

キーブロック解析による
不連続性岩盤の安定性評価に関する研究

西村 毅

目 次

第1章 序 論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 不連続性岩盤のモデル化	4
1.3 等価連続体解析法	5
1.4 不連続体解析法	10
1.5 キーブロック解析に必要なデータ	17
1.6 本論文の構成	19
第2章 不連続面の調査と評価	24
2.1 不連続面の評価項目	24
2.2 不連続面の幾何学性状	26
2.3 不連続面の分布調査とモデル化	38
2.3.1 不連続面の調査法	39
2.3.2 モデル化の例	40
2.4 不連続面の強度	43
2.5 不連続面調査とその定量化	48
2.5.1 調査地点の概要	48
2.5.2 地質調査方法	49
2.5.3 不連続面分布の評価方法	50
2.5.4 不連続面群の定量的評価	58
2.5.5 考察と結果	62
2.6 2章のまとめ	64
第3章 ブロック理論に関する研究	67
3.1 キーブロック理論の基本的仮定と岩盤の崩壊形態	68
3.2 ステレオ投影法	71
3.2.1 ステレオ投影法	71
3.2.2 ブロックのステレオ投影	74
3.3 ブロックの移動可能性	78
3.3.1 ブロックの種類	78
3.3.2 ブロックの移動可能性	79

3.3.3	ステレオ投影法における有限性定理	85
3.4	ブロックの安定解析	87
3.4.1	すべりモード	89
3.4.2	合力の方向が与えられた場合のステレオ投影によるすべりモードの判定	93
3.4.3	J Pが与えられたときのすべりモードの判定	96
3.4.4	キーブロックに対する補強工の設計	101
3.4.5	地下水圧の検討	108
3.5	ステレオ分析法による凹型ブロックの判定法	112
3.5.1	不連続面のステレオ投影	112
3.5.2	ブロックの形状	113
3.5.3	ステレオ分析法	118
3.5.4	ステレオ分析法の検証	122
3.6	回転モードのキーブロック	133
3.6.1	ジョイントピラミッドの回転可能性	136
3.6.2	回転モード解析	139
3.6.3	物体力が作用する場合の回転モードの安定解析	140
3.6.4	一般的な回転モードの安定解析	142
3.7	3章のまとめ	146
第4章	大規模地下空洞施工時におけるキーブロック解析の適用	148
4.1	奥多々良木地下発電所増設工事における適用	148
4.1.1	工事概要	148
4.1.2	地質および岩盤物性	151
4.1.3	支保設計	154
4.1.4	不連続面調査、試験	158
4.1.5	キーブロック解析システム	161
4.1.6	キーブロック解析の実施結果	167
4.2	小丸川地下発電所への適用	181
4.2.1	地下発電所の概要	181
4.2.2	地質	182
4.2.3	支保設計と情報化施工	183
4.2.4	キーブロック解析実施結果	185
4.3	4章のまとめ	187

第5章 キーブロック解析における課題と新しい手法の提案	189
5.1 キーブロック解析における課題	189
5.2 提案する手法の理論	193
5.2.1 確率統計的手法によるキーブロックの予測	193
5.2.2 ブロックの破壊確率	199
5.2.3 不連続面の有限性を考慮したキーブロック解析	206
5.3 提案する手法の適用結果	214
5.3.1 地下空洞における事前予測解析の評価	214
5.3.2 地下空洞における破壊確率評価	222
5.3.3 トンネルにおける有限性の検討結果	226
5.4 5章のまとめ	234
第6章 結 論	236
謝 辞	238
著者論文リスト	239

第1章 序 論

1.1 研究の背景と目的

我が国は、戦後著しい経済繁栄を遂げ、今や世界有数の経済大国となった。その間の発展を支えるために社会資本の整備も進み、道路・鉄道などの交通施設、ダム、発電所およびエネルギー貯蔵施設等が数多く建設された。狭隘で山がちな日本の国土においては、これらの施設の建設においては、大規模な岩盤斜面や地下の掘削を伴うことが多く、岩盤を適切に評価し、安定性を確保することが重要な課題となっている。

岩盤斜面の分野では、平成8年の豊浜トンネルの崩落事故、平成9年の白糸トンネルの崩落事故を契機に、岩盤斜面崩落への関心が高まり、土木学会、地盤工学会においても検討委員会が組織され、岩盤斜面崩落現象に関する調査・計測、崩壊メカニズムに関する検討が実施された^{1),2)}。その結果、崩壊メカニズムに関する研究が遅れていることが指摘されており、岩盤斜面の安定問題に関する研究の重要性は高まってきている。

一方、岩盤地下空洞では、過去数十年間にわたり、地下発電所空洞や石油備蓄空洞などの大規模地下空洞が多数建設されている³⁾。地下発電所は、昭和30年代の高度経済成長による電力需要の増大に応えるべく建設されるとともに大型化も進み、断面積が1,500m²を超える大規模な空洞も建設されている。また、最近ではエネルギー貯蔵の観点から石油備蓄、LPG備蓄のための空洞や、地下調整池、多目的ドームなどさまざまな地下構造物が建設されている。さらに、将来に目を向けると、放射性廃棄物の地下貯蔵や、大都市における大深度地下利用などの構想に向けた研究も実施されている。

大規模地下空洞の建設の歴史の中で、その設計、施工にかかわる技術上の諸問題の多くが克服されてきた⁴⁾。しかしながら建設コストの低減への要請、立地点の地質条件の悪化、環境問題の認識の高まり、あるいは最近の地下空洞の用途の多様化に伴い、さまざまな新たな技術の解決が迫られている。これらの技術的課題のうち、地下空洞の力学的な安定性を適切に判断する技術の向上は、今もって岩盤力学の重要な課題と言わざるを得ないし、事実、今日の多くの研究者の中心的テーマのひとつとなっている。

岩盤を力学的に扱うことの難しさは、岩盤が断層・破碎帯や節理等の多数の不連続面を含む、いわゆる不連続性岩盤としての挙動を示すことによる。不連続性岩盤をどのように力学的にモデル化するかについては、大きく2つの手法に分けることができる。その一つは、長い歴史を持ち、安定した解析手法である連続体力学の中に不連続の考え方を取り入れたものである。クラックテンソル、損傷力学、MBCなどの手法が挙げられる。一方では、不連続体

を個々のブロックとして分割し、ブロック間のすべりや開口など力の釣り合いを解くものである。RBSM、個別要素法、キーブロック解析、不連続変形法（DDA）、マニホールド法などの手法が挙げられる。

本論文では、解析手法としてキーブロック解析を取り上げ、大規模地下空洞の建設工事への適用を試み、空洞の安定性評価に関する研究を実施した。

ブロック理論は、不連続性岩盤の力学的な安定性を論ずる手法として Shi と Goodman⁵⁾により提案されたものである。これは岩盤中に存在する不連続面と掘削面により囲まれ、滑動あるいは崩落する可能性のある岩盤ブロックを見つけ出し、そのブロックの安定性を論じ、必要ならば補強工の設計を行うものである。キーブロック理論が提案されてから、その適用性に関する研究⁶⁾が実施されるようになり、実施工への適用事例も報告されている。しかしながら、地下空洞での実施例は事前調査に基づく予備的な解析^{7),8)}や、補強工の効果を確認する補助的な解析⁹⁾として実施されており、施工中の日常管理として実施された例は少ない。そこで本研究では、確定論的なキーブロック解析の実用化を目的として、施工中の切羽観察結果からキーブロック解析、補強工の設計をリアルタイムで実施するためのシステムを開発し、実際の施工現場において適用を図ることを試みた¹⁰⁾。また、キーブロック解析の結果や計測での空洞の変形挙動を検討し、不連続面に関する試験結果に対する考察を加えた。

さらに、新たなキーブロック解析手法として、確率・統計論的なキーブロックの事前予測、ブロックの破壊確率、不連続面の有限性について提案を行った。これらの手法については、地下空洞やトンネルでの事前の不連続面調査による評価と、施工中のキーブロック発生状況との比較検討を通してその有効性の検証を行った。



写真-1.1 豊浜トンネルの岩盤崩落¹¹⁾

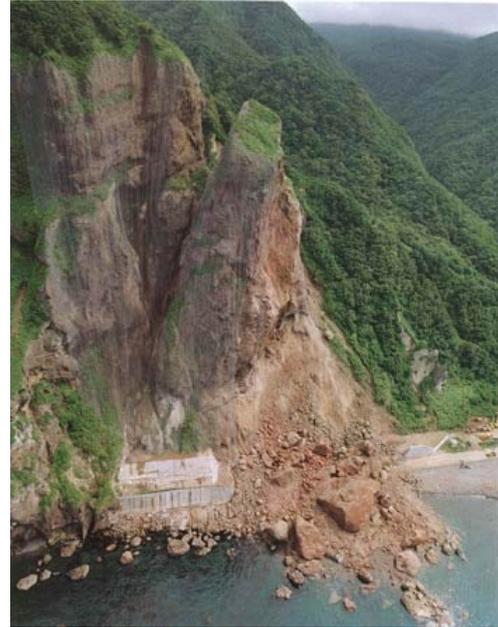


写真-1.2 白糸トンネルの岩盤崩落¹²⁾



写真-1.3 小丸川地下発電所空洞
W=24.0m, H=48.1m, L=188.0m

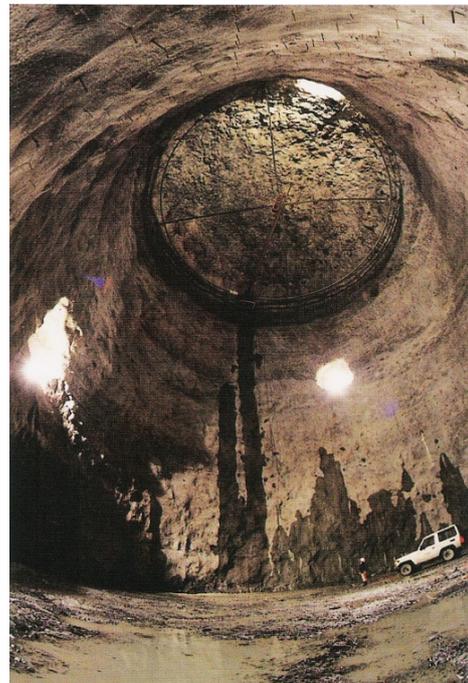


写真-1.4 スーパーカミオカンデ地下空洞
 $\phi=40.0\text{m}$, H=57.6m

1.2 不連続性岩盤のモデル化

岩盤構造物の応力変形解析や安定性評価を行うために数値解析を用いるに当たっては、解析対象となる岩盤を何らかの形でモデル化しなければならない。モデル化する際の困難さは、岩盤が断層・破碎帯や節理等の多数の不連続面を含む、いわゆる不連続性岩盤としての挙動を示すことに起因する。したがって、不連続性の規模、分布性状、力学的性質などをいかに精度良く、合理的に調査・試験するかが岩盤評価の重要な要因となる。さらに、岩盤モデルを構築する場合、同じ岩盤においても、そこに造られる岩盤構造物の大きさや荷重条件によって、モデルを変化させる必要がある。たとえば図-1.1に示すように、同じ強度、分布を持つ節理群に対しても、掘削される空洞や斜面の規模により、岩盤としての力学評価を変えなければならない。これは掘削により考慮すべき岩盤領域での不連続性の影響が異なることを意味している。このような不連続面を含む岩盤を、連続体として近似できる最小の寸法要素を代表要素（REV: Representative Elementary Volume）と呼んでいる。REVは、不連続面の分布が統計的に均質とみなせる大きさであり、等価な連続体に置き換えて扱える大きさである。

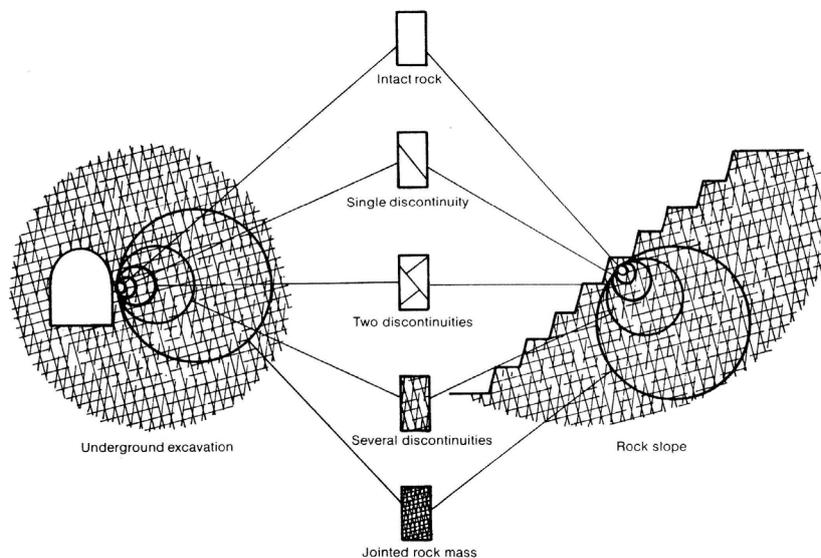


図-1.1 不連続性岩盤における寸法効果¹³⁾

不連続面の大きさ、方向、位置などの幾何学的形状データがある程度得られている場合の岩盤評価には、①岩盤内の不連続面を評価することにより等価連続体として取り扱う方法と、②個々の不連続面を決定論的にモデルに取り込み、不連続体として取り扱う方法がある。前者の場合は、実際の岩盤から得られた不連続面に関する調査データを統計処理し、等価な連続体に置き換えて解析する方法であり、従来からの弾性学・塑性学を主体とした連続体力学

の範疇で発展してきた手法である。古くは、おおまかに等方性体や異方性体へ置き換えての解析、新しくはクラックテンソルや、損傷テンソルなどを基にした連続体に置き換えた形での解析が知られている。後者は、不連続面の存在がすべて既知として解析を行おうとするものであるが、現実には不可能であり、不足分を何らかの統計処理をして補完した後に、理想化したモデル化が行われている。代表的な手法には有限要素法、RBSM（剛体バネモデル）、DEM（個別要素法）などがある。有限要素法とRBSMは不連続面をジョイント要素で表現し、連続体解析的な考えで解かれている。DEMは、岩盤を構成する岩盤ブロックの個々の動きを、大変位・大変形になるまで追跡できる手法であり、空洞壁面や岩盤斜面の崩壊ならびに、崩壊後の挙動と形状を知ることが出来る。また、不連続面ならびに連続体の動的、準静的問題を解くために開発された新しい手法に不連続変形法（DDA）、さらにはマニフォールド法が登場している。これらは大まかには有限要素法と個別要素法の間隔的な手法であるが、解の安定性の良い変位法を用い、要素間の分離を簡単に扱うことが出来る。

1.3 等価連続体解析法

等価連続体モデルによる解析は、FEM解析が基本となっており、従来は岩盤を等方性あるいは直交異方性材料としてモデル化されてきたのに対し、構成則の中に不連続性を表現できるモデルを組み込んだものである。表-1.1に等価連続体解析法の代表的な手法と特徴を示す。

これらの内、最も基本的な手法はHill¹⁴⁾が提案した複合材料の等価弾性係数を求める理論に基づき、Singh¹⁵⁾により提案された等価弾性コンプライアンス法である。岩盤のひずみは、図-1.2に示すように、母岩のひずみと節理群のひずみの和として表わされ、節理群の形状は平板であり、周期的、規則的に存在していると仮定している。これは、不連続面がある程度規則性を持って層状に分布している場合などに適した手法である。

小田、山辺ら^{16),17)}によって提案されたクラックテンソル法では、岩盤中の不連続面の幾何学特性をその方向性、寸法、開口幅に関する確率密度関数を用いて一般性の高い2階および4階の無次元テンソルで記述している。さらに、岩盤の等価コンプライアンスは、母岩と不連続面に生じるひずみの和から定式化され、クラックテンソルに加えて図-1.3に示すような不連続面のせん断剛性 k_n と垂直剛性 k_s および母岩の剛性により表現されている。定式化の際には、クラックの形状を円盤状（Penny shape）と仮定し、クラックによる応力集中係数を円盤の理論解から与えている。クラックテンソル法は、不連続面の卓越方向や確率密度関数などの幾何学的分布性状が与えられている場合には有効な手法である。なお、この手法は浸透流解析にも適用されており、透水性テンソルとして用いられる。

また、京谷ら¹⁸⁾によって開発された損傷テンソル法では、岩盤中に分布する不連続面の損

傷効果は、岩盤内の有効断面積を減少させることであると定義している (図-1.4)。その損傷効果は、不連続面の面積密度と不連続面の単位法線ベクトルを用いた 2 階の損傷テンソルによって定量的に表現される。この損傷テンソルは原位置岩盤の露頭や試掘坑において不連続面の数、方向、大きさを調べることによって決定される。有効面積が減少した結果、母岩に発生する実質応力は、見かけ応力 (コーシー応力) と損傷テンソルによって表現され、この実質応力が有効断面に働いて岩盤の変形・破壊挙動を支配する。

ここまでの 3 つの手法が、不連続面の分布性状・力学性状を何らかの形で仮定した上で定式化を行い、順解析的に問題を解くものに対して、桜井¹⁹⁾によって提案された異方性マトリックス法は、逆解析的なアプローチで直交異方性材料としての定式化を試みたものである。不連続面に沿ったすべりおよび剥離を異方性パラメータ m, n により表現しており、これらの値は、計測値から逆解析により求めることができる。トンネル、岩盤地下空洞、斜面などの問題に適用が試みられ、掘削時に発生する地山の変位計測結果から異方性パラメータが求められ、岩盤中の最大せん断ひずみの分布から構造物の力学的な安定性の評価が実施されている。

また、岩盤斜面の安定性を評価するために佐々木ら²⁰⁾は、等価弾性コンプライアンス法を拡張した複合降伏モデルを提案している。これは、図-1.5に示すように、岩盤の構成を健全岩部 (Intact rock)、無指向性の微小クラック、指向性の節理群 (Joint set) であるとし、岩盤のひずみをこれらの線形総和として表した。これらの要素のそれぞれ降伏条件を与え、応力状態がこれらの要素の中で最も早くその条件に達したものを岩盤の降伏モードとして採用したものである。

最近では吉田・堀井²¹⁾により開発されたマイクロメカニズムに基づく連続体解析 (MBC 解析) が提案され、大規模地下空洞の掘削問題に適用されている。MBC 解析では岩盤内の個々のジョイントの微視的な構造要素に着目して、不連続面のすべりに伴うせん断変位、開口変位挙動を巨視的な構成式として求めて連続体として解析するものである。不連続面が開口変位するメカニズムとして図-1.6に示すような、起伏を有する不連続面を考え、起伏面でクーロンの摩擦条件が満足した場合に、その面でせん断すべりが生じ、別の面では開口する。この解析手法の特徴として、不連続面の方向や間隔が直接解析の入力データとできること、不連続面のせん断変位、開口量の空間分布が解析結果として得られることが挙げられる。

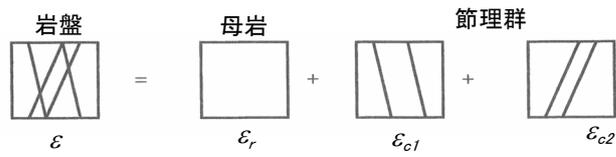


図-1.2 等価弾性コンプライアンス法

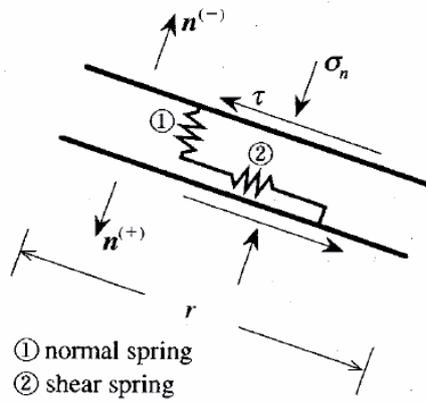


図-1.3 クラックテンソルにおけるモデル化¹⁷⁾

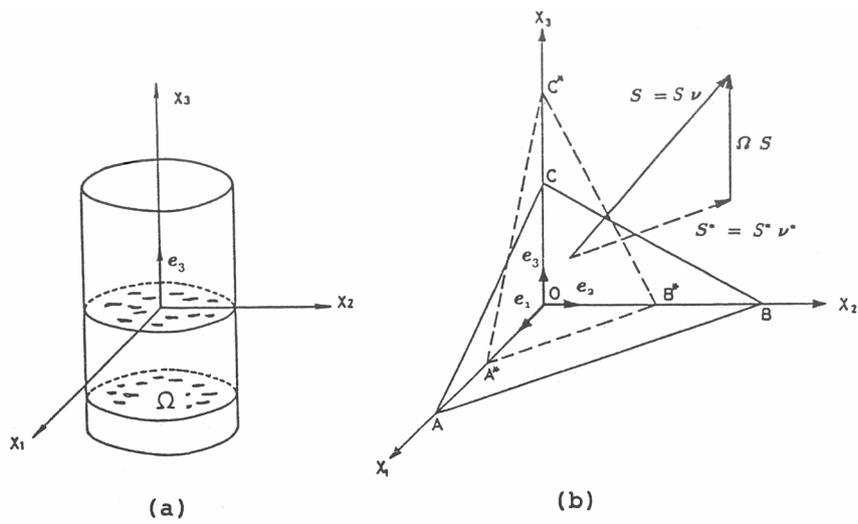


図-1.4 損傷テンソルの定義¹⁸⁾

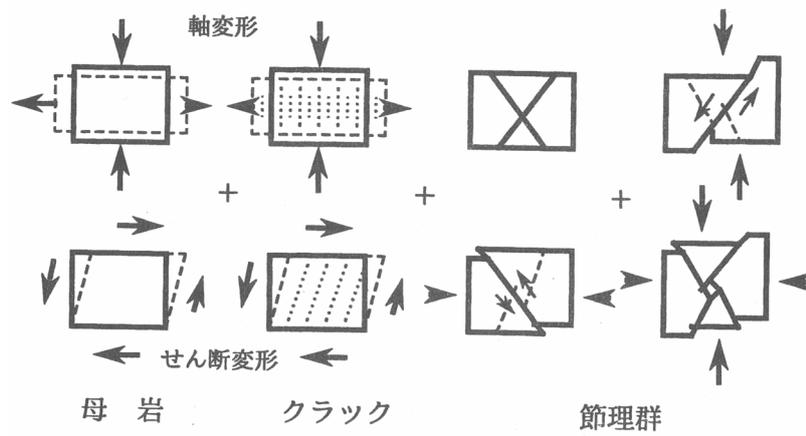


図-1.5 複合降伏モデル²⁰⁾

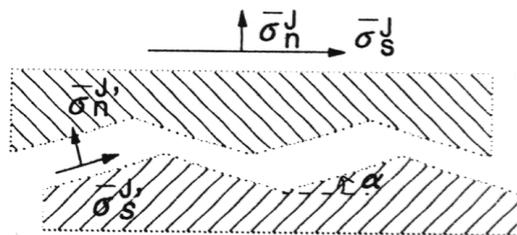


図-1.6 MBCにおける起伏を有するジョイント²¹⁾

表-1.1 等価連続体モデルにおける代表的な手法の比較と現状

	等価弾性コンプライアンス法 Equivalent Elastic Compliance Method	クラックテンソル法 Crack Tensor Method	損傷テンソル法 Damage Tensor Method	異方性マトリックス Anisotropic Matrix Method	複合降伏モデル Multiple Yield Model	MBC モデル Micromechanics Based Continuum Model
提案者	Hill(1963) Singh(1973)	Oda(1982) 山辺(1987)	京谷(1985)	桜井(1986)	佐々木(1994)	吉田&堀井(1996)
理論仮定	等価応力仮定	等価応力仮定	等価ひずみ仮定	等価応力、ひずみ	等価応力仮定	等価応力仮定
クラックの形状	平板	円盤(penny shape)	平均面積	平均化した変形特性	平板	起伏を有する節理
不連続面の剛性	鉛直剛性、せん断剛性	鉛直剛性 せん断剛性	係数 k	等価なせん断弾性係数を評価 (計測値)	鉛直剛性 せん断剛性 降伏条件	摩擦角、起伏角
不連続面の応力分担	応力集中係数	理論解(penny shape)	有効部分で平均化	逆解析により異方性係数を評価	応力集中係数	系の剛性、FEM 解
特徴	規則的に分布する不連続面群を評価	任意のクラックを幾何学的、統計的に評価	クラック開口の影響を等価外力で評価	逆解析により異方性係数を評価	弾性コンプライアンス法を弾塑性モデルに拡張	節理面のすべりに伴う開口変位を表現できる
適用例	基礎岩盤の変形 岩盤斜面の安定	トンネルの 3 次元解析、浸透流解析	地下空洞の解析	斜面の逆解析 トンネルの逆解析	斜面の解析	地下空洞の解析 水圧破砕

1.4 不連続体解析法

不連続体解析法は、不連続面の幾何学形状を直接解析モデルに取り込んで、岩盤の力学挙動を解析しようとするものである。表-1.2に不連続体解析法の代表的な手法と特徴を示す。

有限要素法は地盤や構造物内部の応力・変形の状態や部分的な局所破壊の発生を調べるのに有用であることは明らかであり多くの適用例が知られている。しかし、斜面安定や支持力などのような全体破壊を対象とする解析はあまり得意ではない。こうした分離や不連続面の挙動に対処するために開発されたのが、Goodman のジョイント要素である²²⁾。ジョイント要素は、図-1.7に示すように基本的にはバネモデルであり、軸およびせん断バネの工学的な値を決定する必要がある。ジョイント要素は岩盤のみならず地盤や各種構造物のすべりや分離を表現するのに用いられてきたが、微小変形に基づく解析であるという制約から大きな変位が伴う問題には適用できない。

そこで、大変形を伴う接触問題を解析する方法として離散有限要素法(Discrete Finite Element Method)が登場し、Hallquist ら²³⁾が汎用コード DYNA-3D を発表し、種々のモデルを検討している。接触の取り扱いにはやや複雑さが残る点拘束法と呼ばれる Master-Slave 法を用いている(図-1.8)。これをさらに進めて、Hilbert ら²⁴⁾は Lagrange の乗数法と penalty 法を組み合わせた手法を発表しており、トンネルの崩落や断層の進展などの解析を行っている。彼は連立方程式の解法には、領域分割法(DDM)を用い、未知数は FEM 要素の節点で定義されている。この方法は理論的には、後に述べるマニフォールド法のブロック内のメッシュに FEM を用いたものと同様である。これは、基本的に FEM の接触を考慮した動的大変形解析と分類できる。

Cundall²⁵⁾によって開発された個別要素法(DEM: Distinct Element Method)は、不連続な岩石ブロックの組み合わせからなる岩盤を個々のブロックの運動から差分的に解く極めてユニークな方法で、岩盤を不連続体として解いた初めてのものである。節理の発達したかぶりの浅い岩盤の斜面などでは、岩塊がブロック状であり、その応力場も小さい。このような状態では、岩塊ブロック自体の弾性変形よりも、ブロック全体の運動による変形の方が大きい。そこで、ブロックを剛体と仮定し、斜面の崩壊・逐次破壊などの過程を、ブロック同士の接触を考慮した大変形の運動として解析している。個別要素法は図-1.9に示すように、法線方向と接線方向のジョイントの性質を用い、ブロックの回転を考慮する。未知数は、ブロックの重心の速度で定義されている。しかし、いずれも接触時の貫入は取り扱っていない。これは基本的に、簡便的なブロックの運動に関する動的大変形解析であると分類される。

DEM の主要な仮定は、変形が岩塊(ブロック)の表面のみで生じる、すなわちブロックの表面に薄い仮想の弾性膜がある点である。したがって、このような仮定が工学的に成り立つ

のは、変形がブロック表面に沿うことと、比較的地圧が低く、しかも、岩塊に作用する荷重が小さく、ブロック自体の剛性が大きい場合である。DEMの特徴は、前述のように、任意形状のブロックのモデル化が可能であること、また、運動方程式は全て力の釣り合いで求め、差分法で解くため、定式化が他の手法に比較して簡単になることである。そのため、この手法は、その後種々の問題に広く応用されている。当初、比較的被りが浅く、地圧の小さい斜面などがその解析対象であったが、ブロックの弾性変形が考慮出来るように改良されて地圧の大きな、被りの深い岩盤空洞のモデルに対しても適用され始めているが、FEMとの境界がだんだん無くなって来ている。個別要素法が注目を浴びだしたのは、Bartonら²⁶⁾のリレハンメルオリンピックのアイスアリーナの解析への適用からである(図-1.12)。現在では、汎用プログラムとして、「UDEC」が商用ソフトウェアの地位を確固たるものとしている。また、三次元解析の「3DEC」も開発されている。

川井^{27),28)}の開発した剛体バネモデル(RBSM: Rigid Body Spring Model)を用いる手法は、Cundallモデルに対するものと同様の手法と考えられるが、基本式の解き方は差分法ではなく有限要素法に準拠している。このモデルでは図-1.10に示すように岩盤は剛体ブロックからなり、それらは接線方向と垂直方向のブロック面の挙動を表現する2つのスプリングによってお互いにつながれている。未知数はブロックの重心で定義されている。この手法は、基本的に剛体を仮定した簡便的な不連続面の進展に関する静的微小変形解析であるといえる。川井のRBSM理論を基礎とする研究は、その後、竹内²⁹⁾により岩盤の解析目的で、種々の機能を付加した解析方法が開発されている。最近では、ボロノイ分割を利用したクラックの進展解析に適用されている。

Shi³⁰⁾によって開発された不連続変形法(DDA: Discontinuous Deformation Analysis)は差分的な手法で解く個別要素法の接触点での不明瞭な定義を克服して、有限要素法と同じようにポテンシャルの最小化原理を利用して剛性マトリックスを作成し、解析する方法であり、解の唯一性が保証されている。不連続変形法は、図-1.11に示すように、任意形状の個々の岩石(要素)ブロックの重心点で定義するひずみ、剛体変位、剛体回転を未知数として用いており、これらの未知数は要素内では一定としている。この手法では、1ブロックが1要素としているので、要素内で応力分布を検討するには不便である。DDAの接触の貫入判定にはPenalty法を用いている。これは解析の分類としては、基本的にブロックの運動に関する簡便的な弾性体の動的大変形解析である。定式化は有限要素法(FEM)と同様の手順を踏むものである。本手法では、ブロック間にバネが組み込まれ、また不連続面の強度特性としてモール・クーロン則などを接触条件として設定できる。DDAは、有限要素法との類似、解の安定性、材料定数の決定が比較的容易であることから落石や岩盤崩落の解析に用いられてきた。また、円

形要素の採用、動的問題への適用など幅広い応用が考えられており、今後の実用問題への適用の広がりが期待されている。

先に述べた DDA の欠点である、要素内で一つの応力しか求まらない点を克服するために、また有限要素法の一般化を目指して開発されたのが、マニフォールド法 (Manifold Method)^{31),32)}である。この手法では、解析対象は物理メッシュと数学メッシュに分離され、データの作成は、物理メッシュである現実の解析対象の物理境界が定義され、その上に規則正しい形状の数学メッシュをかぶせることで自動的に行われる。したがって、一つの岩石ブロック (要素) の中に多くの数学メッシュの区分が入ることになるので、ブロック内のひずみや応力分布を詳しく求めることができる。未知数は数学メッシュの節点で定義されている。マニフォールド法の接触の貫入は DDA と同様にペナルティ法を用いており、これらは、数学メッシュ上の節点の座標の関数となっている。これは、基本的に接触を考慮した弾性体の動的大変形解析である。また、前述の離散 FEM と異なる点は、数学メッシュが自動的に設定されていることである。FEM の欠点として、メッシュ分割のデータが非常に多く、このことが解析作業のネックになっている。特に、岩盤の問題は基本的に 3 次元であり、現在 3 次元メッシュを能率良く作成することは極めて困難である。これらを解決する手段の一つとしてもマニフォールド法は有力な手法と思われる。このように、マニフォールド法は新しい考え方に基づいて構築されており、大きな可能性を秘めているがその適用性はまだ十分検討されていない研究段階である。図-1.14は上が岩盤ブロックの斜面安定問題を DDA で解析、下がマニフォールド法で解析した例である。マニフォールド法では要素 (ブロック) が多くの数学メッシュに分割され、それぞれの中で応力が計算されるのがわかる。

以上述べた不連続体解析法は、数値解析によるものであり、不連続面を含む全体系に対して構造物の変形予測や安定性の評価を行うものである。これに対し、不連続面で囲まれた個別の岩盤ブロックに対して安定性を評価することが実用的に用いられている。例えば、卓越した不連続面を有する岩盤に掘削された斜面や地下空洞壁面の安定性を解析する場合、掘削面上に現れたくさび状の岩塊が安定かどうかを図解法により調べる方法が知られており、Hoek と Bray³³⁾はこうした例を多く示した。さらに発展した Goodman と Shi³⁴⁾により体系づけられたブロック理論は、得られる不連続面群の方向と掘削面の方向の組み合わせから岩盤中に形成されるすべてのブロック形状パターンを、ステレオ投影法という図解法により分類し、移動 (崩壊) 可能な形状のブロックを 3 次元図形として見つけ出す方法である。そして、移動可能ブロックに対して、作用している重力などの合力とすべり面の摩擦力から極限平衡解析を行い、滑動の危険性のあるブロック (キーブロック) を決定し、その安定性を保つために必要な支保力を求める。四面体までのブロックの極限平衡解析は Wittke³⁵⁾, Londe³⁶⁾,

John³⁷⁾, Goodman³⁸⁾などによって提案されているが、キーブロック理論では一般化した n 面体ブロックについて議論している。キーブロックが滑動すれば、逐次的にその周辺の岩盤は崩壊することが多く、キーブロックを効果的に安定化させることにより、施工・管理をより経済的に行うことが可能になると考えられる。特に、規則的に節理が分布している硬質岩盤では、その傾向が顕著である。キーブロック理論が適用できる岩盤は、数群のジョイント群に明確に分けられる不連続面を示す岩盤で、ブロックの形状から移動（崩壊）性について分類することができる。しかし、不規則に発達する不連続面を有する岩盤については、各不連続面の位置、方向性の計測を行い、個々の岩石ブロックの立体形状を明確にする必要がある。最近計測方法が進歩し、不連続面データが比較的容易に得られるようになり、ブロック理論の適用が実用化されてきた。

ここで、キーブロック解析の特徴を列挙すると以下のようになる。

- ①不連続体解析法の一手法。
- ②不連続面の位置と方向のみで危険なブロックを検出できる。
- ③ブロックは剛体と仮定している。
- ④数値解析のような複雑なモデル化を必要としない。
- ⑤すべりの判定は、極限平衡解析による。
- ⑥入力する不連続面情報の正確性が重要である。
- ⑦実際の施工現場での適用事例が少ない。

本論文では、不連続性岩盤の解析手法として、上述の不連続体解析法の一つであるキーブロック解析を取り上げ、大規模地下空洞の建設工事への適用を試み、不連続性岩盤の安定性評価に関する研究を実施した。

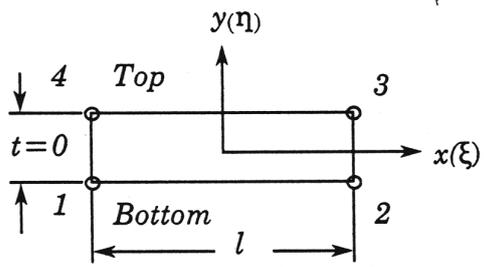


図-1.7 Goodman のジョイント要素²²⁾

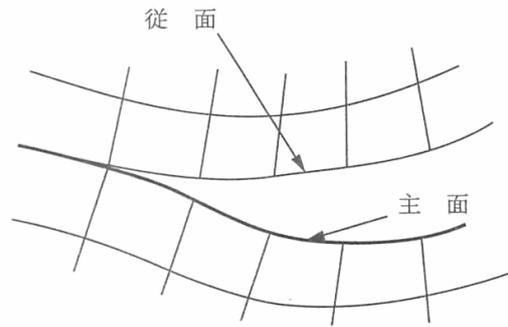


図-1.8 節点拘束法²³⁾

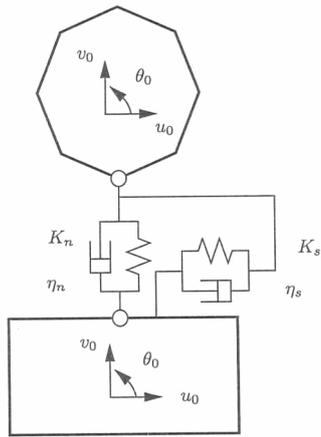


図-1.9 個別要素法 (DEM)²⁵⁾

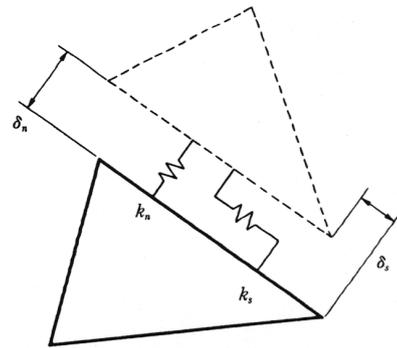


図-1.10 剛体バネモデル (RBSM)²⁸⁾

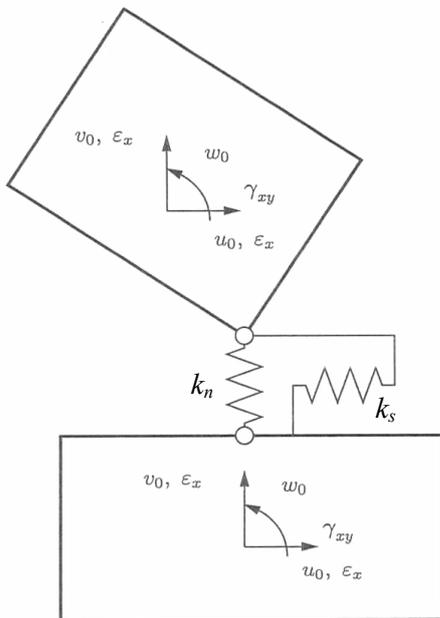


図-1.11 不連続変形法 (DDA)³⁰⁾

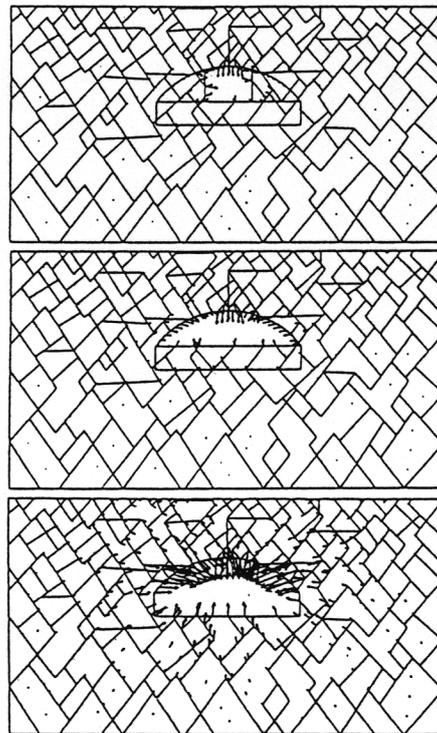


図-1.12 DEMによる掘削解析²⁶⁾

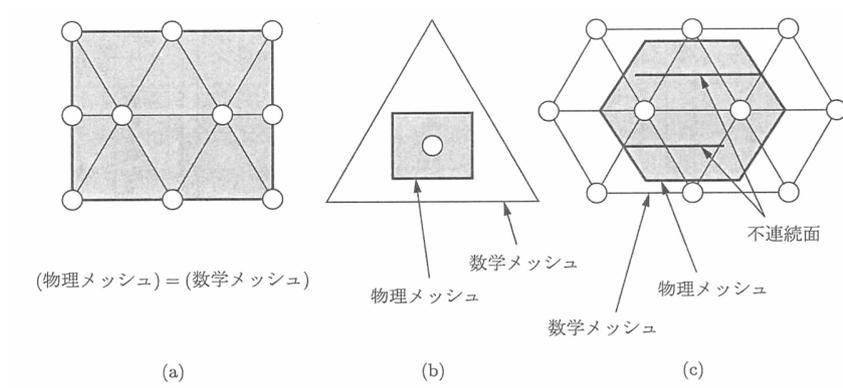


図-1.13 FEM(a), DDA(b), マニフォールド法(c)の関係

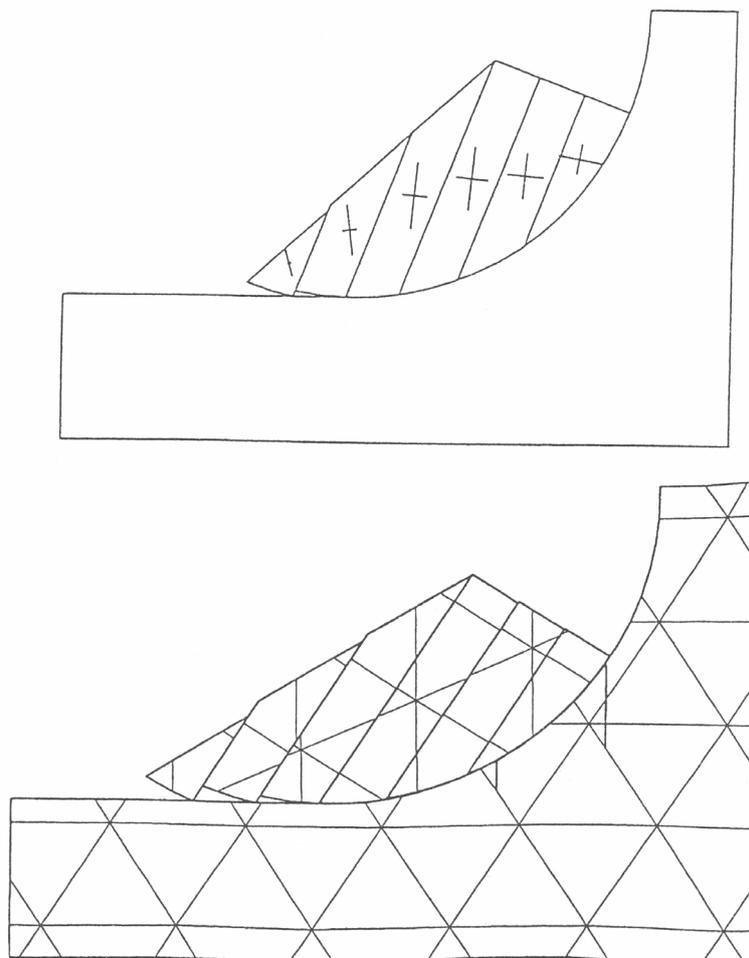


図-1.14 DDA (上) とマニフォールド法 (下) による斜面すべりの解析

表-1.2 不連続体モデルにおける代表的な手法の比較と現状

	ジョイント要素 Joint Element	離散 FEM (DFEM) Discrete Finite Element Method	個別剛体要素法 (DEM) Distinct Element Method	剛体バネモデル (RBSM) Rigid Body Spring Model	不連続変形法 (DDA) Discontinuous Deformation Analysis	マニフォールド法 Manifold Method	キーブロック解析 Key Block Analysis
提案者	Goodman(1976)	Hallquist et. Al(1985)	Cundall(1971)	Kawai(1976)	Shi(1984)	Shi(1991)	Goodman & Shi(1985)
変形	微小変形	大変形	大変形	大変形	大変形	大変形	考慮しない
ブロック の剛性	弾性、弾塑性(FEM)	弾性、弾塑性(FEM)	剛体	剛体	弾性体	弾性体	剛体
不連続面 の剛性と 決定法	バネ	Master-Slave 法 (節点拘束法)	バネ,ダッシュポット 不連続面付近の実質 部の擬似剛性	バネ (弾性) バネ周辺の実質部の 剛性 (実験)	Penalty 法 (貫入が 0 になるように解く)	Penalty 法 (貫入が 0 になるように解く)	変形を考慮しないの で不要。すべり面の せん断抵抗力を考慮
運動 方程式	静的 (仮想仕事の原理) $ku = F$	動的 (Hamilton の原理) $M\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F$	動的 (Newton の運動 の第 2 法則) $M\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F$	静的 (仮想仕事の原理) $ku = F$	動的 (Hamilton の原理) $M\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F$	動的 (Hamilton の原理) $M\ddot{u} + c\dot{u} + ku = F$	静的 極限平衡解析
特徴	FEM に容易に適用で きる。	3次元 FEM の衝突 解析 爆破など多くの機能	任意形状 剛性の設定に経験が 必要、粒状体の解析 などの研究例がある	任意形状 差分法と FEM の中 間的理論 極限解析 (滑り)	任意形状、FEM の一 種、ブロックのひず み応力が求まる。任 意の構成則が可能。	FEM+DDA 物理メッシュと数学 メッシュ (三角形) を利用	個々のブロックの移 動可能性と安定性を 評価する
未知数	節点変位	節点変位	ブロック重心の速度	ブロック重心の変位	ブロック重心のひず み	節点変位	必要導入力
適用例	断層、トンネル、ダ ム、地下構造物など 多数	衝突、爆破解析 トンネル崩壊 断層の解析	斜面の崩壊 トンネルの崩壊 空洞の安定解析	クラックの進展 破壊パターン解析 断層の解析	斜面、空洞、岩盤基 礎の安定解析 落石解析、動的問題	斜面、空洞解析 熱応力解析 クラックの進展	斜面、地下空洞、ト ンネル

1.5 キーブロック解析に必要なデータ

キーブロック解析の実施方法は、大別して決定論的な方法と確率・統計的な方法に分けられる。表-1.3には、これらの方法において解析に必要なデータを示してある。

決定論的な手法は、施工中の掘削面や露頭において、崩落する可能性のあるブロックを特定するために実施されるものであり、観察した不連続面情報がそのまま入力データとなる。この場合、いかに正確に不連続面データを収集できるかが、解析の結果を左右することになる。入力データとしては、不連続面の幾何学性状として位置、方向、長さが必要となる。不連続面は完全な平面と仮定しているため、実際は曲がっている場合は、不連続面上のいくつかの点の計測値の平均的な位置、方向を入力値とする。曲がり大きい場合は、複数の不連続面として扱う場合もある。長さは、観察面での両端の点を与えるが、観察領域外まで延びている不連続面については、注意が必要である。無限長を仮定すれば安全側の結果を与えるが、実際には発生する可能性の小さいブロックまで抽出する可能性がある。水戸ら³⁹⁾は、既掘削面を確定論で扱い、未掘削面を確率論で表す複合的な手法を提案しており、ベンチ掘削のように段階的に観察面が広がっていく場合では有効な手法といえる。

移動可能なブロックを検出する段階では、以上の不連続面の分布性状のみが入力データとなるが、安定解析を行う段階では、不連続面の強度と岩盤密度が必要である。不連続強度は、不連続面を含むサンプルでのせん断試験等により直接強度を算定する方法と不連続面の粗さや壁面強度から推定する方法^{40), 41)}がある。岩盤に関する力学情報は、キーブロック解析では岩盤を剛体と仮定しているため、密度のみが必要なデータであり、変形特性や強度特性は不要である。考慮する外力については、支保部材の導入外力として、ロックボルトやアンカーの許容耐力や吹付けコンクリートのせん断耐力、地下水圧等がある。

確率・統計的な手法では、不連続面の幾何学性状は、調査結果を統計処理した上で分布関数を与えることになる。不連続面の分布はいくつかの方向の不連続面群（ジョイントセット）に分かれるのが一般的な分布であるから、ジョイントセットごとの平均方向、平均長さ、平均密度が基本的な項目である。これらは、スキャンライン調査・グリッド調査などの不連続面調査データをステレオネット、クラスター分析などの統計手法により分析して求める。ばらつきを考慮する場合は、分散係数なども入力データとなる。

幾何学性状以外の、不連続面強度、岩盤密度、外力については決定論的手法と同様である。

第2章では、キーブロック解析に必要なこれら不連続面の調査と評価手法について述べる。

表-1.3 キーブロック解析に必要なデータ

分類	項目	決定論的手法	確率・統計的手法
不連続面の幾何学性状	位置	掘削面で観察された不連続面上の点の座標を与える。	対象領域にランダムに発生させる。追加して、大規模不連続面を決定論的に与える場合もある。
	方向	観察された不連続面の方向を与える。曲がった面では、平均方向あるいは複数面に分ける。	不連続面調査から卓越方向を求める。ステレオネット、クラスター分析等を用い、卓越方向と分布関数を仮定する。
	長さ	写真撮影、スケッチ等で両端の点を与える。 領域外まで延びている不連続面の取り扱いに注意する必要がある。	不連続面調査により、平均長さを求め、長さの分布関数を仮定する。 領域外まで延びている不連続面の取り扱いに注意する必要がある。
	密度 (間隔)	不要	スキャンライン法、グリッド調査法等により平均密度を求める。
力学性状 の不連続面の	強度	不連続面のせん断抵抗（粘着力と摩擦角） せん断試験等により直接強度を算定する方法と不連続面の粗さや壁面強度から推定する方法がある。	
岩盤	密度	剛体を仮定しているため変形、強度に関する情報は不要。	
外力	—	目的により考慮する内容が異なる。 ロックボルト、アンカーの導入力、吹付けせん断強度、地下水圧等	

1.6 本論文の構成

本論文は、筆者が施工技術者として携わってきた大規模地下空洞の設計・情報化施工において、不連続面等の地質情報と周辺岩盤挙動計測結果から岩盤の力学的挙動の評価および空洞の安定性評価を実施する際に、不連続体解析技術の適用を試みようとするものである。適用した不連続体解析技術は、キーブロック理論であり、大規模地下空洞掘削時における不連続面の地質情報の調査、解析、補強工の設計、施工までの一連のシステムの確立を目指したものである。また、キーブロック理論の発展的な研究として、統計論を用いた予測解析、ブロックの破壊確率による危険キーブロックの研究等を実施した。

以下に、各章ごとの概要を述べる。

第1章は、序論であり本論文の研究の背景と目的について述べたものである。ここではまず、不連続性岩盤の解析手法の変遷と概要についてまとめた。断層から節理に至るまで様々な規模と頻度を持つ不連続面を含む岩盤をそのまま正確に表現して解析することは不可能であり、何らかのモデル化が行われる。その手法は大きく2つに分類され、不連続面を多数含む岩盤を等価な連続体に置き換えて解析する等価連続体解析法と、不連続面を直接モデルに取り込む不連続体解析法である。ここでは、現在提案されている主な手法の概要および特徴を述べた。その上で、従来の連続体解析手法を中心とした不連続性岩盤の解析技術の課題点を解決するために、新しい解析技術としてキーブロック解析に取り組むことを述べた。すなわち、断層や割れ目などの不連続面が卓越している不連続性岩盤では、取り扱いの複雑さから有限要素法などの連続体解析手法が主体となってきたが、不連続面を解析に直接取り込む新しい数値解析法が提案され、不連続性岩盤解析が実用に供されるようになってきており、その手法の一つがキーブロック解析である。

第2章は、不連続性岩盤のモデル化および解析を行う上での重要となる不連続面の調査・評価方法について述べた。不連続面の方向性、長さ、密度などの分布は、特に確率統計的なキーブロック解析を行う場合は、現地調査などの限られた調査情報から分布特性を評価しなければならない。ここでは、不連続面の評価項目、幾何学性状について述べた後に、これらの不連続面情報を得るための調査手法と評価方法について述べた。さらに、評価した結果にもとづいたモデル化の方法と事例を示した。また、キーブロックの安定解析を行ううえで重要となる不連続面強度の推定方法についても述べる。最後に、不連続面調査の定量化の試みとしてステレオロジーの理論にもとづく調査事例を示した。

第3章は、キーブロック理論の概要とその拡張理論について述べたものである。キーブロック理論の基本的な仮定および、不連続面および掘削面の位置と方向性の幾何学的情報から、崩落の可能性を判定し安定解析を実施するための理論となる有限性定理と移動可能性定理に

ついて述べた。次に、検出されたキーブロックに対して補強工の設計を行う手順を示す。さらに、凸型ブロックから凹型ブロックへの拡張されたブロック理論について述べ、例題によりその適用性を確認した。また、すべりモードのみならず、回転モードの判定方法についても述べた。

第4章は、キーブロック理論の大規模地下空洞掘削工事における適用例を述べたものである。ここでは、情報化施工における日常管理の中にキーブロック解析を取り込み、安全かつ合理的な施工の実現を目標においた。地下発電所掘削工事における事前の地質調査・試験、施工中の切羽観察、キーブロック解析、追加補強の設計、施工へのフィードバックに至る一連のシステムを提案し、運用した実績について述べ、キーブロック解析により効果的な支保設計と追加補強が実施できることを示した。さらに、計測された岩盤挙動を検討することにより、不連続面に対する試験結果について考察を加えた。

第5章は、キーブロック理論の課題と新しい手法の提案に関する記述である。提案する手法としては、①確率・統計的手法による事前予測、②ブロックの破壊確率、③不連続面の有限性を考慮した手法である。これらの理論について述べたのちに、実際にキーブロックを検出し安定評価を実施した地点のデータを用い、それぞれの手法を適用した結果について考察を行い、提案する手法の有効性を示した。

第6章は、第2章～第5章で述べた不連続性岩盤を対象とした調査・評価手法、キーブロック解析に関する拡張理論、現場適用事例、新しい手法としての確率統計論的な予測解析、破壊確率についての結論をまとめたものである。

参考文献

- 1) 土木学会：大規模岩盤崩落に関する技術検討委員会報告書，1997
- 2) 地盤工学会北海道支部：岩盤崩壊の発生機構と計測技術，2000
- 3) 土木学会岩盤力学委員会：大規模地下空洞の情報化施工，土木学会，1996
- 4) 野崎隆司，伊藤洋，日比野敏：大規模地下空洞における各種安定化対策とその考察，電力土木，No.209，pp.40-48，1987
- 5) Goodman, R.E. and Shi, Gen-hua : *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*, Prentice-Hall, 1985
- 6) 大西有三，長野恵一，藤川富夫：ブロック理論による不連続性岩盤掘削時の安定性評価について，土木学会論文集，第364号／Ⅲ-4，pp.209-218，1985
- 7) Yow Jr. J. L. and Goodman, R. E. : A Ground Reaction Curve Based Upon Block Theory, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20, 167-190, 1987
- 8) Chan, R. and Goodman, R. E. : Predicting the Number of dimensions of Key Blocks of an Excavation Using Block Theory and Joint Statistics, *28th US Symposium on Rock Mechanics*, 81-87, 1987
- 9) 大橋敏行，西村毅，草深守人：節理性岩盤の調査・解析システムを用いたキーブロック解析，第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.189-193，1987
- 10) 手塚昌信，大西有三，田中誠，西村毅：大規模地下空洞掘削時におけるキーブロック解析，土木学会論文集 VI 巻，609, VI-41, pp.73-85, 1998
- 11) 三田地利之：豊浜トンネル岩盤崩壊に学ぶ，土と基礎，Vol.44, No.5, pp.47-48, 1996
- 12) 大西有三：CD 版岩盤崩壊の考え方，土木学会，2003
- 13) Hoek, E. : *Strength of jointed rock mass*, geotechnique, 1983
- 14) Hill R. : Elastic properties of reinforced solids, Some theoretical Principles, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol.11, pp.357-372, 1963
- 15) Singh B. : Continuum characterization of jointed rock mass, part I - The constitutive equations, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abst.*, Vol.10, pp.311-335, 1973
- 16) Oda M. : Fabric tensor for discontinuous geological materials, *Soil & Found.*, Vol.22, No.4, pp.96-108, 1982
- 17) 山辺正，原夏生，小田国寛：クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性解析と入力パラメータの決定に関する研究，土木学会論文集，No.382/Ⅲ-7，pp.121-130，1987
- 18) 京谷孝史，市川康明，川本朧万：岩盤の力学特性評価における損傷力学的アプローチ，土質工学会，土と基礎，Vol.35-3, pp.23-28, 1987

- 19) 桜井春輔, 谷川正也 : 岩盤の不連続面を考慮した大規模地下空洞の変位計測結果の逆解析, 土木学会論文集, No.403/VI-10, pp.75-84, 1989
- 20) 佐々木猛, 吉中龍之進, 永井文夫 : 有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.59-68, 1994
- 21) 吉田秀典, 堀井秀之 : マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模地下空洞掘削の解析, 土木学会論文集, No.535/III-34, pp.23-41, 1996
- 22) Goodman R. E., Tylor R. and Brekke T. L. : A model for the mechanics of jointed rock, J. Soil Mech. and Found. Eng. Div., ASCE, SM3,94, pp.637-659, 1968
- 23) Halliquist, J. O., "A procedure for the Movements in solution of finite deformation contact-impact problem by the finite element method", UCRL-52066, Lawrence Livermore Lab, California, April, 1976
- 24) Hilbert, L. B., Yi, W., N. G. W. Cook, Cai, Y. and Liang, G-P, "A new discontinuous finite element method for interaction of many deformable bodies in geomechanics", 1993.
- 25) Cundall, P. A., "A computer Model for Simulating Progressive, Large Scale Blocky Rock System, ISRM symposium, Nancy, France, pp.11-18, 1971
- 26) Barton, Tunbridge, et. al "Norwegian Olympic Hockey Cavern of 60m Span", 7th Congress of ISRM, Aachen, Vol2, 1991
- 27) 川井忠彦 : 離散化極限解析法に関する最近の話題, 生研セミナーテキスト, 1986.
- 28) 川井忠彦 : 離散化極限解析法概論, 培風館, 1991
- 29) 竹内則夫 : 地盤力学における離散化極限解析, 培風館, 1991
- 30) Shi, G. H., "Block system modeling by Discontinuous Deformation Analysis", Univ. of California, Berkeley. Dept. of Civil Eng, 1989
- 31) Shi, G.H., "Modeling rock joint and blocks by Manifold method", Proc. 33rd US Sympto. Rock Mech., Balkema, pp.639-648, 1992
- 32) Shi, G.H., "Manifold method of material analysis", Trans. 9th Army Conf. on Appl. Math. and Comp., Rep. No.92-1. U.S. Army Res. Office, 1991
- 33) Hoek E. and Bray J. (小野寺, 吉中訳) : 岩盤斜面工学, 朝倉書房, 1979
- 34) Goodman, R. E. and Shi, Gen-Hua : Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall (吉中, 大西訳, 土木工学社), 1985
- 35) Wittke, W. : Method to Analyze the Stability of Rock Slopes, With and without Additional Loading, Fels mechanik und Ingenieurgeologie Supplementum II, pp.52-79, 1965
- 36) Londe, P., Vigier, G. and Vormeringer, R. : Stability of Rock Slopes. A Three Dimensional Study, Proc. ASCE J. Soil Mech. and Found. Div. v.95, SM7, Jan. 1969
- 37) John, K. W. : Graphical stability analyses of slope in jointed rock, J. Soil Mech. Fdns Div. Am. Soc. Civ. Engrs 94, pp.497-526, 1968

- 38) Goodman, R. E. : *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*, West Publish co., 1976 (赤井・川本・大西訳, 森北出版)
- 39) 水戸義忠, 菊地宏吉, 平野勇, 双木英人 : 岩盤斜面掘削における確率ブロック理論の適用性の検討, *応用地質*, 第 38 卷, 第 1 号, pp.13-24, 1997
- 40) Barton, N.R. : Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Eng. Geol.* **7**, pp.287-332, 1973
- 41) Barton, N.R. : The shear strength of rock and rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **13**, pp.1-24, 1976

第2章 不連続面の調査と評価

2.1 不連続面の評価項目

岩盤の力学的・水理学的特性が、岩石コアの特性と大きく異なることは、岩盤内に存在する地質学的な分離面すなわち不連続面の影響による。不連続面が周辺の岩石と異なる特徴は、せん断強度が低いこと、引張強度が著しく小さいこと、透水性が高いことなどが挙げられる。

不連続面の評価項目として ISRM 指針¹⁾では、不連続面の基本要素を「幾何学情報」と「力学・透水性情報」の2つに大別して、10の要素を挙げている。表-2.1には、これらの要素に加えてキーブロック解析では特に重要となる位置の項目を含めた不連続面の評価項目を示す。位置の情報は不連続体解析ではきわめて重要な情報である。本研究で取上げたキーブロック解析では自由面やブロックを構成する不連続面の位置と方向の関係に基づいて移動可能性や安定性の判定が行われる。これに対し、連続体解析では、各不連続面の絶対位置の情報はそれほど重要視されない。

表-2.1 不連続面の評価項目 (ISRM 指針¹⁾ を加筆)

分類	項目	内容
幾何学 情報	位置	3次元的な不連続面の位置 (x, y, z 座標)
	方向	3次元的な不連続面の方向 (走向、傾斜等で記録される)
	連続性 (トレース長)	露頭部に見える不連続面の長さ
	間隔	隣り合った不連続面間の鉛直距離
	セット数	卓越不連続面群 (ジョイントセット) の数
	ブロックサイズ	交差しあう不連続面群のそれぞれの方向と間隔によって決まる岩塊の寸法
力学・透水性 情報	表面粗さ (粗度)	1つの不連続面における平均的な面を基準にとった時の表面粗さや起伏度
	壁面強度	不連続面の壁面を構成する岩石の圧縮強度
	間隔幅	空気や水で満たされている不連続面の両側の壁面間の垂直距離
	充填物	不連続面の両側の壁面に挟まれる物質

	浸透水	個々の不連続面あるいは岩盤全体に見られる水の流れと自由水
--	-----	------------------------------

図-2.1は、岩盤構造物の規模と不連続面のトレース長と調査方法との概略的な関係を表したものである²⁾。岩盤基礎、斜面、地下掘削などの岩盤構造物の設計の際には、不連続面情報を正しく評価することが重要となる。不連続面には、断層・破碎帯のように規模が大きく、その存在や力学性状が直接、岩盤構造物に影響を与えるものがあり、これらは確定的に力学モデルの中に取り込んで評価が行われる。一方、節理や層理などの中小規模で岩盤中に多数存在する不連続面に対しては、統計的な評価を実施したうえで力学モデルに取り込むことが行われる。ただし、同じ地下構造物であっても不連続面の規模や間隔と構造物との関係は、構造物の規模によって相対的に変化するものであることにも留意する必要がある。また、不連続面は方向を持って三次元的に分布するため、構造物と不連続面の関係はより複雑となる。

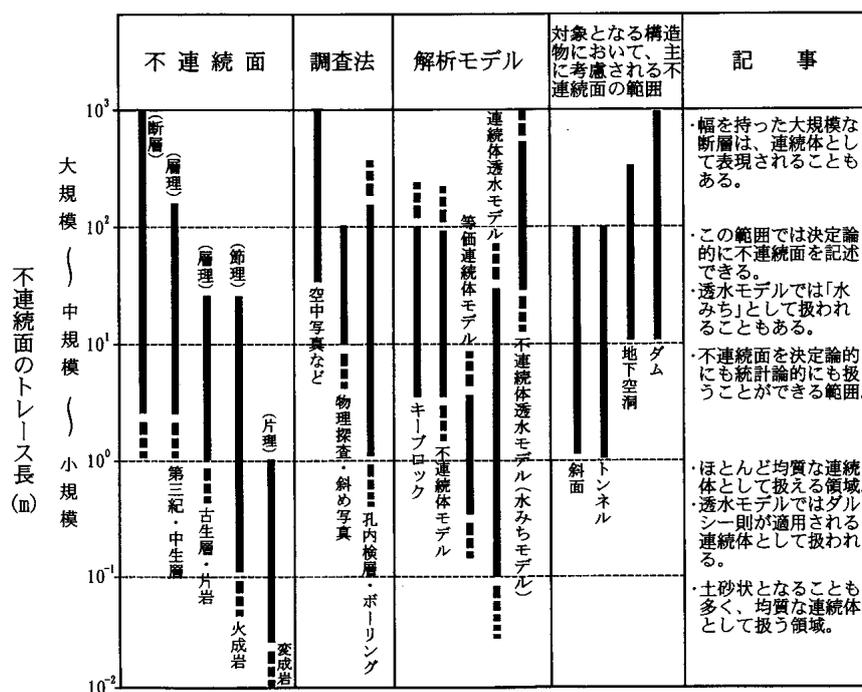


図-2.1 不連続面のトレース長と調査法・解析モデル²⁾

2.2 不連続面の幾何学性状

(1) 方向性とジョイントセット

不連続面の方向性は、不連続面の特徴を表す最も重要な要素の1つである。節理などの不連続面では、多くの場合、同じ方向性を持つ2方向以上の不連続面群が交差して存在する。同じ方向性を有する不連続面群をジョイントセット（卓越不連続面群）という。多くの場合、全体の系は複数のジョイントセットからなる。

不連続面の方向性は地質調査では、一般的に走向(strike)および傾斜(dip)で表現される。走向・傾斜による表現は、N10E35E というように、クリノメーターで読み取ったままを数字と方位を表すNSEWの組合せで表現する方法であるが、数学的処理をするには不向きな表現方法である。そこで、傾斜(dip)および傾斜方位(dip direction)の2つのパラメータを使う方法が用いられる。例えば、N10E35Eを傾斜・傾斜方位で表すと35/100となる。図-2.2は走向・傾斜および傾斜・傾斜方位の関係を表したものである。ここで、デカルト座標系のX軸は東、Y軸は北、Z軸は鉛直上向きと一致している。傾斜している平面と水平面(XY平面)との交線が走向であり、その走向に直交して、面が傾斜する方位が傾斜方位である。傾斜方位は水平面上でY軸から時計回りに測った角度 β として定義する。また、傾斜角 α は水平面と傾斜方位がなす角度として定義する。現場調査において得られる走向・傾斜のデータは簡単に傾斜および傾斜方位のデータに変換することができる。傾斜方向の単位ベクトル $\hat{s} = (s_x, s_y, s_z)$ は以下の式で表される。

$$\hat{s} = \begin{pmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha \sin\beta \\ \cos\alpha \cos\beta \\ -\sin\alpha \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

図-2.3は方向を記述する別の方法であり、平面の法線ベクトル \hat{n} を用いて表わすものである。図-2.2と同様に、平面の傾斜方位角を β とし、傾斜角を α とする。法線ベクトル \hat{n} の水平面への投影である om の北(Y軸)から時計回りに測った角度が傾斜方位角 β となる。そして、法線ベクトル \hat{n} がZ軸となす角度は傾斜角 α と一致する。法線ベクトルが上向きの場合と下向きの場合とでは正負の判定を必要とするため、ここでは上向きの法線ベクトル \hat{n} を用いて傾斜および傾斜方位を計測する。上向き法線ベクトルを選ぶことによって傾斜角は($0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$)の範囲となり、解析への導入が簡単となる。

このとき、単位法線ベクトル $\hat{n} = (n_x, n_y, n_z)$ の成分(方向余弦)は図-2.3から、以下の式で

表される。

$$\hat{n} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \alpha \sin \beta \\ \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

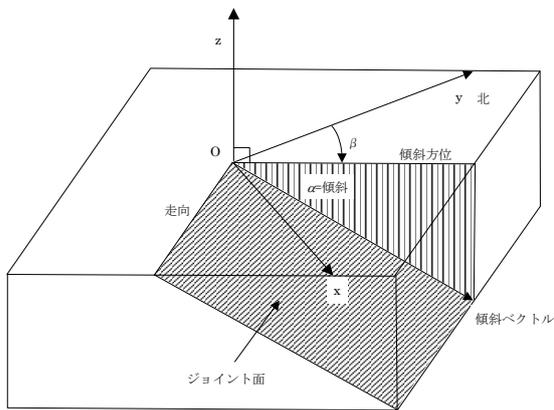


図-2.2 傾斜した平面の記述法

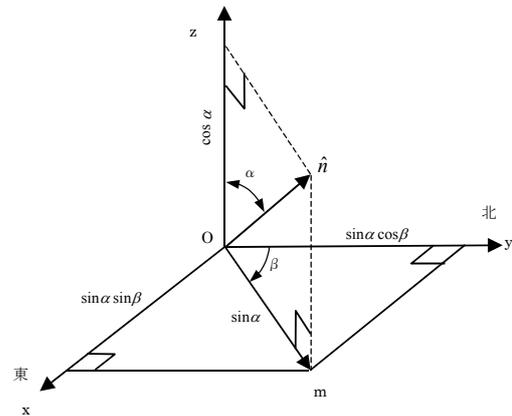


図-2.3 平面の法線ベクトル

不連続面の方向性を評価するためにステレオ投影法が用いられる（ステレオ投影法の原理については3.2節参照）。図-2.3に示される不連続面の法線ベクトルは、ステレオネット上では作図円内の1点に投影される。図-2.4は、極座標表示された不連続面分布の例であり、図-2.5は密度コンター図である。

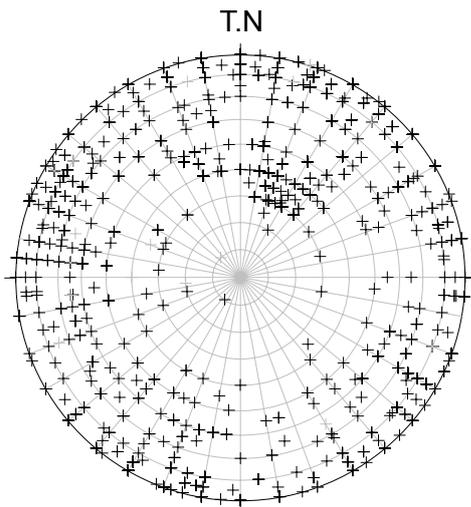


図-2.4 極座標プロット図

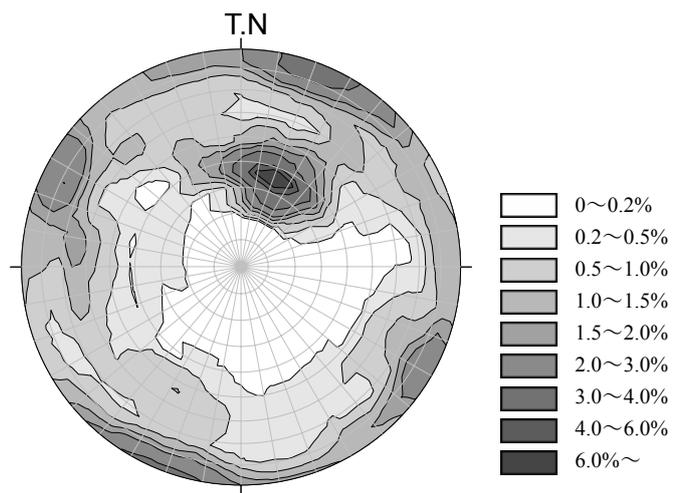


図-2.5 ステレオコンター図

不連続面の方向性を評価する場合に注意しなければならないことに、計測の偏り (Sampling bias) がある。これは、ボアホールカメラや、露頭でのスキャンラインによる調査では、測線の方向と不連続面の方向により、不連続面の計測されやすさが異なることである。測線に直交する不連続面ほど測線上に現れやすく、計測本数も多くなる。逆に測線に平行な不連続面ほど測線上に現れにくくなり、本数が少なく計測される。最初にこの観測の偏りの問題について研究したのは Terzaghi³⁾ であり、その後 Kulatilake⁴⁾ などの研究がある。図-2.6に示すように、スキャンラインの方向と不連続面の法線方向のなす角度を δ とすると、不連続面本数に対して、以下の式で重み付けを行うこととする。

$$w = \frac{1}{\cos \delta} \quad \delta < 90 \quad (2.3)$$

$\delta=0$ の時が測線と不連続面が直交する時で、重み係数 $w=1$ となり最小値をとる。 δ が大きくなるにしたがって重み係数 w も大きくなり $\delta \rightarrow 90$ で $w \rightarrow \infty$ (無限大) となる。しかし、 δ が 90° に近付くと重み係数の値が非常に大きくなり、過大な誤差を含む可能性がある。Terzaghi³⁾ は δ の最大値として 70° を提案しており、この時、重み係数の最大値 $w=1/\cos 70=2.92$ となる。また、Yow⁵⁾ は不連続面方向の計測誤差と、重み係数の最大誤差を以下の式で表している。

$$w_{\varepsilon, \max} = \frac{\cos \delta}{\sin(90 - \delta - \varepsilon)} - 1 \quad (2.4)$$

不連続面方向の計測誤差 ε を 1° 、重み係数の最大許容誤差を 20% とすると、式より、 $\delta=84^\circ$ となり、重み係数の最大値 $w=9.56$ となる。また、Terzaghi の提案する $\delta=70^\circ$ 採用すると重み係数の最大許容誤差は 5% となる。

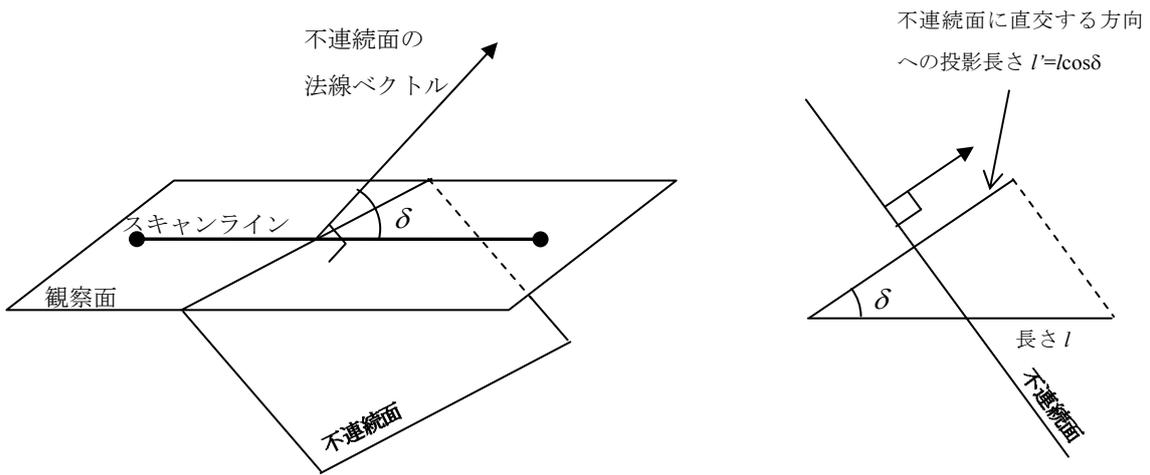


図-2.6 スキャンラインと交差する不連続面

ステレオネット表示された不連続面の極データにクラスター分割を用いて、不連続面は卓越方向群にグループ化される。クラスター分割によって不連続面は n 個の卓越方向グループに分割される。こうして多数の不連続面を n 個の卓越方向群にグループ化することによって、問題を単純化することができる。

クラスター分析の方法は、計数円による方法が使われる。これは、ステレオネット上で面積一定の計数円を描き、この円内に含まれる極の数から分布密度を与えるものである。従来は計数円に含まれるデータのみを計数して分布密度を算出していたが、最近では全データを対象にサンプリング関数を用いたクラスター分析が行われるようになった。これにより密度計測点近傍のデータをより重視し、かつ遠方のデータも無視しないことで、分布の局所的な変化をよりよく表わすことができる。例えば、サンプリング関数として次式を用いる。

$$w(\theta | N) = \frac{1}{d(N)} \exp(\kappa(N) \sin^2 \theta) \frac{1}{N} \quad (2.5)$$

これは密度計測点周りの等方的な（半球面上）Bingham 分布を用いたものである。ここで、 N は不連続面のデータ数、 θ はメッシュの中心方向と不連続面の極方向のなす角度である。 κ は集中度を表す係数でその大きさは、例えば $N=100$ 程度以上のとき、以下の式で近似される⁶⁾。

$$\kappa(N) = -0.586 \times N \quad (2.6)$$

また、 d は正規化定数で、半球面上での積分が 1 になるように定められる。

クラスター分割によってグループ化された不連続面グループごとに、その代表値となる平均方向とばらつき度合いを表す標準偏差を求めることができる。

グループの平均方向は、不連続面の単位法線ベクトルの合成ベクトル \mathbf{R} 方向で表すことができる (図-2.7)。また、分散度の指標である方位分散係数は次式で表される。

$$K = \frac{N-1}{N-|\mathbf{R}|} \quad (2.7)$$

N はそのグループに含まれる不連続面数である。ここでグループ内のすべての不連続面法線が完全に平行であれば、合成ベクトル \mathbf{R} の大きさ (ノルム) は N に等しくなる。しかし、実際には不連続面の方向は分散しているため \mathbf{R} の大きさは N より小さくなる。方位分散係数 K は分散が 0 に近づくほど大きくなる。

式(2.7)より、グループごとの方位分散係数が決定するので、次に球面統計学を適用し、グループごとのばらつきを計算する。不連続面法線ベクトルのばらつきの程度 (標準偏差) は角度で表され次式となる。

$$\Omega = \arcsin \sqrt{\frac{2\left(1 - \frac{1}{N}\right)}{K}} \quad (2.8)$$

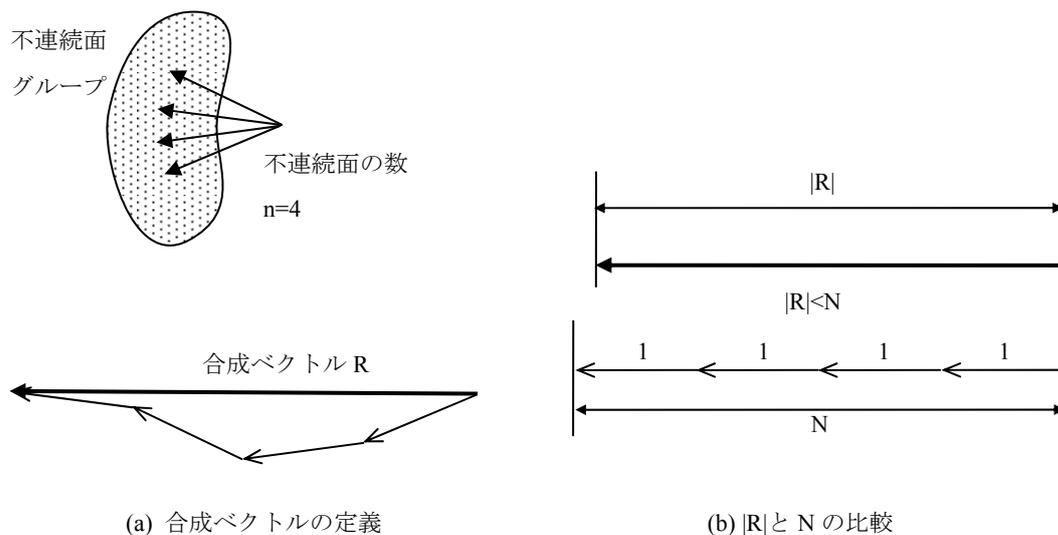


図-2.7 不連続面グループの合成ベクトル方向

(2) 長さ（連続性）

不連続面長さ（連続性）は、ある一つの面内での不連続面の長さ、あるいは面積の広がり
を意味する。解析モデルを作成する上で重要なパラメータの一つであるが、最も定量化の難
しいものの一つでもある。露頭面であれ掘削面であれ、調査の際には不連続面の両端あるい
は片端が調査範囲外まで延びており、正確な長さが不明な不連続面が数多く存在するため
である。また、調査で見ている不連続面は2次元の断面でのトレースであり、3次元の不連続
面の広がりにはさらに把握するのが困難である。したがって、現在のところ、不連続面長さ
については決まった測定方法はなく、任意の測線と交差する不連続面長さを調査するスキャン
ライン法や、ある平面領域内で調査を行うサンプリングウィンドウなどの方法が提案されて
いる。

長さの分布モデルとしては、スケールの小さいものは個数が多く、スケールの大きいもの
は個数が少ないという概念を適用して、不連続面長さが従う分布形を指数分布と仮定する場
合が多い。この仮定の妥当性は、調査で得られた不連続面長データを指数確率紙にプロット
することから確認できる。指数確率紙上ではデータが指数分布に従っている場合には各点は
直線状に並び、その傾きが平均値を示すという性質がある。

実際に岩盤露頭面に分布している不連続面の長さ l を指数分布と仮定すると、その分布形
は次のように表される。

$$f(l) = \lambda \exp(-\lambda \cdot l) \quad (2.9)$$

ただし、 $1/\lambda$ ：不連続面長の平均値 ($=\mu$)

これより、不連続面調査によって得られた不連続面長データからその平均値を推定するこ
とができれば、式(2.9)に示した確率密度関数が決定される。図-2.8は、筆者らが実施したあ
る花崗岩地域における、約 50m×約 40m の露頭調査における不連続面長さの分布を示したも
のである⁷⁾。不連続面の平均長さは 5.02m であり、図中には負の指数分布を仮定した時の理論
曲線を併記してある。不連続面長さの分布がほぼ負の指数分布に従うことがわかる。

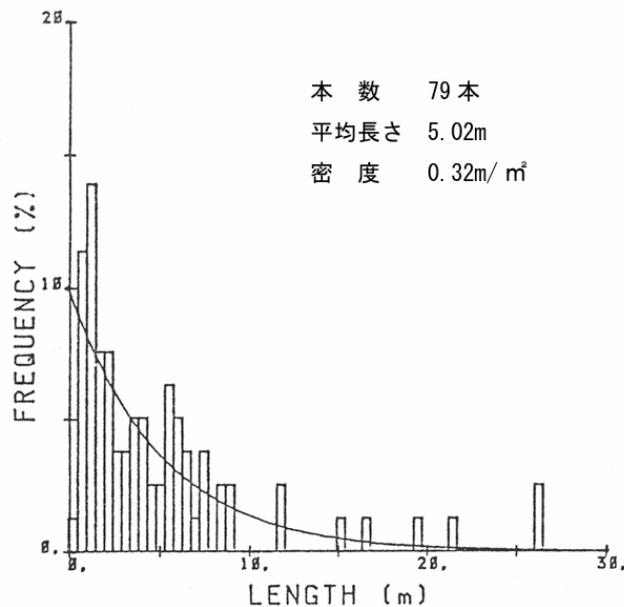


図-2.8 不連続面長さの分布

さて、現場の岩盤露頭面で不連続面調査を行う場合、種々の理由により不連続面全体をとらえることができないことの方が多い。このような場合実際の不連続面長さを正しく測定することができず、限られた情報をもとにして実際の不連続面長さを推定しなければならない。Priest ら⁸⁾は不連続面全体が測定不可能な場合の不連続面長の平均値の推定方法について提案している。以下、卓越方向解析を行ったのちの属群に分類された不連続面のみを対象にする。すなわち考えている不連続面群は全て平行なものとして取り扱うものとする。さて、図-2.9のように、測定基線となるスキャンラインを設置する露頭の広さには制限がある場合が多いので、実際には実長 ab の測定が不可能な場合がある。したがってスキャンラインと交差する不連続面の半トレース長 ib により実長 ab を評価することを考えなければならない。図-2.9は露頭の観察可能範囲に制限があるため半トレース長の測定可能な長さが制限されている場合を示している。観測可能な半トレース長の長さを C_m とするとその長さは位置により変化するものであるから、

$$C = \min\{C_m\} \quad (2.10)$$

のような基準値 C を設定する。

n をスキャンラインと交差する不連続面数、 r を C 以下の半トレース長を持つ不連続面数とし不連続面長さの母集団が指数分布に従うと仮定する。

長さ C 以下の不連続面数の割合は、式(2.9)より、

$$\begin{aligned}
F(C) &= \int_0^C f(l)dl \\
&= \int_0^C \lambda \exp(-\lambda l)dl \\
&= 1 - \exp(-\lambda C)
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

サンプル数が多くなると、 $F(C) \approx r/n$ であるから、

$$\frac{r}{n} = 1 - \exp(-\lambda C)
\tag{2.12}$$

となり、式(2.9)の λ は以下の式で評価できる。

$$\lambda = -\frac{1}{C} \ln\left(1 - \frac{r}{n}\right)
\tag{2.13}$$

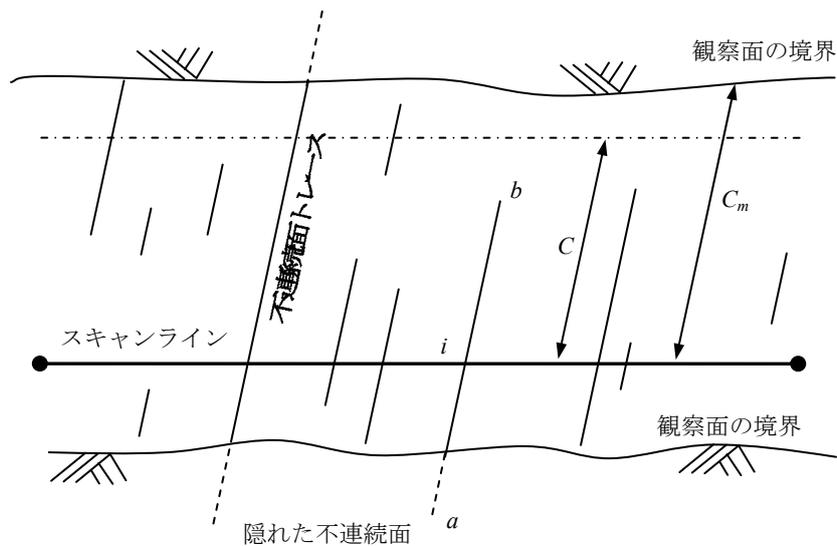


図-2.9 スキャンライン法による調査方法

ここで、 λ は分布の平均値の逆数である。したがって式(2.10)、式(2.13)から、測定可能な半トレス長を測定することにより、実際の不連続面長が指数分布に従うと仮定した場合の平均値を推定することができる。このようにして露頭に存在する不連続面全体が観察できなくとも、不連続面長をスキャンライン調査によって測定することによって不連続面長の平均値を推定でき、それによってその確率密度関数を決定できる。

一方 Kulatilake & Wu⁹⁾は、サンプリングウィンドウを用いて、個々のトレス長を用いることなく、トレス長平均値を求める方法を考案した。この方法では全トレスを図-2.10に示

す3つに分類する。(a)は不連続面の両端ともサンプリングウィンドウ内に観察されるものであり、(b)は片端が観察されるもの、(c)は両端とも観察されないものである。節理長の観測下限値として C_L を与えるため、サンプリングウィンドウの大きさは、観察が可能な領域の大きさよりもこの分だけ小さく取る必要がある。

全観測トレース数 N に占める(a)、(c)のトレースの比率を $r_a(=N_a/N)$ 、 $r_c(=N_c/N)$ とすると、トレース長平均値 μ_f は以下の式で与えられる。

$$\mu_f = \frac{A \cdot B}{B \cdot E[|\cos \theta|] + A \cdot E[|\sin \theta|]} \frac{1 + (r_c - r_a)}{1 - (r_c - r_a)} \quad (2.14)$$

ただし、 $E[*]$ は、トレースの方向分布に関する積分を表す。これらは、実際の計算においては観察データからの値を用いて

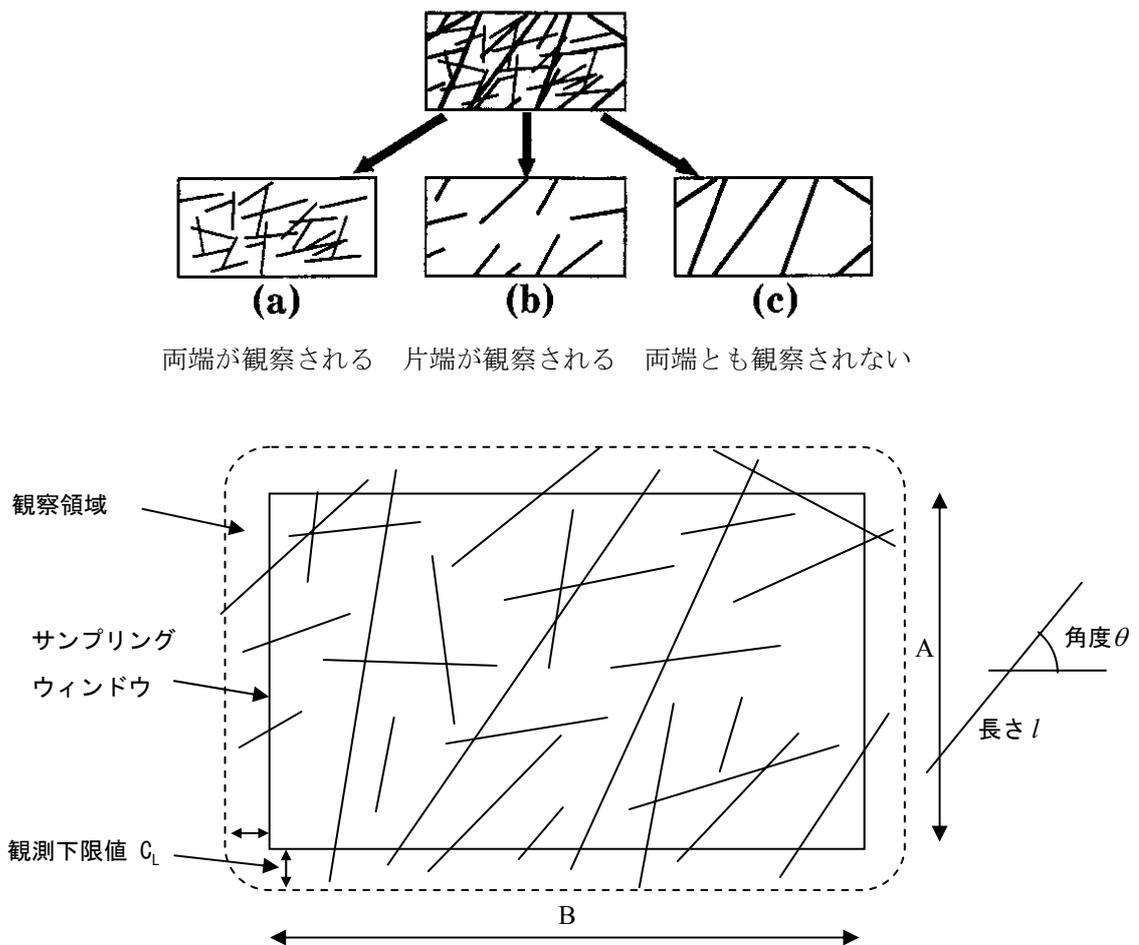


図-2.10 サンプリングウィンドウによるトレース長の推定

$$\begin{aligned}
E[|\cos \theta|] &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\cos \theta_i| \\
E[|\sin \theta|] &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\sin \theta_i|
\end{aligned}
\tag{2.15}$$

で代用すればよい。ただし式中の θ_i は、実際に観察された各トレースに関する値である。

(3) 密度、間隔

不連続面の密度は、体積密度、面積密度、1次元密度等で定義できる。体積密度は単位体積当たりの不連続面個数であり、面積密度は単位面積当たりの不連続面本数であるが、これらの量は実際に計測するためには、時間とコストを要することもあり、現実的には調査されることが少ない。

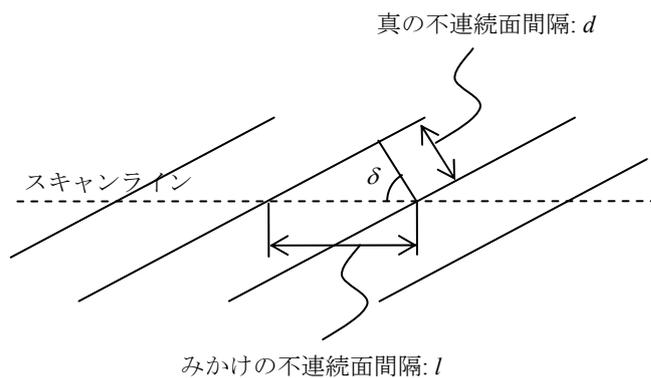
最も簡単で、一般的に用いられているのは1次元密度であり、不連続面群に垂直にスキャンラインを設けた時の、単位長さあたりに含まれる平均不連続面本数 λ である。一般の観察の場合、図-2.11に示すように、スキャンラインの方向と卓越不連続面の垂線の方向のなす角を δ とすると、スキャンライン上での見かけの不連続面密度 λ_s と真の密度 λ との関係は以下の式で表される。

$$\lambda_s = \lambda \cos \delta \tag{2.16}$$

また、不連続面群が複数存在する場合のスキャンライン上での全不連続面の密度は、

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^N \lambda_i \cos \delta_i \tag{2.17}$$

となる。ここに、 δ_i は、 i 番目の不連続面の法線方向とスキャンライン方向のなす角のうち鋭角の方であり、 λ_i は、 i 番目の不連続面に直交する方向の真の密度である。



$$\cos \delta = \frac{d}{l}$$

真の不連続面密度

$$\lambda = \frac{1}{d}$$

みかけの不連続面密度

$$\lambda = \frac{1}{l} = \frac{\cos \delta}{d} = \lambda \cos \delta$$

図-2.11 不連続面密度の補正

Priest と Hudson¹⁰⁾および Wallis 等¹¹⁾は、スキャンライン法による不連続面調査の結果を整理して、任意の方向における不連続面の発生状況が全くランダムな分布をしていることを示している。測線上でのランダムな発生分布は、1次元でのポアソン過程に従う分布の一例である。Larson¹²⁾によれば、不連続面密度が λ で与えられる時、測線に沿った長さ x の範囲に、不連続面が k 本存在する確率が以下の式で表される。

$$P(k, x) = \frac{e^{-\lambda x} (\lambda x)^k}{k!} \quad (2.18)$$

ここに λ ：平均不連続面密度（単位長さ当りの平均不連続面本数）

ここで、図-2.12に示すようなスキャンラインに2点A,Bで交差する不連続面を考える。ABの長さが不連続面間隔であり X_t で表すものとし、点Aから任意の長さ x を考える。ここで、 $X_t > x$ となる確率は、長さ x の中に不連続面が存在しない確率に等しいから式(2.18)で $k=0$ とにおいて、

$$P(X_t > x) = P(0, x) = e^{-\lambda x} \quad (2.19)$$

次に、 $X_t \leq x$ となる確率は、上記の余事象であるから、

$$P(X_t \leq x) = 1 - P(X_t > x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (2.20)$$

ここで $P(X_t \leq x)$ は、不連続面間隔が x 以下となる確率であるから、これは x の累積密度関数 $F(x)$ である。

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad (2.21)$$

従って、不連続面間隔 x の確率密度関数 $f(x)$ は以下の負の指数分布で表されることがわかる。

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} = \lambda e^{-\lambda x} \quad (2.22)$$

式(2.22)より、平均不連続面間隔は平均密度の逆数 $1/\lambda$ となる。図-2.13は Priest¹⁰⁾らの調査結果であり、不連続面間隔が負の指数分布に従うことを示している。

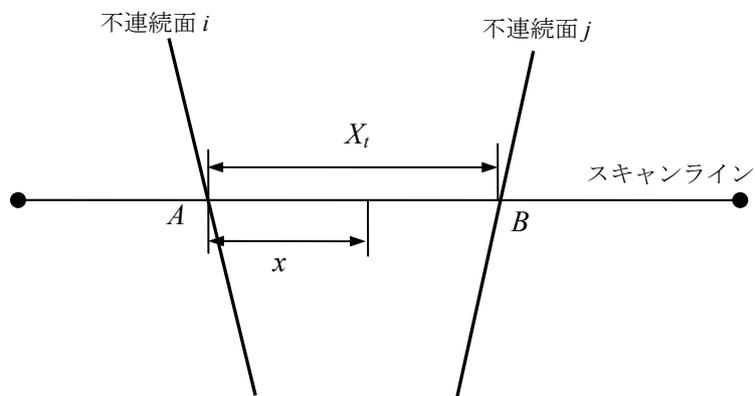


図-2.12 スキャンライン上でのランダムな不連続面の分布

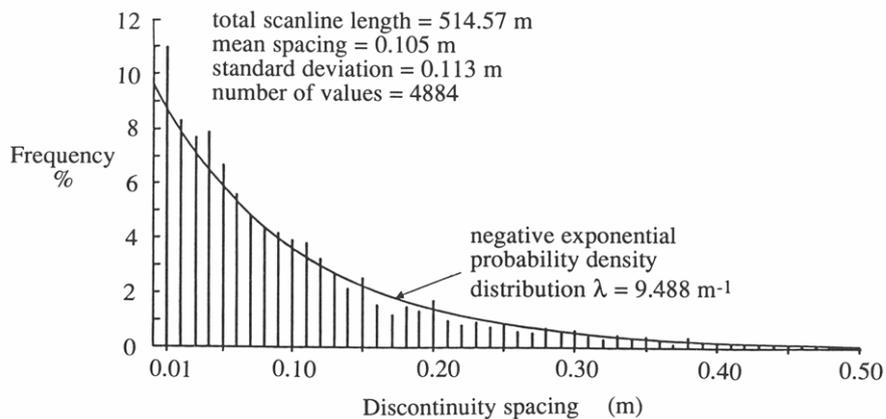


図-2.13 不連続面間隔の計測結果¹⁰⁾

2.3 不連続面の分布調査とモデル化

解析のためのモデル化を目的とした調査の手順を図-2.14に示す。調査は、まず不連続面を決定論的に扱う大規模不連続面と、統計論的に扱う中小規模不連続面に区別することから始める。ただし、実際には調査の初期の段階で岩盤の変形や崩壊モードを予測し、それに適合した解析モデルを採用することを前提に、調査は進められる。

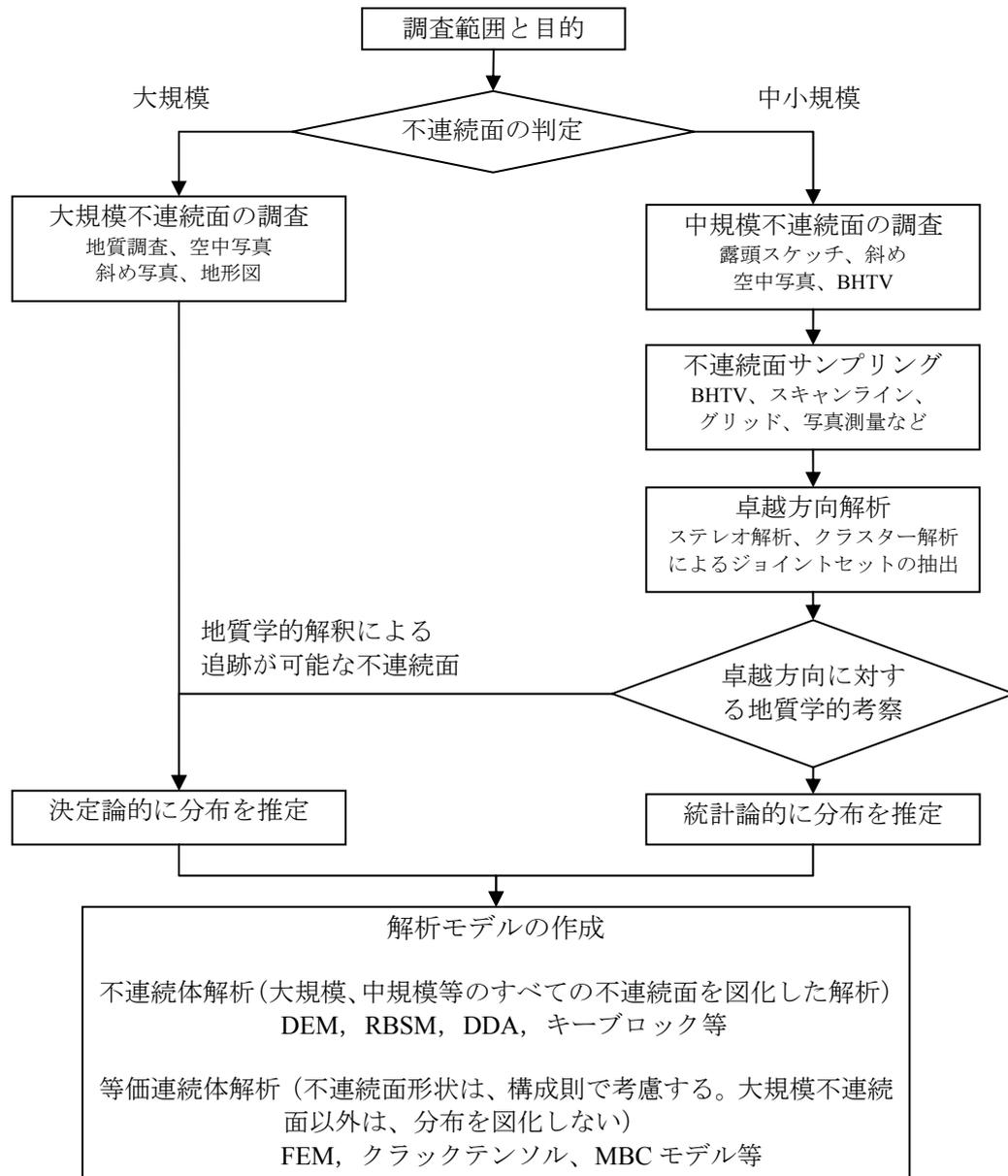


図-2.14 不連続面のモデル化の手順²⁾

2.3.1 不連続面の調査法

断層に代表される大規模不連続面は、一般に地形図などの基礎資料のほかに、空中写真判読、露頭、調査坑、ボーリングコア、および施工掘削面での目視観察、さらに物理探査などによって、分布位置や不連続面特性が詳細に調査される。調査結果から地質平面図や断面図が作成され、決定論的なモデルが作成される。ただし、対象構造物の規模によっては、中規模不連続面がこの範疇に入ることも多い。

中小規模不連続面に対する調査の基本は、観察によるスケッチである。スケッチでは、不連続面の連続性や方向を、地質や地質構造との関係から写し取ることが重要である。方向や連続性および間隔などを統計的に処理するためには、十分な量のデータをサンプリングする必要があり、ISRM 指針¹⁾では 150 点以上のデータ数を推奨している。

中小規模不連続面のサンプリング方法には表-2.2に示すように、スキャンライン法やグリッド法などのような直接観察法と、スケッチや画像などを通じて観察する間接観察法がある。直接観察法は、従来から良く採用されている方法である。露頭を直接観察するため、間隙幅や充填物の状況のほかに、不連続面の変位などのより細かい情報の取得が可能という利点がある。一方、間接観察法の写真測量は、近年急速に普及した方法で、技術者が近寄れない急崖や、時間的制約を伴うトンネル切羽観察などで利用されている。この方法は、測量精度が写真の撮影条件に依存することや、不連続面の間隙幅や充填物や粗さなどの観察が困難という短所もある。しかし、画像上で方向や連続性および間隔などを容易に計測できるという長所を持つ。ボアホールカメラも同様である。

表-2.2 中小規模不連続面の調査法²⁾

観察方法	名称	方法の概要	モデル化のための情報
直接観察法	スキャンライン	対象となる露頭面に 5m~10m の測線（スキャンライン）を設定し、測線と交差する不連続面を調査する。	不連続面の方向と単位測線長当たりの不連続面の密度（間隔）。サンプリング精度が高く、間隙幅や充填物などの情報も入手可能。
	グリッド	対象となる露頭面に 1.0m~2.0m 四方の格子枠を設定し、その中に出現する不連続面を調査する。	不連続面の方向と単位面積当たりの不連続面の密度（間隔）。サンプリング精度が高く、間隙幅や充填物などの情報も入手可能。
間接観察法	写真測量	ステレオ写真による方法。切羽やのり面など、容易に近づけない急崖などで用いる。写真の画質が精度を左右。（植生がある場合は適用不可）	3 点の XYZ 座標から、不連続面の方向を推定する。サンプリング精度は、写真の撮影条件や画質による。間隙幅や充填物の計測は困難。
	ボアホールカメラ	ボーリング孔内で使用。成果は、ボーリングの方向に影響される。ボーリングコアとは、情報の性質が異なるので注意が必要。	不連続面の方向と単位測線長の不連続面の密度（間隔）。サンプリング精度は高く、間隙幅も測定可能。ボーリングコアと合わせて考察することが重要。

2.3.2 モデル化の例

ここでは、不連続面のモデル化と評価の一例として、花崗岩地域の露頭調査をもとに、2次元の不連続面ネットワークモデルの作成を行い、不連続面密度や不連続面の連結性の評価を行った事例を示す^{13),14)}。

図-2.15(a)は、花崗岩地域の海岸露頭で実施された不連続面スケッチ図である。範囲は、ほぼ水平面の20m×20mであり、観察された不連続面本数は422本、密度は1m²当たり2.34mであった。スケッチ図から分かる通り、走向としてはN60E系、EW系、N20W系の3つのジョイントセットが存在する。表-2.3はこれら3方向に分類した不連続面群の卓越方向、平均長さ、頻度を示したものである。平均方向N56.4Eのジョイントセットの割合が51.8%と大きいですが、長さは平均方向N16Wが4.93mと長いという特徴を示している。なお、不連続面長さについて、観察面境界まで延びているものについては、観察長さの2倍の長さとして評価した。

図-2.15(b)は、表-2.3の方向性、長さ、頻度にもとづいて、2次元の不連続面ネットワークモデルの作成を行った例である。不連続面の位置はモデル領域中の任意の場所に発生させた。方向性については、それぞれのジョイントセット内では一定として、卓越方向回りの分散は考慮していない。長さについては、平均長さを用いた負の指数分布で与えた。

スケッチ図とモデル図を比較すると、方向性や分布密度等についてある程度再現性のあるモデルとなっている。ただし、作成モデルの使用目的にもよるが、スケッチ図で上下方向に露頭面を縦断する不連続面については、規模が大きいため決定論的にモデルに組み込む等の工夫をした方が良い場合もある。

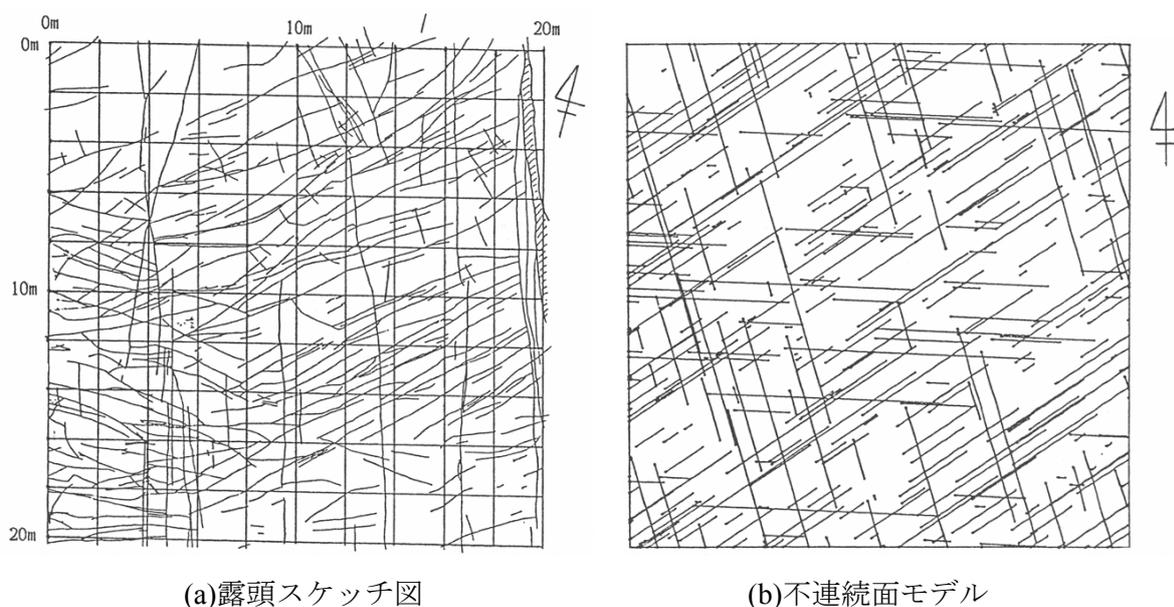


図-2.15 不連続面の露頭スケッチ図とネットワークモデル

表-2.3 不連続面の卓越方向

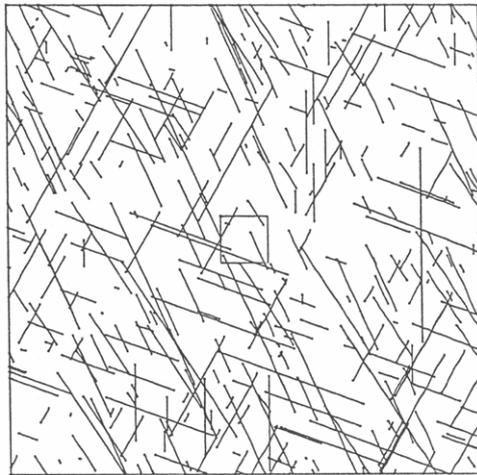
卓越群の範囲	卓越方向	平均長さ(m)	割合(%)
N40E~N80E	N56.4E	2.87	51.8
N80E~N90E, N70W~N90W	N87.6W	2.69	17.9
N0W~N30W	N16.0W	4.93	19.6
その他	—	1.93	10.7

次に、不連続性岩盤の透水性に注目して、不連続面ネットワークモデルを用いて、密度や不連続面の連結性などの要因が、透水経路としての水みちを形成する可能性についての解析を行った事例について示す。

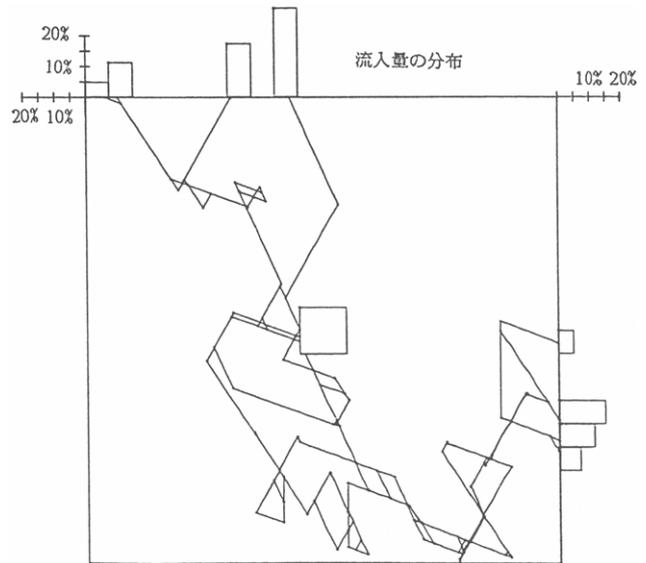
図-2.16(a)、図-2.17(a)は、ある花崗岩地域の不連続面調査結果にもとづき、同じ方向性、長さ分布を持つジョイントセットに対して、不連続面の発生密度を変化させて作成した不連続面モデルである。領域は、一辺が50mの南北方向の鉛直断面を表しており、平均割れ目長さは5mとしてある。不連続面密度は図-2.16で 0.68m^{-1} 、図-2.17で 3.41m^{-1} である。ここで、不連続性岩盤の中央に地下空洞を考え、領域内の不連続面のうち中央の空洞から外側の境界までつながっているものを、連結した不連続面とした。また、連結している不連続面の合計の長さを、領域内の総ての不連続面長さで割ったものを、連結率と定義した。連結率は、密度がある点を越えると急激に増加することが知られている⁷⁾。図-2.16(b)、図-2.17(b)は、連結した不連続面のみを抽出したものであり、連結率はそれぞれ、28.7%と74.9%である。

図-2.16(b)は、連結率が低く、明らか特定の不連続面による水みちが形成されていることがわかる。これは、実際の岩盤では、ある規模以上の断層破碎帯の分布に対応するとも言える。図-2.17(b)に示される程度に連結率が增加すると、全体的に不連続面はつながるようになるが、不連続面の密集部分と、そうでない部分とが形成される。これは、節理が密集した部分が、全体としては透水ゾーンとなる不連続面密集体モデルというべきパターンに相当する。

このモデルを使い、中央空洞と周辺境界に水頭差を与えて、周辺境界からの流入量の分布を計算した。解析は、岩盤基質の透水性はないものとし、不連続面にのみ一定の透水係数を与えた定常浸透流解析である。境界条件は上面を水頭0、左右境界を静水圧条件、下面を不透水条件とした。解析結果は、図-2.16(b)では、特定の不連続面が明らかな水みちとなっているが、中央空洞までの経路が短い連結不連続面が、より流入量は大きくなる。図-2.17(b)では、不連続面の密集部分で流入量が大きくなる傾向がうかがえるとともに、左境界やや上部と右境界下部の流入量が大きく、不均質かつ異方性のある透水場が形成されている。

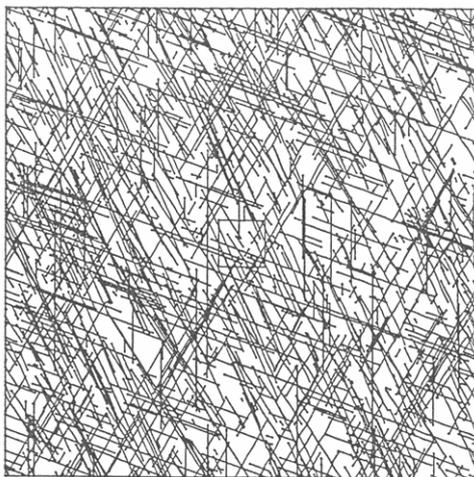


(a)不連続面モデル (密度 0.68m^2)

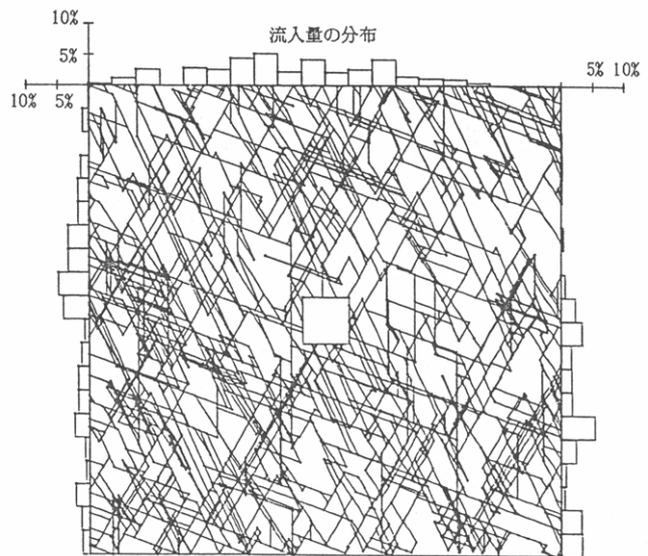


(b)連結トレース (連結率 28.7%)

図-2.16 不連続性岩盤モデルと連結トレースの抽出



(a)不連続面モデル (密度 3.41m^2)



(b)連結トレース (連結率 74.9%)

図-2.17 不連続性岩盤モデルと連結トレースの抽出

2.4 不連続面の強度

不連続面を含む岩盤の力学的安定性を論じる上での、最も重要な条件は不連続面の幾何学的分布性状である。不連続面の傾きや方向と掘削面の関係において、岩盤のどの部分がすべり出すか、あるいは落下するかを決定するからである。次に重要な点は、破壊する可能性のある面に沿うせん断強度で、これは単一の不連続面のこともあり、あるいは、いくつかの不連続面が組み合わさり、また岩石材料部分の破壊も含むような複雑な破壊となることもある。

図-2.18に示すような、不連続面を含む供試体での一面せん断試験を考える。各供試体に対して、不連続面に垂直な方向に垂直応力 σ_n を与え、ついで水平方向のせん断変位 δ を生じさせるためのせん断力 τ を測定する。垂直応力一定の条件で、せん断応力と同変位の関係をプロットしたものが図-2.18左下の図である。変位が非常に小さい場合は、応力と変位が弾性的に（直線的）に変化する。降伏が始まると曲線状になり、ついで最大せん断応力 τ_p に達してピークをむかえる。さらに変位を増大させると応力は急激に減少し、最後に変位を増大にかかわらず応力が一定の残留強度 τ_r に達する。

一連の垂直応力 σ_n に対して求めたピークせん断応力をプロットすると図-2.18右下の図が得られる。この曲線はほぼ直線で近似でき、その傾きがピーク摩擦角 ϕ であり、せん断応力軸の切片が粘着力 c である。この粘着力成分は、垂直応力 σ_n に独立の成分であるが摩擦によるせん断強度の成分は、図のように垂直応力と共に増大する。ピークせん断強度 τ_p と垂直応力 σ_n は次に示すモール・クーロンの式で定義される。

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2.23)$$

ここに c : 不連続面の粘着力

ϕ : ピーク摩擦角

残留せん断強度を垂直応力に対してプロットすると、次の直線関係が求まる。

$$\tau_r = \sigma_n \tan \phi_r \quad (2.24)$$

ここに ϕ_r : 残留摩擦角

上式は、不連続面の粘着力が失われたことを示している。また、一般に残留摩擦角 ϕ_r は、ピーク摩擦角 ϕ よりも低い。

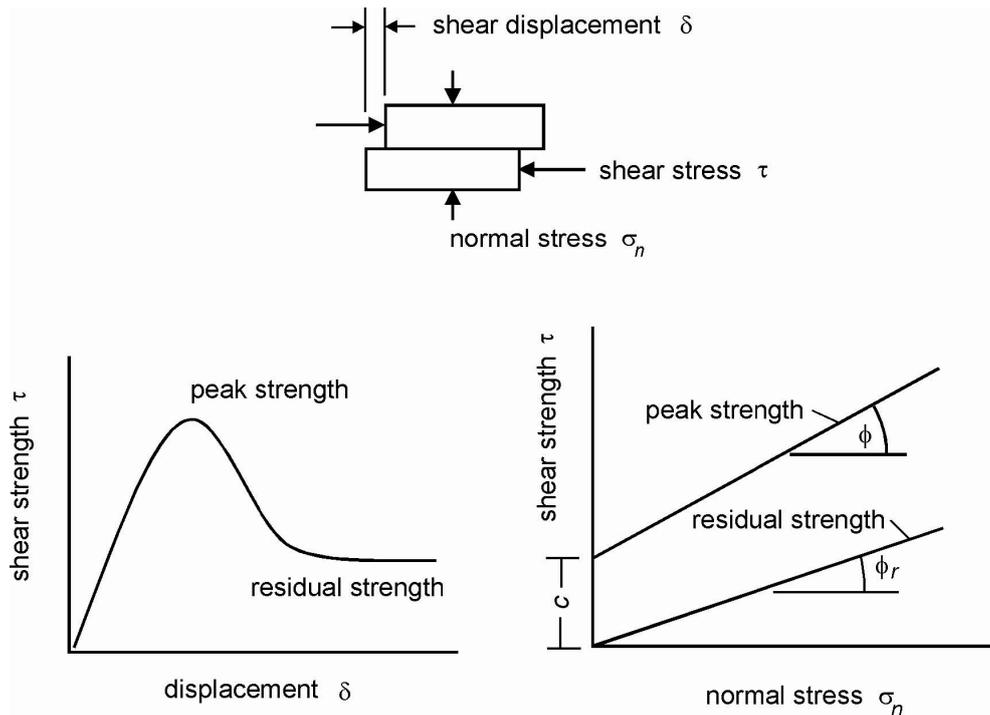


図-2.18 不連続面のせん断試験

ここまでは、せん断の生じる分離面はせん断力が作用する方向に完全に平行にあるものと仮定してきた。次に、図-2.19に示すように、せん断が生じる不連続面が、せん断応力の方向に対して傾いている場合について考える。自然の不連続面が平滑な面であることはなく、表面は凸凹の粗さを持っている。この表面粗さは、不連続面のせん断挙動に大きな影響を与え、表面粗さによるせん断強度の増大は、不連続性岩盤の安定問題を考える上で非常に重要である。

Patton¹⁵⁾は図-2.19に示すのこぎりの歯状の供試体によるせん断試験を行っている。この場合のせん断変形は、傾いた面に沿って上方へ変位するダイレクションをとらない供試体の体積変化を生じる。Pattonのせん断強度は以下の式で表される。

$$\tau = \sigma_n \tan(\phi_b + i) \quad (2.25)$$

ここに ϕ_b : 基本摩擦角

i : 不連続面のせん断方向との傾き (粗さ角度)

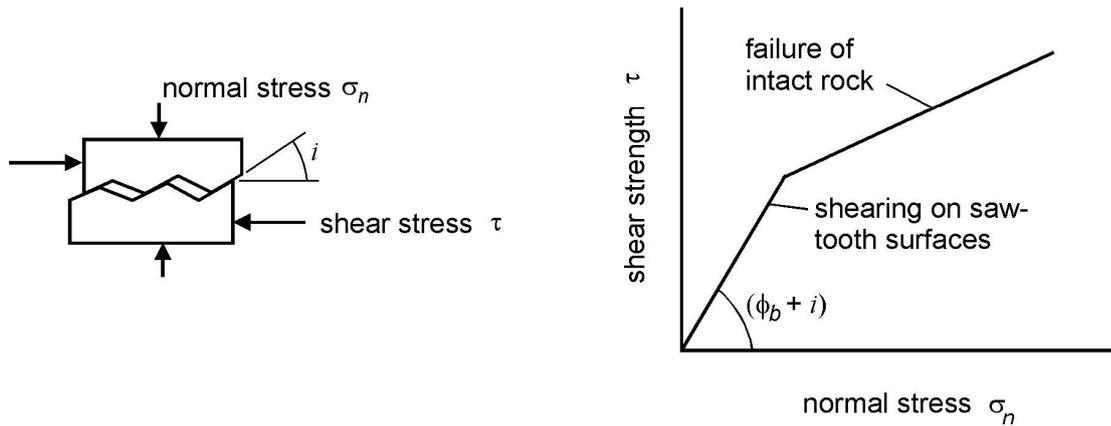


図-2.19 Pattonの規則的起伏面でのせん断実験

式(2.25)の関係は、垂直応力が比較的小さく、せん断変位が傾斜した面に沿って生じる場合に有効な式である。しかし、垂直応力が大きくなると、起伏の部分がせん断破壊される状況に近付き、結果として不連続面の摩擦特性よりは、岩盤基質のせん断特性を示すようになる。Pattonはこの関係を図-2.19のグラフに示すような折れ線で表現している。

これに対し Barton^{16),17)}は、鉛直応力の増大にしたがい、せん断強度が滑らかに変化する関係式として以下の式を提案している。

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_b + JRC \cdot \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (2.26)$$

ここに、JRC：不連続面粗さ係数（Joint Roughness Coefficient）

JCS：不連続面圧縮強度（Joint Wall Compressive Strength）

その後 Barton と Choubey¹⁸⁾は、130個にも及ぶさまざまな風化した不連続面を含むせん断試験をにより、式(2.26)の基本摩擦角 ϕ_b の代わりに残留摩擦角 ϕ_r を用いる式を再提案している。

$$\tau = \sigma_n \tan \left(\phi_r + JRC \cdot \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right) \quad (2.27)$$

残留摩擦角 ϕ_r は以下の式で評価される。

$$\phi_r = \phi_b - 20(1 - r/R) \quad (2.28)$$

ここに、 r ：湿潤、風化状態にある不連続面でのシュミットハンマー反発係数

R ：乾燥、新鮮状態の平滑な不連続面でのシュミットハンマー反発係数

不連続面粗さ指数 JRC は、**図-2. 20**に示されるような標準的な粗さ断面形状を示した図面と実際の表面形状を比較することにより決定される。不連続面の表面形状は、直線状に並んだ多数の針を表面に押し当てる不連続面測定器やレーザー距離計などが用いられる。室内実験での供試体レベルの大きさの不連続面では、表面形状を計測して**図-2. 20**と直接比較できるが、現地調査の場合は不連続面の規模が数 m～数 10m におよび、表面形状を詳細に観察するのが困難な場合がある。そこで、**図-2. 21**に示す方法も用いることができる。これは断面測定長と表面粗さの振幅（深さ）から JRC を推定する方法である。

不連続面圧縮強度 (JCS) は、不連続面に垂直な方向のシュミットハンマー反発係数から求められる¹⁹⁾。シュミットハンマー試験が実施できない場合は、岩石の一軸圧縮強度の 1/4 程度が用いられる²⁰⁾。

Barton と Bandis²¹⁾は、不連続面およびそのレプリカを使った試験により、不連続面のせん断強度特性に寸法効果が現れることを指摘している。 JRC のよび JCS の寸法効果の補正として以下の関係式が提案されている。

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02JRC_0} \quad (2.29)$$

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03JRC_0} \quad (2.30)$$

ここに、 L_0 : 室内試験の供試体の寸法 (10cm)

L_n : 現位置での不連続面長さ

JRC_0, JCS_0 : 室内試験 (10cm) で求めた JRC と JCS

JRC_n, JCS_n : 現位置でのブロックサイズの JRC と JCS

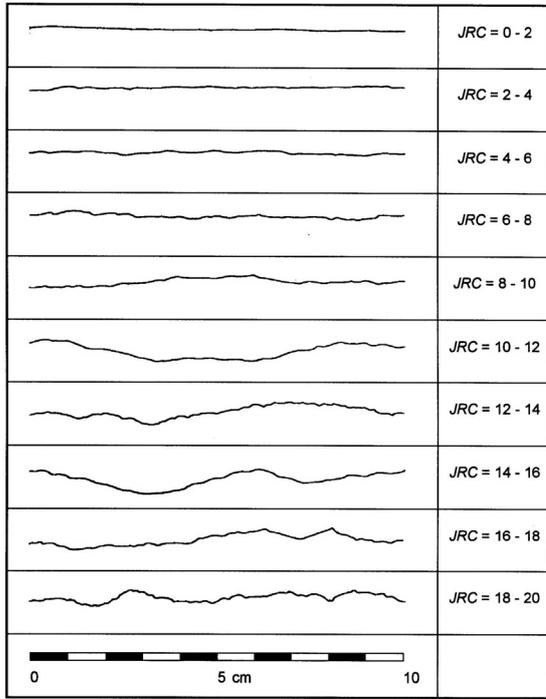
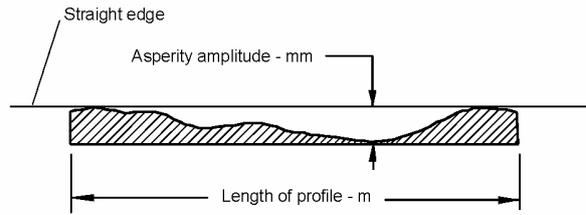


図-2.20 粗さ形状と JRC 指標^{17) 18)}

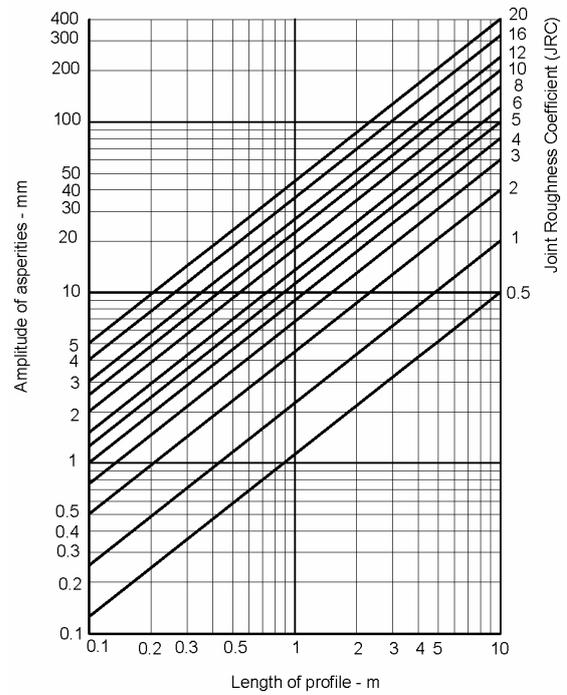


図-2.21 起伏深さによる JRC の評価方法¹⁸⁾

2.5 不連続面調査とその定量化

不連続面の卓越方向や分布密度を定量的に把握する方法としては、スキャンライン法などにより個々の不連続面の位置、方向、長さを直接測定して、統計処理により求める方法が一般的である。この場合、統計的に信頼の置ける結果を得るためには、十分な量のデータをサンプリングする必要がある、多大な労力を要する場合が多い。ここでは、間接的に不連続面の方向性と分布密度を定量化する方法として、ステレオロジーの理論に基づく方法の適用を試みた²²⁾。この方法は、方向の異なる観察面での不連続面トレースの2次元の分布情報から3次元の不連続面分布を推定する方法である。個々の不連続面の走向傾斜の方向を測定する必要がなく、スケッチや写真で得られる各観察面でのトレース図があれば適用可能な方法である。

2.5.1 調査地点の概要

調査地点は、中部電力により静岡県に建設された赤石地下発電所の発電機組み立て室空洞である。発電所は図-2.22に示すように、上部の高さ14.9m×幅15.0m×奥行き27.0mの発電機組立室と高さ10.0m×幅10.2m×奥行き12.7mの配電盤室、および下部のφ13.0m×高さ65.5mの発電機室立坑からなる。施工はいずれの空洞も吹付けコンクリートとロックボルトによるNATM工法が採用された。

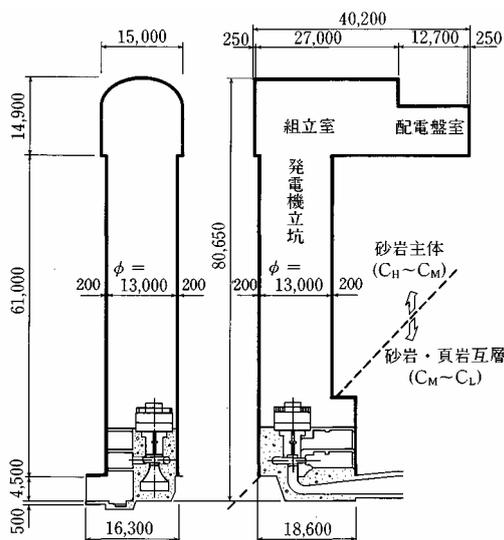


図-2.22 地下発電所空洞の諸元

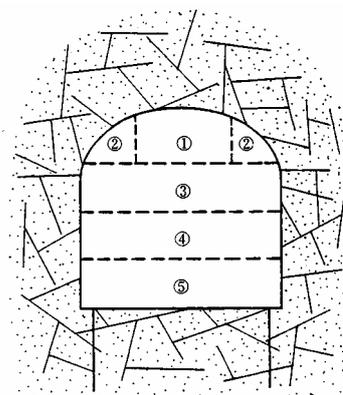


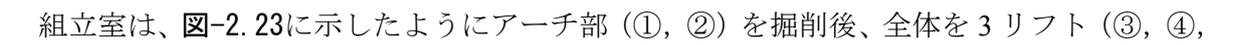
図-2.23 発電機組立盤の掘削リフト

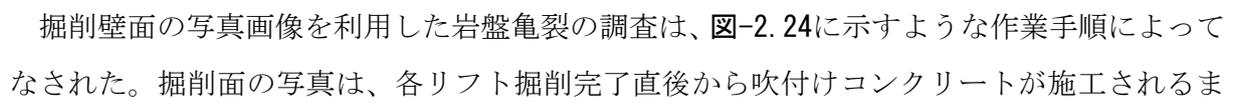
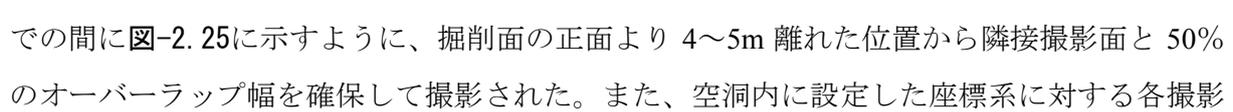
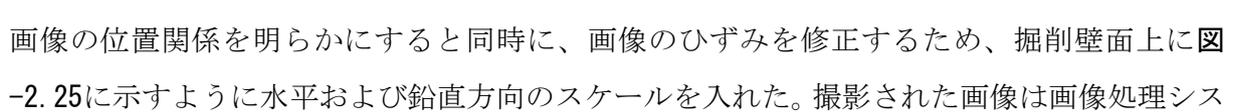
当開発地域は、西側に中央構造線、東側に糸魚川静岡構造線で境され、諏訪湖を頂点とする赤石楔状地の北部に位置し、四万十層群中の白根帯-大井川帯に属する。大半は白根帯で、

その地質は砂岩、頁岩あるいはそれらの互層が主体となっている。発電所の地質は、上部はおおむね $C_H \sim C_M$ 級の堅硬な砂岩層が主体であり、発電機据付け位置付近を境とした下部は、上部に比べてやや脆弱な $C_M \sim C_L$ 級の砂岩・頁岩の互層となっている。両者の境界は、山腹斜面に対して差し目となっている。

地下空洞の掘削にあたっては、空洞周辺の地質状況を岩盤力学的な視点から把握するために、まず組立室の掘削時に詳細な地質調査が実施され、その結果を立坑の設計・施工に反映させる努力がなされた。これは、大規模な立坑の掘削工法として NATM 工法がわが国で初めて採用されることに加えて、吹付けコンクリートとロックボルトが運転開始後の永久支保構造となることへの技術的配慮である。さらに、本工事の完成により今後、永久構造物として健全な大規模立坑を安全に、経済的に建設するための技術の向上に貢献することも重要な動機の一つである。

2.5.2 地質調査方法

組立室は、に示したようにアーチ部 (①, ②) を掘削後、全体を3リフト (③, ④, ⑤) に分けて掘削された。地質調査は、この3リフトについて、各リフト掘削ごとに空洞壁面で実施され、最終リフトでは底盤面についても実施した。調査方法は、掘削面での地質観察と写真撮影の2つの方式が採用された。地質観察では、岩盤等級や、観察される岩盤亀裂（発破によって生じたと判断されるものは除く）のうちトレース長（掘削壁面と亀裂面の交線）が3m程度以上のものを中心にその方向、位置、開口程度、湧水状況、狭在物の有無等が調査された。この調査は、掘削壁面に存在する不安定なキーブロックの検知とその支保対策の検討など施工の安全管理のためのデータを提供することを主目的としているが、写真撮影調査データの解析結果の検証にも利用される。ここでは主に写真撮影による調査とその解析に絞って述べる。

掘削壁面の写真画像を利用した岩盤亀裂の調査は、に示すような作業手順によってなされた。掘削面の写真は、各リフト掘削完了直後から吹付けコンクリートが施工されるまでの間にに示すように、掘削面の正面より4~5m離れた位置から隣接撮影面と50%のオーバーラップ幅を確保して撮影された。また、空洞内に設定した座標系に対する各撮影画像の位置関係を明らかにすると同時に、画像のひずみを修正するため、掘削壁面上にに示すように水平および鉛直方向のスケールを入れた。撮影された画像は画像処理システムを利用して原画像のひずみ修正、亀裂トレース線の抽出を行った後、撮影日時、整理番号等の識別情報とともに光ディスク上に保存される。さらにこれらのトレースデータは、最終リフトの掘削が完了した時点で、発電機室側壁面、妻壁面、底盤面ごとに亀裂面のトレースマップとして合成される。このようにして作成されたトレースマップは、次章以降に述べ

る地下空洞周辺の岩盤内に存在する亀裂群の分布を推定するための基本データとして使用される。

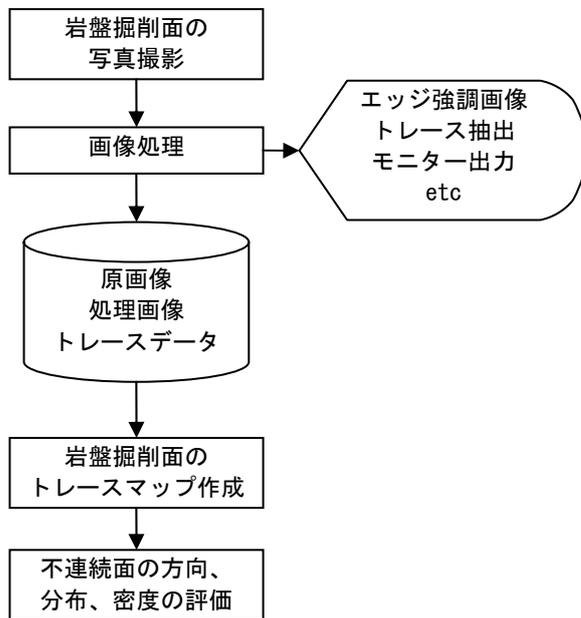


図-2.24 写真画像による調査評価手順

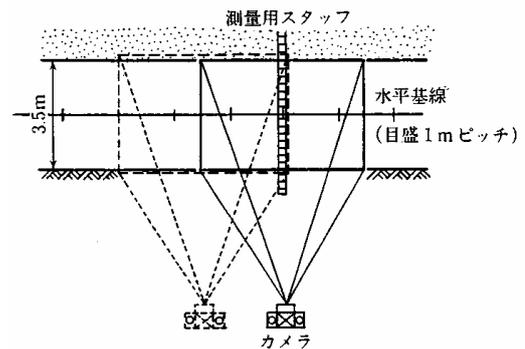


図-2.25 掘削壁面の写真撮影

2.5.3 不連続面分布の評価方法

本発電所地下空洞周辺の岩盤中に存在する不連続面群の空間的分布を推定するため、ステレオロジーの理論^{23),24)}を岩盤工学の分野に応用する目的で草深^{25),26)}によって示された手法を採用する。この手法は、岩盤の切断面（掘削面）で観察される亀裂面と切断面の交線（トレース）分布から、亀裂面の空間的な幾何学関係を利用することにより、岩盤内部の亀裂面の方向性と分布密度を推定しようとするものである。この理論のうち、次節の理解を容易にするために、互いに直交する3つの掘削面のうちいずれか2つの掘削面で観察されるトレースの卓越方向が岩盤中に設定した直交座標軸（通常は、直交する3つの掘削面の交線に一致させる）と平行となる特別な場合、すなわち1つまたは2つの掘削面に直交するような亀裂面について、以下に詳細に解説しておくことにする。

なお本文では、岩盤の不連続性を特徴付ける因子を亀裂面の方向性と分布密度に絞って議論するが、もちろん空洞の力学的安定性等を検討する際には、亀裂面の開口幅、狭在物、湧水等の影響についても十分配慮することが必要である。

(1) 掘削面で観察される不連続面トレースの方向性と分布密度の推定

方向性をもって不連続面群が分布する岩盤を任意の掘削面（平面）で切ると、この掘削面に現われるトレースは、掘削面上に方向性をもって分布するものと考えられる。このような

掘削面で観察されるトレースの方向性と分布密度は、ステレオロジーの理論を用いて次の手順に従って評価することができる。

まず、岩盤中に直角座標系(X_1, X_2, X_3)を固定し、それぞれ3つの座標軸に直交する観察掘削面を X_1 面、 X_2 面、 X_3 面とする。これら各掘削面上のトレースの方向 θ_i ($i=1, 2, 3$)を図-2.26に示すように X_i 面内で X_{i+1} 軸 ($i+1=4$ のときは $i+1=1$) の方向から左回転に計るものとする。

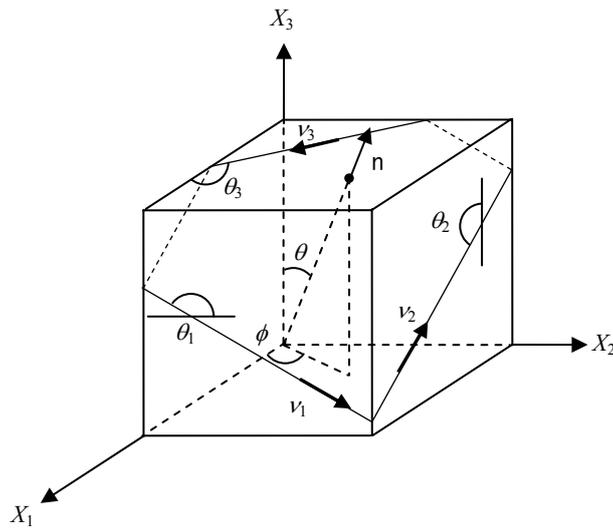


図-2.26 不連続面およびトレース方向のベクトルの定義

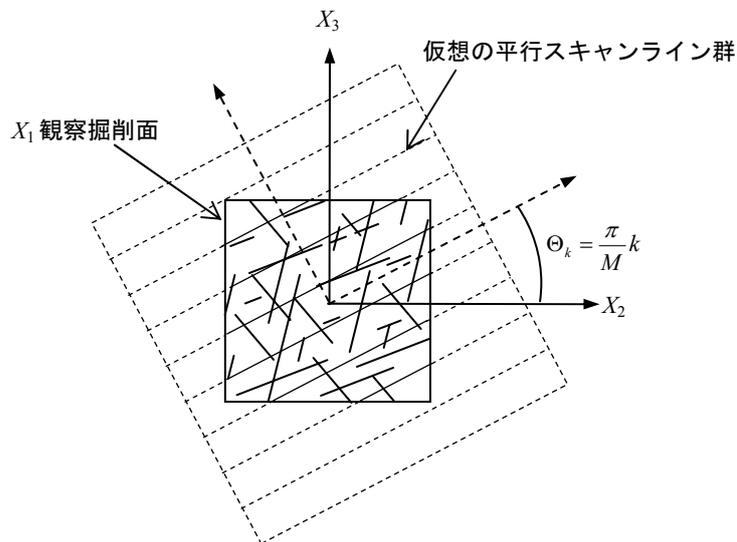


図-2.27 等間隔の平行スキャンライン

次に、図-2.27に示すように、 X_1 面上に傾き Θ_k の多数の平行スキャンラインを引く。

$$\Theta_k = \frac{\pi}{M}k \quad 0 \leq \Theta_k < \pi \quad (k = 0, 1, 2, \dots, M-1) \quad (2.31)$$

Θ_k 方向のすべてのスキャンラインと X_i 面上に分布するトレースとの総交点数 N_k を数え、この方向のスキャンライン単位長さ当たりの平均交点数 \bar{N}_k を計算する。

$$\bar{N}_k = \frac{N_k}{L_k} \quad (2.32)$$

ただし、 L_k は Θ_k 方向のスキャンラインの総長で図-2.27に示すスキャンライン群の実線部分の総長さである。

係数 C, A_n, B_n を次式に従って計算する。

$$\begin{cases} C \cong 2 \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \frac{\pi}{M} = \frac{2\pi}{M} \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \\ A_n \cong 2 \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \cos\left(\frac{n\pi k}{M}\right) / \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \\ B_n \cong 2 \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \sin\left(\frac{n\pi k}{M}\right) / \sum_{k=0}^{M-1} \bar{N}_k \end{cases} \quad (2.33)$$

X_i 面上に分布するトレースの分布密度関数 $f_i(\theta_i)$ は、次式で計算される。

$$f_i(\theta_i) = \frac{C}{8\pi} \left\{ 1 - \sum_{n=2}^{\infty} (n^2 - 1) \times (A_n \cos n\theta_i + B_n \sin n\theta_i) \right\} \quad (2.34)$$

3つの掘削面上のトレースの分布密度関数のグラフから図-2.28に示すように、各掘削断面におけるトレースの卓越方向を卓越度合の大きい順に適当にそれぞれ n, m, l 個選び次のように表わす。

$$X_1 \text{面} : \theta_{11}, \theta_{12}, \theta_{13}, \dots, \theta_{1n}$$

$$X_2 \text{面} : \theta_{21}, \theta_{22}, \theta_{23}, \dots, \theta_{2m}$$

$$X_3 \text{面} : \theta_{31}, \theta_{32}, \theta_{33}, \dots, \theta_{3l}$$

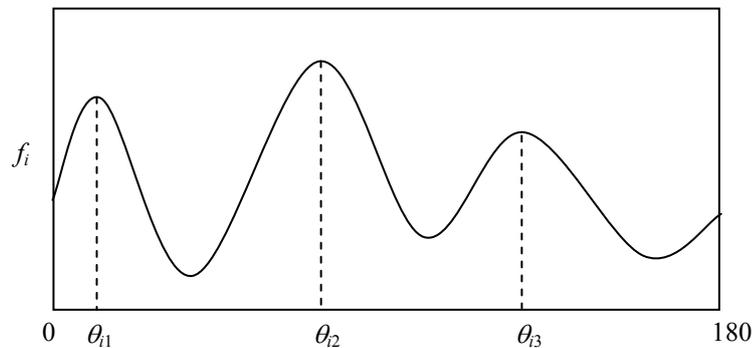


図-2.28 X_i 面におけるトレースの方向性とその卓越角度

これらの3つの掘削面におけるトレースの卓越角は、空間中に卓越した方向をもって分布する亀裂面群により作られるものであるとする。このように考えると、3つの掘削面上に現われるトレースは完全に独立した分布を与えるものではなく、互いに幾何学的な関連をもつことになる。したがって、ある1つの亀裂面群に対し、 X_1 面、 X_2 面、 X_3 面での1組の卓越角の組合せ $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ が決定されるはずである。

この場合、卓越角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ と分布密度関数 $f_1(\theta_1), f_2(\theta_2), f_3(\theta_3)$ には以下の関係がある²⁵⁾。

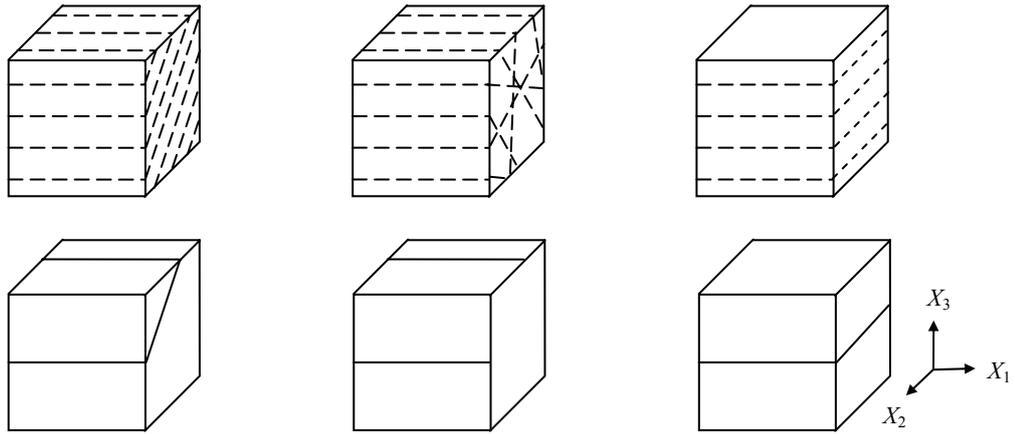
$$\tan \theta_1 \tan \theta_2 \tan \theta_3 = -1 \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} \frac{f_1(\theta_1)}{f_2(\theta_2)} &= \left| \frac{\sin \theta_2}{\cos \theta_1} \right| \\ \frac{f_2(\theta_2)}{f_3(\theta_3)} &= \frac{|\cos \theta_1|}{\sqrt{\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2}} \\ \frac{f_3(\theta_3)}{f_1(\theta_1)} &= \frac{\sqrt{\cos^2 \theta_1 \cos^2 \theta_2 + \sin^2 \theta_1 \sin^2 \theta_2}}{|\sin \theta_2|} \end{aligned} \quad (2.36)$$

(2) 座標軸に平行なトレースをもつ不連続面群の分離

互いに直交する3つの掘削面で観察されるトレースの分布密度関数 $f_1(\theta_1), f_2(\theta_2), f_3(\theta_3)$ から座標軸と平行なトレースをもつ不連続面群を分離する。ここで、不連続面群とは、個々の不連続面の方向がある1つの卓越方向によって代表される1つの母集団に属するような不連続面の一群（その亀裂面群に属する個々の亀裂面の方向の平均値を卓越方向とするような亀裂面の母集団）をいうものと定義する。また、この亀裂面群によって掘削面上に現われるトレース群も図-2.28に示すようなある卓越方向を形成するものと仮定する。

図-2.29は、直交する3つの掘削面に現われる亀裂面のトレースが1つあるいは2つの座標軸と平行となる特別な場合についての基本的なトレースの分布パターンを示したものである。これらの基本形について亀裂面群の分離を行う。



(a) 互いに平行な不連続面の
トレースが1つの座標軸と
平行に現れる場合

(b) 互いに平行でない不連続面の
トレースが1つの座標軸と
平行に現れる場合

(c) 互いに平行な不連続面の
トレースが2つの座標軸と
平行に現れる場合

図-2.29 座標軸と平行なトレースを有する不連続面群

a) 互いに平行な不連続面のトレースが1つの座標軸と平行に現れる場合

これは、図-2.29(a)の場合であり、考察を簡単にするために図-2.30(a)に示すように X_1 面、 X_3 面のトレースが X_2 軸と平行な単一亀裂面群を考えることにし、この亀裂面群の各掘削面におけるトレースの卓越角を $\theta_1 = 0^\circ$, $\theta_2 = \theta_2$, $\theta_3 = 90^\circ$ 、対応するトレースの分布密度を $f_1(0)$, $f_2(\theta_2)$, $f_3(90)$ とする。これら3つの掘削面上でのトレースの分布密度 $f_1(0)$, $f_2(\theta_2)$, $f_3(90)$ の間の関係を求めるために、図-2.30(b)に示すように座標軸 (X_1, X_2, X_3) を X_2 軸まわりに回転し、 X_3' 軸が X_2 掘削面上の亀裂面のトレース方向と一致するように新しい座標軸 (X_1', X_2', X_3') を選ぶ。

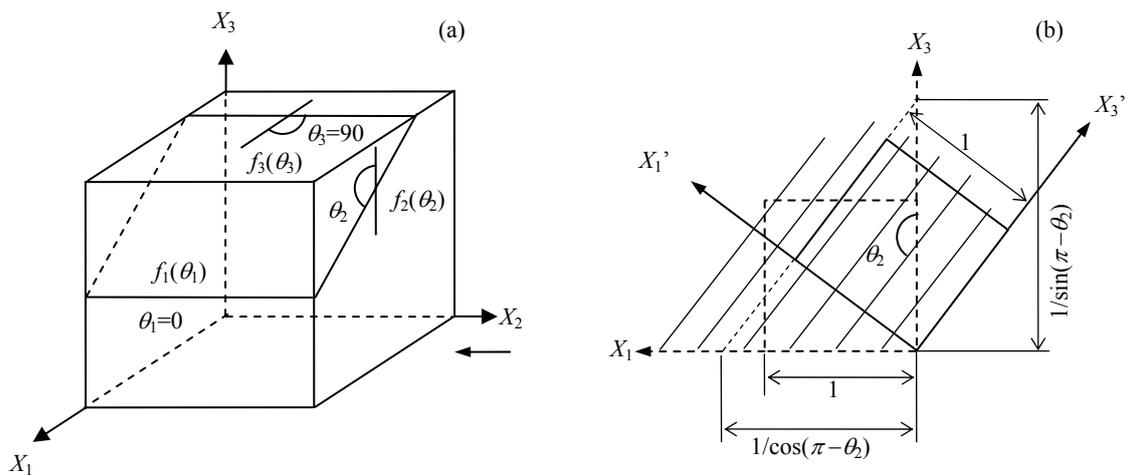


図-2.30 X_2 軸と平行な不連続面の各掘削断面における分布密度の関係

(X_1', X_3') 平面上で X_1' 軸、 X_3' 軸を含む単位面積の正方形内には方向角の分割幅を $\Delta\theta$ として、 $\theta_2 \pm \Delta\theta/2$ の区間の方向を有するトレースが総長で $f_2(\theta_2)\Delta\theta$ 存在するから、 X_1' 軸に平行な単位長さの任意のスキャンラインとトレースの交わる確率、すなわち、単位長さ当たりの交点数は $f_2(\theta_2)\Delta\theta/1=f_2(\theta_2)\Delta\theta$ である。一方、元の座標軸 X_1 軸、 X_3 軸方向のスキャンラインとトレースの交わる確率（交点数）は、単位長さ当たり、それぞれ

X_1 軸方向のスキャンライン単位長さ当たり

$$\bar{S}_1 = f_2(\theta_2)\Delta\theta|\cos(\pi - \theta_2)| = f_2(\theta_2)\Delta\theta|\cos(\theta_2)| \quad (2.37)$$

X_3 軸方向の試験直線単位長さ当たり

$$\bar{S}_3 = f_2(\theta_2)\Delta\theta|\cos(\pi - \theta_2)| = f_2(\theta_2)\Delta\theta|\sin(\theta_2)| \quad (2.38)$$

また、**図-2. 30(a)** で X_1 , X_3 掘削面上でのトレースの分布密度は $f_1(0)$, $f_3(90)$ であるから、単位面積当たりのトレースの総長はそれぞれ $f_1(0)\Delta\theta$, $f_3(90)\Delta\theta$ である。したがって、 X_3 掘削面上においた X_1 軸方向のスキャンラインおよび X_1 掘削面上においた X_3 軸方向のスキャンラインと各掘削面上のトレースとの交わる確率は、

X_1 軸方向の試験直線単位長さ当たり

$$\bar{S}_1 = f_3(90)\Delta\theta/1 = f_3(90)\Delta\theta \quad (2.39)$$

X_3 軸方向の試験直線単位長さ当たり

$$\bar{S}_3 = f_1(0)\Delta\theta/1 = f_1(0)\Delta\theta \quad (2.40)$$

したがって、式(2.37)～式(2.40)の4つの式から、 X_1 , X_3 掘削面上でのトレースの分布密度と X_2 掘削面上でのトレースの分布密度の間に次式の関係が存在する、

$$\begin{cases} f_3(90) = f_2(\theta_2)|\cos(\theta_2)| \\ f_1(0) = f_2(\theta_2)|\sin(\theta_2)| \end{cases} \quad (2.41)$$

上式は、亀裂の方向がほとんど一定とみなせる微小角 $\Delta\theta$ の区間に分布する亀裂面群について考察した結果である、しかしながら実際問題では、ある卓越方向を中心に亀裂の方向がかなりの広い範囲に分布する亀裂をまとめて1組の亀裂面群として扱う場合がほとんどで、かつ実務的である。そこで**図-2. 28**に示したようなトレースの分布図において、トレースの方向が1つの卓越角を中心とする1山分を1組の亀裂面群に対応させるものとし、かつ式(2.37)～式(2.40)を利用できるものと仮定する。この仮定がどの程度認め得るものであるかについて

の厳密な理論的検討を要することはいうまでもないが、ここではそこまで深く立ち入らず、後述する実際の岩盤への適用結果の範囲でのみ考察するにとどめる。また、以下の記述を簡単にするため 1 つの亀裂面群によって構成される各掘削面上のトレースについて次式を定義する。

$$F_i(\theta_p) = \int_p f_i(\theta_i) d\theta_i \quad (i=1,2,3) \quad (2.42)$$

ただし、 θ_p は i 軸に直交する掘削面上のトレースの p 番目の卓越角を表わし、積分は卓越角 θ_p を中心とした $f_i(\theta)$ の 1 山分の積分を表わす。

以上の仮定に基づき、トレースの卓越方向が X_i 軸に平行となる場合について式(2.41)を書き直すと、

$$\begin{cases} F_{i+1}(90) = \int_{90} f_i(\theta_i) |\cos \theta_i| d\theta_i \\ F_{i+2}(0) = \int_0 f_i(\theta_i) |\sin \theta_i| d\theta_i \end{cases} \quad (2.43)$$

ただし、 $i: 1, 2, 3$

$i+1, i+2: 4$ 以上の数字なる場合は、その数字から 3 を引いた数字とする。

b) 互いに平行でない不連続面のトレースが 1 つの座標軸と平行に現れる場合

これは、**図-2.29(b)**の場合であり、2 つの掘削面上のトレースが 1 つの座標軸と平行で、他の 1 つの掘削面上のトレースは方向性をもたないランダムな分布を示す場合である。 X_2 軸に平行なトレースをもつ亀裂面群を考えることにすると、 X_2 掘削面上でのトレースの分布は方向 θ_2 に無関係に一定の分布密度 f_2 でランダムに分布する。この分布密度 f_2 に対応して、平行なトレースの現われる他の 2 つの掘削面 (X_3 掘削面、 X_1 掘削面) 上にはそれぞれ等しい分布密度 $f_3(90) = f_1(0)$ のトレースが現われる。したがって、 X_2 掘削面上の微小角 $\Delta\theta$ に対応する X_3 および X_1 掘削面上の分布密度は式(2.41)より、

$$F_3(90) = F_1(0) = 2 \int_0^{\pi/2} f_2 \cos \theta d\theta = 2f_2 \quad (2.44)$$

である。前記 a) と同様に、上式を X_i 軸に平行なトレースをもつ亀裂面群について書き直すと、

$$F_{i+1}(90) = F_{i+2}(0) = 2f_i \quad (2.45)$$

ただし、 $i: 1, 2, 3$

$i+1, i+2 : 4$ 以上の数字なる場合は、その数字から 3 を引いた数字とする。

c) 1 つの掘削面に平行な不連続面群の場合

これは、図-2. 29(c)の場合であり、亀裂面が互いに直交する 3 つの掘削面のいずれか 1 つに平行な亀裂面群の場合であり、図から簡単に、

$$F_i(0) = F_{i+1}(90) \quad (2.46)$$

$F_{i+2} : F_i(0), F_{i+1}(90)$ に対応する f_{i+2} の卓越角は存在しない。

(3) 不連続面群の空間的分布密度の推定

互いに直交する 3 つの掘削面上で観察されるトレースの分布 $f_1(\theta_1), f_2(\theta_2), f_3(\theta_3)$ をもつ亀裂面群の分布密度 D は、下式によって与えられる²⁵⁾。

$$X_1 \text{面} \quad D = \frac{F_1}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cdot \cos^2 \phi}} \quad (2.47)$$

$$X_2 \text{面} \quad D = \frac{F_2}{\sqrt{1 - \sin^2 \theta \cdot \sin^2 \phi}} \quad (2.48)$$

$$X_3 \text{面} \quad D = \frac{F_3}{\sqrt{1 - \cos^2 \theta}} \quad (2.49)$$

ただし (θ, ϕ) は図-2. 26に示すように亀裂面の単位法線ベクトル $\mathbf{n}(\theta, \phi)$ の方向を表わし、 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を用いて下式により決定される。

$$\cos \theta = \frac{-\cos \theta_i \sin \theta_j}{\sqrt{\cos^2 \theta_i + \sin^2 \theta_i \sin^2 \theta_j}} \quad (2.50)$$

$$\tan \phi = \tan \theta_i \tan \theta_j \quad (2.51)$$

すなわち、3 つの掘削面で観察されるトレースの方向角 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ によって決定される法線ベクトル \mathbf{n} をもつような亀裂面群は、岩盤の単位体積当たりに D の面積をもって存在することになる。

2.5.4 不連続面群の定量的評価

本節では、赤石水力発電所地下空洞周辺の岩盤中に存在する亀裂について、前節で述べたステレオロジック的手法に従ってその分布の形態を評価する。

写真撮影による亀裂調査結果は、前節で述べた岩盤内の亀裂分布の定量評価に必要なデータを提供するものである。地下空洞の掘削岩盤面全域で撮影された写真画像から掘削面と亀裂面の交線、すなわちトレースのみを抽出・作成したトレースマップを図-2.31に示す。2.5.2節で述べたように、目視による地質観察ではトレース長が3m以上のものについてのみ調査したが、このトレースマップは写真撮影による調査で得られた画像から判読・抽出できるすべてのトレース（発破によるものと判断されるものを除く）が示されている。

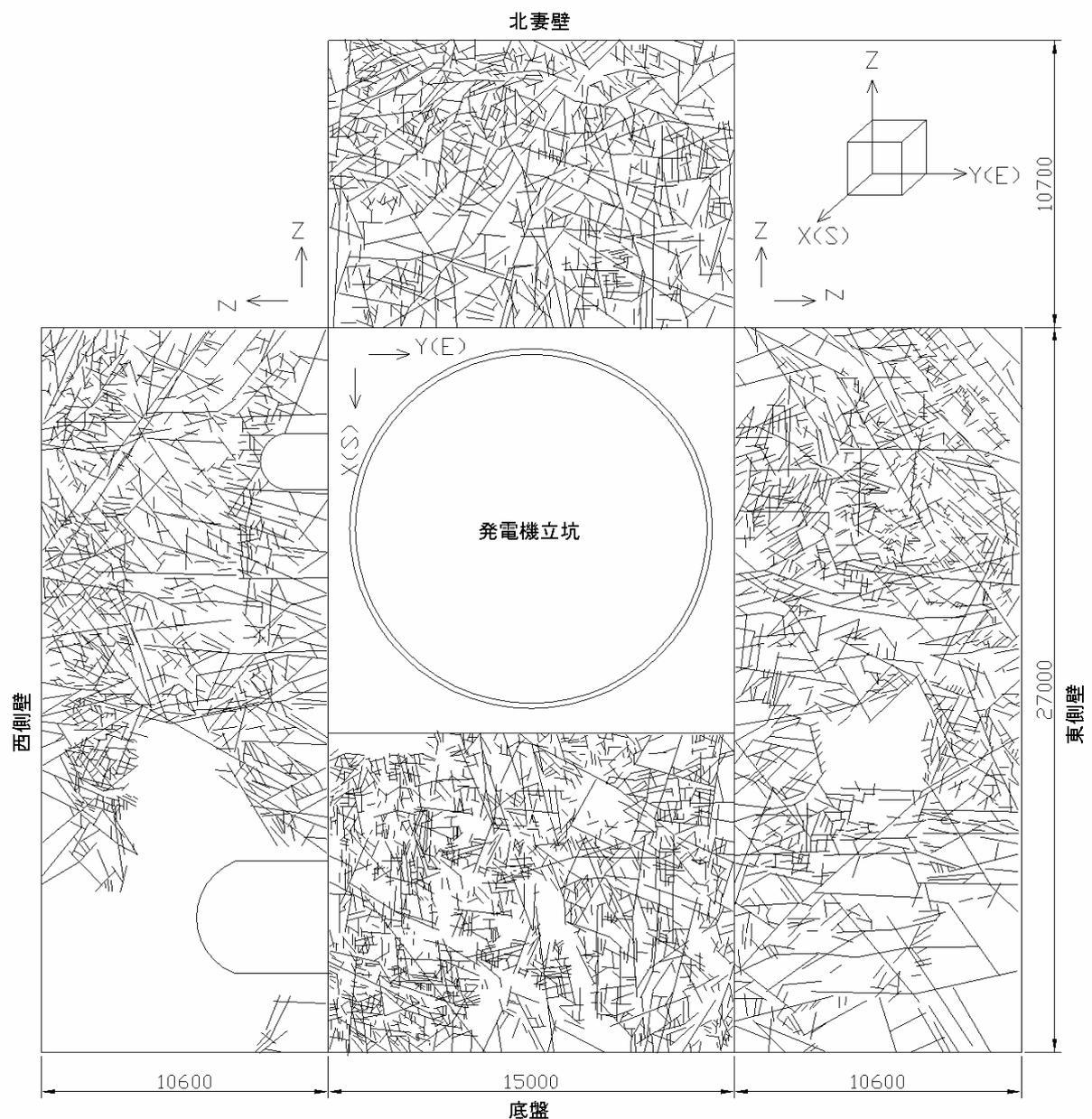
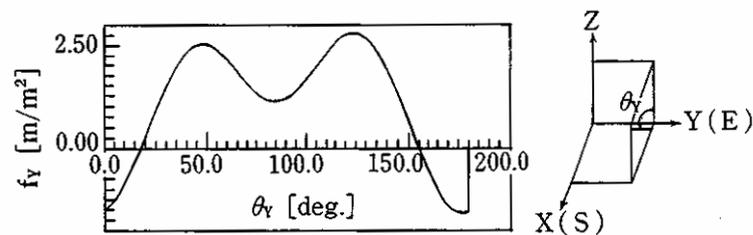


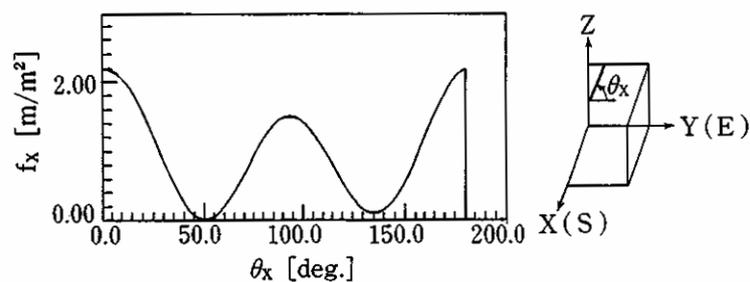
図-2.31 掘削岩盤面の写真画像より抽出された不連続面トレースマップ

以下では、互いに直交する掘削面のうち、東側壁面、北妻壁面、底盤面の3つのトレースマップを利用して、本地下空洞周辺岩盤中に分布する亀裂面を定量化することとする。

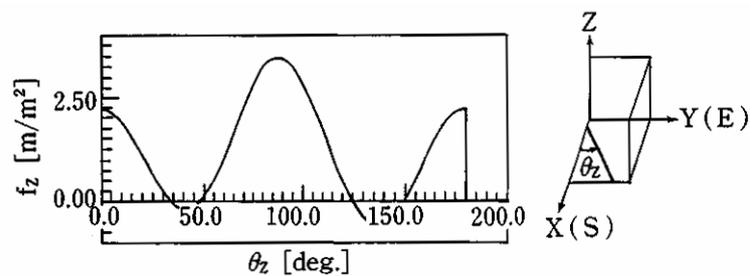
まず基準となる岩盤中の座標系を図-2.31に示すように設定し、各掘削面上のトレースの分布密度関数 $f_x(\theta_x)$, $f_y(\theta_y)$, $f_z(\theta_z)$ を2.5.3(1)で述べた手順に従って決定した。図-2.32は、東側壁、北妻壁、底盤面のトレースの分布密度の推定結果を示したものである。ただし、試験直線とトレースとの交点数の測定にあたっては、間隔0.5mピッチの試験直線群をこれら3つのトレースマップ上において、それぞれ角度 $\Delta\theta=2^\circ$ ピッチで $0\sim 180^\circ$ まで回転させた。また、式(2.33), 式(2.34)の項数は、 $n=2, 4, 6, 8, 10$ の5項までとした。



(a) 東側壁面で観察されるトレース分布



(b) 妻壁面で観察されるトレース分布



(c) 底盤面で観察されるトレース分布

図-2.32 トレース分布密度関数の評価結果

図-2.32より、地下空洞周辺の岩盤中に存在する亀裂面群は、掘削面に現われるトレースが座標軸と平行（図-2.32では、北妻壁でY, Z軸に、底盤面でX, Y軸にそれぞれ平行な卓越方向をもつ2組のトレース群が存在）となる前節で述べた特別な場合に相当する。すなわち、存在する亀裂面群は、その卓越方向がA亀裂面群（ $\theta_x=90^\circ, \theta_z=0^\circ$, 対応する $f_Y(\theta_Y)$ のピーク値は存在しない）、B亀裂面群（ $\theta_x=0^\circ, \theta_y=40^\circ, \theta_z=90^\circ$ ）、C亀裂面群（ $\theta_x=0^\circ, \theta_y=132^\circ, \theta_z=90^\circ$ ）の3つに分解することができる。明らかに、図-2.33に示すようにA亀裂面群はy面に平行で、B, C亀裂面群のトレースとは完全に独立している。また、B, C亀裂面群のトレースはY面で互いに異なる卓越方向を示すものの、X, Z面においてY軸に平行に互いに重なり合って現われる。以上の点に注意して、それぞれの亀裂面群の分布密度を前節の手法に従って推定する。

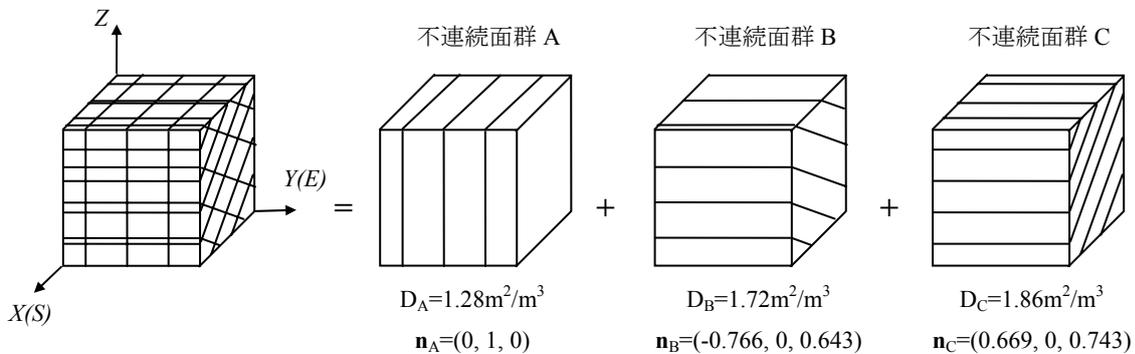


図-2.33 推定された3つの不連続面群の方向と分布密度

a) A不連続面群（ $\theta_x=90^\circ, \theta_z=0^\circ$ ）

この不連続面群は図-2.29(c)の場合に相当し、式(2.46)の積分範囲を θ_x に関して $50^\circ\sim 135^\circ$ 、 θ_z に関して $0^\circ\sim 40^\circ, 135^\circ\sim 180^\circ$ として図-2.32(b),(c)の f_x, f_z を数値積分すると、

$$F_X(90) = 1.22$$

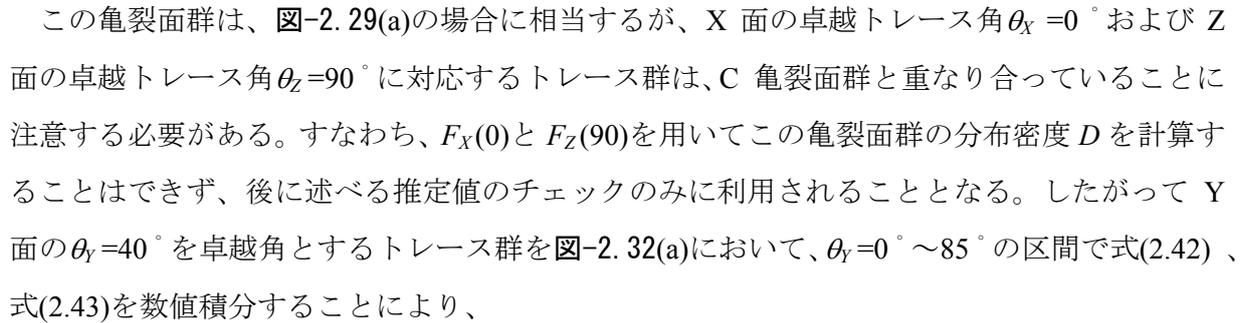
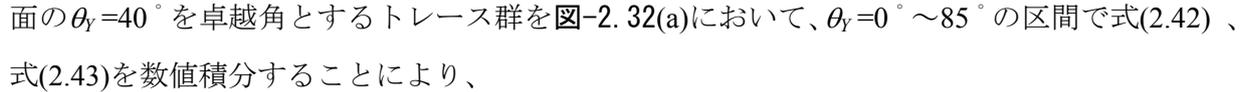
$$F_Z(0) = 1.35$$

を得る。これらの平均をとって、

$$F_X(90) = F_Z(0) = (1.22+1.35)/2 = 1.28$$

と仮定する。厳密には、 $F_X(90)=F_Z(0)$ でなければならないが上記の結果には約10%程度の誤差を生じている。これは、観察する掘削面の仕上り状態、写真撮影の証明条件等が直交する3つの掘削面で完全に同一な理想的条件を整えることが現実には難しいこと、また亀裂面が必ずしも平面でなくかつ形状も等方的な広がりをもっていないなどの理由によるものと思われる。次に、この亀裂面群の面積密度 D を式(2.47)、式(2.49)に従って計算すると、 $\theta=\phi=90^\circ$ （極座標で表わした亀裂面の法線ベクトルの方向）であることから、 $D=1.28\text{m}^2/\text{m}^3$ を得る。

b) B 不連続面群 ($\theta_x = 0^\circ$, $\theta_y = 40^\circ$, $\theta_z = 90^\circ$)

この亀裂面群は、の場合に相当するが、X 面の卓越トレース角 $\theta_x = 0^\circ$ および Z 面の卓越トレース角 $\theta_z = 90^\circ$ に対応するトレース群は、C 亀裂面群と重なり合っていることに注意する必要がある。すなわち、 $F_x(0)$ と $F_z(90)$ を用いてこの亀裂面群の分布密度 D を計算することはできず、後に述べる推定値のチェックのみに利用されることとなる。したがって Y 面の $\theta_y = 40^\circ$ を卓越角とするトレース群を において、 $\theta_y = 0^\circ \sim 85^\circ$ の区間で式(2.42)、式(2.43)を数値積分することにより、

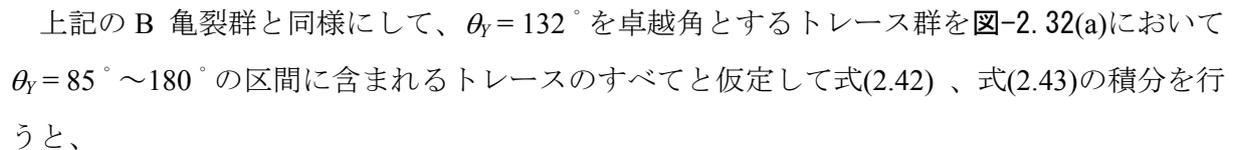
$$F_y(40) = 1.72$$

$$F_z(90) = 1.35$$

$$F_x(0) = 1.10$$

となる。式(2.47)～式(2.49)によりこの亀裂面群に含まれる亀裂面の面積密度は、この亀裂面群の法線ベクトルの方向 $\theta = 50^\circ$, $\phi = 180^\circ$ を用いて $D = 1.72 \text{ m}^2/\text{m}^3$ となる。

c) C 不連続面群 ($\theta_x = 0^\circ$, $\theta_y = 132^\circ$, $\theta_z = 90^\circ$)

上記の B 亀裂群と同様にして、 $\theta_y = 132^\circ$ を卓越角とするトレース群を において $\theta_y = 85^\circ \sim 180^\circ$ の区間に含まれるトレースのすべてと仮定して式(2.42)、式(2.43)の積分を行うと、

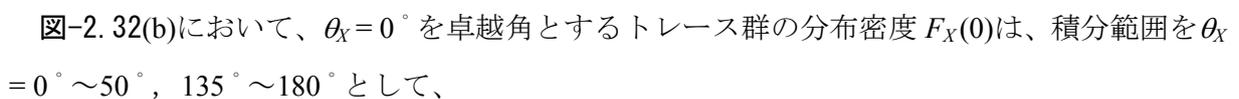
$$F_y(132) = 1.86$$

$$F_z(90) = 1.24$$

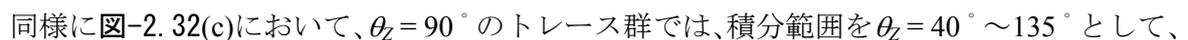
$$F_x(0) = 1.38$$

となる。この亀裂面群の法線ベクトルの方向は $\theta = 42^\circ$, $\phi = 0^\circ$ であるから、式(2.47)～式(2.49)を用いて、亀裂面群の面積密度 $D = 1.86 \text{ m}^2/\text{m}^3$ を得る。

d) $F_x(0)$ と $F_z(90)$ のトレース群

において、 $\theta_x = 0^\circ$ を卓越角とするトレース群の分布密度 $F_x(0)$ は、積分範囲を $\theta_x = 0^\circ \sim 50^\circ$, $135^\circ \sim 180^\circ$ として、

$$F_x(0) = 2.01$$

同様に において、 $\theta_z = 90^\circ$ のトレース群では、積分範囲を $\theta_z = 40^\circ \sim 135^\circ$ として、

$$F_z(90) = 2.53$$

を得る。すでに述べたように、B, C 亀裂面群のトレースは、X 面, Z 面において、その卓越方向が等しく重なり合って現われるから、上記の積分値は b), c) で求めたそれぞれの値の和に一致することとなるはずであり、推定した亀裂面群の値の 1 つのチェックを与える。すなわち、b), c) の結果より、

$$F_X(0) = 1.10 + 1.38 = 2.48$$

$$F_Z(90) = 1.32 + 1.24 = 2.56$$

であり、 $F_Z(90)$ については、ほとんど一致し、 $F_X(0)$ については約 20%の差を生じた。

以上で、本地下発電所周辺岩盤に分布するであろう亀裂面群の方向性とその分布密度を、岩盤掘削面で撮影された写真画像から抽出された亀裂面のトレース情報を用いて推定することができた。これらの結果をまとめて図-2.33に示すこととする。なお、同図中の D , \mathbf{n} は、各亀裂面群の分布密度（単位体積の岩盤中に含まれる亀裂面群の密度）と法線ベクトルを表わしている。

2.5.5 考察と結果

2.5.4節では、実際の地下発電所空洞周辺の岩盤中に存在する亀裂面の分布について、2.5.3節で示したステレオロジー的手法を用いて評価した。ここでは、この評価結果の妥当性について考察することとする。

図-2.34は、トレース長が 3m 以上の主要亀裂面について、現位置において測定した走向・傾斜データのステレオマップである²⁷⁾。図中 A, B で示した点は、卓越方向であり、それぞれ N20E/88N, N76W/47N である。また、前節での写真画像から抽出したトレースデータを用いて評価した亀裂面群は 3 種類あり、図-2.33に示すこれら 3 つの A, B, C 亀裂面群の方向を走向・傾斜角に変換して表わすとそれぞれ、N8E/90N, N82W/50N, N82W/42S となる。

表-2.4 不連続面の卓越方向の分布

	ステレオネットによる方法	ステレオロジーによる方法	
	走向・傾斜	走向・傾斜	分布密度
A	N20E88N	N8E90N	1.28m ² /m ³
B	N76W47N	N82W50N	1.72m ² /m ³
C	—	N82W42S	1.86m ² /m ³

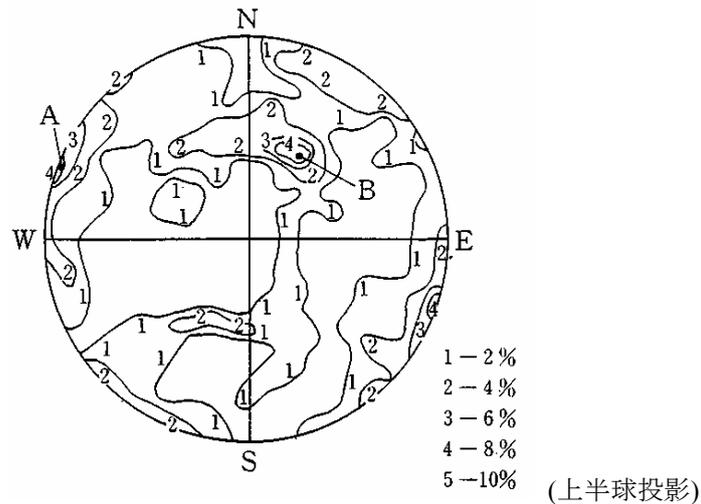


図-2.34 現位置で測定した主要不連続面のステレオマップ

表-2.4には、これら2種類の方法で求めた卓越方向をまとめて示した。両者の卓越方向を比較すると、AおよびB亀裂面群については良く一致しているが、C亀裂面群については、ステレオマップ上では卓越しているとは認められない。また、ステレオロジーでは各卓越方向に属する亀裂面群の密度が、単位体積中に含まれる亀裂面の面積として求まるが、これを見るとステレオマップでは現われなかったC亀裂面群が、 $1.86 \text{ m}^2/\text{m}^3$ で最も大きい。ステレオロジーによる方法がより短いトレースまで考慮に入れていることを考えると、A、B亀裂面群の方向はトレース長が数m以上の比較的大きな亀裂面が多く存在し、C亀裂面群についてはトレース長が数m以下の比較的小さい亀裂面が多数存在している可能性がある。その結果、全体としてはC亀裂面群の密度が大きいのではないかと考えられる。

また、同地点は砂岩層からなり、地質図から判断される層理面の方向はほぼB亀裂面群の卓越方向と一致しており、この方向と直交する方向にC亀裂面群の卓越方向がある。したがって、B亀裂面群は比較的長いトレース長をもつ層理面に平行する亀裂面の一群であり、C亀裂面群の方向は、この層理面と共役な方向に存在する比較的小規模な亀裂面群と判断することができる。

2.6 2章のまとめ

本章では、キーブロック解析の入力情報となる不連続面の調査方法および評価方法について述べたものである。以下に、研究の成果を示す。

- (1) 不連続面の評価項目について示し、キーブロック解析では特に重要な項目となる方向性、ジョイントセット、長さ（連続性）、密度（間隔）という不連続面幾何学性状と不連続面強度について整理するとともに、調査手法と解析のためのモデル化について論じた。不連続面調査では、まず不連続面を決定論的に扱う大規模不連続面と、統計論的に扱う中小規模不連続面に区別することが重要であり、岩盤の変形や崩壊モードを予測し、それに適合した解析モデルを採用することが重要であることを述べた。
- (2) 不連続面のモデル化と評価の一例として、花崗岩地域の露頭調査を実施し、2次元の不連続面ネットワークモデルの作成を行い、透水場としての水みちの形成に注目して、不連続面密度や不連続面の連結性の評価を実施した結果について述べた。作成した不連続面ネットワークモデルにより、不連続面密度が小さい場合は特定の水みちが存在すること、不連続面密度が大きい場合は、不連続面の密集部とそうでない部分が形成され、密集部が主な水みちとなる可能性を示すことができた。
- (3) 不連続面調査の定量化を行う方法として、ステレオロジーによる方法を提案し、地下空洞の現場で不連続面調査を行い本手法の適用を試みた。不連続面調査では、個々の不連続面の位置、方向、長さを直接測定して統計処理により求める方法が一般的であるが、十分な量のデータをサンプリングする必要があり、多大な労力を要する場合が多い。ここでは、間接的に不連続面の方向性と分布密度を定量化する方法として、方向の異なる観察面での不連続面トレースの2次元の分布情報から3次元の不連続面分布を推定する方法を試みた。取得したデータを本手法で解析した結果、3つの不連続面群とそれらの分布密度を特定することが可能となった。また、別途実施した、走向傾斜の測定結果と比較して、整合性のある卓越方向のデータが得られ、本手法の妥当性を示すことができた。

参考文献

- 1) 岩の力学連合会訳：ISRM 指針 Vol.3 岩盤不連続面の定量的記載法，岩の力学連合会，1986
- 2) 中井卓巳，島内哲哉：不連続性岩盤の調査・解析と評価 3. 不連続面の調査と評価（その1），土と基礎，48-1(504)，pp.57-62，2000
- 3) Terzaghi, R., : Sources of error in joint survey, *Geotechnique*, Vol.15, pp.287-304, 1965
- 4) Kulatilake, P.H.S.W. and Wu, T. H., : Sampling bias on orientation of discontinuities, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 17, pp.243-253, 1984
- 5) Yow J. L. : Blind zone in the acquisition of discontinuity orientation data, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Technical Note, Vol.24, No.5, pp.317-318, 1987
- 6) 大西有三，中川誠司，田中誠：岩盤節理の幾何学的分布性状の推定に関する研究，土木学会論文集，第499号/III-28，pp.59-68，1994
- 7) 小島圭二，西村毅：岩盤割れ目系の確率モデルによる評価，第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.1-5，1985
- 8) Priest, S. D., and Hudson, J. A., : Estimation of Discontinuity Spacing and Trace Length Using Scanline Surveys, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol.18, pp.183-197, 1981
- 9) Kulatilake, P.H.S.W. and Wu, T. H. : Estimation of Mean Trace Length of Discontinuity, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 17, pp.215-232, 1984
- 10) Priest, S. D. and Hudson, J.A., : Discontinuity Spacing in Rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.*, Vol. 13, pp.135-148, 1976
- 11) Wallis, P. F. and King, M. S., : Discontinuity Spacing in a crystalline rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.17, pp.63-66, 1980
- 12) Larson, H.J., : Introduction to probability theory and statistical inference, 2nd edition, Wiley, New York, 1974
- 13) 西村毅，小島圭二：割れ目系岩盤の水みちのモデル化—ネットワークモデルを用いた解析—，日本応用地質学会研究発表会予稿集，pp.143-146，1986
- 14) 西村毅，小島圭二：割れ目系中の水みち—モデリングの一例，第18回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.366-370，1986
- 15) Patton, F.D. : Multiple modes of shear failure in rock. *Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon 1, 509-513, 1966
- 16) Barton, N.R. : Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Eng. Geol.* 7, pp.287-332, 1973
- 17) Barton, N.R. : The shear strength of rock and rock joints, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 13, pp.1-24, 1976

- 18) Barton, N.R. and Choubey, V. : The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.* 10(1-2), 1-54, 1977
- 19) International Society for Rock Mechanics Commission on Standardisation of Laboratory and Field Tests. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*15, 319-368. 1978
- 20) 土木学会 : 岩盤斜面の調査と対策,1999
- 21) Barton, N.R. and Bandis, S.C. : Effects of block size on the the shear behaviour of jointed rock. 23rd U.S. symp. on rock mechanics, Berkeley, 739-760, 1982
- 22) 西村毅, 草深守人, 大橋敏行, 西川力 : 水力発電所地下空洞の掘削に伴う岩盤亀裂調査とその定量化, 土木学会論文集 III 卷, Vol.418, III-13, pp.45-54, 1990
- 23) Kanatani, K. : Stereological determination of structural anisotropy, *Int. J. Eng. Sci.*, Vol. 22, No.5, pp.531-546, 1984
- 24) 金谷健一 : 構造異方性によりひずみを決定するステレオロジーの理論, 日本材料学会誌, Vol.20, pp.43-51, 1984
- 25) 草深守人, 浜島良吉, 川井忠彦 : 岩盤中に分布する中小規模亀裂面の定量評価手法, 土質工学会論文報告集, Vol.27, No.4, pp.176-188,1987
- 26) 草深守人 : 岩盤中に分布する不連続面の定量評価手法と岩盤構造解析手法に関する基礎的研究, 東京大学工学博士論文, 1987
- 27) 西村毅, 草深守人, 大野博之, 小島圭二 : 岩盤割れ目系の現地調査をもとにした確率統計的な評価, 第 23 回土質工学研究発表会講演集, pp.1119-1120, 1988

第3章 ブロック理論に関する研究

岩盤中の不連続面に沿った滑りや崩落が岩盤の破壊を支配するような場合は、不連続面を特定することにより極限平衡解析を適用するのが効果的な場合が多い。Wittke¹⁾や Londe²⁾は、くさび状の岩塊を支持し岩盤の安定化を図る方法を提案している。Croney³⁾は、掘削面に現れたジョイントの配置からくさび状岩塊を検出する確定論的方法を示し、不連続面を非常に長い断層とその断層間にのみ存在する短い節理群とに分類し、これらが形成するくさび状岩塊を効果的に選定し、地下空洞掘削時の設計手順を明確に示している。また、Hoek と Bray⁴⁾は、掘削面上に現れたくさび状の岩盤ブロックが安定か否かを図解法により調べるとともに、補強工の設計を行う方法を提案している。これらの手法に対し、ブロック理論は、Goodman と Shi⁵⁾によって開発された新しい岩盤の安定解析手法である。その理論は、岩盤内に存在する不連続面と自由面をなす掘削面の3次元の幾何学的関係から、崩落の可能性のある不安定な岩盤ブロックを見つけだすものである。この不安定ブロックのことをキーブロックと呼び、キーブロックの安定化を図ることで岩盤構造物全体の安定化を図ろうとするのがブロック理論の体系である。

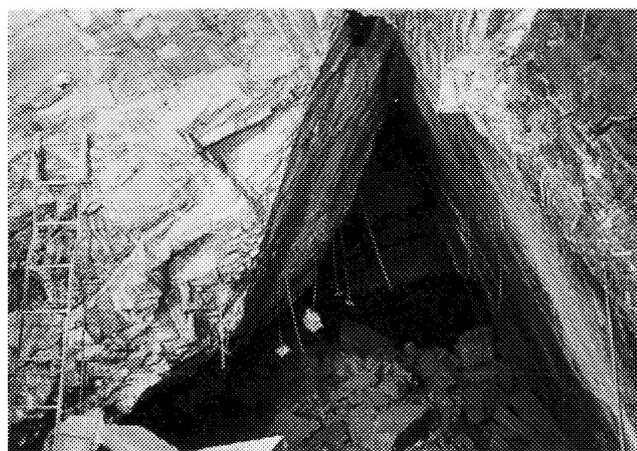
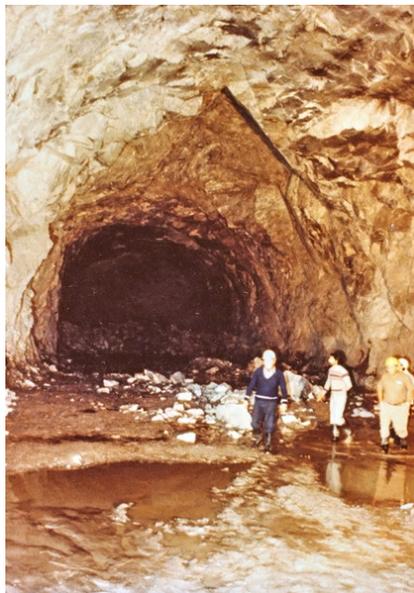


写真-3.1 トンネル天端におけるくさび崩壊事例^{6), 7)}

3.1 キーブロック理論の基本的仮定と岩盤の崩壊形態

キーブロック理論は、不連続面に囲まれた岩盤ブロックの挙動が岩盤全体の安定性を支配するような、硬岩中の不連続性岩盤に適用される理論である。しかしながら、実際の岩盤における不連続面の分布形態や形状は複雑であり、理論を構築するためにはかなりの困難を伴うので、解を得るために簡略化のための仮定をしている。以下にその内容を説明する。

①すべての不連続面は、完全な平面とする。

この仮定は、大部分の節理や断層に当てはまるが、すべてとは言えない。例えば、しゅう曲を伴うような地層面には当てはまらない。ブロックの形態を線形ベクトル方程式で表現するために、完全な平面を仮定することが必要であり、曲面にも適用するためには理論の拡張が必要となる。しかし、現在のブロック理論の中で曲がった不連続面に対しては、いくつかの平面に分けて表現することにより取り扱うことは可能である。

②不連続面は、注目する岩盤領域内で完全に広がっているものとする。

キーブロックとなる領域内では不連続面が途切れることなく、無限な平面として定義されている。このことは、すべてのブロックは既存の不連続面で完全に囲まれていることを示している。安定性を議論する領域に対して、比較的規模の大きい断層や破碎対等は無限平面として扱っても問題はない。しかし、実際の路頭や切羽面で観察される中小規模の不連続面は、有限長である場合が多い。観察面で有限長である不連続面は3次元的にも有限長であると考えべきであり、3次元的な不連続面の形状を考慮すべきである。この問題に関しては、キーブロック理論の拡張に関する研究として、第5章の中で円盤状の不連続面形状を仮定した場合について述べる。

また、キーブロック理論では新しく発生する不連続面は考慮しない。しかしながら、あらかじめ不連続面の発生位置を予測できるのであれば、それを追加して解析するという方法も可能である。

③不連続面で定義されたブロックは剛体と仮定する。

キーブロック理論では、ブロックの変形やゆるみを考慮していない。キーブロックに問題は幾何学と位相幾何学で完全に定式化されている。キーブロック理論を用いて見出したキーブロックに対しては、安定性の検討を行うが、この段階で不連続面の強度特性を導入することになる。キーブロックの各面に摩擦力が作用すると、ブロック面に沿う変形が必然的に生じ、ブロック内に応力とひずみが蓄積される。この場合のブロックの変形は、キ

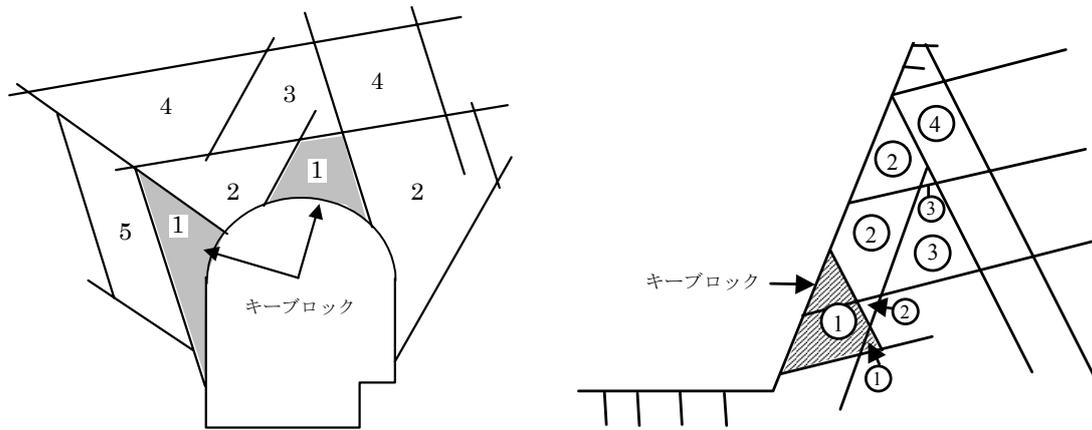
ブロック理論と力学的な数値解析手法をカップリングさせることで調べることができるであろう。

- ④不連続面の幾何学的性状、力学的性状と掘削面の位置・方向などの入力パラメータは、既知であると仮定する。

実際に、不連続面の方向性がいくらかのばらつきを示す場合は、ある卓越方向を不連続面群の代表としてとらなければならない。Monte Carlo シミュレーションで、これらの角度変化が解析結果に与える影響を統計学的に確率論的に議論することは可能である。

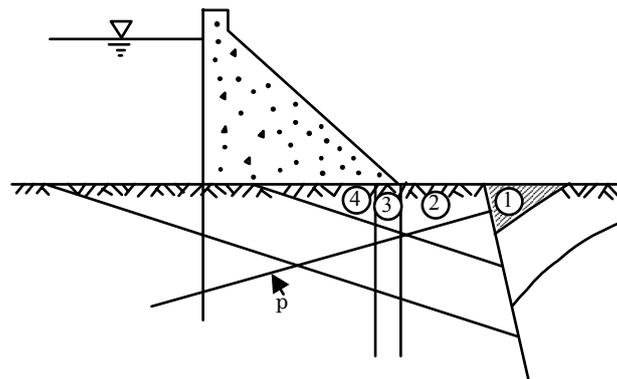
以上をまとめると、ブロック理論は地質構造から導き出した幾何学的情報と簡単な力学を用いる釣り合い計算に基づいて展開するものであり、キーブロック理論はブロックの移動のモードのみを考慮したものである。連続体力学による解析は、キーブロック計算の次の段階で用いられるべきものである。

図-3.1に代表的なキーブロックを2次元の例で示す。図-3.1(a)は地下空洞やトンネルにおけるキーブロックであり、斜線部のブロック1がキーブロックとなっている。このうちアーチ部に存在するブロックは、支保工による補強がなければ直ちに落下する可能性のあるブロックであり、側壁にあるブロックがすべり破壊を起こすか否かはすべり面の持つ強度により決定される。図-3.1(b)は、斜面掘削でのキーブロックの例であり、No.1のブロックがキーブロックとなっている。ここで、重要なことはいずれの例においてもキーブロックの安定性が岩盤構造全体の安定性を支配していることである。すなわち図中の、ブロック1を失うとブロック2、3と次々に崩落が続き空洞や斜面は崩壊に至る。ブロック1が移動した後、どのような過程で破壊に至るかは動的な数値解析をしなければ明らかでないが、その場にブロック1が留まることがその他のブロックの動きを止めることは明らかである。また、図-3.1(c)は、ダム基礎におけるキーブロックを示している。ダムの下にある面 p が、ダムの安定を調べるための計算に用いるべき潜在すべり面と考えられる。しかし、面 p の上の岩盤は、ブロック1がその位置に固定されている限り動かないのでキーブロックとなっている。この例でも同様にキーブロック1が移動すると、続いてブロック2、さらにブロック3と順次、ブロックの移動やころがりによってダム基礎は破壊される。以上の例でわかるように、キーブロック理論では不連続面についての必要な情報を得ることにより、キーブロックを早期に発見し適切な補強を施すことを目的とするものであり、大規模な崩壊を防ぐことが出来るとともに、経済的な構造物の構築を可能にするものである。



(a)地下空洞

(b)斜面掘削



(c)ダム基礎岩盤

図-3.1 キーブロックの例

3.2 ステレオ投影法

ここではベクトル解析法とステレオ投影法について説明する。キーブロック解析では各ジョイントの面はベクトル方程式で記述することによって、ブロックの体積、各面の面積、頂点の位置、交線の位置などのブロック形状に関する諸量を算出している。さらに、自重、外力、摩擦、慣性力、支保反力などの外力が作用する状態でのキーブロックの運動および静的平衡解析を実施することができる。

3.2.1 ステレオ投影法

地質学では、3次元の構造であるジョイント面やベクトルを2次元の平面上でわかりやすく表すために透視投影法を利用しており、等面積投影法や等角投影法などがある。以下にこれらの方法について説明する。

ここで、まず注意しなければならないのは投影方向についてである。球面上の点を平面に投影する場合、球の最上部を焦点として下方に投影する場合を下半球投影 (lower hemisphere projection) あるいは上方焦点投影法 (upper-focal-point projection) と呼んでおり、最下部点を焦点として上方に投影する場合を上半球投影 (upper hemisphere projection) あるいは下方焦点投影法 (lower-focal-point projection) と呼んでいる。どちらの焦点を選択しても両半球 (全球) に存在するすべての点が投影できるが、使用する際にはどちらかの投影法に統一することが混乱を避ける意味で重要なことである。キーブロック解析では投影方向として上半球投影が用いられることが多く、本論文でも多くの場合上半球投影で作図してある。これは、Goodman と Shi が最初にキーブロック理論を発表した際にこの方法でステレオ投影図を作成したためである。ところが、地質学では下半球投影を用いるのが一般的であり、日頃下半球投影法に慣れている者にとっては上半球投影で表現されると少し理解しにくい面がある。したがって、ステレオ投影図を描く場合は、できるだけ投影方向の区別を明記することが望ましい。

(1) 等面積投影(equal-area pojection)

等面積投影は、ランバート投影(Lambert projection)あるいはシュミット投影(Schmidt projection)としても知られているものである。

等面積投影法の利点は球面上の面積が等しく投影されることであり、基準球上のどこに位置していても等面積領域は同じ比率の面積として投影される。この性質は統計処理には便利である。しかし、投影領域の形がひずむ欠点があり、基準球上の円の作図が難しいことである。これに対して次に説明するステレオ投影では、投影された円の軌跡は円になるので作図が簡単である。

(2)ステレオ投影 (Stereographic Projection)

ステレオ投影は、等角投影(equal-angle projection)あるいはウルフ投影(Wulff projection)とも呼ばれるものである。図-3.2はステレオ投影を3次元で表したものである。図では基準球上の大円(great circle)の作図原理を示したものである。大円は基準球と同じ半径を持つ円であり、原点を中心とする円である。この大円を赤道面上に投影することを考える。大円は基準球の最下部にある焦点と大円上の点を結んだ直線と赤道面との交点の集合として投影される。図では大円の最上点 A が A_0 に、最下点 B が B_0 に投影される。この AB を含む鉛直面を示したのが、図-3.3(a)である。図において、直線 AB は鉛直軸と角度 θ だけ傾いているとする。焦点 F から引いた作図線 AF によって、点 A は赤道平面上の点 A_0 に投影される。よって、直線 OA は直線 OA_0 上に投影され、 OA_0 の長さは $R \tan(\theta/2)$ となる。図-3.3(b)は基準球面上の経線と緯線に相当する曲線をステレオ投影したもので、これらの曲線は投影平面上にすべて円弧として投影される。これは、基準球面上の円は投影平面上にも円として投影されることを意味しており、ステレオ投影図の作図を簡単にする。この利点によってステレオ投影図の作図の定式化は、他の正射投影や等面積投影法よりも簡単となる。

表-3.1は、傾斜 α 、傾斜方位 β の場合のステレオ投影面上での諸量の計算式を示したものである。

ステレオ投影では基準球面上の位置によって面積がひずむので、この点については正射投影と等面積投影の中間に位置する投影法とも言える。ステレオ投影法と等面積投影法は、基準球面上の焦点から放射状に引く作図線によって投影するので、基準球上の点はすべて一対一に投影される。

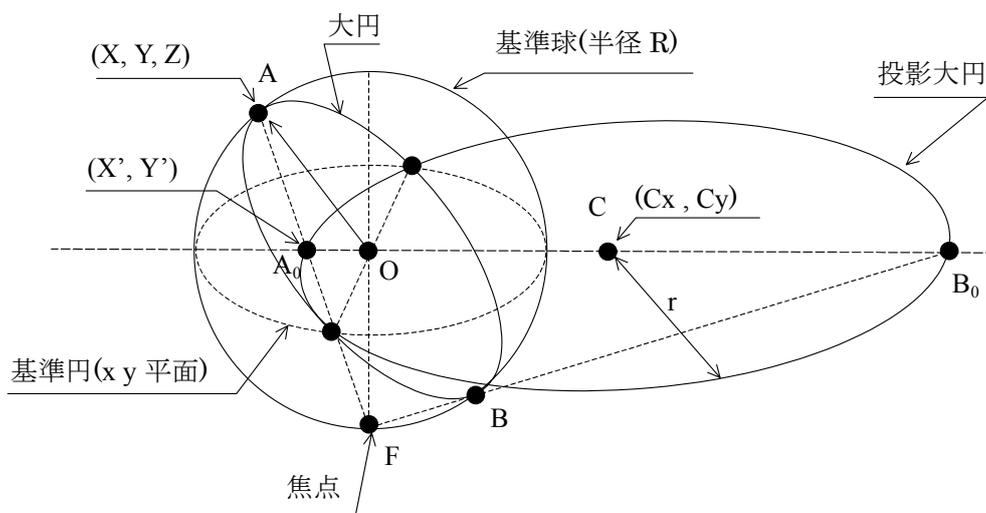


図-3.2 ステレオ投影法 (上半球投影、下方焦点投影法)

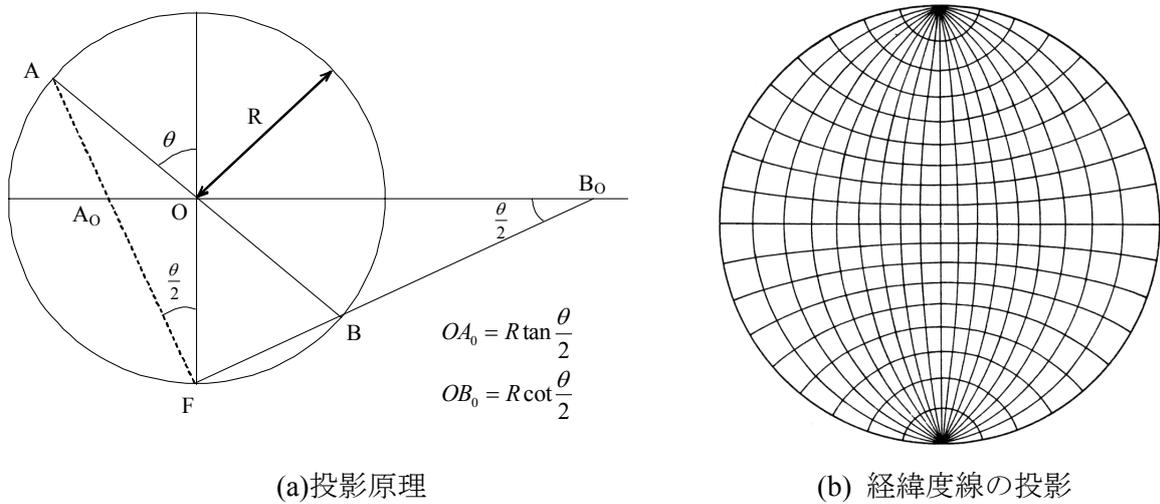


図-3.3 基準球のステレオ投影

表-3.1 ステレオ投影図上の諸量

項目	数式	投影図
傾斜	α	
傾斜方位	β	
大円の半径	$r = R / \cos \alpha$	
大円の中心	$\begin{cases} C_x = R \tan \alpha \sin \beta \\ C_y = R \tan \alpha \cos \beta \end{cases}$	
傾斜ベクトル	$\begin{cases} P_x = R \frac{(\sin \alpha \pm 1) \sin \beta}{\cos \alpha} \\ P_y = R \frac{(\sin \alpha \pm 1) \cos \beta}{\cos \alpha} \end{cases}$	
法線ベクトル(極)	$\begin{cases} N_x = -R \frac{(\cos \alpha \pm 1) \sin \beta}{\sin \alpha} \\ N_y = -R \frac{(\cos \alpha \pm 1) \cos \beta}{\sin \alpha} \end{cases}$	

3.2.2 ブロックのステレオ投影

ここでは、平面によって囲まれているブロックがステレオネット上でどのように表現されるかについて説明する。

P_i を原点 $(0, 0, 0)$ を通る平面とする。平面 P_i に含まれず、点 $(0, 0, 0)$ を始点とするベクトルは平面 P_i の上側半空間、あるいは下側半空間のどちらかに存在する。平面 P_i の傾斜方位を β ($0 \leq \beta \leq 360^\circ$)、傾斜を α ($0 \leq \alpha \leq 90^\circ$) とすると、平面 P_i の単位法線ベクトルは、

$$\hat{n}_i = (\sin \alpha \sin \beta, \sin \alpha \cos \beta, \cos \alpha) \quad (3.1)$$

となる。傾斜角 α は ($0 \leq \alpha \leq 90^\circ$)、 $\cos \alpha \geq 0$ であるから、 \hat{n}_i は上向き、あるいは水平である。よって、単位法線ベクトル \hat{n}_i は上半球に含まれる。平面 P_i は原点 $(0, 0, 0)$ を含むから、平面上の点 $X(x, y, z)$ の満たす方程式は $\hat{n}_i \cdot X = 0$ となる。

P_i の上側半空間を記号 U_i で表し、次式に従うベクトル X の集合として定義する。

$$\hat{n}_i \cdot X \geq 0 \quad (3.2)$$

同様に、 P_i の下側半空間を記号 L_i で表し、次式に従うベクトル X の集合として定義する。

$$\hat{n}_i \cdot X \leq 0 \quad (3.3)$$

平面 P_i のステレオ投影は大円である。上半球投影法において原点 $(0, 0, 0)$ から P_i の上側へ向かう任意のベクトルは、-3.4に示すように大円の内部（斜線部）に投影される。同様に、平面 P_i の下半空間の任意のベクトルは大円の外側に投影される。すなわちステレオネット上に投影された大円の内側が平面の上側を表し、大円の外側が平面の下側を表すことになる。

ここで、平面 P_i が鉛直面のとき、上下で表現するとステレオ投影面上での領域が決定できないように思われる。しかし、 \hat{n}_i を平面 P_i のどちらか1つの方向のベクトルとして決めておけば、半空間を適切に定義することができる。ただし、鉛直面の場合のみ上下の定義を別途考えることは煩雑になるため、鉛直な面はわずかではあるが傾斜させることで煩雑さを避けることができる。例えば、傾斜角が 90° の場合は自動的に 89.9° と 0.1° 傾ける処理をする

ことで、鉛直な面を考慮する必要がなくなる。

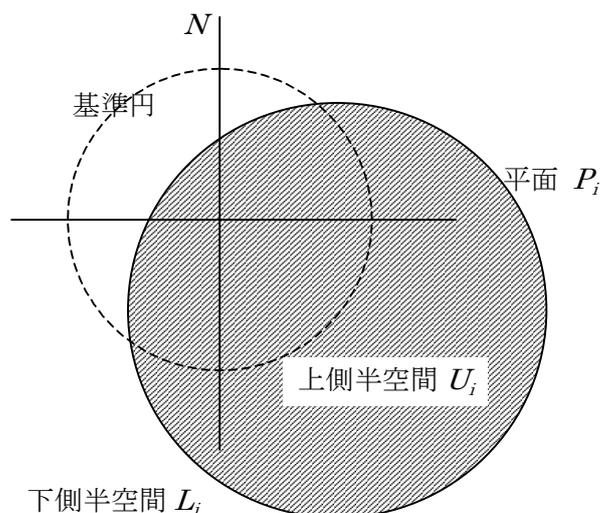


図-3.4 平面 P_i の半空間の上半球投影

今は1個の平面で考えたが、次に複数の平面で囲まれた領域がステレオネット上でどのように表されるか示すことにする。

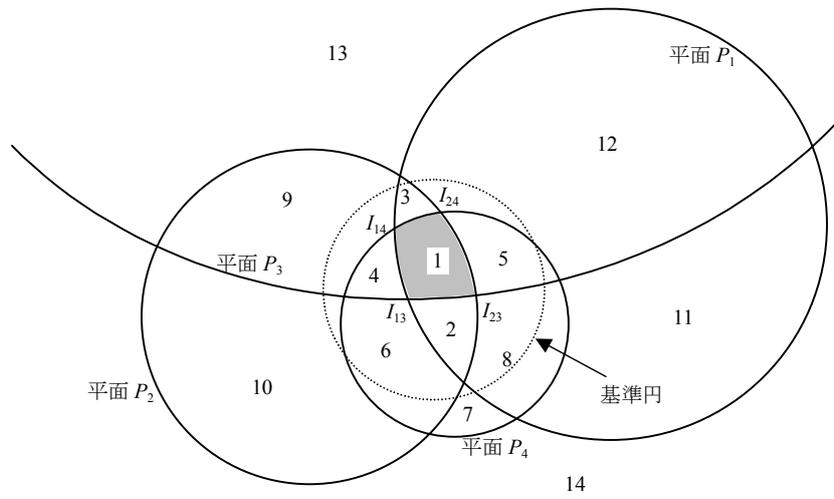
図-3.5(a)は、方向の異なる4つの平面の上半球ステレオ投影図である。点線が基準円であり、実線が4つの平面の大円を表している。それぞれの大円の内部が上側半空間、外部が下側半空間を表すから、これら的大円で区切られた1つの領域は、その領域が4つの平面とどのような上下関係にあるかを示すことになる。例えば、番号1で表される領域は、大円 P_1 ~ 大円 P_4 の内側であるから、面1から面4のすべての面の上側半空間の共通領域で定義される空間を表すことになる。記号で示せば、 $U_1U_2U_3U_4$ となる。また、番号2で表される領域は、大円 P_1 の内側、大円 P_2 の内側、大円 P_3 の外側、大円 P_4 の内側であるから、定義により面1の上側(U_1)、面2の上側(U_2)、面3の下側(L_3)、面4の上側(U_4)の共通領域となる空間($U_1U_2L_3U_4$)を表す。

領域1を表す3次元空間を示したものが図-3.5(b)である。ここでは、4つの面 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 をすべて原点 O を通るようにしてある。このように原点を通る平面の半空間の共通領域として表される空間をブロックピラミッドと呼んでいる。領域1は、半空間 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 の積集合であったから図-3.5(b)の各平面の上側半空間となる。図-3.5(b)でのブロックピラミッドの4つの辺を I_{13} 、 I_{23} 、 I_{24} 、 I_{41} ので表すと、図-3.5(a)の領域1を表わす斜線部の円弧の交点が辺の投影となり、円弧をなす境界は面 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 の投影となる。

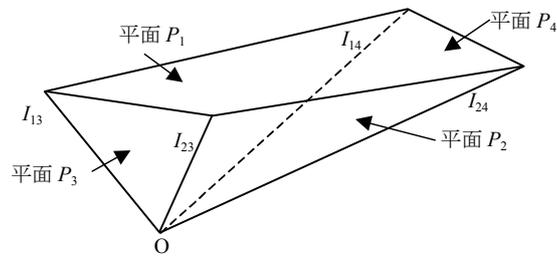
さらに、図-3.5(a)では、4つの大円によって投影面は1~14までの領域に分かれている。

それぞれの領域は、それぞれに対応するブロックピラミッドの空間領域を表すものであり、4つの平面の組み合わせで14個のブロックが形成されることを示している。また、各領域の角に位置する点は領域に対応するブロックピラミッドの稜線のステレオ投影であり、領域の境界をなす円弧はそのブロックピラミッドを構成する面の投影である。

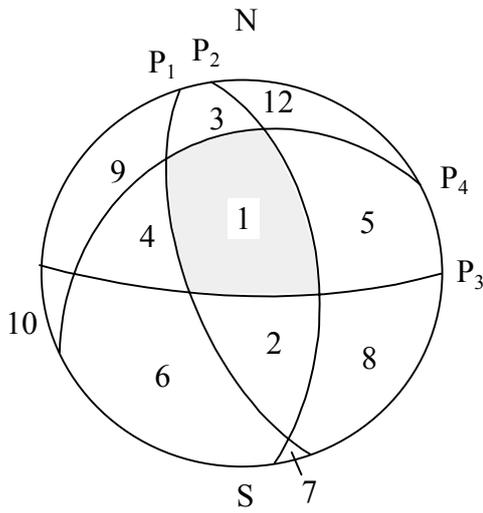
ここで、**図-3.5 (a)**は、ブロックピラミッドの上半球投影であった。上半球投影法のように基準球の最下部の焦点から赤道平面上に投影する方法は、基準球の上半球に現われる領域を表現するのに最も適している。**図-3.5 (c)**、**(d)**に示すように全球の投影を上半球と下半球を2つの図にわけて表現することもできる。**図-3.5 (c)**は最下部の焦点から投影した上半球部分であり、**図-3.5 (d)**は最上部の焦点から投影した下半球部分である。しかし、2つの図に分けて表現すると、**図-3.5 (d)**の円の内部領域は下側半空間 L_i を表すが、**図(c)**において円の内部領域は上側半空間 U_i を表すことに留意しなければならない。よって、2つの投影図に分けて表現することは混乱の原因となるので、1つの焦点を用いて基準球を表現すべきである。



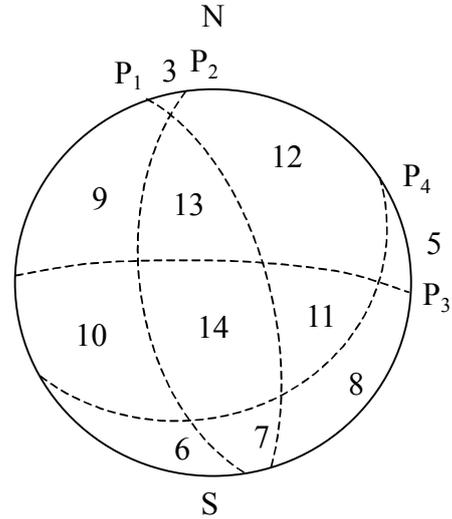
(a) 全球の上半球投影



(b) U_1, U_2, U_3, U_4 の投影 (領域 1)



(c) 上半球投影による上半球



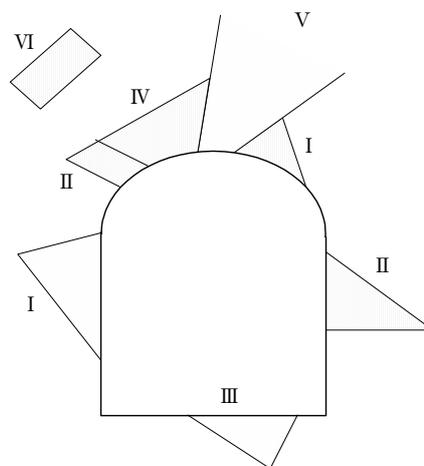
(d) 下半球投影による下半球

図-3.5 ジョイントピラミッドのステレオ投影

3.3 ブロックの移動可能性

3.3.1 ブロックの種類

複数の不連続面と掘削面によって岩盤ブロックが形成されるが、このブロックはいくつかのタイプに分類される。図-3.6はトンネルを例にして、ブロックのタイプを示したものである。タイプVIのジョイントブロックは、不連続面のみで形成されるブロックであり掘削面（自由面）を持たないブロックである。ジョイントブロックは掘削面の背後に存在し、直接観察することのできないブロックである。タイプVの無限ブロック(infinite block)は、掘削面に接しているが岩盤内部に向かって無限の広がりを持つブロックである。基本仮定において述べたように新たな不連続面の発生を考えなければこのブロックは安定である。タイプIVの先細りブロック(tapered block)は、有限ブロックではあるが、掘削面に向かって細くなっており移動不可能である。このブロックは、隣のブロックが移動すると引き続いて移動する可能性があるが、ここではこのような2次的なブロックの移動は考えないこととする。これらタイプIV～VIのブロックは、幾何学的に移動不可能なブロックといえる。



- I : キーブロック(key block)、II : 潜在キーブロック(potential key block)
III : 安定ブロック(stable block)、IV : 先細りブロック(tapered block)
V : 無限ブロック(infinite block)、VI : ジョイントブロック(joint block)

図-3.6 キーブロックの種類

残りの I～III のブロックは有限で、しかも移動することができる。このような移動可能ブロック(removable block)は、ブロックにかかる合力の方向および不連続面の摩擦抵抗の大きさ

により 3 種類に分類することができる。今、重力のみが作用する状態を考えると、タイプⅢのブロックは不連続面に働く摩擦力を考慮しなくても移動することなく、安定して岩盤上に存在する。図-3.6のアーチ部に存在するタイプⅡのブロックは、平行な面を含むブロックであり、1方向にしか移動できない。このような場合は、移動する方向に合力が作用したとしても不連続面のラフネスにより摩擦抵抗が著しく増大し、移動しにくい。また、右側の側壁に存在するブロックは、すべり面となる面の傾斜が小さく、摩擦抵抗がきわめて小さいか、あるいは、変位を生じる方向に合力が作用しなければ不安定にはならない。このようなブロックを潜在的キーブロック (potential key block) と呼ぶ。タイプⅠのブロックは移動可能であり、不安定であるからキーブロックとなる。すなわち、このブロックにすべり方向と反対に荷重が働かなければ移動する。このようなキーブロックは、掘削によってブロックが孤立する前に何らかの補強対策を施す必要がある。

3.3.2 ブロックの移動可能性

ブロックはいくつかのタイプに分かれることを説明したが、表-3.2はブロックのタイプの判定方法を示したものである。有限性定理(theorem of finiteness)と移動可能性定理(theorem of removability)は、無限ブロックと有限ブロック、移動可能ブロックと移動不可能ブロックを判定するものである。これらの定理による判定はブロックの幾何学的な形状のみによって行うことができる。その結果、移動可能ブロックとなったものについては、ブロックに作用する合力の方向によるモード解析および不連続面の摩擦を考慮した極限平衡解析により、キーブロックが抽出される。有限性定理と移動可能性定理は Shi によって示されたものであり、いずれも凸型ブロック(convex block)に対してのみ有効な定理であり、凹型ブロック(concave block)に対しては適用されない。凸型ブロックとは、ブロック内のすべての内角が 180° 未満であるような多面体であり、ブロック内の任意の2点を結ぶ線分を完全にブロックに含むものと定義することもできる。

一般に、ブロックは掘削平面(自由表面)とジョイント面によって構成され、これらの面で構成される半空間の積集合によってブロックが表される。さらに、これらの平面を回転させることなく任意の1点を通るように平行移動することによって形成される半空間の共通領域である空間をブロックピラミッド(BP: block pyramid)と呼ぶ。また、ブロックを形成する平面のうちジョイント平面の半空間で形成されるピラミッドをジョイントピラミッド(JP: joint pyramid)、掘削平面(自由平面)の半空間によって形成されるピラミッドを掘削ピラミッド(EP: excavation pyramid)と呼び、掘削ピラミッドの補集合をスペースピラミッド(SP: space pyramid)と呼ぶことにする。ブロックピラミッドは、ジョイントピラミッドと掘削ピラミッドの積集

合と考えることができる。

ここで、有限性定理は、注目するブロックが有限ブロックであるか、あるいは無限ブロックであるかの判定を行うものであり、以下のように定義される。

有限性定理 (Shi の定理)

凸型ブロック (convex block) は、そのブロックピラミッド(BP)が空集合であれば有限ブロックである。逆に言うと、凸型ブロックはブロックピラミッド(BP)が存在すれば有限ブロックではない、すなわち無限ブロックである。

また、移動可能性定理は、有限凸型ブロックが、移動可能であるかどうかを判定するものである。移動不可能な有限ブロックは先細りブロックとなり、移動可能な有限ブロックはキーブロックとなる可能性がある。以下に定理の内容を示す。

有限凸型ブロックの移動可能性定理(Shi の第 2 定理)

凸型ブロックにおいて、ブロックピラミッド(BP)が空集合でジョイントピラミッド(JP)が空集合でないときは、移動可能ブロックである。さらに、凸型ブロックにおいて、ジョイントピラミッド(JP)が空集合のときは移動不可能ブロック (先細りブロック) である。

有限性定理により、上の有限凸型ブロックの移動可能性定理を満たせば注目するブロックは有限である。移動可能性定理の前半部分は、ジョイントピラミッドが空集合でなく、かつスペースピラミッドの中に完全に含まれるときは、移動可能ブロックであると表現することもできる。移動可能性定理の後半部分は、ジョイント平面による半空間が有限ブロックであるならば、これらジョイント平面と自由平面とによって定められる有限ブロックは先細りブロックであることを示している。すなわち、ジョイントブロックを表すブロックが有限なら、ジョイントピラミッドに1つ以上の自由平面を加えたブロックは先細りである。

ここで、これらの定理を2次元の例により説明することにしよう。表-3.3には斜面における3タイプのブロックが示してある。これらは、3つあるいは4つの平面で構成される簡単なブロックであり、ブロック形状をみれば左から移動可能ブロック、無限ブロック、先細りブロックあることは明らかである。ブロック A とブロック B は、掘削面 (自由表面) ①と2つのジョイント面②、③から構成されており、ブロック C は、掘削面 (自由表面) ①と3つのジョイント面②、③、④から構成されている。ブロックは各平面の上半空間あるいは下半空間のいずれかに存在するが、ここで上半空間と下半空間を記号 U と L あるいは数字 0 と 1

で表すことにする。したがって、表中の3つのブロックは左から $L_1U_2L_3$ 、 $L_1U_2L_3$ 、 $L_1U_2L_3U_4$ 、あるいは 101、101、1010 で表される。表のブロック形状の下段には、ジョイントピラミッド(JP)、掘削ピラミッド(EP)、ブロックピラミッド(BP)をそれぞれ示してある。

まず、有限性定理について説明しよう。表-3.3中のブロックピラミッドの項は、ブロックを形成するすべての平面の半空間の積集合であるが、ブロック A,C では存在せず、ブロック B では斜線をつけた部分として存在している。したがって、ブロック A,C は有限ブロックであり、ブロック B は無限ブロックであることが定理より示される。

次に、移動可能性定理について説明する。移動可能性定理は、有限ブロックについて移動可能かどうかを判定するためのものである。ジョイントピラミッドの項をみるとブロック A、B では、ジョイントピラミッドはいずれも U_2L_3 で示される半空間の共通領域であり斜線をつけた領域として存在する。一方、ブロック C では、ジョイントピラミッドは $U_2L_3U_4$ で表される半空間の共通領域であるが、この領域は存在しない、すなわち空集合であることがわかる。したがって、移動可能性定理の後半部分より、ジョイントピラミッドが空集合であるから、このブロックは先細りブロックである。次に、掘削ピラミッドの項をみると、3つのブロックとも掘削面は面①の下側 L_1 であるから、掘削ピラミッドは図中の網掛けした半空間で定義される。ブロック A の場合は、ジョイントピラミッドと掘削ピラミッドは互いに重なり合わない別々の領域で示されており、その積集合である共通領域は存在しないことがわかる。したがって、移動可能性定理の前半部分より、ブロックピラミッドが空集合でジョイントピラミッドが空集合でないからこのブロックは移動可能ブロックである。ブロック B の場合には、ジョイントピラミッドが掘削ピラミッドの中に完全に含まれており共通領域が存在するので無限ブロックである。この場合、ジョイントピラミッドと掘削ピラミッドは同じ領域となっている。

2次元ブロックの有限性および移動可能性は、以上の考察によって明らかである。3次元での考察は簡単ではないが、ステレオ投影図を用いることによってこれらの定理が適用できる。

以上をまとめて、移動可能ブロックを見つけだすフローを図-3.7に示す。まず、ジョイントピラミッドが存在するかどうかを調べる。存在しなければ先細りブロックである。先細りブロックは、空間に向けて移動することはできないから、キーブロックとは成り得ないので以降の検討は必要ない。ジョイントピラミッドが存在する場合は、次にジョイントピラミッドと掘削ピラミッドの積集合であるブロックピラミッドが存在するかどうか調べる。存在する場合は、ブロックは無限ブロックである。無限ブロックも、空間に向けて移動することはできないから、キーブロックとは成り得ないので以降の検討は必要ない。最後に残ったブロックピラミッドが存在しない場合が、移動可能な有限ブロックすなわちキーブロックであり、

安定性の検討が必要となる。

表-3.2 ブロックの判定法

ブロックの種類		(1) 自由面を持つ	(2) 有限性定理	(3) 移動可能性	(4) モード解析	(5) 極限平衡解析
I	キーブロック 支保を行わないと滑動の危険性がある	YES	有限 ブロック	移動可能 ブロック	不安定 ブロック	不安定 ブロック
	II					
III	安定移動可能ブロック ブロックに作用する合力方向により安定である			移動不可能 ブロック	安定 ブロック	安定 ブロック
IV	先細りブロック 有限凸型ブロックで空洞方向に先細りの状態					
V	無限ブロック 無限ブロックで、空洞方向に先細りの状態	無限 ブロック	有限 ブロック	移動不可能 ブロック	安定 ブロック	
VI	ジョイントブロック 掘削面上に現れず、節理面のみで形成される	NO				
入力値		不連続面と掘削面の方向			合力方向	合力とすべり面の摩擦力

表-3.3 2次元におけるブロックの移動可能性の判定方法

	ブロック A	ブロック B	ブロック C
ブロック 形状			
ジョイント ピラミッド (JP)			
掘削 ピラミッド (EP)			
ブロック ピラミッド (BP)			
判定結果	移動可能ブロック	無限ブロック	先細りブロック

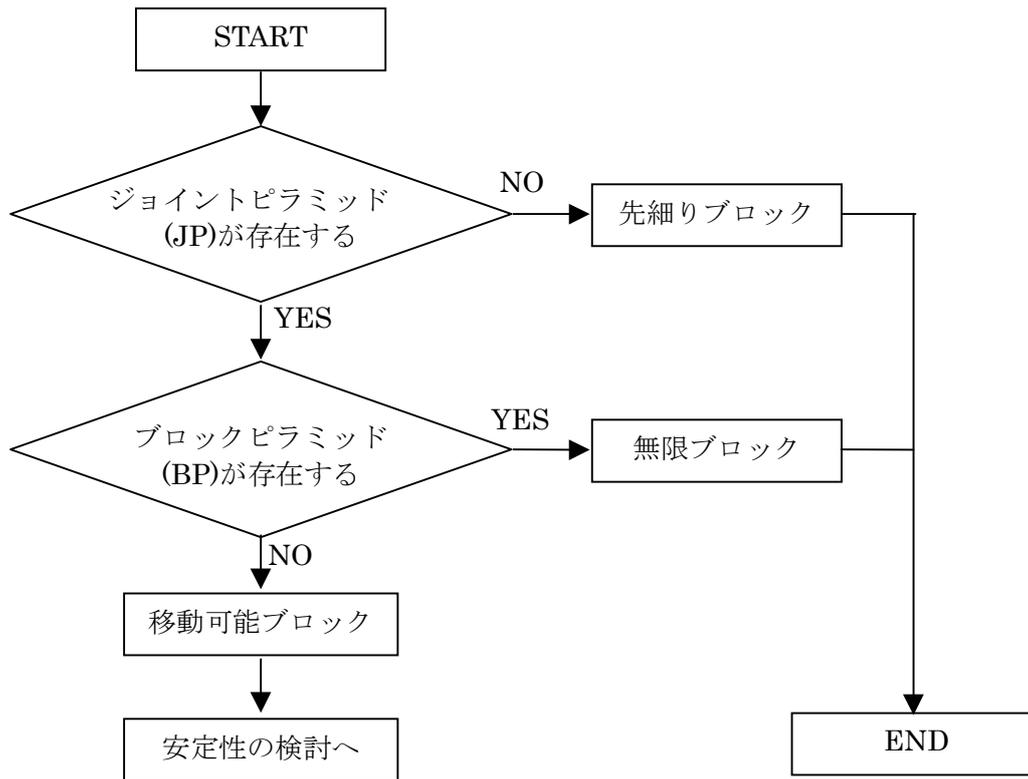


図-3.7 移動可能ブロックの判定フロー

3.3.3 ステレオ投影法における有限性定理

前節では、有限性定理および移動可能性定理について2次元の簡単な例で説明した。ここでは、3次元におけるこれらの定理の適用についてステレオ投影で説明することとする。ステレオ投影法は、与えられたジョイント平面および自由平面を半径 R の基準球の中心を通るように平行移動し、平面と基準球が交差する大円を赤道平面上に投影することによって描かれるものであった。

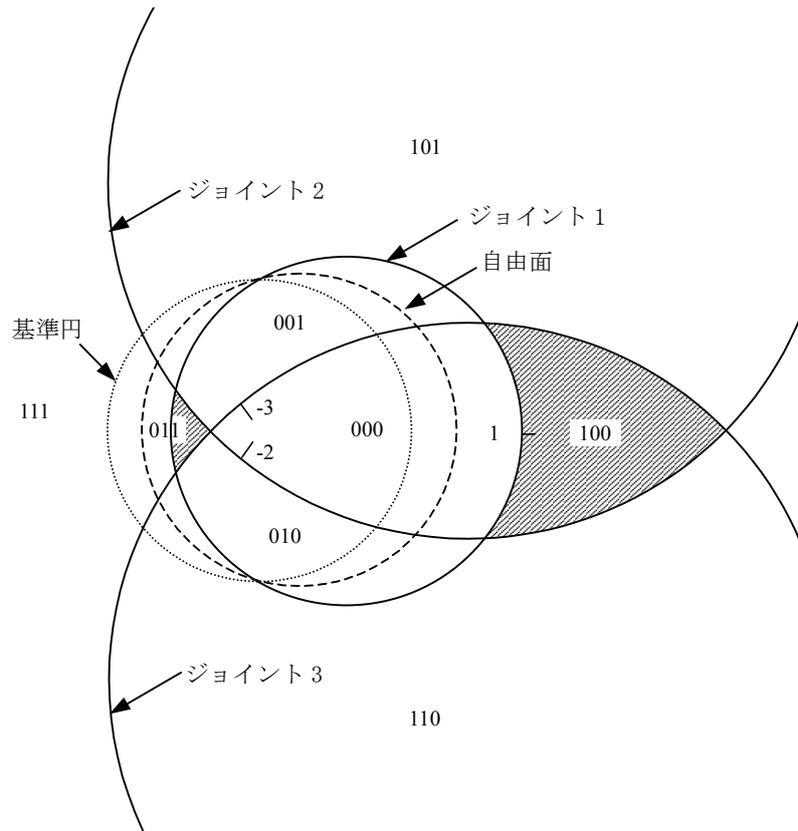
表-3.4に示されている傾斜と傾斜方位を持つ3個のジョイント平面と、1個の自由平面によって構成されるブロックのステレオ投影図が図-3.8(a)である。この図は上半球投影を用いて4つの平面を投影したものである。基準円（水平面）を点線の円、自由表面を破線の円、ジョイント平面を実線の円で表している。まず、ジョイント平面だけを考えると、3つのジョイント平面の積領域によってジョイントピラミッドが構成される。このとき、各ジョイントピラミッドは3桁の数字の列で表示される。0は上半球空間 (U) を表し、1は下半球空間 (L) を表す。たとえば、100で表される領域は平面1の下側、平面2と平面3の上側の領域を表すことになる。

いま、ここで地下空洞の掘削を考え、自由表面を天盤とする。天盤内のブロックは自由表面の上側半空間とジョイント平面の半空間の積集合によって構成される。図-3.8(b)では自由表面は実線の円で描かれ、ジョイントピラミッドの内、この自由表面の表す大円によって分割される領域を除外すると、残るものは011と100である。これらのジョイントピラミッドは自由表面を表す円の内外に完全に含まれる。自由表面による掘削ピラミッドは、自由表面の上側半空間、すなわち大円の内部領域である。JP100は掘削ピラミッドと共通領域を持たない。また、自由表面である天盤により掘削されたスペースピラミッドは、自由表面の下側領域であり、大円の外部領域である。したがって、JP100は掘削円の外部領域に完全に存在するのでSPに完全に含まれているとも言いかえられる。有限性定理によって、JP100 ($L_1U_2U_3$) は有限ブロックを表すことになる。他のジョイントピラミッドは、図-3.8(a)で明らかのように、掘削円内に部分的に含まれているか、掘削円内にすべて含まれており、SPに完全に含まれていない。よって、これらのジョイントピラミッドで表されるブロックは無窮ブロックである。

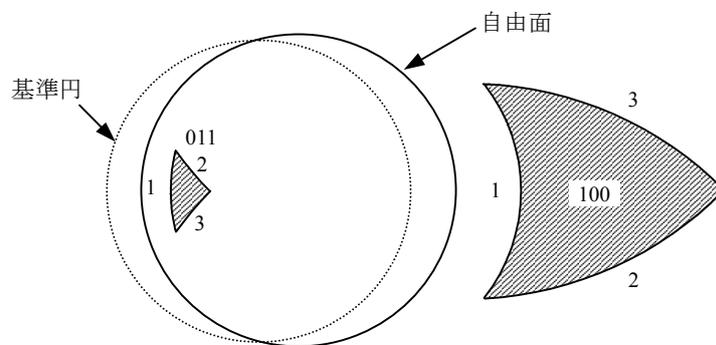
掘削円に完全に含まれている011の領域で表されるブロックは、自由表面の下側が岩盤である場合、つまり空洞の底盤で有限となるブロックを表している。

表-3.4 ジョイント面と自由面の方向

平面	傾斜、 $\alpha(^{\circ})$	傾斜方向、 $\beta(^{\circ})$
ジョイント面 1	30	90
ジョイント面 2	65	40
ジョイント面 3	65	140
自由面(掘削面)	15	90



(a) 平面のステレオ投影図 (上半球投影)



(b) JP(011)およびJP(100)のステレオ投影図 (上半球投影)

図-3.8 3次元における有限性定理の適用

3.4 ブロックの安定解析

前章までに、自由表面とジョイント面からなるブロックの移動可能性を判定するための方法について述べた。表-3.2あるいは図-3.7のフローによりブロックは無限ブロック、先細りブロックおよび移動可能ブロックに分類された。ここまでは、ブロックを構成する各面の幾何学的な情報すなわち走向・傾斜およびブロックコードだけで判定を行うことができる。そして無限ブロックおよび先細りブロックは、自由空間に向かって移動することができないためにキーブロックではないことから、安定性の検討をする必要がない。したがって、ここでは移動可能ブロックについてキーブロックであるかどうかの判定を行う手法について説明する。移動可能ブロックは、表-3.2あるいは図-3.6で示したように、以下の3つのタイプに分類される。

- I. キーブロック (Key block) : もし適切な支保が施されなければ、掘削が行われるとただちに移動する。
- II. 潜在的キーブロック (Potential key block) : 掘削が行われるときに、幾何学的に移動する形状である。しかし、接触面に作用する摩擦力が合力とつり合い状態にあるので移動しない。
- III. 安定ブロック (Stable key block) : 接触面の摩擦角がゼロであっても移動しない。なぜならば、合力の方向がブロックが移動できない方向に作用しているからである。

以上の3つの移動可能ブロックについてのみ力学安定解析が適用される。自由表面背後の岩盤内のジョイントブロックは、表面上にあるいくつかのブロックが移動しない限り空間内へ移動することはない。これは、先細りブロック (タイプIV) も同様である。自由表面上に現れる無限ブロック (タイプV) は、そのブロックの破砕により有限となることによるのみ移動する。本研究においては、これらの可能性は検討しない。

移動可能ブロックに対して、2つの解析法により上記の3つのタイプを分類することができる。その検討フローを図-3.9に示した。第1の解析法は、モード解析であり、キーブロックと潜在的キーブロック (タイプIとII) から安定ブロック (タイプIII) を識別することができる。このモード解析においては合力の方向が必要となるが、ジョイントの強度特性は必要ではない。第2の解析法は、極限平衡解析であり各々のジョイント面の摩擦角を用いた安定解析を行うことにより、キーブロック (タイプI) から潜在的キーブロック (タイプII) を分離する。この2つの解析によってキーブロック (タイプI) を決定する。

モード解析では、すべりのモードを抜け出し、1面すべり、2面すべりに分類する。そし

て、このいずれのすべりモードにも属さないブロックは安定ブロックとなる。極限平衡解析では、すべりのモードにしたがって、すべり面の摩擦力を考慮した釣り合い方程式をたてて、すべり出すか否かを判定する。その結果、すべり出すブロックがキーブロックとなり、対策を必要とするブロックである。対策工による必要導入力は、仮想の導入力の項を釣り合い方程式の中に追加して、これを導入力について解くことにより求められる。

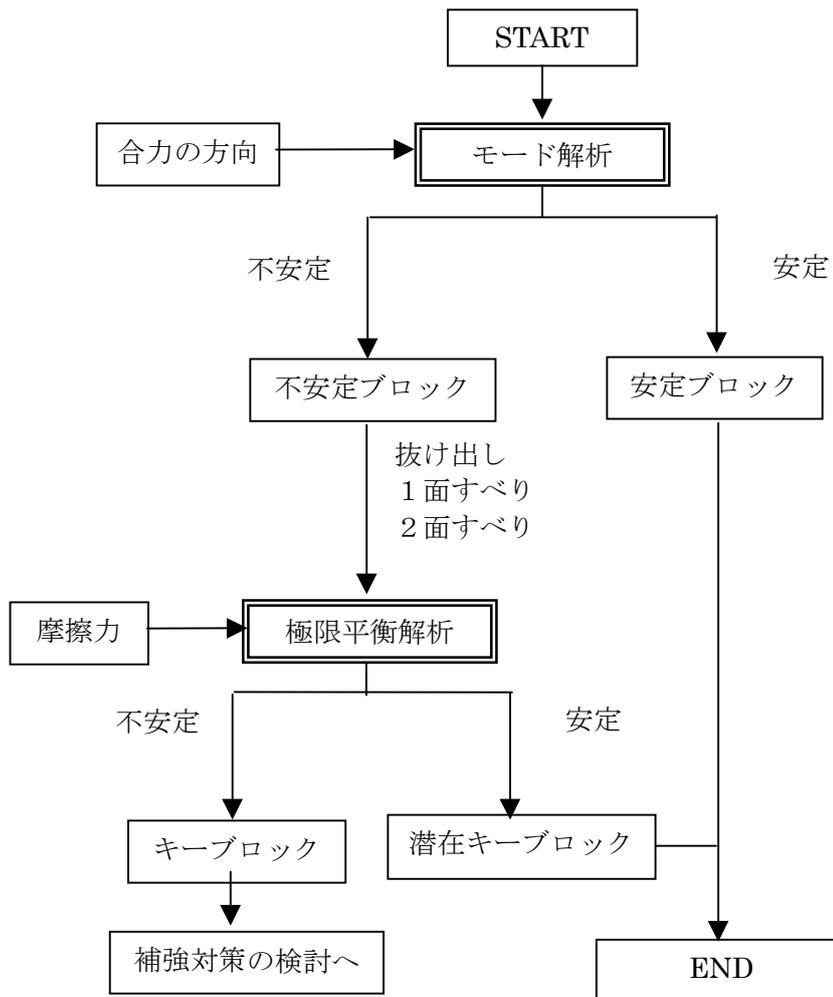


図-3.9 ブロックの安定性の検討フロー

3.4.1 すべりモード

移動可能な有限ブロックは、モード解析によりブロックに作用する合力の方向により、摩擦がなくても移動することのない安定ブロックと、摩擦がなければ移動する不安定ブロックに分けられる。不安定ブロックのすべりのモードとしては、抜け出し(lifting)と平面すべり(single-face sliding)および2面すべり(double-face sliding)がある。抜け出しは、ブロックを構成するすべてのジョイント面が岩盤から離れる方向に移動する場合である。ブロックに作用する合力が重力のみである場合、移動方向は鉛直下方になり、トンネル天端に位置する落下型のブロックに相当する。平面すべりは、一つの面に沿ってブロックがすべる場合であり、すべり方向は合力ベクトルのすべり面への正射投影となる。合力が重力のみである場合、すべり方向はすべり面の傾斜ベクトルと一致する。2面すべりは、2つの平面に沿ってすべる場合であり、すべり方向は2面の交線方向となる。

モード解析によりこれら3つのすべりのモード、すなわち抜け出し、1面すべり、2面すべりのいずれの条件も満たさないブロックは、どの方向にも移動することのできない安定なブロックとなる。

以下に、この3つのすべりモードの判定法について説明する。

(1) 抜け出しモード

図-3.10は、それぞれのジョイント面が開口することによって自由に移動するキーブロックを示す。このような移動モードを抜け出し(lifting)と呼ぶ。このとき、ブロックに作用している合力方向の単位ベクトルを \hat{r} とし、ブロックのすべり方向（抜け出し方向）の単位ベクトルを \hat{s} で表すものとする。また、ブロックを構成するジョイント面 P_i の単位法線ベクトルの内、ブロック内側へ向かうベクトルを \hat{v}_i で表す。したがって、ジョイント面 P_i の上向き単位法線ベクトルを \hat{n}_i とすると、 $\hat{v}_i = \hat{n}_i$ あるいは $\hat{v}_i = -\hat{n}_i$ のいずれかである。

抜け出すブロックは、どの面とも接触できないので抜け出し方向 \hat{s} はどのジョイント平面とも平行になることはない。また、抜け出しの場合ブロックに作用する力は合力のみであるから、合力ベクトル \hat{r} と抜け出し方向ベクトル \hat{s} は一致する。すなわち、

$$\hat{s} = \hat{r} \tag{3.4}$$

このとき、ブロックが抜け出しとなる場合の必要十分条件は以下の通りである。

ブロックの抜け出し方向 \hat{s} と、すべてのジョイント面 l のブロック内部へ向かう法線ベクトル \hat{v}_l の間に次式が成立する。

$$\hat{s} \cdot \hat{v}_i > 0 \quad (3.5)$$

式(3.5)は、単位ベクトル \hat{s} と \hat{v}_i のなす角が 90° 未満であること、すなわち法線ベクトル \hat{v}_i を持つ平面により分割される空間の内、ベクトル \hat{v}_i と同じ側の半空間にベクトル \hat{s} が存在することを示している。または、ジョイント面により分割される2つの半空間のうち、ブロック内部へ向かう法線ベクトルの存在する側の半空間に抜け出し方向が存在することである。このとき、各ジョイント面の半空間のうちブロック内部を表す半空間の積集合がジョイントピラミッド(JP)であったから、式(3.5)は、抜け出し方向ベクトルが完全にJP内部領域にあることとも言い換えられる。

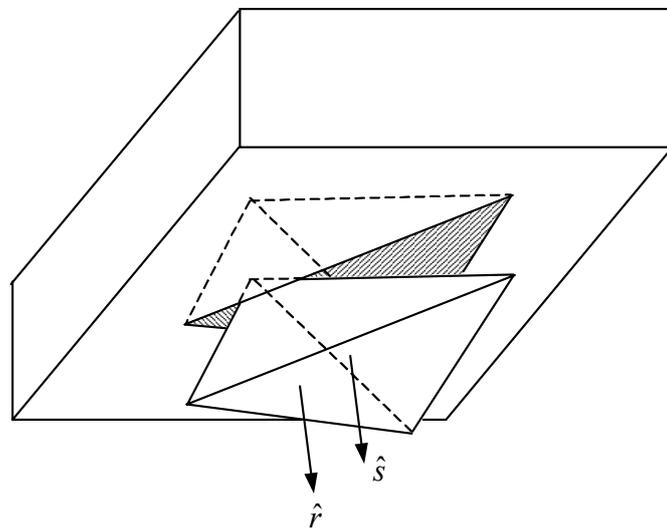


図-3.10 抜けだしモードのブロック

(2) 平面すべり

図-3.11は、ブロックを構成するジョイント面のうち、1つの面がすべり面となっているブロックを示したものであり、このようなすべりのモードを平面すべりあるいは1面平面すべりと呼んでいる。平面すべりにおけるすべり方向の単位ベクトル \hat{s} は、すべり面 P_i 上に、ブロックに作用する合力 \hat{r} を正射投影させた方向と一致し、以下の式で表される。

$$\hat{s} = \hat{s}_i = \frac{(\hat{n}_i \times \hat{r}) \times \hat{n}_i}{|\hat{n}_i \times \hat{r}|} \quad (3.6)$$

式(3.6)の2重外積の関係を示したのが、図-3.11(b)である。合力 \hat{r} の面 P_i への正射投影の方向は、合力 \hat{r} と面 P_i の法線ベクトル \hat{n}_i を含む平面と平面 P_i との交線方向である。外積 $\hat{n}_i \times \hat{r}$ は、

ベクトル \hat{n}_i と \hat{r} に直交する方向を表し、すべり方向 \hat{s} は、ベクトル \hat{n}_i と $\hat{n}_i \times \hat{r}$ に直交する方向である。

ここで、面 P_i で平面すべりが発生する必要十分条件は、以下の2式で表される。

$$\hat{s} \cdot \hat{v}_l > 0 \quad (\text{ただし、} l \neq i \text{のすべての} l \text{に対して}) \quad (3.7)$$

$$\hat{r} \cdot \hat{v}_i \leq 0 \quad (3.8)$$

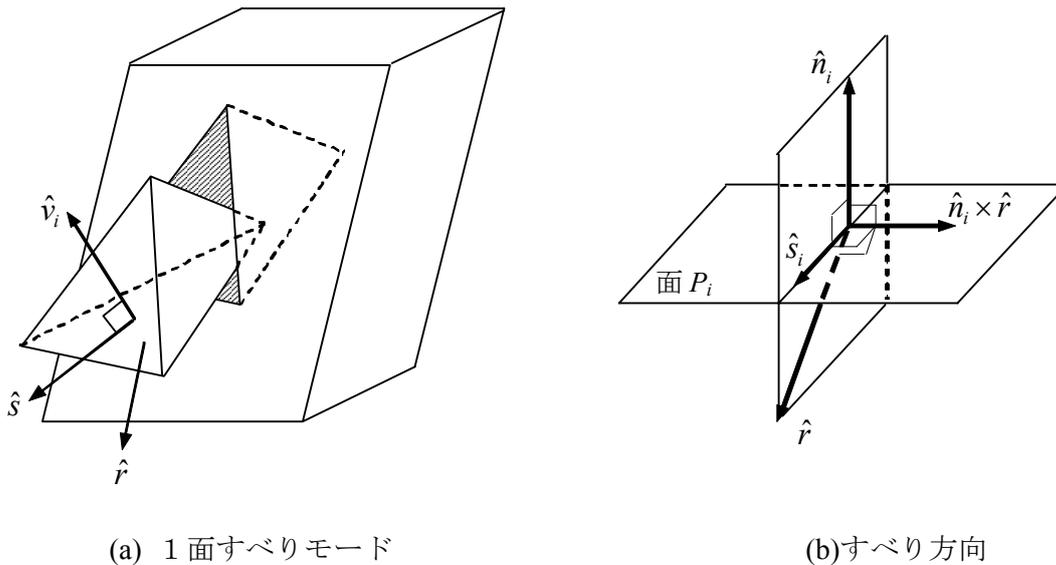


図-3.11 1面すべりモードのブロック

式(3.7)は、すべり方向 \hat{s} が、すべり面以外のすべてのジョイント面を開口させる方向であることを示している。または、すべり面以外のジョイント面の半空間に関しては、ブロック内部を表わす半空間の中にすべり方向 \hat{s} があることを示している。さらに、式(3.8)は、合力方向 \hat{r} はすべり面を閉じる方向に向いていること、あるいはすべり面上にあることを示している。または、合力方向 \hat{r} がすべり面に対してブロックの外部を表す半空間に存在することを示している。

(3) 2面すべり

図-3.12は、ブロックを構成するジョイント面のうち、2つの面がすべり面となっているブロックを示したものである。この場合すべり方向は2面の交線方向となる。なぜなら、交線方向が2つの面に共通する唯一の方向だからである。このようなすべりのモードを2面すべり、交線すべりあるいはくさびすべりと呼んでいる。2つのすべり面を面 P_i 、面 P_j とし、これらの法線方向ベクトルを \hat{n}_i 、 \hat{n}_j とすると、すべり方向 \hat{s} は $\hat{n}_i \times \hat{n}_j$ 、あるいは $-\hat{n}_i \times \hat{n}_j$ と同

じ向きである。ブロックのすべり方向 \hat{s} は、これら反対方向の2つのベクトルのうち、ブロックに作用する合力 \hat{r} とのなす角が小さい方である、すなわち 90° 以下である。したがってすべり方向 \hat{s} は、以下の式で表される。

$$\hat{s} = \hat{s}_{ij} = \frac{\hat{n}_i \times \hat{n}_j}{|\hat{n}_i \times \hat{n}_j|} \text{sign}((\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \cdot \hat{r}) \quad (3.9)$$

ここで、面 P_i と面 P_j で2面すべりが発生する必要十分条件は、以下の3式で表される。

$$\hat{s} \cdot \hat{v}_l > 0 \quad (\text{ただし、} l \neq i, l \neq j \text{ のすべての } l \text{ に対して}) \quad (3.10)$$

$$\hat{s}_i \cdot \hat{v}_j \leq 0 \quad (3.11)$$

$$\hat{s}_j \cdot \hat{v}_i \leq 0 \quad (3.12)$$

式(3.10)は、すべり方向 \hat{s} が2つのすべり面 P_i, P_j 以外のすべてのジョイント面を開口させる方向であることを示している。または、2つのすべり面 P_i, P_j 以外のジョイント面の半空間に関しては、ブロック内部を表す半空間の中にすべり方向 \hat{s} があることを示している。さらに、式(3.11)、(3.12)はすべり面に関する条件である。式(3.11)は面 P_i での1面すべりの発生方向 \hat{s}_i が、もう一方のすべり面 P_j を閉じる方向に向いていることを示している。もし、 $\hat{s}_i \cdot \hat{v}_j > 0$ であるならば、面 P_i のすべり方向 \hat{s}_i が、面 P_j を開口させる方向であり、これは面 P_i の平面すべりあるいは抜け出しのモードになってしまうから、2面すべりではなくなる。したがって、式(3.11)が成立する必要がある。同様の関係が面 P_j のすべり方向 \hat{s}_j と面 P_i の法線ベクトルにも存在するので式(3.12)が成立する必要がある。

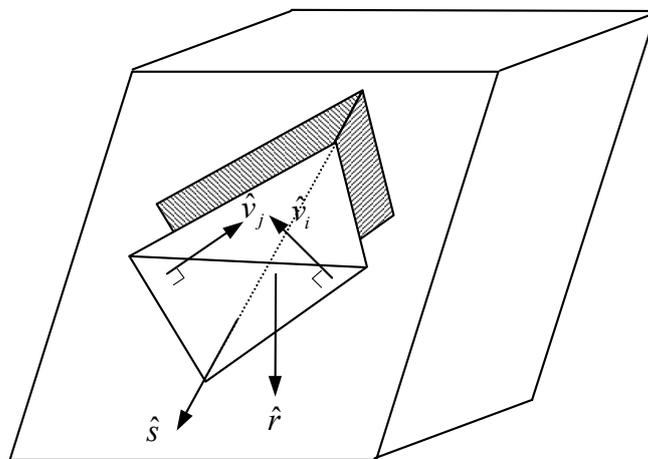


図-3.12 2面すべりモードのブロック

3.4.2 合力の方向が与えられた場合のステレオ投影によるすべりモードの判定

モード解析によるすべりモードの判定は、ベクトル解析により実施することができる。したがって、ブロックを構成するジョイント面の方向とブロックコードが与えられれば、ジョイント面の内部に向かう単位法線ベクトルが決定され、これらとブロックに作用する合力の方向ベクトルに関して式(3.4)から式(3.12)の判定式を計算すれば、すべりのモードが判定できるわけである。しかし、ここでは、ベクトル解析を行わずにステレオ投影図を用いて、すべりモードの判定を行う方法について説明する。もちろん、ベクトル解析とステレオ投影図のいずれの方法を用いても、同じすべりモードの判定結果が得られる。

表-3.5に示される方向を持つ3個のジョイント群の組み合わせで発生するブロックについて、合力 $\mathbf{r} = (0, 0.866W, 0.500W)$ が作用したときの各ブロックコードに対するすべりのモードを考える。その結果は、図-3.13の上半球ステレオ投影図に示されている。ここで、抜け出しのモードをモード0、ジョイント面 i に沿った平面すべりをモード i 、ジョイント面 i と j に沿った2面すべりをモード ij 、安定なブロックをモード s と呼ぶことにする。図-3.13の3桁のブロックコードの下に括弧書きの数字がすべりモードを表している。以下にこれらの判定手順を示す。

まず、ステレオネット上に3つのジョイント面の大円を描く。次に、合力の単位ベクトル方向 \hat{r} および合力方向に垂直な平面の大円を描く。ジョイント面の投影大円は実線の円弧であり、ジョイント面上向き法線ベクトルの投影点は \cdot で示される n_1, n_2, n_3 となる。合力の方向ベクトルの投影は $+$ で示される点であり、合力に垂直な面の投影は点線の大円で示されている。次にジョイント面での合力によるすべり方向、およびジョイント面の交線のすべり方向を作図する。ジョイント面のすべり方向 \hat{s}_i は式(3.6)により求められる。あるいは、図-3.11(b)に示されるように、すべり方向 \hat{s}_i は、すべり面の法線ベクトル \hat{n}_i と合力ベクトル \hat{r} を含む面とすべり面 P_i の交線上にあるから、ステレオ投影図では、 n_i と r を通る大円を描き、これと面 i の大円との交点の内 r に近い方の交点を S_i とすればよい。また、2面すべりの場合のすべり方向 \hat{s}_{ij} の投影は、面 i と面 j の大円の交点であるが、これは2点存在する。しかし、すべり方向は合力とのなす角が小さい方、すなわち合力に垂直な平面の合力ベクトル側の半空間上にあるから2つの交点のうち、点線の円の中にある交点がすべり方向 S_{ij} となる。

以上で、与えられた3個のジョイント面の組み合わせから形成される可能性のあるブロックのすべり方向をすべて作図することができた。次にすべりのモードに対応するジョイントピラミッドを判定することにする。

抜け出しのモードの条件は、式(3.4)および式(3.5)であった。これは、ジョイント面により

分割される2つの半空間のうち、ブロック内部側の半空間に抜け出し方向が存在することを意味する。すなわち、抜け出しの可能性のあるJPは、その内部に合力 \hat{r} を含む。したがって、**図-3.13**では、すべり方向 r を含むブロックコード100の領域が抜け出しモード0となる。

次に面 P_1 に沿った1面すべりを考える。これは、すべり方向 \hat{s}_1 を含む領域であるから、**図-3.13**では S_1 を含む2つの領域JP100とJP000のいずれかの領域である。ここで、式(3.8)の平面すべりの条件より $\hat{r} \cdot \hat{v}_1 \leq 0$ となり、これはJP内部方向を表す平面 P_1 の半空間の反対側に合力方向 r が存在することを表わす。すなわち、 P_1 の大円に関して r は外側に存在するから、反対側の大円 P_1 の内側にある領域が平面すべりの条件を満たしている。先ほどの、2つの可能性のある領域のうちJP000の領域がこの条件を満たすから、モード1のJPとなる。同様に、面 P_2 、面 P_3 の1面すべりはそれぞれJP110、JP111であることがわかる。

次に、面 P_1 と面 P_2 の2面すべりとなるJPを考える。これは、すべり方向 \hat{s}_2 を含むJPであるから、**図-3.13**では S_{12} を頂点とする4つの領域JP011、JP001、JP101、JP111のいずれかの領域である。ここで、式(3.11)から得られる条件 $\hat{s}_1 \cdot \hat{v}_2 \leq 0$ より、JPは面2の2つの半空間のうち \hat{s}_1 を含まない方の側にある。**図-3.13**では S_1 は大円 P_2 の内側にあるから、求めるJPは大円 P_2 の外側に位置する。また、 S_2 は大円 P_1 の外側にあるから、求めるJPは大円 P_1 の内側にある。先ほどの4つのJPのうち、これらの条件を満たすのはJP011のみであり、これが求めるモード12のJPとなる。同様に、面2と面3、面1と面3の2面すべりの領域は、JP101、JP001となる。以上の結果からわかることは、大円で区切られたジョイントピラミッドに対して、1対1の関係で不安定ブロックのすべりモードが存在することである。

最後に、いずれのすべりモードにも属さなかったJP010は、安定ブロックとなる。この例題では、安定ブロックとなるジョイントピラミッドは1つであったが、方向の異なる4面以上のジョイント群を考えれば、安定ブロックは複数のジョイントピラミッドで表される。ただし、不安定ブロックのすべりモードは、3面の場合と同様に、必ず1対1に対応した領域となる。

表-3.5 3個のジョイント群の方向および摩擦角

ジョイント群	傾斜、 $\alpha(^{\circ})$	傾斜方位、 $\beta(^{\circ})$	摩擦角、 $\phi(^{\circ})$
1	68	243	20
2	45	280	40
3	13	343	30

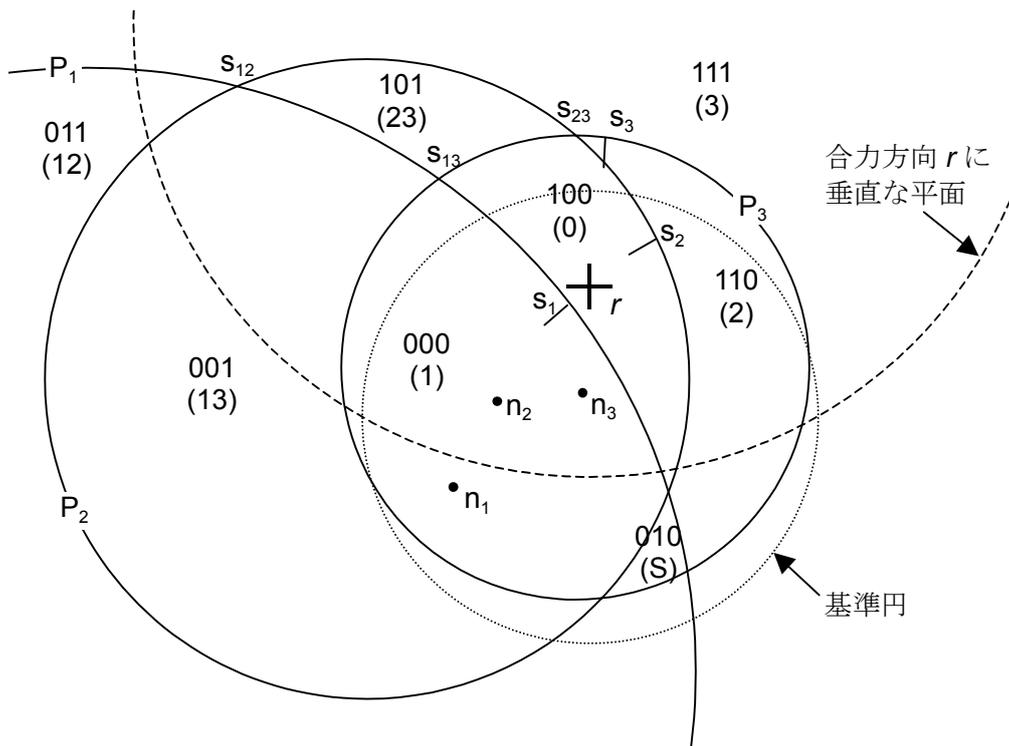


図-3.13 3個のジョイント群の投影図（上半球投影）

3.4.3 JPが与えられたときのすべりモードの判定

3.4.2節では、ブロックに作用する合力を1方向に限定して、さまざまなブロックコードを持つJPのすべりモードを判定した。今度は、その逆の問題を扱う。すなわち特定のブロックコードを持つJPに注目して、このブロックに作用する合力の方向を変化させた場合の、すべりモードについて判定を行うことにする。

この2つの問題は、以下のような2つのケースに相当すると考えればよい。例えば、掘削面においていくつかのジョイント群の組み合わせにより、多くの岩盤ブロックが観察される場合、まず重力場のみを考えれば合力の方向は1つに決定され、前節の方法に従ってそれぞれの岩盤ブロックのすべりモードの判定を行うことができる。その結果、すべりの危険性のあるブロックを特定することができることになる。これを最初のステップとすれば、次のステップは、このすべりの危険性のあるブロックに対して、補強対策を考えることである。例えばアンカーによる補強を考えれば、アンカーの打設方向と導入力を決めれば、これとブロック自重により新しい合力方向が決定される。その結果、ブロックのすべりモードは変化し、ブロックが安定となるような合力方向を見つけだすことができる。そして、最適なアンカー設計が可能となる。ここで扱うのは、この2番目のステップに相当すると考えればよい。

前節と同じ表-3.5の3つのジョイント群を考え、図-3.13のステレオ投影図でJP101で表されるブロックを考える。図-3.14はこのブロックに対して、任意の方向の合力が作用した際のすべりモードの領域を示したものである。以下にその作成手順を述べる。

まず、抜け出しのモードとなる領域は、ブロックに加わる合力方向がJP内にある場合であったから、図-3.14の斜線で示したJPの内部がモード0の領域となる。JP101は(S_{12} 、 S_{13} 、 S_{23})を頂点とする大円で囲まれた内部領域である。

次に面 P_1 での平面すべりとなるモード1の合力の領域を作図する。平面すべりの条件はすべり方向の単位ベクトルを \hat{s}_1 、面 P_2 、 P_3 のブロック内向きの法線ベクトルを \hat{v}_2 、 \hat{v}_3 としたときに、式(3.7)より $\hat{s}_1 \cdot \hat{v}_2 > 0$ 、 $\hat{s}_1 \cdot \hat{v}_3 > 0$ が成立することである。これを図-3.15のブロックコード101のジョイントピラミッドで考えると、面 P_1 上にあるすべり方向ベクトル \hat{s}_1 が、交線ベクトル \hat{s}_{12} と \hat{s}_{13} の間にあることを意味する。したがって、 \hat{s}_1 は合力方向の単位ベクトル \hat{r} の面 P_1 への正射投影の方向であるから、図-3.15より \hat{r} は \hat{s}_{13} と $-\hat{v}_1$ を含む平面の \hat{s}_{12} 側の領域で、かつ \hat{s}_{12} と $-\hat{v}_1$ を含む面の \hat{s}_{13} 側の領域である。ここで、面 P_1 の外向きベクトルを $-\hat{v}_1$ で表した。また、もう1つの条件は、式(3.8)より $\hat{r} \cdot \hat{v}_1 < 0$ であるから、図より \hat{r} は、 \hat{s}_{12} と \hat{s}_{13} を含む面の $-\hat{v}_1$ 側の領域である。以上をまとめると、図-3.15で斜線をつけた3つの平面の内部領域

となるジョイントピラミッドがモード1の合力方向の範囲となる。これを、**図-3.14**のステレオ投影図上に表わすと、面P1の外向き単位ベクトルの位置を $-V_1$ として、3点 $(-V_1, S_{12}, S_{13})$ を頂点とする大円で囲まれた内部領域となる。同様にして、面P2、P3の外向きベクトル $-V_2$ 、 $-V_3$ を作図することにより、モード2およびモード3の領域が、それぞれ $(-V_2, S_{12}, S_{23})$ 、 $(-V_3, S_{13}, S_{23})$ を頂点とする大円で囲まれた領域となる。

次に面1と面3の2面すべりとなるモード13の合力の領域を作図する。まず式(3.10)の条件は $\hat{s}_{13} \cdot \hat{v}_2 > 0$ であり、定義より \hat{r} は \hat{s}_{13} となす角が 90° 未満であるから、**図-3.16**に示すように \hat{r} は、 $-\hat{v}_1$ と $-\hat{v}_3$ を含む平面より \hat{s}_{13} 側の領域である。また、式(3.11)の条件は $\hat{s}_1 \cdot \hat{v}_3 < 0$ であり、 \hat{r} は \hat{s}_{13} と $-\hat{v}_1$ を含む面の $-\hat{v}_3$ 側の領域である。式(3.12)の条件は $\hat{s}_3 \cdot \hat{v}_1 < 0$ であり、 \hat{r} は \hat{s}_{13} と $-\hat{v}_3$ を含む面の $-\hat{v}_1$ 側の領域である。以上をまとめると、**図-3.16**で斜線をつけた3つの平面の内部領域となるジョイントピラミッドがモード12の合力方向の範囲となる。これを、**図-3.14**のステレオ投影図上に表わすと、 $(-V_1, -V_3, S_{13})$ を頂点とする大円の内部領域である。同様にしてモード12およびモード23の領域は、それぞれ $(-V_1, -V_2, S_{12})$ 、 $(-V_2, -V_3, S_{23})$ を頂点とする大円の内部領域である。

最後に、以上のいずれのすべりモードにも含まれない領域として $(-V_1, -V_2, -V_3)$ を頂点とする大円の内部領域が残る。したがって、この領域が合力の方向によって摩擦なしでも安定なブロックとなる領域である。

以上は、摩擦を考えない場合の結果であったが、次にジョイント面の摩擦抵抗を考えた場合のすべりについて考える。まず、平面すべりの場合を考えると、**図-3.17**に示すように、平面の内部摩擦角が ϕ とすると、ブロックに作用する合力の方向が、平面の外向き法線ベクトルの方向を中心とする頂角 2ϕ の円錐の中にあれば、すべりは発生しない。このような円錐を表す小円のステレオ投影は、すべり力と摩擦抵抗が釣り合った平衡状態を表す。**図-3.14**において、まず面1における平面すべりの平衡領域を作図すると、面1の摩擦角が 20° であるから、面1の外向き法線ベクトル $-V_1$ を軸とする中心角 40° の小円の内、すべりモード1のJP内に含まれる円弧となる。同様にして、面2および面3の摩擦角がそれぞれ 40° 、 30° であるから、モード2およびモード3のJP内に、平衡状態の円弧を描くことができる。次に、2面すべりの平衡領域を作図する。**図-3.14**において、2面すべりの領域を表すJPの境界上には、今、作図した平面すべりの平衡状態の円弧の端点があることがわかる。この2つの端点を通る大円を描けば、それが2面すべりにおける平衡領域となる。

このようにして、摩擦抵抗による平衡状態を表わす曲線を作図することができる。この平衡領域は、投影面上で連続した曲線であり、抜け出しのモード0と安定のモードSの間に存在し、この曲線よりのモードS側にある領域が摩擦を考えたときに安定となる領域である。

図-3.18は、各面の摩擦角が等しい場合に、摩擦角の大きさによって安定領域がどのように変化するかを示したものである。摩擦角が0の時の安定領域がSで示される領域に合力が存在する時である。摩擦角が 10° の時は、安定領域Sは図中の $\phi=10^\circ$ で示された点線の領域に広がる。摩擦角が大きくなるにしたがい安定領域は広がってゆき、 $\phi=90^\circ$ の時、すべりモードの領域は消滅し、浮上がりモードの0で示される領域以外が安定領域になる。摩擦角のコンターを示したこの図面は、一目で任意の合力の作用点に対するつりあいに必要な摩擦角がどのくらいかを判断するのに有効である。

ここで考えたジョイント面の抵抗力は、内部摩擦角 ϕ によるものであったが、通常は抵抗力として粘着力cによるものも考える。しかしながら、粘着力cまで含めてステレオ投影で平衡曲線を描くことはできない。それは、粘着力による抵抗力は、粘着力とすべり面の面積であるから、ブロックの形状と大きさに依存するためであり、ステレオネット上では表現できないからである。したがって、ジョイント面のc、 ϕ を含めた安定性を判定するためには、次節で説明する極限平衡方程式を使った解法によらなければならない。

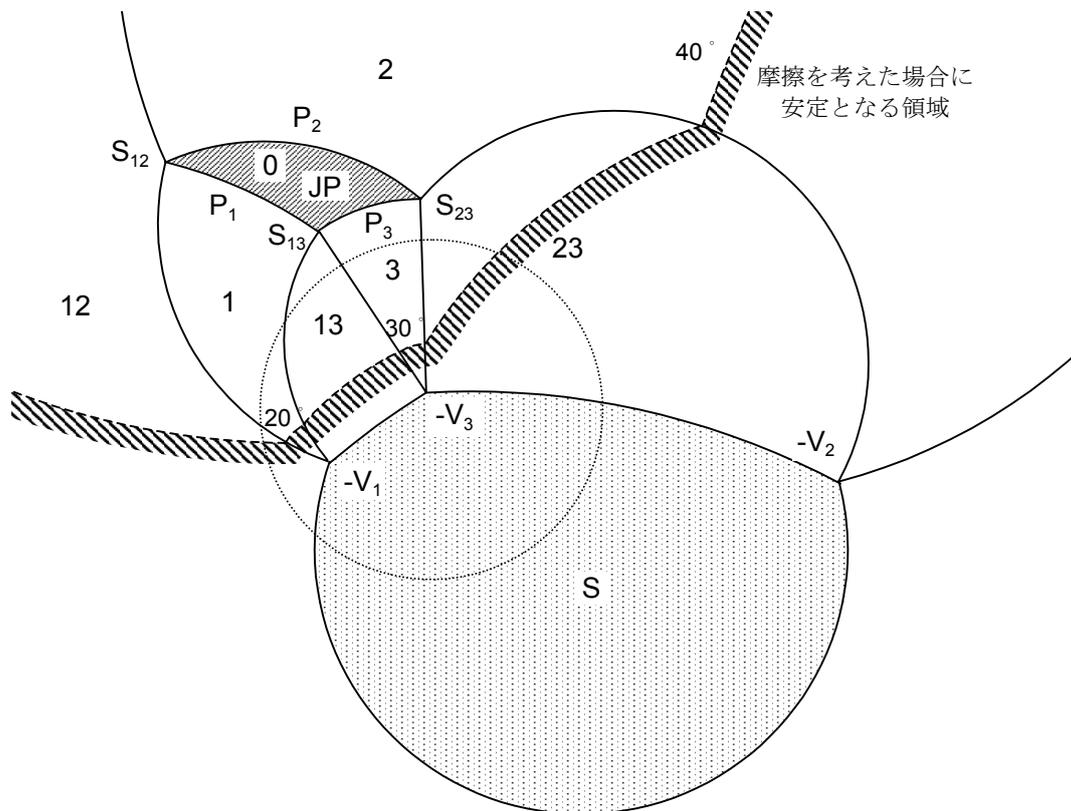


図-3.14 JP101 に対するすべりモード（上半球投影）

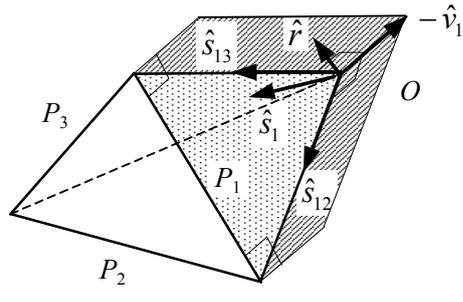


図-3.15 1面すべりの合力範囲

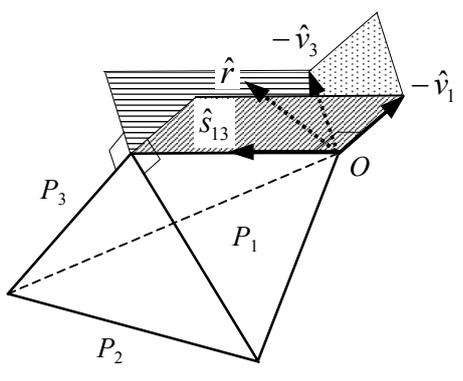


図-3.16 2面すべりの合力範囲

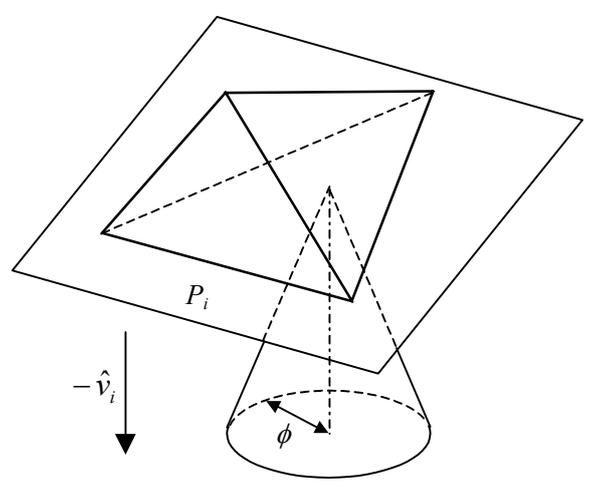


図-3.17 平面すべりの摩擦抵抗

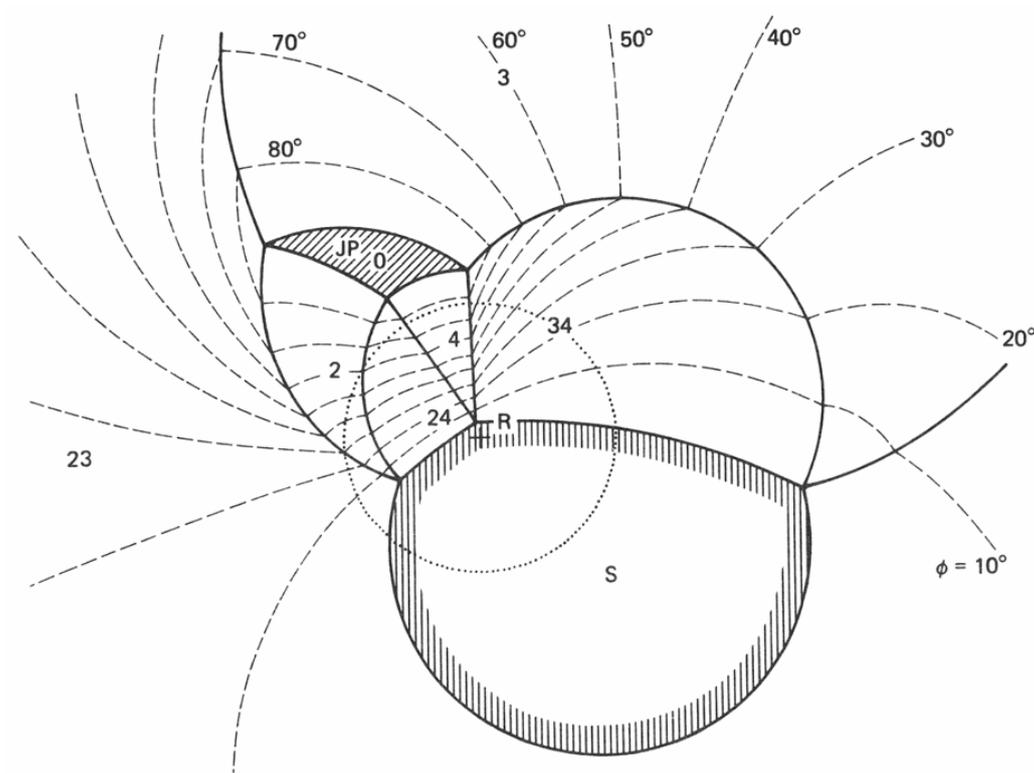


図-3.18 JP101 の摩擦角の平衡領域コンター（上半球投影）

3.4.4 キーブロックに対する補強工の設計

モード解析によりブロックに作用する合力方向を考えたときに不安定と判断されるブロック、すなわち潜在キーブロック（タイプ2）およびキーブロック（タイプ1）のブロックに対しては、極限平衡解析による安定計算を実施する。安定計算では、吹付コンクリートやアンカー等による導入力を検討し、必要な安全率を満たすための補強工の設計を行うことになる。その際、前節のモード解析により分類される3つの破壊モードである抜け出し、平面すべり（1面すべり）、2面すべり（くさびすべり）のモードに対応した釣合い方程式により解析が行われる。

補強工設計における安定計算では、ブロックに作用する外力を仮定する必要がある。ここでは、以下に示すブロック自重、ジョイント面のせん断抵抗、ロックボルトやアンカーによる導入力、吹付面のせん断抵抗を考慮して、釣合い方程式立てることとした。

①ブロックの慣性力

ブロックの自重のみを考慮する場合は、ブロックの体積に岩盤の単位体積重量をかけたものが慣性力の大きさである。この場合、慣性力の作用方向は鉛直下向き(0,0,-1)となる。地震時の水平および鉛直慣性力を考慮する場合は、作用方向ベクトルは3成分とも持つことになる。

②不連続面のせん断抵抗

不連続面に対しては粘着力 c と内部摩擦角 ϕ によるせん断抵抗を考慮した。2面すべりに対しては、各すべり面ごとに異なる c 、 ϕ が扱えるようにしてある。ただし、不連続面の引張抵抗は考慮しなかった。したがって、抜け出しモードのブロックについては、すべてのジョイント面が開口するために、不連続面抵抗は存在しないことになる。

③吹付コンクリートのせん断抵抗

吹付けコンクリートに対しては、掘削面におけるキーブロックの境界線に沿ったせん断抵抗を考慮した。したがって、吹付コンクリートのせん断強度を τ_R 、キーブロックの掘削面での周長を l 、吹付厚さを t とすると、吹付抵抗は $\tau_R l t$ となる。ただし、最近の研究では吹付コンクリートが破壊するのはせん断破壊よりは、吹付コンクリートと岩盤の付着が切れることによる曲げ破壊であることの方が多く、せん断強度による抵抗力よりも小さい抵抗力しか期待しないと指摘もあるが、ここでは考慮しない。

④ロックボルト、ロックアンカーによる導入力

ロックボルトあるいはPSアンカーに対しては、その打設方向に導入力が外力としてブロックに作用するものとした。ロックアンカーの場合は緊張力が加えられるから、それを導入力として与えればよい。全面接着型のロックボルトの場合はロックボルトに発生する軸力は、事前には不明であるが、例えば鋼材の降伏強度の相当する軸力を仮定の導入力として考えることができる。ここでは、ロックボルトのせん断抵抗は考慮していない。

なお、岩盤ブロックに作用する外力としては、上記の4種類以外にも考えられるが、本節では触れないこととした。例えば図-3.20に示すように、ジョイント面からの地下水の浸出がみられる場合には、水圧の作用によりブロックがより不安定になることが考えられるが、この効果については次節で考察することとする。また、岩盤ブロックには、周辺地盤からの地圧が作用していると考えられる。これは、岩盤斜面のように地表面付近での安定を考えれば、地圧は小さく無視しても差し支えないが、岩盤自重に比べて地圧が相対的に大きくなる地下深部のトンネルや地下空洞では、ブロックの安定性に影響する。地圧の方向や大きさとジョイント面の方向やせん断強度の関係により、ブロックが周辺岩盤より押し出され不安定になる場合と、ジョイント面の摩擦抵抗が増加し安定になる場合の両方が考えられる。このような現象に対しては、不連続変形法や個別要素法などブロック間の力の伝達による相互作用を解析できる手法を使う必要がある。また、ブロックのジョイント面にできるだけ垂直にアンカーやロックボルトを打設することにより、定着長をより長くしたり、ジョイント面のせん断抵抗を大きくするなどの効果を期待して2方向以上に導入力を作用させることも考えられるが、ここでは考慮していない。

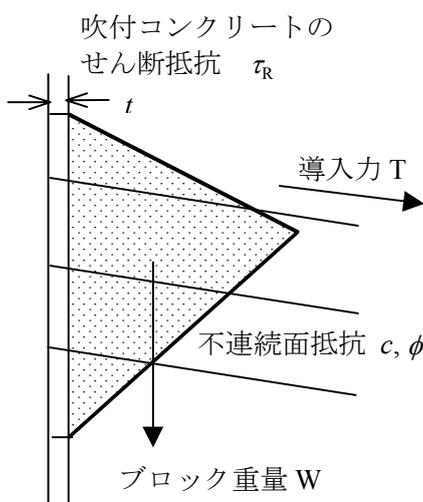


図-3.19 ブロックに作用する外力

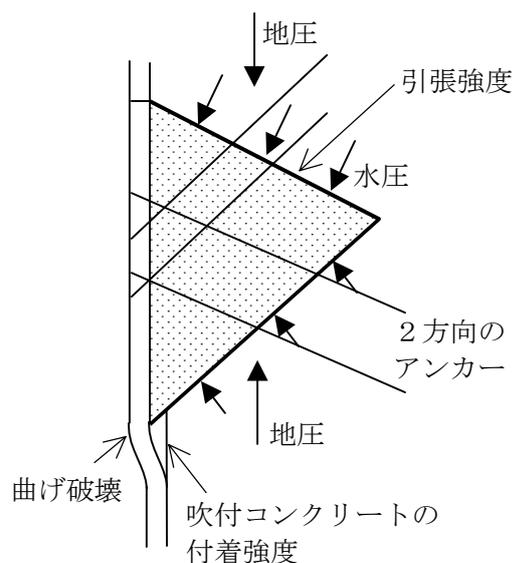


図-3.20 安定解析に考慮していない外力

以下に各すべりモードの極限平衡解析の方法について説明するが、ここには1つの条件がある。それは、解析の途中では同一の極限平衡方程式で解を求めているということである。手順としては、最初にキーブロックに対して何ら補強対策が行われず、導入力が入力されない状態でのすべりモードとすべり方向を判定し、そのモードに適合した方程式を立てて、導入力が入力した場合について考えることになる。しかし、厳密にブロックの安定性を議論しようとするならば、導入力を作用させた状態では、導入力と初期のブロックに作用していた慣性力の合力が新たな合力として定義され、この合力に対するすべりのモードを判定し、平衡解析を行う必要がある。与える導入力の大きさと方向によっては、すべりモードが変化することが予測され、例えば最初平面すべりであったものが2面すべりに成ることも考えられる。これは、解析の手順としてはかなり複雑になる。また、この逆問題として、導入力の大きさを未知数として、所定の安全率を満たす状態を解析しようとする、さらに複雑な過程を必要とする。したがって、ここでは計算を簡易にするために、最初に設定した平衡方程式で議論を進めてゆくことにする。

モード解析により、抜け出し、平面すべり、2面すべりのモードとすべりの方向が決定される。極限平衡解析は、このすべり方向での釣合いの計算を行うものである。今、ブロックに作用する重力やロックボルトおよびロックアンカーによる導入力のすべり方向への成分をすべり力 S とし、不連続面の摩擦抵抗や吹付けコンクリートのせん断力などのすべり方向成分を抵抗力 R とすると、すべりの合力 F は以下の式で表される。

$$F = S - R \quad (3.13)$$

式(3.13)において、 $F=0$ の場合はすべり力と抵抗力がちょうど釣り合っている状態であり、 $F>0$ の場合はすべり力のほうが大きくすべり破壊の起きる不安定な状態、 $F<0$ の場合は抵抗力のほうが大きく安定な状態である。また、安全率 f_s は抵抗力 R とすべり力 S の比として以下の式で表される。

$$f_s = \frac{R}{S} \quad (3.14)$$

以下に、図-3.21に示すようなブロックの作用力が与えられた場合の各すべりモードにおける安定計算式について説明する。

(1) 抜け出し

図-3.21(a)に示すような、抜け出しのすべりモードとなるブロックに作用する力の釣り合いを考える。不連続面の引張抵抗は考慮していないのでブロックに作用する力は慣性力、ボルトあるいはアンカーによる導入力、および吹付コンクリートのせん断力となる。図中、導入力の方向と慣性力方向のなす角を θ とすると、すべり力 S 、抵抗力 R 、すべりの合力 F は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} \text{すべり力} \quad S &= W + (\hat{t} \cdot \hat{w})T = W + T \cos \theta \\ \text{抵抗力} \quad R &= \tau_R l t \\ \text{すべりの合力} \quad F &= S - R = W + T \cos \theta - \tau_R l t \end{aligned} \quad (3.15)$$

また、すべりの安全率 f_s は次式で表される。

$$f_s = \frac{R}{S} = \frac{\tau_R l t}{W + T \cos \theta} \quad (3.16)$$

安全率が与えられた場合の、必要導入力は上式を T について解くことにより求められ、次式で表される。

$$T = \frac{\tau_R l t - f_s W}{f_s \cos \theta} \quad (3.17)$$

(2) 平面すべり

図-3.21 (b)に示すような、平面すべりの破壊モードとなるブロックに作用する力の釣り合いを考える。ブロックの慣性力がブロック自重のみである場合、すべり方向はすべり面の傾斜方向と一致する。すべり方向へのすべり力 S は次式で表される。

$$\begin{aligned} S &= k_w W + k_t T \\ &= W \cos \alpha + T \cos \theta \end{aligned} \quad (3.18)$$

ただし、 $k_w = \hat{w} \cdot \hat{s} = \cos \alpha$, $k_t = \hat{t} \cdot \hat{s} = \cos \theta$ である。

また、すべり面の法線方向に作用する力 N は次式で表される。

$$\begin{aligned}
N &= -l_w W - l_t T \\
&= W \sin \alpha + T \sin \theta
\end{aligned}
\tag{3.19}$$

ただし、 $l_w = \hat{w} \cdot \hat{v}_i = -\sin \alpha$, $l_t = \hat{t} \cdot \hat{v}_i = -\sin \theta$ である。

したがって、抵抗力 R は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned}
R &= c A + N \tan \phi + \tau_R l t \\
&= c A - (l_w W + l_t T) \tan \phi + \tau_R l t \\
&= c A + (W \sin \alpha + T \sin \theta) \tan \phi + \tau_R l t
\end{aligned}
\tag{3.20}$$

また、すべりの安全率 f_s は次式で表される。

$$f_s = \frac{R}{S} = \frac{c A + (W \sin \alpha + T \sin \theta) \tan \phi + \tau_R l t}{W \cos \alpha + T \cos \theta}
\tag{3.21}$$

安全率が与えられた場合の、必要導入力は上式を T について解くことにより求められ、次式で表される。

$$\begin{aligned}
T &= \frac{c A - f_s k_w W - l_w W \tan \phi + \tau_R l t}{k_t f_s + l_t \tan \phi} \\
&= \frac{c A - f_s W \cos \alpha + W \sin \alpha \tan \phi + \tau_R l t}{f_s \cos \theta - \sin \theta \tan \phi}
\end{aligned}
\tag{3.22}$$

(3) 2面すべり

図-3.21(c)に示すような2面すべりを形成する2つの面を持つブロックに作用する力の釣り合いを考える。すべり方向は2つの面の交線方向であり、この方向へのすべり力 S は次式で表される。

$$S = k_w W + k_t T
\tag{3.23}$$

ただし、 $k_w = \hat{w} \cdot \hat{s}$, $k_t = \hat{t} \cdot \hat{s}$ である。

また、すべり面1、2の法線方向に作用する力 N_1 、 N_2 とすると、すべり面1、2に垂直な方向の力の釣り合いを考えれば次式が成立する。

$$\begin{aligned}
N_1 + N_2 \hat{v}_2 \cdot \hat{v}_1 + T \hat{t} \cdot \hat{v}_1 + W \hat{w} \cdot \hat{v}_1 &= 0 \\
N_2 + N_1 \hat{v}_1 \cdot \hat{v}_2 + T \hat{t} \cdot \hat{v}_2 + W \hat{w} \cdot \hat{v}_2 &= 0
\end{aligned}
\tag{3.24}$$

以上の2式を N_1 、 N_2 について解くことにより以下の式が得られる。

$$N_i = \alpha_i W + \beta_i T \tag{3.25}$$

$$\text{ただし、 } \alpha_i = \frac{(\hat{w} \cdot \hat{v}_j)(\hat{v}_1 \cdot \hat{v}_2) - \hat{w} \cdot \hat{v}_i}{1 - (\hat{v}_1 \cdot \hat{v}_2)^2}, \quad \beta_i = \frac{(\hat{t} \cdot \hat{v}_j)(\hat{v}_1 \cdot \hat{v}_2) - \hat{t} \cdot \hat{v}_i}{1 - (\hat{v}_1 \cdot \hat{v}_2)^2}$$

($i=1$ の時 $j=2$ 、 $i=2$ の時 $j=1$) である。

したがって、抵抗力 R は以下の式で与えられる。

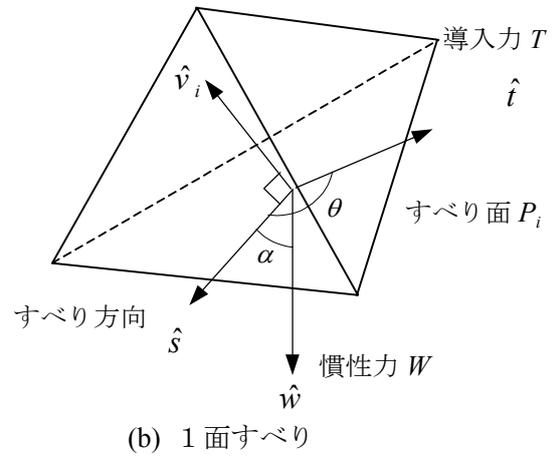
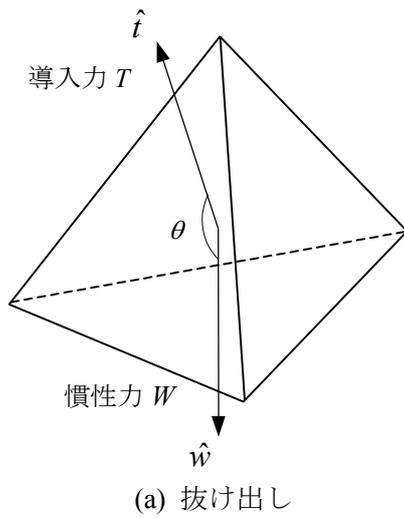
$$\begin{aligned}
R &= \sum c_i A_i + \sum N_i \tan \phi_i + \tau_R l t \\
&= \sum c_i A_i + \sum (\alpha_i W + \beta_i T) \tan \phi_i + \tau_R l t
\end{aligned}
\tag{3.26}$$

また、すべりの安全率 f_s は次式で表される。

$$f_s = \frac{R}{S} = \frac{\sum c_i A_i + \sum (\alpha_i W + \beta_i T) \tan \phi_i + \tau_R l t}{k_w W + k_t T} \tag{3.27}$$

安全率が与えられた場合の必要導入力は上式を T について解くことにより求められ、次式で表される。

$$T = \frac{k_w f_s W - \sum c_i A_i - \sum \alpha_i W \tan \phi_i - \tau_R l t}{\sum \beta_i \tan \phi_i - k_t f_s} \tag{3.28}$$



- \hat{s} : すべり方向の単位ベクトル
- \hat{t} : アンカーまたはボルトの導入力の単位方向ベクトル
- \hat{w} : 慣性力方向単位ベクトル
- α : すべり方向と慣性力方向のなす角
- θ : すべり方向と導入力方向のなす角
- l : 掘削面上でのブロック周長
- t : 吹付コンクリート厚さ
- τ : 吹付コンクリートせん断強度
- T : アンカーまたはボルトによる導入力
- W : ブロック重量
- A_i : すべり面 i の面積
- c_i : すべり面 i の粘着力
- ϕ_i : すべり面 i の内部摩擦角
- \hat{v}_i : すべり面 i のブロック内向きの単位法線ベクトル

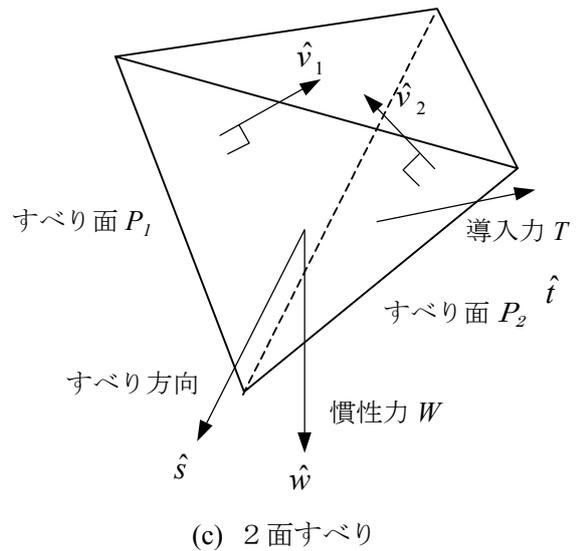


図-3.21 キーブロックに作用する力

3.4.5 地下水圧の検討

キーブロックに地下水圧が作用する場合は、その作用効果はブロックを不安定化する方向に働くため、注意が必要である。地下発電所空洞の場合は、空洞周辺には事前の調査トンネルが掘削されており、またアクセストンネルや放水路、導水路トンネルが先行して掘削される場合が多く、本体空洞掘削時には空洞周辺の地下水位は下がっている場合が多い。また、事前調査により湧水が多く、空洞の安定性が懸念される場合には、水抜き孔を配置したり、グラウトを実施したりすることにより、極力空洞周辺に地下水圧が作用させないよう対策を実施している。したがって、このような場合はキーブロックにも地下水圧はほとんど作用しないと考えられ、その影響を考慮する必要はない。

一方、石油備蓄空洞やLPG備蓄空洞の場合には、岩盤貯蔵の原理として地下水圧により内部の石油やガスを封じ込める水封システムを採用している⁸⁾。空洞掘削時においても周辺岩盤内に不飽和域を発生させることは、将来の漏洩経路となる恐れがあるため、水封トンネルは先行して掘削され、水封システムが稼動した状態で空洞掘削は開始される。したがって、空洞周辺は施工時点から飽和状態に保持されることになり、空洞の周辺岩盤には常に地下水圧が作用するため、キーブロックの安定解析にも地下水圧を考慮する必要がある。

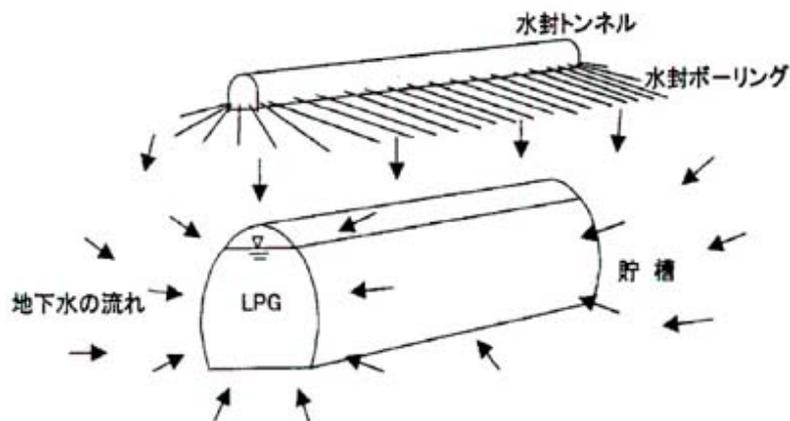


図-3.22 LPG地下備蓄における水封方式概念図⁸⁾

Hoek と Bray⁴⁾は、2次元問題として、斜面での平面すべりの安定解析において地下水の影響を考慮した場合の安全率の式を導いている。これは、図-3.23に示すように斜面の背面に引張亀裂があり、引張亀裂およびすべり面に地下水圧が作用している場合である。ここで引張亀裂は鉛直で、深さ z_w まで地下水で満たされており、静水圧分布をしている。地下水は引張亀裂の底部から水頭 z_w の圧力ですべり面に浸入し、すべり面が斜面に現れる点で大気圧になる。また、すべり面内での水圧分布は一定の圧力勾配を持ち、直線的に変化すると仮定する。

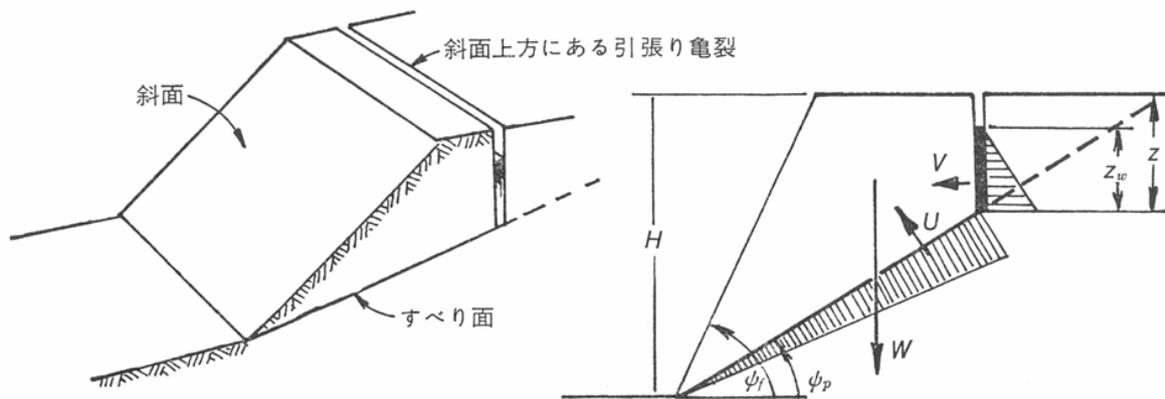


図-3.23 斜面頂部背面に引張亀裂のある斜面⁴⁾

また、岩盤ブロックの重量 W 、すべり面上の水圧による揚圧力 U 、および引張亀裂中の水圧による力 V は、岩盤の重心を通るものとしている。これは、言い換えると岩盤ブロックを回転させようとするモーメントはなく、崩壊はすべり破壊によってのみ生じるとする仮定である。

すべりの破壊基準はクーロンの破壊基準によるものとし、粘着力を c 、内部摩擦角を ϕ とすると、すべり力 S 、抵抗力 R および安全率 f_s は以下の式で表される。

$$\begin{cases} S = W \sin \varphi_p + V \cos \varphi_p \\ R = c \cdot A + (W \cos \varphi_p - U - V \sin \varphi_p) \tan \phi \\ f_s = \frac{R}{S} = \frac{c \cdot A + (W \cos \varphi_p - U - V \sin \varphi_p) \tan \phi}{W \sin \varphi_p + V \cos \varphi_p} \end{cases} \quad (3.29)$$

ここに、図-3.23より、

$$\begin{cases} A = (H - z) \sin^{-1} \varphi_p \\ U = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot z_w (H - z) \sin^{-1} \varphi_p \\ V = \frac{1}{2} \gamma_w \cdot z_w^2 \end{cases} \quad (3.30)$$

さて、式(3.29)によれば、すべり力 S は水圧 V により増加しており、抵抗力 R は水圧 U 、 V により減少している。その結果、水圧を考慮した場合、安全率が大きく減少し、すべり破壊

が発生しやすくなる場合があることに注意しなければならない。

また、地下水が存在する場合の粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ についても検討しておく必要がある。一般に硬岩の不連続面の場合、間隙に充填物がほとんどない場合は、これらの強度定数は地下水の存在によって大きくは変化しない。不連続面抵抗力の減少は、水圧が作用する分だけすべり面に作用する有効応力が減少することによるものである。しかしながら、不連続面の間隙に粘土等の充填物が存在する場合は、充填物の含水量の変化により、粘着力と内部摩擦角が著しく変わることがある。これらの材料を試験する時は、含水比をできる限り現場の状態に近くすることが必要となる。

次に、キープロック解析に地下水圧を考慮することを考える。ここでも、上述した平面すべりの場合と同様に、**図-3.24**に示すような三角形分布の地下水圧を仮定、三角形分布の頂点での地下水圧を p_w とする。このような水圧分布は、実際にブロックの各面に生じているものに比べて、かなり簡略化したものであるが、実際の圧力分布を正確に求めることは困難であり、また線形で無い圧力分布が得られたとしても、その積分値としての作用力を求めることにも複雑な計算となる。したがって、この仮定は現状では合理的なものと考えてよい。キープロックの岩盤内の頂点における地下水圧 p_w については、斜面の場合は地下水面からの深さ相当の地下水圧を与えることができる。トンネルや地下空洞の場合は、均質媒体中の円形トンネルの水圧分布の理論解や、浸透流解析により、あらかじめ掘削面からの深さと地下水圧の関係を求めておき地下水圧 p_w を与えることができる。また、実際に岩盤中の間隙水圧が計測されている場合は、その計測値を参考にすることも可能であろう。

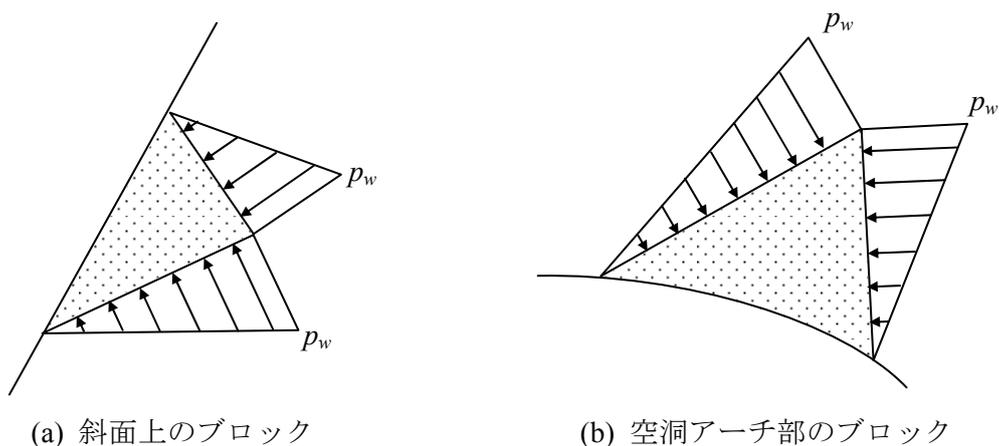


図-3.24 キープロックに作用する地下水圧

キーブロックを構成する不連続面の形状がすべて三角形である場合は、各面に作用する水圧による力 U_i は容易に計算され、以下の式で表される。

$$U_i = \frac{1}{3} A_i \cdot p_w \quad (3.31)$$

ここに、 U_i : 不連続面 i に作用する水圧による力

p_w : 岩盤内頂点における水圧

A_i : ブロックを構成する不連続面 i の面積

各面の形状が三角形でない場合は、やや複雑になるが、多角形を 3 角形に分けることにより計算することができる。

また、地下水圧によりブロックに作用する合力は以下の式で与えられる。

$$\mathbf{U}_{\text{total}} = \sum \mathbf{U}_i = \sum U_i \cdot \hat{\nu}_i \quad (3.32)$$

ここに、 $\mathbf{U}_{\text{total}}$: 水圧による作用合力

\mathbf{U}_i : 不連続面 i における作用力

$\hat{\nu}_i$: 不連続面 i のブロック内向きの単位法線ベクトル

さて、ブロックに作用する合力を、重力による成分と、地下水圧による成分の和として考えると合力は、以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_f &= \mathbf{W} + \sum_{i=1}^n \mathbf{U}_i = W \cdot \hat{w} + \sum_{i=1}^n U_i \cdot \hat{\nu}_i \\ &= R_f \cdot \hat{r} \end{aligned} \quad (3.33)$$

ここに、 \mathbf{R}_f : ブロックに作用する全合力

\mathbf{W} : ブロック自重による慣性力

R_f : ブロックに作用する全合力の大きさ

\hat{r} : ブロックに作用する全合力方向の単位法線ベクトル

式(3.33)の意味するところは、前節で地下水圧を考慮せず、ブロック作用力を重力成分 \mathbf{W} だけで計算していたものを、地下水圧成分を加えた合力 \mathbf{R}_f に置き換えれば良いということである。すなわち、式(3.15)~式(3.28)において、 \mathbf{W} および \hat{w} の項を、 R_f および \hat{r} の項に置き換えることにより、地下水圧を考慮した安定解析が実施できる。

3.5 ステレオ分析法による凹型ブロックの判定法

ここでは、ステレオ投影法と行列計算を併用することにより、凹型ブロックを含めた一般形状のブロックについて、ブロックの有限性を判定できるステレオ分析法⁹⁾について述べる。Shi のブロック理論⁵⁾は、ステレオ投影法もしくはベクトル計算法のいずれかを用いて、不連続面を含む岩盤の凸型ブロックの有限性と移動可能性を論じるものである。ステレオ投影法は非常に分かりやすい手法であるが、不連続面の数が多くなると投影面上での大円や交点の位置関係は複雑になり、ブロックの判定をするのは容易ではない。また、ベクトル計算法でも多くの不等式を解く必要がある。また、凹型のブロックに対しては、ブロックの判定は複雑になる。

ステレオ分析法では、ステレオ投影法と行列計算の組合せで、有限ブロック、先細りブロックおよび移動可能ブロックの判定を行うものであり、ブロック理論をより効果的な手法に発展させるものである。

3.5.1 不連続面のステレオ投影

座標軸は右手系直交座標系とし、X 方向を東、Y 方向を北、Z 方向を鉛直上向きにとる。不連続面 P_i は傾斜角度 α_i と傾斜方位 β_i で表されるものとする。3.2.1 節で述べたステレオ投影法によれば、不連続面 P_i を下方焦点投影法で表すと 図-3.25 のようになり、不連続面を表す大円の半径 r と中心座標 (C_x, C_y) は以下の式で表される。

$$\begin{aligned} r &= R / \cos \alpha_i \\ C_x &= R \tan \alpha_i \sin \beta_i \\ C_y &= R \tan \alpha_i \cos \beta_i \end{aligned} \quad (3.34)$$

ここに、 R は基準円の半径である。

この時、大円の方程式は以下のようなになる。

$$(x - R \tan \alpha_i \sin \beta_i)^2 + (y - R \tan \alpha_i \cos \beta_i)^2 = (R / \cos \alpha_i)^2 \quad (3.35)$$

ただし、 $\alpha_i = \pi/2$ のときは直線となり

$$x \tan \beta_i + y = 0 \quad (3.36)$$

となる。なお、以降の議論では、 $\alpha_i = \pi/2$ の場合は扱わないものとする。これは、 $\alpha_i = \pi/2$ の場合に、別途式を立てなければならない煩雑さを回避するためである。90度の傾斜は、少し傾けて89.9度等とすることにより、式(3.35)で評価できるので一般性を失うことはない。

不連続面 P_i により、3次元空間は2つの半空間に分かれるが、投影面上では下方焦点投影の場合、大円の内側が P_i の上半空間となり、大円の外側が P_i の下半空間となる。

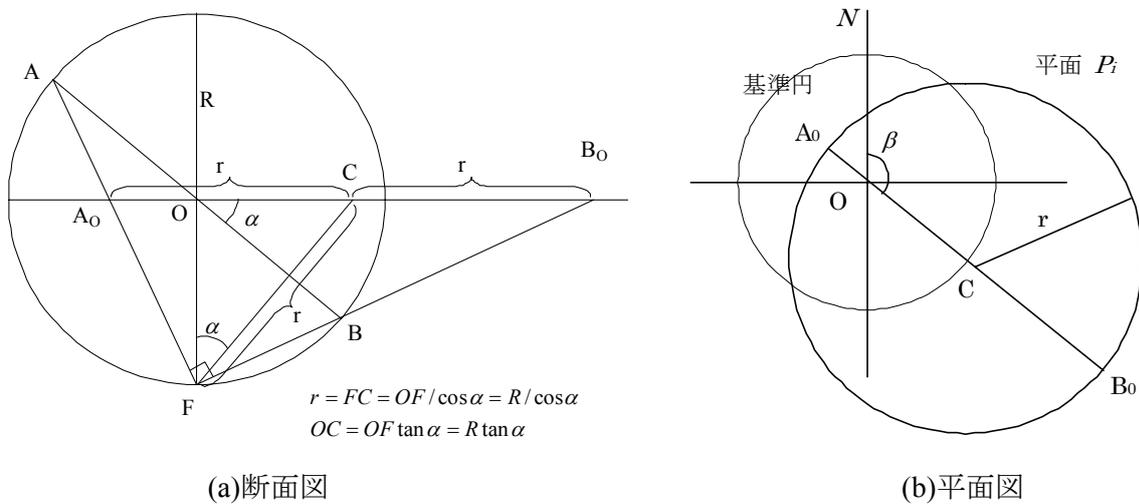


図-3.25 平面のステレオ投影図

3.5.2 ブロックの形状

3.2.2節で述べたように、不連続面 P_i の上半空間を記号 U_i 、下半空間を記号 L_i で表すことにする。図-3.26(a)に示すように2つの不連続面 P_i と P_j を考えると、空間は4つの無限凸型ブロック、すなわちに $U_i \cap U_j$ 、 $U_i \cap L_j$ 、 $L_i \cap L_j$ および $L_i \cap U_j$ に分けられる。このうち無限凸型ブロック $U_i \cap U_j$ を不等式で表すと以下ようになる。

$$\begin{aligned}
 &A_i x + B_i y + C_i z > D_i \\
 &\text{and} \\
 &A_j x + B_j y + C_j z > D_j
 \end{aligned} \tag{3.37}$$

ここで、 A_i 、 B_i 、 C_i 、 A_j 、 B_j 、 C_j は、不連続面 P_i と P_j の単位法線ベクトルの方向余弦であり、 D_i 、 D_j は原点と各面の距離を表す。

また、**図-3. 26 (b)**に示す無限凹型ブロック $L_i \cup L_j$ は、以下の不等式で表される。

$$L_i \cup L_j = (U_i \cap L_j) \cup (L_i \cap U_j) \cup (L_i \cap L_j) \quad (3.38)$$

これを不等式で表すと以下のようになる。

$$\begin{aligned} A_i x + B_i y + C_i z < D_i \\ \text{or} \\ A_j x + B_j y + C_j z < D_j \end{aligned} \quad (3.39)$$

3次元空間では4個以上の不連続面、2次元空間では3個以上の不連続面が存在すると、有限な凸型ブロックを形成することができ、**図-3. 26 (c)**に示すように有限な凸型ブロックは、上半空間と下半空間の積集合で表される。

$$U_1 \cap U_2 \cap \cdots \cap U_n \cap L_1 \cap L_2 \cap \cdots \cap L_m \quad (3.40)$$

これを不等式で表すと以下のようになる。

$$\begin{aligned} A_i x + B_i y + C_i z > D_i \\ (i = 1, 2, \dots, n) \\ \text{and} \\ A_j x + B_j y + C_j z < D_j \\ (j = 1, 2, \dots, m) \end{aligned} \quad (3.41)$$

ただし、3次元空間の場合、 $i \geq 1, j \geq 1, 1 + j \geq 4$ となる。

図-3. 26 (d)に示す有限な凹型ブロックを考えると、この集合は半空間の積集合と和集合の組合せで表され、不連続面 A1 と A2 が凹部を形成する場合は、以下の集合となる。

$$\begin{aligned} & U_1 \cap U_2 \cap \cdots \cap U_n \cap L_1 \cap L_2 \cap \cdots \cap L_m \cap (L_{a1} \cup L_{a2}) \\ & = (U_1 \cap U_2 \cap \cdots \cap U_n \cap L_1 \cap L_2 \cap \cdots \cap L_m \cap L_{a1}) \cup (U_1 \cap U_2 \cap \cdots \cap U_n \cap L_1 \cap L_2 \cap \cdots \cap L_m \cap L_{a2}) \end{aligned} \quad (3.42)$$

これを数式で表すと以下の2組の不等式となる。

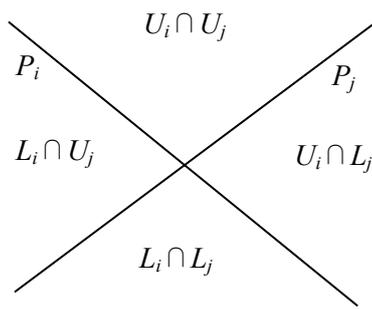
$$\left\{ \begin{array}{l} A_i x + B_i y + C_i z > D_i \\ (i = 1, 2, \dots, n) \\ \text{and} \\ A_j x + B_j y + C_j z < D_j \\ (j = 1, 2, \dots, m) \\ \text{and} \\ A_{a_1} x + B_{a_1} y + C_{a_1} z < D_{a_1} \end{array} \right. \quad (3.43)$$

ただし、 $i \geq 1, j \geq 1, i + j \geq 3$

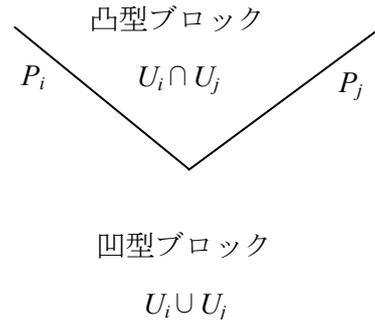
あるいは、

$$\left\{ \begin{array}{l} A_i x + B_i y + C_i z > D_i \\ (i = 1, 2, \dots, n) \\ \text{and} \\ A_j x + B_j y + C_j z < D_j \\ (j = 1, 2, \dots, m) \\ \text{and} \\ A_{a_2} x + B_{a_2} y + C_{a_2} z < D_{b_1} \end{array} \right. \quad (3.44)$$

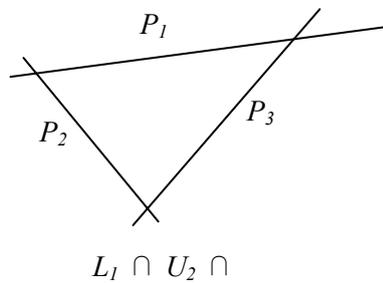
ただし、 $i \geq 1, j \geq 1, i + j \geq 3$



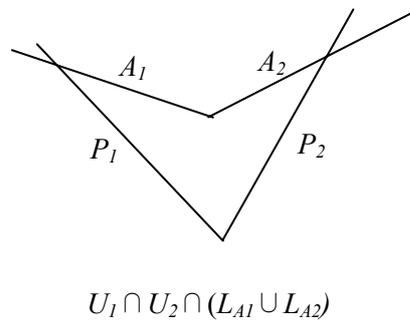
(a)無限凸型ブロック



(b)無限凸型および無限凹型ブロック



(c)有限凸型ブロック



(d)有限凹型ブロック

図-3.26 2次元の場合の凸方ブロックと凹型ブロック

3.3.2節で述べたように、ブロックを形成するすべての不連続面と掘削面を原点に移動したときの半空間の集合をブロックピラミッド(BP)と呼び、凸型ブロックの場合は Shi の定理によりブロックピラミッドが空集合であるときそのブロックは有限である。ここで、有限な凸型のブロックピラミッド (BP) は式(3.41)を原点に移動して、以下の式で表される。

$$\begin{aligned}
 &A_i x + B_i y + C_i z > 0 \\
 &(i = 1, 2, \dots, n) \\
 &\text{and} \\
 &A_j x + B_j y + C_j z < 0 \\
 &(j = 1, 2, \dots, m)
 \end{aligned}
 \tag{3.45}$$

ただし、 $i \geq 1, j \geq 1, i + j \geq 4$

BP が有限である条件は、式(3.45)を満たす解が存在しないことである。逆に式(3.45)を満た

す解が存在すれば、そのブロックは無限ブロックである。

$$U_1 \cap U_2 \cap \cdots \cap U_n \cap L_1 \cap L_2 \cap \cdots \cap L_m = \Phi \quad (3.46)$$

BP が凹型ブロックである場合に拡張すると、式(3.43)、式(3.44)を原点に移動して、

$$\left\{ \begin{array}{l} A_i x + B_i y + C_i z > 0 \\ (i = 1, 2, \dots, n) \\ \text{and} \\ A_j x + B_j y + C_j z < 0 \\ (j = 1, 2, \dots, m) \\ \text{and} \\ A_{a1} x + B_{a1} y + C_{a1} z < 0 \end{array} \right. \quad (3.47)$$

ただし、 $i \geq 1, j \geq 1, i + j \geq 3$

あるいは、

$$\left\{ \begin{array}{l} A_i x + B_i y + C_i z > 0 \\ (i = 1, 2, \dots, n) \\ \text{and} \\ A_j x + B_j y + C_j z < 0 \\ (j = 1, 2, \dots, m) \\ \text{and} \\ A_{a2} x + B_{a2} y + C_{a2} z < 0 \end{array} \right. \quad (3.48)$$

ただし、 $i \geq 1, j \geq 1, i + j \geq 3$

BP が有限である条件は、式(3.47)、式(3.48)のいずれも解を持たないことである。逆の場合、すなわち式(3.47)、式(3.48)の少なくともいずれか 1 つが解を持つ場合は、その凹型ブロックは無有限ブロックである。したがって、凹型ブロックの有限性定理は以下の式で表される。

$$U_1 \cap U_2 \cap \cdots \cap U_n \cap L_1 \cap L_2 \cap \cdots \cap L_m \cap (L_{a1} \cup L_{a2}) = \Phi \quad (3.49)$$

3.5.3 ステレオ分析法

前節では、凸型および凹型のブロックの有限性を判定するための不等式について述べた。しかしながら、実際の不連続性岩盤の問題において、多くの不等式を満足する解を求めることは困難である。ここでは、より簡単で効果的な手法として、ステレオ分析法の概念について述べる。

まず、基準円を $C = \{(x, y) | x^2 + y^2 = R^2\}$ とし、不連続面 P_i と P_j の交線のステレオ投影点を $N_{ij} = N_{ij}(x_l, y_l)$ ($l=1 \text{ or } 2$) としたとき、

$N_{ij} = N_{ij}(x_l, y_l) \in C$ ならば N_{ij} は正の交点とし、 N_{ij}^+ と表す

$N_{ij} = N_{ij}(x_l, y_l) \notin C$ ならば N_{ij} は負の交点とし、 N_{ij}^- と表す

と定義する¹⁰⁾。基準円の内部は $Z>0$ の上半球の空間を表し、基準円の外部は $Z<0$ の下半球の空間を表すから、ステレオ投影面での正の交点は 3 次元空間では上向きの交線ベクトルを表し、負の交点は下向きの交線ベクトルを表すことになる。

3 個のそれぞれ平行でない不連続面が存在するとき、(a)このうちの 2 つの不連続面 P_i と P_j の交線はステレオ投影面では、2 つの点で表される。(b)そのうち片方の点は第 3 の不連続面 P_k の投影大円の上半空間に存在し、他方の点は下半空間に存在する。(図-3.27 参照)

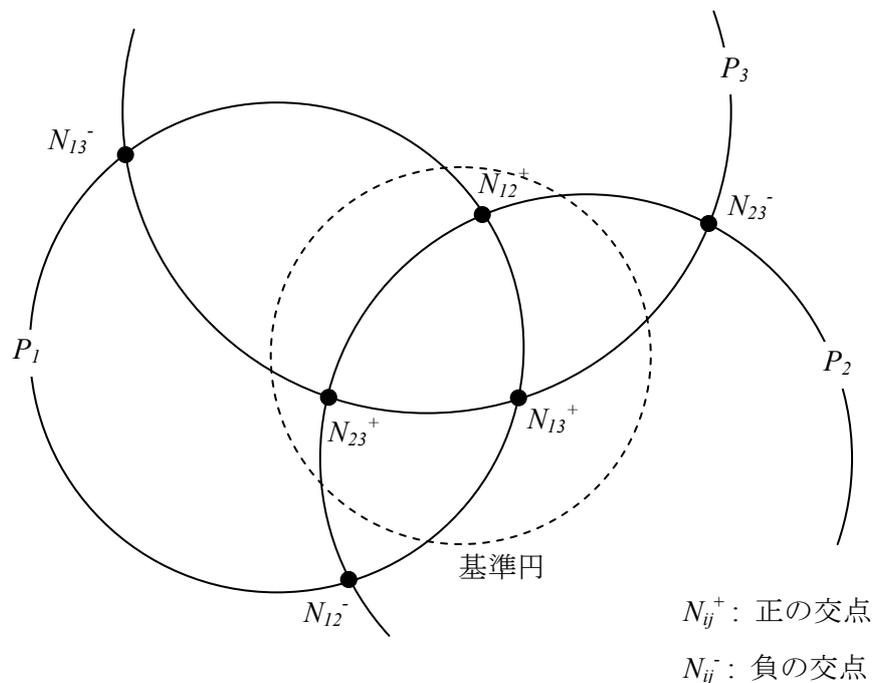


図-3.27 正の交点と負の交点の位置関係

ここで、正負の交点に関して以下の定理が得られる。

定理 1 : 2 個の不連続面交線の投影点のうち正の交点が、他の不連続面群によるブロックピラミッドの内部に存在するとき、その正の交点はブロックピラミッドの稜線となっている。逆にブロックピラミッドの外部に存在するときは稜線ではない。

同様に、2 個の不連続面交線の投影点のうち負の交点が、他の不連続面群によるブロックピラミッドの内部に存在するとき、その負の交点はブロックピラミッドの稜線となっている。逆にブロックピラミッドの外部に存在するときは稜線ではない。

定理 2 : ステレオ投影において不連続面と掘削面の半空間の共通領域が空集合のとき、実際に有限ブロックが存在し、このことはステレオ投影法により判定できる。ステレオ投影法における半空間の共通集合が空集合でないとき、実際のブロックは無限ブロックである。

ステレオ分析法の手順は以下の通りである。

不連続面の方程式は式(3.35)で表されるから、任意の 2 組の不連続面を P_i, P_j 、それぞれの傾斜、傾斜方位を (α_i, β_i) および (α_j, β_j) とすると、それぞれの面の方程式は以下の通りである。

$$\begin{cases} (x - R \tan \alpha_i \sin \beta_i)^2 + (y - R \tan \alpha_i \cos \beta_i)^2 = (R / \cos \alpha_i)^2 \\ (x - R \tan \alpha_j \sin \beta_j)^2 + (y - R \tan \alpha_j \cos \beta_j)^2 = (R / \cos \alpha_j)^2 \end{cases} \quad (3.50)$$

$\tan \alpha_i \sin \beta_i - \tan \alpha_j \sin \beta_j \neq 0$ の場合、交点は

$$\begin{cases} x = \frac{-AR}{A^2 + 1} (-B \pm \sqrt{A^2 + B^2 + 1}) \\ y = \frac{R}{A^2 + 1} (-B \pm \sqrt{A^2 + B^2 + 1}) \end{cases} \quad (3.51)$$

ただし、 $A = \frac{\tan \alpha_i \cos \beta_i - \tan \alpha_j \cos \beta_j}{\tan \alpha_i \sin \beta_i - \tan \alpha_j \sin \beta_j}$ 、 $B = A \tan \alpha_i \sin \beta_i - \tan \alpha_j \cos \beta_j$

$\tan \alpha_i \sin \beta_i - \tan \alpha_j \sin \beta_j = 0$ の場合、交点は

$$\begin{cases} x = R\left(\tan \alpha_i \sin \beta_i \pm \sqrt{\tan^2 \alpha_i \sin^2 \beta_i + 1}\right) \\ y = 0 \end{cases} \quad (3.52)$$

定義に従って、 $N_{ij} = N_{ij}(x_l, y_l) \in C(l=1 \text{ or } 2)$ ならば、 $N_{ij} = N_{ij}(x_l, y_l)$ は正の交点、そうでなければ負の交点とする。もし、 P_i あるいは P_j が基準円 C と一致する場合は、両方とも正の交点とする。

次に、定理 1 にしたがって、すべての不連続面の交線の投影点のうち実際のブロックピラミッドの稜線となっている交点を決定する。

ここで、位置変数の指標 L_k^{ij} を導入する。

$$L_k^{ij} = \text{sign}\left[(R/\cos \alpha_k)^2 - (x_l - R \tan \alpha_k \sin \beta_k)^2 - (y_l - R \tan \alpha_k \cos \beta_k)^2\right] \quad (3.53)$$

ここに、 F が $(>0, 0, <0)$ のとき、 $\text{sign}(F) = (1, 0, -1)$ 、

ただし、 $i \neq j$ 、 $\alpha_k \neq \pi/2$ 、 (x_l, y_l) は正の交点

式(3.53)と図-3.27により、

$$L_k^{ij} = \begin{cases} +1 & \text{正の交点 } N_{ij}^+ \text{ は、面 } P_k \text{ の上半空間にある} \\ 0 & \text{正の交点 } N_{ij}^+ \text{ は、面 } P_k \text{ 上にある} \\ -1 & \text{正の交点 } N_{ij}^+ \text{ は、面 } P_k \text{ の下半空間にある} \end{cases}$$

不連続面の個数が n のとき、交点の総数は $2C_n^2$ 、正の交点の数は C_n^2 となる。したがって、すべての不連続面の位置変数の組み合わせにより、位置変数マトリックス $[L_k^{ij}]_{C_n^2 \times n}$ を定義する。

すべてのブロックは、ブロックを構成する不連続面に対し正負の数値で表されるブロックコード $N_b = [I(b_1), I(b_2), \dots, I(b_n)]$ で表されている。ここに、 $I(b_j)$ は、 $+1, -1, 0, \pm 1$ のいずれかであり、以下の意味を持つ。

$$I(b_k) = \begin{cases} +1 & \text{ブロックは面の上半空間にある} \\ -1 & \text{ブロックは面の下半空間にある} \\ 0 & \text{ブロックはこの面を含まない} \\ \pm 1 & \text{ブロックは平行な面の間にある} \end{cases}$$

ブロックコードを、対角行列を用いて以下のように表すものとする。

$$[N]_{n \times n} = \begin{bmatrix} I(b_1) & & & 0 \\ & I(b_2) & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & I(b_n) \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

ここでブロック決定行列を次式で定義する。

$$[D]_{C_n^2 \times n} = [L]_{C_n^2 \times n} \cdot [N]_{n \times n} \quad (3.55)$$

決定行列 $[D]_{C_n^2 \times n}$ の各要素は、 $D_k^{ij} = L_k^{ij} \cdot I(b_k)$ であり、以下の意味を持つ。

$D_k^{ij} = L_k^{ij} \cdot I(b_k) = +1$ 正の交点 N_{ij}^+ は、不連続面 P_k のブロック側の半空間、すなわちブロックピラミッド内部に存在する。

$D_k^{ij} = L_k^{ij} \cdot I(b_k) = 0$ 正の交点 N_{ij}^+ は、不連続面 P_k 上に存在するか、あるいは不連続面 P_k はブロックを形成する不連続面ではない。

$D_k^{ij} = L_k^{ij} \cdot I(b_k) = -1$ 正の交点 N_{ij}^+ は、不連続面 P_k のブロック側と反対の半空間、すなわちブロックピラミッド外部に存在する。

$D_k^{ij} = L_k^{ij} \cdot I(b_k) = \pm 1$ 正の交点 N_{ij}^+ は、不連続面 P_k の上半空間および下半空間に存在する。

以上のことから、決定行列 $[D]_{C_n^2 \times n}$ を用いて以下の結論が導き出せる。

- 1) $[D]_{C_n^2 \times n}$ の i 行目が、+1 と -1 の両方を含むか、すべて 0 であるならば、正の交点 N_{ij}^+ はブロックピラミッドの稜線ではない。
- 2) $[D]_{C_n^2 \times n}$ の i 行目が、+1 と 0 だけの行ならば、正の交点 N_{ij}^+ はブロックピラミッドの稜線である。
- 3) $[D]_{C_n^2 \times n}$ の i 行目が、-1 と 0 だけの行ならば、負の交点 N_{ij}^- はブロックピラミッドの稜線である。

したがって、ブロックの有限性および移動可能性について以下のことが言える。

いずれかの正の交点あるいは負の交点が、ブロックの実際の稜線であるならば、ブロック

ピラミッドは空集合ではない、すなわちブロックは無限ブロックである。逆に、すべての正の交点および負の交点がブロックの実際の稜線ではないならば、ブロックピラミッドは空集合である、すなわちブロックは有限ブロックである。ブロックが不連続面のみで形成される場合、ピラミッドはジョイントピラミッド JP と呼ぶ。JP も BP も空集合でない場合は、不連続面のみブロックも、これに掘削面を加えたブロックも無限ブロックである。JP も BP も空集合である場合は、ブロックは有限かつ先細りブロックである。JP が空集合でなく、BP が空集合の場合は、ブロックは有限かつ移動可能である。

3.5.4 ステレオ分析法の検証

ここでは、ステレオ分析法によるブロック判定の結果を検証するために、ステレオ投影法と比較しながら例題の計算を行うことにする。

この例題では、表-3.6に示す4個の不連続面と1個の掘削面（面5）を考える。これらの平面のステレオ投影は図-3.28に示される。

表-3.6 4個の不連続面と1個の掘削面の方向

面	傾斜 α (°)	傾斜方位 β (°)
1	75	80
2	65	330
3	40	30
4	10	270
5 (掘削面)	60	50

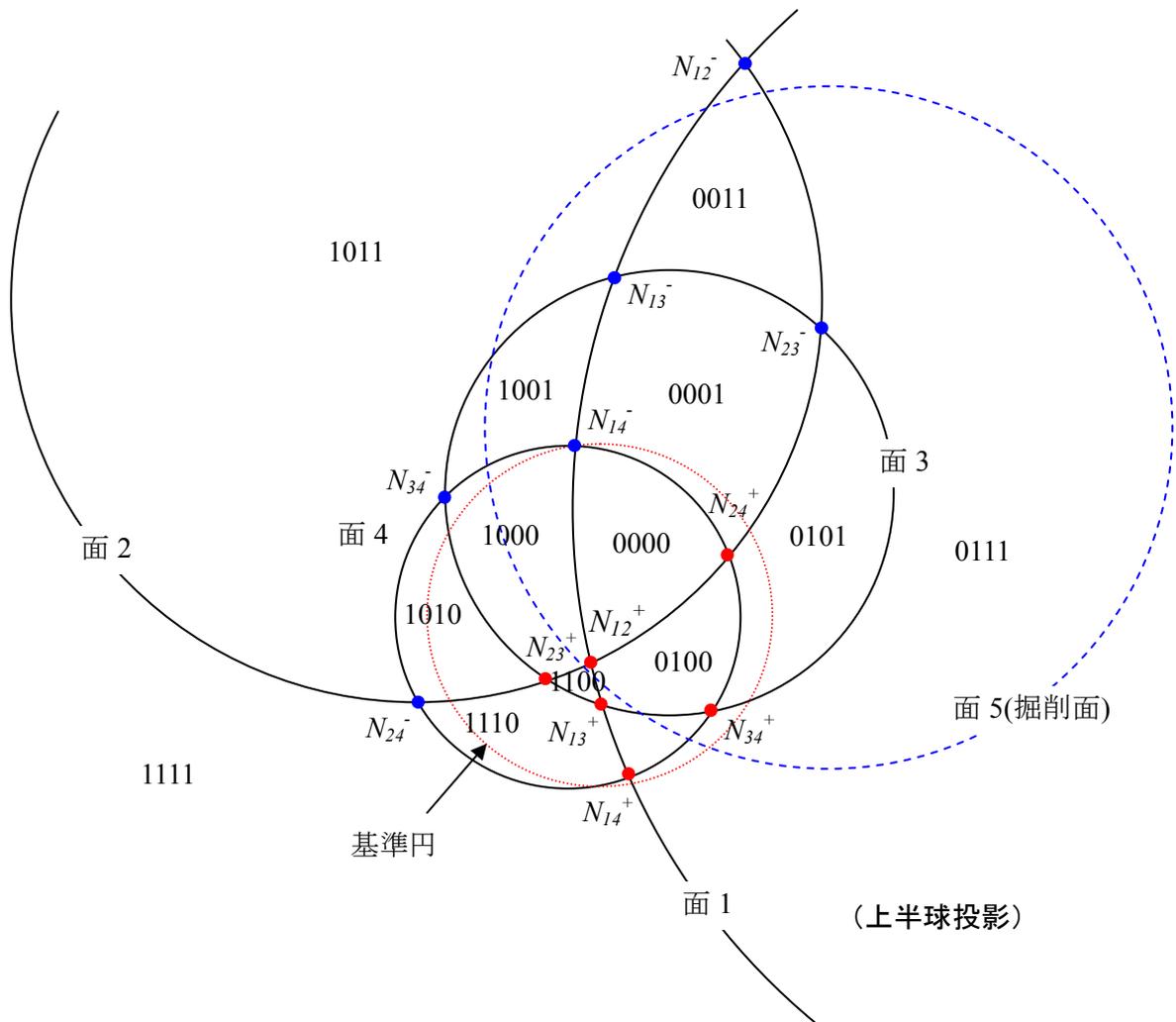


図-3.28 ステレオ投影図

各面のステレオ投影面での方程式は、基準円の半径 $R=1$ として、式(3.35)より以下の通り。

$$P_1: (x-3.675)^2 + (y-0.648)^2 = 14.93$$

$$P_2: (x+1.072)^2 + (y-1.857)^2 = 5.6$$

$$P_3: (x-0.420)^2 + (y-0.727)^2 = 1.704$$

$$P_4: (x+0.176)^2 + y^2 = 1.031$$

$$P_5: (x-1.327)^2 + (y-1.113)^2 = 4.0$$

表-3.7は、式(3.51)より求めた、2面の組合せによる交点の座標である。表中の右上側が正の交点の座標であり、左下側が負の交点の座標となっている。

表-3.7 ステレオ投影面での2面の交点の座標

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
P_1	----	(-0.0733, -0.288)	(-0.0122, -0.5053)	(0.1611, -0.9577)	(-0.0641, -0.3237)
P_2	(0.8310, 3.263)	----	(-0.2831, -0.3735)	(0.7689, 0.3709)	(-0.0919, -0.2964)
P_3	(0.0478, 1.978)	(1.289, 1.701)	----	(0.6750, -0.5535)	(0.2414, -0.5665)
P_4	(-0.1708, 1.015)	(-1.055, -0.5089)	(-0.8859, 0.7264)	----	(0.5360, -0.7237)
P_5	(0.5888, 2.972)	(0.9545, 3.078)	(-0.6366, 1.494)	(-0.6609, 0.8923)	----

2面 P_i, P_j の交点と他の面 P_k との位置関係を表す位置変数行列 L_k^{ij} の値を計算するために、式(3.53)を用いて表-3.8を得る。

表-3.8 5面からなる位置変数行列 L_k^{ij} の要素

$ij \backslash k$	1	2	3	4	5
12	0	0	1	1	1
13	0	-1	0	1	-1
14	0	-1	-1	0	-1
15	0	-1	1	1	0
23	-1	0	0	1	-1
24	1	0	1	0	1
25	-1	0	1	1	0
34	1	-1	0	0	1
35	1	-1	0	1	0
45	1	-1	-1	0	0

4個の不連続面でできるブロックの位置変数行列 $[L]$ は以下の通り。

$$[L] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ここで不連続面のブロックコードが 0001 の場合を考えると、 $N_b=[1, 1, 1, -1]$ となり、対角行列 $[L]$ は以下の通り。

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

決定行列 $[D]$ は式(3.55)により、以下のように計算される。

$$[D] = [L] \cdot [N] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$[D]$ マトリックスは、1と0だけの行（行5）、-1と0だけの行（行2,3,4）が存在するので、ブロックピラミッドは空集合でない。これは、ジョイントブロック 0001 は、無限ブロックであることを示している。また、ジョイントピラミッドの稜線は、正の交点 N_{24}^+ と負の交点 $N_{13}^-, N_{14}^-, N_{23}^-$ である。図-3.28のステレオ投影図上でも、ブロックコード 0001 の領域が存在し空集合ではないこと、ジョイントピラミッドの交点が $N_{13}^-, N_{14}^-, N_{23}^-, N_{24}^+$ であることが確認される。

次に、このジョイントブロック 0001 に下半空間側が掘削面となる面 5 を加えてブロック 00011 を考える。マトリックス、 $[L]$, $[N]$, $[D]$ はそれぞれ以下のようになる。

$$[L] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[N] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$[D] = [L] \cdot [N] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$[D]$ マトリックスは、すべての行に 1 と -1 の両方を含む。したがって、ブロックピラミッドは空集合である ($BP = \phi$)。これは、ブロック 00011 が移動可能なブロックであることを示す。

図-3.28 のステレオ投影図上でも、ジョイントピラミッド 0001 は、掘削面 5 の大円の内側、すなわち掘削面 5 のスペースピラミッドに完全に含まれることから、ブロックピラミッドが空集合であることが確認される。Zhang 等は、同様の方法で凸型ブロックのうち、先細りブロック、無限ブロックも判定できることを示している⁹⁾。

次の例題として凹型ブロックの有限性の判定を試みる。凹型ブロックは1個以上のブロックの内角が180度以上の形状である。したがって、ベクトル法や図解法で凹型ブロックのタイプを決定するのは困難である。本研究で提案する新しいステレオ分析法では容易に凹型のブロックのタイプを決定することが出来る。

表-3.9に示す5個の不連続面からなる凹型ブロックを考える。不連続面 A_1 と A_2 が無限の凹型ブロック $U_{A_1} \cup U_{A_2}$ を形成する。他の不連続面と合わせて、凹型ブロックは、 $U_1 \cap L_2 \cap U_3 \cap (U_{A_1} \cup U_{A_2})$ であるとする。

表-3.9 凹型ブロックの不連続面

面	傾斜 α (°)	傾斜方位 β (°)
P_1	60	60
P_2	60	180
P_3	60	300
A_1	30	90
A_2	30	270

各面のステレオ投影面での方程式は、基準円の半径 $R=1$ として、式(3.35)より以下の通り。

$$P_1: (x-1.5)^2 + (y-0.866)^2 = 4.0$$

$$P_2: x^2 + (y+1.732)^2 = 4.0$$

$$P_3: (x+1.5)^2 + (y-0.866)^2 = 4.0$$

$$A_1: (x-0.557)^2 + y^2 = 1.334$$

$$A_2: (x+0.557)^2 + y^2 = 1.334$$

表-3.10は式(3.51)により計算される交点の座標である。右上の9個が正の交点であり、左下の3個が負の交点である。式(3.53)の位置変数のマトリックスは表-3.11で表される。

表-3.10 ステレオ投影面での2面の交点の座標

	P_1	P_2	P_3	A_1	A_2
P_1	----	(-0.396, 0.228)	(0, -0.457)	(-0.465, 0.496)	(0.309, -0.741)
P_2	(1.896, -1.094)	----	(0.396, 0.228)	(-0.562, 0.187)	(0.562, 0.187)
P_3	(0, 2.189)	(-1.896, -1.094)	----	(-0.310, -0.741)	(0.465, 0.496)

表-3.11 凹型ブロックの位置変数行列 L_k^{ij} の要素

$ij \backslash k$	1	2	3	A1	A2
12	0	0	1	1	1
13	0	1	0	1	1
1A ₁	0	-1	1	0	1
1A ₂	0	1	-1	1	0
23	1	0	0	1	1
2A ₁	-1	0	1	0	1
2A ₂	1	0	-1	1	0
3A ₁	-1	1	0	0	1
3A ₂	1	-1	0	1	0

凹型ブロック $U_1 \cap L_2 \cap U_3 \cap (U_{A_1} \cup U_{A_2})$ は、2つの部分集合の和集合として、
 $(U_1 \cap L_2 \cap U_3 \cap U_{A_1}) \cup (U_1 \cap L_2 \cap U_3 \cap U_{A_2})$ のように表現できる。

したがって、位置変数マトリックスは以下の式で与えられる。

$$[L_k^{ij}]_{A_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad [L_k^{ij}]_{A_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

同様に、凹型ブロック $U_1 \cap L_2 \cap U_3 \cap (U_{A_1} \cup U_{A_2})$ に対応する[N]マトリックスは以下の式で与えられる。

$$[N]_{A_1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad [N]_{A_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

[D]マトリックスは以下の2つの部分に分けられる。

$$[D]_{A_1} = [L^j_k]_{A_1} [N]_{A_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad [D]_{A_2} = [L^j_k]_{A_2} [N]_{A_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

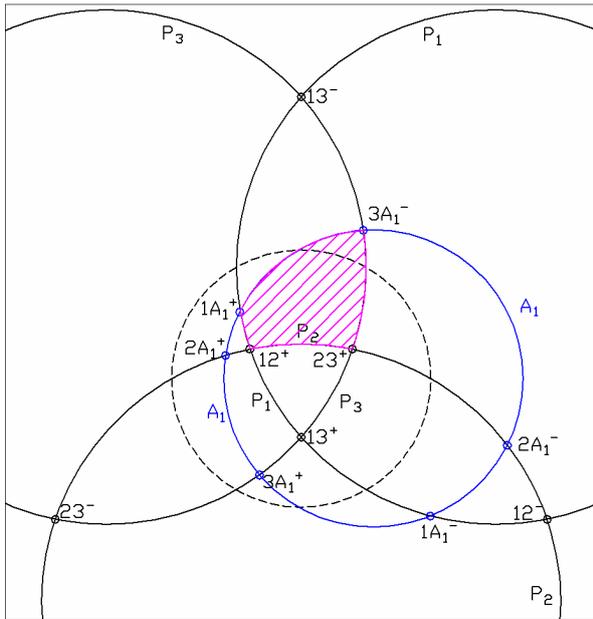
上記の2つの[D]マトリックスは、1と0だけから成る行、あるいは-1と0だけから成る行を含んでいるので、ジョンとピラミッドは空集合ではなく、凹型ブロック $L_1 \cap L_2 \cap L_3 \cap (U_{A_1} \cup U_{A_2})$ は無限ブロックであると判定できる。

以上の結論を、ステレオ投影図との対比で説明すると以下のようになる。

前半部分の $[D]_{A_1}$ マトリックスの1,3,4行目は1と0のみの行であり、6行目は-1と0のみの行であるから、それぞれ対応する正の交点 N_{12}^+ , N_{1A1}^+ , N_{23}^+ と負の交点 N_{3A1}^- はジョイントピラミッドの稜線である。これは、ステレオ投影図では図-3.29(a)の斜線部分で確認できる。

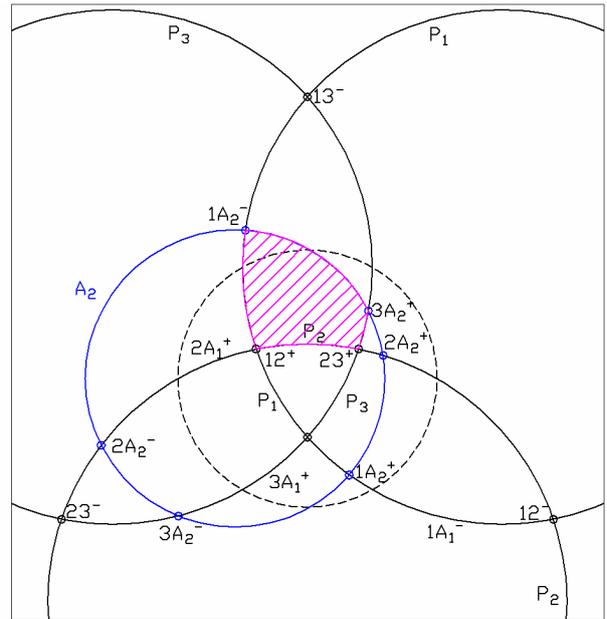
後半部分の $[D]_{A_2}$ マトリックスの1,4,6行目は1と0のみの行であり、3行目は-1と0のみの行であるから、それぞれ対応する正の交点 N_{12}^+ , N_{23}^+ , N_{3A2}^+ と負の交点 N_{1A2}^- はジョイントピラミッドの稜線である。これは、ステレオ投影図では図-3.29(b)の斜線部分で確認できる。

凹型ブロック $L_1 \cap L_2 \cap L_3 \cap (U_{A_1} \cup U_{A_2})$ は、図-3.29(a)および図-3.29(b)の斜線部の和集合となるから図-3.29(c)の斜線部の領域として表され、これは空集合ではないから凹型ブロックは無限ブロックとなり、先ほどのステレオ分析法と同じ結論を得る。なお、ステレオ投影法は等角投影図法であるから、図-3.29(c)では面A1と面A2のブロック内部側の角度が180度以上となっていることが分かる。凹型ジョイントピラミッドの3次元形状は、図-3.29(d)のようになる。



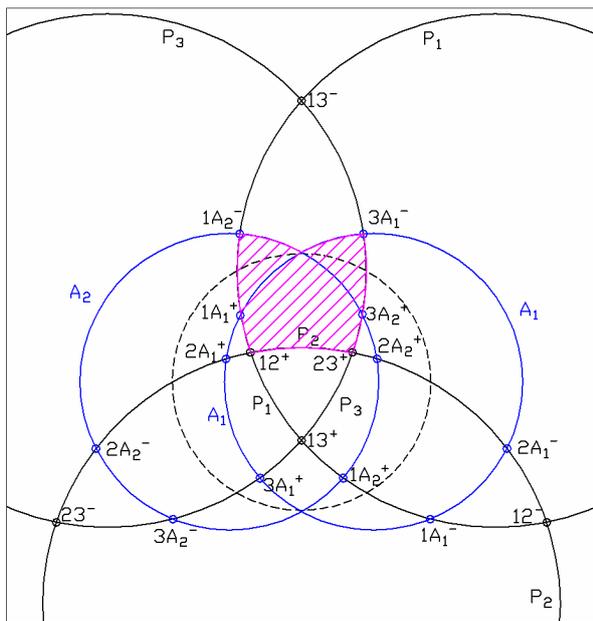
ブロックコード (01002)

(a) 凸型ブロック $U_1 \cap L_2 \cap U_3 \cap U_{A_1}$

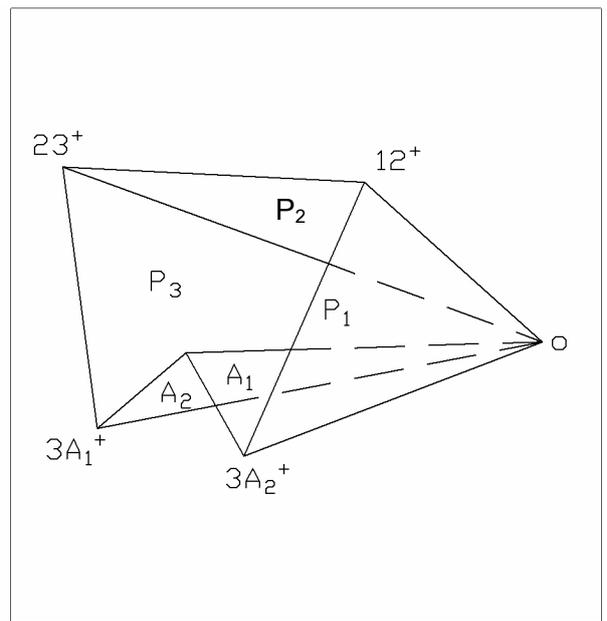


ブロックコード (01020)

(b) 凸型ブロック $U_1 \cap L_2 \cap U_3 \cap U_{A_2}$



(c) 凹型ブロック $U_1 \cap L_2 \cap U_3 \cap (U_{A_1} \cup U_{A_2})$



(d) ジョイントピラミッドの形状

図-3.29 凹型ブロックのステレオ投影図

次の例として、同じく表-3.9の不連続面を使って、凹型ブロック $L_1 \cap L_2 \cap L_3 \cap (U_{A_1} \cup U_{A_2}) = (L_1 \cap L_2 \cap L_3 \cap U_{A_1}) \cup (L_1 \cap L_2 \cap L_3 \cap U_{A_2})$ の有限性を判定する。

位置変数マトリックスは、ブロックコードと関係がないから、前回と同じで以下の式で与えられる。

$$[L_k^{ij}]_{a_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad [L_k^{ij}]_{a_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

[N]マトリックスは以下の式に変更になる。

$$[N]_{a_1} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad [N]_{a_2} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

したがって、[D]マトリックスは以下のように計算される。

$$[D]_{a_1} = [L_k^{ij}]_{a_1} [N]_{a_1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{or} \quad [D]_{a_2} = [L_k^{ij}]_{a_2} [N]_{a_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

上記の2つの[D]マトリックスは、すべての行が1と-1を含んでいる。よって、 $JP = \phi$ であり、凹型ブロック $L_1 \cap L_2 \cap L_3 \cap (U_{A_1} \cup U_{A_2})$ は有限ブロックであると判定できる。ステレオ投影図では、図-3.29(a)、図-3.29(b)において、それぞれ $L_1 \cap L_2 \cap L_3 \cap U_{A_1}$ 、 $L_1 \cap L_2 \cap L_3 \cap U_{A_2}$ の領域が空集合であることが確認できる。また、図-3.29(c)においても $L_1 \cap L_2 \cap L_3 \cap (U_{A_1} \cup U_{A_2})$ が空集合になることは言うまでもない。

以上の例により、ステレオ投影法と行列計算を組み合わせた手法であるステレオ分析法は、

不連続面ブロックの有限性の判定に用いることができ、有限ブロック、無限ブロック、先細りブロックを判定できる手法であることを示した。さらに、本手法は凸型ブロックと凹型ブロックのいずれの形状に対しても適用可能である。

3.6 回転モードのキーブロック

ブロック理論における、回転モードの破壊に関する研究は、Mauldon¹¹⁾および Mauldon & Goodman^{12),13)}によって行われている。回転モードにおいても、すべり破壊の場合と同様に、まず移動可能性の検討を行い、次に回転モードの決定、最後に安定性の検討を行う。これらの研究は、Wittke¹⁴⁾による岩盤ブロックの3次元回転移動に関する研究を拡張したものである。

ブロックの回転にはさまざまなモードがあるが、良く知られているのはトップリング破壊である。トップリング破壊は、ブロックの角を中心として倒れこむように回転するものであり、岩盤斜面では傾斜角が大きくて差し目構造になっている状況でしばしば発生する。トップリング破壊の検討は、すべりに加えて回転の自由度が加わるため、解析は複雑になる。

図-3.30は斜面上に存在する長方形ブロックを示したものである。斜面とブロックの間には粘着力はなく摩擦抵抗のみが働くと仮定する。斜面の角度を α 、摩擦角を ϕ とすると、すべりが発生する条件は、斜面の角度が摩擦角より大きくなることであり、 $\alpha > \phi$ で表される。逆に $\alpha < \phi$ の時は、すべりは発生しない。また、トップリングが生じる条件は、ブロック重心位置が、回転の中心となるブロック頂点Aに比べ斜面の傾斜する側にあることであるから、ブロックの幅と高さの比 b/h を用いて、 $b/h < \tan \alpha$ で表される。図-3.31はこの関係を示したものであり、安定の状態は4つの領域に別れ、安定、すべり、トップリング、すべりとトップリングが同時におこる場合に分けられる。

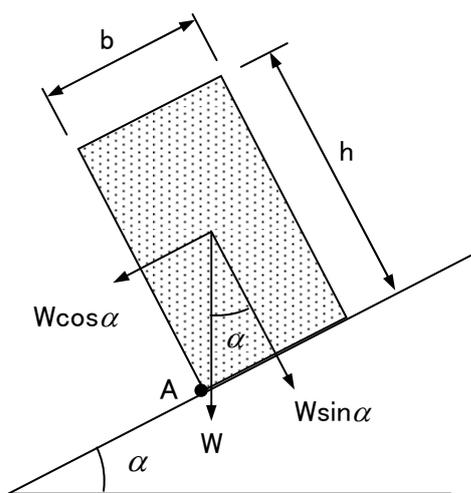


図-3.30 斜面上の長方形ブロック

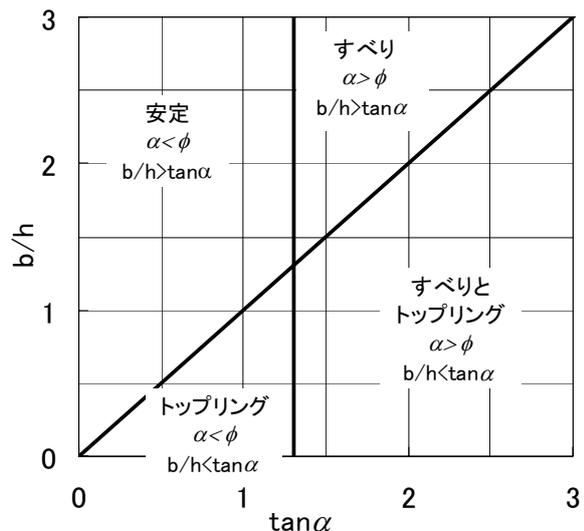


図-3.31 ブロックの安定性

次に2次元問題として、掘削面における3角形ブロックの回転の条件を検討する。図-3.32に示すような三角形ブロック abc を考え、辺 ac を掘削面、頂点 a を回転の中心とする。頂点 a の周りに回転するとき、頂点 b は辺 ab に直交する方向に動き出すから、回転の条件は $\angle b > 90^\circ$ となっていることである。また、 $\angle b < 90^\circ$ の場合、回転することはできない。

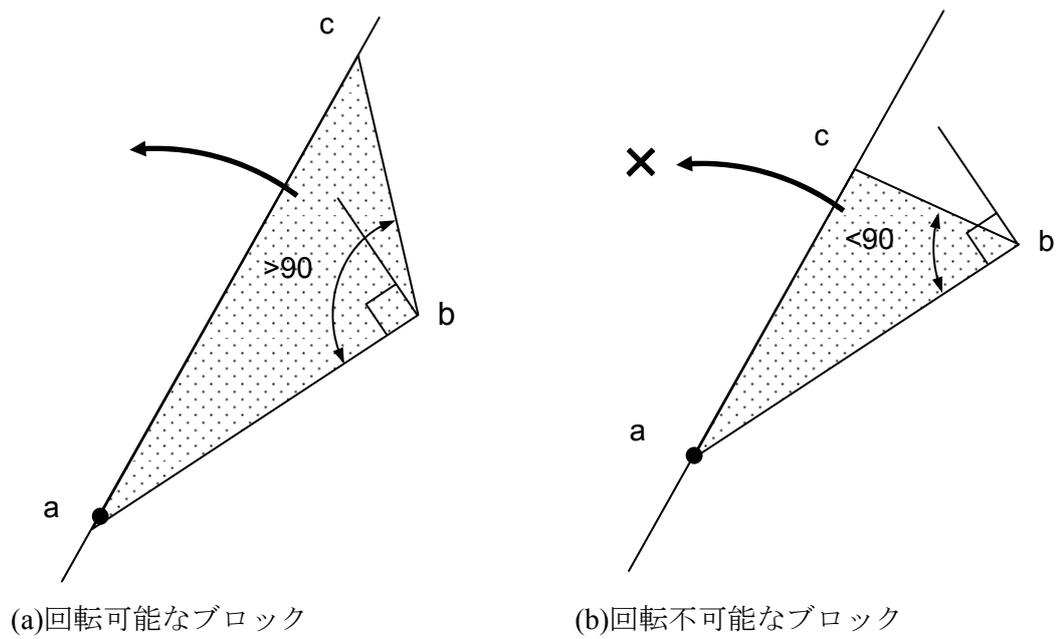


図-3.32 2次元での3角形ブロックの回転条件

さて、次に3次元に拡張して回転モードを考えることとしよう。図-3.33に4面体ブロックのトップリング破壊の例を示す。ブロックは不連続面と自由面の交線となっている辺を軸として回転する。3つの不連続面と自由面の交線は3本あるから、潜在的には3つの回転モードが存在することになる。

また、図-3.34に示すように4面体ブロックは自由面におけるブロックの頂点を通る軸を中心として回転するモードがある。自由面には3つの頂点が存在し、回転軸はこの頂点のいずれかを通るが、回転軸の方向は無数の方向が考えられる。

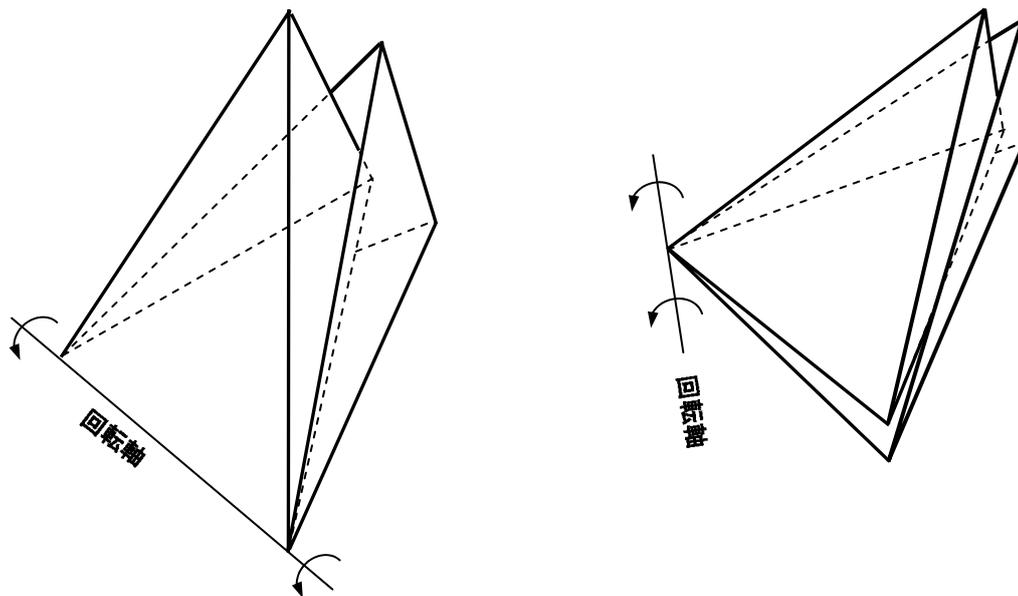


図-3.33 4面体ブロックの辺回りの回転 図-3.34 4面体ブロックの頂点回りの回転

辺回りと頂点周りの回転モードは、回転軸周りの作用力のみを考慮すればよい。さらに複雑な回転モードとして、ブロックの面や辺において接触しつつ回転するモードがある。図-3.35は、ねじりすべりの例であり、ブロックは頂点回りに回転するが、回転軸は不連続面に垂直になっている。不連続面内で接触状態を保ちつつ、回転とすべりが同時に生じることになる。マルパッセダムのアバット面の破壊現象は、3次元のFEM解析の結果、ねじりすべりであった可能性が指摘されている¹⁵⁾。

別の例として、図-3.36に示すブロックの落ち込みがある。ブロックは辺と面あるいは頂点と辺での接触を保ちながらすべりつつ回転する。この場合の回転軸は必ずしもブロックの辺や頂点である必要はなく、ブロックの移動とともに回転軸も移動する。これらのねじりや落ち込みの解析のためには、辺と面が接触している時の限界すべり抵抗力や、面内でねじれながらすべる時の摩擦係数などが必要となるが、これらの物理量についてはよく知られていな

いのが現状である。

以降、辺周りの回転と頂点回りの回転について考察を進める。

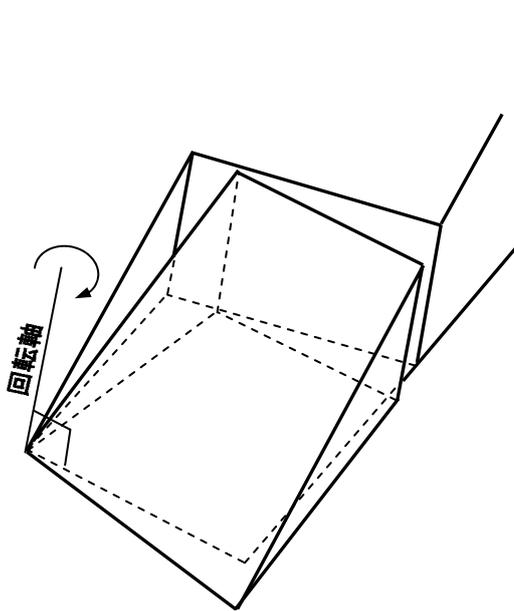


図-3.35 ブロックのねじりすべり

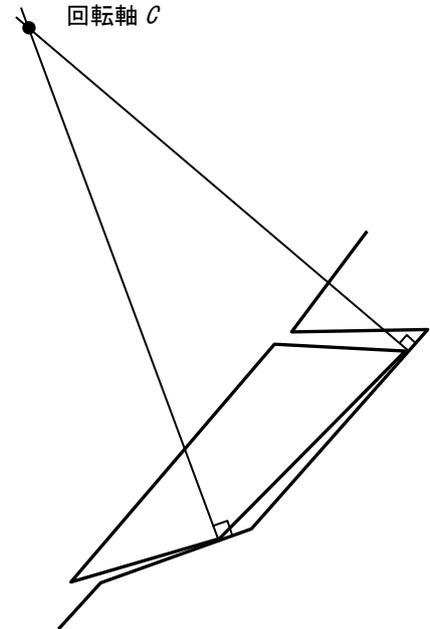


図-3.36 ブロックの落ち込み回転

3.6.1 ジョイントピラミッドの回転可能性

3つの不連続面と1つの掘削自由面からなる4面体ブロックで、不連続面1と2の交線と自由面との交点で回転する場合を考える。ブロックは剛体と仮定し、岩盤表面へのブロック頂点の食い込みはないものとする。頂点回りの回転が生じるためには辺 I_{12} 上のすべての点は、面1と面2のブロック内向きの法線ベクトル側の半空間に移動可能でなければならない。この条件を満たすためには、ステレオ投影図上ではJPの頂点 I_{12} の両側の辺のうち少なくともいずれか一方が 90° より大きくななければならない(図-3.37)。

次に、同じく四面体ブロックにおいて掘削自由面上にある辺の回りに回転する条件を考える。不連続面1と掘削面の交線を軸として回転する場合は、ブロックの掘削自由面上のすべての点は、不連続面1のブロック内向きの法線ベクトル方向に移動可能であり、かつ法線ベクトル方向をJPが含んでいなければならない。この条件は、図-3.38に示すように、JPの面1の両側の内角がいずれも 90° より大きいことである。この時、面1のブロック内向き法線ベクトル \mathbf{n}_1 はJPの内部にプロットされる。

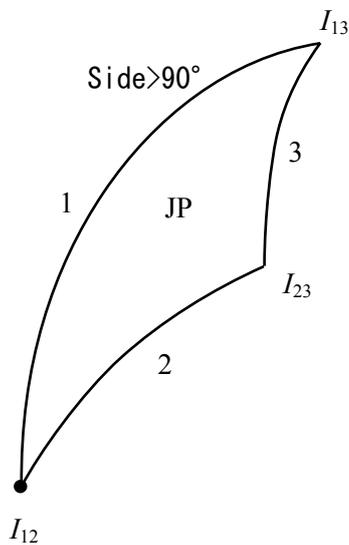


図-3.37 頂点 I_{12} 周りの回転の条件

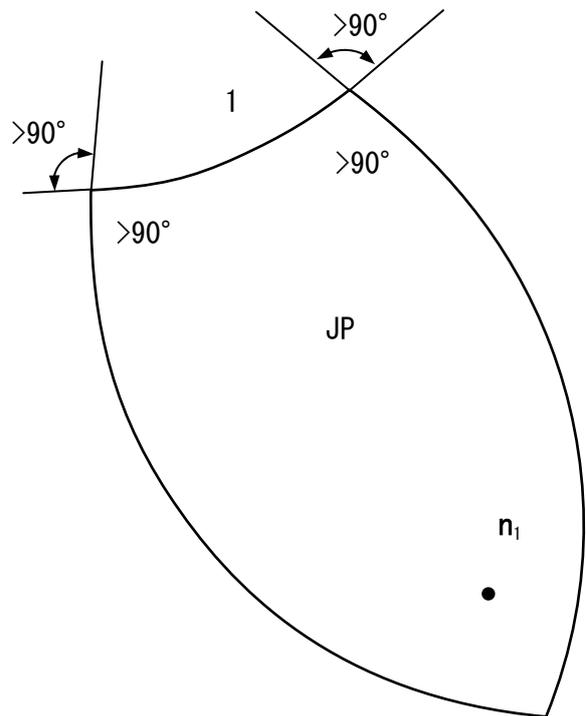


図-3.38 ブロックの辺回りの回転条件

辺の周りの回転は、頂点周りの回転の特別な場合であり、ある頂点回りの回転軸を他の頂点を通るように移動させたものである。従って、頂点回りの回転が起きない条件では、辺回りの回転も起きないことが分かる。このことから、回転が不可能となるブロックの幾何学条件は、図-3.39に示すように、すべての辺の角度が 90° より小さい鋭角となることである。

3つの不連続面からなるJPをステレオ投影法で描くと、ここで述べた角度は比較的容易に測定することができる。図-3.40には3つの不連続面のすべてのJPを示してあり、それぞれのJPの頂点での角度と辺の角度の大きさを示してある。辺の中心角が 90° より大きい場合を■、頂点での内面角が 90° より大きい場合を▲で示してある。

図中には、ブロックコードと可能な回転のモードを示してある。ブロック000では、 90° より大きい辺を持つので点回転モードを持つとともに、2つ以上の内角が 90° より大きいので辺回転モードも持つ。ブロック001でも、 90° より大きい辺を持つので点回転モードを持つが、一つの内角のみが 90° より大きいので辺回転モードは持たない。ブロック101は3辺とも 90° に満たないので、回転モードを持たないブロックである。

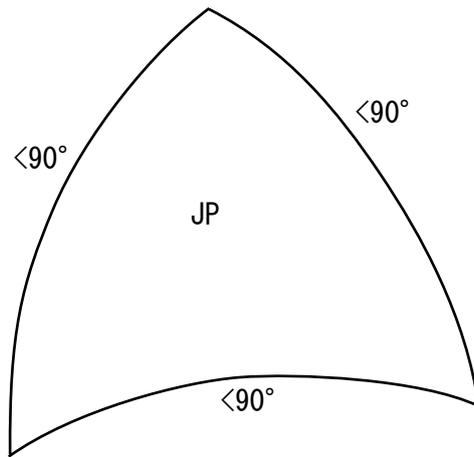


図-3.39 回転不可能な JP

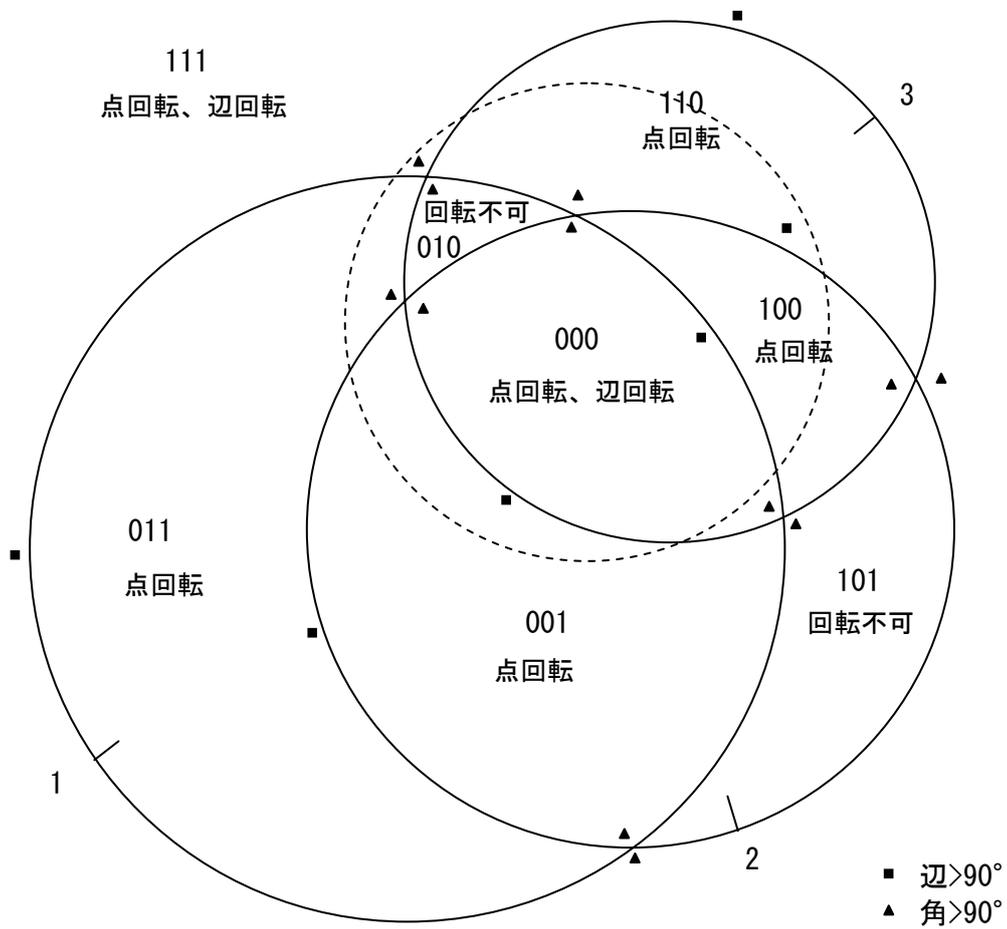


図-3.40 3面のJPにおける回転モード

3.6.2 回転モード解析

ブロックが不連続面と掘削表面の交線となる辺の回りに回転する場合は、ブロックに作用する合力の方向は、不連続面のブロック外向きの法線ベクトル方向の成分を持たなければならないので、合力の点は JP の外側に位置する (図-3.41)。頂点周りの回転の場合は、少し複雑になり辺回転モードの一部とオーバーラップする。

回転モードの解析でも、すべりモードの時と同じように 2 種類のモード解析がある。ひとつは、合力の方向を固定して各 JP の回転モードを解析するものであり、もう 1 つは与えられた JP に対して合力の方向を変化させて回転モードの解析を行うものである。

前者のモード解析の場合、3 個の不連続面の組合せを仮定すると 8 個の JP が存在するが、合力の方向とこれの逆方向のベクトルを含む 2 つの JP については回転モードを持たない。残りの 6 つの JP については転回点あるいは辺回転のモードを持つ可能性がある。

後者のモード解析の場合を図-3.42に示すが、すべりモード解析の場合と異なり、回転モードは重なり合うことがある。さらに、掘削面の方向により回転モードの領域は制限を受ける。回転モードの場合、合力の方向は掘削面のスペースピラミッドに含まなければならない。掘削面が平面の場合、回転モードの領域は掘削面の大円のうちブロックと反対側の半空間側に存在する。

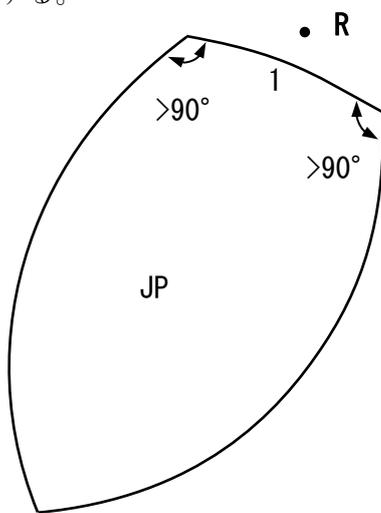


図-3.41 辺 1 の回転の場合の合力 R

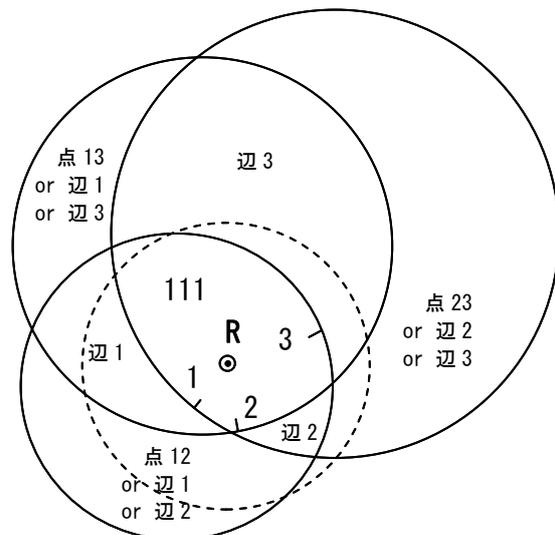


図-3.42 JP に対する回転モード

3.6.3 物体力が作用する場合の回転モードの安定解析

回転モードの解析をする場合、すべり解析の場合と異なり合力の方向だけでなく合力の作用位置も考慮する必要がある。作用位置により回転モーメントの方向と大きさが異なるからである。ここでは、回転モードの安定解析を、3つの不連続面と掘削面からなる4面体ブロックに物体力が作用する場合に単純化して行う。物体力の作用点は4面体ブロックの重心位置となる。また、すべりの安定解析と異なり、回転の場合、掘削面の方向も考慮に入れなければならない。図-3.43および図-3.44に示すような、面3と掘削面の交線 I_{3f} の回りの回転を考える。3面のJPに自由面の大円を描くと図-3.43のようになり、交線のなす角度として α と β を定義できる。 α は I_{1f} と I_{13} のなす角であり、 β は I_{13} と I_{12} のなす角である。ここで、図-3.44に示すように回転軸 I_{3f} とブロックの辺12の中点を通る中間平面を考える。面1上での中間平面との交線と辺のなす角を α_1 とすれば、 α_1 は α と β を使って以下の式で表される。

$$\tan \alpha_1 = \frac{\tan \alpha \tan \beta}{\tan \alpha + 2 \tan \beta} \quad (3.56)$$

また、これらの角度の関係はステレオ投影図上では、図-3.45のようになる。図中の中間面の大円が回転モードの安定、不安定領域を分けることになる。合力の方向が中間面上にあるときは、ブロックは回転モードの極限平衡状態にある。なぜなら、物体力の作用点はブロックの重心位置であり、この点は中間面上にあるので、合力はまっすぐ回転軸のほうを向いていることになり回転モーメントは発生しない。回転軸合力の方向が中間面のJP側にある時が不安定となり回転が発生する。

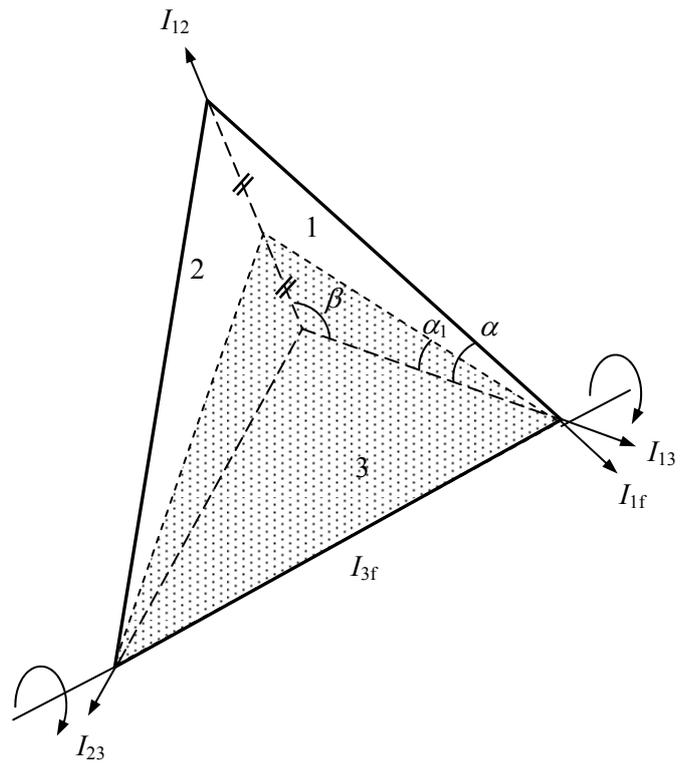
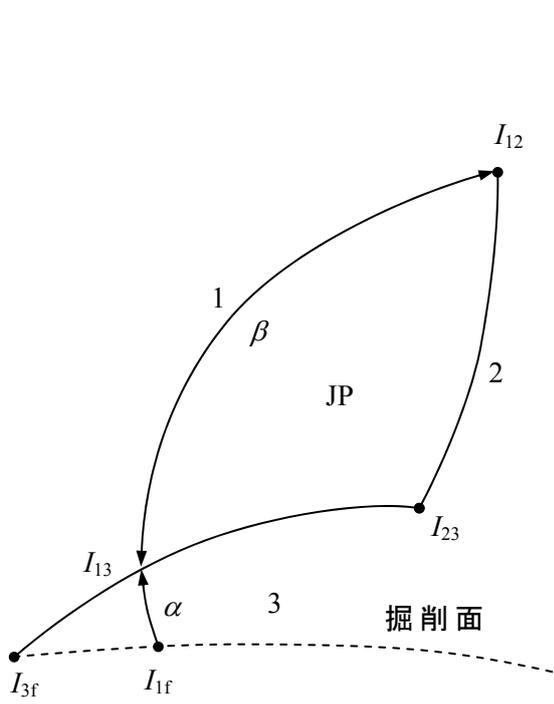


図-3.43 JP と掘削平面による角度 α と β

図-3.44 Mauldon の中間面¹¹⁾と角度 α, β, α_1

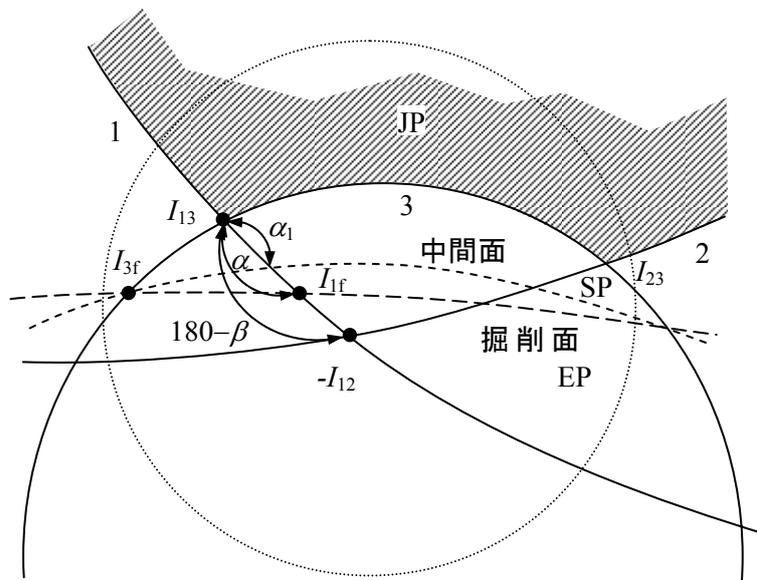


図-3.45 物体力による辺回りの回転と中間面

3.6.4 一般的な回転モードの安定解析

合力の作用点と作用方向、回転軸の位置と方向が与えられると、ベクトル演算により回転モーメントの大きさを計算することができる。その結果、ブロックが空間側に回転できる方向に回転モーメントが存在すればブロックは不安定と判定できる。

辺の回りの回転のモードの場合、回転軸の位置と回転方向は既知であるから、合力の作用点と方向により回転モーメントを求めることができる。頂点周りの回転モードの場合は、回転軸が通る点の位置は決定できるが、回転軸の方向は無数に存在する。従って、回転軸を決定できるような制約条件がない限り、回転モーメントの計算はできない。しかしながら、回転可能な軸の方向の存在範囲は限定することができる。Mauldon¹¹⁾は、回転軸の頂点から延びる3本の辺について、辺上の任意の点は特定の不連続面のブロック内部側へ移動可能であるという運動条件を導き出している。

ここで、図-3.46に示すようなブロックの構成面 d 上の点 A が回転する条件を考える。頂点 A は、頂点 C を通る回転軸 \hat{r} を中心として右ねじの方向に回転するものとする。面 d のブロック内向きの法線ベクトルを \hat{n}_d 、辺 AC の方向ベクトルを \hat{I}_{ij} とすると、 \hat{n}_d と \hat{I}_{ij} は直交し、さらにこれらに直交して面 d 上にあるベクトル $\hat{n}_d \times \hat{I}_{ij}$ が定義される。回転軸ベクトル \hat{r} と $\hat{n}_d \times \hat{I}_{ij}$ が平行な時、点 A はちょうど \hat{n}_d の方向に動き出し、回転することができる。点 A が動き出せる範囲は、面 d のブロック内部への半空間であるから、その方向はベクトル \hat{n}_d を中心として90度以内の方向である。

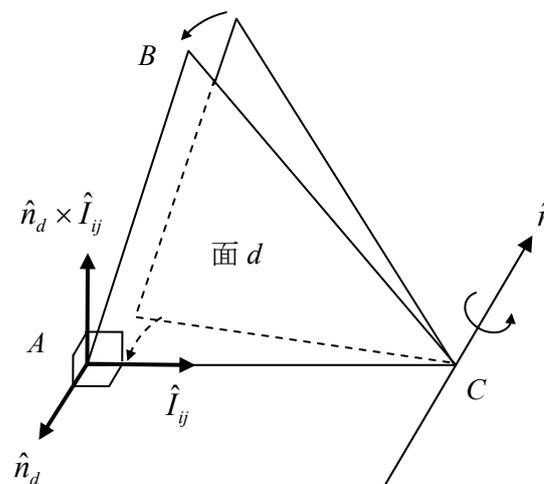


図-3.46 ブロックの任意面上の点が頂点回りに回転する条件

\hat{r} に関して言い換えれば、回転軸 \hat{r} は $\hat{n}_d \times \hat{I}_{ij}$ の方向を中心として90度以内の方向にある。すなわち、 \hat{r} と $\hat{n}_d \times \hat{I}_{ij}$ の内積が正であることが、点Aに関する回転条件となり、以下の式で表される。

$$\hat{r} \cdot \hat{n}_d \times \hat{I}_{ij} > 0 \quad (3.57)$$

今度は、図-3.47に示すような4面体ブロックについて考える。このブロックは3つの不連続面 J_1, J_2, J_3 と掘削面 f から構成されており、面 J_1, J_3, f の交点 D を通る回転軸の回りに回転すると仮定する。岩盤内部の点Aに関する回転条件は、面 J_1, J_2, J_3 のブロック内部へ回転することである。掘削面上の点Bに関する回転条件は、面 J_1, J_2 のブロック内部へ回転することであり、同様に掘削面上のCに関する回転条件は、面 J_2, J_3 のブロック内部へ回転することである。以上をまとめると、回転軸が存在しなければならない領域を以下の7個の不等式で表すことができる

$$\begin{cases} \text{点A: } \hat{r} \cdot \hat{n}_d \times \hat{I}_{13} > 0 \quad (d=1,2,3) \\ \text{点B: } \hat{r} \cdot \hat{n}_d \times \hat{I}_{1f} > 0 \quad (d=1,2) \\ \text{点C: } \hat{r} \cdot \hat{n}_d \times \hat{I}_{3f} > 0 \quad (d=2,3) \end{cases} \quad (3.58)$$

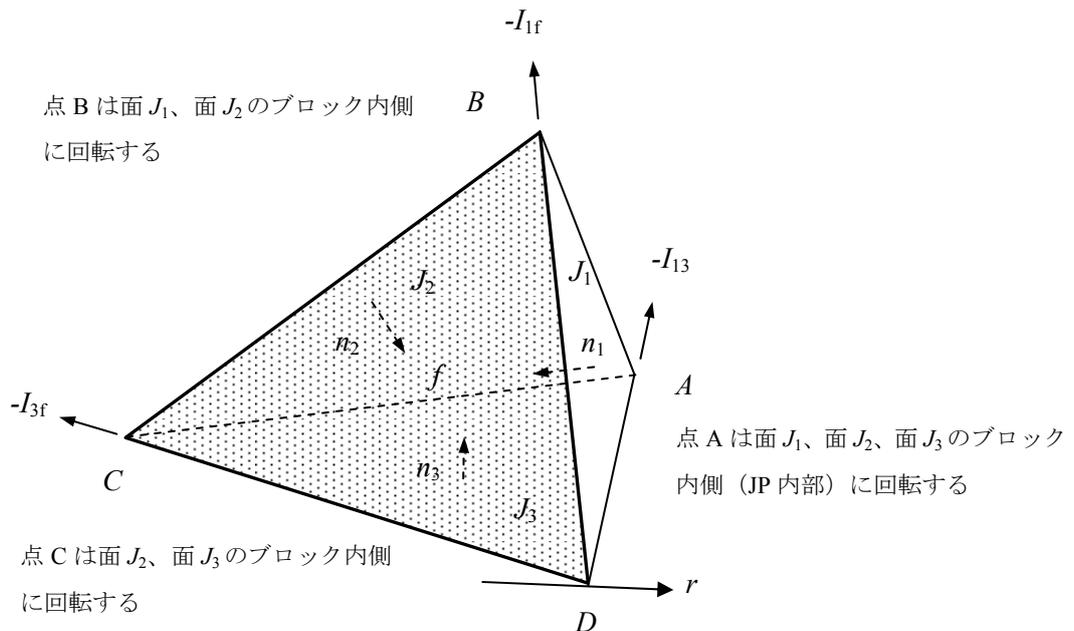


図-3.47 辺 I_{13} の頂点における回転の運動

ここで、不等式(3.57)の示す範囲をステレオ投影図上で考える。図-3.48に示すように、ベクトル $\hat{n}_d \times \hat{I}_{ij}$ は、ベクトル \hat{n}_d と \hat{I}_{ij} を通る大円の極であるが、2つ存在する極の内いずれであるかは、 \hat{n}_d と \hat{I}_{ij} の位置関係により異なる。図-3.48(a)に示すように、ベクトル \hat{n}_d , \hat{I}_{ij} , $\hat{n}_d \times \hat{I}_{ij}$ の関係は右手系であることを考慮すると、大円上で \hat{n}_d から \hat{I}_{ij} へ向かう円弧のうち、小さい方の角度をとるものが反時計回りであるとき、 $\hat{n}_d \times \hat{I}_{ij}$ は大円の内側にある極となる。したがって、不等式(3.57)よりベクトル \hat{r} は $\hat{n}_d \times \hat{I}_{ij}$ と同じ半空間側にあるから、大円の内側領域が不等式を満たす領域となる。逆に、図-3.48(b)に示すように、大円上で \hat{n}_d から \hat{I}_{ij} へ向かう円弧のうち、小さい方の角度をとるものが時計回りであるとき、 $\hat{n}_d \times \hat{I}_{ij}$ は大円の外側にある極となる。したがって、大円の外側領域が不等式を満たす領域となる。

図-3.49は、4面体ブロックの頂点 I_3 を回転軸が通る場合の解析結果の例である。図中の太線が3つの不連続面 J_1, J_2, J_3 を示し、点線が掘削面 f を示す。式(3.58)の不等式を満たす領域として、7個の大円と図-3.48の関係より求まる半空間側を矢印で示した。これらの半空間の共通領域として、斜線の球面四角形の領域が、回転軸の存在する領域となる。

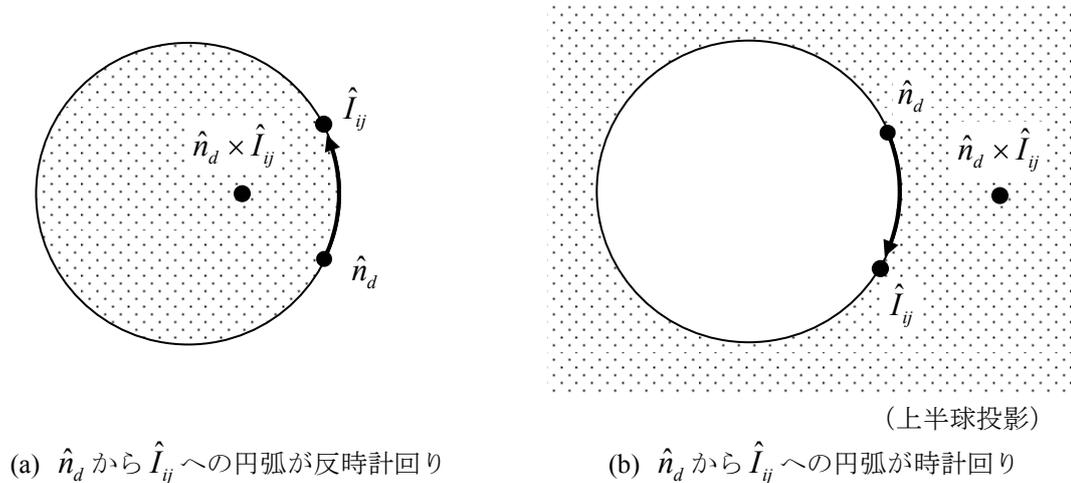


図-3.48 ステレオ投影図上での不等式(3.57)の範囲

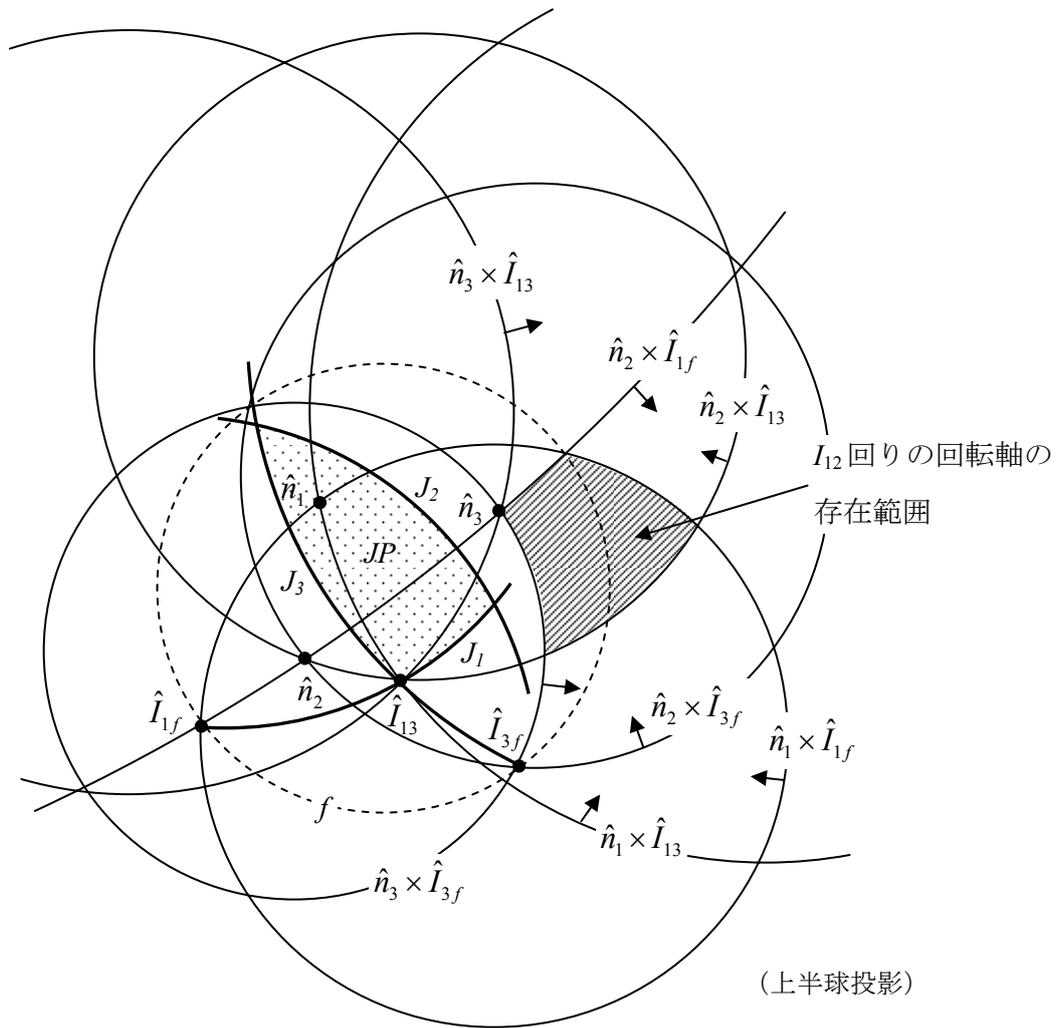


図-3.49 辺 I_{ij} の頂点回りの回転軸の存在範囲

3.7 3章のまとめ

岩盤内に存在する不連続面と、自由面をなす掘削面の3次元の幾何学的関係から、崩落の可能性のある不安定な岩盤ブロックであるキープロックを見つけ出し、その安定化を図ろうとするのがブロック理論の体系である。本章では、本研究の基本概念となるキープロック理論の内容について整理してまとめるとともに、基本理論を拡張した研究内容について述べた。その成果は以下の通りである。

- (1) ブロック理論における不連続面形態の基本的仮定、ブロックの種類、移動可能なブロックを判定するための有限性定理、移動可能性定理、およびすべりモードの判定法について整理し、補強工の設計をするための導入力の算定方法について論じた。
- (2) 凸型ブロックから凹型ブロックへの拡張されたブロック理論について述べた。凹型ブロックを判定するためのステレオ投影法と行列計算を併用したステレオ分析法の理論を述べ、従来のステレオ投影法と比較しながら例題を示し、ステレオ投影法が凸型、凹型いずれのブロックへも適用可能であることを示した。
- (3) 従来のブロック理論で扱っていたすべりモードのみならず、回転モードの判定方法について論じた。ここでは、4面体形状のブロックに限定して頂点回りの回転モードと辺回りの回転モードについて回転可能性の判定方法を示した。安定解析については、物体力のみが作用する場合の辺回りの安定性と、頂点回りの回転モードについては回転軸の存在範囲についてステレオ投影法による判定法を示した。
- (4) 課題として、回転モードについては、5面体以上の任意形状での判定方法が今のところないことや、安定解析も限定した条件でしか実施できないため、今後の研究余地が残されている。

参考文献

- 1) Wittke, W. : Method to Analyze the Stability of Rock Slopes, With and without Additional Loading, Fels mechanik und Ingenieurgeologie Supplementum II, pp.52-79, 1965
- 2) Londe, P., Vigier, G. and Vormeringer, R. : Stability of Rock Slopes. A Three Dimensional Study, Proc. ASCE J. Soil Mech. and Found. Div. v.95, SM7, Jan. 1969
- 3) Crony, P., Legge, T. F. and Dhalla, A. : Location of Block Release Mechanism in Tunnels from Geological Data and Design of Associated Support, The Institution of Civil Engineers, pp.97-120, 1978
- 4) Hoek E. and Bray J. : Rock Slope Engineering, Institution of Mining and Metallurgy, London,1974(小野寺、吉中訳、朝倉書房)
- 5) Goodman, R. E. and Shi, Gen-Hua : Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall, 1985 (吉中、大西訳、土木工学社)
- 6) Hoek, E. :The Rio Grande Project – Argentina, Practical Rock Engineering, 2007,
<http://www.roscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>
- 7) Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F. : Support of Underground Excavations in Hard Rock, 2000, <http://www.roscience.com/hoek/OtherHoekPublications.asp>
- 8) 前島俊雄:液化石油ガス地下備蓄岩盤貯槽空洞の概要, 岩の力学国内ニュース, No.71, 2004
- 9) Zhang ZX and Kulatilake, P.H.S.W., : A new stereo-analytical method for determination of removal blocks in discontinuous rock mass
- 10) Zhang ZX, Hua AZ : Stability theory of stratified discontinuous rock mass, China University of Science and Technology Press, 1988
- 11) Mauldon, M., : Rotational failure modes in jointed rock: a generalization of block theory, PhD thesis, University of California, 1992
- 12) Mauldon, M. and Goodman, R. E., : Rotational kinematics and equilibrium of blocks in a rock mass. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 27, No.4, pp.291-304, 1990
- 13) Mauldon, M. and Goodman, R. E., : Vector analysis of keyblock rotations – kinematics, failure mode and stability. J. Geotech. Div. Am. Soc. Civ. Engrs, 1995
- 14) Wittke, W., : Method to analyze a stability of rock slope with without additional loading. Rock mechanics and engineering geology, supplement 2, Berlin:Springer-Verlag
- 15) Poisel, R., Steger, W. and Unterberger, W. : The Malpasset Dam failure - comparison between continuum and discontinuum mechanics, Proc. 7th Int. Congr. Rock Mech., Aachen, pp.1893-1896, 1991

第4章 大規模地下空洞施工時におけるキープブロック解析の適用

4.1 奥多々良木地下発電所増設工事における適用

4.1.1 工事概要

今回キープブロック解析を適用した地下空洞は、関西電力(株)奥多々良木発電所増設工事の地下発電所空洞として建設されたものである。以下に地下発電所の工事概要と設計・施工および情報化施工の特徴を述べる^{1),2)}。

既設の奥多々良木発電所は兵庫県ほぼ中央に位置し、昭和49年に運転を開始した最大出力121.2万kWの純揚水式発電所である。今回の増設工事は、上部調整池と下部調整池を現状のまま利用し、既設の地下発電所空洞から約200m離れた地点に増設の水路および地下発電所(出力72万kW)を建設したものである。図-4.1に計画平面図を、図-4.2に水路縦断面図を示す。工事は平成6年12月に着工し、平成7年4月から平成8年5月までに発電所地下空洞の掘削工事を行い、平成10年4月に6号機、同年6月に5号機の営業運転を開始している。増設発電所空洞は地表面下約250mに位置し、掘削横断面は幅25m、高さ47mの弾頭型(断面積1,075m²)で空洞延長は130mであり、総掘削量は約94,000m³である。地下発電所付近の、鳥瞰図を図-4.3に、増設発電所空洞の横断面図・縦断面図を図-4.4、図-4.5に示す。

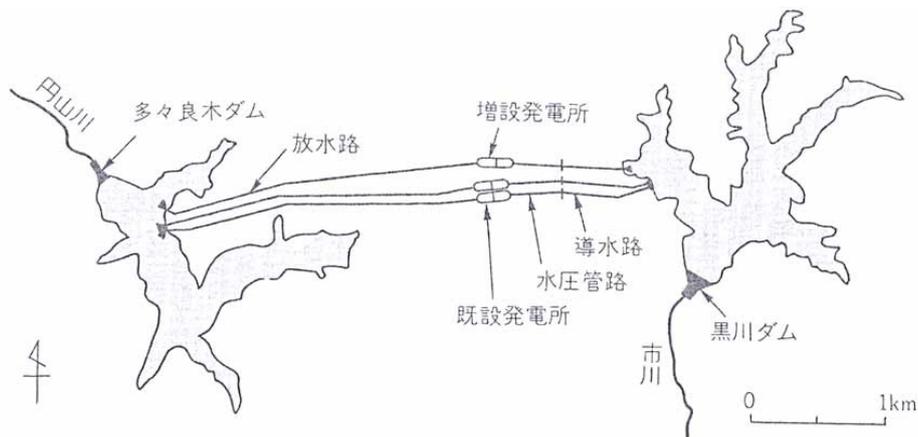


図-4.1 計画平面図

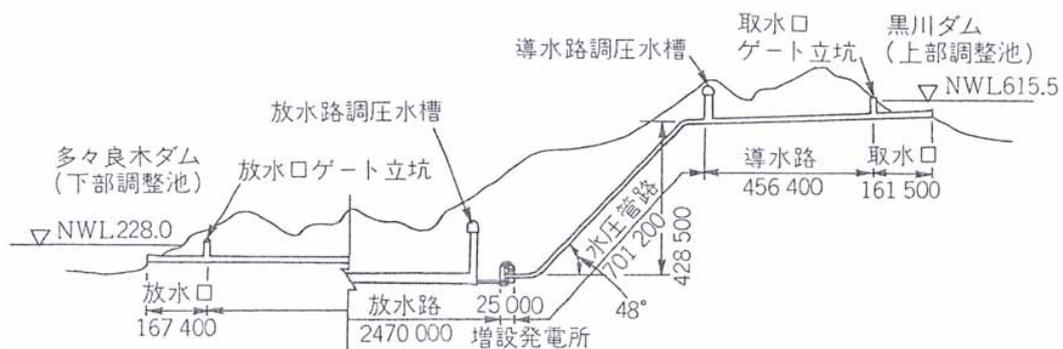


図-4.2 水路縦断面図

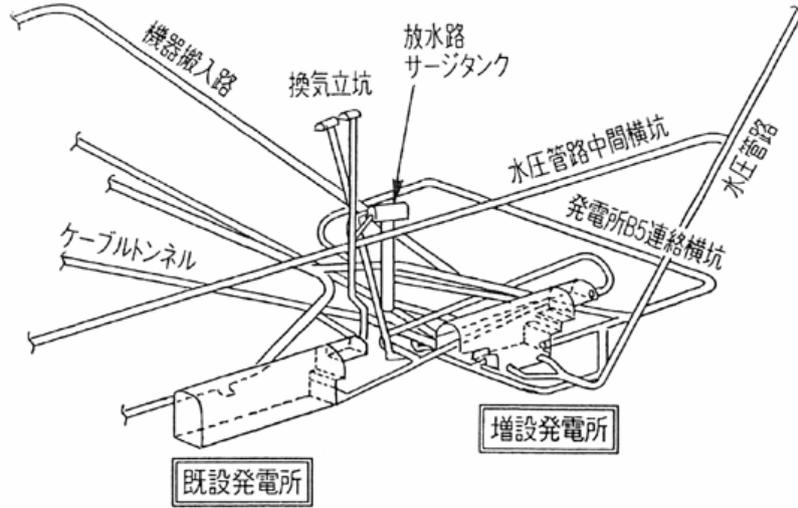


図-4.3 発電所付近の鳥瞰図

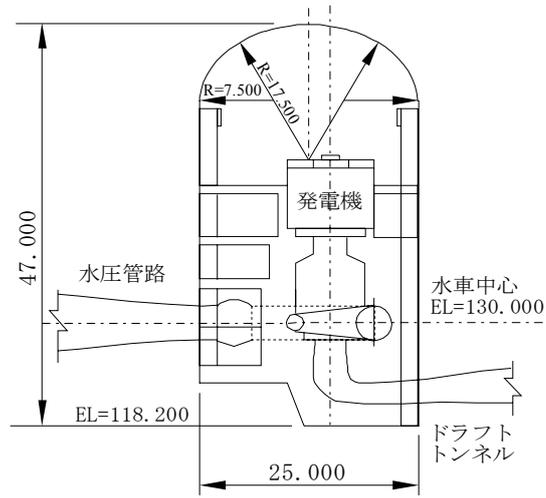


図-4.4 発電所空洞の断面図

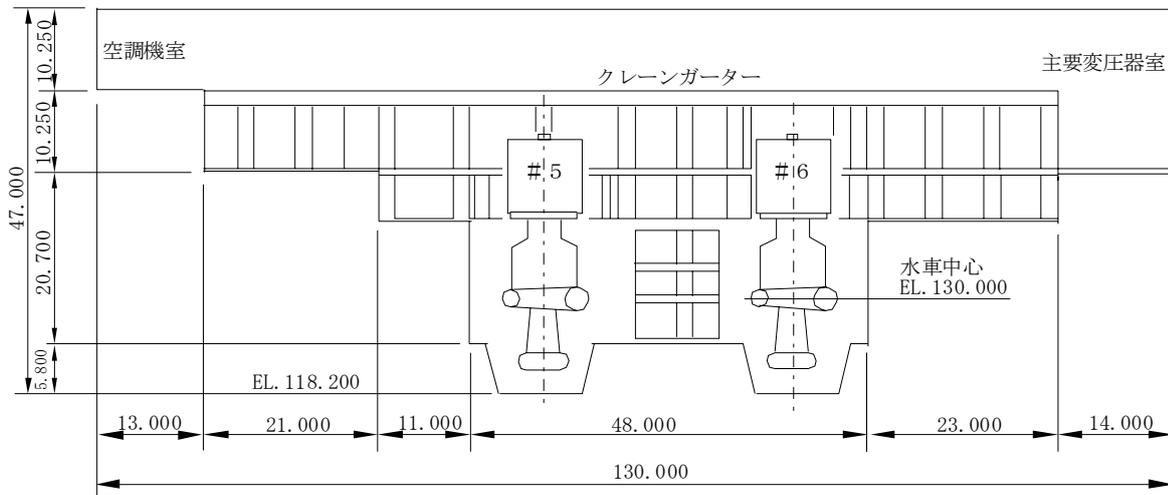


図-4.5 発電所空洞の縦断面図

増設発電所の特徴は、既設発電所に隣接していること、および既設発電所の連絡横坑が増設発電所空洞を横切っていることである。

掘削工事にあたり、NATM の原点に戻り「地山自体の持つ支持力を最大限に活かす」ことを基本として、岩盤地下空洞の新しい設計・施工・情報化施工の取り組みを行った^{1),2)}。初期支保設計では、「NATM の考え方にもとづき地山自体の持っている保持力を最大限に利用した支保設計を行い、最小限の支保量で設計する」こととした。さらにその支保設計を有効なものにするための施工法として、「地山の保持力を最大限に残すために掘削周辺岩盤の損傷を極力低減することのできる施工法」を採用することとし、アーチ掘削には縁切り工法と発破工法を併用した施工法を、盤下げ掘削にはスムーズブラस्टィングなどの制御発破を用いた。

また、初期支保設計を補うために、「地質情報や計測結果などを用いて必要な対策を迅速かつ的確に実施するための情報化システム」の構築・運用を行うこととし、従来から実施されている周辺岩盤の計測に加え、岩盤の不連続性に着目した不連続面のすべり・剥離を考慮した逆解析、不連続体モデルの一つであるキープロック解析を情報化施工に採り入れた³⁾。キープロック解析では、実際の施工現場において運用することを目的として、地質調査、不連続面データの入力、キープロック抽出・安定解析、追加補強の実施までを一連のシステムとして確立することとした。



写真-4.1 6リフト掘削時の施工状況

4.1.2 地質および岩盤物性

地下発電所周辺の地質は大部分が中生代白亜紀中葉（1.1 億年前～9 千万年前）の生野層群に属する流紋岩類および、同質火砕岩類を主としている。流紋岩中には流理構造が明瞭に見られる部分が多く、同質火砕岩である凝灰岩中には明瞭なラミナすなわち葉理構造が見られる。また、ひん岩がほぼ南北方向の貫入岩として確認されている。貫入岩の幅は最大で 5m 程度であるが、1m 未満のものが主体であり大規模なものは見られない。断層、破砕帯は比較的小規模なものしか確認されておらず、破砕帯幅は最大で 60cm 程度であり平均すると 1～10cm である。岩盤等級は概ね B～C_H 級と良好であり(RQD=70～90%)、ひん岩岩脈の貫入面近傍や、破砕帯や変質を受けた狭い範囲に、C_M 級以下の劣化した岩盤が分布している。

事前空洞安定解析に必要な岩盤の強度定数、変形係数、および地山の初期応力を推定するために、既設発電所の連絡横坑、試掘横坑を利用して各種試験を実施した。なお、既設発電所建設時にも各種試験を実施しているために、今回の試験は必要最小限の規模とした。

原位置せん断試験として、ブロックせん断試験を 1 シリーズ 4 供試体について実施し、同時にせん断後のフリクション試験をすべての供試体で実施し残留強度を求めた。対象岩盤は、事前調査の結果発電所のサイトの大半を占めると予想された B 級流紋岩を対象とした。試験結果を表-4.1 に示す。岩盤変形試験として、2 か所で平板載荷試験を鉛直・水平方向の 2 方向で実施した。試験結果を表-4.2 に示す。初期応力に相当する 5-10MPa における B 級、C_H 級流紋岩の除荷時の接線弾性係数は 24,000MPa, 16,000MPa であり、空洞長軸方向、断面方向に対する異方性は認められず、おおむね等方性の岩盤と考えられた。地質調査のボーリングコアを利用し各種岩石試験を実施した結果、表-4.3 のような物性が得られた。一軸圧縮強度は、B 級流紋岩で 145MPa、C_H 級流紋岩で 133MPa であり、B 級と C_H 級では差は見られないが、C_M 級では 63MPa と約 50%に低下している。

表-4.1 ブロックせん断試験の結果²⁾

	ピーク強度		残留強度	
	c (MPa)	ϕ (°)	c (MPa)	ϕ (°)
B級流紋岩	2.51	57.3	1.96	42.9

c : 粘着力 ϕ : 内部摩擦角

表-4.2 平板載荷試験の結果²⁾

	載 荷 時			除 荷 時		クリープ率
	D (kgf/cm ²)	E_s (kgf/cm ²)	E_t (kgf/cm ²)	E_s (kgf/cm ²)	E_t (kgf/cm ²)	
B 級流紋岩	168,000	191,000	187,000	195,000	188,000	0.05
	~ 262,000 (196,000)	~ 278,000 (228,000)	~ 266,000 (227,000)	~ 280,000 (232,000)	~ 273,000 (244,000)	~ 0.09 (0.07)
C _H 級流紋岩	34,000	78,000	79,000	81,000	79,000	0.05
	~ 114,000 (79,000)	~ 160,000 (127,000)	~ 160,000 (127,000)	~ 160,000 (130,000)	~ 208,000 (160,000)	~ 0.07 (0.06)

D : 変形係数, E_s : 割線弾性係数, E_t : 接線弾性係数, () 内数字は平均値を示す。

表-4.3 室内岩石試験の結果²⁾

		流 紋 岩			凝灰岩	ひん岩
		B 級	C _H 級	C _M 級	B 級	B 級
表乾比重 G_t		2.56 ~2.62 (2.58)	2.49 ~2.60 (2.56)	2.49 ~2.60 (2.55)	2.51 ~2.55 (2.54)	2.77 ~2.80 (2.79)
吸水率 W (%)		0.98 ~1.76 (1.36)	0.63 ~2.75 (1.64)	1.02 ~3.26 (1.97)	1.97 ~2.86 (2.36)	0.71 ~1.43 (1.18)
弾性波	V_P (km/sec)	5.56 ~6.42 (5.78)	4.72 ~6.25 (5.61)	4.95 ~5.82 (5.41)	5.27 ~5.96 (5.53)	5.62 ~6.26 (5.96)
	V_s (km/sec)	2.26 ~3.09 (2.97)	2.19 ~3.25 (2.84)	1.71 ~3.21 (2.47)	2.05 ~2.94 (2.64)	2.60 ~3.01 (2.87)
引張強度 σ_t (kgf/cm ²)		93	46	51	121	62
圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)		1,475	1,360	643	1,007	974
静弾性係数 E_s ($\times 10^5$ kgf/cm ²)		5.35	5.80	4.17	5.69	5.03
静ポアゾン比 V_s		0.22	0.23	0.32	0.25	0.22
強度定数	粘着力 C (kgf/cm ²)	160		75	150	121
	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	60		49	54	63

() 内数字は平均値を示す。

また、既設横坑内で、小林らが提案する円錐孔底ひずみゲージ法⁴⁾を用いて地山の初期応力を測定した。その結果を検証するために、同坑内の2か所のボーリングコアを用いてAE法による初期応力の測定⁵⁾も併せて実施した。得られた3次元主応力を図-4.6に、発電所横断面での2次元主応力を図-4.7に示す。孔底ひずみ法とAE法の測定結果は比較的良好な整合性を示している。発電所横断面での最大、最小主応力は、それぞれ7.87MPa、4.68MPaとなった。

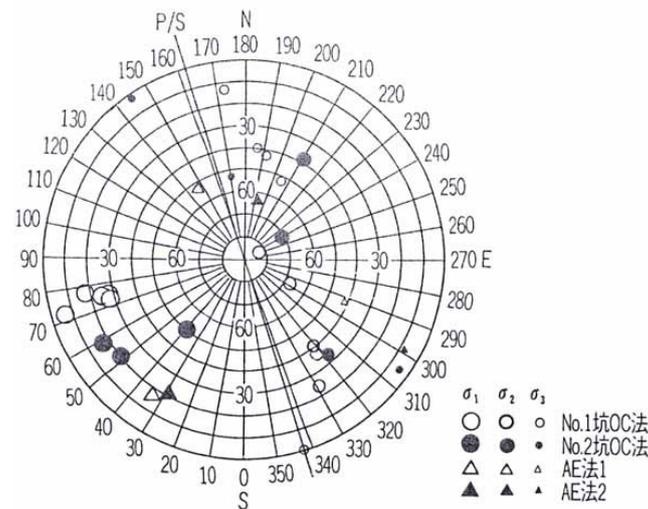


図-4.6 初期応力測定結果の主応力分布²⁾

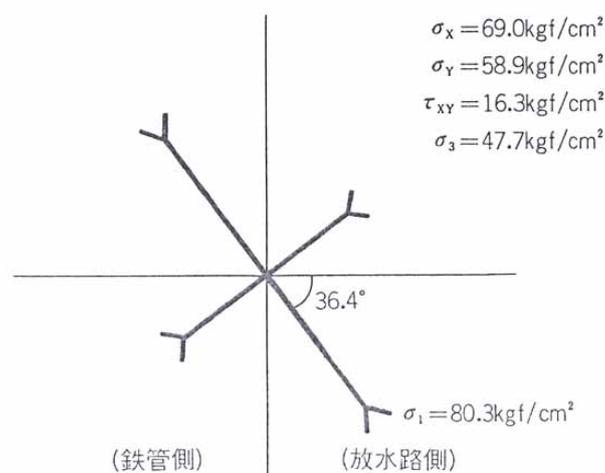


図-4.7 発電所断面における主応力分布²⁾

4.1.3 支保設計

従来、大規模地下空洞の設計では、補強対象とする岩盤挙動の不安定要因として以下の2つの要因に対する設計が実施されている。

- ①空洞掘削による初期応力の解放に伴い、連続体として挙動する周辺岩盤に発生するゆるみ域に対する補強設計。
- ②空洞周辺に存在する不連続面に起因する、すべりや崩落に対する補強設計。

しかしながら、これら事前に実施される支保設計は必ずしも、最適かつ合理的なものとはなっていないと考えられる。たとえば、連続体としての解析結果からは、得られた最大の補強対象の深さが空洞の全周にわたって分布していると仮定し、P Sアンカーで岩盤を縫いつけた支保設計となっている場合や、不連続面に対する事前設計では、多くのすべり線を仮定し最大規模の岩盤ブロックに対して支保設計を行っている場合が多い。

このような、安全側に考えた支保設計が行われてきた理由としては、設計時に実施される解析は、事前調査での岩盤を代表する入力物性値と、ある仮定条件のもとで岩盤をモデル化した数値モデルによって実施される推定値に過ぎず、実際の岩盤挙動とは異なることが十分に予想されるからである。掘削時の岩盤挙動を正確に予測するためには岩盤中の複雑な亀裂、地質の差や初期応力などを正確に把握しなければならず、現状の調査技術、設計技術では非常に困難であることは言うまでもない。

また、地下発電所空洞はアーチ部を施工後、盤下げ掘削によって内空断面の高さが高くなり、アーチ部や側壁上部に異常な岩盤挙動が発生した場合、その対策を実施するためにトンネルのような線上の構造物とは比較にならないほど多くの費用と時間が必要となることも安全側の設計が行われてきた理由の一つである。

奥多々良木発電所空洞の支保設計では、従来の空洞設計における課題点を解決するために、岩盤地下空洞の新しい設計・施工・情報化施工の取り組みを試みた。その初期支保設計の関する基本概念は「NATM の考え方に基づき、地山自体の持っている保持力を最大限に利用した支保設計を行い、最小限の支保量で地下空洞の掘削を開始すること」である。ここで言う「地山保持力の最大限の利用」とは、本当に補強を必要とする領域を適切な手法を用いて推定し、最小限のP Sアンカーを効果的に打設することに他ならない。そこで、事前設計としての周辺岩盤の支保は原則的に吹付けコンクリートとロックボルトとし、事前に実施する連続体の数値解析結果から想定されるせん断破壊領域と引張破壊領域の落下・すべりに対してのみP Sアンカーで補強することとした。

掘削による破壊には2つの主要なモードが存在する。一つは掘削によってもたらされる応力状態の変化が局所的に岩盤の破壊強度に達する場合であり、もう一つはキープロックの落

下およびすべりによる破壊である。前者については初期支保設計で対応することとし、後者については後述する施工中の地質調査およびキープロック解析にもとづく情報化施工の中で追加補強することとした。一方、これに加え当地点の岩盤の物性値、初期応力の大きさ・方向がよく似ており、事前解析結果も当地点と似たものになることが予想された関西電力(株)大河内発電所の支保補強実績を反映させることとした。大河内発電所は、平成4年に運転開始した揚水発電所であり、その発電所空洞形状は高さ46.6m、幅24.0mの弾頭型断面、延長134.0mの空洞形状を有している⁶⁾。

まず、第1に大河内では、アーチ部の掘削開始当初から放水路側アーチ肩部の吹付けコンクリートにクラックが生じたこと、限界せん断ひずみを超える領域が発生しPSアンカーを2列補強したことから、当地点でも重点的に放水路側アーチ肩部を事前に補強することとした。第2に大河内では、側壁部で限界ひずみを超える領域が拡大化したためPSアンカー長を当初の10mから15mに変更した実績から、盤下げに伴い限界せん断ひずみを超える領域が広範囲に発生する場合を想定して当初から補強対象領域の側壁部についてアンカー長を15mにすることとした。

初期支保設計における補強対象領域を決定するために、実際の掘削ステップを考慮した非線形粘弾性逐次掘削解析⁷⁾(2次元FEM)を実施した。変形係数 D の非線形性は d -min法を用いて評価し、変形係数およびポアソン比の設定はそれぞれ $D_{min} = D_0/100$ 、 $\nu_{max} = 0.45$ とした。なお、解析に用いる初期応力は、測定結果からの2次元主応力を自重解析により補正している。解析結果として、**図-4.8**にせん断領域と引張破壊領域の分布を示す。緩み領域($\nu = 0.45$)の範囲はこの破壊領域の分布形状とほぼ一致している。

支保対象領域は、前述した必要最小限の支保量の考え方で、**図-4.8**の破壊領域分布図から決定した。すなわち、アーチ部(放水路側)では連続してせん断破壊が生じるアーチ円周に沿った深さ1.0mの領域の岩盤自重をPSアンカーで支保することとした。一方、側壁部(鉄管路側)では、せん断破壊と引張破壊が連続して生じる領域のすべり力に対し、PSアンカーの導入力および岩盤自重による摩擦抵抗により支保することとした。この手法によると、鉄管路側アーチ部と放水路側側壁部は解析上支保が不必要となる。わずかに発生している引張破壊領域はロックボルトと吹付けコンクリートで十分対応可能と考え、これらの箇所には計測を目的としたPSアンカー(軸力計設置)を、導入力約100kN/本(1本/30m²)で打設した。**図-4.9**に初期支保設計のレイアウトを示し、従来の安全側の初期設計と比較したPSアンカーの設計を**図-4.10**に示す。初期PSアンカーは、空洞に対して左右非対称の配置となり、PSアンカーの必要本数と導入力は、従来方法の設計に比べて大幅に減少している。

このように、初期支保設計として大幅にPSアンカーの数量を減少させた支保設計を実現

するために、情報化施工では、従来の計測と観察を主体とする方法に加え、キープロック解析を日常管理の中に導入することとした。すなわち、キープロック解析導入の効果は、施工中の地質観察結果を最大限に活用して、不安定なブロックにのみ必要量の補強が可能になるため、初期設計時における空洞の支保の量を必要最低限なものに低減することを可能にすることにある。さらに、掘削直後の段階で不安定なブロックを予測することができるため、早期に空洞の安定性が確保されると共に補強工実施の遅延が回避できる効果も期待される。

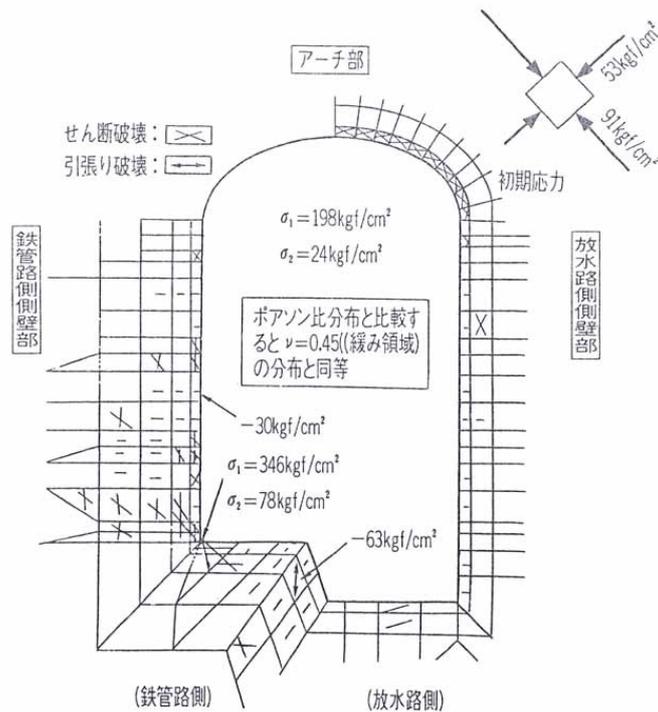


図-4.8 事前 FEM 解析結果²⁾

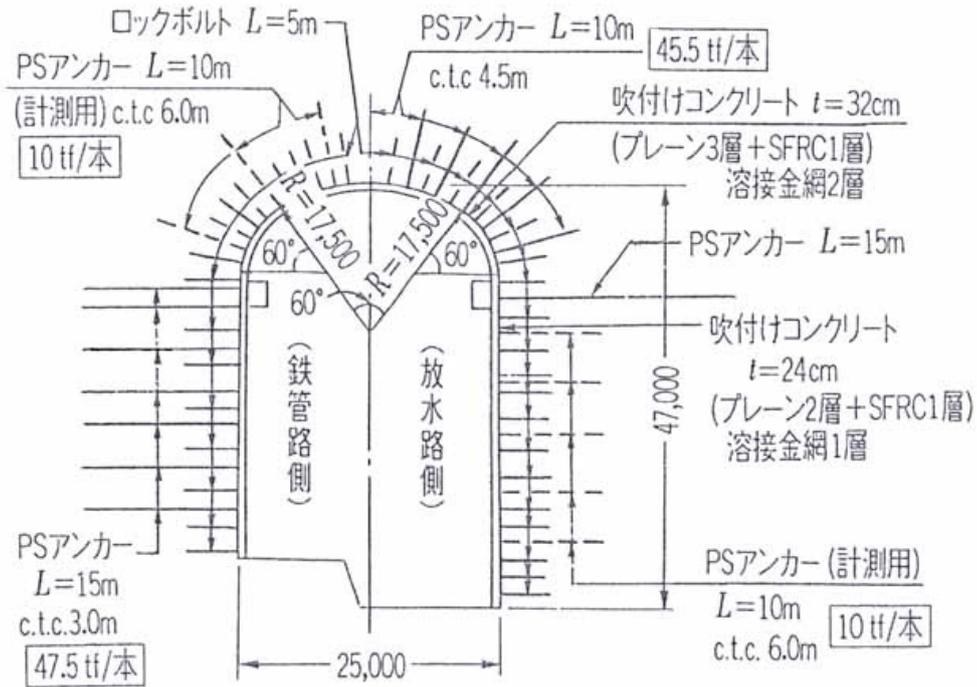


図-4.9 初期支保設計 (横断面図) ²⁾

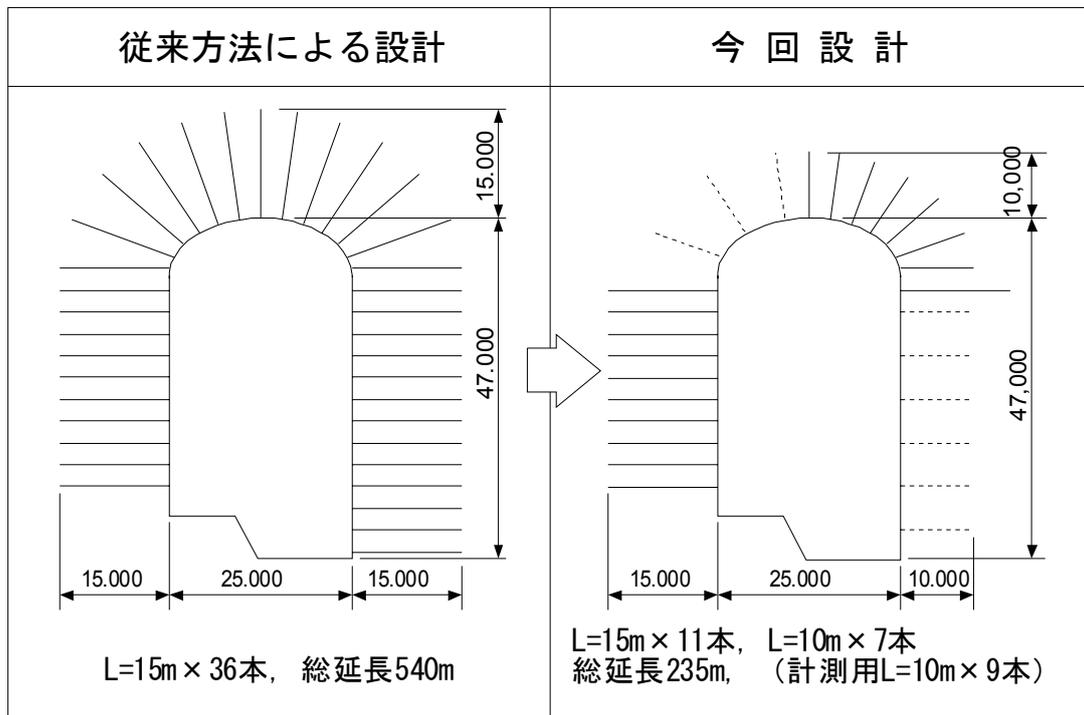


図-4.10 PSアンカーの初期設計

4.1.4 不連続面調査、試験

事前の不連続面調査は、空洞建設地点周辺の試掘坑および換気立坑において実施し、不連続面の幾何学的特性（方向性、長さ、間隔、粗度、亀裂の分布密度や卓越方向）について調査した。調査は、予備調査として1m×1mのウィンドウサンプリング調査を計4ヶ所実施し、主に小規模な不連続面分布の特徴を把握した後、スキャンライン調査を試掘坑および換気立坑にて計200mの範囲で実施した。図-4.11に調査結果のうち、発電所空洞の主な地質区分である流紋岩中の不連続面のステレオ投影図（下半球投影）を示す。同図から、傾斜角は鉛直に近く、走向は南北系と東西系の2種類からなる卓越方向が存在することがわかる。この卓越方向は、岩種に関わらず一定であり、また岩脈、破碎帯と同系統の節理群と判断された。

安定計算に用いる不連続面の物性値を決定するために、現場におけるブロックサンプリングならびにボーリングコアを用いて多段圧縮三軸試験⁸⁾、一面せん断試験を実施した。それとともに各試験結果の妥当性を評価するために、傾斜試験⁹⁾および研磨した流紋岩の一面せん断試験を補助的に実施した。各試験の結果を表-4.4、図-4.12に示す。多段三軸試験に用いたコアはφ=5cm、高さ10cmで総数4供試体であり、一面せん断試験では、せん断面が10×10cm程度の岩盤ブロックをモルタルで固めて整形した試料を14個用いた。試験結果は、傾斜試験から得られた平滑な表面を持つ岩石コアによる基本摩擦角(28.1°)と、実際の不連続面サンプルの傾斜角(46.5°)の間に分布しているが、不連続面のかみ合わせによって大きく左右される傾向も見られた。よって、当地点の不連続面粗度⁹⁾(JRC)の値が1~8と小さいことから、研磨した流紋岩の一面せん断試験結果が不連続面物性値の下限值を示しているものと判断し、安定解析に用いる物性値として、粘着力(c)を0.0Pa、内部摩擦角(φ)を32.4°とした。

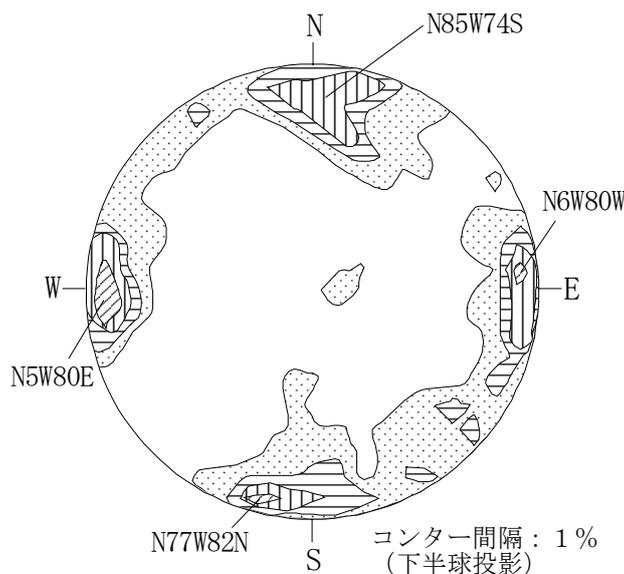


図-4.11 不連続面分布のステレオ投影図

表-4.4 多段三軸圧縮試験および一面せん断試験の結果

	多段三軸圧縮試験				一面せん断試験			
	ひん岩①	ひん岩②	流紋岩①	流紋岩②	ひん岩	凝灰岩	流紋岩①	流紋岩②
c (kPa)	20	49	20	0.0	110	78	19	510
ϕ (°)	33.1	35.0	34.8	50.6	33.6	35.9	26.4	29.1
JRC ave.	2.4	1.4	7.3	0.04	4.6	6.5	7.9	8.5

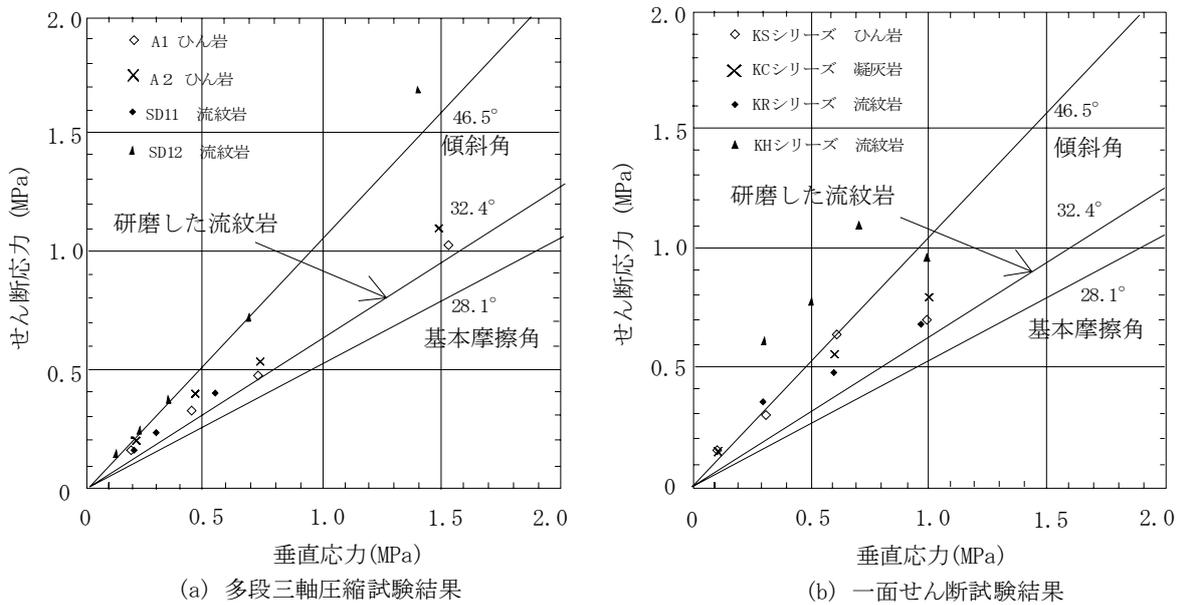


図-4.12 不連続面試験結果

なお、本調査で得られた不連続面の走向・傾斜の卓越方向と平均面間隔データをもとに、本地点で確率論的に発生すると考えられるキープロックの規模や頻度を把握するために予備解析を実施した。不連続面データを表-4.5に、予備解析結果を図-4.13に示す。本解析では、平均トレース長は、負の指数分布で与え、不連続面の位置の分布は一様乱数によりデータを発生させている。したがって、キープロックの発生位置を特定化することはできないが、発生頻度および大きさの傾向を把握することが可能であり、後述する初期支保設計で十分対応可能であることがわかった。

表-4.5 キーブロック予備解析に使用した不連続面データ

サイト No	A-1		A-2		B		
データ数	323		433		207		
スキャンライン長(m)	53(南北方向)		65(東西方向)		39(東西方向)		
平均トレース長(m)	0.6		0.85		0.87		
平均面間隔(m)	0.16		0.15		0.18		
クラスタ No	1	2	1	2	1	2	3
データ数	175	107	266	132	84	29	84
走向・傾斜	N85W84S	N25E80W	N22E80W	N77W87N	N5E84N	N65W87N	N43E88E
平均トレース長(m)	0.63	0.51	1.09	0.72	0.73	0.72	0.88
平均面間隔(m)	0.30	0.49	0.13	0.26	0.18	0.45	0.18
走向・傾斜	N85W84S	N25E80W	N22E80W	N77W87N	N5E84N	N65W87N	N43E88E
平均トレース長(m)	0.63	0.51	1.09	0.72	0.73	0.72	0.88
平均面間隔(m)	0.889	1.45	0.314	0.628	0.725	1.81	0.725
	分布: 負の指数分布 $f(x) = \frac{1}{\mu} e^{-\frac{x}{\mu}}$ (μ : 平均の長さ)						
	分布: 一様乱数						

平均面間隔(d_i)は次式によって調整した。 $d_i^2 = \frac{L_i}{L_{A1} + L_{A2} + L_B} d_i^1$

($i=A1, A2, B$ L: 平均トレース長 d: 平均面間隔)

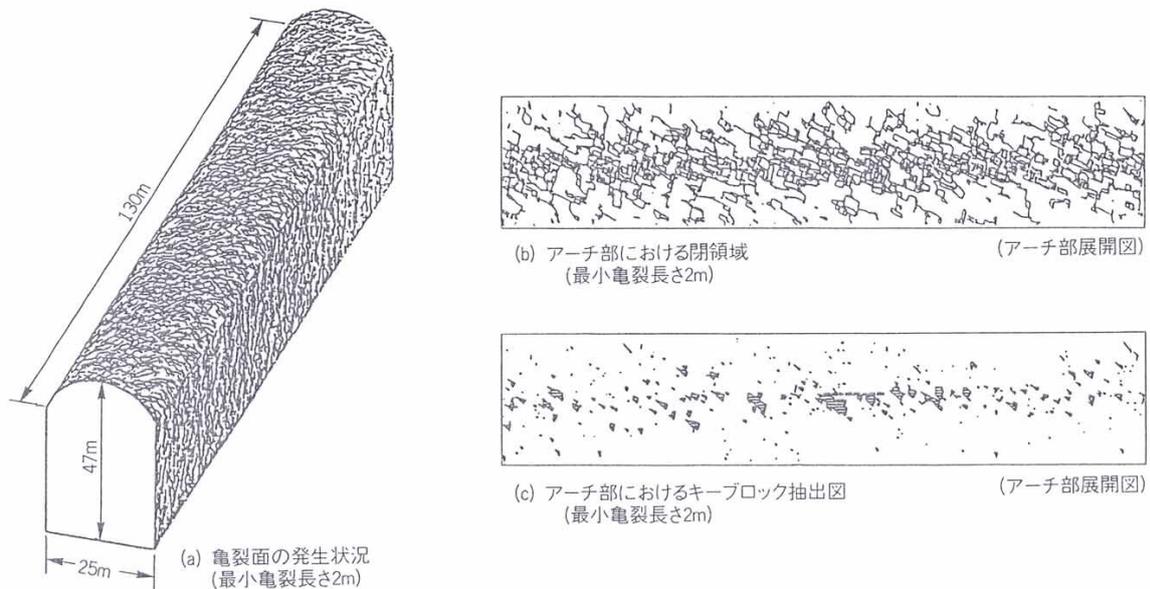


図-4.13 キーブロック予備解析結果

4.1.5 キーブロック解析システム

キーブロック解析を効率的に実施するために、日常管理とステップ管理という2つの手法を導入した。これは、キーブロック解析を実施工で運用する場合における、解析の迅速性と正確性に対応した考え方に基づくものである。

切羽近傍に出現するキーブロックは、掘削直後の状態が最も危険であり、施工が進み、吹付けやアンカー等の補強工が実施されるに従い安定性は高まると考えられる。従って、切羽近傍に存在するキーブロックに対しては、その存在をできるだけ早く察知することにより、補強対策を行う必要がある。このため、日常管理においては1回分の切羽観察結果を基に、切羽と切羽周辺の空洞部分の解析を実施する。解析は数時間程度で終了し、掘削サイクル内あるいは次掘削サイクル中に対策が実施できることを目標とするものであり、リアルタイムの管理手法となる。

一方、個々の切羽の観察データは空洞全体の不連続面分布の断片的な情報であり、正確な不連続面情報を得ようとすれば複数の観察データを集約した不連続面図を作成しなければならないが、この作業には時間を要する。これは、キーブロック解析では不連続面を完全な平面と仮定しているが、実際には粗度や折れ曲がりによって同一の不連続面でも切羽によって出現する位置や方向性が異なるからである。また計測誤差も存在するはずである。従って、全体の不連続面データを作成するためには、個々の不連続面の連続性を判断したり、場合によっては岩級区分や岩質区分なども加味して判断するという地質学的な能力を必要とする。ステップ管理は、このようにして作成された不連続面データに基づいて実施し、空洞掘削におけるいくつかの段階において実施されるものであり、日常管理では検出できない、空洞全体に対する比較的大規模なキーブロックを検出する目的で実施された。図-4.14は、これら日常管理とステップ管理のフローを示したものである。

地質観察は、発破の後のズリ出し、こそく作業が終了した時点で実施される。ここで、計測対象とすべき不連続面の下限値を求める目的で微小なブロックに対する安定計算を実施した。ブロックとしては最も危険なモードであるアーチ天端での落下型の正三角錐あるいは正四角錐のブロックを考えた。ブロックに作用する力は、自重と吹付けコンクリートのせん断抵抗のみである。計算の結果、掘削面での面積が 1m^2 以下、重量が 3t 以下のブロックは、1次吹付けの厚さ 8cm 、2時間強度の 440kPa のせん断抵抗で十分な安全率を有しており、安定解析の対象外として良いことが分かった。したがって、地質観察においても数 m 規模以上の主要な不連続面についてのみ、スケッチと走向傾斜の測定を実施した。また、岩級、岩質や不連続面の充填物、湧水に関する情報など、通常の切羽観察で実施される項目についても観察シートに記載するとともに掘削面の写真撮影を行った。

各不連続面は、観察シートより始点、終点の座標と走向傾斜を読みとり、入力データを作成し、キーブロック解析プログラムを実行する。プログラムは、切羽面でのキーブロックを検出する平面用プログラムと、アーチ面を含んだ空洞周囲のキーブロックを検出するトンネル用プログラムからなっている。いずれのプログラムもすべての処理がパソコン画面を見ながら対話形式で実施できるようになっており、現場事務所において解析することが可能である。

キーブロック解析プログラムにより、移動可能ブロックを検出し、ブロックの大きさ、形状等の幾何学的情報を計算する。移動可能ブロックのうち、安定計算をする必要のない安定ブロックおよび前述した1次吹付けで安定している微小ブロックを除いたブロックについて安定解析を実施した。

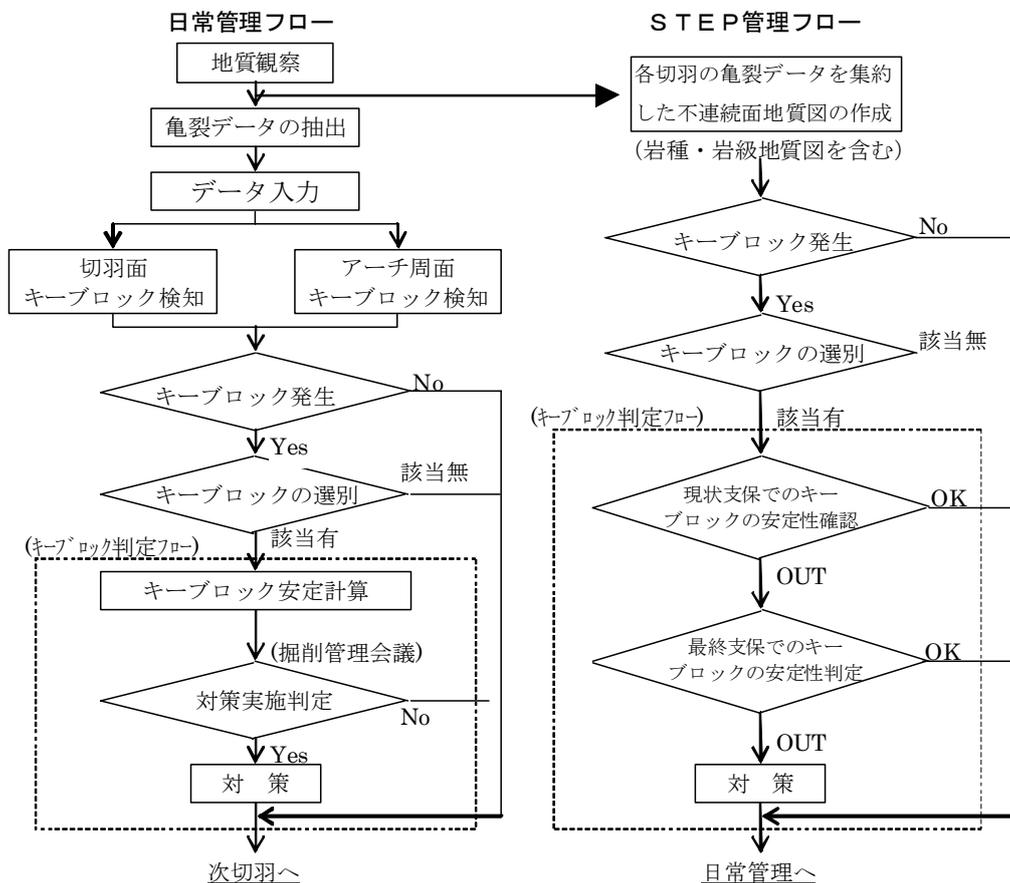


図-4.14 キーブロック解析を用いた情報化施工フロー

安定計算で考慮した抵抗力は、不連続面に対しては粘着力と内部摩擦角によるせん断抵抗であり、不連続面の引張抵抗は考慮しなかった。吹付けコンクリートに対しては、吹付け面

におけるキーブロックの境界線に沿ったせん断抵抗を不連続面の粘着力の増分として考慮した。吹付け厚さ、せん断強度および吹付け領域は施工状況に応じて変化させた。ロックボルトあるいはP Sアンカーについては、その打設方向に設計強度に相当する導入力が外力としてブロックに作用するものとした。ここで、積極的に導入力を作用させるP Sアンカーと導入力のない全面接着型のロックボルトは、支保としての作用メカニズムが異なるが、安定計算上は同じ扱いをした。その理由は、ここで検討対象としているのは不安定な岩盤ブロックであり、このような状態では、ブロックが滑り出そうとする力に対抗する形で、後からロックボルトに軸力が発生することになり、ロックボルトに導入力が作用した状態で安定性を論じることと同等であると考えられるからである。なお、P Sアンカーおよびロックボルトのせん断抵抗は考慮していない。

キーブロック判定フローの詳細を図-4.15に示した。図-4.15の各ステップでの安定計算の内容は表-4.6に示してある。ここで示した安全率のうち、不連続面に対する安全率は、吹付けコンクリートのせん断抵抗に対する安全率3と同等とし、ロックボルトおよびP Sアンカーに対してはグラウンドアンカー設計施工手順によった。また、ロックボルトは異形棒鋼(SD345, D25mm)であり、P SアンカーはP C鋼より線(F100)である。ここに示すように安定解析は、考慮する抵抗力に応じて実施されるが、安定計算の各段階において安全率の計算結果に対する判断基準により打ち切られ、必要ならば対策工が実施される。

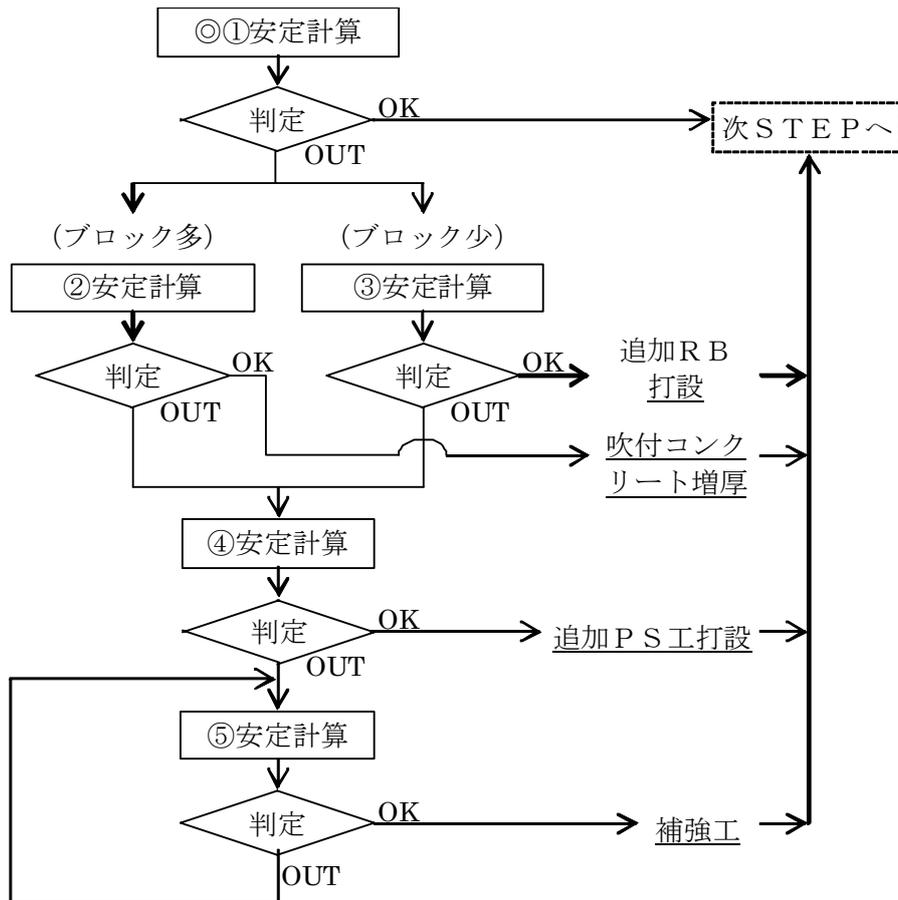


図-4.15 キーブロック安定判定フロー

表-4.6 安定解析の判断基準

	対策メニュー	判定基準 (対策OKとなる基準)	物性値
◎	吹付Cなし	$f_j \geq 3$	粘着力(c) = 0.0 kPa ^{*1)} 内部摩擦角 (ϕ) = 32.4° ^{*1)}
①	吹付Cのみ (t=3 or 8cm)	$f_c \geq 3$	せん断強度(τ_c) = 440 kPa (試験結果2時間強度)
②	吹付Cのみ (t=16cm)		
③	吹付C + 追加RB	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤と注入材間の極限引抜力に対し $f_T \geq 2.5$ $\min(0.6T_{su}, 0.75T_{sy}) \geq T$ RBと注入材との許容付着強度に対し $f_T \geq 1$ 	引抜強度(C_f) = 2.0 MPa ^{*2)} 引張強度(T_{su}) = 240kN 降伏強度(T_{sy}) = 169kN 付着強度(C_b) = 1.6 MPa ^{*3)}
④	吹付C+(追加RB)+追加PS	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤と注入材間の極限引抜力に対し $f_T \geq 2.5$ $\min(0.6TP_u, 0.75Py) \geq T$ PSと注入材との許容付着強度に対し $f_T \geq 1$ 	引抜強度(C_f) = 2.0 kPa ^{*2)} 引張強度(P_u) = 967 kN 降伏強度(Py) = 823 kN 付着強度(C_y) = 1.6 kPa ^{*3)}
⑤	補強工		

*1) 試験結果より *2) 「グラウンドアンカー設計・施工基準」硬岩の平均値より

*3) 「グラウンドアンカー設計・施工基準」より

図-4.15中の安定計算①では、不連続面抵抗のみの場合の安全率とこれに吹付けのせん断抵抗を考慮した場合の安全率が計算される。ここで必要安全率を満たしていないものは、追加補強の対策を必要とするキープロックであり、次の項目へ進む。安定計算②と③は、対策工として追加の増し吹付けを実施する場合と、追加のロックボルト工を実施する場合である。どちらの対策工を実施するかは、例えば多数のキープロックが集合体で存在する場合には増し吹付け、ブロックが単体で存在する場合にはロックボルトを用いるというように使い分ける。また、施工サイクルのなかで次工程として実施しやすい方法を選ぶこともできる。安定計算⑤は吹付け、あるいはロックボルトでは対応できない場合であり追加のP S工に対する安定計算を実施する。

表-4.6の判定基準及び物性の値は、建設地点の地質や不連続面の状況あるいは空洞規模等に対応して決定されるものである。

また、安全率については、釣り合い式を構成する各要因ごとに異なった数値を用いる考え方を採用した。以下に、その考え方を平面すべりの場合で示す。

平面すべりの安全率は、

$$F_s = \frac{c \cdot A + (W \cos \beta + T \cos \theta) \tan \phi + t \cdot l \cdot \tau_R}{W \sin \beta - T \sin \theta} \quad (4.1)$$

で表される。ここに、 F_s =安全率、 W =ブロック重量、 T =導入力、 β =すべり面の傾斜角度、 θ =導入力方向とすべり面の法線方向のなす角度、 c =すべり面の粘着力、 ϕ =すべり面の内部摩擦角、 A =すべり面の面積、 τ_R =吹付けコンクリートのせん断強度、 t =吹付け厚さ、 l =ブロックの掘削面での周長である。

しかし、式(4.1)における安全率は、釣り合いの状態を構成する各要素に対して、同じ安全率で評価していることになる。これに対し、Londeら^{10),11)}は、釣り合い式を構成するそれぞれの要素の不確実性に対応した安全率を与えることを提案している。この考え方を採用すると、式(4.1)は、

$$1 = \frac{\frac{c \cdot A}{f_j} + (W \cos \beta + \frac{T \cos \theta}{f_T}) \frac{\tan \phi}{f_j} + \frac{t \cdot l \cdot \tau_R}{f_c}}{W \sin \beta - \frac{T \sin \theta}{f_T}} \quad (4.2)$$

となる。ここに、 f_j =不連続面抵抗に関する安全率、 f_c =吹付けコンクリートに関する安全率、 f_T =導入力に関する安全率である。このとき、必要な導入力 T は、

$$T = \frac{W(\sin \beta - \frac{\tan \phi \cos \beta}{f_j}) - \frac{c \cdot A}{f_j} - \frac{t \cdot l \cdot \tau_R}{f_c}}{\frac{1}{f_T} (\frac{\tan \phi \cos \theta}{f_j} - \sin \theta)} \quad (4.3)$$

で表される。

今回は、不連続面抵抗および吹付けコンクリートに対しては、強度のばらつきやキープロック解析を日常管理に採用する初めての例であること等を考慮して、 $f_j=f_c=3$ と十分に安全な値とした。また、導入力に対しては、設計強度にすでに安全率が反映されていることから $f_T=1$ とした。

4.1.6 キーブロック解析の実施結果

(1) アーチ掘削時のキーブロック解析

アーチ掘削時においては、導坑掘削および側壁拡幅の各サイクルにおいて切羽観察を実施し、前述のフローにしたがってキーブロック解析を実施した。切羽観察は、施工に関わる地質状況の把握とキーブロック解析の入力となる不連続面データの取得の両方に主眼をおいて実施した。また、観察作業は、発破・ずり出し・こそく作業が終わった後 30 分程度で実施し、施工サイクルを妨げないようにした。図-4.16にアーチ部での切羽観察の例を示す。

切羽観察シートから不連続面の座標と走向・傾斜を読み取り、トレスマップを作成すると同時に、キーブロック解析の入力データを作成する。続いて、連続性の高い不連続面を空洞アーチ壁面に展開し、閉領域の抽出、キーブロックの検出、そして不安定キーブロックの検出とそれに対する安定計算を実施する。補強対策工が必要なものに対しては図-4.17に示すような安定計算シートが出力される。安定計算シートには、キーブロックの3次元形状が空洞上に図示され、視覚的に形状が認識できる。また、同図中にはキーブロックを形成する不連続面の走向・傾斜等の情報やキーブロックの高さ、体積、重量等の幾何学的情報および、安定計算の結果が出力され、これをもとに補強工の種類、打設位置、本数等の検討を行うことになる。

このようにしてアーチ部において追加対策工を必要としたキーブロックを図-4.18に示す。また、キーブロックの幾何学情報、破壊モード、追加補強の内容の一覧を表-4.7に示す。対策を要したキーブロックは計 28 個あり、うち落下型は 9 個、平面すべり型は 9 個、くさびすべり型は 10 個で、それぞれ前述したフローに従い対策を実施した。キーブロック規模は平均で掘削面での面積 70m^2 、質量 182t、最大で面積 500m^2 、質量 1,300t であった。また、対策を施したキーブロックは、追加ロックボルトによるものが 19 個、追加吹付けコンクリートによるものが 7 個、追加 P S 工によるものが 1 個、追加吹付けコンクリートと追加 P S 工の併用によるものが 1 個であり、集計すると追加ロックボルト 69 本、追加吹付けコンクリート 486m^2 、追加 P S 工 12 本となった。

記録日	平成7年4月28日 0:30~1:15			記録者	坂 靖範				
距離程	TD14.6	レベル		掘削段階	アーチ中央導坑				
観察位置	面の方向			東西方向					
岩級・産状に関する項目	岩種(色調)	流紋岩(緑灰)	その他						
	岩自体の硬さ	1	風化状況						
岩級区分・岩盤評価に関する項目	節理の産状	3							
	節理密度	20cm以上の亀裂	20~30cm	2m以上の亀裂	1~2m				
	節理の開口性	1	節理面の粗さ		2				
総合判定	級	節理面の変質	1	節理面湧水状況				2	
キーブロックに関する項目	亀裂群況	番号	走向・傾斜	長さ	間隔		備考		
		①	52E 54E	1.0m程度	30~50cm				
	②	不明	2.0m程度	0.5m程度					
	主要亀裂	番号	走向・傾斜	長さ	幅・介在物	開口性	粗さ	変質	湧水
		①	64W 84N	8.0m以上	認められず	1	2	1	1
		②	8W 80E	8.0m以上	"	1	2	1	1
		③	62E 52N	6.0m以上	"	1	2	1	1
		④	62E 52N	5.0m以上	"	1	2	1	1
		⑤	58W 60N	3.0m以上	"	1	2	1	1
		⑥	不明	7.0m以上	"	1	2	1	1
		⑦	不明	3.0m以上	"	1	2	1	1
		⑧	不明	5.0m以上	"	1	2	1	1
		⑨							
		⑩							
		⑪							
⑫									
⑬									
⑭									
観察者の記載事項									

生理番号	TD14.6	区分	7-7中央導坑	写真番号					

観察スケッチ (正面図、展開図) 1/100

岩種

岩級

写真 TD-14.6m

図-4.16 切羽観察シート

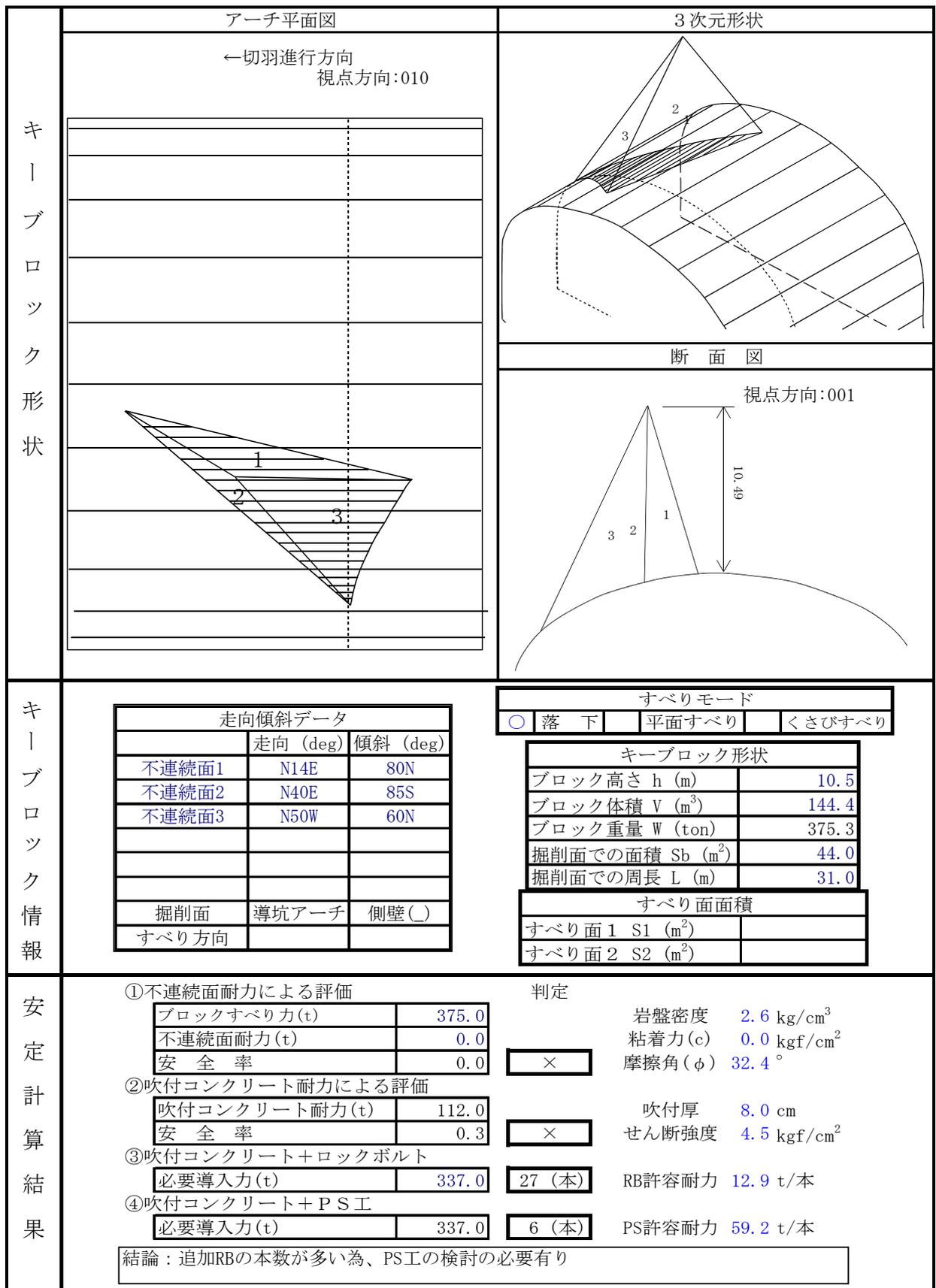
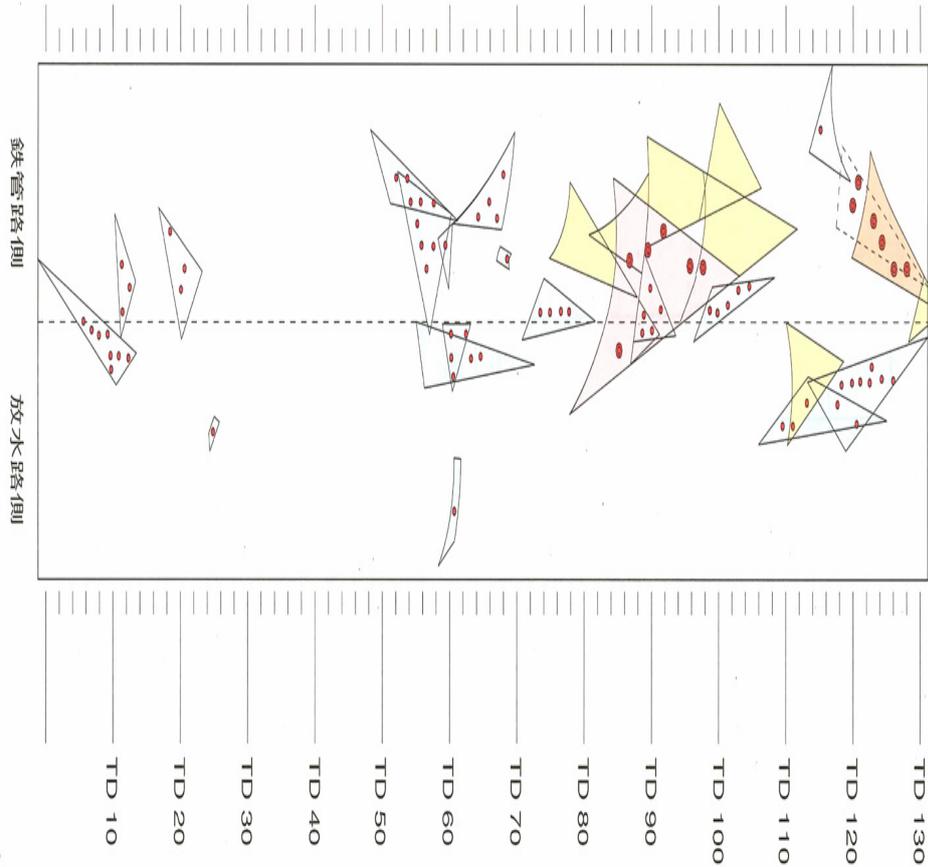


図-4.17 キーブロック安定計算シート

対策工 (キープロック別)



対策工 (キープロック別)

ロックボルト	
吹付	
PS工	
吹付+PS工	

ロックボルト位置
PS工位置

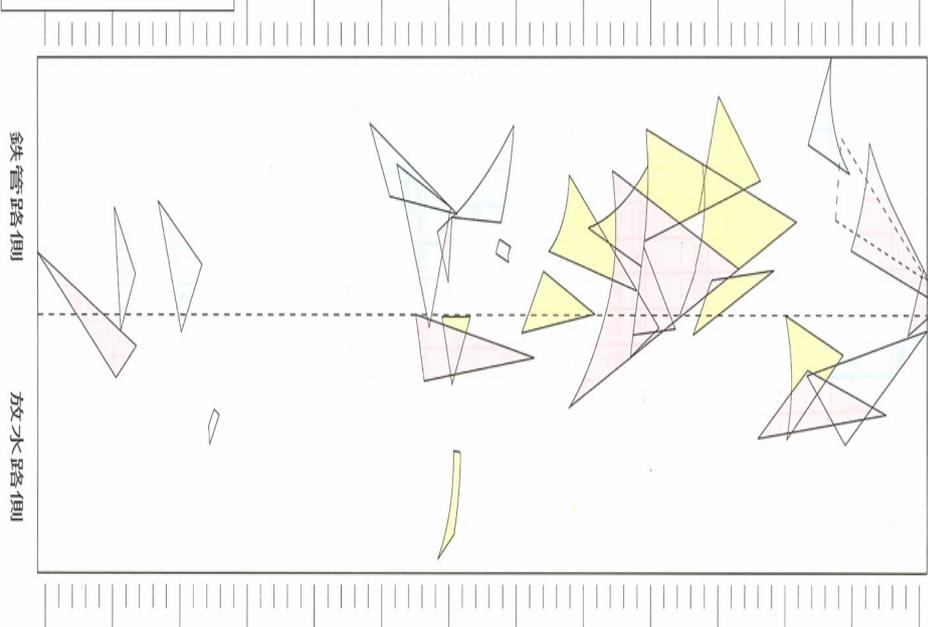
対策別キープロック数 (9/18現在)

- ・ロックボルト 19個
- ・吹付工 7個
- ・PS工 1個
- ・吹付+PS工 1個

対策諸量

- ・ロックボルト L=5m D25 69本
- ・増吹付 SFRC 8cm 486m²
- ・PS工 L=10m 45.5t 12本

キープロックの形態



キープロック形態

落下型	
平面すべり	
クサビすべり	

<キープロック諸量>

総数 (9/18現在) 28個

形態別数

- ・落下型 9個
- ・平面すべり 9個
- ・クサビすべり 10個

最大キープロック

・500m³, 1300t (19)

平均キープロック

・70m³, 180t

(1/500)

図-4.18 対策工を必要としたアーチにおけるキープロック

表-4.7 アーチ部における追加補強キープロックの概要

キープロック 番号	構成亀裂				すべり形態			キープロックの形状				安全率		実施対策工			掘削管理会議2 メモ
	1	2	3	4	落下	平面	クサビ	高さ (m)	面積 (m ²)	体積 (m ³)	重量 (t)	面耐力 のみ	面耐力+ 吹付	追加RB	追加吹付	追加PS	
①	N60W 84E	N52E 60S	N84E 80N			○		2.3	19.7	1.6	4.1	0.07	7.10	3			最初のキープロック、対策基準の模索段階
②	N30W 50S	N35E 83W	N22 86E		○			6.2	15.3	32.2	83.7	0.00	—	6			落下型の最初のキープロック、対策基準の模索段階
③	N55W 60S	N80E 40S	N40E 55W			○		2.8	9.2	6.6	17.2	0.44	1.85	5			対策基準の模索段階
④	N22E 86E	N56W 78N	N72E 80W	N65W 65N		○		3.9	1.9	5.8	15.0	0.14	1.58	1			日常管理
⑤	N70E 60N	N20E 85W	N5E 60N			○		5.6	21.7	38.6	100.3	0.06	1.15	5			日常管理
⑥	N20E 80W	N70W 90N	N70E 60N			○		6.4	8.3	17.7	46.0	0.12	1.24	4			対策基準の模索段階
⑦	N20E 80W	N70W 60N	N20W 70E	N85W 90N	○			2.6	3.8	2.8	7.4	0.00	4.62	1			日常管理: 導坑時での吹付はキープロックの半分
⑧	N20W 70E	N60W 70N	N5E 60W			○		5.6	21.4	37.9	98.5	0.25	1.19	4			日常管理
⑨	N60W 70E	N20E 85W	N80W 90E	N20E 85W		○		4.6	1.6	5.6	14.6	0.06	1.25	2			日常管理
⑩	N70E 60N	N10E 30E	N5W 70W		○			2.1	39.1	27.4	71.1	0.00	2.10	2			日常管理
⑪	N70E 60N	N65W 50N	N5E 50E			○		8.7	7.1	19.4	50.3	0.55	2.00	4			日常管理
⑫	N70W 90N	N60W 45N	N70E 60N	N20E 20E		○		7.7	7.5	31.5	81.9	0.55	1.66	1			日常管理
⑬	N5W 70W	N50W 90N	N20E 85W			○		12.3	20.4	82.3	215.6	0.08	0.49	4			日常管理
⑭	N75W 75N	N25W 75W	N35E 90N		○			6.4	7.9	16.6	43.1	0.00	2.20	3			日常管理
⑮	N5W 70W	N75W 75N	N46E 70S		○			5.3	17.4	31.7	82.3	0.00	0.90	5			日常管理
⑯	N5W 70W	N50W 40N	N29W 90N			○		15.1	15.7	75.0	195.0	0.14	1.00	5			日常管理
⑰	N35E 90N	N10E 85E	N30W 35E			○		6.4	34.8	59.0	153.5	0.14	1.90		SFRC 8cm		STEP管理 + 独自対策なし
⑱	N75W 75N	N15E 70E	N10W 40E			○		3.6	23.3	17.0	44.1	0.38	2.60		SFRC 8cm		STEP管理 + 独自対策なし
⑲	N20W 90N	N15E 70E	N60W 40E		○			9.9	135.6	500.3	1300.8	0.00	0.20		SFRC 8cm	6	STEP: 増吹→追加PS + 有効システムRB、PC
⑳	N20W 75N	N14E 80N	N20W 30W			○		5.7	50.2	93.3	242.6	0.10	0.70		SFRC 8cm		STEP管理 + 独自対策なし
21	N70W 80S	N50E 60S	N20E 30W			○		15.2	31.8	154.3	401.1	0.50	0.80		SFRC 8cm		STEP管理 + 独自対策なし
22	N50W 40N	N14E 80N	N20W 90N			○		10.0	65.0	207.2	538.6	0.46	1.20		SFRC 8cm		STEP管理 + 独自対策なし
23	N15E 70E	N50W 30N	N60E 25N			○		6.4	29.2	58.1	151.0	0.30	2.50		SFRC 8cm		STEP管理 + 独自対策なし
24	N40W 50N	N15E 70E	N5W 80W		○			5.3	39.8	68.5	178.1	0.00	0.80	5			STEP管理 + 有効システムRB
25	N10W 70E	N30W 80W	N40E 80E			○		12.5	49.6	204.5	531.7	0.11	0.40	8	SFRC 8cm		STEP管理 + 有効システムRB
26	N14E 80N	N40E 85S	N50W 60N		○			10.5	44.0	144.4	375.3	0.00	0.30			6	日常管理 中央導坑時PS2本、切払時PS4本
27	N40E 85S	N60W 60E	N20W 80W		○			4.1	8.2	9.0	23.5	0.00	2.10		SFRC 8cm		日常管理 増吹により安定、独自対策なし
28	N70W 65S	N20E 60W	N35E 80E			○		5.2	14.6	22.7	59.0	0.30	2.60	1			日常管理
					9	9	10	平均 6.9	平均 26.6	平均 70.4	平均 183.1			69	486	12	

キーブロックに対する検討過程の実施例として、**図-4.19**に示した No. 26 のキーブロックの解析結果と追加補強について以下に示す。このキーブロックは、中央導坑の切羽位置 TD120m における切羽観察結果を用いて解析を実施したところ、切羽直上から前方アーチ終端までの約 10m の範囲で検出されたものである。前述した**図-4.17**が計算結果の安定シートである。ブロックは高さ 10.5m、重量 3,678kN であり、抜落ちモードは落下型である。特に高さ 10.5m は空洞幅 25m の約 1/2 に相当し、キーブロックが落下した場合、重大な災害が発生するだけでなく、アーチ部周辺の応力経路が遮断されることによって空洞の安定性が大きく損なわれることになる。

キーブロックは中央導坑と切拡げ部にわたって発生しており、掘削を進める上で以下のような追加補強対策および掘削作業を実施することとした。

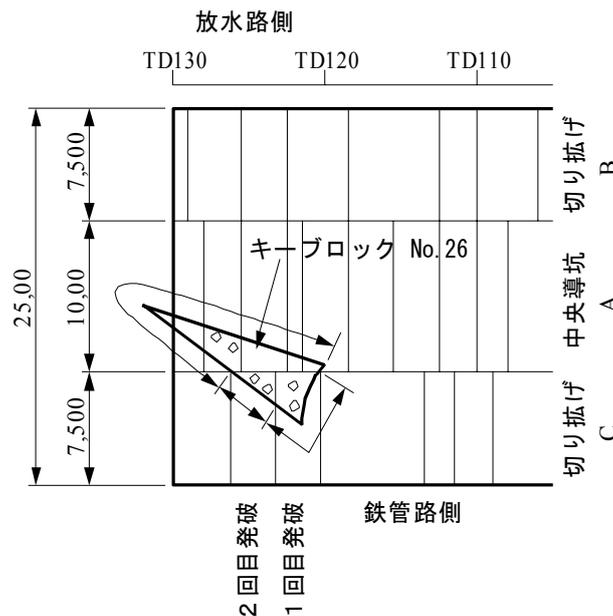


図-4.19 No. 26 のキーブロック

a) 必要導入力 の 算定

1 層目の吹付けコンクリートを施工し、2 時間強度として 440kPa を期待する。せん断抵抗力 R は、以下の式で算定される。

$$R = 440 \text{ (kPa)} \times 8 \text{ (cm)} \times 31 \text{ (m)} = 1,091 \text{ (kN)}$$

この場合、キープロックのすべり力はキープロック重量 3,678kN に相当し、安全率を算定すると $F_s=0.3$ となり、無支保では破壊する危険のあるブロックである。吹付けに対して必要な安全率は 3.0 であるから、不足する抵抗力 ΔR は以下の式で算定され、これは追加補強するロックボルトもしくは P S アンカーの負担分に相当する。

$$\Delta R = W - R = 3,678 \text{ (kN)} - 1,091 \text{ (kN)} / 3 = 3,314 \text{ (kN)}$$

b) 補強対策工の数量算定

不足する抵抗力をロックボルトで補強する場合を考えると、表-4.6 に示した判定基準に従い、(A) 岩盤と注入材との極限引抜力、(B) ロックボルトと注入材との許容付着力、(C) ロックボルト耐力のそれぞれから算定されるロックボルトの必要本数で最大となるのは (C) であり、ロックボルト必要本数 (RB) を算定すると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} RB &= 3,314 \text{ (kN)} / \min(0.6T_{su}, 0.75T_{sy}) \\ &= 3,314 \text{ (kN)} / \min\{0.6 \cdot 240 \text{ (kN)}, 0.75 \cdot 169 \text{ (kN)}\} \\ &= 26.1 \text{ 本} \end{aligned}$$

同様に不足する抵抗力を P C アンカーで補強する場合、(A) 岩盤と注入材との極限引抜力、(B) P C ストランドと注入材との許容付着力、(C) P C ストランドの耐力のそれぞれから算定される P S アンカーの必要本数で最大となるのは (C) であり、P S アンカーの必要本数を算定すると、以下のようになる。

$$\begin{aligned} PS &= 3,314 \text{ (kN)} / \min(0.6PS_u, 0.75PS_y) \\ &= 3,314 \text{ (kN)} / \min\{0.6 \cdot 967 \text{ (kN)}, 0.75 \cdot 823 \text{ (kN)}\} \\ &= 5.4 \text{ 本} \end{aligned}$$

以上の計算結果より、1次吹付けコンクリートに加え、ロックボルトであれば27本、P Sアンカーであれば6本の追加補強が必要となる。

ここでは、ロックボルトでは本数が多くなること、キープロックの高さが10.5mでありロックボルト長さL=5mでは定着長が不足すること等の理由により、追加補強としてP Sアンカーを採用することとした。このように、キープロックを構成する不連続面が80N、85S、60Nのように高傾斜である場合、キープロック高さが高くなる可能性が生じ、定着部をキープロックの外部に設定するために十分な長さを有するP Sアンカーを打設する必要がある。

c) 補強対策工の施工

前述の通り、このキープロックは中央導坑と鉄管側切掘り部にわたって発生しているため、中央導坑を掘削しただけでは落下しない。よって以下に示すように、まず中央導坑をTD130mまで到達させ、順次追加補強を実施することとした。すなわち、中央導坑をアーチ部終端まで到達させ、長期強度を期待するために1層の吹付けコンクリートを施工し、ロックボルトを初期支保設計の $2.25\text{m}^2/\text{本}$ で打設した。これは、キープロックの周長31mのうち約65%に相当する20mが中央導坑部に発生するため、切掘り掘削を実施する間に吹付けコンクリートの長期強度を発現させる効果は大きいと判断したためである。続いて放水路側B切羽を切掘り、初期支保設計のP Sアンカーを打設すると同時に、b)で計算された追加補強P Sアンカー6本のうち中央導坑部の2本を打設した。B切羽の掘削終了後、鉄管路側C切羽の切掘りを実施した。この際、キープロックの発生位置直前までは通常通りの進行速度とし、キープロックの箇所は順次1次吹付けコンクリートとロックボルトおよびP Sアンカーを打設するために、2分割にして掘削を行なった。中央導坑の最終吹付けからの経過時間は約20日であることから、吹付けコンクリートのせん断強度が設計強度の約80%発現していると仮定すると、既打設の2本のP Sアンカー導入力を考慮して、残りの必要導入力は約1,500kNとなる。鉄管路側切羽の1回目の発破において周長の残り約6mが出現し、2時間強度を有すると仮定した1次吹付けコンクリートとP Sアンカー2本を施工した時点で、この区間における追加導入力は約1,400kNとなり、キープロック全体に対する必要導入力をほぼ満足する結果となった。これにより、2回目の掘削作業は十分に安全な状態で実施することが可能となり、算定された必要P Sアンカーの残り2本を打設することによってキープロックに対する追加補強を完成した。

(2) 本体掘削時のキープロック対策

盤下げ掘削時に検知されたキープロックを図-4.20に示す。側壁部で検知されたキープロックは計50個である。破壊のモード別に見ると、平面すべり型が20個、クサビすべり型が30個であり、いずれも初期支保設計で安定した状態となっているため、追加補強は実施しなかった。

盤下げ掘削時のキープロック解析の一例として表-4.8に5リフトの解析で検知されたキープロック計8個の安定計算結果を示す。不連続面データを入力する際、5リフトにおいて観察された不連続面のうち観察面の上下の境界まで達しているものについては、鉛直上方向には2リフトの上端まで、鉛直下方向には8リフト下端まで延長して解析した。また、安定計算では、4リフト以上では不連続面のすべり抵抗に加えブロック境界面の吹付コンクリートのせん断抵抗を考慮している。

同表で、放水路側側壁で検知されたブロック No.6 は5リフト以深に出現することが予測され5リフトにおける吹付コンクリートのせん断抵抗では安全率が2.6となり所要安全率3.0を下回るが、その後の盤下げ掘削に伴う吹付コンクリートのせん断抵抗で必要安全率が確保できるため追加補強は実施しなかった。

盤下げ掘削時に側壁部で検出されたキープロックに対して追加補強を実施する必要がなかった原因として、第1に側壁部に出現するキープロックについては落下型が物理的に存在せず、すべてがすべり型の破壊モードとなるため、すべり抵抗を期待できることがあげられる。第2に、盤下げ掘削においては、各リフト毎に支保を実施するため前リフトまでの吹付コンクリートによるせん断抵抗が期待できることが主な要因になったと考えられる。

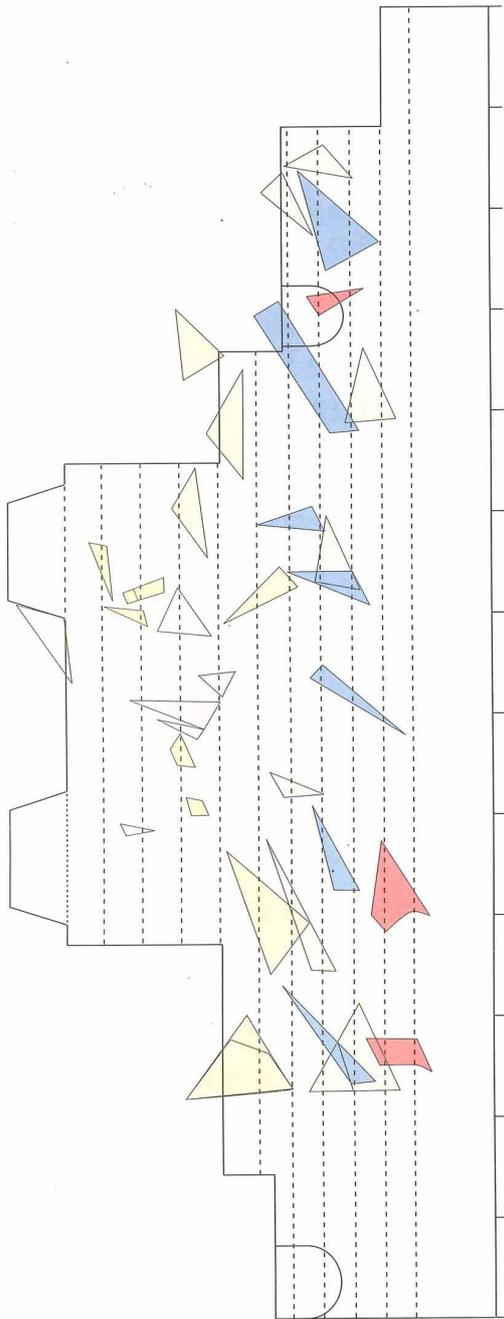
表-4.8 側壁部におけるキープロック安定解析結果（5リフト切羽観察時）

位置	ブロック番号	不連続面抵抗					5リフトまで吹付					全体吹き付け	
		安全率	判定	必要導入力 (トン)	ロックボルト (本)	PSアンカー (本)	安全率	判定	必要導入力 (トン)	ロックボルト (本)	PSアンカー (本)	安全率	判定
鉄管	9	0.6	×	6.4	1	1	70.8	○					
路側	19	0.4	×	50.0	4	1	14.3	○					
	22	1.6	×	449.2	35	8	28.9	○					
放	13	0.1	×	60.8	5	2	31.2	○					
水	6	0.4	×	405.3	32	7	2.6	×	64.2	5	2	5.8	○
路	5	0.6	×	12.8	1	1	10.1	○					
側	4	0.2	×	213.2	17	4	9.0	○					
	23	0.1	×	11.2	1	1	131.6	○					

側壁部検知キーブロック 放水路側

放水路側	
1・2リフト	3
3リフト	7
4リフト	8
5リフト	4
6リフト	4
7リフト	3
8リフト	2
9リフト	6
10リフト	1
計	41

放水路側



鉄管路側

側壁部検知キーブロック 鉄管路側

鉄管路側	
1・2リフト	8
3リフト	9
4リフト	10
5リフト	4
6リフト	7
7リフト	4
8リフト	1
9リフト	9
10リフト	2
計	51

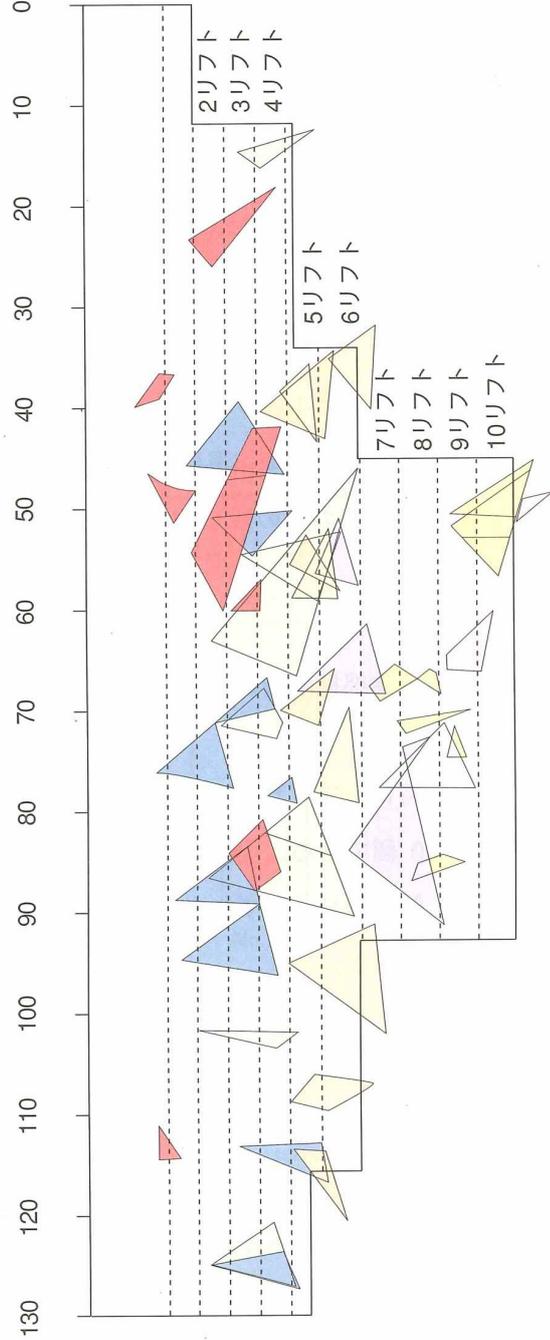


図-4.20 側壁部におけるキーブロック発生位置図

(3) 岩盤挙動にもとづく不連続面物性値評価の一例

キープロックの安定計算に用いた物性値は、前述した通り事前に実施した不連続面試験結果から得られたものである。不連続面の物性値は、キープロック解析の結果を左右する重要な要因であるにもかかわらず、事前に決定する事が困難な物性値でもある。そこで以下に岩盤挙動にもとづく不連続面物性値の評価を試みた例を示す。これは、空洞掘削中において変状のあった岩盤挙動のうち、キープロックによるすべりが原因と考えられるものを対象に安定計算を行い、補強対策工を実施した結果をもとにして、不連続面の物性値を逆算し、不連続面物性として設定した値の妥当性を検討したものである。

図-4.21に示したのは主要変圧器室側妻壁の地質図である。また、同壁面にアーチ掘削後設置された地中変位計の計測結果の経時変化を図-4.22に示す。1リフト掘削時には壁面および深度1mの地点で最大4mm程度の変位が生じており、その後も増加傾向にあった。2リフト掘削時には変位計設置点より掘削地点が遠くなっているにもかかわらず、1リフト掘削時よりもさらに大きな変位増分が5mm程度発生しており、異常な変形挙動であると認識された。また、地質観察では1リフトでは観察されなかった流れ盤となる不連続面が現れた。そこで2リフト掘削直後にこの不連続面を含むブロックがすべり始めたものとし、地質観察結果と周辺のPSアンカー軸力計の計測結果から図-4.21の太線で示した4つの不連続面から形成されるキープブロックを仮定して、不連続面物性を逆算した。

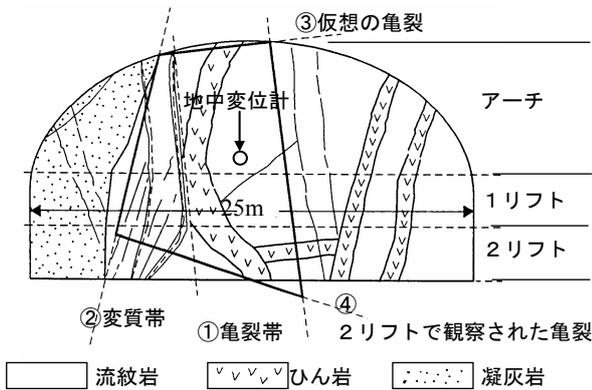


図-4.21 主要変圧器室妻壁の地質図

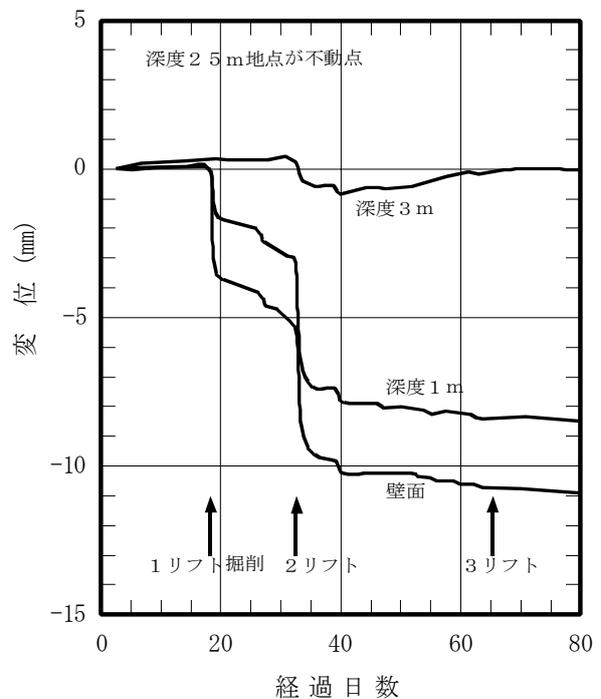


図-4.22 地中変位の経時変化

図-4.23にこのキーブロックの形状を示す。その際計測から得られたPS軸力がキーブロックに導入力として作用しているものとし、そのときの安全率を1とした。不連続面の粘着力と内部摩擦角は一義的に求めることはできないが、一方の値を仮定した場合の物性値を図-4.24に示す。粘着力の値は小さく44kPa以下である。粘着力を0とすると内部摩擦角は47.8°となり、事前を実施した傾斜試験の傾斜角にほぼ等しい値となる。粘着力を20kPaとすると内部摩擦角は31.2°となり今回設定した値にほぼ等しくなる。したがって、粘着力は設計値よりも若干大きく20kPa程度であるとすれば、内部摩擦角の設計値32.4°は岩盤の挙動に合致している。

また、このキーブロックに対しては追加補強工として安全率を3にするために必要なPSアンカーの本数を求めて、2リフトのアンカー施工時に設計パターンに追加して施工した。図-4.25にPSアンカーの施工位置を示す。その結果、図-4.22に示すように3リフト掘削後は、地中変位の増加はほとんど認められず、対策工が有効であったと判断された。

ここで実施した不連続面物性値の評価は、数少ない一例に過ぎないが、今後キーブロック解析を有効な情報化施工の手法とするために必要なアプローチであり、データの蓄積を進めることにより、合理的な物性値や安全率の設定が可能になると考えている。

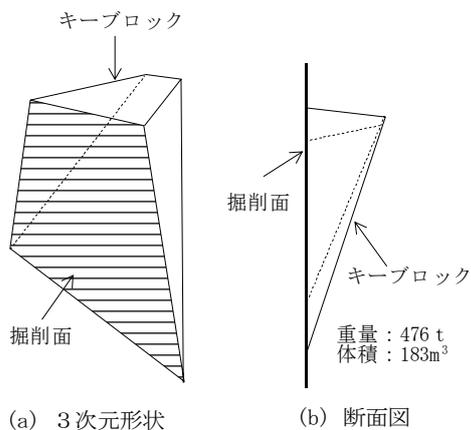


図-4.23 仮定したキーブロック形状

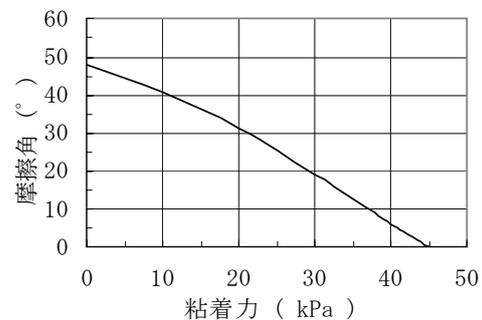


図-4.24 不連続面物性の逆算結果

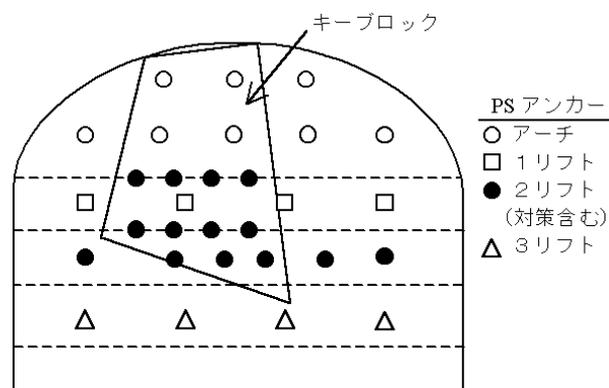


図-4.25 PSアンカーの施工実績

(4) キーブロックを形成する不連続面の方向性の評価

本節では、キーブロックを形成する不連続面方向の分布特徴について、施工中の地質観察で得られた不連続面の方向性分布や調査横坑内で実施した事前調査の結果と比較して検討する。図-4.26(a)は、事前の地質調査結果の内、本体空洞の大部分を占める岩種である流紋岩中の調査坑で得られた不連続面分布のステレオネット投影図を示したものである。不連続面は、傾斜が 70° 以上の高角度のものが多く、走向はほぼ南北性と東西性の2方向が存在している。図-4.26(b)は、空洞施工中の切羽観察で得られた全不連続面分布のステレオネット投影図を示したものである。事前調査の結果とほぼ同様に高角度の傾斜を持つ不連続面が多いものの、傾斜角が 30° 程度と比較的低角度で北東落ちの不連続面が新たに出現しており、しかも卓越性が非常に高くなっている。施工中の切羽観察では、掘削面を横切るような少なくとも数 m 以上の長さを持つ不連続面を中心に観察しており、図-4.26(b)は比較的連続性の高い不連続面の分布であると言える。一方、調査坑では、1m以下の小規模な不連続面まで詳細に観察しており、連続性の低い不連続面まで含めた分布となっている。

図-4.26(c)には、アーチ部で検出されたキーブロックの中で、追加補強を必要としたキーブロックを形成している不連続面分布のステレオネット投影図を示したものである。この図における不連続面の分布状況は、事前調査および施工時の全不連続面分布を合わせた分布に傾向が似ている。すなわち、走向が南北方向で高角度の傾斜を持つ不連続面群と北～北東落ちで低角度～高角度の不連続面群がキーブロックを形成しやすいことがわかる。したがって、4.1.6節の図-4.18に示したように、アーチ部展開図でのキーブロック形状が、アーチを横断する方向(東西方向)の1面と空洞軸に近い方向(南北方向)の2面からなる3角形となっているものが多くなっている。このことから、事前調査で不連続面分布を把握しておけば、ある程度空洞に出現するキーブロックの形状を予測できる可能性があるといえる。

また、図-4.26(d)には、盤下げ掘削時に検出されたキーブロックを形成していた不連続面の方向の分布を放水路側と鉄管路側に分けて示したものである。放水路側では、全不連続面の分布である。図-4.26(b)と非常によく似た分布をしており、北東落ちの低角度の方向に集中した分布となっている。これは、この方向が放水路側では流れ盤となる方向と一致するためであり、この面をすべり面として他の方向の不連続面との組み合わせから成るキーブロックが多いことを示している。一方、鉄管路側の分布はこれと異なり、西落ちで高角度の方向が最も集中度が高く、次が北東落ちの低角度の方向となっている。これは、鉄管路側では西落ちの方向が流れ盤となる方向であり、この面をすべり面として分布集中度の高い北東落ちの低角度を含む組み合わせのキーブロックが出現しやすいことを示している。

以上のことから、事前調査により不連続面分布の特性を把握して、空洞軸方向や掘削面の

向きを考慮すれば、施工時に出現するキーブロックの形状をある程度予測できるとともに、危険度の高い不連続面方向を予測することができると考えられる。

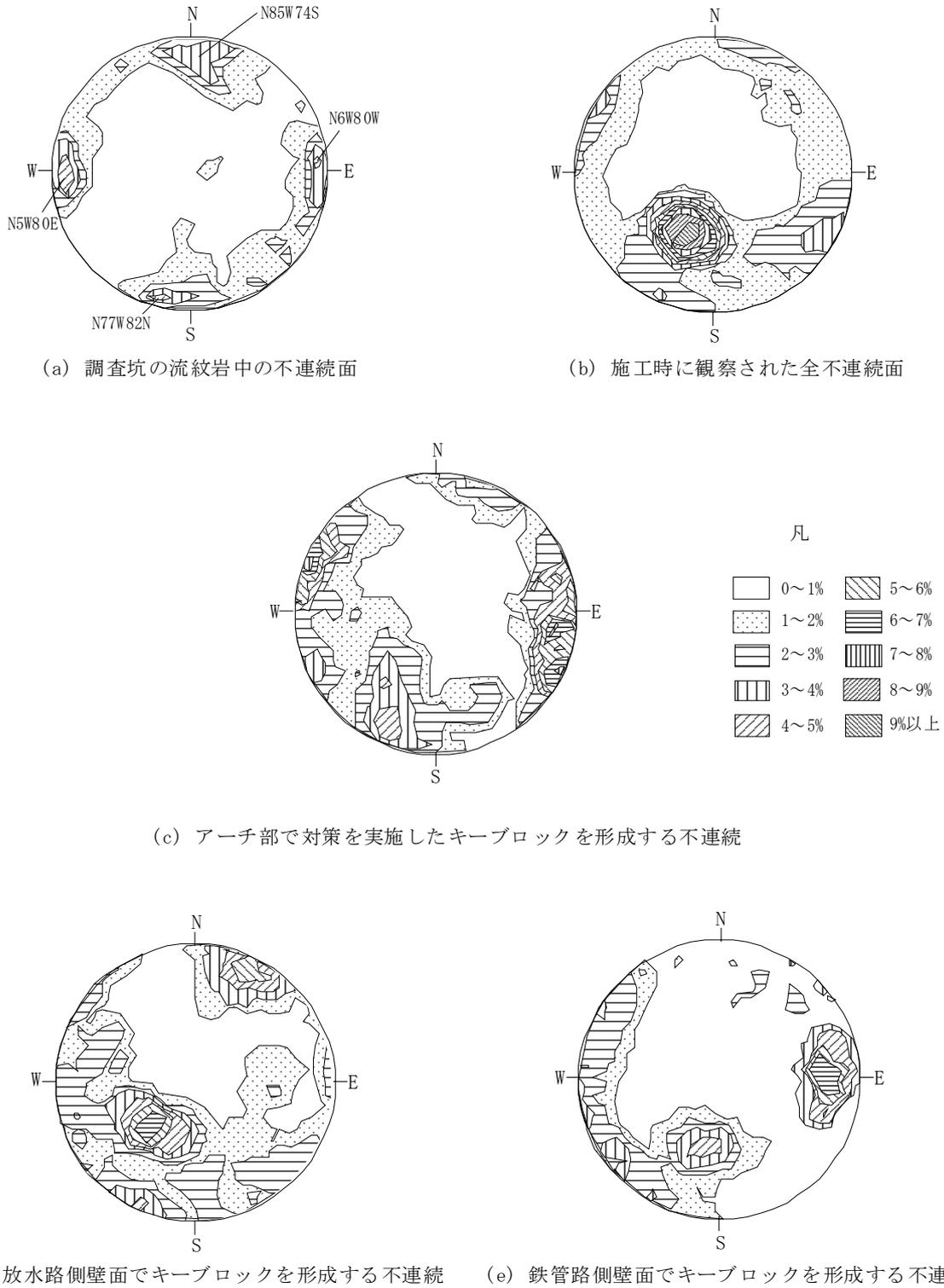


図-4.26 不連続面群のステレオネット下半球投影図

4.2 小丸川地下発電所への適用

4.2.1 地下発電所の概要

小丸川発電所は、九州電力㈱により建設され、宮崎県の中央部を流れる小丸川において、その支流の最上部に上ダム（ロックフィルダム、高さ 65.5m）を築造して上部調整池とし、小丸川本流に下部ダム（重力式コンクリートダム、高さ 47.5m）を築造して下部調整池とし、この間を約 2.8km の水路で連絡し、有効落差 646m を得て、最大出力 120 万 kW の発電を行うものである^{12)~14)}。

小丸川発電所本体地下空洞は掘削幅 24.0m、掘削高さ 48.1m、最大長さ 188.0m、総掘削量約 16 万 m³、最大掘削断面積約 1,000m² に及ぶ弾頭型大規模地下空洞である。図-4.27 に発電所縦断面図を、図-4.28 に発電所断面図を示す。本体空洞掘削工事は 2001 年（平成 13）年 4 月に着工し、2003 年（平成 15 年）2 月に掘削工事を完了した。

掘削工法としては空洞アーチ部を中央導坑先進側壁拡幅工法で掘削完了した後、1 リフト 3m の盤下げ掘削を合計 13 回繰り返して掘削完了した。この地下空洞の支保としては吹付けコンクリート、ロックボルト、ロックアンカーを主な支保部材とし、支保設計の考え方として空洞近傍岩盤における試験結果をもとに周辺岩盤全体を均質体として評価し、そこでのゆるみ領域を補強対象領域として岩盤の安定に必要な支保数を計上している。したがって、局所的な地質不良部や不連続面によるキープロックに対しては個別に補強対策を講じ、空洞の安定を図るとともに全体としての支保量が必要最小限となるように努めた。この設計思想に対して、実施工において運用を図るため地質不良部や岩盤の不連続面に起因した岩盤挙動に対して、掘削中の地質観察結果と計測管理結果を迅速かつ適切に施工に反映させるため、企業者と請負会社が掘削情報をリアルタイムで共有する情報化施工を実施した。

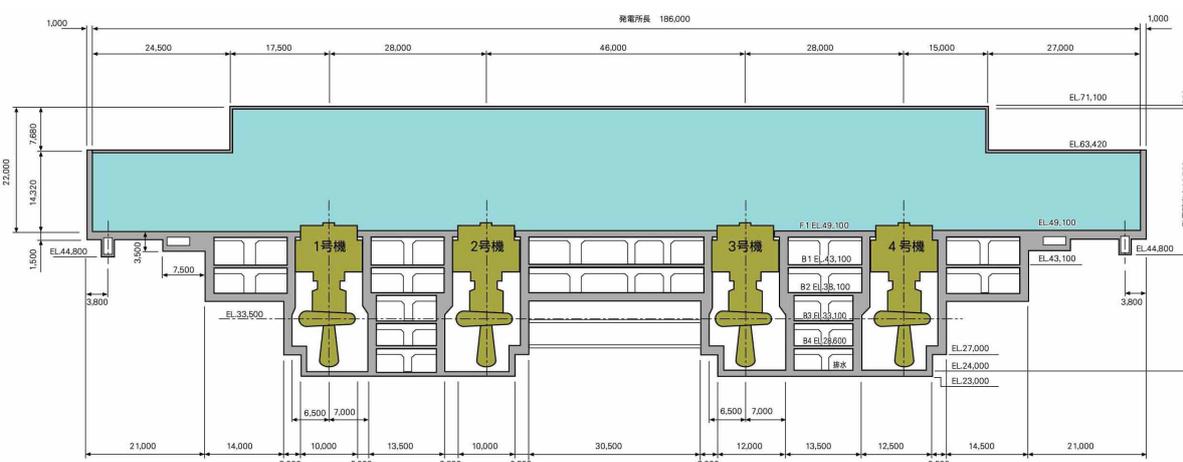


図-4.27 発電所縦断面図

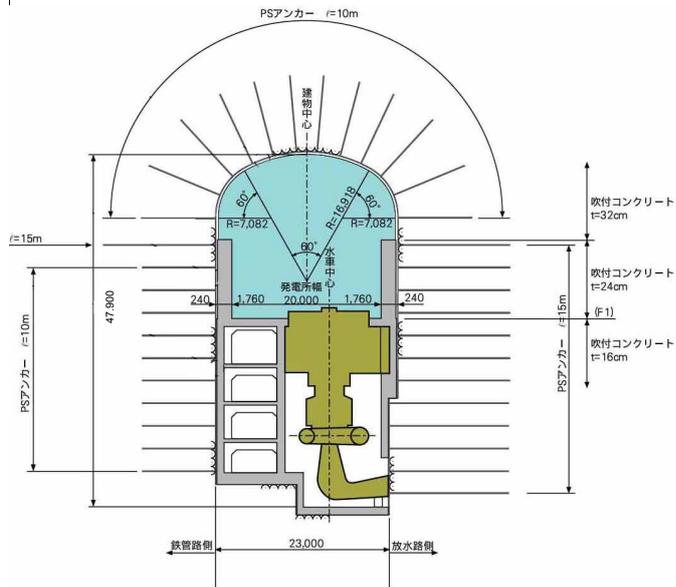


図-4.28 発電所横断面図



写真-4.2 発電所掘削完了時の状況

4.2.2 地質

大規模地下空洞付近の地質は、図-4.29に示すように新生代古第三紀始新世～漸新世の四万十累層群の日向層群（砂岩，頁岩）と、これにルート中央部ではほぼ直交する形で貫入している木城花崗閃緑岩の幅約 300m の岩脈上岩体を基盤とする。大規模地下空洞はこの花崗閃緑岩の岩脈中に位置しており、土被りは約 400m である。

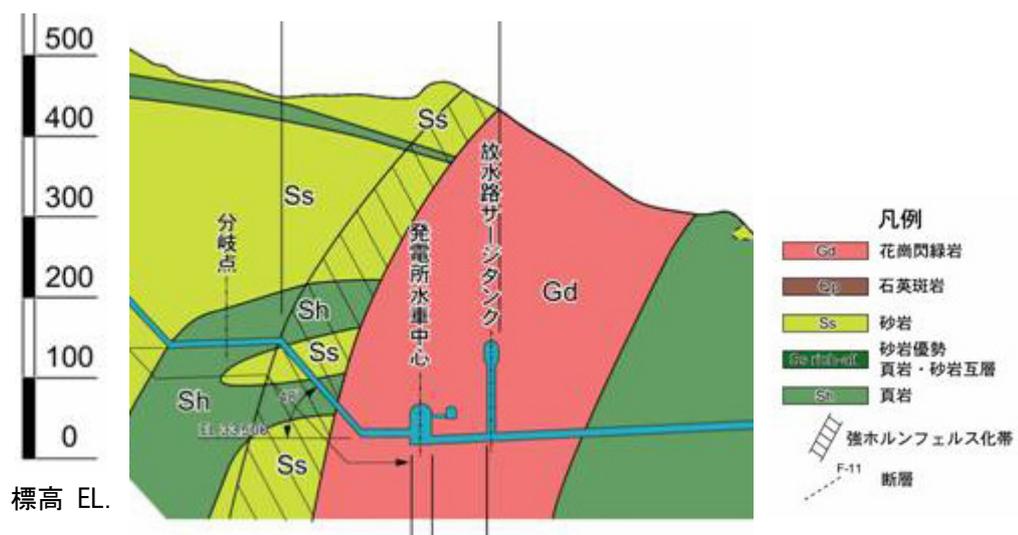


図-4.29 発電所周辺断面図

図-4.30に地下空洞の地質展開図を示す。花崗閃緑岩は岩級としては概ねC_H級であり、部分的にC_M級が分布している。C_H級岩盤の基質は一軸圧縮強度170MPa程度、小断層又は節理間隔が5cm～15cm(細区分AⅢa)あるいは15cm～50cm(細区分AⅡa)程度、坑壁弾性波速度は5.0km/s～5.4km/sであり、掘削中の地質観察結果からも概ね想定どおりの地質性状であることを確認した。しかし、C_H級岩盤の分布に関してはAⅡa岩盤が主体となり、その中にAⅢa岩盤が分布するとの当初予想に反して、掘削中の観察結果からは本体空洞全体が概ねAⅢa岩盤を主体とし、その中にAⅡa岩盤が分布する結果となった。

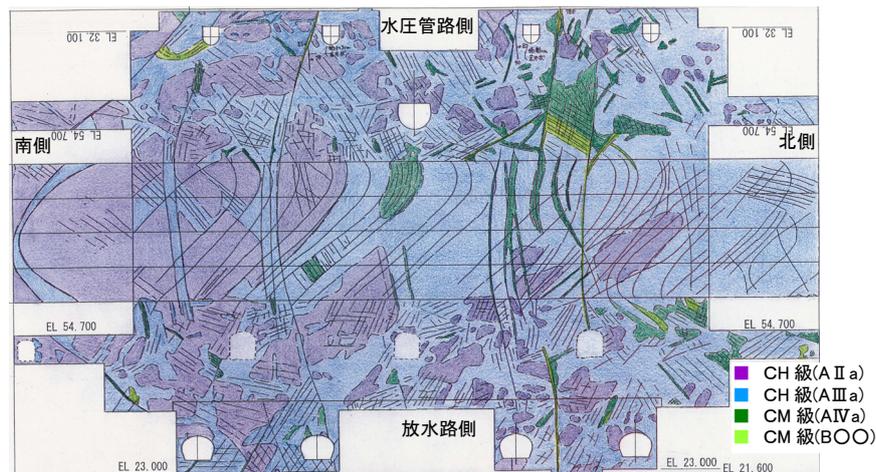


図-4.30 地下空洞地質展開図¹³⁾

4.2.3 支保設計と情報化施工

大規模地下空洞の初期支保設計は、岩盤試験、初期地圧試験等の試験結果を基に設定した解析用物性値を用いて設計している。つまり、空洞全体を平均化した代表的な岩盤と考えていることから、局所的な地質不良部に対するリスク管理が必要となる。また、空洞全体に分布する不連続面の位置や挙動を安全側で想定した設計を行うと、初期設計支保が増えることとなり、結果的に不経済となる。これらのことから、当地点では支保量を初期設計支保と情報化施工に基づく追加支保を分けて考え、局所的に地質の悪い箇所や不連続面によるキーブロックに対しては個別に補強対策を講じることで、必要最小限とすることを目指した。

支保工としては、吹付けコンクリート ($t=16\sim32\text{cm}$)、ロックボルト ($L=5\text{m}$)、P Sアンカー ($L=10\sim20\text{m}$ 、アンカー耐力 110t) を主な部材としているが、このうち主要な支保部材になるP Sアンカーは、岩盤を平均化した均質体としてモデル化し、二次元有限要素法を用いた逐次掘削解析から推定されるゆるみ領域を補強対象領域としている。図-4.28に地下空洞における初期支保設計図を示す。

情報化施工としては、空洞全体の岩盤挙動を把握するため、空洞長軸方向にほぼ均等に計測断面を設け、断面毎に地中変位計、P Sアンカー荷重計、ロックボルト軸力計等の埋設計

器を設置し、岩盤挙動を監視することとした。計測断面は、空洞の変状を確認するとともに解析による検証を行うための主計測断面と空洞全体の変状を均等に把握するための従計測断面を設けた。主計測断面は、掘削断面積が大きく、変形が最も大きくなると予想される A、B 断面及び断面形状の異なる C 断面とし、その他の断面は (D, E, F, G, H) は従計測断面とした (図-4.31 参照)。また、図-4.32 に主計測断面 A における埋設計器配置図を示す。

岩盤挙動の計測システムとしては、①計測および計測結果の図化処理を自動化し、②企業者、施工者で計測結果を共有し、変状発生時には迅速かつ適切な分析・評価を行うことを目的に新たに計測管理システムを開発、導入した。図-4.33 に計測管理システム構成図を示す。

岩盤挙動は原則として、傾向管理と絶対値管理を併用している。傾向値管理は、日々の計測値 (変位量) の変位速度に注目して、変位が収束するまで段階的に対策を実施するものである。絶対値管理は、管理基準値により管理レベルを設け、管理レベルごとの管理方針に従うものである。また、これらの管理は対象となる期間に応じて、日々の掘削と並行した日常管理と、掘削ステップ毎のステップ管理に分けて設定している。

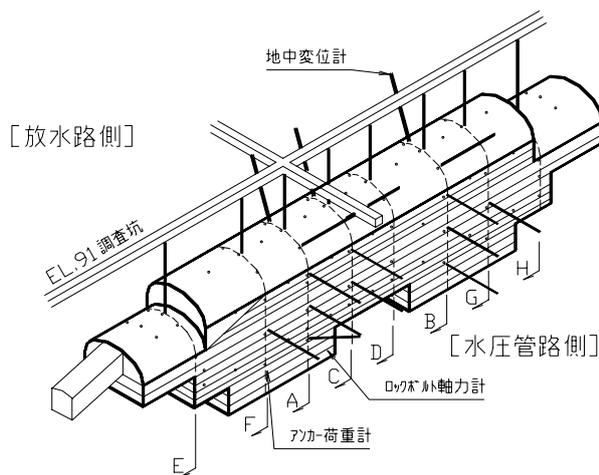


図-4.31 計測断面位置図

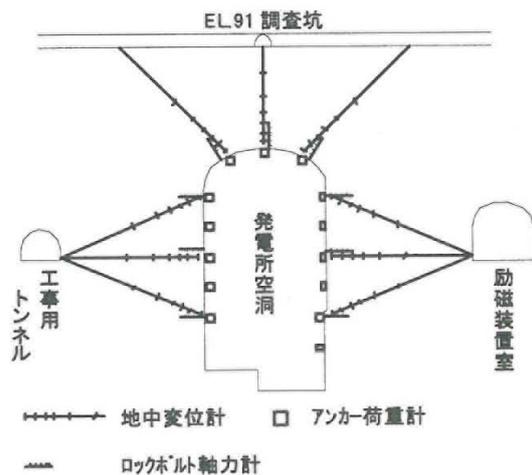


図-4.32 埋設計器配置図 (A 断面)

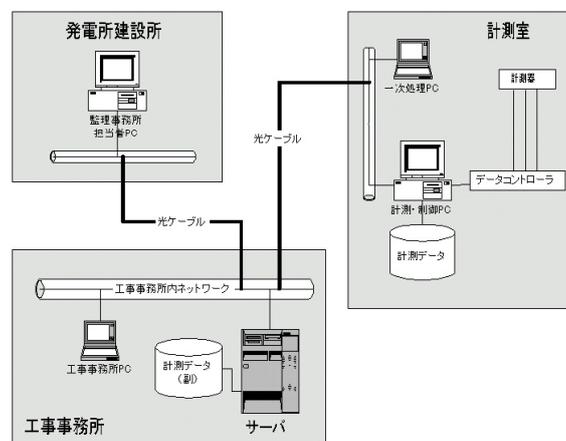


図-4.33 計測管理システム構成図

4.2.4 キーブロック解析実施結果

キーブロック解析のシステム運用は基本的には4.1.5節と同様である。ただし、小丸川地点の地質特性を考慮して、以下の点で改良を加えて運用を実施した。

4.2.2節で述べたように、発電所空洞地点の地質は花崗閃緑岩であり、岩級としては概ねC_H級であったが、不連続面密度は大きく、その間隔はおおむね5cm～15cm(細区分 AⅢa)を主体とし、15cm～50cm(細区分 AⅡa)程度が分布する状況であった。したがって、切羽面で多数観察される中小規模の不連続面を抽出すると、切羽観察に多大な時間を要するとともに、結果として検出されるキーブロックも比較的小さいものとなり、より大きく危険なブロックを見落とす可能性が大きい。これは、現状の決定論的手法におけるキーブロック解析プログラムでは、掘削面の不連続面トレースの最小閉ループに対してのみ判定を行い、閉ループが結合して形成されるブロックに対しては判定できないからである。

そこで、切羽観察シートに記載された主要な不連続面をキーブロック解析の入力不連続面とした。主要な不連続面とは、切羽面を横切る程度の規模を持つ断層、節理面等である。また、入力した不連続面は、観察地点から長さ30mの連続性を持つものとした。これは、発電所周辺の調査坑での事前地質観察結果より、断層の連続性が約30m程度と評価されたことによるものである。

結果として、アーチ部では図-4.34に示すように、7個のキーブロックに対して追加補強を実施した。追加補強は、不連続面耐力、吹付けコンクリート耐力および設計パターンのP Sアンカー導入力を考慮しても必要安全率を満たすために不足する導入力を追加のP Sアンカーにより補強する考え方とした。キーブロック補強として追加したP Sアンカーの総本数は55本であり、図-4.34の主A断面のアーチ天端付近に存在するブロックが最も補強数量の多く17本の追加アンカーを実施した。施工は中央導坑掘削後に3本、側壁拡幅後に14本と段階をおって実施した。このブロックには、図-4.35に示すように調査坑より先行設置したアーチ天端方向の地中変位計A-1が設置されていた。中央導坑掘削時に10mm程度、拡幅後に28mm程度の天端沈下量が計測されているが、追加補強後から本体盤下げ終了までの変位増分は小さく5mm程度であった。

補強終了後は、アーチ部に設置された他の計器も含めた計測管理によりキーブロックの挙動を監視したが、すべてのキーブロックは安定しており補強効果を確認することができた。

なお、図-4.34には計測による追加補強、盤下げ移行時のステップ管理時の追加補強についても示してあるが、これらの詳細は文献13)を参照されたい。

盤下げ時にも同様に不連続面観察を行い、キーブロック解析を実施した。観察された不連続面は現掘削リフト以下では連続性が不明であるが、安全側の判断により、現在の掘削リフ

トより空洞底盤面まで連続しているものとして解析し、将来予測に重点を置いた。また、測壁面では各リフトの支保が終了してから次リフトの掘削となるため、キープブロックに対しては順次上部リフトから補強がなされ、アーチ部より安定性が高いと考えられるため、キープブロック内の計器の計測結果や、不連続面の連続性を確認しながら、監視する方針とした。

その結果、側壁部では追加補強を必要とするキープブロックは発生しなかった。

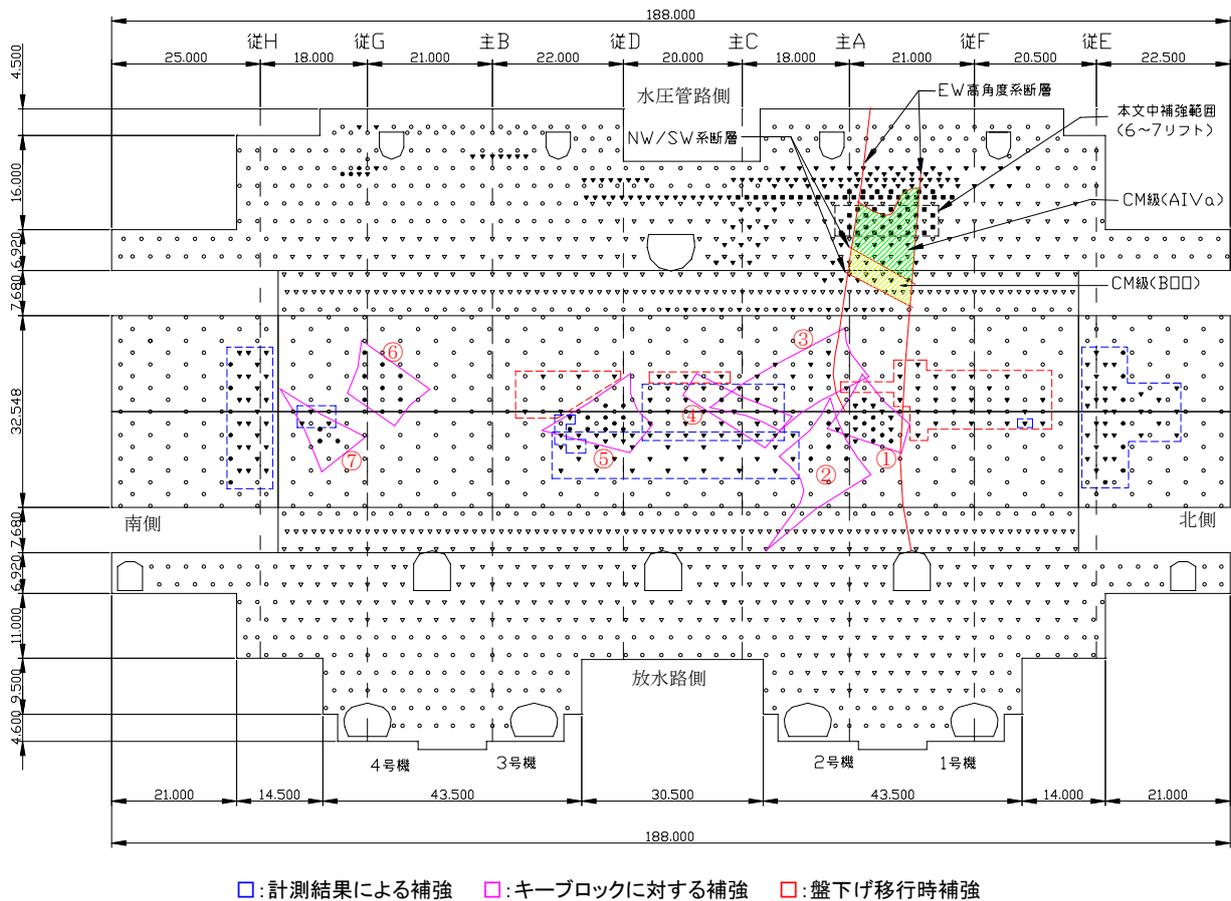


図-4.34 発電所空洞 PS アンカー施工実績図¹³⁾

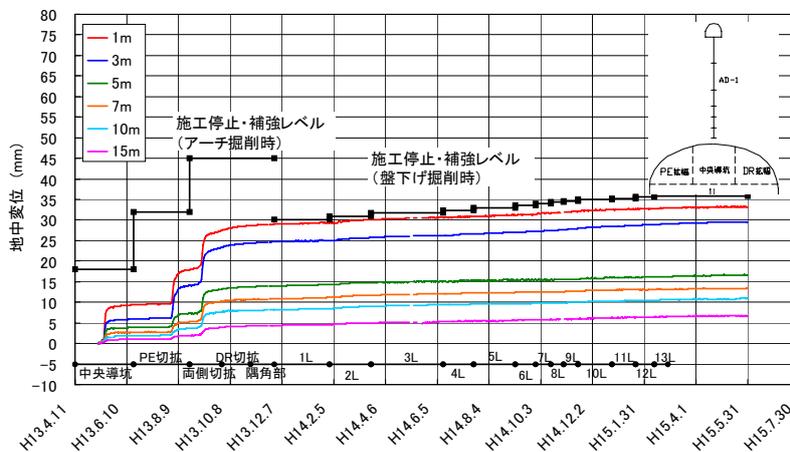


図-4.35 地中変位計 A-1 の計測結果¹³⁾

4.3 4章のまとめ

本章の研究の目的は大規模地下空洞の掘削時においてキープロック解析を運用するシステムを確立することである。その結果、補強が必要な部分について重点的に補強工を実施し、それ以外の部分については軽い支保設計とし、全体としての支保の数量を低減し経済的かつ合理的な地下空洞の設計・施工を実現することが可能になる。研究の成果は以下に示す通りである。

- (1) キープロック解析にもとづく情報化施工を実施した結果、奥多々良木増設発電所では、アーチ掘削時には合計 28 個のキープロックに対して追加補強を実施した。追加補強の内容は、キープロックの大きさ、不足する導入力大きさを考慮して、追加ロックボルト、追加吹付けコンクリート、追加 PS アンカーを適宜施工した。その結果、発見されたキープロックに対して、適切な補強工の設計・施工を実施することによりアーチ天端の変位はほとんど発生せず、アーチ部での変状も観測されず、本手法の有効性を確認した。また、小丸川発電所アーチ掘削時には合計 7 個のキープロックに対して追加補強を実施し、計測および変状観察により同様に追加補強の効果を確認した。これらの事例により、大規模地下空洞掘削工事におけるキープロック解析の運用方法を確立することができた。
- (2) いずれの地下発電所においても盤下げ掘削時には追加補強を必要とするキープロックは発生しなかった。これは、盤下げ掘削時には、出現するキープロックに対して前リフトまでの支保工の補強効果が期待できること、および破壊モードがすべり型であり、自重による不連続面耐力が期待できることが、その要因となっていると考えられる。
- (3) 変状のあった岩盤挙動のうち、キープロックによるすべりが原因と考えられる事例につき、不連続面の強度定数を逆算で求め、不連続面物性として事前に設定した値がほぼ妥当な範囲になることを示した。ここで実施した不連続面物性値の評価は、数少ない一例に過ぎないが、今後キープロック解析を有効な情報化施工の手法とするために必要なアプローチであり、データの蓄積を進めることにより、合理的な物性値や安全率の設定が可能になると考えている。

参考文献

- 1) 手塚昌信, 大西有三, 袋井肇, 瀬岡正彦: 大規模地下空洞掘削における情報化施工の適用例, 第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.43-48, 1997
- 2) 連載講座: 大規模地下空洞(6)事例 関西電力奥多々良木発電所増設, トンネルと地下, 第 29 卷 10 号, pp.71-84, 1998
- 3) 手塚昌信, 大西有三, 田中誠, 西村毅: 大規模地下空洞掘削時におけるキーブロック解析, 土木学会論文集 VI 卷, 609, VI-41, pp.73-85, 1998
- 4) 小林昭一, 西村直志, 吉川太, 打田靖夫: 円錐孔底ひずみゲージを用いた初期応力測定, 土木学会第 22 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp279-284, 1990
- 5) 金川忠, 山本清彦, 田中達吉, 横山幸也: AE 法と変形率変化法を併用した室内試験による地圧測定, 第 7 回岩の力学シンポジウム講演論文集, pp193-198, 1987
- 6) 原田稔, 片山武, 矢田篤: 大河内水力発電所地下発電所空洞の設計と施工, 電力士木, No.230, pp.46-57, 1991
- 7) 本島睦, 日比野敏, 林正夫, 北原義浩: 大規模な地下構造物掘削時の安定解析プログラムの開発とその適用例, 電力中央研究所報告, No.376011, 1977
- 8) 西垣好彦, 城戸渉: ジョイントを含む岩への多段三軸試験の適用, 土と基礎, Vol.31, No.7, 1983
- 9) Barton, N. and Choubey, V. : The Share Strength of Rock Joints in Theory and Practice, *Rock Mechanics*, Vol.10/1-2, pp1-54, 1977
- 10) Londe, P., Vigier, G. and Vormeringer, R.: The Stability of Rock Slopes - a Three Dimensional Study, *J. Soil Mech. and Foundation Div.*, ASCE, Vol.95, No.SM1, pp235-262, 1969
- 11) Londe, P., Vigier, G. and Vormeringer, R.: Stability of Slopes - Graphical Method, *J. Soil Mech. and Foundation Div.*, ASCE, Vol.96, No.SM4, pp1411-1434, 1970
- 12) 鶴田正治, 河原田寿紀, 日高英介: 小丸川地下発電所の設計解析と情報化施工計画. 電力士木. No.300, pp.114-118, 2002
- 13) 柏木雄二, 河原田寿紀, 日高英介: 小丸川発電所地下空洞の情報化施工, 電力士木, No.307, pp.53-57, 2003
- 14) 河邊信之, 園田利美津, 江口聡一郎, 西村毅: 大規模地下空洞における情報化施工の適用と実施工結果について, 土木学会 トンネル工学報告集, 第 15 卷, pp.175-180, 2005

第5章 キーブロック解析における課題と新しい手法の提案

5.1 キーブロック解析における課題

ここまで、キーブロック解析を行うための不連続面情報の調査・評価手法、ブロック理論の拡張、施工現場での情報化施工の一環としての運用等について述べてきた。ここでは、施工現場で運用してきた結果に基づく問題点、および今後さらにキーブロック解析を有効なものにするための課題点について述べる。

(1) 情報化施工でのキーブロック解析の位置付け

岩盤構造物においては、事前に相当の調査を実施したとしても、工事の着手以前において地山の安定性を見極めることは困難である。特に、空洞の安定性が地山に依存する割合の大きい大規模地下空洞のような場合は、施工中の周辺地山の挙動には万全の注意を払う必要がある。したがって、施工中においては、地山の挙動を観察・計測し、その結果を分析して設計施工に反映させるいわゆる情報化施工が重要な役割を担うことになる。これにより必要に応じて適切な対策を講じ、安全で経済的な施工を実現することが可能となる。

キーブロック解析は、情報化施工の中で地山の観察結果を有効に利用できる強力な手法であるといえる。したがって、キーブロック解析をローカルな追加支保を実現するためだけの独立した手法として認識するのではなく、計測結果や地質調査結果を含めて地山安定性の総合判断をすることが重要である。

例えば、地下空洞側壁におけるキーブロックは、盤下げの進行に伴い、徐々にブロックが掘削面に現れる。従って、初期の段階から追加支保を実施するのではなく、ブロック内部の既設の計測点や、新規に設ける内空変位等の測点を注意深く計測監視すれば、追加支保の要否や、実施時期を適切に判断できる可能性がある。結果的に発見されたキーブロックに追加補強を実施しないということもあり得る。これは、キーブロック解析の仮定の中で、不連続面が岩盤中で無限に広がっていることや、曲がりのない完全な平面を仮定していることなど、現実とは異なる条件で計算しているからである。ただし、アーチ部での落下型のキーブロックでは、急激な変状が生じる可能性が高いことから、より安全側の判断による追加支保を決定した方が望ましい。

一方、計測結果と地質観察により、すべり破壊が想定されるが、キーブロックが発生していない場合に、仮想の不連続面を追加することによりキーブロックを発生させて追加補強の検討を行う方法も考えられる。仮想の不連続面は、既存の観察不連続面を延長させたり、卓越方向群の中からすべり面との関係で危険なブロックを形成する方向を選ぶこと

ができる。キーブロック解析の利点の一つは、不連続面の位置と方向の組合せが決定すれば、追加補強の範囲、数量、長さなどの補強工の算定結果が比較的容易に得られることであり、迅速な意思決定に寄与する可能性がある。

(2) 入力データの不確実性

キーブロック解析では、入力する不連続面の幾何学的形状が明確であることが前提となっており、不連続面は完全な平面と仮定する理想的な状態で計算を行っている。しかし、実際の単一不連続面の方向性については、ある程度の変化があるため、測定時には点としての走向／傾斜の測定にならないように注意する必要がある。なるべく平均的な方向性が得られるような点を選ぶか、同一不連続面で複数の計測を測定するよう努めるべきである。しかしながら、施工現場での切羽観察時には正確な方向性の測定が困難な場合が多い。掘削直後の切羽では、安全性の観点から切羽に密着して作業することはできない場合が多く、直接クリノメータを岩盤表面に当てることができない。通常の測定方法は、掘削進行長に相当するアーチの未吹付け部分の中には入らないようにして、少し離れた地点から、目測でクリノメータを使用することになり、方向性の測定には誤差を含む可能性が高い。このような場合、前後の切羽における不連続面の出現位置から幾何学的に方向を算出する方法も使って、補正することが望ましい。そのためには、スケッチとともにできるだけ多くの写真画像を取る等、正確な地質断面図、展開図を作成するよう努めることが重要である。

また、次の問題として、観察面における方向性は極力正確に計測する努力が払われたとしても、岩盤内部での方向性の変化については、観察することができない。そのためキーブロック解析結果にも、いくらかの不確実性が伴う。このことは、入力する不連続面の角度を少し変えるだけで、結果が大きく異なる場合もあることに関連して、重要な問題である。ブロック規模が大きく、補強数量も多くなるようなキーブロックの場合は、構成する不連続面の方向を少し変化させて計算してみるような感度解析を実施したほうがよい場合もある。どの解析結果を採用するか判断は難しく、現状では技術者の工学的判断とならざるを得ない。

(3) 事前設計への活用

第4章の研究により、施工中のキーブロック解析の運用手法を確立することができた。一方、事前設計へのキーブロック解析の適用は研究レベルのものが多く、実現場への適用は進んでいないように思える。これは、岩盤斜面および、トンネル・地下空洞の分野でも、岩盤分類や連続体力学にもとづいた設計手法が実績の裏付けの元、ほぼ確立されているか

らである。しかし、より合理的な設計やコスト削減が必要になる場合はキーブロック解析を設計段階でも有効に活用することの重要性は高まると考えられる。

例えば、卓越不連続面群がいくつか限定されれば、トンネルの最大キーブロックの形状は予測可能である。最大キーブロックに注目して支保設計をすれば、より重点的な岩盤補強が実現する可能性がある。また、大規模地下空洞では空洞周辺の調査横坑で事前調査が行われることが多く、この段階で空洞まで連続するような大規模な不連続面の評価・特定が可能であれば、あらかじめ発生するキーブロックに対する設計・準備を整えておくことができる。

確率・統計論的な手法によれば、ある程度発生するキーブロックの位置、大きさや追加導入力を予測することが可能である。ただし初期設計に活用するには、発生するブロックの統計的なばらつきを評価する手法の確立が待たれる。

(4) 不連続面の有限性の検討手法

キーブロック解析の基本的な仮定では、不連続面の岩盤内での広がりを無限なものとして仮定している。そのため、キーブロック解析を実施すると、観察面でのトレース長に比べて奥行き方向の非常に深く続くブロックが検出されることがある。観察面での不連続面の有限性からすると、このようなブロックが実際に形成されている可能性は小さい。従って、不連続面の有限性を評価できれば、より適切な解析が実施できる。

このための課題としては、不連続面の3次元形状の推定と、有限性を考慮した3次元ブロックの検出方法である。不連続面の3次元形状としては、取り扱いの容易さから円盤と仮定する場合が多い。円盤で仮定することにより、不連続面相互の交線の計算を容易にすることができ、Yu¹⁾らは3次元ブロックの同定に関する研究を実施している。

(5) 観察手法の迅速性

施工中のキーブロック解析の結果は、入力する不連続面情報の精度に大きく左右される。したがって施工時の限られた時間内により正確で詳細な切羽観察を行う方法および、掘削毎に得られる観察結果からデータの追加、修正を適切に実施できる手法が必要となる。

これを解決する有力な手段として写真測量が挙げられる。写真測量は理論的には確立された手法であるが、精度上の問題および既知点としての基準尺やターゲットを写しこむ必要があることから切羽観察では実用化されるに至っていない。しかし、最近のデジタルカメラの画素数の進歩は早く数 1000 万画素のカメラも市販されており、将来的には精度の問題は解決可能と考えられる。

また、ターゲットについてもパターンマッチングと呼ばれる、ターゲットを必要としな

い写真測量の研究・開発も進められており、適用が期待される。

(6) 調査する不連続面規模の基準

不連続面の分布特性として、小規模な不連続面ほど数多く存在し、調査に多大な時間と労力を要する。一方、小規模な不連続面から形成されるキーブロックは、相対的に小さいブロックとなり、吹付けコンクリートなどの初期の支保で十分安定が確保され、追加補強を検討する必要がない場合が多い。現場の地質特性や基本設計の支保量に応じてサンプリングする不連続面の基準や、安定解析の検討を行うキーブロックの重量等の基準を設定する必要がある。

(7) 不連続面強度特性の評価

安定解析の結果は不連続面の強度特性に左右される。強度特性の設定方法としては Barton²⁾等の手法があるが、標準的な手法として確立されておらず、今後試験方法とその評価方法についての手法の確立が待たれる。また、破砕帯・変質帯、節理を含めた観察される不連続面ごとに強度特性を推定できるようなデータベースを事前に作成しておくことが重要である。

(8) 地山応力の評価

キーブロック解析における極限平衡解析では、ブロックの作用力、不連続面の抵抗力、補強工による導入力であり、地山応力は考慮されていない。岩盤斜面のように地表面に近い場合は、地山応力は小さく無視できると考えられるが、トンネルや地下空洞で地下深部に建設される場合は地山応力を考慮すべきである。この場合、キーブロックの周辺地山は、掘削によって再配分された応力状態にあり、ブロックを形成する不連続面には地山応力による垂直応力成分とせん断応力成分が存在する。大石ら³⁾は、キーブロックの高さを変化させた2次元の安定解析をDEMで実施することにより、地山応力の効果を評価している。アーチに存在する落下型のブロックであっても、高さが一定以上になると地山応力の拘束により落下しないことを明らかにしている。

以上のような課題に対して、ここでは3つの新しい手法を提案するとともに、適用と評価を試みた。事前設計への活用として①確率統計的手法による事前予測、②ブロックの破壊確率による評価を実施し、③不連続面の有限性を考慮した解析手法を実施した。

5.2 提案する手法の理論

本節では、新しいキーブロック解析手法として①確率統計的手法による事前予測、②ブロックの破壊確率による評価、③不連続面の有限性を考慮した解析の考え方について述べる。

5.2.1 確率統計的手法によるキーブロックの予測

この節では、事前に調査横坑等の不連続面調査により取得した不連続面情報から、仮想的に不連続面分布を発生させ、移動可能ブロックを抽出し、その移動可能ブロックの発生割合を持って予測値とすることを試みる。不連続面データはグループ化され、グループごとに平均方向、方位分散係数、頻度などを得ることができる。次に、これらの情報を基に仮想的にトレースを発生させ、移動可能ブロックを抽出し、その割合を求める。

(1) 不連続面トレースの仮想発生

不連続面グループごとに、確定値である平均方向を中心に乱数発生させた方向と頻度を用いて、不連続面分布を再現する。

本研究では、不連続面方向の乱数発生の際に、不連続面分布を特徴づける確率分布として、Fisher 分布を適用する。Fisher 分布を表す確率密度関数は次式で表される。

$$f(\mathbf{x}_i) = \frac{K}{4\pi \sinh K} \exp(K \cos \theta) \quad (5.1)$$

$$K = \frac{N-1}{N-|\mathbf{R}|} \quad (5.2)$$

ここに、 \mathbf{x}_i : 球中心から球面上の点に向かう単位ベクトル

θ : 分布の中心方向と \mathbf{x}_i とのなす角

K : 方位分散係数

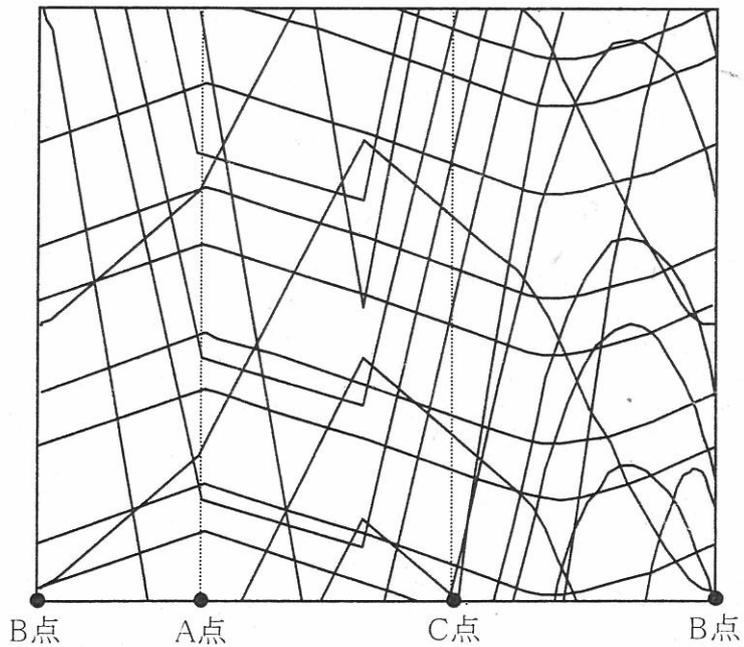
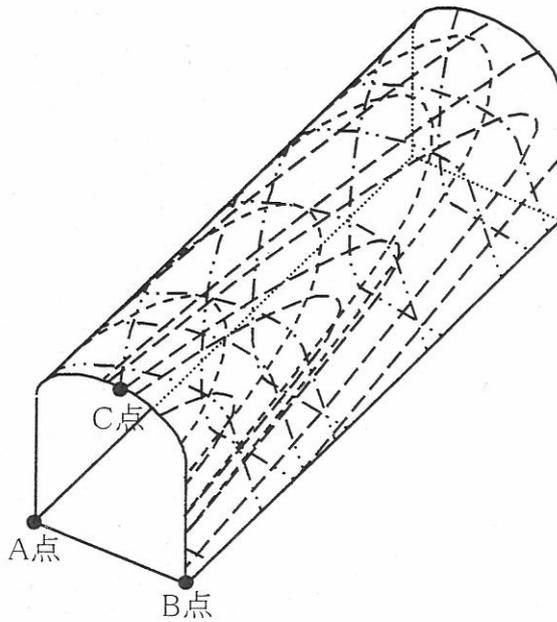
N : 不連続面数

\mathbf{R} : 不連続面の単位法線ベクトルの合成ベクトル

これらの式に従い、各グループごとに乱数を発生させることにより、不連続面の方向と間隔を決定する。例えば、表-5.1に示した傾斜、傾斜方位を持つ不連続面群を空洞壁面に発生させたトレースマップは、図-5.1のようになる。

表-5.1 使用した不連続面群の方向

グループ	傾斜 (°)	傾斜方位 (°)
1	71	163
2	68	243
3	45	280
4	13	343



空洞展開図

図-5.1 空洞面に発生させたトレースマップ

(2) 移動可能ブロックの抽出

次に、Shi and Goodman の手法⁴⁾を用いて、仮想発生させたトレスマップから移動可能ブロックを抽出する。

まず、ブロックを形成する不連続面の組合せと破壊モードによって、そのブロックの形成される最大領域が決まる。例えば表-5.1、図-5.1におけるトレスマップにおいて、不連続面グループ3をすべり面とする平面すべり破壊ブロックの最大領域は図-5.2のようになる。

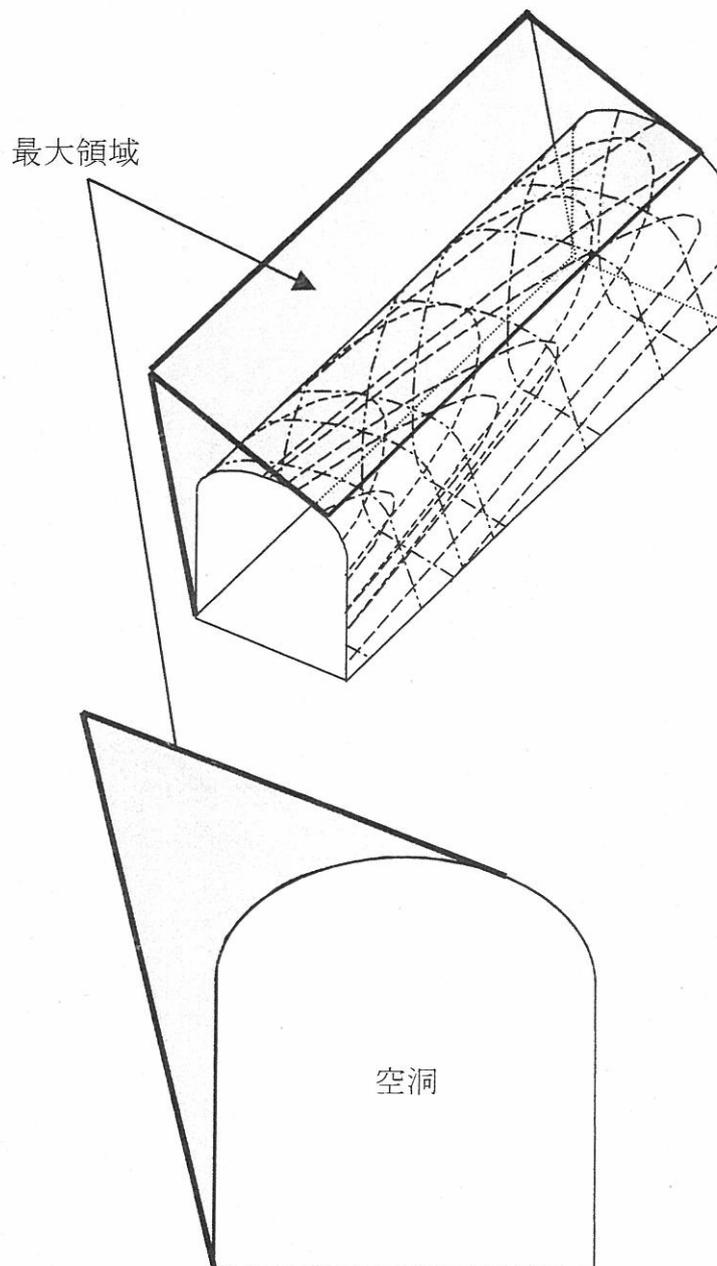


図-5.2 グループ3をすべり面とするブロックの最大領域

次に、最大領域内のトレースマップを取り出し、ブロック形成に無関係な枝トレースを取除き、ループ状のトレースのみにする。図-5.3にその過程を図示する。

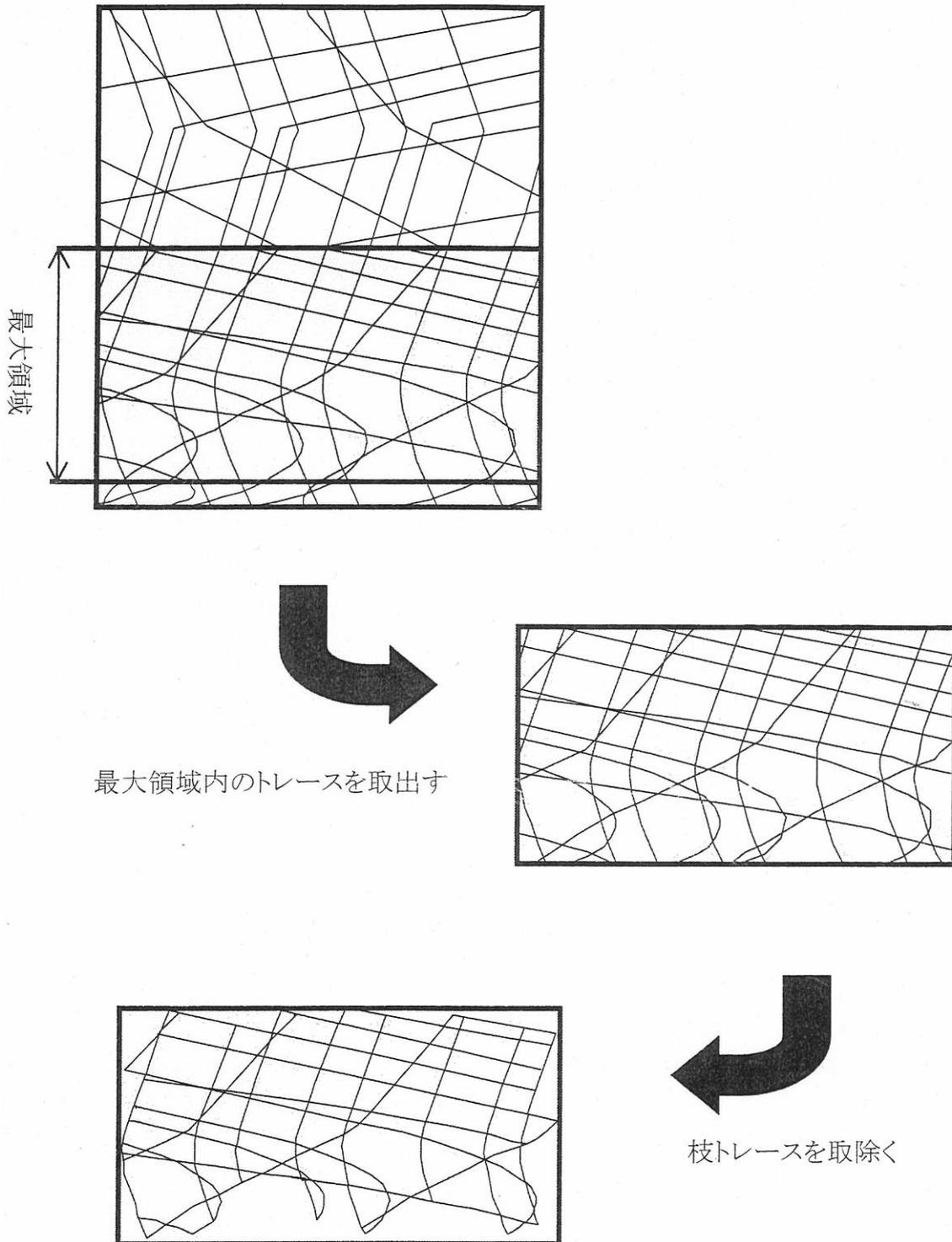
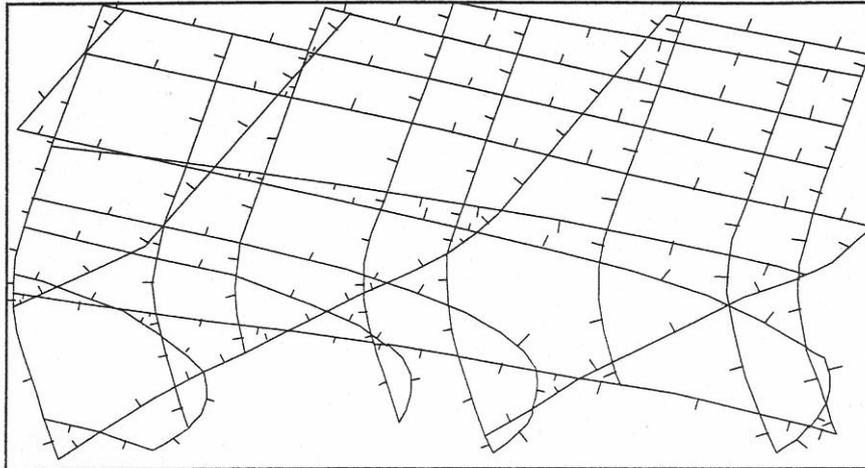
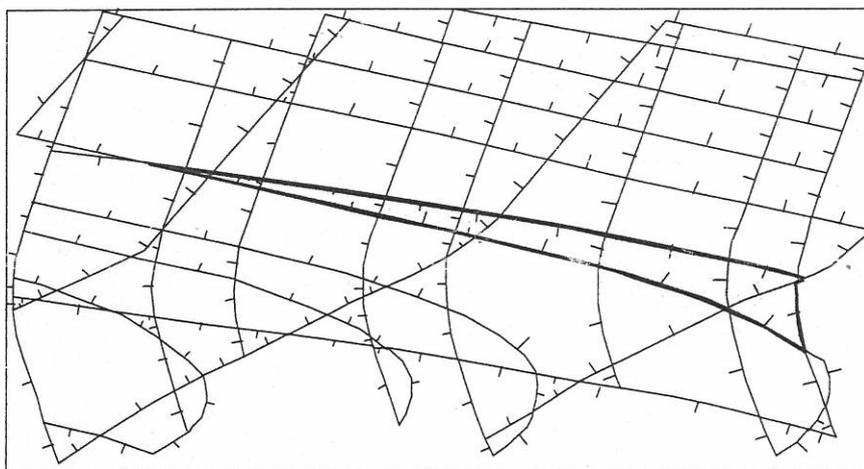


図-5.3 不必要なトレースの除去

そして、該当するブロックが各トレースのどちら側に存在するのかをマーキングして、マークがすべて内側に向いているループを抽出する。例えば、不連続面グループ 3 に沿った平面すべり破壊のブロックは、ブロックコード 1101 に該当するので、不連続面グループ 1、2、4 の下半空間、不連続面グループ 3 の上半空間の領域になる。図-5.4にその過程を図示する。抽出されたループが移動可能となるブロックのトレースである。



トレースのブロック側サイドにマークをつける

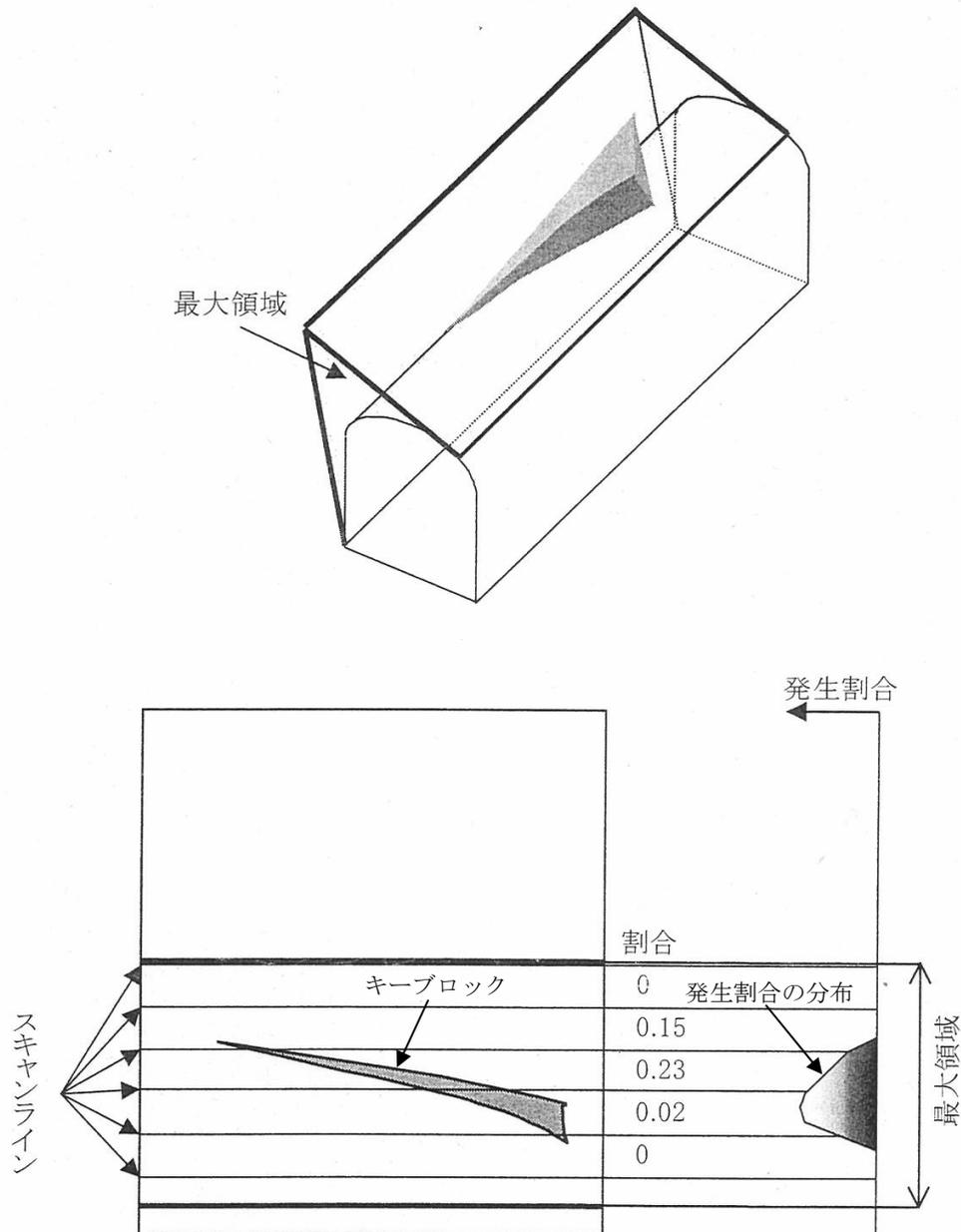


すべてのマークが内側を向いているループがキーブロックとなる

図-5.4 移動可能ブロックをなすトレスマップの抽出

(3) 移動可能ブロックの発生割合

仮想的に抽出された移動可能ブロックの空洞軸方向での全長に対する存在割合を求める。そして、空洞断面での軸方向のスキャンライン上で占める仮想移動可能ブロックの割合を、その位置での移動可能ブロック発生割合の予測値とする（図-5.5）。図-5.5を見るとわかるように、一つの最大領域内でも空洞壁面位置によって移動可能ブロックの発生割合が変化する。幾何学的に最大領域内はどこも移動可能ブロックの発生する可能性があるが、実際には不連続面頻度の影響などで、発生割合は変化する。



スキャンライン上で
仮想抽出された移動可能ブロックの占める割合を算出

図-5.5 スキャンラインによる発生割合の予測

5.2.2 ブロックの破壊確率

ブロック理論は、不連続性岩盤の掘削問題に対して、どのブロックが危険かを判定できる数学的な手法である。複数の不連続面と掘削自由面の幾何学的形状が判明すれば、ブロック理論は半空間の組合せにより、厳密に移動可能なブロックを検出し、破壊モードを決定するとともにブロックを安定させるのに必要な補強工を求めることが出来る。ブロック理論は、非常に強力な手法であるが、不連続面の幾何学形状が明確であることを前提としている。したがって、岩盤構造が複雑になり将来挙動予測にブロック理論を直接適用することは困難となることもあり、工学的判断が求められる。たとえば、路頭調査や調査トンネルでの地質調査により、不連続面の卓越方向などの統計量が得られている場合には、実際の斜面掘削やトンネル掘削時に現れるキーブロックを予測するためには、何らかの仮定の下に掘削時の不連続面位置を決定する等の手法が必要となる。

ここでは、不連続面の統計量が求められている場合に、危険なキーブロックを判定する方法について述べる。必要な情報は不連続面の卓越方向、密度（不連続面間隔）、摩擦角と掘削面の方向である。まず、卓越方向の組合せと密度により、ブロックの形成されやすさを示すブロック発生の確率関数を求める。次に、ブロックの形状が尖っているより扁平である方がすべりやすいことを数学的に形状指数で表す。次に、ブロックに作用するすべり力の大きさを無次元化して不安定指数で表す。最後にこれら、ブロック発生の確率関数、形状指数、不安定指数の積をブロックの破壊確率として評価するものである。

(1) 不連続面組合せの確率関数 $P(JC)$

岩盤中の不連続面を、方向性がほぼ等しい不連続面群としてグルーピングする。不連続面群の特性は、その卓越方向と密度によって代表される。今、岩盤中の微小体積を考えると、不連続面群がこの微小体積を通過する確率は同じではない。不連続面間隔がより小さい卓越群ほど、より大きい確率で微小体積を通過する。ここで、不連続面間の間隔を x とすると、 x の確率密度関数は負の指数分布で表されることが知られている^{5),6)}。

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (5.3)$$

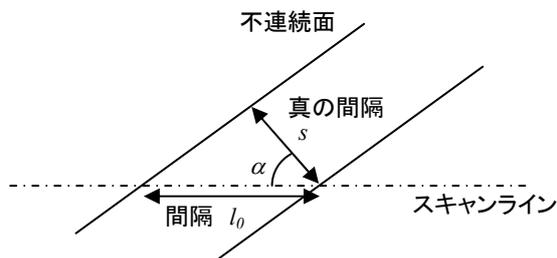
ここに x : 不連続面間隔 (Spacing)

$f(x)$: 不連続面間隔の確率密度関数

λ : 平均不連続面密度 (単位長さ当りの平均不連続面本数)

$1/\lambda$: 平均不連続面間隔

式(5.3)の不連続面間隔 x の平均値および標準偏差はいずれも $1/\lambda$ となる。 λ は、不連続面法線方向の密度であり、一般のスキャンライン法での不連続面密度を Terzhagi の方法⁷⁾により補正した真の不連続面密度である。これは、図-5.6に示すように真の不連続面間隔は、不連続面の法線方向の間隔であるから、スキャンラインと法線方向の角度 α により補正する必要がある。不連続面方向とスキャンラインの方向がほぼ等しい場合、すなわち α が 90° に近付くと、真の密度は非常に大きくなり過大な評価をする可能性があるため、 α の最大値を 70° とする。



$$\text{真の間隔 } s = l_0 \cos \alpha \quad |\alpha| \leq 70^\circ$$

$$\text{真の密度 } \lambda = \frac{1}{s} = \frac{1}{l_0 \cos \alpha}$$

図-5.6 スキャンライン法における密度、間隔の補正

また、ある固定長に存在するジョイントの分布がポアソン分布に従うとすると、ジョイントセット i において、ジョイントに直交する方向の間隔 x_i 内に k 本のジョイントが存在する確率は、以下の式で表される。

$$P[N_i = k] = \frac{e^{-\lambda_i x_i} (\lambda_i x_i)^k}{k!} \quad k = 0, 1, \dots \text{ and } x_i > 0 \quad (5.4)$$

式(5.4)のパラメータは、不連続面群の密度 λ_i のみであり、これはスキャンライン調査により求めることが出来る。ここで、微小間隔 x_i に 1 本のジョイントが存在する確率は、

$$P[N_i = 1]_{x_i \rightarrow 0} = \frac{e^{-\lambda_i x_i} (\lambda_i x_i)}{1!} = \frac{\lambda_i x_i}{e^{\lambda_i x_i}} = \lambda_i x_i \quad (5.5)$$

ここで 3 組の不連続面群の組合せ $\{i, j, k\}$ において、ジョイントセット j, k においてもポアソン分布を仮定し、各セットの分布が独立であるとする、微小空間 $\{x_i, x_j, x_k\}$ に 3 組の不連続面が存在する確率は、それぞれの確率の積で表される。

$$\begin{aligned}
& JC : \{N_i = 1\} \cup \{N_j = 1\} \cup \{N_k = 1\} \\
& P(JC) \propto P(\{N_i = 1\}) \cdot P(\{N_j = 1\}) \cdot P(\{N_k = 1\}) \\
& P(JC) \propto \lambda_i x_i \cdot \lambda_j x_j \cdot \lambda_k x_k
\end{aligned} \tag{5.6}$$

ここに、 $P(JC)$: 不連続面組合せの確率関数 (Joint Combination Probability)

$\lambda_i, \lambda_j, \lambda_k$: ジョイントセット i, j, k のジョイント密度

x_i, x_j, x_k : ジョイントセット i, j, k でのジョイント間隔

式(5.6)は不連続面密度のみの関数であり、不連続面方向とは無関係である。Mauldon⁸⁾は、より一般的な式として、不連続面の密度と方向に依存した以下の組合せ確率関数を定義している。

$$P(JC) = \frac{(\lambda_i x_i)(\lambda_j x_j)(\lambda_k x_k)}{V_{ijk}} \tag{5.7}$$

V_{ijk} は、各方向の2面の間隔が x_i, x_j, x_k である3組の不連続面で囲まれた平行6面体の体積であり、以下の式で表される。

$$V_{ijk} = \frac{x_i x_j x_k}{|\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j \times \mathbf{n}_k|} \tag{5.8}$$

ここに $\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j, \mathbf{n}_k$: ジョイントセット i, j, k の単位法線ベクトル

式(5.8)を式(5.7)に代入して、ジョイント組み合わせの確率関数は以下の式で表される。

$$P(JC) = (\lambda_i \lambda_j \lambda_k) |\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j \times \mathbf{n}_k| \tag{5.9}$$

$|\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{n}_j \times \mathbf{n}_k| = |\mathbf{n}_j \cdot \mathbf{n}_k \times \mathbf{n}_i| = |\mathbf{n}_k \cdot \mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j|$ であり、この式の値は法線ベクトル $\mathbf{n}_i, \mathbf{n}_j, \mathbf{n}_k$ がお互いに直交するとき1となり最大値をとる。したがって、式(5.9)は不連続面群の密度が大きく、互いに直交する角度に近い方が大きな値となる、すなわち選択した不連続面の組合せによるブロックが出現しやすいことを示している。

(2) ジョイントピラミッドの形状指数 (K)

ジョイントピラミッド(JP)の形状指数は、ブロックの形状による移動のしやすさを評価する指数である。図-5.7に示すようなジョイントピラミッドを広角、狭角で比較すると以下のようなことが言える。広角な JP とは、JP 内部での各面のなす角度が大きい JP であり、JP の頂点と自由面の距離は小さい。狭角な JP とは、JP 内部での各面のなす角度が小さい JP であり、JP の頂点と自由面の距離は大きい。現地調査の結果を分析すると広角な JP の方が崩壊する場が多い。これは、以下の理由による。

- 1) 円形トンネルで考えると、頂点距離が大きくなると、ジョイントの法線ベクトルは自由面の接線方向により近くなるため、より大きな周方向応力がブロック各面に作用する。
- 2) 頂点距離が大きくなると、側面の面積も大きくなるため、各面で発生する粘着力が大きくなり、すべりに抵抗する。
- 3) 頂点距離が大きくなると、ブロックの移動方向はより制限されるとともに、ジョイントのラフネス（表面粗度）の影響が大きくなる。

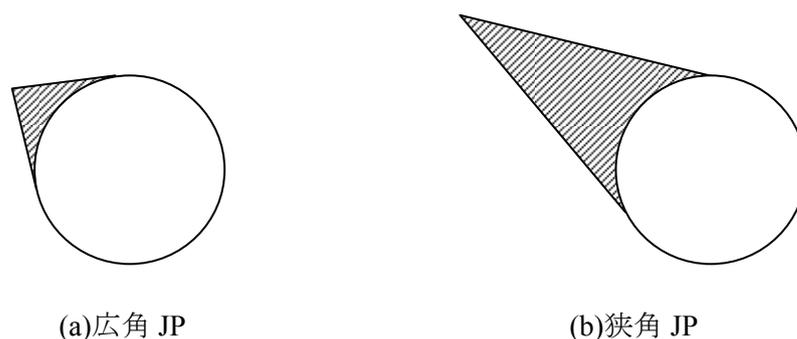
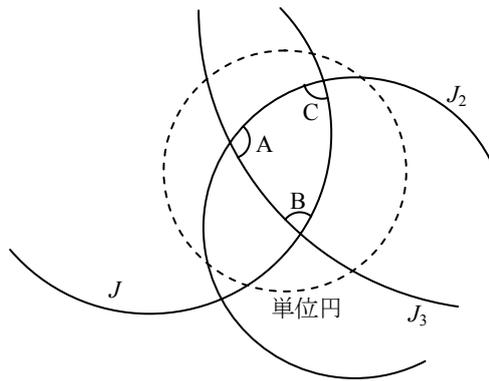


図-5.7 トンネルにおける広角 JP と狭角 JP の形状

ここでは、3つの不連続面と1つの掘削面からなる4面体のブロックについて考察することにする。図-5.8に示すように、3つの不連続面からなるジョイントピラミッド(JP)はステレオ投影面上では、球面3角形で表され、この球面3角形の面積が大きい方が、広角な JP となり危険なブロックである。そこで、JP 形状指数[K]を、ステレオ投影において JP の球面3角形の面積と全球の面積の比率で表すことにする。

$$K = \frac{(A+B+C-\pi)R^2}{4\pi R^2} = \frac{A+B+C-\pi}{4\pi} \quad (5.10)$$

ここに、A, B, C は、JP を構成する3つの面の JP 内部での交差角度であり、R は投影球の半径である。



ブロックコード：000

図-5.8 3つの不連続面の JP 内部での各面の交差角度

(3) ジョイントピラミッドの不安定指数(F)

移動可能なブロックの破壊の解析は、極限平衡解析によって行われる。ブロックの回転や変形を考慮しない場合、破壊のモードは、すべての不連続面が開口する落下あるいは浮き上がりのモード、1面すべりのモード、2面すべりの3種類のモードに分けられる。このとき、不連続面の粘着力を考慮しない場合のすべりの合力は、それぞれの破壊モードで以下の式で表される。

落下 $F^* = |\mathbf{r}|$ (5.11)

1面すべり $F^* = |\mathbf{n}_i \times \mathbf{r}| - |\mathbf{n}_i \cdot \mathbf{r}| \tan \phi_i$ (5.12)

2面すべり

$$F^* = \frac{1}{|\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j|^2} \left\{ \mathbf{r} \cdot (\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j) \|\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j\| - |(\mathbf{r} \times \mathbf{n}_j) \cdot (\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j)| \tan \phi_i - |(\mathbf{r} \times \mathbf{n}_i) \cdot (\mathbf{n}_i \times \mathbf{n}_j)| \tan \phi_j \right\}$$

(5.13)

ここに、 \mathbf{r} はブロック作用力、 \mathbf{n}_i , ϕ_i はジョイント i の単位法線ベクトルと摩擦角である。このとき、ブロックの不安定指数を以下の式で定義する。

$$F = 2^{(F^*/R)}$$

(5.14)

ここに R はブロック作用力の大きさであり、重力のみが作用する場合は自重となる。 F^*/R はブロックのすべり力を作用力で除して正規化したものである。ブロック不安定指数 F は、ブロックの正規化すべり力を $0 \sim 2$ の範囲に変換したものである。これら正規化すべり力、破

壊モードおよび不安定指数の関係を表-5.2に示す。

表-5.2 正規化すべり力と安定状態不安定指数の関係

F*/R	破壊モード	不安定指数
1.0	落下	F=2
0 < F*·R < 1.0	すべり	1 < F < 2
0	極限平衡	F=1
< 0	安定	0 < F < 1
→ -∞	モードなし	F → 0

落下型のブロックがもっとも危険なブロックであるが、この場合すべり力の大きさは自重と一致し F^*/R は 1.0 となる。したがって落下型のモードの場合 $F=2.0$ となる。 F^*/R が 0~1 の間にあるときは、ブロックはすべりモードの状態にあり $1 < F < 2$ である。ブロックがちょうど安定しており極限平衡状態にあるときは、すべり力は 0 であるから $F=1.0$ となる。摩擦力等を考慮してブロックが安定している場合は、すべり力は負の値となり、ブロックを移動させるためには、すべり方向の力をブロックに作用させなければならない。この場合 F は 1 より小さく、JP はすべりモードになく安定である。なお、ブロックがいずれの破壊モードにもなく、摩擦力がなくても安定な場合は、 $F=0$ と定義する。

(4) ブロックの破壊確率 P(B)

不連続面組合せの確率関数 $P(JC)$ 、ジョイントピラミッドの形状指数 K 、ジョイントピラミッドの不安定指数 F を用いて、ブロックの破壊確率を以下の式で定義する^{9),10)}。

$$P(B) = P(JC) \cdot K \cdot F \quad (5.15)$$

ここに $P(B)$: 相対的なブロックの破壊確率(Relative Block Failure Likelihood)

$P(JC)$: 不連続面組合せの確率(Joint Combination Probability)

K : JP 形状指数(JP Shape Parameter)

F : JP 不安定指数(JP Instability Parameter)

ブロックの破壊確率は、不連続面の幾何学分布特性によるブロックの形成されやすさと、すべりやすさを合わせて、その危険性を評価する指数といえる。すべての不連続面組合せごとに破壊確率は計算することが可能であるから、自由面を掘削する際の危険なブロックを推定することが出来る。

N 個の不連続面群がある場合に、そのうち k 個の不連続面群を選ぶ組み合わせの数は以下の式で表される。

$$N_{jc} = \frac{n!}{k!(n-k)!} \quad (5.16)$$

前述した不連続面組合せの確率および JP の形状指数はいずれも $k=3$ の場合の式であり、3 つの不連続面に 1 つの掘削面を加えた 4 面体ブロックの安定性を本研究では考慮していることになる。実際にはより大きな k のブロックが発生する可能性があるが、実際の現場では $k=4$ の場合も非常に少なく、 k が 5 以上の場合のブロックはほとんど観察されない⁹⁾。これは、筆者らが実施した奥多々良木発電所のアーチ部のキーブロック解析においても、追加補強キーブロック 28 個のうち 24 個が $k=3$ 、4 個が $k=4$ で $k=5$ 以上は発生しなかった¹¹⁾。

また、Shi¹²⁾によれば、自由面が一つである場合に、k 個のジョイントより成るブロックのうち、移動可能なブロックコードの数は、以下の式で表される。

$$N_{rb} = \frac{k^2 - 3k + 2}{2} \quad (5.17)$$

上式によれば、 $k=3$ のとき $N_{rb}=1$ である。すなわち、不連続面が 3 面である場合は、掘削自由面を 1 方向に決めれば移動可能なブロックコードは 1 種類に限定される。 $k=4$ の場合は、 $N_{rb}=3$ となり、不連続面の組合せごとに 3 種類のブロックコードについて、すべりモードおよびすべり力の検討を行わなければならないことになる。したがって、3 つの不連続面と掘削面を 1 つ加えた 4 面体ブロックを対象とすることにより、より簡便で有効な破壊確率の検討が実施できる。実際の掘削により複雑なブロックが検出された場合は、個別に安定解析を実施することにより対応できる。

5.2.3 不連続面の有限性を考慮したキーブロック解析

ブロック理論では、不連続面は岩盤内では無限な広がりを持つと仮定しているのが基本であり、不連続面の有限性は考慮されていない。ただし、掘削面においては不連続面のトレースは有限長として扱われている。このために、キーブロック解析を行うと、掘削面上で観察されたトレース長は短いにもかかわらず、岩盤内では非常に深いところまで達するような細長いキーブロックが検出されることがある。実際にこのようなブロックが形成される可能性は小さいと考えられるが、定量的に評価するのは困難である。

不連続面を円盤や多角形で表現し、3次元のブロックを同定する手法はLin¹⁴⁾や池川¹⁵⁾やYu¹⁾より提案されている。ここでは、不連続面を円盤と仮定してブロックを同定する方法について述べる。

(1) 不連続面の3次元形状

実際の不連続面が3次的にどのような形をしているかは、わかっていない。不連続面はある程度の曲面性を持っていると考えられるが、一般に単純に平面としている。平面と近似した場合の形状も明らかではないが、円盤や多角形として扱うことが多い。ここでは、解析上の扱いの容易さから円盤で不連続面を表現することとした。円盤モデルは、厳密な不連続面形状を再現させようとするものではなく、不連続面が岩盤内である程度の大きさを持つ平面的な存在として捉えたものである。

円盤モデルでは、図-5.9に示すように、単位法線ベクトル、円盤半径、中心位置のパラメータだけで形状を決定することができる。3次元形状に関する十分な情報が得られない場合にも、観察面上に両端の2点が観察されれば、半径を決定するだけで不連続面の円盤を表現することができることや、円盤同士の交差の有無の計算が容易である等の扱いやすさがあり、岩盤ブロックの同定には適していると考えられる。

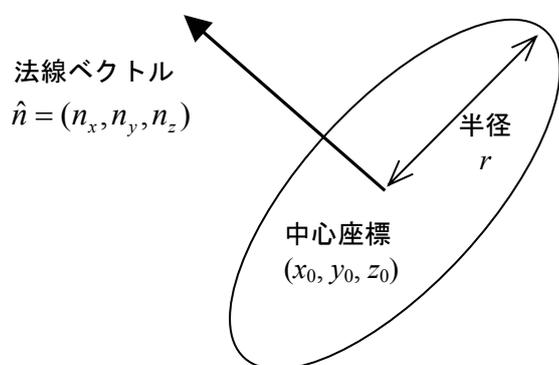


図-5.9 不連続面の円盤モデル

(2) 解析領域のモデル化

解析領域については、検討対象としている斜面やトンネルなどの掘削面の大きさに比べて、十分に広い領域の3次元の閉領域としてモデル化する。すなわち、掘削面と仮定の平面多角形をつなぎ合わせた形で表現する。元々、大きな3次元閉領域であったものが不連続面により新たに小さな3次元閉領域に分割され、それがブロックとなるという発想で捉えるためである。トンネルと斜面のモデル化の例を図-5.10に示す。掘削面を表現した平面以外は、解析を行なうために、仮想的に設けたものであり、この部分を含むブロックが検出されたとしても、仮想的な平面を設けたために形成されたブロックであるとし、除外することにする。

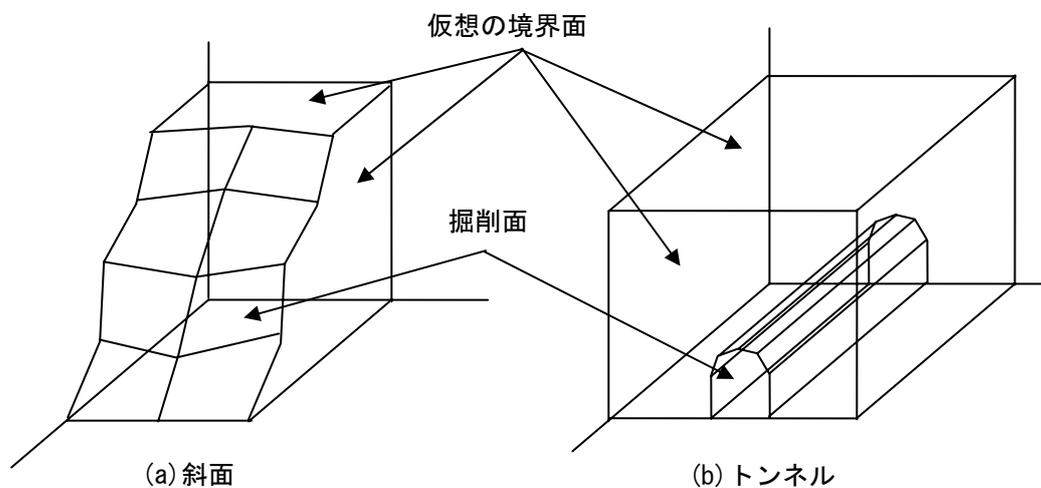


図-5.10 解析対象領域の設定

(3) 微小な不連続面の除去

解析に用いる不連続面モデルの円盤の最小半径を決定し、最小半径以下の半径をもつ不連続面の除去を行なう。決定論的な扱いをする場合は、十分小さな値は観察データに含まれないことが多いため、必ずしも必要ではないが、確率論的な扱いをする場合には、必要な作業となる。統計論的に見れば、不連続面は小さなものほど多く存在し、それらを全部用いれば、大量の微小なブロックが形成されることになる。微小なブロックは、吹付けコンクリート等の初期の支保により十分に安定であることが多く、補強対象とならない。また、不連続面の数が多くなると計算上もメモリ容量や計算時間などの問題が生じる。このようにならないために、十分小さい不連続面はあらかじめ除去する。

十分小さい不連続面の基準はサンプリングの際の基準と関連づけて考えればよい。トレース長の観察データの記録は、ブロックの安定問題では、施工時の条件から決定される。たとえば、施工初期の支保工の強度が、一辺 2m 四方のブロックの滑働を抑止できる程度のもの

であるならば、サンプリングすべき不連続面の間隔と連続性は概ね 2m 以上でよい。半径についても、トレース長と同じ考え方で決定できる。トレース長は最大で円盤の直径であるため、最小トレース長の半分を最小半径とすればよい。

(4) 非連結不連続面の除去

次の段階として、不連続面の連結性の観点から不連続面の除去を行う。ここで、「連結」の定義として、以下の2つの条件を満たす不連続面を連結不連続面と呼ぶことにする。

- (ア) 少なくとも3つ以上の不連続面と交差する。(掘削面も含み、掘削面は平面多角形の不連続面として捉える。)
- (イ) 対象不連続面上で、他の不連続面との交線が少なくとも1つ以上のループを形成している。

①については、最小の多面体は4面体であり、そのうち1つの面に注目すればブロック(多面体)を形成するためには少なくとも他の3面と交差していることが必要条件である。3つ未満の不連続面としか交差しない場合には、ループが形成されることがない。

②については、他の3面以上と交差している面の一部分が、有限なブロックを構成する面となるためには、注目する面上で交線が互いに交差してループを形成する必要がある。このループの内部の有限領域がブロックの面となるからである。

これらの条件を満たさない不連続面を非連結不連続面と呼び、これらを除去する。

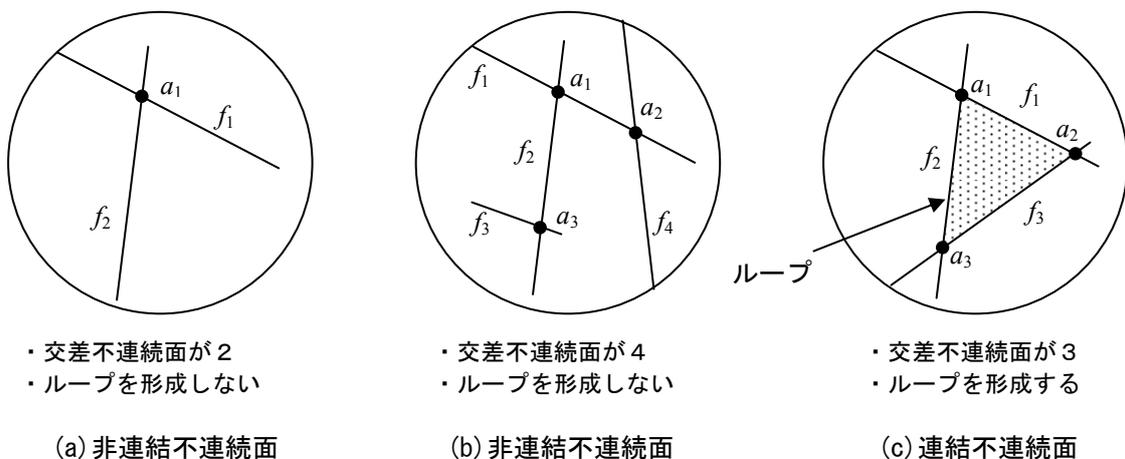


図-5.11 解析対象領域の設定

図-5.12に示すような円盤 i と円盤 j の交差について調べることにする。お互いの半径が無
限長であるとするれば、必ず交差線が存在し、その方向ベクトルは $\hat{n}_i \times \hat{n}_j$ となる。お互いの半
径が有限長であり、交差線分が存在するのであれば、その線分はこの交差線の一部となる。
以下の方程式が共に解を持ち、共通部分が存在する時、交差線分が形成されることになる。

$$\begin{aligned} |\hat{n}_i \times \hat{n}_j|^2 t_i^2 + 2(\hat{n}_i \times \hat{n}_j)(\hat{X}_i - \hat{x}_{i0})t_i + |\hat{X}_i - \hat{x}_{i0}|^2 - r_i^2 &= 0 \\ |\hat{n}_i \times \hat{n}_j|^2 t_j^2 + 2(\hat{n}_i \times \hat{n}_j)(\hat{X}_j - \hat{x}_{j0})t_j + |\hat{X}_j - \hat{x}_{j0}|^2 - r_j^2 &= 0 \end{aligned} \quad (5.18)$$

ただし、交点の位置ベクトル \hat{x}_i 、 \hat{x}_j はそれぞれ、

$$\begin{aligned} \hat{x}_i &= \hat{X}_i + t_i(\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \\ \hat{x}_j &= \hat{X}_j + t_j(\hat{n}_i \times \hat{n}_j) \end{aligned} \quad (5.19)$$

円盤と平面多角形についても同じような方法で求めることができる。円盤半径を無限にし
た場合には、平面の辺の部分を通ることになり、これを交差線とすればよい。ただし、多
角形の形状によっては、交点の数が 2 個でなく、それ以上となることもあるため、その処理
が必要である。具体的には、交点を k 個持つとすれば、 $k-1$ 本の線分を持つことになる。こ
の $k-1$ 本の線分の midpoint が注目する多角形を含む 2 次元平面上で、多角形の内部にあるか、外
部にあるかの判定を行なう。ここで、内部と判定された線分だけが交差線分となる。これ以
降については同様である。

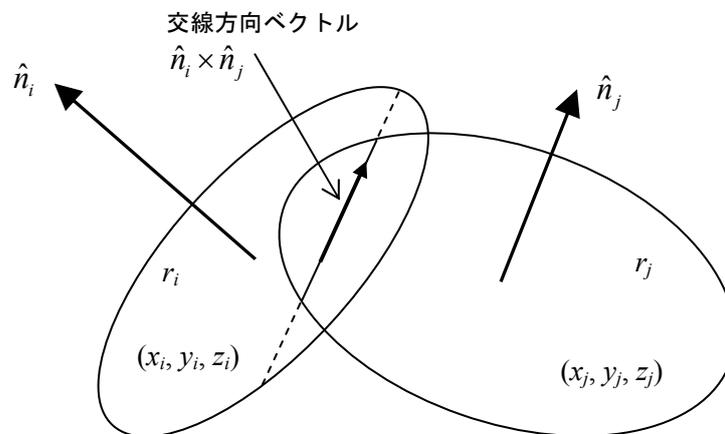


図-5.12 有限な面同士の交差線分

以上より、交差状況を交差線分の形で表現することができる。

次に、線分同士の交差について述べる。ここで、ある面に注目して考える。面は I 本の交差線分がある。ただし、 $I \geq 3$ であり、これを満たさない場合は、この時点で除去される。この 2 次元の面上で考えると、 I 本の線分に対して $1 \sim I$ まで番号付けを行ない、この線分の集合を $\{A\}$ とする。線分 i と線分 j ($i, j \in \{A\}$) の交差について、以下のように表現する。

$$\begin{aligned} f_{cross}(i, j) = 0 & \quad \text{交差しない} \\ f_{cross}(i, j) = 1 & \quad \text{交差する} \end{aligned}$$

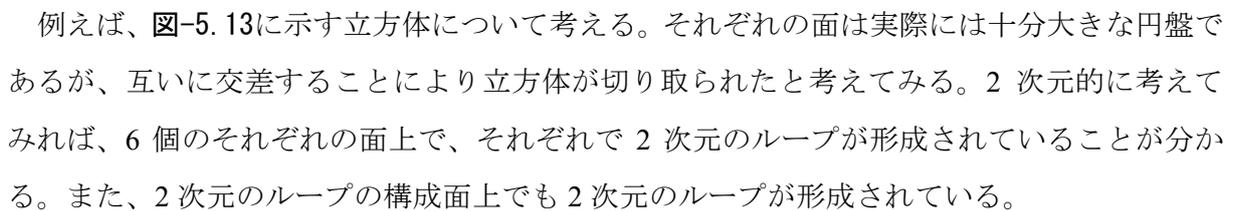
例えば、 $i, j, k, l, m, \dots \in \{A\}$ に対して、

$$\begin{aligned} & (f_{cross}(i, j) = 1) \cap (f_{cross}(j, k) = 1) \cap (f_{cross}(k, i) = 1) \\ & (f_{cross}(i, j) = 1) \cap (f_{cross}(j, k) = 1) \cap (f_{cross}(k, l) = 1) \cap (f_{cross}(l, i) = 1) \\ & \dots\dots \\ & \dots\dots \end{aligned} \tag{5.20}$$

などのいずれかが成り立つ場合には、2 次元のループが形成されていることになり、注目する面は連結不連続面となる。すべての不連続面について繰り返し計算をすることにより、これを満たす不連続面を同定し、これを満たさない非連結不連続面を除去することにより、モデルの簡略化を行なう。

(5) 3 次元ループの特定

すべての不連続面がブロック形成に関係するのではなく、連結している不連続面だけであると考え、前段階で非連結不連続面を除去した。その結果、不連続面上で 2 次元ループを形成している不連続面を特定した。ここでは、それらの集合体として、3 次元ループを形成するかどうか調べる段階となる。

例えば、-5.13 に示す立方体について考える。それぞれの面は実際には十分大きな円盤であるが、互いに交差することにより立方体が切り取られたと考えてみる。2 次元的に考えてみれば、6 個のそれぞれの面上で、それぞれで 2 次元のループが形成されていることが分かる。また、2 次元のループの構成面上でも 2 次元のループが形成されている。

岩盤ブロック同定問題には掘削面で 2 次元ループが形成されていることが絶対条件となる。形成されていない場合には、掘削面でブロックとして出現しないことになる。掘削面上の 2 次元ループのすべての構成面上で、掘削面を構成要素に含む 2 次元ループが形成される必要がある。これらを複数回繰り返し、それが満足されていれば 3 次元ループが形成されているとする。本手法では、百面体のような複雑な 3 次元問題を扱うことは不可能でもよいと考え、

以上のような方法でブロックを構成する2次元ループ群を同定する。そのため、この段階ではブロックが定まっているわけではない。この段階を満足するが、実際にはブロックを形成しない場合も原理的には考えられるが、それは次の段階でブロックが形成されているかどうかを確認するので問題はない。

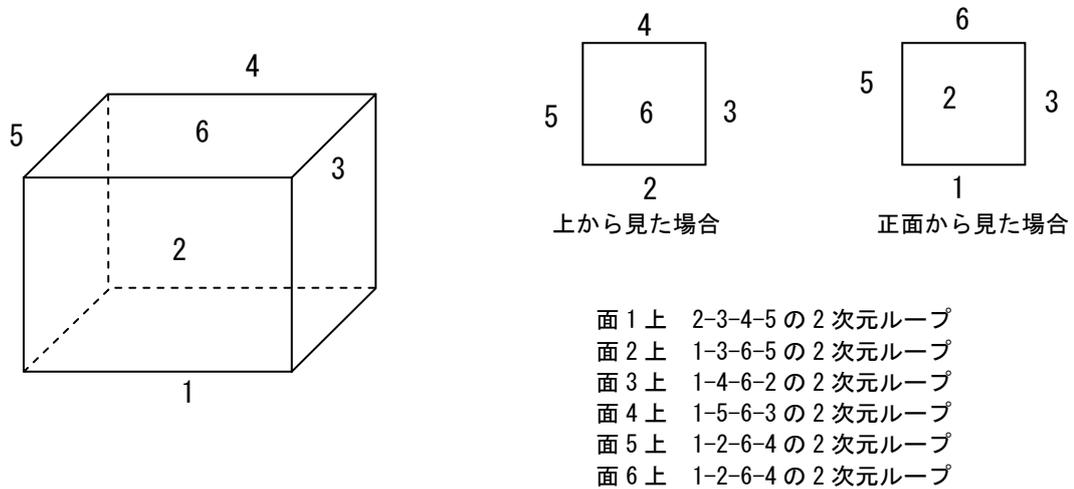


図-5.13 6面体上の3次元ループ

(6) ブロック形状と体積

本研究では、ブロック形状および体積を近似的に表すために、体積要素増殖手法を提案する。この手法では、まず、掘削面上に開始点を設ける。そこで、ブロック内部に平行移動させた点を新たな開始点とする。トンネルの場合には、掘削面の2次元ループ内の1点からわずかでも上方に移動させれば、ブロック内部に入ることになる。開始点において立方体の体積要素 (volume element) を作り、それを増殖させ (図-5.14) ブロックの認識を行う。

体積要素は、以下の4種類の属性に分けることにする。ここで、 $g(x, y, z)$ という関数を用いて、体積要素の属性を示す。ただし、 (x, y, z) は注目する体積要素の位置を示し、立方体の重心の位置である。

- $g(x, y, z)=a$ 体積要素についての情報はまだない。
- $g(x, y, z)=b$ 体積要素はブロック内部に存在するが、隣接する体積要素の属性についての情報はまだない。
- $g(x, y, z)=c$ 体積要素はブロックの境界にある。
- $g(x, y, z)=d$ 体積要素はブロック内部に存在し、隣接する体積要素についての情報も分かっている。

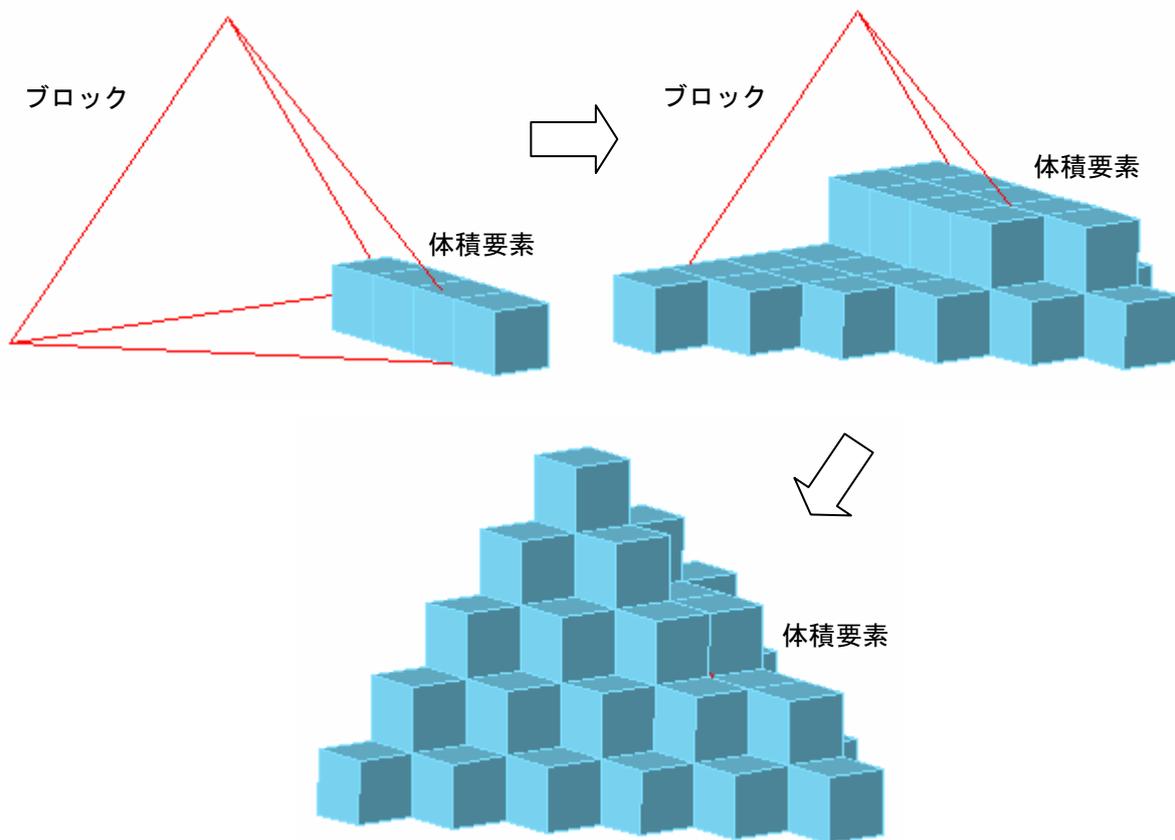


図-5.14 体積要素増殖法のイメージ

体積要素は図-5.15に示すように6個の体積要素と隣接する。1つの体積要素の性質が分かれば、その隣接する6個の体積要素の属性を調べていくことを繰り返していくことにより、最終的にブロック内部のすべての属性を特定することができれば、ブロックの形状が特定できたことになる。

具体的には、開始時には初期設定として、ブロック内部は開始点の体積要素は $g(x, y, z)=b$ であるが、それ以外はすべて $g(x, y, z)=a$ となっている。ここで、隣接する体積要素の性質を調べることができるのは $g(x, y, z)=b$ となる体積要素のみであるという取り決めをする。これに従い、開始点の体積要素に隣接する6個の体積要素を調べることができる。隣接する6個の体積要素の情報がすべて得られれば、注目している体積要素の体質は $g(x, y, z)=c$ または $g(x, y, z)=d$ のいずれかになることになる。

隣接する体積要素が $g(x, y, z)=a$ と表されるならば、これは $g(x, y, z)=b$ と $g(x, y, z)=c$ のいずれかに変換されるのだが、これらを判定するには、体積要素の辺と連結不連続面、または平面が交差するかどうかを調べる。立方体の12本の辺すべてについて、すべての連結不連続面、平面と交差するかどうか調べ、いずれとも交差しなければ、 $g(x, y, z)=b$ となり、交差するものが存在するのであれば、 $g(x, y, z)=c$ となる。

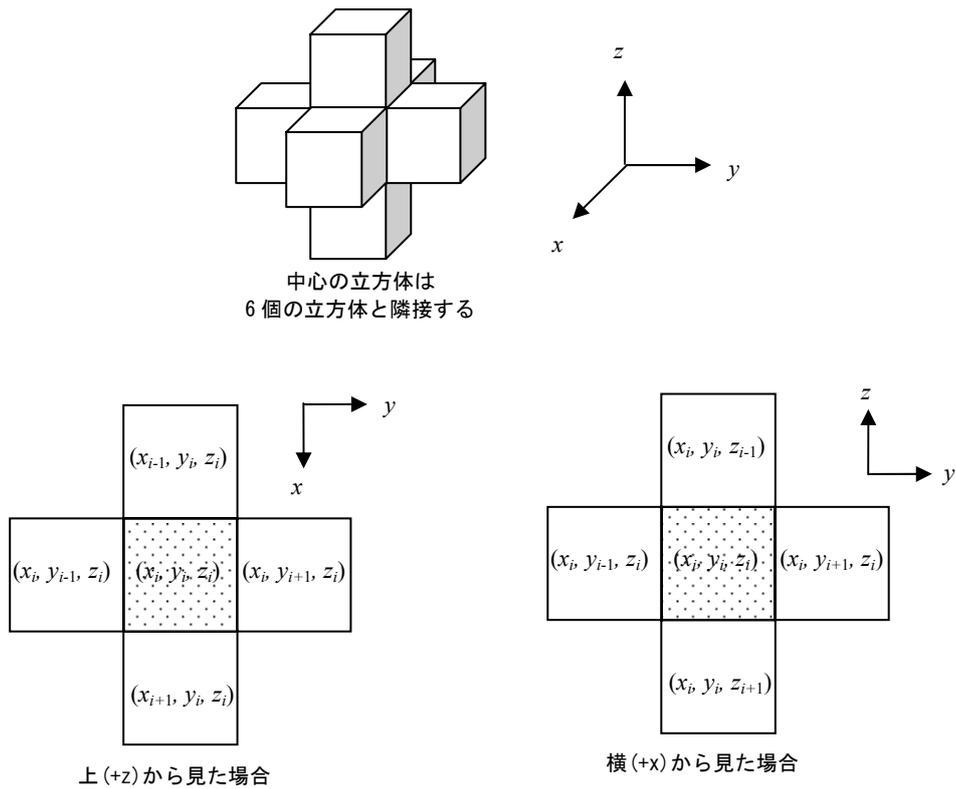


図-5.15 隣接する体積要素

体積要素を増殖してブロック形状を特定するための取り決めとして、 $g(x, y, z)=b$ の要素しか隣接する体積要素の属性を判定することができないとする。そこで、ブロックに対して十分大きな領域内で、注目する体積要素を換えていく。もし、そこで、 $g(x, y, z)=b$ となる体積要素が発見されれば、隣接するものを調べていくことになる。ブロック内部の全体積要素の性質が決定され、ブロック内部の体積要素は、 $g(x, y, z)=c$ か $g(x, y, z)=d$ のどちらかになる。

また、ブロック内部の $g(x, y, z)=c$ か $g(x, y, z)=d$ のどちらかで表現される体積要素を数えることにより、体積も求めることができる。ただし、厳密に体積を求めたわけではないため、体積の誤差はある程度生じる。立方体の大きさを小さくすれば、誤差の幅を少なくすることはできるが、正確な体積を求めたい場合には、別の方法を用いた方がよい。

5.3 提案する手法の適用結果

5.3.1 地下空洞における事前予測解析の評価

本節では、5.2.1節で説明した理論により、実際の現場で得た不連続面データをもとに、移動可能ブロックの発生割合予測を行った結果を示す。

(1) 検証に用いた現場の概要

本研究では、関西電力の奥多々良木発電所増設空洞掘削における不連続面データを基に解析し、実際に出現したキーブロックを用いて検証した。奥多々良木発電所は、兵庫県朝来郡朝来町多々良木に位置しており、上部調整池に黒川ダムを、下部調整池に多々良木ダムを使った揚水式発電所である。一号機から四号機までの既設発電機は昭和49、50年から運転されている。今回の解析に用いたのは、五号機、六号機の増設地下空洞貫入が認められているが、岩盤は強固なB~C_H級岩盤である。既に第4章で述べたように、実際の現場では確定論的にキーブロックを抽出し、最終支保設計に活用された。その結果、従来の地下空洞に比べて支保が大幅に軽減された。

本研究では、本空洞周辺の試掘坑から事前に得られた不連続面データと本坑掘削中に随時得られた不連続面データとを用いて解析し、本空洞アーチ部で実際に検出されたキーブロックと比較する。本空洞、試掘坑の見取り図を図-5.16に示す。本空洞の空洞軸はN5Wの方向で、北から掘削された。実際にアーチ部で検出されたキーブロックを図-5.17に示す。

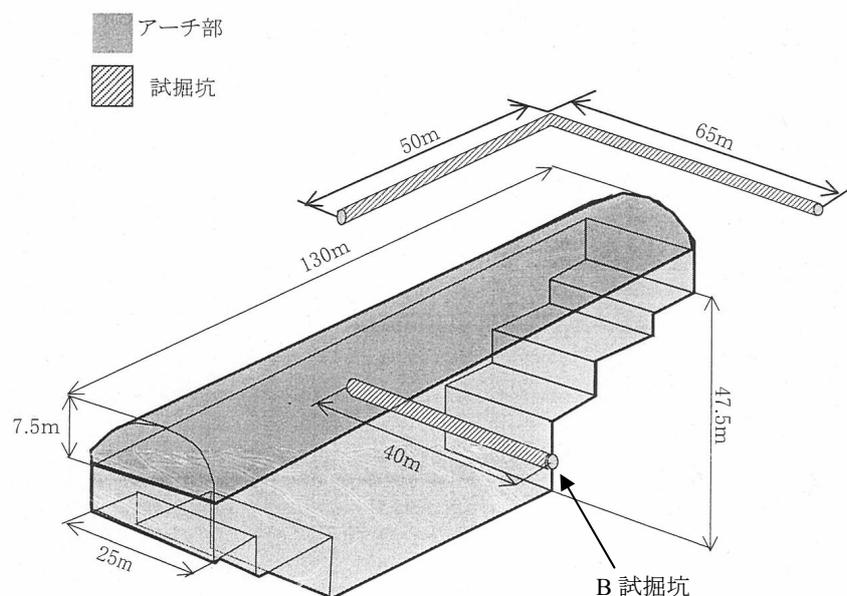


図-5.16 対象とする地下空洞と試掘坑の配置

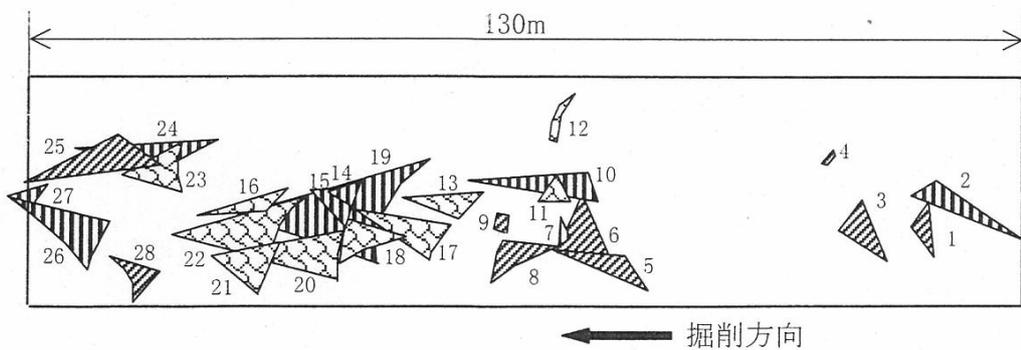
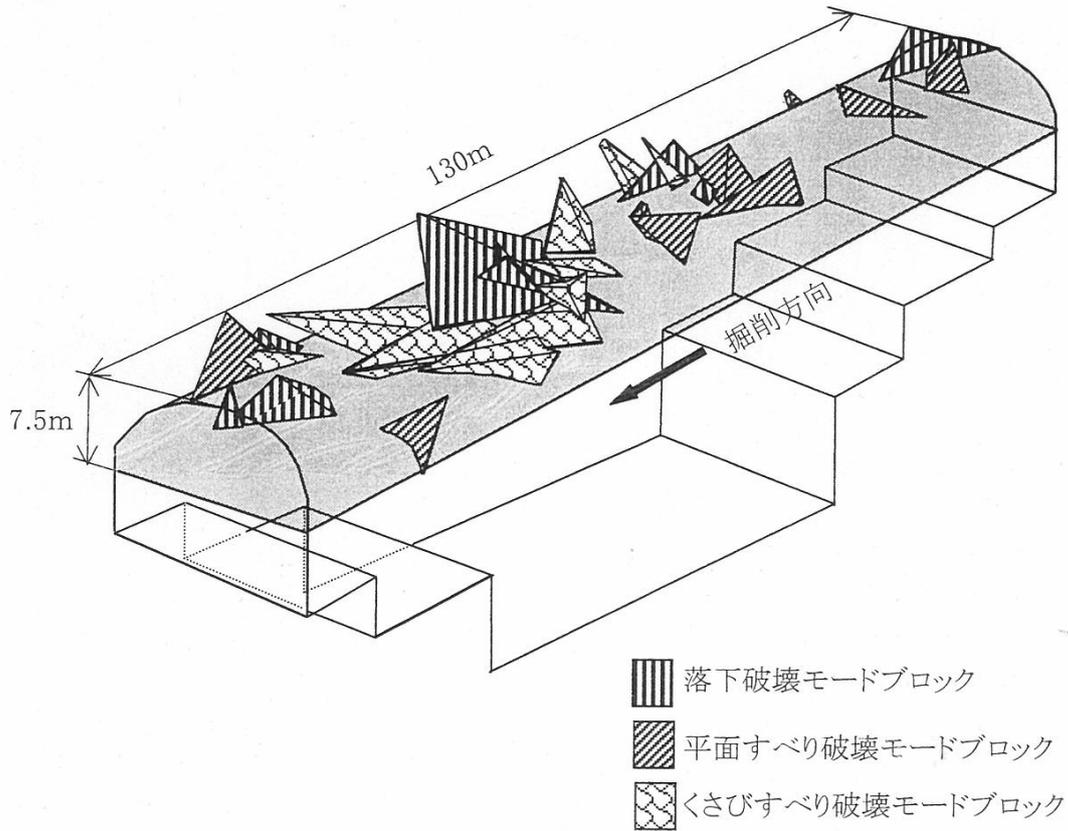


図-5.17 施工時に検出されたキーブロック

(2) 試掘坑情報からの予測と検証

まず、試掘坑で事前に採取された不連続面データを用いて、移動可能ブロックの発生割合を予測することを試みる。本研究での発生割合は、予測対象範囲において、発生する移動可能ブロックの占有する割合を空洞軸方向にスキャンラインしたものである。不連続面データは、本空洞下部に掘削されたB試掘坑で採取されたものである。

採取された不連続面の極のステレオ投影図を図-5.18に示す。また、空洞軸を考慮したクラスター分割結果を表-5.3に示す。

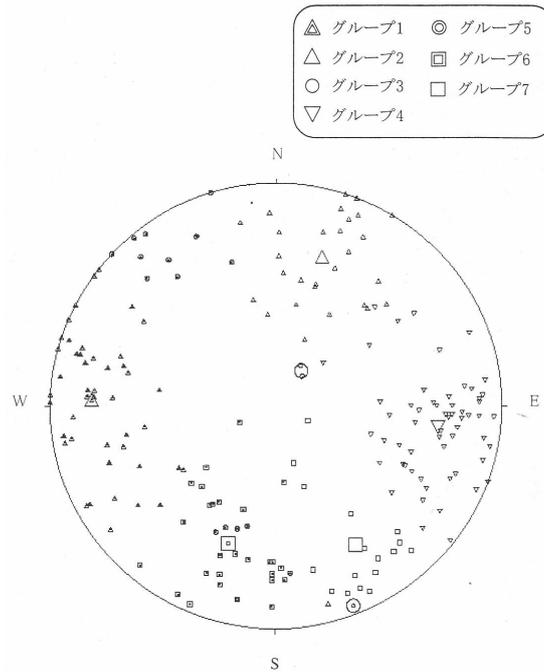


図-5.18 B 試掘坑の不連続面ステレオ投影図

表-5.3 クラスタ分析結果

グループ	平均傾斜角(°)	平均傾斜方向(°)	方位分散係数	平均間隔(m)
1	78.6	271.9	13.4	1.71
2	70.1	17.1	14.8	0.91
3	21.9	35.6	439.4	2.87
4	72.0	97.6	15.0	2.14
5	87.7	158.7	7.7	1.64
6	66.1	198.7	13.3	2.23
7	71.4	150.1	13.5	2.64

移動可能ブロックの発生割合の予測では、繰り返し乱数を発生させ、その結果の平均値で与えた。縦軸を発生割合、横軸を空洞壁面位置とするグラフで表示した。発生割合は0~1の間で表示され、空洞壁面位置はアーチ東端を0としてアーチ沿いの長さで位置を表した。アーチに沿った壁面長さはおよそ35メートルになる。また検証のため、グラフの下に予測の対象となる実際に発生したキーブロックを表示し、その割合をグラフに併記し、比較し易くした。実際に発生したキーブロックの破壊モードもブロック理論によるモード解析と構成不連続面がどの不連続面グループに属するかで決定した。グラフに併記した実際に発生したキーブロックの発生割合は、複合して重なったブロックも考慮した割合である。

検証の際には、実際の割合が予測割合を超えないことが最も重要である。予測値が実際値

を下回るのは非常に危険である。次に、発生割合の凹凸傾向が一致することと、予測値と実際値が一致することが検証の基準となる。

落下破壊ブロックに関する解析結果を図-5.19に示す。図-5.19では、参考のため、平均する前の繰り返し乱数させた値のうち、サンプルとして10個のパターンを示した。実際値は予測値を越えることなく、予測値より下回るものの発生傾向は一致している。

同様にして、平面すべり破壊ブロックに関する解析結果を図-5.20～図-5.24に示す。平面すべり破壊は一つの不連続面に沿ってすべるため、不連続面グループの数だけ破壊モードが存在する。その中で実際に発生したキープロックは平面1、2、4、5に沿ったものであった。それぞれの予測値の比較を図-5.20～図-5.23に示す。図-5.20に示した不連続面グループ1に沿った破壊では、実際値が予測値を上回ることなく、傾向も一致している。ブロック13、20はくさびすべり破壊のブロックであるが、2つのすべり面がいずれも不連続面グループ1に含まれるため、方向の近い二つの不連続面を一つの不連続面として考えて、ここに分類した。図-5.21および図-5.22に示した不連続面グループ2および4をすべり面とする破壊では実際値が予測値内に収まっている。しかし、図-5.23に示した不連続面グループ5に沿ったすべり破壊では、実際値が若干予測値を上回ってしまい発生位置も境界を跨いでいる。実際に発生しなかった破壊モードについての予測計算結果は図-5.24に示した。不連続面3での破壊が予測計算においても発生しなかったのは、実現象と合致している。不連続面6、7に関しては実際には発生しなかったが、予測では発生する結果となった。しかし、発生ブロックが一つだった不連続面4、5よりも相対的に予測割合が小さくなっている。

くさびすべり破壊ブロックに関する解析結果も同様に図-5.25～図-5.30に示す。どの破壊モードでも実際値が予測値を下回った。特に発生ブロックの多かった不連続面グループ1、4に沿ったすべり（図-5.25）は、一部傾向も予測値に漸近している。発生しなかった不連続面グループ組み合わせ（図-5.30）では、どれも予測割合が0.2以下のものか、アーチ部に予測最大値がないものである。

(3) 適用結果のまとめ

本手法は、統計論的なキープロック解析であり、掘削前に掘削予定地で発生するキープロックの傾向を予測しようというものである。統計論的キープロック解析においての本手法の特徴は、ある破壊モードのキープロック発生割合について、最大領域内においても細かく知り、相対的な発生比率ではなく絶対的な割合として求めようというところにある。

全体的に、落下破壊、平面すべり破壊、くさびすべり破壊の順に予測が悪くなる。これは不連続面に沿ってすべる破壊は不連続面の正確な方向に大きく影響を受けるからである。

発生割合を事前に予測することで、掘削前に発生が予測される危険ブロックの傾向（位置

と割合)をつかむことができる。しかし、キーブロックの発生割合を求めることだけでは、支保の位置を決めるのに役立つだけである。本手法を実際の支保設計に生かすには支保力の予測が不可欠である。統計的な不連続面データによる完全な支保力予測は難しいが、事前に得られた不連続面データを最大限に生かすことである程度可能と思われる。また、支保力の予測ができれば、本節で予測した発生割合がさらに有効に使えるようになる。例えば、大きな支保力が必要と予測されても、発生割合の予測が小さければ事前に大きな支保力を導入する設計をするよりも、確定論的キーブロック解析で個々のキーブロックを抽出して個々に対応していく方が支保の効率がよくなる。

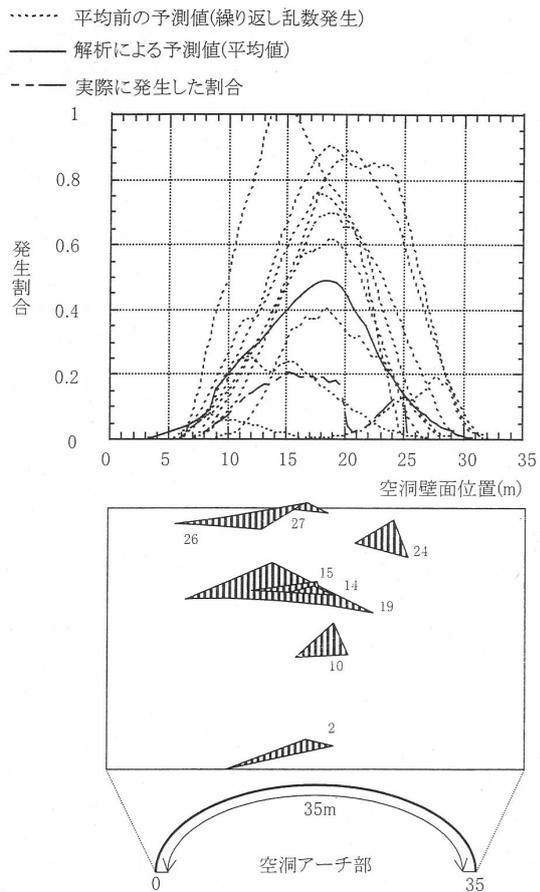


図-5.19 落下型ブロック

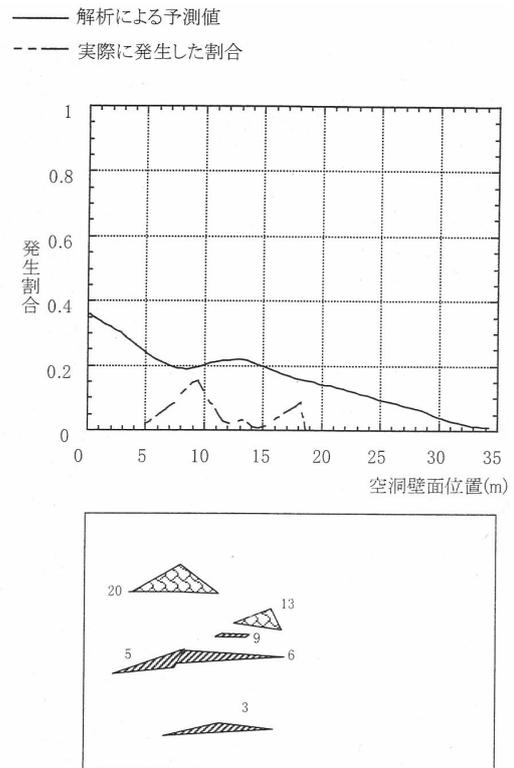


図-5.20 不連続面1の平面すべり

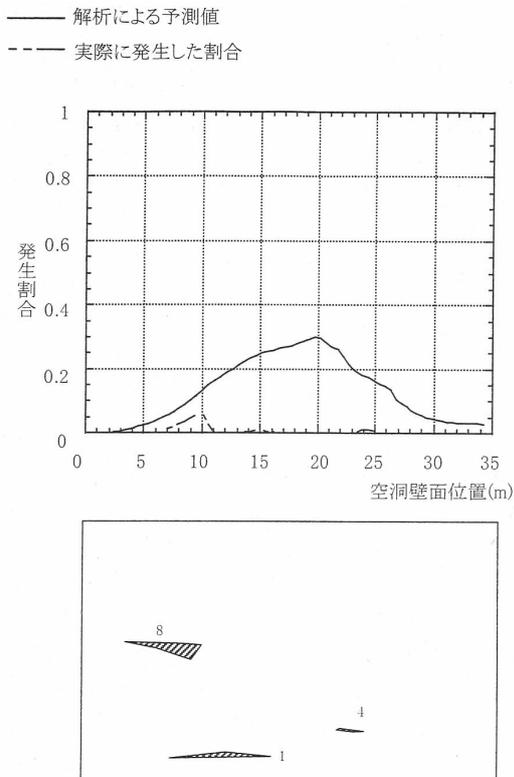


図-5.21 不連続面2の平面すべり

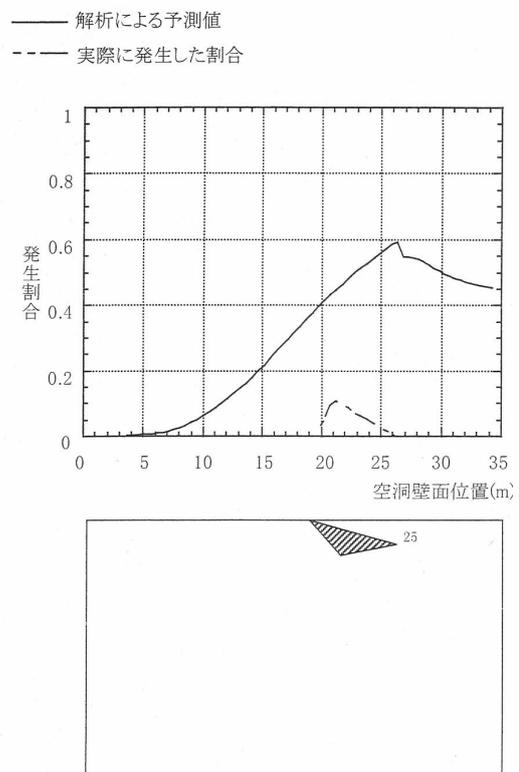


図-5.22 不連続面4の平面すべり

—— 解析による予測値
 --- 実際に発生した割合

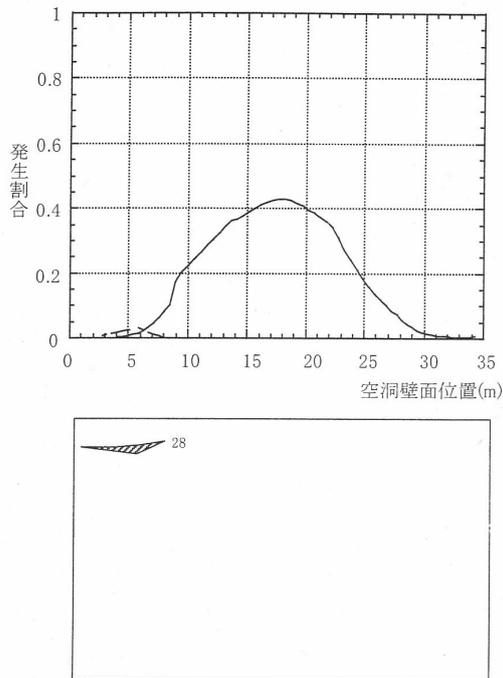
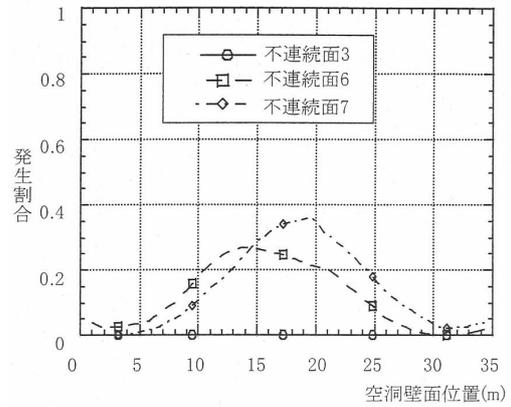


図-5.23 不連続面 5 の平面すべり



注). ○, □, ◇ の印は区別しやすいように表示したもので
 その位置に特別な意味はない.
 以降のFig.においても同様.

図-5.24 施工時には発生しなかった平面すべり

—— 解析による予測値
 --- 実際に発生した割合

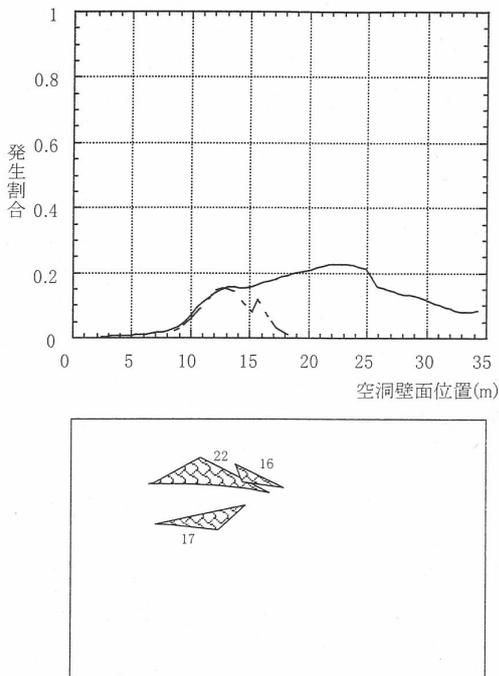


図-5.25 不連続面 1, 4 に沿ったくさびすべり

—— 解析による予測値
 --- 実際に発生した割合

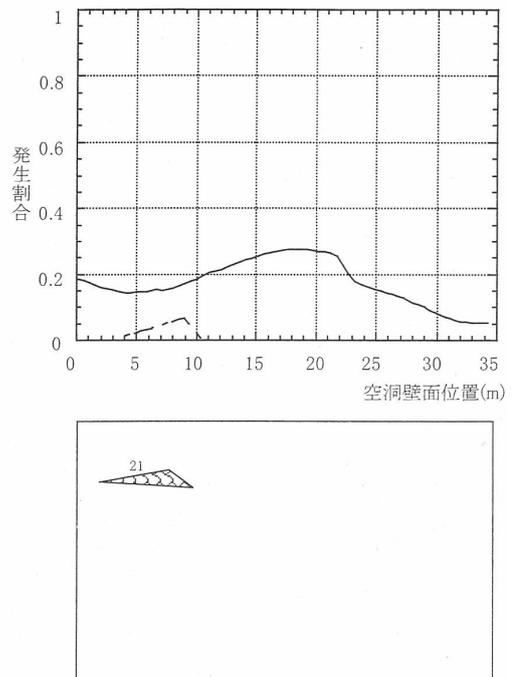


図-5.26 不連続面 1, 6 に沿ったくさびすべり

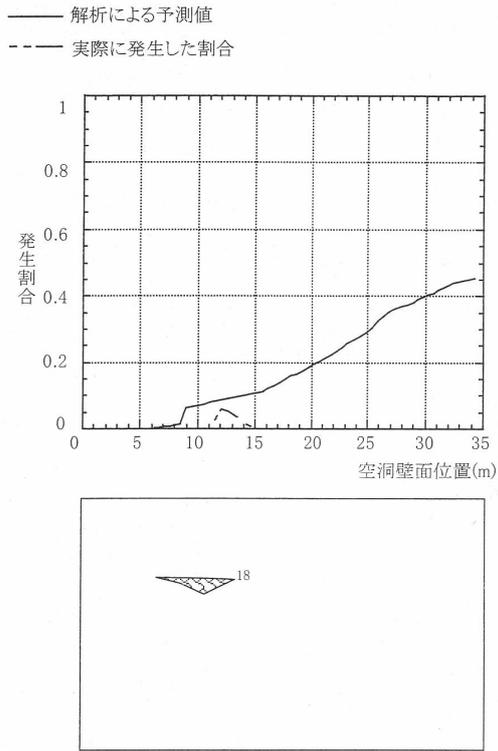


図-5.27 不連続面 2, 4 に沿ったくさびすべり

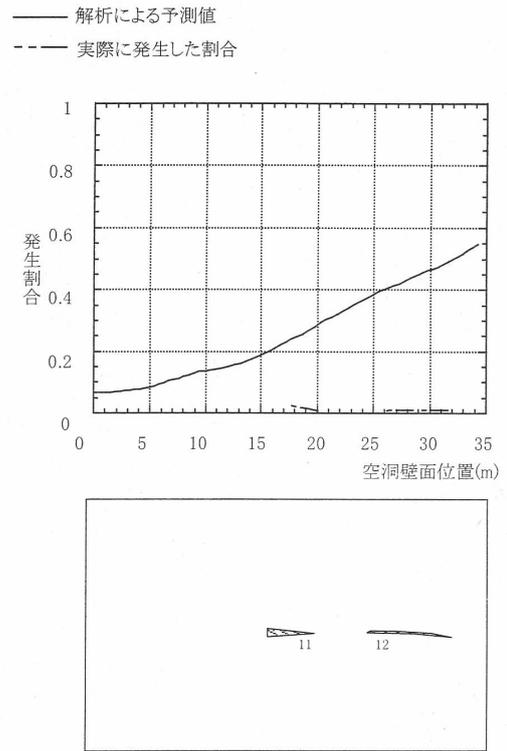


図-5.28 不連続面 2, 5 に沿ったくさびすべり

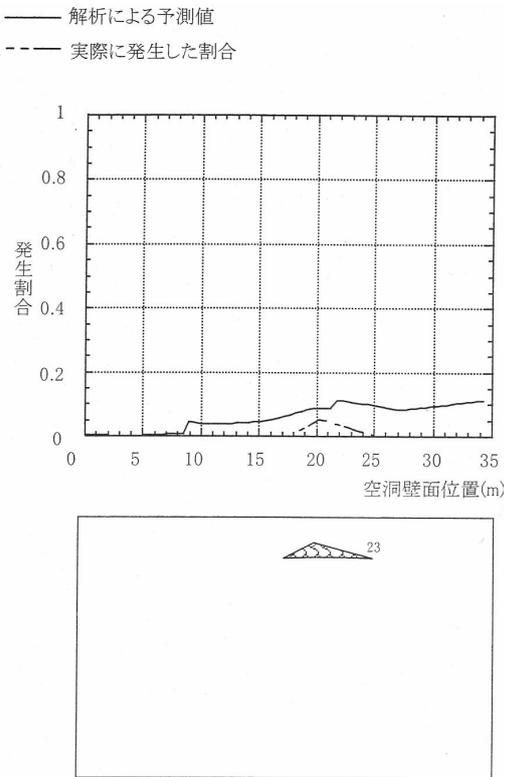


図-5.29 不連続面 3, 4 に沿ったくさびすべり

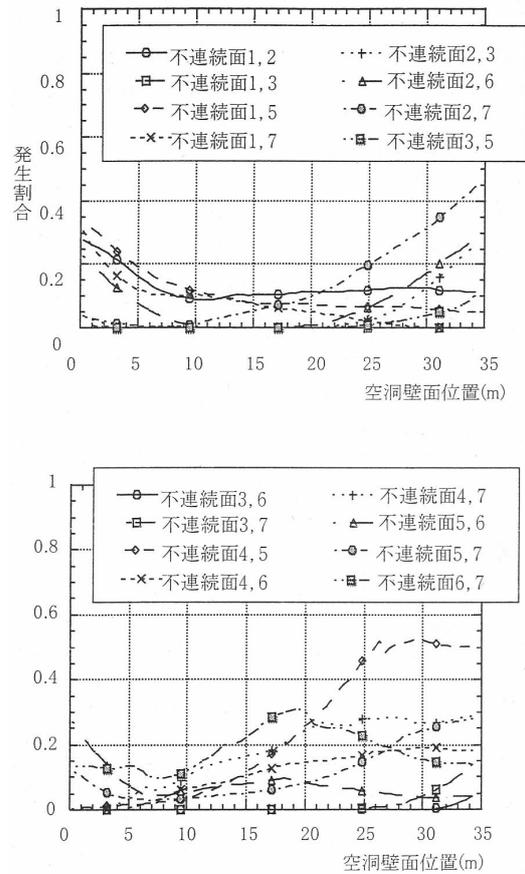


図-5.30 施工時には発生しなかったくさびすべり

5.3.2 地下空洞における破壊確率評価

ここでは、5.2.2節で示した破壊確率の指標を、奥多々良木発電所の本体掘削時の不連続面調査に適用した結果について述べる。発電所空洞は幅 25m、高さ 47m、延長 130m の大規模地下空洞である。地質は流紋岩類とひん岩の貫入岩から成っている。本体部の掘削は高さ 3m ごとの盤下げ掘削であり、合計 10 リフトの掘削である。各盤下げリフトでは、高さ 3m で幅が掘削延長分の切羽スケッチ図が得られる。側壁部でのキーブロック解析は、この切羽スケッチ図を元に各リフトごとに閉領域の検索、移動可能ブロックの抽出、安定計算の手順で実施した。図-5.31はキーブロック解析の結果であり、移動可能なブロックを示している。

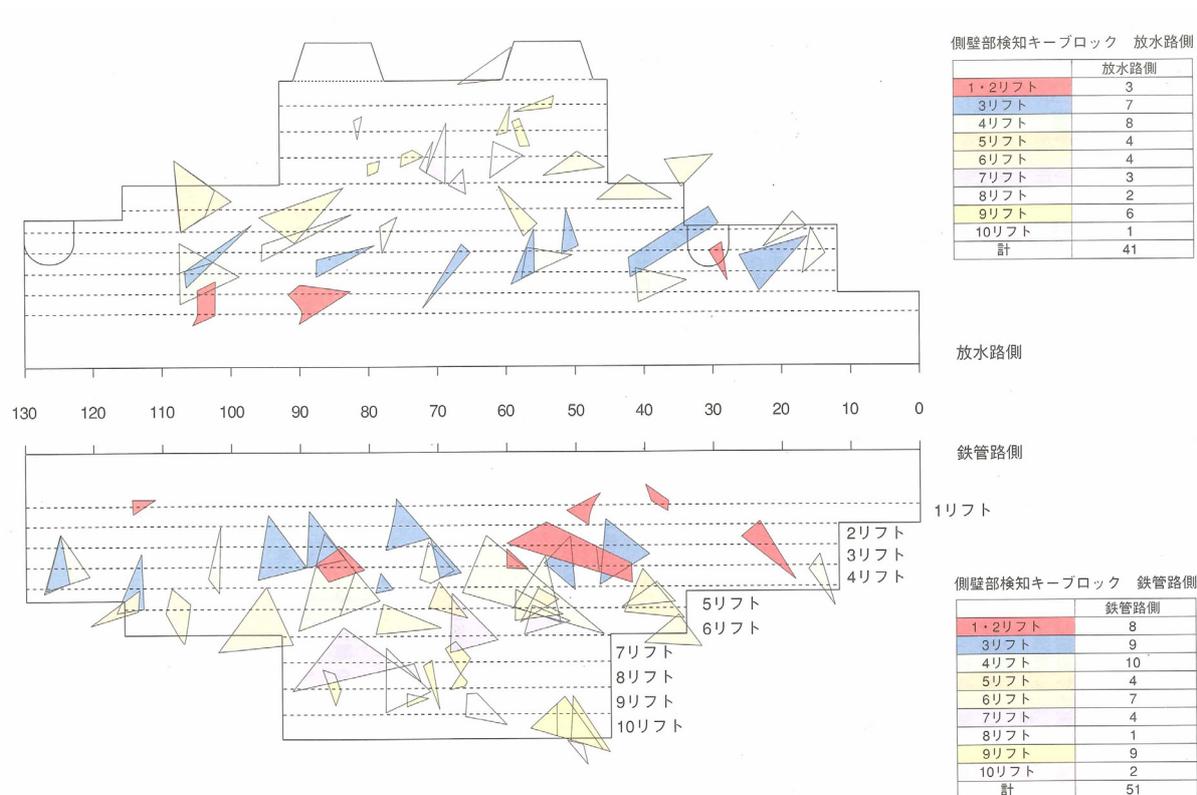


図-5.31 奥多々良木発電所空洞の側壁部におけるキーブロック¹³⁾

前述の手順に従い破壊確率を評価するため、まず不連続面の卓越方向および密度を求めた。図-5.32は、盤下げ掘削のうち 1～6 リフトの不連続面のステレオネットである。これより、最も集中度の高い方向を N76W48N (48/14) とし、その他に N66W79S (79/214)、N24E73W (73/294)、N4W71E (71/86)、N54E78S (78/144) を加えた合計 5 方向に不連続面群を分類した。不連続面密度は、各リフトの観察面の中央の高さにスキャンラインを引いて、このスキャンラインに交差する不連続面の数から計算した。その際は、スキャンライン方向と不連続

面のなす角により修正された真の不連続面密度を求めている。表-5.4にこれらの結果をまとめて示す。不連続面の摩擦角は、現場試験結果にもとづき 32.4° とした。

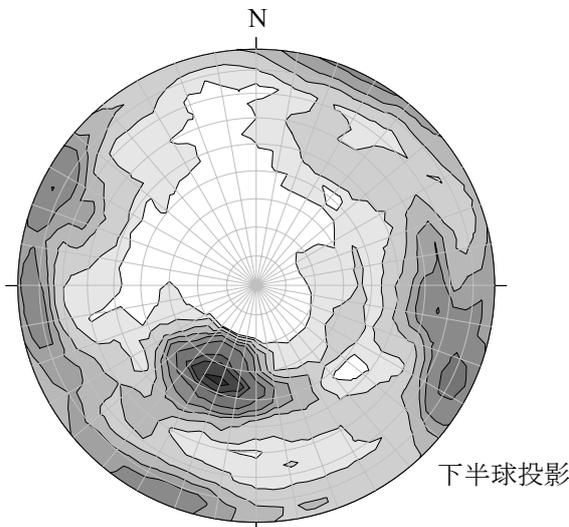


表-5.4 不連続面調査結果

No.	卓越方向		密度 (本/m)	摩擦角 ($^\circ$)
	傾斜	傾斜方位		
1	48	14	0.417	32.4
2	79	214	0.292	32.4
3	73	294	0.385	32.4
4	71	86	0.195	32.4
5	78	144	0.140	32.4
合計			1.428	

側壁面の傾斜は 90° 、傾斜方位は 85°

図-5.32 不連続面のステレオネット図

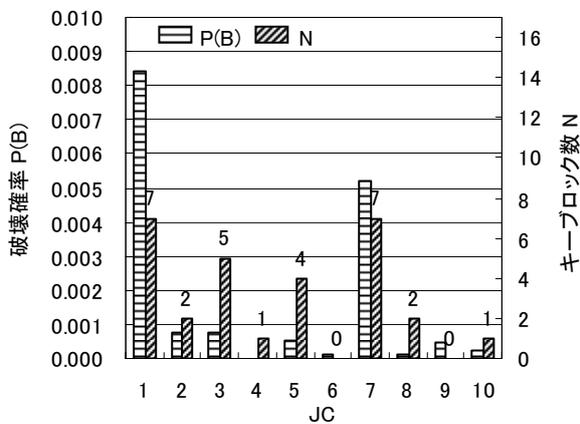
式(5.16)より、5個の卓越方向から3個の不連続面を選ぶ組合せは、 $N_{jc} = 5!/(3!*2!) = 10$ 通りとなる。10通りのそれぞれについて不連続面組合せ確率 $P(JC)$ 、形状指数 K 、不安定指数 F を計算した。このとき、式(5.9)で表される不連続面組合せ確率 $P(JC)$ は掘削面の方向によらないが、形状指数 K および不安定指数 F は掘削面の方向により異なる。したがって、破壊確率の計算は、東壁面（鉄管路川）と西側壁面（放水路側）に分けて実施した。

図-5.33に、不連続面組合せごとの破壊確率と1~6リフトのスケッチ図より実際に検出された移動可能なキープロック数の関係を示した。図-5.33 (a)は東側壁面での破壊確率とキープブロック発生数の分布である。破壊確率は $JC=1:\{1;2;3\}$ が最も大きく、次いで $JC=7:\{2;3;4\}$ が大きい、それ以外は小さい値となっている。実際に検出されたキープブロックは $JC=1:\{1;2;3\}$ 、 $JC=7:\{2;3;4\}$ がそれぞれ7個であり、 $JC=1$ のキープブロック数の比率は破壊確率に比べて小さい。逆に、 $JC=3:\{1;2;5\}$ 、 $JC=5:\{1;3;5\}$ ではキープブロック数は5個、4個であり、破壊確率に比べてキープブロック数が大きい。これは、今回の検討でのキープブロック数の総数は29個と少ないため、ばらつきが大きくなったものと考えられる。ただし、このような予測されないキープブロックが実際には多く出現することもあり得るので、施工時の不連続面調査やキープブロック解析でこのようなブロックを見落とさないようにすることも重要である。

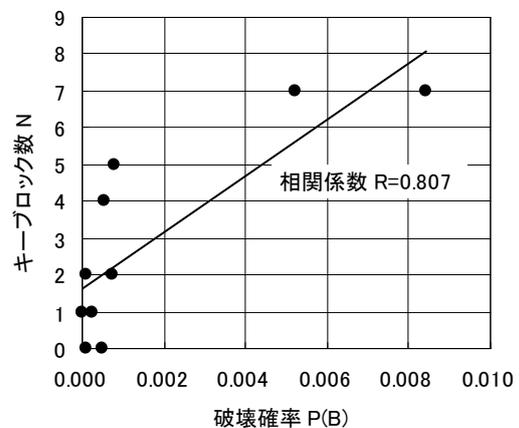
また、図-5.33 (b)に破壊確率 $P(B)$ とキープブロック数の相関を直線近似で示したが、相関係数 R は 0.807 と比較的良い相関が得られた。

図-5.33 (c)は、西側壁面での破壊確率とキープブロック発生数の分布である。東側と異なり最も破壊確率が大きいのは JC=7:{2;3;4}であり、次いで JC=1:{1;2;3}、JC=2:{1;2;4}、JC=3:{1;2;5}と徐々に小さくなっている。検出キープブロック数も 16 個と少ないため、東面と同様に破壊確率とキープブロック数には、ややばらつきが見られるが、図-5.33 (d)に示した相関図では、相関係数 $R=0.827$ とほぼ東面と同程度の良好な相関となった。

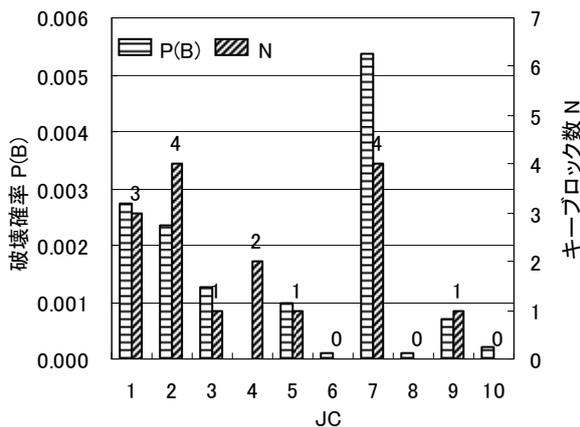
Hatzer 等^{9),10)}は、2箇所のトンネル現場において掘削後の側壁を詳細に調査し、壁面の起伏の状態からブロックの抜け跡を形成する不連続面を抽出して、ブロック破壊確率の検証を行っている。彼らの調査結果でも、破壊確率により予測される危険なキープブロックの頻度と実際に現れたブロックの抜け跡の分布は、相関係数は 0.87 となり非常によい相関を示した。



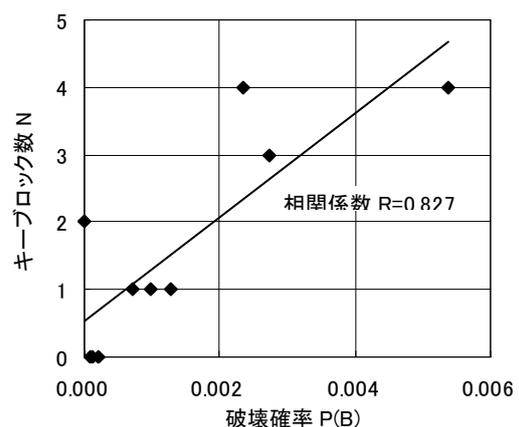
(a)破壊確率とキープブロック数 (東側壁)



(b)破壊確率とキープブロック数の相関 (東側壁)



(c)破壊確率とキープブロック数 (西側壁)



(d)破壊確率とキープブロック数の相関 (西側壁)

図-5.33 ジョイント組合せごとの破壊確率と検出キープブロック

図-5.33のヒストグラムで示した、不連続面組合せごとに得られる破壊確率の総和を取った $\Sigma P(B)$ を考えると、様々の形状のブロックを含んだ総合的な岩盤全体の安定性を評価できる。表-5.5に、東西の側壁面での $\Sigma P(B)$ の計算結果を示す。東側壁面の方が西側壁面より約20%程度大きな数値となっており、東側壁面の方がより崩壊しやすい危険なキーブロックの発生頻度が高いことを示している。同表に示したキーブロックの検出数も東側壁面の方が多くなっており、整合性が取れている。また、図-5.31に示した壁面のキーブロック発生図においても、東側壁面の方が発生数は多く、しかも大きなキーブロックが見られる。このことは、 $\Sigma P(B)$ を岩盤分類の指標として使える可能性を示唆している。重要なことは $\Sigma P(B)$ が不連続面の幾何学的性状に掘削面の方向を考慮した安定性の指標となっていることである。ここで示した例でも、東西壁面で同一の幾何学性状を仮定しているが $\Sigma P(B)$ は異なる数値となっている。不連続面調査の結果から、どの方向に掘削を行った方がより岩盤の安定性が高くなるかというような、工学的な判断に利用できると考えられる。

以上のことより、不連続面調査の結果と掘削面の方向をもとにしたブロックの破壊確率 $P(B)$ を用いて、危険なキーブロックの発生を予測する手法の有効性を示すことが出来た。破壊確率 $P(B)$ のヒストグラムは、破壊しやすいブロックを評価するのに有効である。また、破壊確率の総和を取ることで、不連続面を含む岩盤全体の安定性評価を行うことが可能である。

表-5.5 破壊確率の総和とキーブロック総数

位置	$\Sigma P(B)$	キーブロック数
東側壁面 (鉄管路側)	0.0167	29
西側壁面 (放水路側)	0.0138	16

5.3.3 トンネルにおける有限性の検討結果

本節では、5.2.3節で述べた方法を用いて、トンネル現場で得られた不連続面調査結果から予測される円盤半径の設定とブロックの発生個数、移動可能ブロックの発生個数などの関係について考える。解析では、まず、ブロックの同定を行ない、その後、検出されたブロックの移動可能性について考えることにする。

(1) 栗東トンネル

第二名神高速道路栗東トンネルは、図-5.34に示される掘削幅が18m、掘削断面積が約180m²の大断面トンネルである。これを従来の2車線高速道路と比較すれば、掘削幅が約2倍、掘削断面積が約2.5倍となる。このような大断面トンネルを、道路のような線上構造物として長い延長を施工した例は皆無であり、技術的な課題や不明な点も多く、現地においてそれらを解明しようと試験施工が行なわれてきた。

大断面トンネルの施工を効率的かつ安全に行なうためのポイントとして、地質状況を的確に把握すること、支保部材を効率的かつ効果的に施工すること、切羽の安定性の確保として特に天端からの大きなブロックの抜け落ちに対して配慮することなどが考えられる。そこで、TBM導坑の施工後、そこから得られた事前状況から地山状況を把握、導坑の空間を利用した事前地山補強、これらを活かした上での本坑拡張掘削の施工などを命題とする導坑先進掘削拡張工法が採用された。その一貫として、ブロック理論に基づく支保設計の試験施工が実施された。そこで、本節では、有限性を考慮したキーブロック解析を試みた。

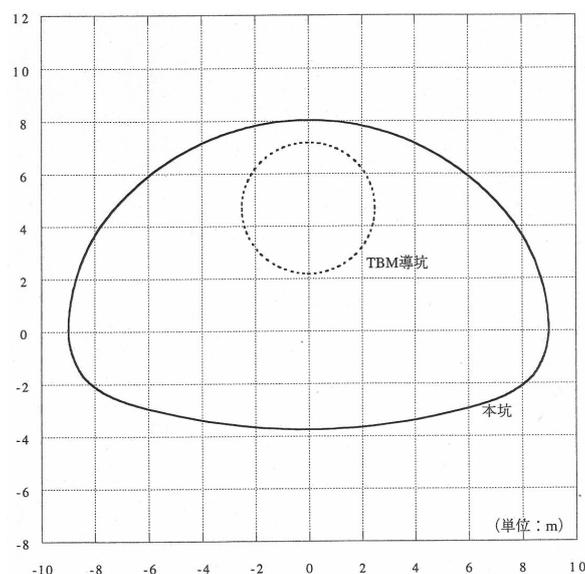


図-5.34 栗東トンネルの断面

(2) 不連続面情報

栗東トンネル上り線の地質は、全線粗粒黒雲母花崗岩（田上花崗岩）であり、断層破碎帯を除けば弾性波速度 4.7km/s 以上の硬岩であり、ブロック理論を用いるのに適した岩であると言える。断層破碎帯が多く分布する区間は、その周辺にも小断層・せん断帯が多く存在すると予測され、湧水のおそれもあり、ブロックが多く形成される可能性の高い区間である。

不連続面情報は、栗東トンネル上り線の TBM 導坑から得られたものを用いる。ブロック理論では、不連続面が無限に広がるという仮定の下で行なわれるため、方向データ（走向、傾斜）と 1 点の座標値が分かれば、不連続面を平面方程式で表現することができる。一方、不連続面を有限の円盤と仮定する場合には、さらに、円盤の中心の位置と半径が必要になる。

不連続面が観察される場合には、**図-5. 35**に示す 3 通りの出現の仕方がある。具体的には、(a)他の不連続面に当たって終わる、もしくは計測範囲内で両方に端点を持つもの、(b)計測範囲内に片方の端点を持ち、片方は計測範囲外に連続するもの、(c)両方が計測範囲外に連続するものが考えられる¹⁶⁾。

この内、(a)の場合には、**図-5. 36**に示す通り両端点を結ぶ線分の垂直二等分線上に中心が存在することになる。半径の値が分かれば、中心の位置は確定するため、半径について、確率論的な扱いをする場合には、**図-5. 36**で、 $0 \leq z < 1$ （安全側に立ち、円盤の掘削面により切り取られている部分の大きな方が常に空洞の外側にあるように設定）、または、 $-1 < z < 1$ （確率に対して忠実に、大きな方が内外同じ割合で存在するように設定）の範囲で一様分布にする方法が考えられる。決定論的な扱いをする場合には、半径を事前に設定すれば、両端点を通り空洞の外側に中心を持つという条件だけで決定できる。

しかし(b)、(c)の場合には、確率論的に扱う場合には特に有力な方法はない。(b)の場合は、片端点を通るように十分大きな半径の値にすること、(c)は十分大きな半径を設定し、観察ウィンドウの midpoint に中心を持つようにすることなど、決定論的、確率論的ともに同じ扱いが妥当であると考えられる。

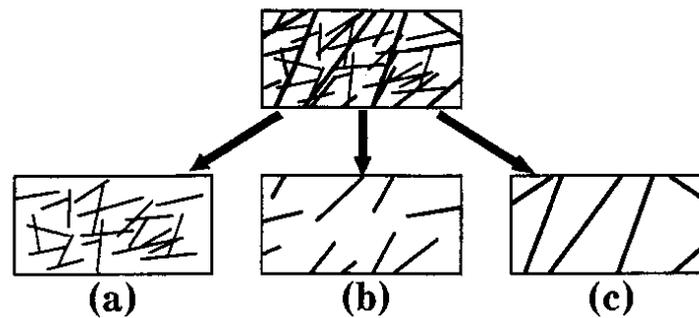
ただし、これらは観察ウィンドウがある程度大きい時に用いることができる。ブロック理論では、無限に不連続面が広がるという仮定のために、考慮する不連続面の取捨選択が大切である。ブロック理論では、取捨選択の基準は特になく、解析の際の重要な問題となる。

TBM 導坑での観察ウィンドウは、本坑に比べて十分小さい。そのため導坑の不連続面情報から有限性の設定が行ないにくい。そこで、ブロック理論を用いるのに適した不連続面を用いることにする。不連続面は、走向、傾斜、1 点の座標で決定されるため、ここでは、観察された任意の 1 点を中心とするある一定の半径を持つ円盤として表現することにする。TBM 導坑は本坑に比べて十分小さいため、中心位置を決定するための十分な情報が得られない

め、このように設定する。

方向性と円盤の中心位置が決定されたため、後は半径を決定すればよい。半径の設定のために有効な基準などは特にないため、ここでは、トンネル径の適当な倍数としてみる。具体的には、トンネルの最大径（掘削幅）の約18mの1.5倍、2倍、2.5倍のそれぞれ、27m、36m、45mに設定する。

なお、対象領域は図-5.37に示すようにモデル化し、不連続面を発生させたものを図-5.38に示す。



両端が観察される 片端が観察される 両端とも観察されない

図-5.35 観察ウィンドウでの不連続面端部の現れ方

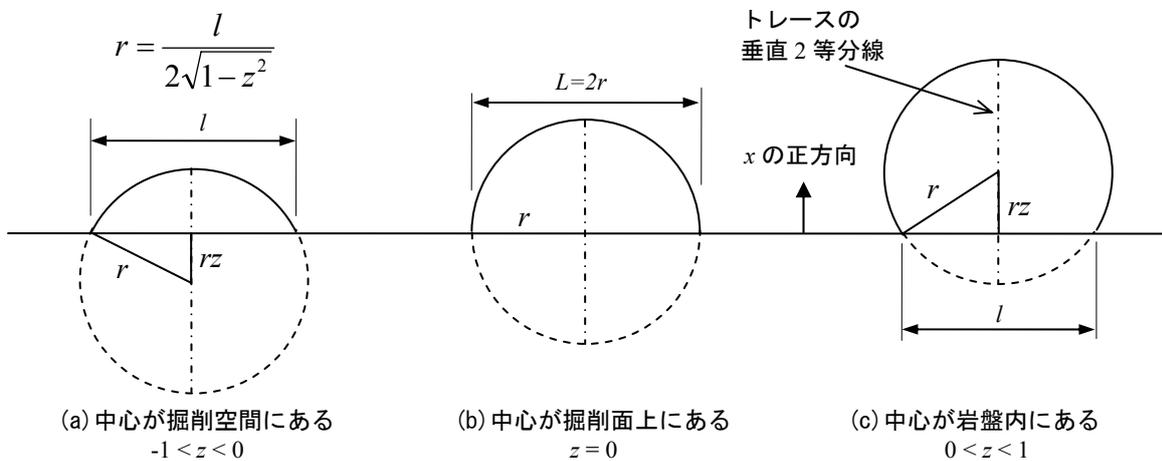


図-5.36 不連続面円盤半径とトレース長の関係

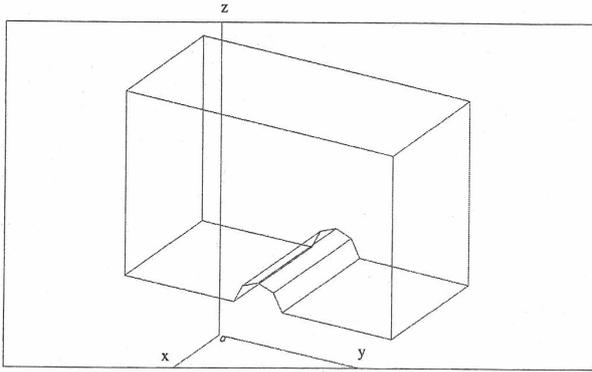


図-5.37 解析対象領域のモデル化

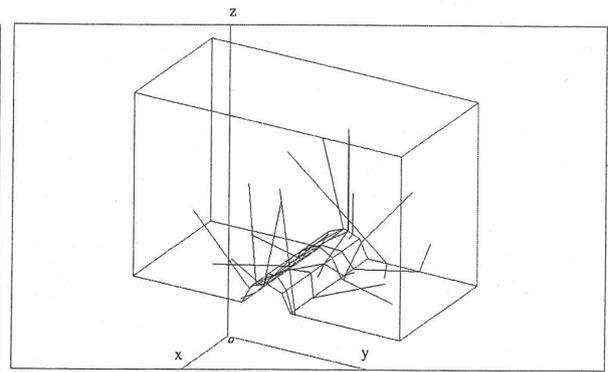


図-5.38 発生させた不連続面

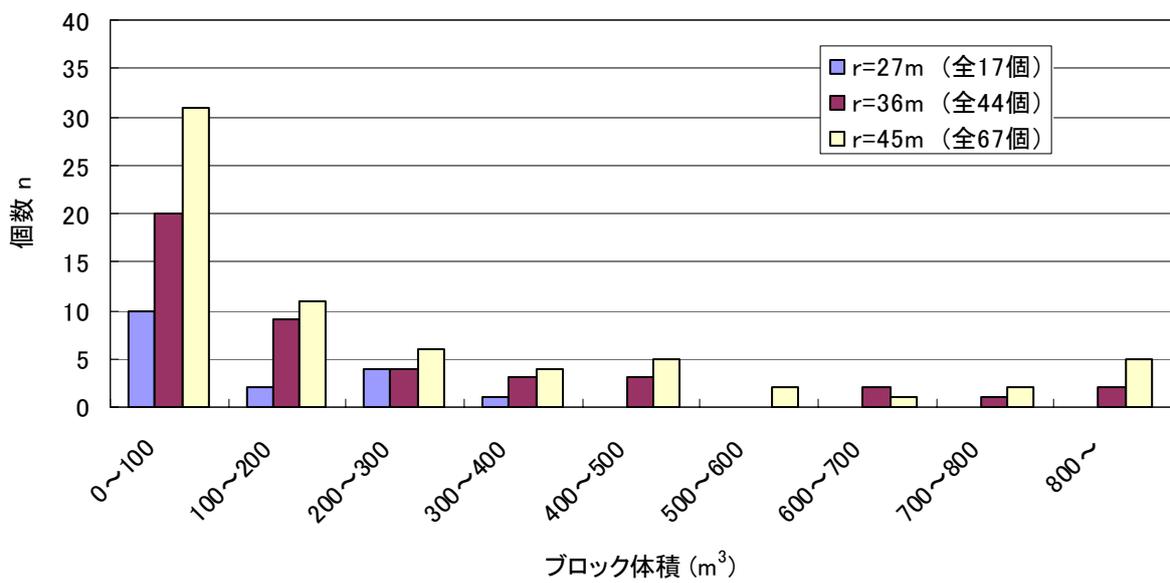


図-5.39 有限ブロックの体積頻度分布

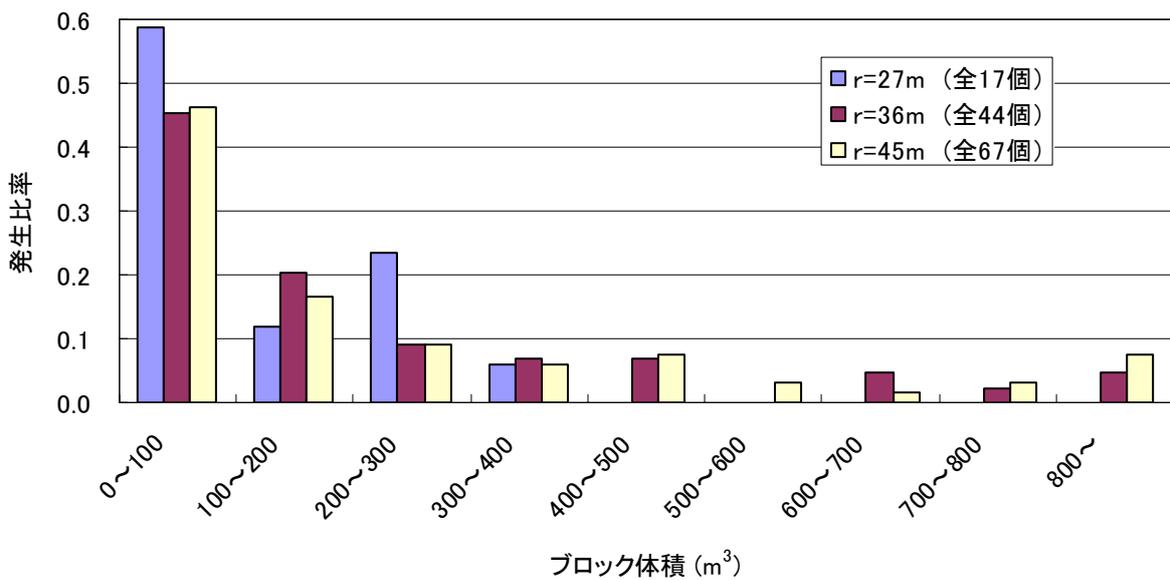


図-5.40 有限ブロックの体積別発生比率

(3) TBM 導坑からの解析結果

掘削面を STA334~STA337 とし、半径を 27m、36m、45m の 3 ケースとして解析を実施した。図-5.39に、それぞれの有限ブロックの体積分布ヒストグラムを示す。検出されたブロックの数は半径により大きな違いが生じており、 $r=27\text{m}$ では 17 個、 $r=36\text{m}$ では 44 個、 $r=45\text{m}$ では 67 個となった。

半径が大きくなるほど、発生するブロックの数が大きいのは当然であるが、半径の増加する比率に比べ、ブロック数の増加する比率の方が大きくなっている。図-5.41に STA334+25m ~+75m において形成された有限ブロックを示す。図の色を塗った部分は解析でブロックが形成されていた部分である。これを見れば、半径が大きくなるほど、多くのブロックが形成されているのは当然であるが、トンネル軸に近い走向を持つ不連続面の影響が大きいことが分かる。

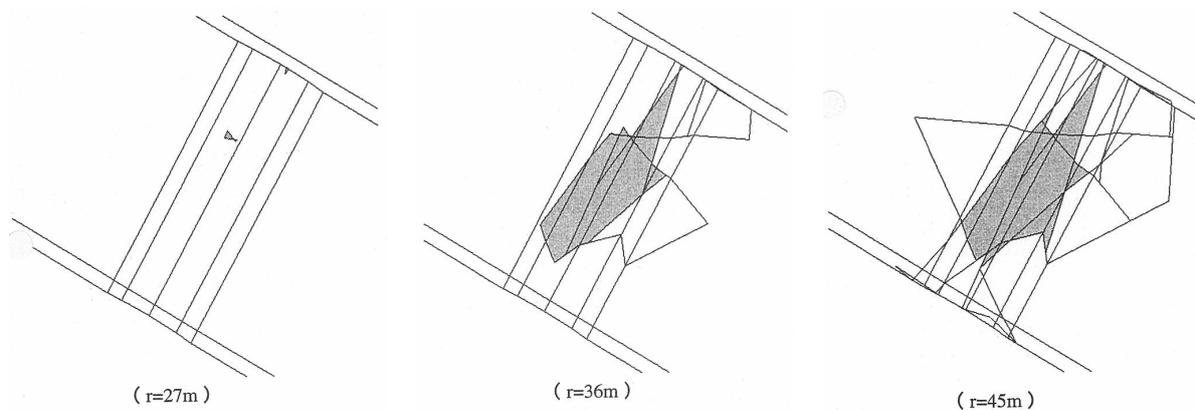


図-5.41 STA334+25m~+75m において形成された有限ブロック

検出ブロックの体積について考える。図-5.40にはそれぞれの半径で形成されるブロックの体積のヒストグラムを示した。ブロックの最大体積を比較すると、半径が 27m、36m、45m でそれぞれ約 340m^3 、約 900m^3 、約 $1,750\text{m}^3$ となっており、半径を大きく設定するほど大きなブロックが形成されることになる。また、半径 36m および半径 45m での最大体積のブロックは、結果的に移動不可能ブロックとなった。移動不可能ブロックは、先細りブロックとなることが多い。先細りブロックとは、掘削面から見れば広がっているブロックであるため、巨大になることが多い。

図-5.40には、ブロックの体積分布を全発生個数の比率で示した。半径が 36m と 45m では、発生比率の分布は非常に似通ったものとなっている。いずれも小さいブロックほど発生比率が大きく、体積が大きくなるに従い発生比率は減少してゆく。半径が 27m の場合は、発生個数が少ないため、ばらつきが大きいのが、傾向としては同じである。ただし、半径が小さいため、一定値以上の体積のブロックは発生しなくなる。

(4) 検出キーブロック

検出ブロックの構成面についてブロック理論を用いて対象ブロックの移動可能性判定と極限平衡解析を行ない、キーブロックの特定を行なう。図-5.42にそれぞれの半径で形成されるブロックの不足力についてのヒストグラムを示す。ここで、不足力は安全率1に対する不足力とする。ブロック理論では5つのタイプのブロックに分類されるが、3次元の閉領域をブロックとしているため、無限ブロックは含まれない。不足力が0でないブロック、つまり、安全率が1以下のブロックがキーブロックにあたり、不足力が0のブロックが残りの3つのタイプのブロック（安定ブロック、潜在的キーブロック、先細りブロック）にあたる。

キーブロックと判定されたものは、半径が27mでは8個（ブロック総数17個の内の47%）、半径36mでは19個（ブロック総数44個の内の43%）、半径45mでは24個（ブロック総数67個の内の36%）という結果になっている。半径が大きくなるほどキーブロック数が増加するのは当然であるが、形成されるブロックに占めるキーブロックの割合は減少する傾向にあることが分かる。半径が27mの場合は数自体が少ないため、単純な比較は難しい。半径が36mから45mになれば、形成されるブロックの数は約1.52倍になるが、キーブロックの数は1.26倍にしかならない。ただし、ここでは小さなブロックは考慮せず、体積が 2m^3 以上のものだけを対象にした。

施工について考えれば、小さなブロックのすべてに対応することは現実的でない。ブロック対策についての施工条件として、吹付けコンクリート等の初期支保工の強度で2.0m四方のブロックの滑動を抑止できると仮定すると、体積が 8m^3 の落下ブロックまでなら初期の支保工で対応することができ、不足力が20tf以上のブロックは追加補強が必要なブロックとなる。表-5.6は、ブロックが形成されるか、標準支保で安定か（ $20\text{tf} \geq \text{不足力} > 0\text{tf}$ ）、標準支保で滑動するか（ $\text{不足力} \geq 20\text{tf}$ ）の3つの観点からまとめたものである。施工条件が同じように与えられるとして、不足力が20tf以上のものだけについても考えると、半径が27mでは7個、半径が36mでは14個、半径が45mでは15個ということになっている。半径が36mの場合と半径が45mの場合とでは、1個しか異ならず、その差はほとんどない。逆に、不足力が20tf未満のブロックの数は、半径36mでは4個、半径45mでは9個と大きく増加している。これらから、半径を大きくしても、追加補強が必要なブロックの数はそれほど増加しないが、もともとの支保工で対処できるブロックの数は大きく増加するという傾向が認められる。

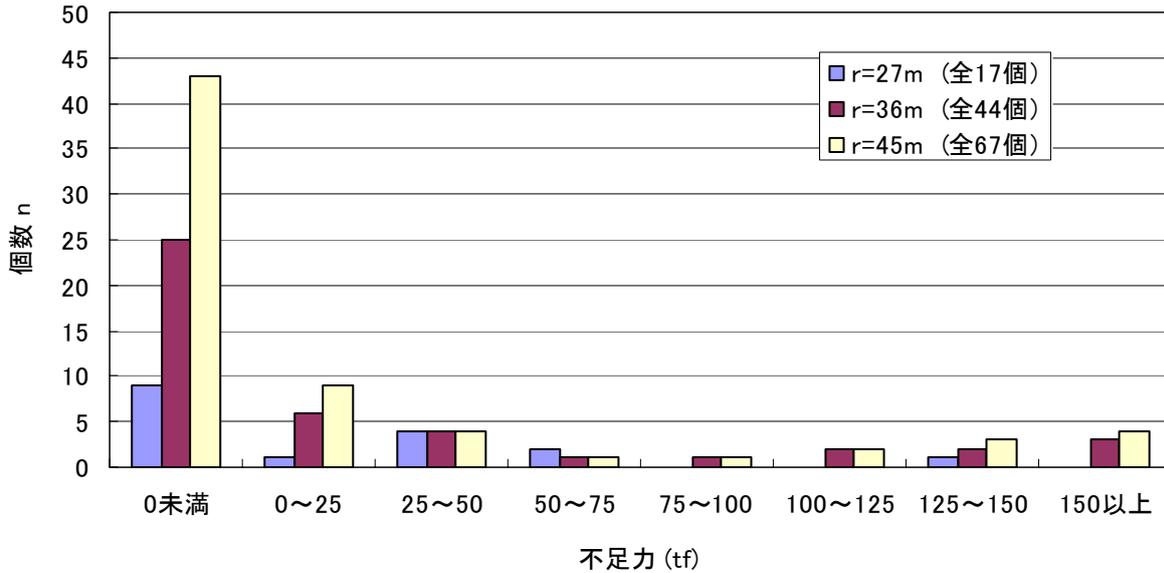


図-5.42 発生ブロックの不足力分布

表-5.6 不連続面半径と不足力によるブロック個数の比較

	半径 27m	半径 36m	半径 45m
全ブロック	17	44	67
0tf<不足力<20tf (標準支保で安定)	1	4	9
不足力>20tf (追加補強を要する)	7	14	15

(5) 考察

TBM 導坑の不連続面情報を用いた解析についてこれまで示した。ここで、解析に用いた不連続面は TBM 導坑で観察され、キーブロックを形成する可能性の高い不連続面と特定されたものであり、任意の 1 点を中心とする半径がそれぞれ 27m、36m、45m の円盤モデルで表現した。これによれば、以下の傾向が得られる。

- ①半径の増加に伴い、ブロック形成個数が飛躍的に増加する。
- ②半径の増加に伴い、形成ブロックに占めるキーブロックの割合が減少する。
- ③半径 27m の場合は形成ブロックもキーブロックも個数が少ない。
- ④半径 36m の場合と半径 45m の場合では、キーブロックの個数にあまり差がない。

これらの原因について考える。

今回は 3 次元の閉領域をブロックとして、ブロックと同定されたものの構成不連続面に対してブロック理論を用いた。そのため、図-5.43(a)に示すような不連続面 f_1, f_2, f_3 で囲まれた

領域が別の不連続面 f_3 で分割されている場合は、別個のブロック a, b として考える。これにより不連続面 f_3 が存在していない（そこまで延長していない）場合に形成されるより大きなブロック c については考慮できない。半径が大きくなるほど、小さなブロックが大量に存在するのはこれらのことが関係していると考えられる。また、不連続面が多くのブロックと交差するため、ブロックの構成面の数が増加し、条件の数が増えたために移動可能な条件を満たしにくくなったことも考えられる。

また、長さについても考える。半径の平均値からトレース長の平均値への変換においては、**図-5.36**で $z=0.5$ とした場合をトレース長の平均値とすれば、トレース長の平均値は半径の平均値の $\sqrt{2}$ 倍で与えられることになる。これによれば、半径 27m、36m、45m はそれぞれ、約 38m、約 51m、約 63m のトレース長に変換される。例えば、ダム基礎などのような広大な露頭においてもこのような長いトレースが多く観察されることはあまりない。これらは、工学的な判断から実際に想定されるよりも大きな不連続面として表現されたことになる。一般的に、大きなブロックほど、実際にキーブロックが形成されている可能性は小さい。そこで、半径をさまざまな値に変化させた場合について検討し、予測の段階では、大きな半径の値でしか形成されないものを除外する必要があると考えられる。これらにより、不連続面の有限性を考慮することが、実際には形成される可能性が少ないが、支保には多大な労力を必要とするブロックに対する判定基準となりうると考える。ただし、これらは予測の段階の話で、本坑掘削時には無限に広がるという仮定で行ってもよい。つまり、有限性を考慮することは、先行補強の実施の可否の基準として用いる指標となりうると考える。

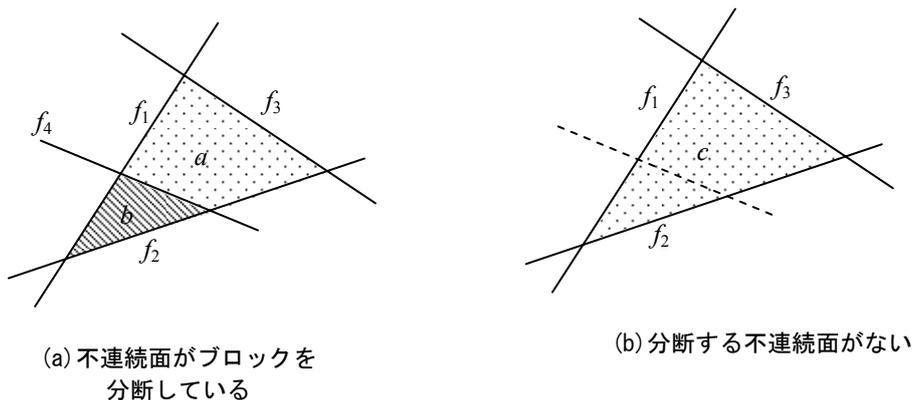


図-5.43 閉ループの検出

5.4 5章のまとめ

本章の研究の目的は、不連続性岩盤の安定性評価に対し、キーブロック解析の適用を図る場合の課題点について論じるとともに、新たなキーブロック解析の手法を提案して、その適用の可能性を検討することである。以下に得られた成果を述べる。

- (1) キーブロック解析の現状技術レベルにおける課題点として①情報化施工でのキーブロック解析の位置付け②入力データの不確実性③事前設計への活用、④不連続面の有限性の検討、⑤観察手法の迅速性、⑥調査する不連続面規模の基準、⑦不連続面強度特性の評価、⑧地山応力の評価を挙げて論じるとともに、将来展望について述べた。
- (2) 確率統計的手法によるキーブロック予測する手法について検討した。まず、事前の不連続面調査結果をもとに空洞掘削時のキーブロックの発生状況を予測し、実際の掘削時に発見されたキーブロックの発生状況と比較することを試みた。試掘坑での調査結果からクラスター分析を行い卓越方向群に分けて卓越方向群ごとの傾斜、傾斜方位、方位分散計数、平均間隔を求め、これらをパラメータとして空洞アーチに不連続面を乱数にて発生させて出現するキーブロックを予測した。その結果、実測結果によるキーブロックの発生割合は、予測値による発生割合を超えないこと、アーチ周方向の発生傾向が良く一致していることが示された。また、全体的に、落下型、一面すべり、二面すべりの順に予測精度が悪くなった。これは、この破壊モードに順に、不連続面方向の変化が破壊モードおよび安定性に与える影響が大きいためである。
- (3) 破壊確率により危険なキーブロックを統計的に予測する手法について検討した。これは、不連続面組合せの確率関数 $P(JC)$ 、ジョイントピラミッドの形状指数 K 、ジョイントピラミッドの不安定指数 F の積として、ブロックの破壊確率 $P(B)$ を定義して、最も出現しやすく、かつすべり破壊しやすい危険なキーブロックを評価しようとするものである。実際の地下空洞側壁でのキーブロック解析の結果と比較して、各不連続面の組合せと掘削面の方向によって求まる破壊確率と実際のキーブロックの発生頻度は、相関係数 0.8 前後と比較的良好な相関が得られ、事前評価の一手法となり得ることを示した。
- (4) 不連続面の岩盤中での広がりをも有限な円盤と仮定した場合の、有限ブロックの検出方法について述べたのちに、円盤の半径の変化がキーブロックの形成に与える影響を検討した。その結果、半径が大きくなるとブロックの形成個数は増大するが、追加導入力を必要とするキーブロックの個数は、半径がトンネル径の 2 倍以上となるとあまり変化しない傾向が得られた。

参考文献

- 1) Yu, Q., Ohnishi, Y. G, Xue and Chen, D. : An approach to identification of three dimensional rock block, Proceedings of International Symposium on Imageing Applications in Geology, Lige, 1999
- 2) Barton, N. R. : Review of a new share strength criterion for rock joints, Engineering Geology, Elsevier. Vil.7, pp.287-332, 1973
- 3) 大石富彦, 袋井肇, 瀬岡正彦 : 不連続面解析を用いた情報化施工の実際と今後の展望, 電力土木, No.276, pp.24-28, 1998
- 4) Goodman, R. E. and Shi, Gen-Hua : Finding 3-D maximum key blocks on unrolled joint trace maps of tunnel surfaces, Rock Mechanics contributions and challenges, rotterdam, pp.219-228, 1990
- 5) Priest, S. D., and Hudson, J. A., : Discontinuity Spacing in Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.13, pp.135-148, 1976
- 6) Hudson, J. A., and Priest, S. D., : Discontinuities and rock mass geometry, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.16, pp.339-362, 1979
- 7) Terzaghi, R., : Sources of error in joint survey, Geotechnique, Vol.15, pp.287-304, 1965
- 8) Mauldon, M., : Relative probabilities of joint intersection, Proceedings of 33rd U.S. Rock Mechanics Symposium, Santa Fe, June, 1992
- 9) Hatzor, Y., : The Block Failure Likelihood: A Contribution to Rock Engineering in Blocky Rock Mass, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.30, No.7, pp.1591-1597, 1993
- 10) Hatzor, Y., and Goodman, R., E., : Application of block theory and the critical key block concept to tunneling: Two case histories, Fractured and Jointed Rock Mass, pp.663-669, 1995
- 11) 手塚昌信, 大西有三, 田中誠, 西村毅 : 大規模地下空洞掘削時におけるキーブロック解析, 土木学会論文集 VI 卷, 609, VI-41, pp.73-85, 1998
- 12) Goodman, R.E. and Shi, Gen-hua : *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*, Prentice-Hall, 1985
- 13) 手塚昌信 : 大規模岩盤地下空洞の合理的な設計・施工に関する研究, 京都大学博士論文, 1999
- 14) Lin D., Fairfurst, C. and Starfield, A. M., : Goemechanical Identification of Three-dimensional Rock Block SystemUsing Topological Technique, Int. J. Rock Mech. Sci. Min. & Geomech. Abstr., Vol.25, No.3, pp.139-147, 1988
- 15) 池川洋二郎 : 岩盤不連続面構造の立体幾何形状のコンピュータ処理に用いるダイレクテッド・ボディについて, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.31-38, 1994
- 16) 大西有三, 中川誠司, 田中誠 : 岩盤節理の幾何学的分布性状の推定に関する研究, 土木学会論文集, 第 499 号/III-28, pp.59-68, 1994

第6章 結 論

本研究で得られた結論を各章ごとに記すと以下の通りである。

2章では、キーブロック解析の入力情報となる不連続面の調査方法および評価方法について述べた。また、不連続面のモデル化と評価の一例として、花崗岩地域の露頭調査を実施し、2次元の不連続面ネットワークモデルの作成を行い、透水場としての水みちの形成に注目して、不連続面密度や不連続面の連結性の評価を実施した。その結果、不連続面密度が水みちの形成に重要な影響を与えることを示した。さらに、不連続面調査の定量化を行う方法として、ステレオロジーによる方法を提案し、地下空洞の現場で不連続面調査を行い本手法の適用を試みた。取得したデータを本手法で解析した結果、3つの不連続面群とそれらの分布密度を特定することが可能となった。また、別途実施した、走向傾斜の測定結果と比較して、整合性のある卓越方向のデータが得られ、本手法の妥当性を示すことができた。

3章では、キーブロック解析の基本的な考え方を述べるとともに、理論の拡張として凹型ブロックの判定方法および回転モードのキーブロックに関する検討を加えた。キーブロック解析の基本条件は、位置と方向性を与条件として無限な平面で囲まれた凸型岩盤ブロックの剛体移動によるすべり破壊の検討を行うものであり、移動可能性の検討、すべりモードの検討、安定解析の3段階で解析を行うものである。これらの基本条件下におけるキーブロック解析は、岩盤構造物の設計や安全性評価において十分に有力な手段といえるが、実際の岩盤の不連続面に起因する不安定化や崩壊のメカニズムはより複雑なモードが存在する。そこで、まず凹型ブロックに対する移動可能性の判定法について検討した。研究した手法では、ステレオ投影法と行列計算を組み合わせたもので、凸型、凹型ブロックのいずれに対しても、ブロックの有限性判定が行えることを示した。次に、回転モードのブロック破壊について検討した。回転モードについては、4面体ブロックに限定して検討を行い、回転移動の可能性、回転モードの決定法について述べた。

4章では、大規模地下空洞の掘削時においてキーブロック解析を運用するシステムを確立するための手法と実現場への適用について述べた。実際の掘削中の現場においてキーブロック解析を導入することにより、補強が必要な部分について重点的に補強工を実施し、それ以外の部分については軽い支保設計とし、全体としての支保の数量を低減し経済的かつ合理的な地下空洞の設計・施工を実現することが可能になることを示した。

キーブロック解析にもとづく情報化施工を実施した結果、アーチ掘削時には合計28個のキ

ーブロックに対して追加補強を実施した。追加補強の内容は、キーブロックの大きさ、不足する導入力大きさを考慮して、追加ロックボルト、追加吹付けコンクリート、追加 PS アンカーを適宜施工した。その結果、発見されたキーブロックに対して、適切な補強工の設計・施工を実施することによりアーチ天端の変位はほとんど発生せず、アーチ部での変状も観測されなかった。

また、盤下げ掘削時には追加補強を必要とするキーブロックは発生しなかった。これは、盤下げ掘削時には、出現するキーブロックに対して前リフトまでの支保工かが期待できること、および破壊モードがすべり型であり、自重による不連続面耐力が期待できることが、その要因となっていると考えられる。

さらに、事前検討における不連続面物性値の設定法の妥当性に関する検討、キーブロックを形成する不連続面の方向性に関する検討を行った。

5章では、確率統計的な手法を用いて、キーブロックを予測する手法について述べたものである。まず、事前の不連続面調査結果をもとに空洞掘削時のキーブロックの発生状況を予測し、実際の掘削時に発見されたキーブロックの発生状況と比較することを試みた。試掘坑での調査結果からクラスター分析を行い卓越方向群に分けて卓越方向群ごとの傾斜、傾斜方位、方位分散計数、平均間隔を求め、これらをパラメータとして空洞アーチに不連続面を乱数にて発生させて出現するキーブロックを予測した。その結果、実測結果によるキーブロックの発生割合は、予測値による発生割合を超えないこと、アーチ周方向の発生傾向が良く一致していることが示された。また、全体的に、落下型、一面すべり、二面すべりの順に予測精度が悪くなった。これは、この破壊モードに順に、不連続面方向の変化が破壊モードおよび安定性に与える影響が大きいためである。

次に、破壊確率により危険なキーブロックを統計的に予測する手法について検討した。これは、不連続面組合せの確率関数 $P(JC)$ 、ジョイントピラミッドの形状指数 K 、ジョイントピラミッドの不安定指数 F の積として、ブロックの破壊確率 $P(B)$ を定義して、最も出現しやすく、かつすべり破壊しやすい危険なキーブロックを評価しようとするものである。実際の地下空洞側壁でのキーブロック解析の結果と比較して、各不連続面の組合せと掘削面の方向によって求まる破壊確率と実際のキーブロックの発生頻度は、相関係数 0.8 前後と比較的良好な相関が得られた。

謝 辞

本論文をまとめるに当り、多くの方々にご指導、ご協力頂きました。ここに厚く感謝申し上げます。

京都大学理事副学長 大西有三先生には、終始懇切な指導と叱咤激励を賜りました。1987年に社)システム総合研究所にてキーブロック実用研究会が持たれ、入社2年目であった筆者が参加させて頂いたことが、大西先生との出会いであり、またキーブロック解析との出会いでもありました。ここに、その成果として、研究内容をまとめることができたのも先生の長きに渡るご指導の賜物であり、深く感謝申し上げます。

京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻教授 青木謙治先生には、丁寧で適切なお指導を頂き、また本論文の構成についても大変貴重なご意見を頂きました。京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻准教授 西山哲先生には論文執筆に行き詰まるときにもアドバイスをいただき、論文取りまとめに当たっては、多大なご協力を頂きました。大西研究室の野村扶みこ様ならびに研究室の方々には、本論文の提出に当たりいろいろとお世話になりました。心より厚く御礼申し上げます。

東京大学名誉教授 小島圭二先生には、東京大学在学当時から不連続性岩盤に関してご教授頂きました。卒業後も今日に至るまで、暖かいご指導と、ご協力を頂いております。ここに感謝申し上げます。

法政大学デザイン工学部部長 草深守人先生には、先生が株式会社間組に在任中の頃より、上司として岩盤調査・解析に関する指導を賜り、本研究の礎を築くことができました。心より感謝いたします。

本研究は、筆者が株式会社間組技術研究所の研究員として研究開発に取り組んだ成果を中心にまとめたものです。技術・環境本部長 吉見憲一氏、技術研究所長 世一英俊氏、技術研究第一部長 三原正哉氏、蓮井昭則部長、三反畑勇主席研究員を始めとする技術環境本部の皆様には、博士号取得に挑戦する機会を与えていただき、多くのご支援、ご協力を賜りました。また、筆者が広島支店倉敷プロパン貯槽工事任中は、広島支店長 岩淵伸一郎氏、土木事業部長 沼俊博氏、同工事作業所長 加藤僚一氏、元所長 門脇武徳氏には、論文執筆に関わる深いご理解と、ご協力を頂きました。心より感謝申し上げます。

キーブロック解析の現場適用に当たりましては、奥多々良木発電所増設工事におきましては、関西電力株式会社 元所長 手塚昌信氏、現北陸支社長 大石富彦氏、袋井肇次長を始めとする方々に、ご指導を賜りました。さらに小丸川発電所新設工事におきましては、九州電力株式会社 鶴田正治氏、柏木雄二氏を始めとする方々に、ご指導を賜りました。ここに、厚く御礼を申し上げます。

著者論文リスト

審査付論文

1. 西村 毅, 草深 守人, 大橋 敏行, 西川 力: 水力発電所地下空洞の掘削に伴う岩盤亀裂調査とその定量化, 土木学会論文集 III 巻, Vol.418, III-13, pp.45-54, 1990

審査付論文(共著)

1. 坂田 英一, 西村 毅, 小林 茂雄, 中川 浩二: 不連続変形法 (DDA) による鉄筋コンクリート構造物発破解体時における倒壊挙動のシミュレーション, 土木学会論文集 VI, 522, VI-28, pp.77-86, 1995
2. 手塚昌信, 大西有三, 田中誠, 西村毅: 大規模地下空洞掘削時におけるキーブロック解析, 土木学会論文集 VI 巻, 609, VI-41, pp.73-85, 1998
3. Ryoichi MASUDA, Hidekazu ASANO, Hiroyuki TADA, Tsuyoshi NISHIMURA, Kiyoshi AMEMIYA and Hideo KOMNE, "EVALUATION OF ATTENUATION OF IMPACT ON BENTONITE-BASED BUFFER UNDER CONSTRUCTION", Journal of JSCE (土木学会論文集 C), Vol.62, No.2, pp292-304, 2006.4

発表論文

1. 西村 毅, 小島 圭二: 割れ目系岩盤の水みちのモデル化—ネットワークモデルを用いた解析—, 日本応用地質学会研究発表会予稿集, pp.143-146, 1986
2. 西村 毅, 小島 圭二: 割れ目系中の水みち—モデリングの一例, 第 18 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.366-370, 1986
3. 西村 毅, 林 一夫, 阿部 博之: 境界要素法による地下き裂問題の解析, 第 7 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.437-442, 1987
4. 西村 毅, 草深 守人, 大野 博之, 小島 圭二: 岩盤割れ目系の現地調査をもとにした確率統計的な評価, 第 23 回土質工学研究発表会講演集, pp1119-1120, 1988
5. 西村 毅, 田中 正, 庄子 智: ステレオ写真による岩盤亀裂面の方向性の計測, 第 24 回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, pp.499-503, 1992
6. 西村 毅: 画像処理による岩盤調査手法の研究, 土木学会第 47 回年次学術講演会, 1992

7. 西村 毅：画像処理による岩盤割れ目の抽出法について，平成5年度日本応用地質学会研究発表会，pp.21-24, 1993
8. 西村 毅，鈴木 英也，川上 康博，前田 信行：川浦アーチダム試験湛水時における基礎岩盤の変形挙動について，土木学会第50回年次学術講演会，pp.272-273, 1995
9. 西村 毅，小野 文彦，増田 良一，雨宮 清：緩衝材原位置締固め工法の検討－衝撃解析による周辺岩盤の挙動の検討－，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，pp.388-389, 2000
10. 西村毅：ブロック理論概説，不連続性地山におけるトンネル支保設計に関する研究・キーブロック理論の適用，高速道路技術センター，2000

発表論文(共著)

1. 小島 圭二，西村 毅：岩盤割れ目系の確率モデルによる評価，第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.1-5, 1985
2. 小島 圭二，横井 一秀，西村 毅，江戸川 修一：地下空洞周辺岩盤の割れ目の連続性と透水性に関する実験的考察，第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.151-155, 1985
3. 大橋 敏行，草深 守人，西村 毅：デジタル画像処理による節理性岩盤の調査・解析システム，第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp.133-138, 1987
4. 大橋 敏行，西村 毅，草深 守人：節理性岩盤の調査・解析システムを用いたキーブロック解析，第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.191-195, 1988
5. 大橋 敏行，西村 毅，草深 守人：キーブロック解析・設計システムについて，第23回土質工学研究発表会講演集，pp.1077-1078, 1988
6. 草深 守人，西村 毅，田中 正：画像処理による岩盤節理抽出手法の研究，第23回岩盤力学に関するシンポジウム論文集，pp.46-50, 1991
7. 世一 英俊，坂田 英一，西村 毅，三原 陽治：構造物解体時のシミュレーション技術-その現状と動向について，資源と環境，Vol.1, No.3, pp.9-18, 1992
8. 草深 守人，田中 茂生，山崎 輝臣，西村 毅：岩盤不連続面の構成則と DDA による数値計算結果の比較，第27回土質工学研究発表会，pp.1301-1302, 1992
9. 武田 洋，西村 毅：固体力学における混合型変分原理に対する一考察，第16回構造工学における数値解析法シンポジウム，pp.493-498, 1992

10. 武田 洋, 西村 毅: 有限要素法による摩擦を考慮した接触問題の汎用的解法, 第 16 回構造工学における数値解析法シンポジウム, 1993
11. 坂田 英一, 西村 毅, 他: RC 制御発破時の倒壊挙動の予測, 土木学会第 47 回年次学術講演会,1993
12. 坂田 英一, 小林 茂雄, 橋爪 清, 西村 毅, 中川 浩二: RC 制御発破解体時の倒壊挙動の予測, 土木学会第 48 回年次学術講演会, pp.10-11, 1993
13. 草深 守人, 梶原 保志, 龍河 将史, 山下 亮,西村 毅: 材料非線形問題の逆解析手法に関する考察, 土木学会第 49 回年次学術講演会講演概要集, pp.802-803, 1994
14. 川上 康博, 鈴木 英也, 西村 毅, 前田 信行: 川浦アーチダム試験湛水時における堤体の変形挙動について, 土木学会第 50 回年次学術講演会, pp.264-265, 1995
15. 鈴木英也, 川上康博, 西村 毅: 川浦アーチダムの試験湛水時の基礎岩盤の挙動について, 土木学会第 50 回年次学術講演会講演概要集, 1995
16. 竹村友之, 中川哲夫, 吉村和彦, 西村 毅: 損傷モデルによる大規模地下空洞の掘削解析, 第回土質工学研究発表会, 1997
17. 大西有三, 手塚昌信, 田中誠, 西村毅: 地下空洞掘削時におけるキープロック解析の適用について, 第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.58-62, 1997
18. 瀬岡正彦, 大西有三, 手塚昌信, 西村毅: 地下空洞掘削時におけるキープロック解析を用いた情報化施工の適用について, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, pp.300-301, 1997
19. Tadahiko Seoka, Yuzo Ohnishi, Masanobu Tezuka, Tsuyoshi Nishimura: New Concept for Observational Construction of Hard Rock Cavern, International Symposium on Rock Support, 1997
20. 手塚昌信, 大西有三, 袋井肇, 瀬岡正彦: 大規模地下空洞掘削時における情報化施工の適用例, 第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム, 58-62, 1997
21. 竹村 友之, 鶴見憲二, 西村毅: 地下大空洞 スーパーカミオカンデ空洞の掘削, 土と基礎, No46-6, pp.28-30, 1998
22. 川上 康博, 藍田 正和, 西村 毅, 田中 正: 重回帰分析によるアーチダムの変位挙動解析, 土木学会第 53 回年次学術講演会, pp.34-35, 1998
23. 前田 信行, 高森 重治, 西村 毅, 三浦 智哉: 大口径立坑におけるボアホールテレビカメラの適用性について, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, 1447-1448, 2002
24. 日高英介, 西村 毅, 丸山能生: 地下発電所掘削工事における岩盤計測管理システムの開発・導入, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, 865-866, 2002

25. 河邊 信之, 西村 毅, 市丸 義次: 大規模地下空洞盤下げ掘削における緩め発破工法の適用について, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, pp.29-30, 2003
26. 日高英介, 西村 毅, 前田信行, 蓮井昭則: 孔間弾性波調査による地下発電所周辺岩盤のゆるみ領域について, 土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集, pp651-652, 2003
27. 日高 英介, 西村 毅, 丸山 能生: 情報共有環境を用いた岩盤計測管理システム, 土木情報利用技術講演集, 28, pp.43-46, 2003
28. 塩谷智基, 河原田寿紀, 日高英介, 中西 康博, 西村 毅: AE 法を用いた地下発電所空洞掘削時のゆるみ領域評価, 第 14 回 AE 総合コンファレンス論文集, 2003
29. 増田良一・朝野英一・多田浩幸・茂呂吉司・西村毅: 緩衝材原位置締固め工法における加速度減衰特性の検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集, 2004
30. 河邊信之・園田利美津・江口聡一郎・西村毅: 大規模地下空洞における情報化施工の適用と実施工結果について, 平成 17 年度トンネル工学研究発表会, 2005
31. 赤尾 悟史, 大西 有三, 西山 哲, 矢野 隆夫, 浦野 和彦, 西村 毅: 不連続変形法の地震応答解析への適用に関する基礎的研究, 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2007
32. Akao, S., Ohnishi, Y., Nishiyama, S. and Nishimura, T. : Comprehending DDA for a block behaviour unde dynamic condition, Proc. Of the 8th Internatinal Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD-8), pp.135-140, 2007