

岩石の風化と崩壊(2)

——崩壊の要因としての岩盤の特性——

沢 田 豊 明

WEATHERING OF ROCKS AND LANDSLIDE (2)

——Characters of Rocks for Primary Factor of Landslide——

By Toyoaki SAWADA

Synopsis

We extend our investigations of characters of rocks for primary factor of landslide which we have mentioned in our previous paper.

In the investigation of landslide, it is the purpose of this paper to point out that the coherence of rocks was expressed by weathering of rocks and alternation of rocks for the factor of landslide.

In this type of investigation, the choice of the method is in itself a problem, we describe the procedure of survey for the determination of rock coherence and indication method of rock coherence.

We express the extent of rock coherence by the density of joint and the compressive strength (hammer rebound).

1. ま え が き

前回¹⁾の報告では、崩壊の原因としての岩石の風化および変質に対する考え方、それを具体的に表現する方法について考察を行なった。

その結果、岩石の風化および変質の程度は岩石の圧縮強度（反撥度）とひび割れの密度の2つのパラメーターで表わすことができるのではないかという結論を得た。

今回は、それらのパラメーターが岩盤の諸特性の中で、どのような位置をしめているかを、野外の現象を主体として検討し、さらに、崩壊を土砂生産の立場からみた場合の岩盤の特性の表現と調査方法について提案した。

また、この2つのパラメーターが立体的にどのように拡がっているかを推定するために、岩盤中の弾性波の伝搬速度に関する資料を参考に若干の考察を行なった。

2. 岩盤の特性をとりあつかう尺度

岩石の崩壊による災害については、災害予知の目的によって、岩盤の性質のとりあつかい方が異なってくる。

災害予知は河川を対象とする場合、道路などの土木施設を対象とする場合および住宅などを対象とする場合の大きく3つに分けられる。

つまり、面的拡がりをもった広い地域、線的な細長い地域および点的な狭い地域を対象とするものに分けられる。

河川における土砂流出による災害の予知に関しては、河川流域のどの地点に、どのような規模の崩壊が発

生して、どれ位の土砂量を河川に供給するかということも必要である。しかし、このような資料はむしろ道路あるいは住宅などの災害予知に必要なことからである。

砂防の立場からこの問題について考えるならば、崩壊土砂量の推定精度が低くとも、流域全体としての崩壊土砂量が把握されればよいと考える。

また、予知しようとする崩壊の規模によっても、とりあつかう岩盤の特性の尺度が異なってくる。一般に、大崩壊とよばれるものは、地質構造、それにともなう地下水および地下水による岩石の変質などに影響される。

しかし、崩壊の規模が崩壊面積にして約 400 m² 以下のものは、一般に、風化土壌や基岩から遊離している土砂および岩塊の滑落となっており、斜面の土質力学的な要素および岩盤のひび割れによる影響が強いものとする。

Table 1 Relation between the area of survey and the characters of rocks.

	Large area	Long area	Small area
Large geological structure	Very importance	Importance	
Underground water	Very importance	Very importance	Importance
Small geological structure		Importance	Very importance
Crack		Importance	Very importance
Alteration	Importance	Importance	Very importance

以上の理由から、Table 1 に示すように、崩壊予知の対象地域の規模に応じて、岩盤に関するその特性のとりあつかいが異ってくる。

3. 岩盤の特性の不均質性について

地表を構成する物質はあらゆる尺度において不均質であるといえる。ここでとりあつかう岩盤においても、岩石の風化およびひび割れの程度に関しても場所によって非常に異なった現われ方をしている。

さらに、岩盤の不均質性に関しては、風化部と未風化部との組合せに関する問題、変質部と未変質部との組合せに関する問題およびひび割れの組合せに関する問題など、非常に多くの問題点が指摘される。

このような不均質性をどのように表現し、崩壊の原因として、今後、どのようなとりあつかい方が重要であるかということに関しては未知の部分が大きい。

そこで、問題点の解決の1つの方向として、崩壊の平均的規模を1つの目安として、不均質な岩盤をとりあつかう尺度を定め、一定範囲内における種々の岩盤の状態を統計的に処理し、ある地点の岩盤の特性を代表させることについて検討した。

崩壊の平均的規模をその面積で表わすとすれば、今まで調査された資料から、崩壊の平均面積を求めてみた。その面積は約 430 m² である。この面積を1つの目安として、単位面積における岩盤の不均質な特性を統計的に処理し、岩盤の特性を表現することを検討した。

4. 岩盤の特性の表現

4.1 ひび割れの要素

ひび割れの状態を適確に表現することは非常に困難であるが、ここでは崩壊に関連があると思われるひび

割れの方向、密度および割れ目の開きの表現について述べる。

ひび割れは岩石の結合力の欠除の程度をその大きさ、形、方向および密度によって表わしている。このようなひび割れの複雑な形態を地質構造のうえから整理し、崩壊の原因としてのひび割れの要素について検討した。

ひび割れは割れ目の程度によって、隠ぺい型、閉鎖型および開放型にわけられる。

隠ぺい型のひび割れは肉眼で割れ目を認めることができないもので、一般に結晶の単位で結晶の壁開や境界に原因している。

閉鎖型はひび割れが肉眼で認められるが、閉じているもので、割れ目があってもある程度の結合力を有している。水がしみこんで風化物が生成して変色しているものもある。あるいはひび割れが小さく一方で閉じてなくなっているものなどである。

開放型はひび割れの割れ目が閉じていても、どの方向も他のひび割れと交っているもの、割れ目が開いているものである。これは最も崩壊しやすく、今回の報告はこの型のひび割れを対象としたものである。

以上のようなひび割れによって破壊された岩塊はほとんどの場合、いくつかの面によって囲まれている。これらの面がどの方向に、どのような密度で分布しているか、あるいはこのような面が今後どのように発達していくかということは岩盤の力学的安定性を考えるうえで重要な問題である。

したがって、このような開放型のひび割れの特性について、面の性質、面の方向および面の密度の3点を対象に、若干の考察を行なった。

面の性質は、巨視的にひび割れ面を観察した場合、その面の形から、平坦面、わん曲面、凸凹面、葉片面および線状面に分けられる。また、造岩鉱物の尺度で面の形態をみた場合、面が鉱物結晶を切っている場合、面が鉱物結晶の境界、壁開にそっている場合および面が後生鉱物などの配列にそっている場合などに分けられる。

ひび割れ面は岩塊の滑落面となるため、この面の性質にともなう摩擦抵抗の大きさは岩塊の滑落を左右する。ひび割れ面の方向はひび割れで囲まれた岩塊の安定性に強く影響している。そのことは、ここでとりあつかう岩盤の安定性に関して、岩盤には圧力のかかっていない空間があることによって特徴づけられる。

このような岩盤に外力および内部的力が加わると、岩盤中の岩塊はその加わった力に応じて、力の加わっていない空間に押し出されるであろう。その際、ひび割れの面の方向によって、その現象の現われ方は異なってくる。以上のことから、面の方向によって岩塊の積木組織の安定性が決定される。

面の密度は岩塊の大きさを決定する。大きい岩塊ほど滑り面の面積が大きく摩擦抵抗が大きく滑落しにくいことから、岩盤の積木組織の安定性を決定する。また、ひび割れ面の密度が不均質であるということは、小さい岩塊と大きい岩塊がまざりあっていることを意味し、やはり岩塊の積木組織の安定性を決定する1つの要素である。このような岩盤の状態が最も表現しにくいものの1つである。

4.2 ひび割れの状態の表現

以上述べたひび割れの要素の中から、ひび割れの割れ目の開きの程度、ひび割れの方向およびひび割れの密度について、その状態の表現の1つの方法を紹介する。

ひび割れの割れ目の開きの程度は割れ面にクサビ形の物差しを差し込んで測定する。測定は長さ10m程度の間で50~100カ所の測定を行ない、その値の平均値をその地点を代表する割れ目の開きとする。

ひび割れの方向は、長さ10m程度の間で50~100個の測定を行ないシュミット網において表現する。

ひび割れは立体的に発達しているものであるが、野外では、一般にひび割れ状態はある面に投影されたように観察される。つまり、ひび割れはとじた線となって現われている。そのとじた線はある面積をあらわしている。その面積の大きさによってひび割れの密度が決定されている。したがって、ひび割れの密度をその面積によって求めることができる。

ひび割れの密度は、長さ10mの間で、約3カ所においてひび割れの状態を写真にとり、それを6ツ切り大の印画紙に焼き付け、その写真から Fig. 1 のようなひび割れの状態をうつしとり、ひび割れで囲まれた

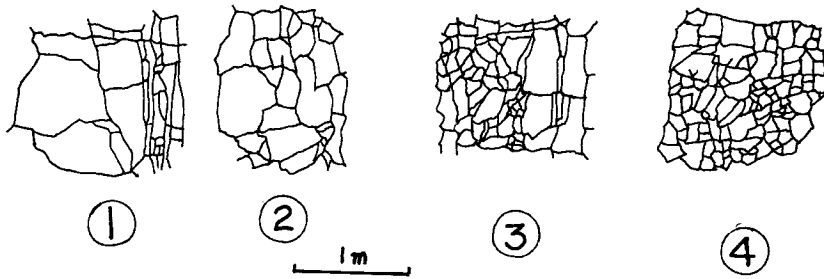


Fig. 1 Copy of crack in rocks.

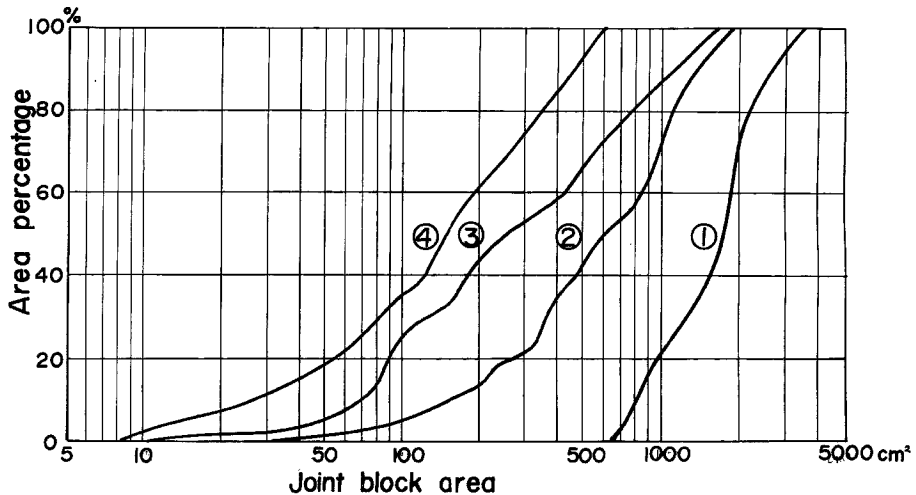


Fig. 2 Area accumulation curves of joint block area. The numbers in this figure are the same as in Fig. 1.

部分の面積を測定し、その個々の面積の累加百分率を求めたものが **Fig. 2** である。したがって、ひび割れの大きさの程度は **Fig. 2** のような累加曲線で表現される。また、ひび割れの密度は、 1 m^2 中に存在する岩塊の数によって、つまり面積累加百分率の中央値 $d \text{ cm}^2$ で 10000 cm^2 を割ったものとして求められる。

なお、各要素の測定区間を長さ 10 m としたことは、前述した崩壊の平均的規模が面積にして約 400 m^2 であることを考慮してである。

4.3 変質の要素と測定

ここで述べる変質は化学的風化も含めて考えている。岩石の変質については大きく2つに分けられる。その1つは地表条件下におけるもので、気候的因子が強く風化と呼ばれている。他の1つは地下の内部因子による影響を強く受け、変質と呼ばれているものである。

しかし、実際には地表近くで、これらの作用が共存していて、岩石の結合力の減少がどの作用によって強く影響されているかは区別しがたい。

したがって、その作用が何であるかということよりも岩石の結合力の減少の程度を知ることが必要である。

変質による結合力の減少は鉱物を構成する分子間の結合力によって決定される。その結合力を測定する方法としては、間接的なものであるが、圧縮試験、引張試験、衝撃試験、圧密試験およびせん断試験などの方法がある。しかし、いずれも試料を実験室に持ち帰って行なうものが多い。野外の状態に則して多くの試料

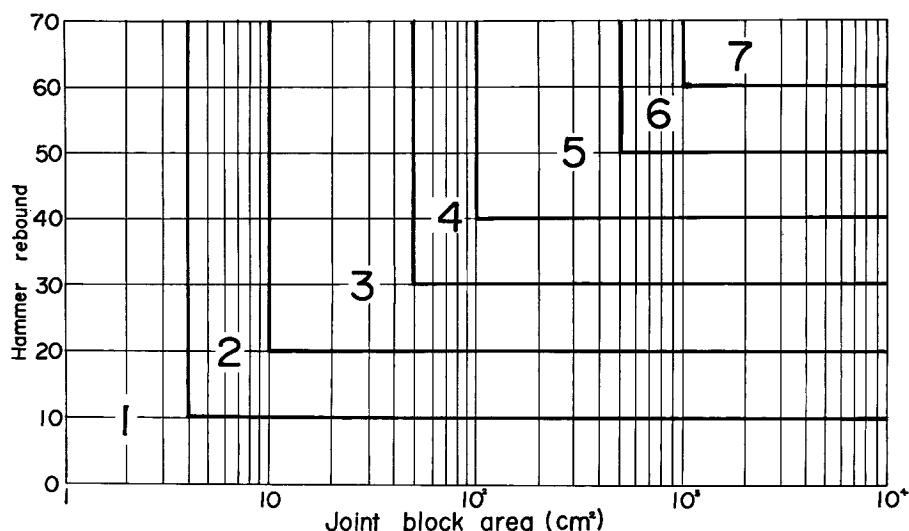


Fig. 3 Figure for grade of rock coherence from relation between joint block area and hammer rebound.

について試験することが望ましいので、1つの方法として、テスト・ハンマーによる岩盤の反撥度を岩石の結合力を示すものとして採用した。

以上述べたことから、土砂生産の立場において、岩盤の崩壊の原因として、測定すべき岩盤の特性の最少単位のものを、岩盤のひび割れ密度と反撥度（圧縮強度）の2つと考える。

岩盤の結合力の程度をひび割れ密度と反撥度の2つのパラメーターによって、簡単に求めるために図表Fig. 3を作製した。岩盤の結合度は1～7の段階に分け表示した。結合度1は最も崩壊しやすい性質、結合度7は最も崩壊しにくい性質を示すものとした。

5. 地質構造と岩盤の特性の立体的拡がり

以上述べた考え方にもとづいて、崩壊にむすびつく岩盤の特性が野外においてどのように現われているかを、具体的な例を示しながら説明したい。また、そのような岩盤の特性が地表下でどのような分布を示しているかを推定する方法について若干の検討を行なった。

5.1 ひび割れと弾性波速度の関係

ひび割れの状態は地表面において平面的に観察されるのみで、その状態が地下においてどのように変化しているかは、地表面のひび割れの状態から判断せざるをえない。しかし、岩石中を伝搬する弾性波の速度と岩石中のひび割れの状態との関係が明らかになれば、この関係を利用して弾性波の伝搬速度から地表下の岩石中のおおよそのひび割れの状態が推定できるものと考ええる。

そこで、ひび割れと弾性波速度の関係について、石英斑岩の野外調査を行なった結果、Fig. 4のような関係が求められた。

Fig. 4 から、ひび割れが少なくなると弾性波は速く、ひび割れの割れ目の開きが大きいほど遅くなる傾向がみとめられた。なお、変質と弾性波の伝搬速度との関係については調査を行っていない。

5.2 岩盤の特性の具体例

調査を行なった地域は神通川水系蒲田川流域で、岩石は変はんれい岩、石英斑岩、砂岩および輝緑凝灰岩質泥岩である。これらの分布および調査地点はFig. 5に示したとおりである。なお、調査の項目はひび割

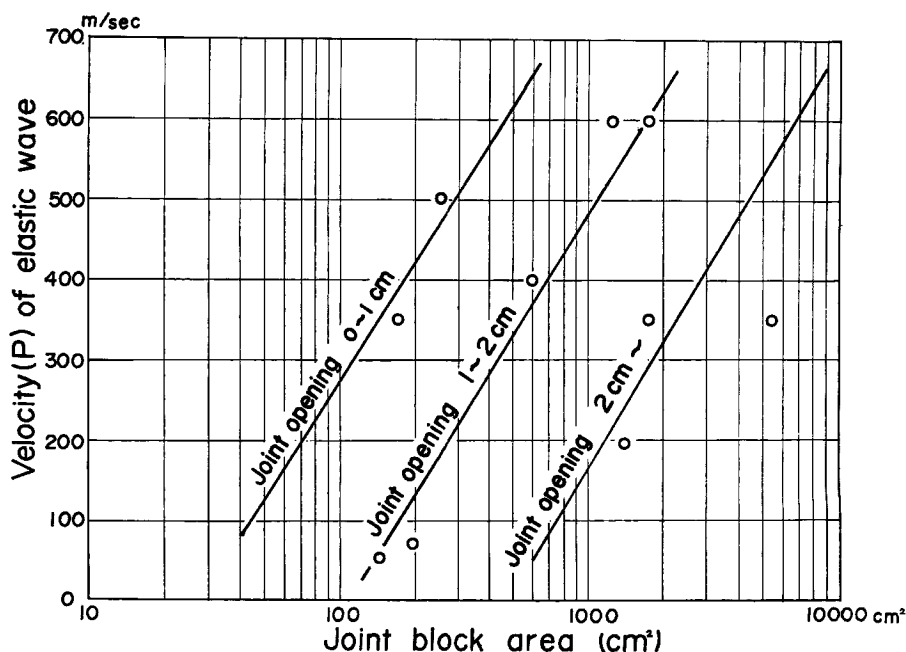


Fig. 4 Relation between joint block area and velocity (P) of elastic wave in quartz porphyry.

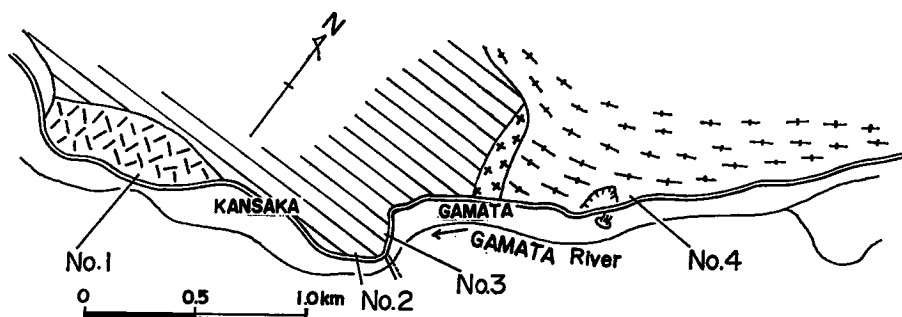


Fig. 5 Location map of survey.

れの方向、テスト・ハンマーの反撥度、ひび割れ密度、ひび割れの開きおよび弾性波の伝搬速度である。

測定に使用したテスト・ハンマーの衝撃エネルギーは 0.225 mkg である。また、弾性波の測定は、1 点に振動ピックアップを置き固定し、振源にスタート信号機構のついたハンマーを使用し、振源を 1 m 間隔で移動し、振源と固定点の間の弾性波（P 波）の到達時間を測定した。

Fig. 6 は変はんれい岩について、No. 1 地点の調査を行なった結果を示したものである。岩盤の状態は一見良好であるが、変質が進んでいて、南北方向の破碎構造が発達している。破碎によるひび割れの密度の平均は 10000/1500、反撥度の平均は約 25 である。これらの値から Fig. 3 によって岩盤の結合度を求めると 3 になる。ひび割れの割れ目の開きは 1 cm 以下である。以上の結果から、やや崩壊の危険性があると考えられる。この場所では雪どけから梅雨時期にかけて、岩塊の崩落がみとめられる。弾性波の伝搬速度は、この岩盤全体では 700 m/sec であるが、反撥度の小さい付近では 100 m/sec 以下となっている。このよう

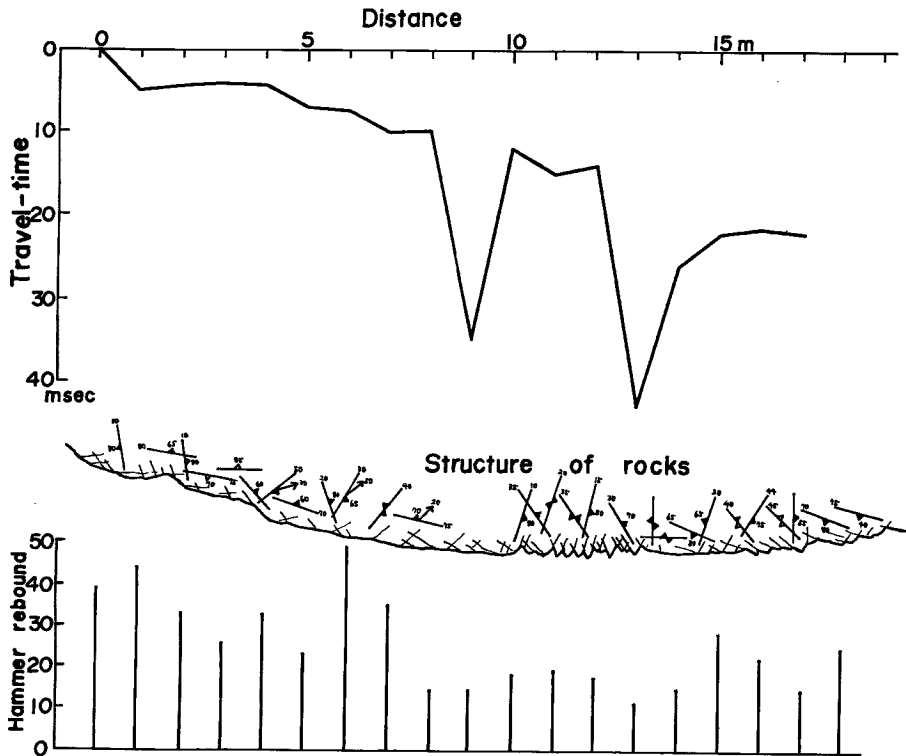


Fig. 6 Relation between hammer rebound or structure of rocks and travel-time of elastic wave in meta-gabbro.

な所は破砕面が地形面に平行しており、岩塊の根が浅く岩盤から遊離しやすくなっている。したがって、弾性波の伝搬速度はこのようなひび割れの状態を反映したものではないかと考える。

Fig. 7 は石英斑岩について、No. 4 地点の調査を行なったものである。石英斑岩はまったく変質していないが、節理が非常に発達しており、岩塊は立方体に近い形をしている。節理によるひび割れの密度の平均値は $10000/1300$ で、反撥度の平均値は約 40 である。これらの値から求められる岩盤の結合度は 4 である。ひび割れ目の開きは平均約 2 cm である。弾性波の伝搬速度はこの岩盤全体では約 700 m/sec である。反撥度が 20 以下を示す地点では、弾性波の伝搬速度は約 100 m/sec 以下となっている。また、この付近のひび割れの密度は約 $10000/200$ と大きく、ひび割れが発達している。なお、この地点の反撥度が 20 以下というのは、岩石の変質よりもこのひび割れの密度の大きさの影響を受けているものと考えられる。この地点の岩塊の滑落はやや多い。しかし、そのような例は、ひび割れの割れ目の間に土砂などの入っている場合で、降雨によってそれが流れ出るときに滑落している。

Fig. 8 は砂岩について、No. 3 地点の調査例を示したものである。岩石の変質はみとめられないが、節理はよく発達し、岩塊は立方体をなしている。岩盤には小さな断層および破砕構造がみとめられる。節理によるひび割れの密度の平均は $10000/2200$ で、反撥度の平均は約 35 である。これらの値から岩盤の結合度を求めると 4 である。ひび割れの割れ目の開きは平均約 1.5 cm である。弾性波の伝搬速度はこの岩盤全体で約 500 m/sec である。伝搬速度が 5~7 m の間で遅くなっているが、地表の観察ではひび割れの密度が大きいことを示しているように思われる。また、12 m の地点で 1 カ所、反撥度が 20 以下となっているが、

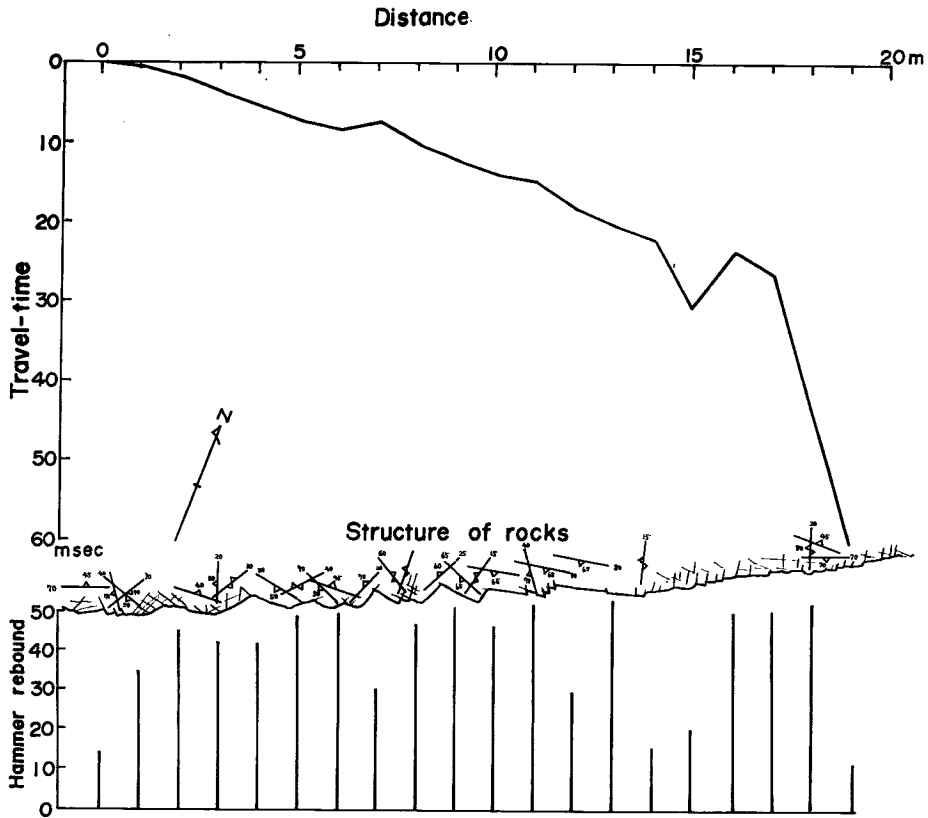


Fig. 7 Relation between hammer rebound or structure of rocks and travel-time of elastic wave in quartz porphyry.

根の浅い岩塊が多いことを示していると考えられる。この地点の岩盤の滑落は非常に少ない。

Fig. 9 は輝緑凝灰岩質の泥岩について、No. 2 地点の調査の例である。岩石の変質はみとめられないが、断層および破碎構造がみとめられる。ひび割れは破碎によるものと節理によるものがほぼ同じ割合でみとめられる。ひび割れの密度の平均は $10000/2400$ で、反撥度の平均は約 35 である。これらの値からこの岩盤の結合度を求めると 4 になる。ひび割れの割れ目の開きの平均は 1 m 以下である。弾性波の伝搬速度はこの岩盤全体で約 1400 m/sec であるが、3~9 m および 10~13 m の間で約 100 m/sec になっている。これは地表面において、1.5 m, 5 m および 8 m 付近にみとめられる断層および破碎構造の影響を受けているものとする。この岩盤において、0~5 m の間で岩塊の滑落が少しみとめられるが、5~15 m の間ではほとんど岩塊の滑落はみとめられない。

以上述べた岩盤は、この調査地域でも安定した岩盤の部類に属している。これらの岩盤の結合度 3 および 4 よりも小さい 1 および 2 を示す地点では、弾性波の伝搬速度が遅く、測定が困難である。また、テスト・ハンマーの反撥度も 0 を示し、ひび割れの密度も $10000/10$ 以上になる。このような所では、雪どけおよび梅雨の時期に岩塊の滑落よりも、土砂を含む岩塊の崩落が非常に多い傾向を示す。

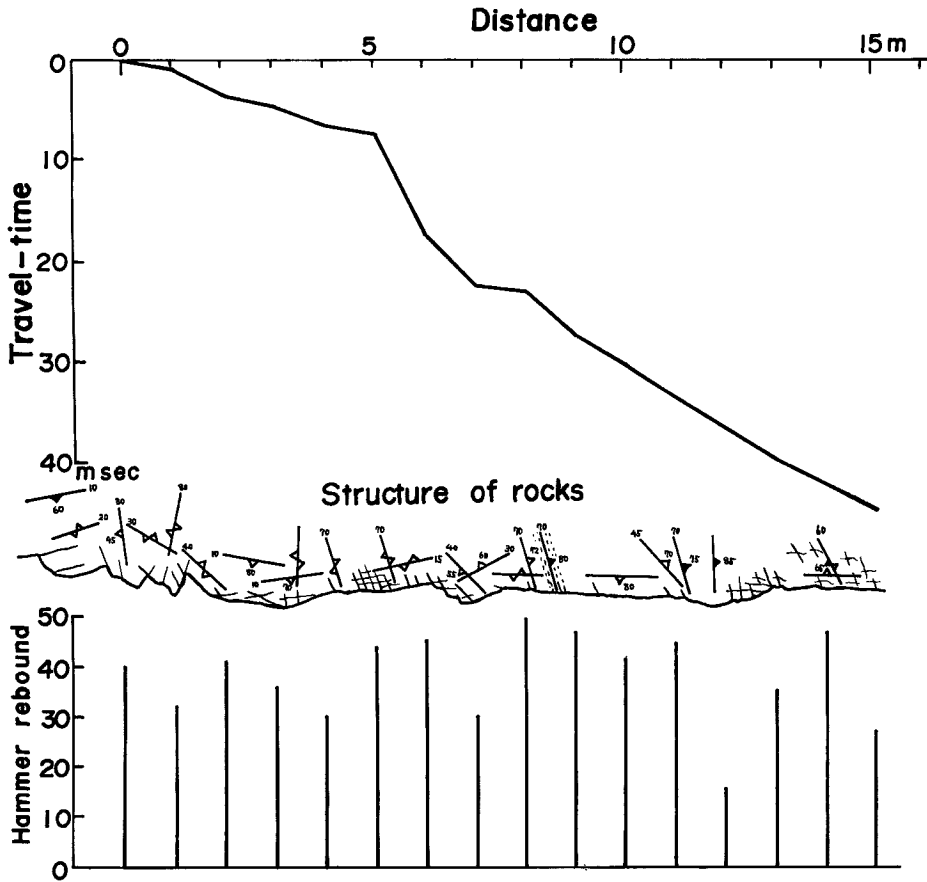


Fig. 8 Relation between hammer rebound or structure of rocks and travel-time of elastic wave in sand stone.

6. む す び

以上、生産土砂量を把握するための崩壊予知の問題に関連して、ひび割れの密度、ひび割れの方向、ひび割れの割れ目の開き、テスト・ハンマーによる反撥度および弾性波速度などの岩盤の特性の表現と調査の方法について2・3の具体例を述べた。

ひび割れの密度の表現方法は前回の方法と同様であるが、調査の方法および測定の方法も若干変更した。また、岩盤の結合度の表現についても、圧縮強度を採用せず反撥度を直接利用した。さらに、岩盤の結合度をひび割れの密度(D)と反撥度(P)の2つのパラメーターによって表現し、野外調査によって得られる D および P の値から、岩盤の結合度を求めるための図表を作製した。

本文は、河川災害において問題となっている河川上流部における土砂生産に関連する岩盤の特性に対する基本的な考え方を述べたものである。

今後、このような考え方に基づいて、野外調査を行ない、生産土砂量を把握するための資料の集収および崩壊に関する基礎的実験を行ないたいと考える。末筆ではあるが、御指導を受けた矢野勝正教授に感謝する。

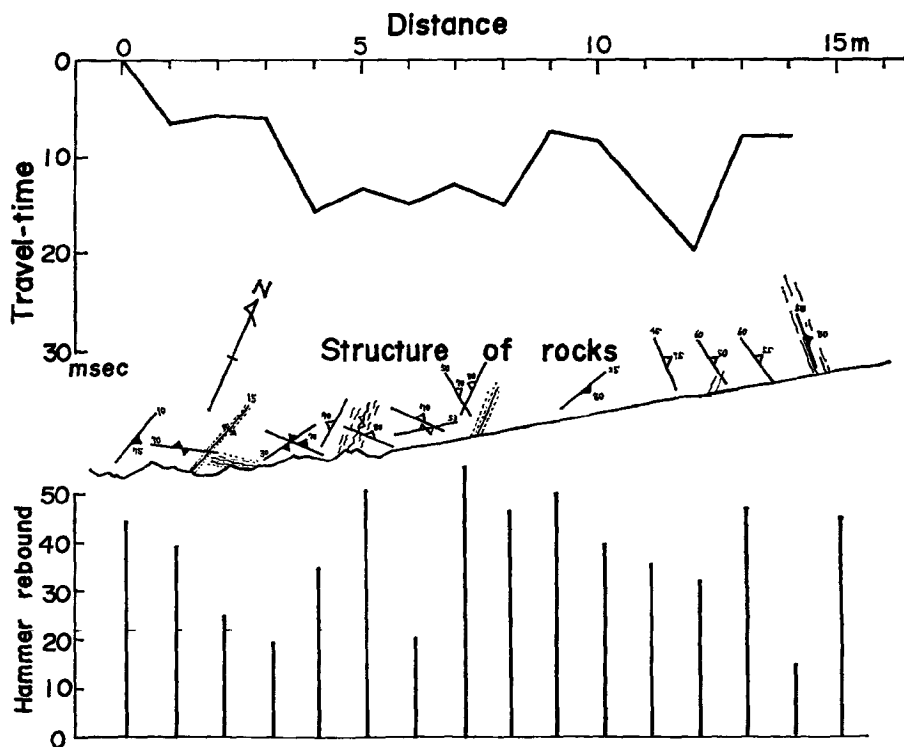


Fig. 9 Relation between hammer rebound or structure of rocks and travel-time of elastic wave in diabasic tuffrich mudstone.

参 考 文 献

- 1) 矢野勝正・沢田豊明：岩石の風化と崩壊(1)，京都大学防災研究所年報，第 13 号 B，昭 45. 3, pp. 621-627.