

第1回岩石力学国際会議に出席して

村 山 朔 郎

SOME TOPICS ON THE FIRST CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF ROCK MECHANICS

By Dr. Eng. *Sakuro* MURAYAMA

Synopsis

In this paper, some topics on the First Congress of the International Society of Rock Mechanics held in Lisboa on September 1966 where the writer attended is reported. Besides, some papers presented to the Congress are introduced relating to the special characters of the Rock Mechanics.

1. 結 言

今回第1回岩石力学国際会議に出席する機会が与えられたので、ここに会議の概況を報告するとともに、地盤災害の面から見た岩石力学などの問題点についてのべたいと思う。

第1回岩石力学国際会議は、1966年9月25日より1週間にわたりリスボンにおいて開催されたが、会議はきわめて盛会であって、これに出席を登録されたものは42ヶ国より800余名にのぼり、25日の開会式にはポルトガル大統領が自ら開会式を主宰するという形で臨席され、その熱意と態度に深い感銘を受けた。この会議はザルツブルグの Müller 教授を現会長とする国際岩石力学会 (International Society for Rock Mechanics) により主催されたもので、総合された岩石力学の発展を期するために、従来各分野で個々に進められていた岩石力学の研究者を一堂に集める意図のもとに開かれた。それだけに参加者の専門も土木工学、鉱山学、石油工学、鉱物学、岩石学、地質学、構造地質学、地球物理学などのひろい分野にまたがっており、提出論文数は241におよび、これを記載したプロシーディングは2巻計約1500ページの大部のものとなっている。

会議の運営にはポルトガル国立土木研究所の Rocha 所長が運営委員長として当られたが、同氏の開会式の挨拶の中には次のような一節があった。「人間はここ百万年以上も地球のほんの表面だけにくぎづけされ、そこに住み、そのまわりだけを調査するに止まっていた。しかしいま宇宙空間にも、大洋の底にも開発の手をのばしはじめ、さらに巨大なボーリングの手段により地殻の超深部にも調査が進められるようになった。自然開発に対する人間の夢が急速に現実化しつつある今日では、乗員をのせ、原子動力を装備してかなりのスピードで地底中を自力で進むいわば地中スプートニク (Sputnik of the Deep) とでも称してよいような機構さえ考案されはじめられるようになった。このような自然開発に必要な科学の一つこそ岩石力学であるといえよう」といっている。スプートニクの夢は別としても岩石力学という言葉は一般にはまだ新しい言葉であるためその対象や内容についてもまだ十分知られるほどになっていない。

岩石とか岩盤とかいえば硬いもの、強いものの代名詞のように使われ、災害とは縁がないように聞えるかも知れない。しかし岩盤不動の頼もしい岩盤はよほど地下深いところは別として、一般に地表近くではどこでもみられるほど多くはない。1959年12月には、竣工後わずか5年しか経ていないフランスのアーチダムの一つであるマルパッセダムが基礎岩盤の一部にあった破碎帯の弱点が原因となったらしく突然崩壊して 500

人におよぶ死者，行方不明がでた。またイタリアのヴァイオントダムは，基礎岩盤の強化処置（30mほどの長さの鉄棒で緊定）がよかったためかダムは崩壊しなかったが，1963年10月深夜その上流の岩石斜面が崩れ，そのため湖水の水が溢れて洪水をおこし多大の死傷者を出した事故が生じた。岩盤の災害はダムの基礎に限らず，岩石斜面やトンネルの災害などその例は数えあげられないほどである。ダムは良質岩盤のところはすでに建設されてしまい今後に残された地点の岩盤は今迄ほどよいところはもはや非常に少ない。また国土の開発にしても，鉄道，道路の建設にしても，今後は開発の進んだ平野の都市を避けて次第に山間にむけられている傾向にある。そのため今後ますます岩盤の処理やその防災の問題が多くなり，岩石力学の重要性が増大するものと思われる。

岩石や岩盤の問題としては，もちろんこのような地表近くの岩盤だけに限られるものではない。たとえば鉱産資源の開発にはすでに長い経験と研究があり，また最近の鉱床調査用ボーリングの深度は3000mにおよび，油井のボーリングは8000mの深度を越すにいたったと伝えられている。理学方面においても岩石力学の問題は多く，構造地質学の扱う地殻の褶曲や断層の問題，地底深くにある高温，高圧下の岩石の挙動の研究などがあり，岩石力学の範囲は非常に広く多岐である。

岩石力学はその重要さにもかかわらず，岩石の性質の複雑さのためにその研究が本格化され始めたのは比較的近年のことといえよう。これはあたかも土質力学が土の特性の複雑さのために力学の一分科として独立したのが非常におそかったのと同じである。土質力学の場合は，現在の形に体系づけられ始めてからまだわずか30余年しか経ていず，欧米の研究者が主になって第1回の国際土質力学会議が米国ハーバード大学で開催されたのが1936年であった。その後ひろく各国が加入して本格的な国際土質力学基礎工学会（International Society of Soil Mechanics and Foundation Eng.）が設立されたのは戦後の1950年であった。

岩石力学についても，ようやく体系づけられた研究が始められたのは土質力学よりもおそいが，今回の会議以前には岩石力学関係の国内的または国際的な会合がいくつか開かれていた。その中には，Müller 教授の指導のもとで開催された16の会合があり，その中から今日いわれるオーストリア学派が生れ，1962年にはじめて国際岩石力学会（International Society for Rock Mechanics）が設立された。米国では鉱山関係の岩石の問題を主にして1956年 Colorado School of Mines において第1回の Rock Mechanics Symposium が開催され，その後も引続いてすでに8回の会合が開かれた。1952年に開催された International Conference on Strata Control and Rock Mechanics は開催数4回を重ね，また1963年にはカリフォルニアにおいて International Conference on the State of Stress in the Earth's Crust が開かれた。東独にある Internationales Büro für Gebirgsmechanik も鉱山関係を主にして国際的な会合を開催している。このほかにも岩石力学の問題は国際大ダム会議や国際土質基礎工学会議などの中でも取扱われた。このように岩石力学の研究は最近着々と進められたが，今回全分野にわたる総合的な第1回の岩石力学会議が，多数の出席者を得て，非常に盛大に開けるようになるにいたったことは，いまやこの研究が本格的な展開をしつつあることを意味するものとして極めて意義が大きい。

前述のように今回の第1回岩石力学会議では各方面よりの241編にのぼる論文が寄せられたが，これらは9月25日の開会式の翌日より8つのテーマに分けて部会を作り全員で会議が進められた。これら8つのテーマと提出論文数を挙げると次の通りである。

(1) 岩盤調査：19編 (2) 力学特性からみた岩石および岩盤の分類法：21編 (3) 岩石・岩盤の物性：92編 (4) 岩盤中の残留応力：10編 (5) 岩石破砕法：11編 (6) 岩盤斜面：16編 (7) トンネルと深いボーリング：42編 (8) 基礎岩盤：30編

2. 岩石力学の特徴

岩石の新鮮なものは硬いがその性状は細かくみれば多様である。特に地表に近いものは応力や風化などをうけているので，細かく破砕された岩石の特性は砂に近く，また風化をうけて粘土化した岩石の特性は粘土の特性に近くなって，土と明確な差がみられなくなる。岩石も土もともに鉱物の細粒の集合体からできてい

る点は共通しているが、破碎や風化をさほどうけていない岩石は粒子間の結合力が強く、粒子の配列が規則的なものが多い。これに対して土は、粒子の配列が雑然としていてしかも粒子間の結合力がきわめて微弱である。岩石の粒子間の結合力は一たん破壊や変質されて弱化すると復元しないから、破壊や変質を受けた岩石は上述のように土に近くなるといえよう。このように岩石の特性の中には、土と似た特性の一半もっているから、まず土のような微弱な粒子間結合力のもとに雑然と配列された粒子からなる集合体の特性についてのべてみよう。

土は外力を受けると、粒子間の結合力が弱いために土粒子はそれぞれ動きやすい方向に勝手に動き、その動きが累積されて土の変形が生じる。そのために土の変形を研究するには、各土粒子の勝手な運動を確率的に調べていくことが必要であろう。このような考え方で土の応力・ひずみ関係を統計学的に解析を行ない粘土が破壊限度以下の応力のもとでおこす変形を求めたことがある。その結果、粘土の応力、ひずみ特性は **Fig. 1** の力学モデルの変形で相似されることが明らかとなった¹⁾。図中 E_1 , E_2 は一定の弾性率をもったスプリング、 σ_0 はスライダー、 η_2 はある構造粘性を示すダッシュポットである。そのほか、粘着力のない砂に対してもこのような統計学的方法で、弾性状態——载荷、除荷をくり返しても残留ひずみのない状態——にある砂の応力、ひずみ関係を求めた²⁾。それによると、砂質土の最大せん断ひずみは主応力差に比例し、平均主応力に反比例し、また粒子表面摩擦係数や締固め度が大きくなると減少する関係が得られ、実験結果をよく説明できた。これは土の力学特性の一部にすぎないが、このように土は弾性体とはちがった特性がある。

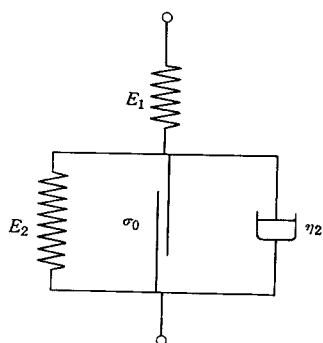


Fig. 1 Mechanical model of clay.

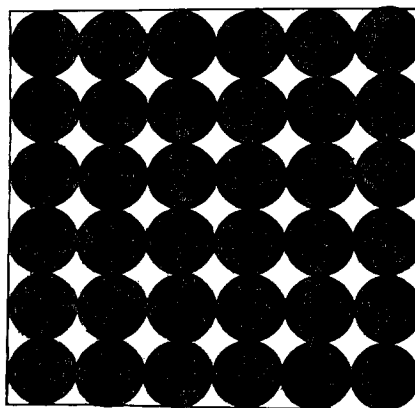


Fig. 2 Balls packed in loose state.

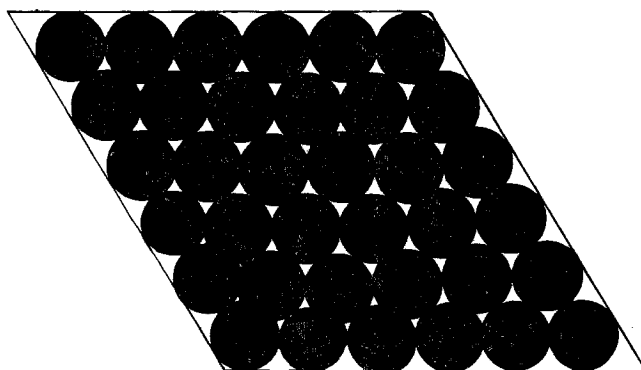


Fig. 3 Balls packed in dense state.

土のような粒子の集合体について、つぎに考えられる現象は、集合体をせん断力で変形させるとき体積変化が生ずることである。この機構は、粒子として等径の球を用いた Fig. 2, 3 の模型によっても説明される。Fig. 2 のように、球の間のすき間を最大になるように詰めた集合体では、これにせん断変形を与えると球がすき間の中に入りこみ、集合体全体のみかけ体積は減少する。Fig. 3 のように、球の間のすき間を最小になるよう密に詰めた集合体では、せん断力によって球がすき間からぬけ出るため全体積が膨張する。土にはこのようなせん断にともない体積変化が生ずるいわゆるダイラタンシーの現象があるが、これは弾性体や流体にはみられない特性である。

通常土の間げきは一部または全部が水で充たされており、地下水面下にある土は水で完全に飽和している。このような水で飽和した土にせん断変形が生じると、ダイラタンシーのために体積変化が発生しようとするが、間げき水があり、それが排出されないときは体積変化が妨げられるので、その代わり間げき水に圧力が生じる。Fig. 4 のように密に詰った土ではせん断時に負の間げき水圧が生じ、粗な土では正の間げき水圧が生じることはよく知られたことである⁹⁾。間げき水圧は載荷や締め固めでも生じるが、正の間げき水圧は載荷の一部を支持して、それだけ土粒子相互をおしつける力が減少するので、粒子間の摩擦が減少して粒子は移動しやすくなる結果みかけの土の強度が減少する。Fig. 5 は建設中のアースダム中に締め固めのため残留した間げき水圧の測定例¹⁰⁾で、このため施工中のダムは安全性が低下している。間げき水圧は、地盤沈下や地震時の緩い砂の流砂現象など土の力学的挙動を支配する要素であり、これもまた土のもつ重要な特徴である。

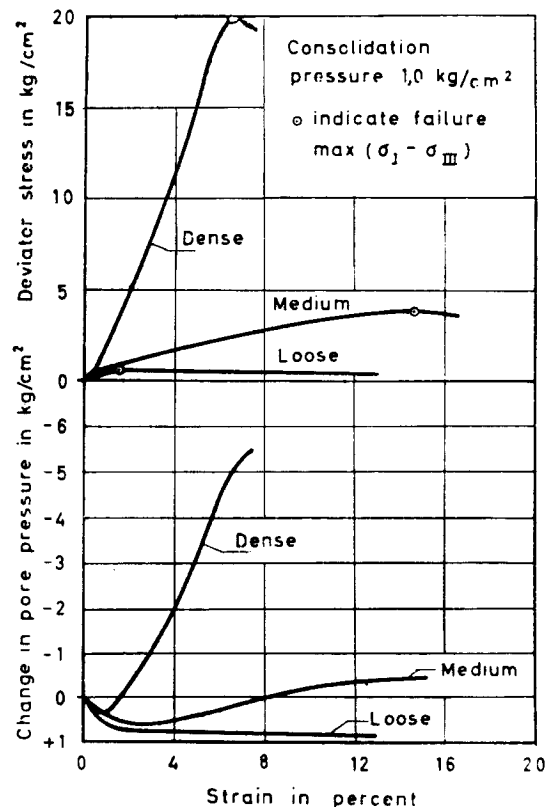


Fig. 4 Change in pore-water pressure caused by deviatoric stress applied on dense, medium or loose soils (After L. Bjerrum)

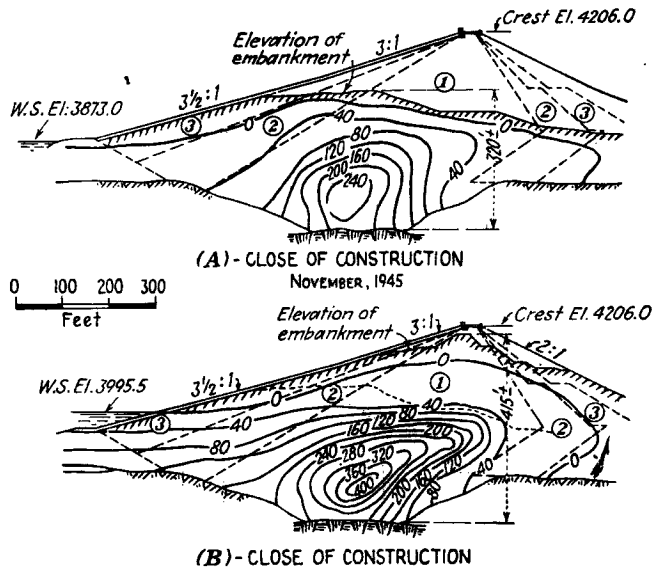


Fig. 5 Distribution of pore-water pressure during the construction of the rolled-fill Anderson Ranch Dam. (After F.C. Walker and W.G. Holtz)

岩石と土との相異の主なもの前記のように、構成粒子の結合力の大小、粒子配列の規則性などにあるといえるので、岩石の力学的な特徴としては、土に比して不均質性と異方性、さらに場合によっては不連続性が著しいことであろう。土でも微細にみれば土粒子の不連続な集合体であるが、粒子が微細でかつその配列に規則性がないから、土を巨視的に扱う場合は均質、等方な連続体とみなされる。したがって、土質力学は従来の慣習が示しているように原則としては均質、等方な連続体に関する力学といえよう。これに対して岩石やそれから構成された岩盤を対象とする岩石力学は次のような特徴が挙げられる。第1に、岩石力学の対象である岩石は、原則として不均質、異方性をもつ材料であり、場合によっては不連続体として扱われなければならない。第2の特徴は、特に地表に近い岩盤を対象とすると、岩盤には岩質自身をもつ上述のような特異性のほかに、岩盤の構造からくる不均質性・異方性・不連続性がある。すなわち、岩盤がいくつかの異質の岩石からできていたり、また地表近くの岩盤には節理・層理・片理、きれつなどいわゆる岩目や断層が比較的規則的に発達している場合が多く、それらの部分は健全な岩石の部分と力学的性質が異なり、強度の低い潜在弱線となって岩盤全体の变形や破壊の挙動に大きな影響を与える。このような岩盤の力学特性を岩盤全体として巨視的な尺度で示すことはなお困難であるが、その挙動は不均質体または異方性体的であり、場合によっては不連続体ともみられる。第3の特徴は、力学体系としての本質的な事項ではないが、岩石力学で扱う圧力、温度、時間のスケールが他の材料力学に比して広範なことが挙げられる。この点について、リスボンの国際会議において Rocha 委員長は次のようにのべている。「岩石力学で扱われる応力の範囲は、人工構築物を与える応力程度から、構造地質学で扱う地底深部における高圧力までおよんでいる。温度の範囲は、地表の温度から地底深部において岩石の再結晶化、溶融、化学変化などがおこるような高温までひろがり、また時間の尺度は、地質時代を対象とする長期から、小は爆破の現象を対象とするような瞬間的な時間までがある。おそらく将来には、地下核爆発手段による運河の開削、貯水池の建設、地下資源の調査などが開発される時がくるであろうが、そのような場合には、その応力は100万気圧にも達し、この圧力下では岩盤はあたかも圧縮性流体のように挙動し、その温度はかつて地上で達しなかった高温にさらされ、しかもその作用時間はミリ秒のオーダーの状態が対象にされるのであろう」とのべている。

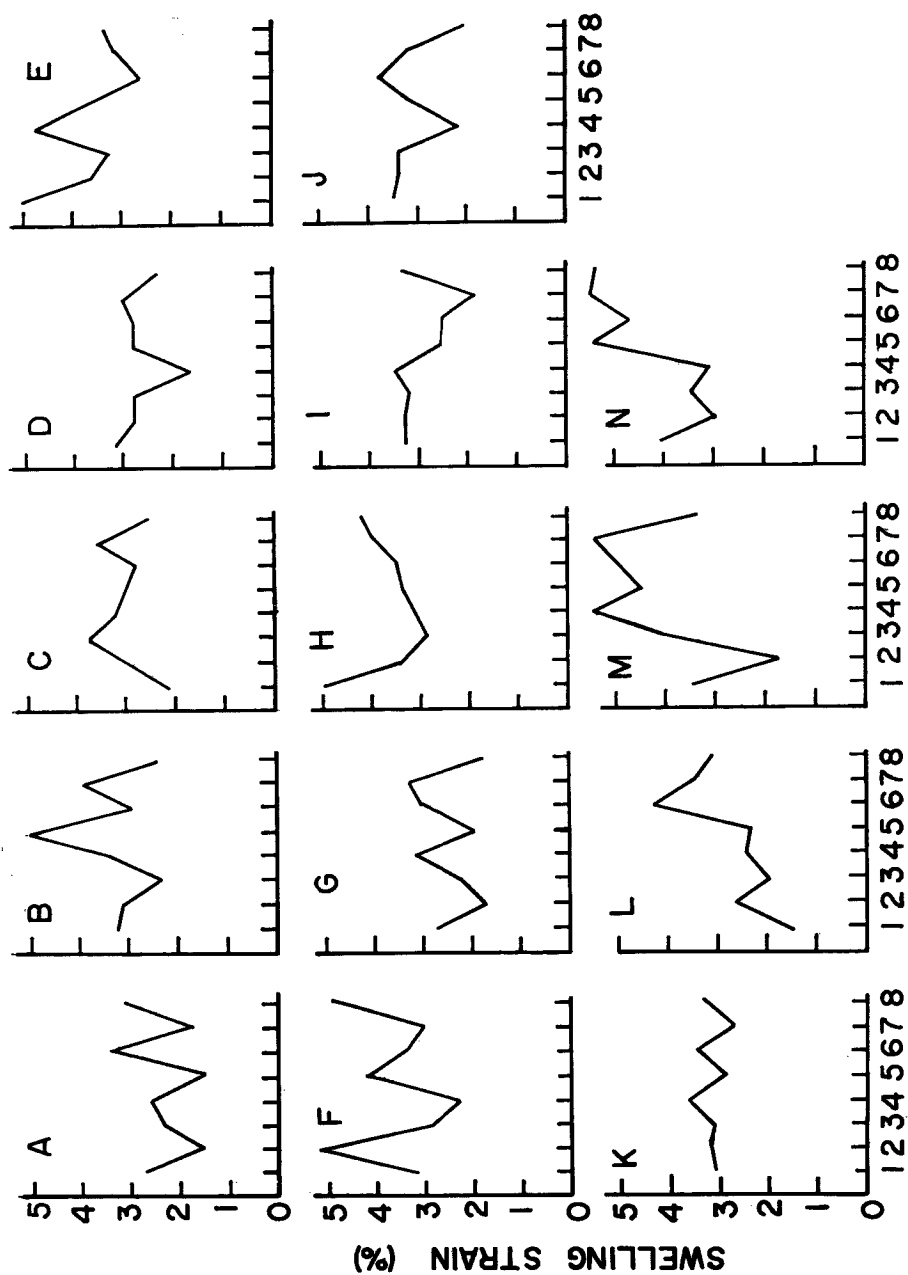


Fig. 6 Distribution of local swelling strain of claystone.

岩石や岩盤には上述した特徴があるので、今回の国際会議においてもそれらの特徴を主題とした研究が多くみられた。ここでは、そのような特徴を主題とした研究のうち、地盤災害とも関連のあるような問題の若干の例を、おもに今回の会議の発表論文より紹介する。

(1) 岩石の不均質性による現象の例

岩石は構成材料が不均質であるから、局部ごとに力学的性状が異なることは当然であるが、岩石ではそれぞれの構成粒子がその間の強い結合力で固定されているから、もし局部ごとに区々の変形がおけるとその結合力が破断されて岩石全体の強度が急減する。Fig. 6 は、著者ら³⁾が、褶曲を受けた古生層粘板岩の切取斜面に滑動性崩壊の生じた原因を明らかにするため、粘板岩における吸水膨張の不均質性を測定したものである。すなわち粘板岩試料表面に、5 mm 間隔の1, 2, 3, ……の縦線とこれと直交するA, B, C, ……の横線で構成される方眼を印し、吸水させた後再び各格点間の距離を顕微鏡によって測定し、各横線に沿う上下格点間の吸水膨張ひずみを画いたものである。この図からも分るように粘板岩の内部では部分的な膨張量に不同があり、そのため岩石組織が破壊される一因が明らかとなった。実際の切取斜面でみられた岩石の崩壊は上記の原因のほか、降水の浸透の不同もまた膨張の不同をおこす原因の一つであったようである。

(2) 岩石の異方性による現象の例

岩石の異方性は粒子の配列に規則性のあるためや粒子の配向が方向性をもつためなどで生ずる。例えば粘

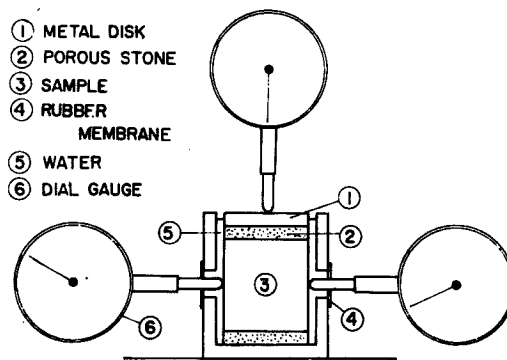


Fig. 7 Swelling strain measuring device.

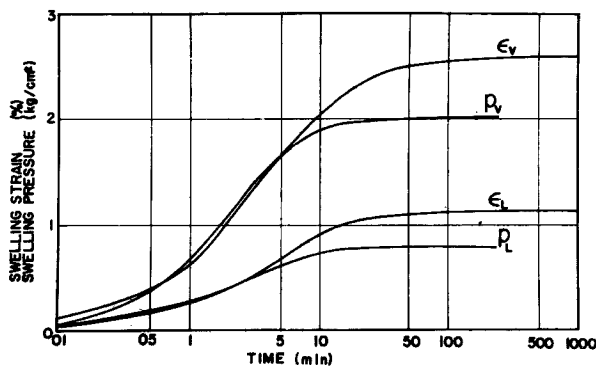


Fig. 8 Swelling strain, swelling pressure-time curves for mudstone
 ϵ_v , ϵ_L : Swelling strain perpendicular and parallel to the bedding respectively.
 p_v , p_L : Swelling pressure under laterally unconfined state.

板岩は一見均質にみえても、堆積層に平行と直角とで力学性を異にする。その一例を示すため泥岩の試料について吸水膨張を測った⁶²。吸水膨張量の測定は供試体の縦・横の不拘束下における膨張変位が測れるように Fig. 7 のような装置を用いた。供試体は縦方向は層理に直角に、横方向は層理に平行に切り出し、浸水後の膨張ひずみを測定した。縦方向のひずみ、 ε_v 、横方向のひずみ ε_L と経過時間との関係は Fig. 8 となり、 ε_v の方が ε_L よりも大きい値が得られた。また自由膨張と別に、この試料を側方不拘束で縦軸のみを拘束して浸水させたとき、縦軸に発生する吸水膨張圧を測定した結果を Fig. 8 の図中に示した。図中 p_v 、 p_L はそれぞれ層理に直角な方向および平行な方向を縦軸として拘束状態においたときの吸水膨張圧である。この図によると p_v は p_L よりも大きく、かつその比 p_v/p_L はほぼ、自由膨張量の比 $\varepsilon_v/\varepsilon_L$ に等しい。

また花こう岩のような一見等方性にみえる岩石にも異方性があることが、F.P. Rodrigues⁷⁾ によって報告されている。Fig. 9 はポルトガルの Alto Lindoso のダム地点の花こう岩について弾性係数を測定し、各方向別の弾性係数の値をだ円体で示したものである。

Most probable ellipsoid :

$$[x \ y \ z] \begin{bmatrix} +93.793 & -7.168 & -30.442 \\ -7.168 & +85.970 & +26.280 \\ -30.442 & +26.280 & +95.873 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = 10^7$$

$$\text{Rotation matrix } [T] = \begin{bmatrix} -0.565 & +0.439 & +0.698 \\ +0.671 & +0.737 & +0.081 \\ +0.479 & -0.515 & +0.711 \end{bmatrix}$$

(x y z - X Y Z)

Normal equation:

$$\frac{X^2}{270^2} + \frac{Y^2}{349^2} + \frac{Z^2}{421^2} = 1$$

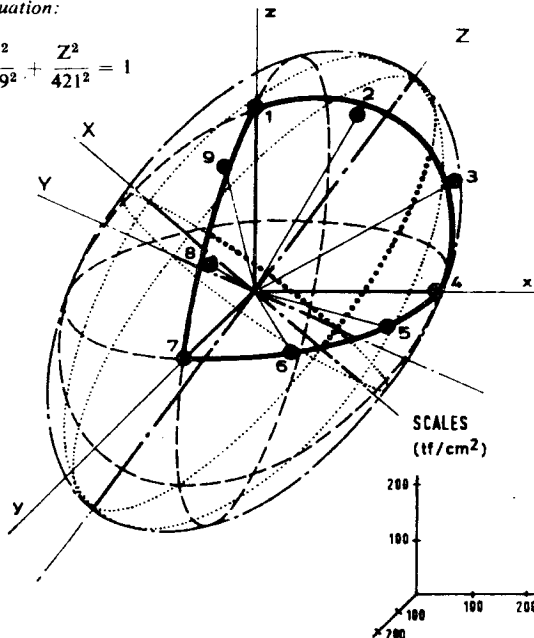


Fig. 9 Ellipsoid of moduli of elasticity E (tf/cm²) observed with granite at Alto Lindoso Dam site. (After F.R. Rodrigues)

(3) 岩石の不連続性による現象の例

岩石は地中で造成後も種々の外力をうけて組織が破壊され、き裂つを生じて外見上不連続になっているも

の多い。しかしこのような外見上の明確なきれつをともしない新鮮な岩石にも内部に微細な局部的な割目や空げきの発生している場合が多い。Fig. 10 は、E. Hoek ら⁹⁾ が、このような割れ目が外力を受けたとき、ここから始発する破壊の進行状態をみるため、ガラスに作った小さい割目を用いて実験した例である。また P. Habib ら⁹⁾ は、このような割目や空げきが、外力によって開閉するため岩石のみかけの透水係数が岩石に加える圧力によって変化することをのべている。岩石中の微細な割目の挙動は、上述のほかにも

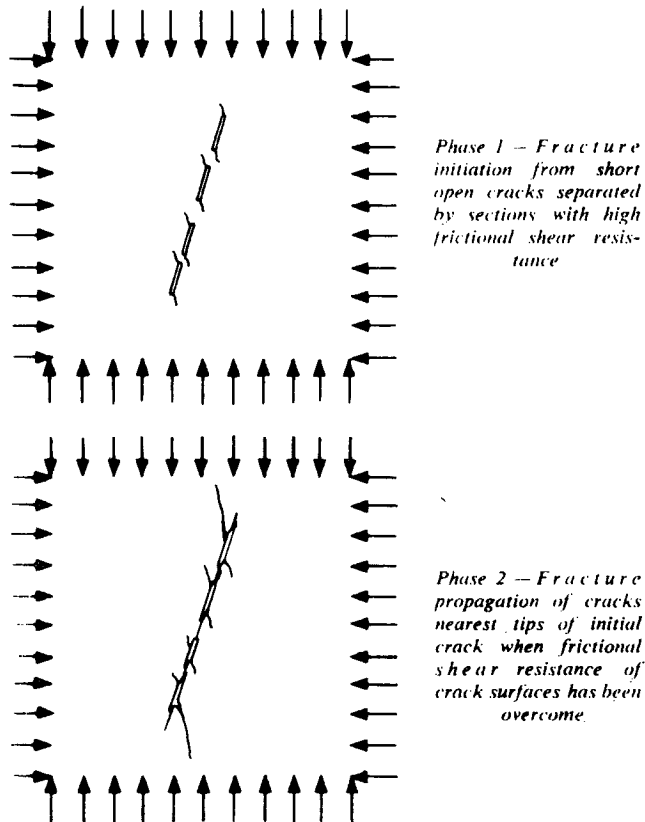


Fig. 10 Diagrammatic representation of the probable fracture mechanism of a closed crack in glass. (After E. Hoek et al.)

岩石の各種の力学的挙動に影響を与える。例えば岩石中の超音波速度が岩石に加える圧力によって変化することも、その原因の一つはこの割目の圧力による開閉が寄与すると考えられる。Fig. 11は、1963年に A. R. Gregory¹⁰⁾ によって行われた横波と加圧圧力に関する実験の一部である。

上述のように岩石は本質的な特異性があるが、詳細に力学特性をみればさらに他の材料と相異なる点が多く、たとえば弾性体とちがう点として特異なレオロジー的な特性もあり、また S. S. Vyalov¹¹⁾ が扱っているような岩石の応力、ひずみ関係が引張り側と圧縮側とで異なるために生ずる変形の特異性の問題などもある。

以上は岩石自身についてのべたが、つぎに岩石から構成された岩盤の特異性について話題を移すこととする。前述したように、岩盤には各種の岩石が入り混っていたり、同種の岩盤でも岩目や断層があるので、岩盤全体を巨視的にみると不均質、異方性あるいは不連続な材料として取扱わねばならないことが多い。

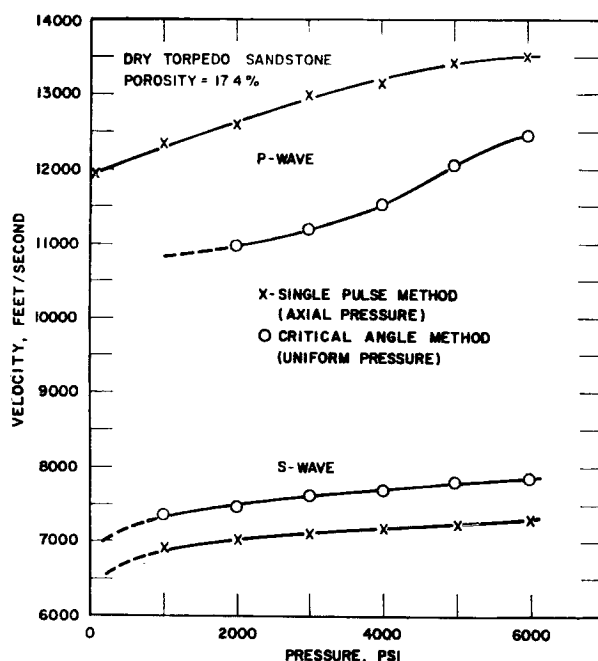


Fig. 11 Relationship between propagation velocity of seismic wave and pressure obtained with sandstone. (After A.R. Gregory)

(1) 岩盤の不均質性を扱った例

トンネルの地山やダム基礎などとなっている岩盤が力学特性の相異なる岩石から構成されている場合には、岩盤中の応力やひずみの分布は岩盤が均質な場合と様相を異にするが、それを正確に解析することは従来困難であった。今回の会議には、このような不均質な岩盤に対する力学的解析を1960年に R. W. Clough が考案した有限要素法 (Finite Element Method)¹²⁾で解く試みが数多く報告されて、興味ある結果を与えていることが注目される。Finite Element 法は、平面ひずみの問題として、解析に関与する領域を要素 (Element) と称する有限の三角形の小区劃に分割し、各要素に働く荷重によって要素に生ずるひずみマトリックスを要素三角形の頂点 (節点: Nodal Point) の変位マトリックスで示し、各節点の変位量が全領域の境界条件を満足するように電子計算機で逐次計算を進めて、岩盤中の応力およびひずみの分布を求める方法である。この方法では節点の変位の算定に、その部分における材料特性を導入することができるので、部分的に力学特性が相異なる非均質材料の応力解析に適用することが可能なだけでなく、非線形特性の材料にも、異方性材料にも応用することができる長所がある。

この方法を用いた 2, 3 の例を挙げると、R. E. Goodman¹³⁾ は弾性係数がそれぞれ E , $100E$ である 2 種の弾性岩盤が鉛直の境界面にて接しており、この境界面より水平に c の距離に中心をもつ半径 a の円形トンネルを掘削したときの地山中の応力分布を求めている。そのために、トンネル周囲地盤中から Fig. 12 のような領域を取り出し、それを図のように三角形の有限要素に分割して解析を行なった。Fig. 13 はその結果の一例であって、図は鉛直応力 σ_v と領域外周に働く均等外圧 p との比の分布であって、硬い岩石に応力の集中が生じていることがうかがわれる。S. F. Reyes¹⁴⁾ はこの方法を用いてトンネル外周の弾塑性問題を扱っており、また H. W. Anderson¹⁵⁾ は複雑な地層構造をもつ岩盤に tectonic force が残存する場合に対象としてトンネル外周地盤の応力分布を考察している。

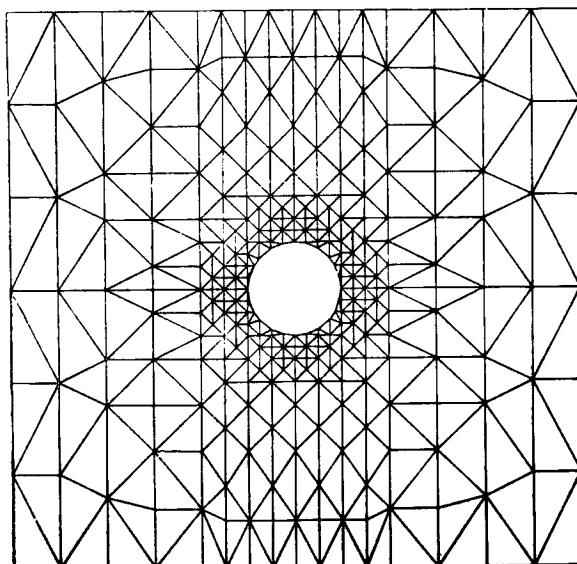


Fig. 12 Finite element meshes used in solving problems. (After R.E. Goodman)

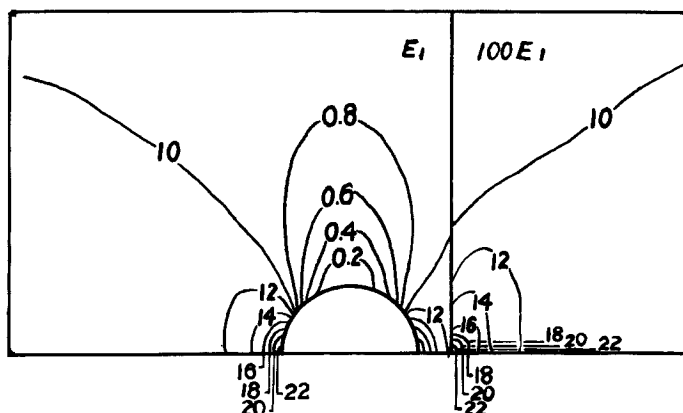


Fig. 13 Contour of stress concentration factor $\sigma_y/p.$ at $c/a=1.5$
(After R.E. Goodman)

(1) 岩盤の異方性を扱った例

岩石自身が異方性であれば、それから構成された岩盤も当然異方性となる。このような場合には、Finite Element 法が適用できることは前述した。O.C. Zienkiewicz ら¹⁸⁾ は弾性係数が1:3の直交異方性の地層が褶曲しているところにトンネルを掘削した場合の応力分布を Finite Element 法により解析し、Fig. 14 のような結果を示している。

岩質が均質・等方であっても、もし岩盤中に片理や主節理のような規則性の岩目が存在すれば、岩盤全体を扱う場合には異方性となる。このような岩盤中にトンネルを掘さくした場合に発生するおそれのある落石や崩壊について、著者は以前考察したことがある。今回の会議では、規則性の岩目を有する岩盤上にダム基

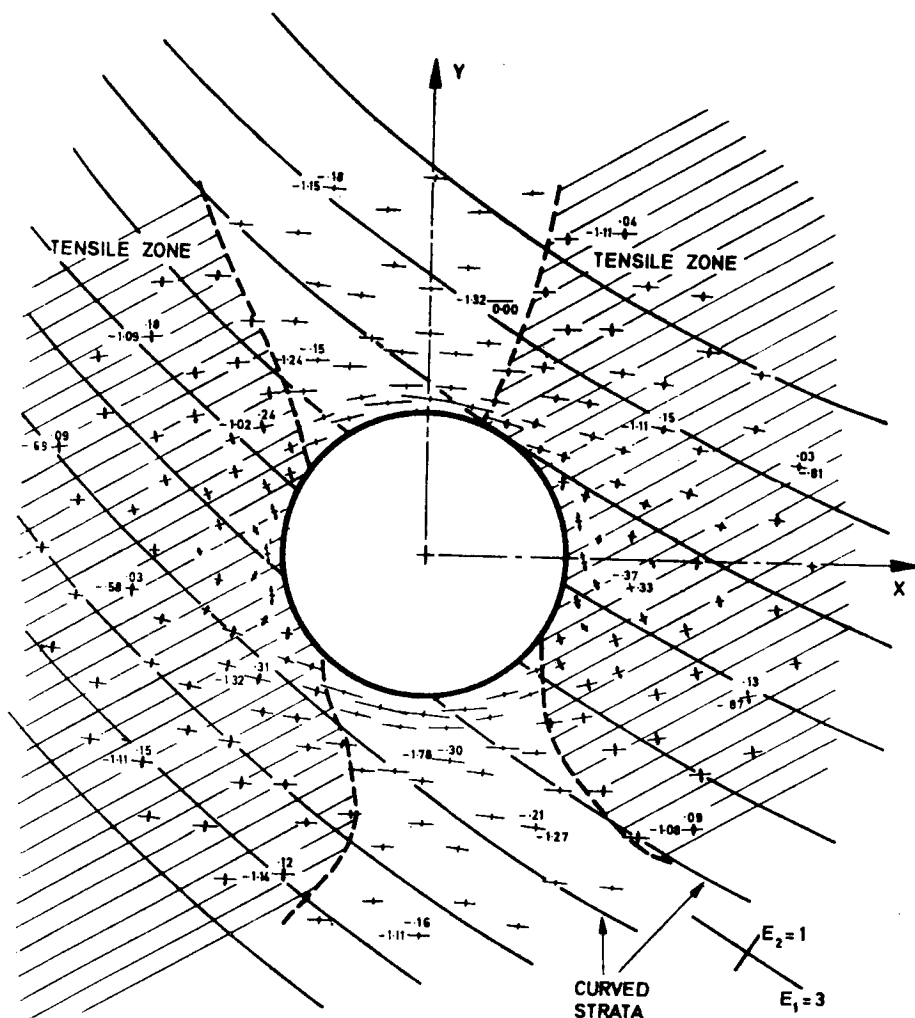


Fig. 14 Principal stresses near a tunnel opening. A horizontal stress of unity acting at a distance: $\nu_1=0.05$, $\nu_2=0.15$, $G_{12}=0.75$, $E_1=3$, $E_2=1$ (After O. C. Zienkiewics et al.)

礎を設けたときの模型実験について M. M. Grishin¹⁷⁾ が報告している。Fig. 15 は各目の基礎岩盤に対する鉛直応力 σ_y の分布を縦軸に示したもので、 σ_y の最大値を示す下流縁端部では均質岩盤に対する σ_y が 14.1 単位となるのに対して 3 型の岩目では 8 単位となり、岩目の型式によって応力分布がかなり変化し、均質として計算したときより危険側になることを明らかにした。なおこの実験ではコンクリートダムと岩盤の弾性係数の比を $E_a : E_f = 1 : 11$ として行なったものである。

(3) 岩盤の不連続性を扱った例

岩盤中には節理・断層などの地質構造的な弱線によって不連続な部分が生じ、それが原因となって異常な破壊がおこることがあって、ダムの基礎やトンネルなど実際に重要な問題となることが多い。これに対し各種の方法を用いて研究が進められている。

M. Goldstein¹⁸⁾ は不連続面のある岩石斜面の安定をバリ・プラスターで作った模型によって実験した。

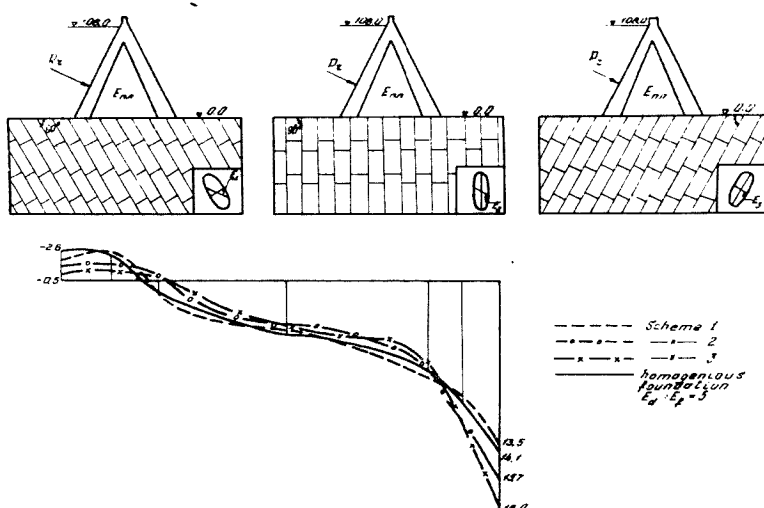


Fig. 15 Investigation of massive buttress dam based on block-like foundation.
(After M.M. Grishin et al.)

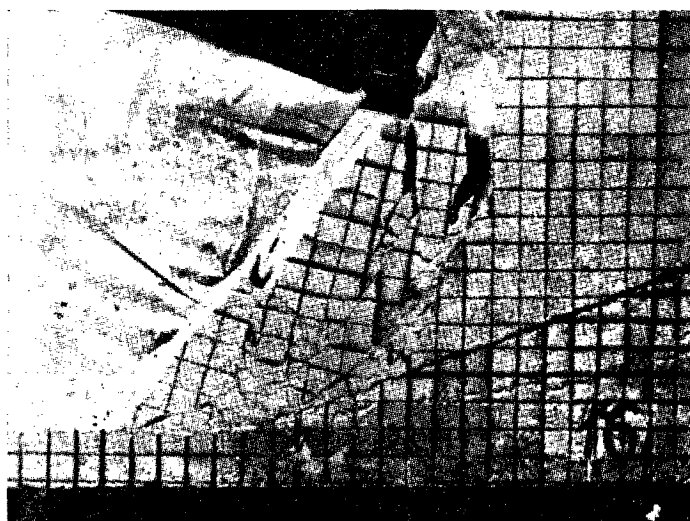


Fig. 16 Rupture of slope which has a slip surface. (After M. Goldstein et al.)

Fig. 16 は崖面下に直線状のき裂のある場合、その水平となす角度による安定性の影響などを検討している。また F. Ishii¹⁹⁾ は、いくつかの不規則な不連続線のあるダム基礎の安定性と不連続部に注入などによる補強処置をした後の安定性の検討を石膏の模型を用いて実験的に検討している。

また主節理と副節理などで方塊状に有離して積層した岩盤中にトンネルを掘削した場合、トンネル天井部上方の崩落部分の高さについてはかつて Terzaghi はアルプスを貫通して掘られた多くのトンネルの実績調査を総合して、Fig. 17 のような水平主節理をもつ岩盤中のトンネルのアーチ上部の崩落高さは $0.5B$ (B : トンネル幅) に近いことを明らかにした。この経験値に対して、F.P. Jaecklin²⁰⁾ は Fig. 18 のような

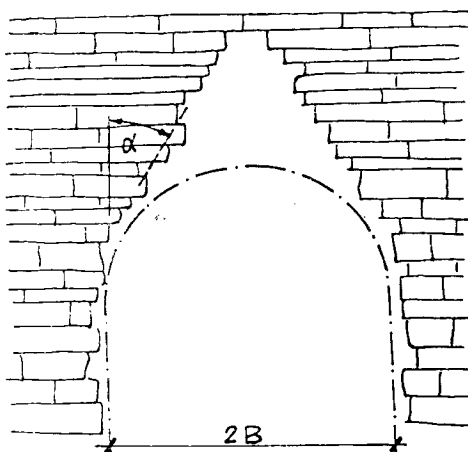


Fig. 17 Probable breaking zone above tunnel arch. ($\alpha=26^\circ$) (After K. Terzaghi)

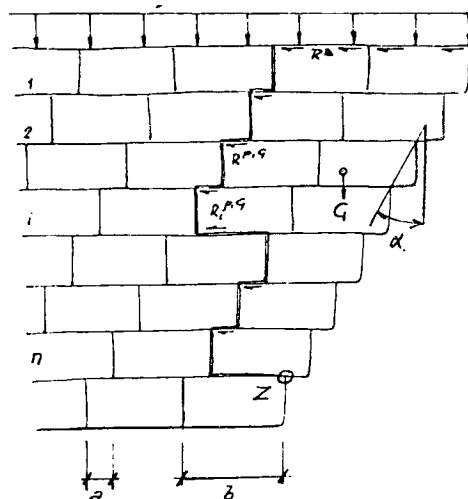


Fig. 18 Stability analysis of stratified rock. (After F.P. Jaeklin)

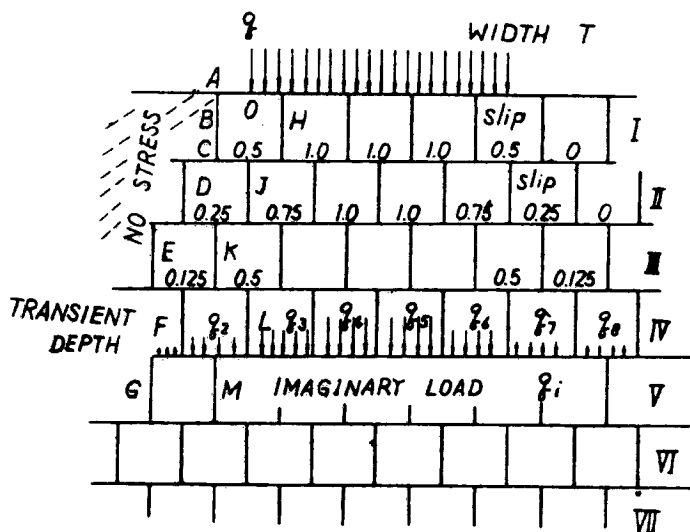


Fig. 19 Mechanical model of fissured foundation. (After M. Hayashi)

横に長い長方形塊の積層の安定を力の釣合いより論じ、崩落部の平均傾斜角 α を半理論的に算出している。さらにその算出式に、通常おこるような積層方塊の諸元を試みに入れて検討し、ほぼ Terzaghi の与えた値に近くなるといっている。

岩盤中に不規則な小き裂が雑然と入った岩盤に外力が加わったとき岩盤中の応力分布については、M. Hayashi²¹⁾ は岩盤を Fig. 19 のような方塊のモザイク体と仮定し、方塊の相互すべりの生ずる浅層部とすべりの生じない深層部に分け、前者の中の応力分布は Pascal 分布をなすと仮定して解いている。Fig. 20

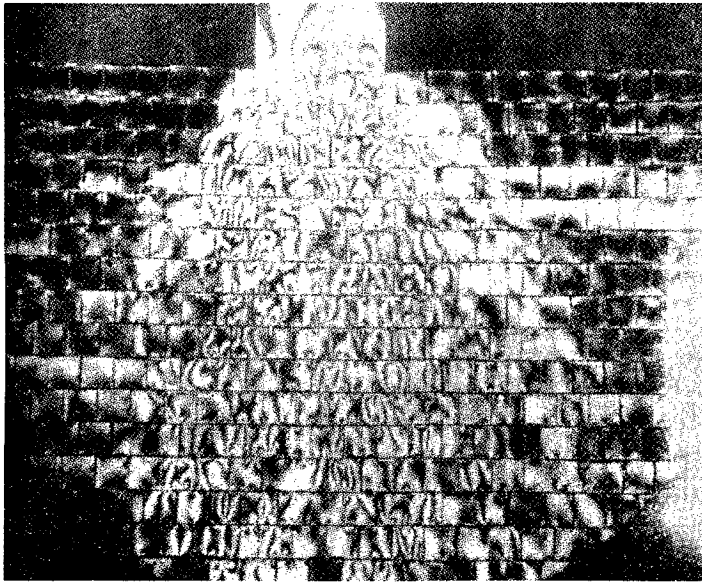


Fig. 20 Photoelastic isochromatics of fissured foundation model. (After M. Hayashi)

はその結果を比較検討するために行なった立方体の光弾性材料を積重ねたモザイク体に対する光弾性実験である。

3. 結 言

以上は第1回岩石力学国際会議に出席した報告をなす機会に、土質力学と対比して岩石力学の特徴や若干の問題点などにふれることともに、岩石力学がいまや発展の過程に入り、また今後この力学により解明を期待される間題が非常に多いことをのべた次第である。

この国際会議の第2回会議は1970年ユーゴスラビアで開催される予定であるが、そのときはさらに発展した多くの立派な発表が予想され、わが国においても今後この方面の一段の進歩がなされるように願うものである。

参 考 文 献

- 1) S. Murayama; T. Shibata: Flow and Stress Relaxation of Clays, Int. Symp. on Rheology and Soil Mech., Springer-Verlag, 1966, pp.99—129.
- 2) S. Murayama: A Theoretical Consideration on a Behaviour of Sand, Int. Symp. on Rheology and Soil Mech., Springer-Verlag, 1966, pp.146—159.
- 3) L. Bjerrum: The Shear Strength of a Fine Sand, Proc. of the 5th ICSOMEF., 1961, pp.29—38.
- 4) F.C. Walker; W.G. Holtz: Comparison bet. Laboratory Test Results and Behaviour of Completed Embankments and Foundations. Paper at ASCE Meeting, Los Angels, May, 1950.
- 5) S. Murayama; N. Yagi: Swelling of Mudstone due to Sucking of Water, ICRM., 1966, pp.495—498.
- 6) Ditto.

- 7) F.P. Rodrigues: Anisotropy of Granites, ICRM., 1966, p.728.
 - 8) E. Hoek; Z.T. Bieniawski: Fracture Propagation Mechanism in Hard Rock, ICRM., 1966, pp.243—250.
 - 9) P. Habib; J. Bernaix: La Fissuration des Roches, ICRM., 1966, pp.185—190.
 - 10) A.R. Gregory: Shear Wave Velocity Measurements of Sedimentary Rock Samples under Compression, Proc. of the 5th Rock Mech. Symp., Univ. of Minnesota, 1963, p.455.
 - 11) S.S. Vyalov; Y.K. Zaretsky: Questions of the Theory of Deformation of Rocks taking into account their Different Tensile and Compression Strength, ICRM., 1966, pp.559—563.
 - 12) R.W. Clough: The Finite Element Method in Plane Stress Analysis, Proc. 2nd ASCE Conference on Electronic Computation, Pittsburg, Pennsylvania, Sept., 1960, or Stress Analysis, Edited by O.C. Zienkiewicz and G.S. Holister. J. Wiley, 1965.
 - 13) R.E. Goodman: On the Distribution of Stress around Circular Tunnels in Non-homogeneous Rocks, ICRM., 1966, pp.249—255.
 - 14) S.F. Reyes; D.U. Deere: Elastic-plastic Analysis of Underground Openings by the Finite Element Method, ICRM., 1966, pp.477—483.
 - 15) H.W. Anderson; J.S. Dodd: Finite Element Method Applied to Rock Mechanics, ICRM., 1966, pp.317—321.
 - 16) O.C. Zienkiewicz; Y.K. Cheung: Application of Finite Element Method to Problems of Rock Mechanics, ICRM., 1966, pp.616—666.
 - 17) M.M. Grishin; V.G. Orekhov; V.I. Pystogov; G. Schimelmitz: The Effect of Heterogeneous Character of Rock Foundation on the Stresses on Concrete Dams Investigated Experimentally, ICRM., 1966, pp.563—566.
 - 18) M. Goldstein; M. Berman; B. Goosev; T. Timofeyeva; A. Turovskaya: Stability Investigation of Fissured Rock Slopes, ICRM., 1966, pp.175—178.
 - 19) F. Ishii; R. Iida; S. Kishimoto: A Method Discussing the Safety of Foundation Bedrock, ICRM., 1966, pp.573—578.
 - 20) F.P. Jaecklin: Tunnelform und Felsmechanik, ICRM., 1966, pp.397—403.
 - 21) M. Hayashi: A Mechanism of Stress Distribution in the Fissured Foundation, ICRM., 1966, pp.509—516.
- (NOTE) ICRM: The Proceedings of the First Congress of International Society of Rock Mechanics, Lisboa, 1966.