

P 波により岩盤のせん断強度を推定する試法

— 凍結融解作用による微小きれつを用いて —

A New Method for Estimation of Shear Strength of Rock Mass by P-Wave Velocity

— By Means of Investigating on Micro-cracks
made by Freezing and Thawing Cycles —

根 岸 正 充*

(昭和55年10月 受理)

Abstract

As it is widely recognized that there is a large difference in strength between rock mass with fissures and intact test-pieces of rock, the author aimed to establish more useful equations that bind both strengths.

For this purpose, test-pieces with numerous micro cracks made by freezing and thawing cycles were prepared, and the relation between their uniaxial compressive strength and P-wave velocity was investigated.

The result showed that this relation is considerably similar to that of rock mass with fissures and indicates that above mentioned method is very useful in laboratory.

Test-pieces of welded tuff were used for this experiment because of these uniform texture and appropriate hardness. On the basis of the results of laboratory experiments on the test-pieces of intact and cracky rock, an approximate value of shear strength of rock mass can be calculated by the following equation :

$$\tau_{mo} = \tau_{po} \cdot \left(\frac{V_{pm}}{V_{po}} \right)^n$$

where, in case of soft rock (uniaxial compressive strength $q_{uo} = 10 \sim 100 \text{ kg/cm}^2$), $n = 1.3 \sim 1.7$

medium hard rock ($q_{uo} = 100 \sim 500$), $n = 1.6 \sim 2.8$

hard rock class I ($q_{uo} = 500 \sim 1,000$), $n = 2.7 \sim 4.0$

hard rock class II ($q_{uo} \geq 1,000$), $n = 4.0 \sim 5.5$

τ_{mo} : shear strength of rock mass (cohesion)

τ_{po} : shear strength intact of test-pieces of rock (cohesion)

V_{pm} : P-wave velocity of rock mass

V_{po} : P-wave velocity of intact-pieces of rock

Furthermore, the relation between shear strength of intact testpieces of rock and that of rock mass obtained by block shear tests at 10 localities of Hokkaido, can be approximately expressed by the following equation :

$$\tau_{m-bo} = \tau_{po} \cdot \left(\frac{V_{pm}}{V_{po}} \right)^N$$

where, in case of soft rock, $N = 3.0 \sim 3.5$

medium hard rock, $N = 3.5 \sim 5.5$

*地質研究室主任研究員

hard rock class I, $N=5.5\sim 8.0$

hard rock class II, $N\geq 8.0$

τ_{m-bo} : shear strength of rock mass obtained by in-situ block shear tests (cohesion, kg/cm^2)

In planning of general construction the latter value (τ_{m-bo}) has been commonly used. However, the difference between the two values (τ_{mo} and τ_{m-bo}) must be recognized, and their application should be made according to the purpose of safety of dams, tunnels and slopes of large cutting in rock masses, etc.

目 次

1. ま え が き	2
2. 従来の研究の問題点と筆者の方法	3
2-1 従来の研究の問題点	3
2-2 筆者の方法	4
3. 試 験 法	4
4. 試 料	5
5. 試験結果と考察	7
5-1 凍結融解作用とき裂の増加	7
5-2 凍結融解作用を受けた供試体の q_u と V_p	7
5-2-1 凍結融解サイクルと V_p の減少率の関係	7
5-2-2 凍結融解サイクルと q_u の減少率の関係	8
5-2-3 q_{un} と V_{pn} の関係	9
5-3 インタクトな岩石供試体とクラッキーな岩石供試体における q_u と V_p の関係の相違	10
6. 岩盤強度推定への適用	14
6-1 岩盤の準一軸圧縮強度への適用	14
6-2 セン断強度への適用	16
6-3 岩盤のせん断強度への適用	17
6-3-1 割れ目のほとんど存在しない岩盤のせん断強度と供試体のせん断強度の比較	17
6-3-2 割れ目の存在する岩盤のせん断強度と供試体のせん断強度の比較	17
7. ま と め	21
8. あ と が き	21
謝 辞	21
参 考 文 献	22

1. ま え が き

複雑多岐をきわめる岩盤の割れ目を定量的に評価し、これを岩盤の強度と結びつけることは、厳密には不可能に近い。換言すれば、岩盤の強度を求める場合、現位置試験よりも適切な方法はない、ということである。

このことを認識しつつも、我々が当面する調査地での現位置強度試験のデータは、現状ではきわめて限定されている。原位置強度試験箇所は、平面的、深度的に制限されるし、多大な労力、費用と工期を要する。このた

め、将来においてもこの試験が必要、かつ十分に実施される可能性は少ない。したがって、より簡潔な方法で岩盤強度の値を求める式が必要である。

このことが本論文の第一の視点である。

最近10年来、岩石の物理的性質の測定および研究は詳細、かつ多数実施されている。しかし、これらが岩盤強度の推定に十分役立っているとはいえない。これは次の理由による。

岩石の割れ目の定量的評価が、きわめて困難なために、通常の岩石試験はインタクトな供試体 (Intact Test-^{注1)}

注1) 肉眼的にみて、割れ目の存在しない供試体

piece) で実施されている。一方、岩盤にはその岩質が硬くなればなるほど、ほとんど必ず割れ目が存在する。しかも、岩盤の強度は存在する割れ目の質、量に大きく左右されている。したがって、通常の岩石試験値は岩盤として考えられる最高強度値を示すだけで、割れ目の存在する実際の岩盤の強度とは非常に異なっている。

従来、岩石試験値は岩盤分類の指標の一つとして利用されている程度であり、これだけから実用に役立つような岩盤強度を求めることはほとんど不可能に近い。

したがって、岩石と岩盤の強度を関係づけるなんらかのより実用的な式が求められ、多数実施されている岩石試験値をより広く活用する方法が考えられなければならない。このことが、本報文の第二の視点である。

構造物の基盤として岩盤を調査する場合、その力学的諸性質が対象になるが、一般にはせん断強度、弾性係数、限界支持力が必要とされる場合が最も多い。なかでもブロックせん断試験 (Block Shear Test) やロックせん断試験 (Rock Shear Test) は多大な費用と労力を要するとともに場所も限定されるので、岩盤のせん断強度は最も求めがたい値である。したがって、室内の岩石試験値と比較的実施しやすい原位置試験から岩盤のせん断強度が推定できれば非常に好都合である。このことが、本報文の第三の視点である。

筆者はこれらのことを目的として、P波の伝播速度を指標として、以下の方法により、岩石と岩盤の強度を関係づけ、岩盤の強度、特にせん断強度を推定する式を求めた。これらの考え方とデータの一部あるいは現位置せん断試験との比較検討はすでに報告したが、今回、その後の試験データも検討し、その論拠と式をより詳細に報

告する。

2. 従来の研究の問題点と筆者の方法

2-1 従来の研究の問題点

周知のように、割れ目の入った岩石および岩盤の強度に関する研究は多数実施されている。我々はこれらから、割れ目が強度に及ぼす影響について、有益な情報を得ることができる。しかしながら、次のようなこともいえる。割れ目の入った岩石の強度に関する従来の多くの研究は、①供試体に人為的にいろいろな角度の割れ目を1～数本挿入、②供試体に多数の規則的割れ目を仮定したFEMによる計算、などにより強度変化を求めたものである。これらが有用な情報を提供してくれることも確かであるが、最終目標を岩盤の強度を推定することとし、岩石と岩盤の対比という視点から考えると、次の理由によりあまり実用的な方法ではない。

岩盤に存在する割れ目は、岩盤の強度を規制する重要な因子であることは確かであるが、その規模、形、夾在物は何れをとっても、本来それほど規則的かつ等方均質なものではない。また、実際の調査では地表面のごく一部を除けば割れ目の大きさ、頻度などどころか、地質構造すらかなり調査の進んだ段階でなければ、実用的な精度で知ることは困難である。

割れ目の諸要素を測定することは、露頭、横坑などの中で簡単にできるように考えられるが、それには多くの労力を要する。データは露頭では地表面のみであり、縦坑や横坑では深度的、平面的に限定される。ボーリングコアでは割れ目の連続性、大きさ、向きなどがかなり不正確である。岩盤の切り取り面でも、重機の走行などに

(注) 記号説明

- q_u : 一軸圧縮強度 (kg/cm^2)
- q_{uo} : 凍結融解0サイクル時のインタクトな供試体における一軸圧縮強度 (kg/cm^2)
- q_{un} : 凍結融解各サイクル時の供試体における一軸圧縮強度
- q_{um} : 岩盤の準一軸圧縮強度 (一軸応力状態を仮定したときの岩盤強度で、供試体の一軸圧縮強度に相当する (kg/cm^2))
- V_p : P波伝播速度 (km/sec)
- V_{po} : 凍結融解0サイクル時のインタクトな供試体におけるP波伝播速度 (km/sec)
- V_{pn} : 凍結融解各サイクル時の供試体におけるP波伝播速度 (km/sec)
- V_{pm} : 岩盤のP波伝播速度 (km/sec)
- τ : せん断強度 (kg/cm^2)
- τ_p : インタクトな供試体における岩石のせん断強度 (kg/cm^2)
- τ_{po} : インタクトな供試体における岩石の粘着力 (kg/cm^2)
- τ_m : 岩盤のせん断強度 (kg/cm^2)
- τ_{mo} : 岩盤の粘着力 (kg/cm^2)
- τ_{m-b} : ブロックせん断試験における岩盤のせん断強度 (kg/cm^2)
- τ_{m-bo} : ブロックせん断試験における岩盤の粘着力 (kg/cm^2)
- τ_{mo-c} : 計算上により求められた割れ目の存在する岩盤の粘着力 (kg/cm^2)
- τ_{no} : 凍結融解各サイクル時の岩石の粘着力 (kg/cm^2)
- σ : せん断試験時の垂直応力 (kg/cm^2)
- ϕ : 内部摩擦角 (度)

より、施工時に生じた破碎岩などが表面に堆積しているために、かなり良好な岩盤でないと割れ目を測定できない場合が多い。一般に割れ目の性状を測定できた場合でも、データのとり方に個人差がかなりでてくる。

このような現状を考えると、現位置で割れ目の性状を測定し、室内試験結果と結びつけることはかなり困難である。実用面から考えても、あまり便利な方法ではないと考えられる。

2-2 筆者の方法

昭和30年代中頃以後、岩盤調査のためのP波を用いた、いわゆる弾性波探査の普及は著しいものがある。現在では、ダム、トンネル、切土などの大きな土木工事においては、ボーリングとともにほとんどの場所で実施されている。したがって、地山(岩盤)の弾性波伝播速度とボーリングコアの岩石試験値から岩盤の強度を推定するのが最も実用的である。

割れ目のある岩石の供試体の強度を求める場合、その割れ目の入り方、大きさなどが問題である。通常の岩盤では5~200cm間隔、連続性は数m~数10mに及ぶいくつかの節理系が発達する場合が多い。岩盤の1ブロックの大きさを20~50m四方面程度と想定すれば、全体の大き

さの1/1000~1/5程度のものが最も多いと考えてよい。したがって、最終目的を岩盤の強度を求めることと考えれば、「岩盤に存在する節理などの割れ目の大きさは、供試体サイズに対比した場合、数分の1mmから最大2~3cm程度の大きさの微小きれつに相当する」と相似性が考えられる。この場合、単純な機械的、人為的な割れ目の挿入(図-1)では供試体に比較して割れ目の大きさが大き過ぎる。換言すれば、一方向の一きれつにより全体が左右されすぎると考えられる。

筆者はインタクトな岩石供試体に対し、凍結融解の繰返し作業(以下凍結融解作用)により、多数の微小きれつを生じさせた。微小きれつの増大にともなう強度の変化を一軸圧縮強度(q_u)とP波伝播速度(V_p)を指標に調べた。この二つの指標の関係が地山(岩盤)の V_p とせん断強度との関係に最も近似するものと考え、これらの関係とインタクトな供試体の岩石試験値から、岩盤の強度を推定することを試みた。

3. 試 験 法

水中において、インタクトな岩石供試体を急速に、かつ反復して凍結-融解させ微小きれつを生じさせた。いわゆる、水中における岩石の急速凍結融解試験であり、温度条件はASTM C-666に準じて実施した。ASTM C-666は、コンクリート供試体を対象としたものであり、温度条件のみならず、供試体の大きさその他について規定している。これによれば、供試体は幅および厚さ3インチ(7.6cm)以上5インチ(12.7cm)以下であり、長さ14インチ(35.6cm)以上16インチ(40.6cm)以下の角柱としている。しかし、筆者は供試体を通常筆者らが岩石試験を実施している大きさおよび形状とした。すなわち、コア採取機が使用できないほど、固結度の弱い軟岩では、カッターで切りだした一辺5cmの立方体または5×5×10cmの直方体の供試体とした。コア採取機で、不攪乱試料として採取可能なその他の軟~硬岩では、直径 $\phi=5$ cm、長さ $L=10$ cm、 $L/\phi=2$ (1.8~2.2)の円柱の供試体とした。これは、一般に供試体の大きさは大きい方が望ましいが、岩塊にはほとんど必ず割れ目が存在し、大きなインタクトな供試体を多数採取することがむずかしいことによる。

同岩質の供試体を確保するために、なるべく一つの大きな岩塊から全部を採取するよう留意した。採取された供試体について、超音波によるP波の伝播速度、比重、間隙率、吸水率などを測定し、均一性を調べた。できるだけ同岩質の試料を、1カ所について30個前後用意し、適当なサイクルごとに超音波によるP波伝播速度 V_p と一軸圧縮強度 q_u を測定した。すなわち、凍結融解作

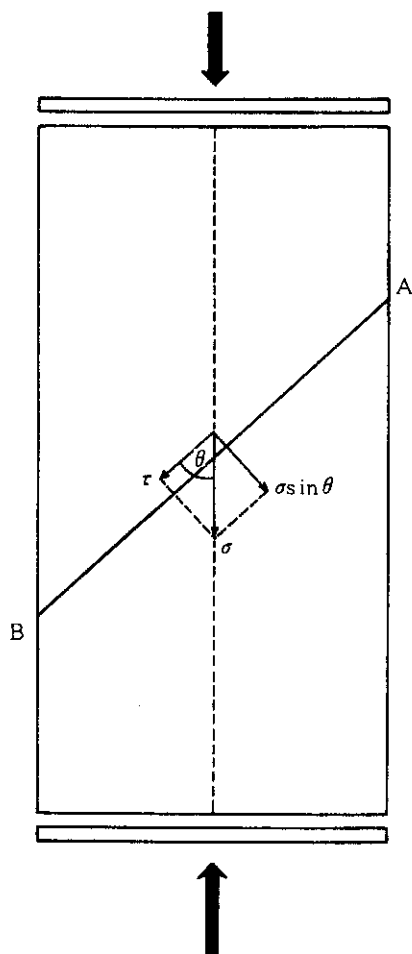


図-1 割れ目と強度の関係

用に対し、抵抗性の強い岩石では50~100サイクル、弱いものでは5~20サイクルごとに測定した。各々のサイクルにおける V_p と q_u の値は原則として5個の平均値で求めた。形、大きさの異なる供試体の q_u は、換算式により $L/\phi = 2$ の円柱の強度に補正した。 V_p は周波数50 KC/secの超音波により測定した。

4. 試料

今回用いた試料はすべて熔結凝灰岩であり次の理由による。当初において、岩質の硬いものほど凍結融解作用の影響が少ないのは当然である。しかしながら、筆者は多種類の岩石の室内凍結融解試験を実施しているうちに、熔結凝灰岩が凍結融解の影響を受けやすく、その中でも特に強い流理構造を持つものが他の岩石に比較して、凍結融解作用による岩質の劣化が著しいことを見出した。

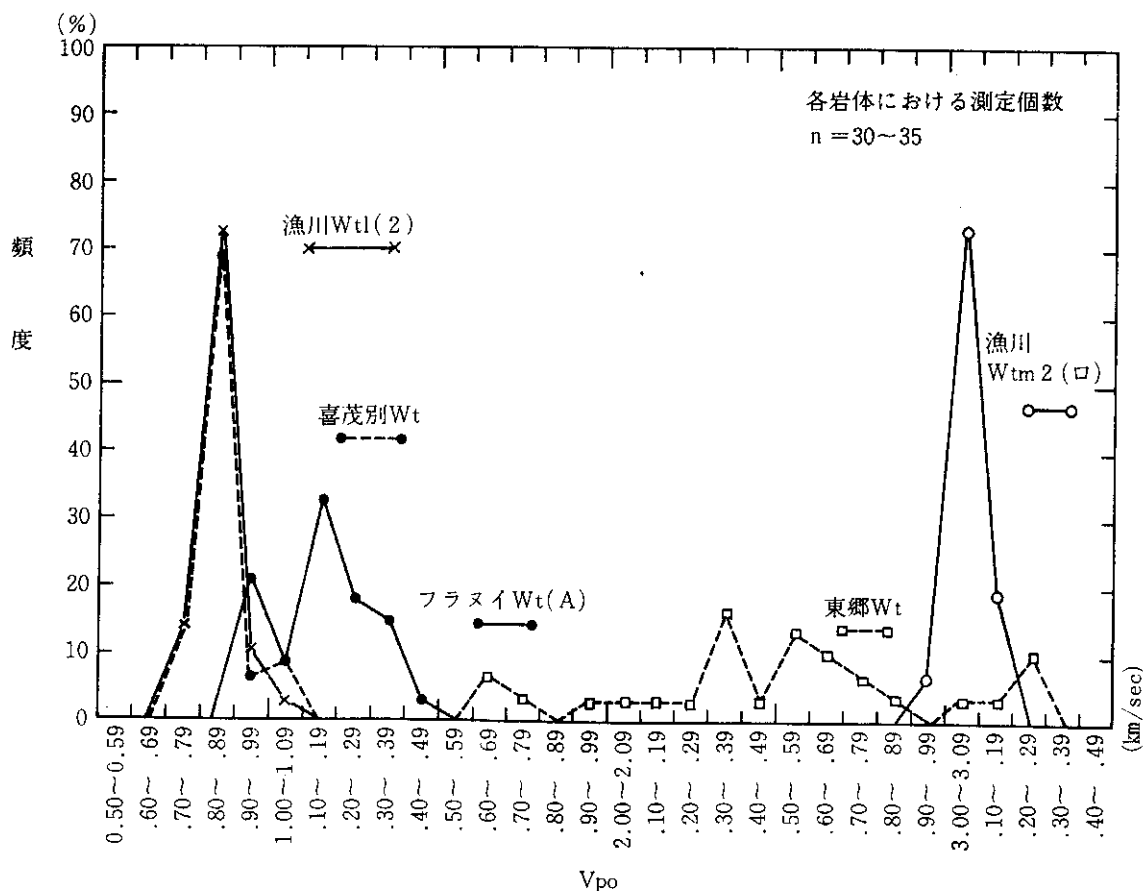
周知のように、熔結凝灰岩は少量の斑晶とほとんどすべてのハリ質からなる、ある意味では、他の岩石に比較して特異な構造(Texture)と岩質を持った岩石である。凍結融解の影響を受けやすいのは、この構造に起因するものと考えられる。肉眼観察によれば、凍結融解において、流理構造(正確にはユータキシチック構造 Eutaxitic

Texture)の流理面に沿って、微小きれつが供試体の表面だけでなく内部にまで生じている。さらに、完晶質の岩石ほど硬質でなく、泥岩ほどは乾湿の変化の影響を受けやすくなく、粘板岩のように潜在きれつが多くない。熔結凝灰岩は、適当なサイクルで凍結融解試験を実施し、その影響を調べるのに好都合である。

試料はいずれも、北海道内の各地より採取したものである。十勝熔結凝灰岩に属する富良野市の東郷、上川郡美瑛町の白金、フラヌイの各ダム計画サイトおよび支笏熔結凝灰岩に属する恵庭市盤尻の漁川ダムサイト、喜茂別熔結凝灰岩に属する虻田郡喜茂別町の喜茂別ダム調査サイトのものである。

これらの試料の岩石試験値および岩質の特徴について表一に示す。供試体を均一化するために、平均値からある程度離れたものは除外したが、それでも試料の不均一性は残る。試験値の例とバラツキの程度を図一2、3に示す。試料のなかでは、漁川ダムサイトの支笏熔結凝灰岩 $W_{tm2}(r)$ が最も硬く、平均 $q_{100} = 1,283$ (kg/cm²)、平均 $V_p = 3.5$ (km/sec)、最も軟質であるのも支笏熔結凝灰岩の漁川 $W_{tl}(2)$ である。平均 $q_1 = 32$ (kg/cm²)、平均 $V_p = 0.85$ (km/sec)である。

一般にすべての岩種において、岩盤は不均一なもので

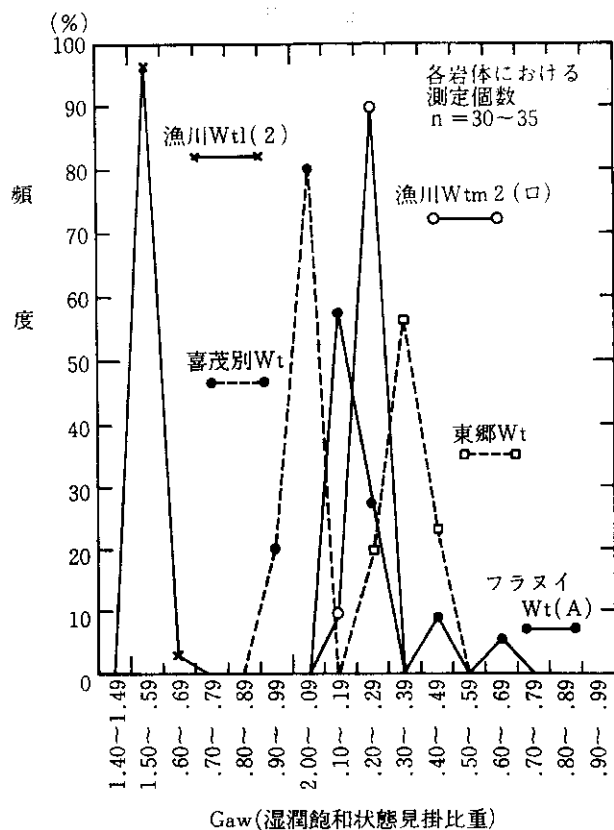


図一2 インタクトな供試体の V_{po} と頻度例

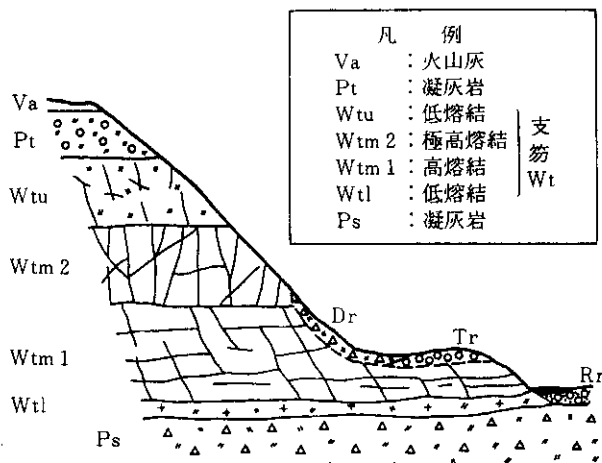
表-1 試料の凍結融解試験前の岩石試験値※

試料	採取地	超音波縦波伝播速度 V_{po} (km/sec)	見掛け比重 G_{aw} (湿潤飽和状態)	一軸圧縮強度 Q_{uo} (kg/cm ²)	有効間隙率 (%)	岩質
白 (十勝熔結凝灰岩)	富良野市東郷東郷ダムサイト	3.8	2.44	428	6.0	肉眼的に見て、弱い流理構造 浮石少なく、微小～5 mm大の石英含む。 中～高熔結、中新世～洪積世
東郷 (十勝熔結凝灰岩)	美瑛町白金ダムサイト	2.5	2.36	214	10.5	
フラヌイW _t (A) (十勝熔結凝灰岩)	美瑛町富美フラヌイダムサイト(A)	1.2	2.24	271	17.7	
フラヌイW _t (B) (十勝熔結凝灰岩)	美瑛町富美フラヌイダムサイト(B)	1.6	2.22	333	16.9	
喜茂別W _t (喜茂別熔結凝灰岩)	喜茂別ダム調査地	0.86	2.00	23.8	27.7	ほぼ均質～きわめて弱い流理構造、低熔結、洪積世
漁川W _t l(1) (支笏熔結凝灰岩)	恵庭市盤尻漁川ダムサイト	1.3	1.59	35	31.6	弱い流理構造を有する。低熔結、洪積世
漁川W _t l(2) (支笏熔結凝灰岩)	恵庭市盤尻漁川ダムサイト	0.85	1.56	32	30.3	弱い流理構造を有する。低熔結、洪積世
漁川W _t m1 (支笏熔結凝灰岩)	恵庭市盤尻漁川ダムサイト	2.7	2.20	598	14.5	強い流理構造を有する。高熔結、洪積世
漁川W _t m2(1) (支笏熔結凝灰岩)	恵庭市盤尻漁川ダムサイト	3.1	2.22	1,195	7.7	最も強い流理構造を有する。極高熔結、洪積世
漁川W _t m2(2) (支笏熔結凝灰岩)	恵庭市盤尻漁川ダムサイト	3.1	2.22	1,036	9.7	最も強い流理構造を有する。極高熔高、洪積世
漁川W _t m2(3) (支笏熔結凝灰岩)	恵庭市盤尻漁川ダムサイト	3.5	2.36	1,283	9.0	最も強い流理構造を有する。極高熔高、洪積世

※インタクトな供試体の試験値



図一3 インタクトな供試体の G_{aw} と頻度例



図一4 漁川支笏熔結凝灰岩の岩層例

あるが、熔結凝灰岩は、特に垂直的にも水平的にも熔結度が大きく異なる。たとえば、支笏熔結凝灰岩も岩層により非常に熔結度が異なる（図一4）。また同一岩層でも漁川 Wtm_2 (□) といなどのように強度がかなり異なる。このことにより、成因的にはほぼ同じ（熔結凝灰岩）で、岩質的には新鮮でありながら、さまざまな強度を有する岩石の試験が可能である。

岩石の構造も比較的簡単であり、さまざまな熔結度の試料に対する割れ目と強度の関係を調査しやすい。

5. 試験結果と考察

5-1 凍結融解作用ときれつの増加

凍結融解作用の進行とともに、供試体にはさまざまな微小きれつが生じる。それは、表面的には肉眼観察により観察可能であり、内面的には V_p の減少によりその増加を推定できる。肉眼観察によれば、微小きれつの入り方は岩石の構造と岩質により異なる。特に、強い流理構造を有するものとそうでないものとの差は大きい（図一5）。流理構造の強いものは、流理面に沿い微小きれつが生じ凍結融解作用の進行とともに拡大していき、最後は流理面に沿って割れる。流理構造の弱いものは、最初流理面沿いに微小きれつが生じるが同時に縦あるいは斜めにも生じ、均質的な性質の割れ目の入り方の傾向が強くなる。最終的にも縦あるいは斜めきれつの成長により、いくつかの岩片に割れる。

流理構造の強弱により、すべてこのような割れ方になるわけではないが、全体的にみると上記の傾向が顕著であるといえる。

生じた微小きれつは岩石の構造に支配され、まったく均一、任意ではないが、凍結融解作用により1供試体にこのような多数の微小きれつを生じさせることができる。

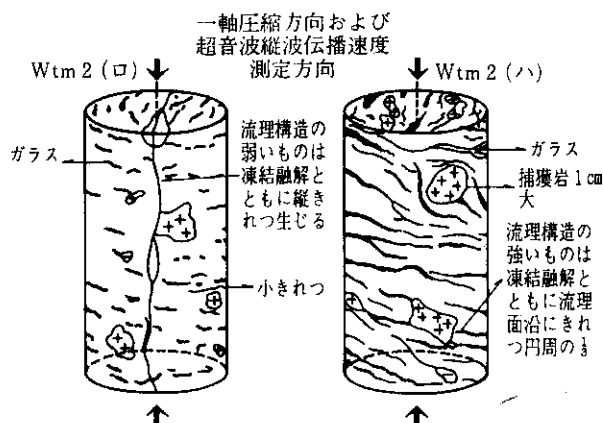
V_p と q_u の減少の大部分は生じた微小きれつに起因するものと考えても妥当である。

5-2 凍結融解作用を受けた供試体の q_u と V_p

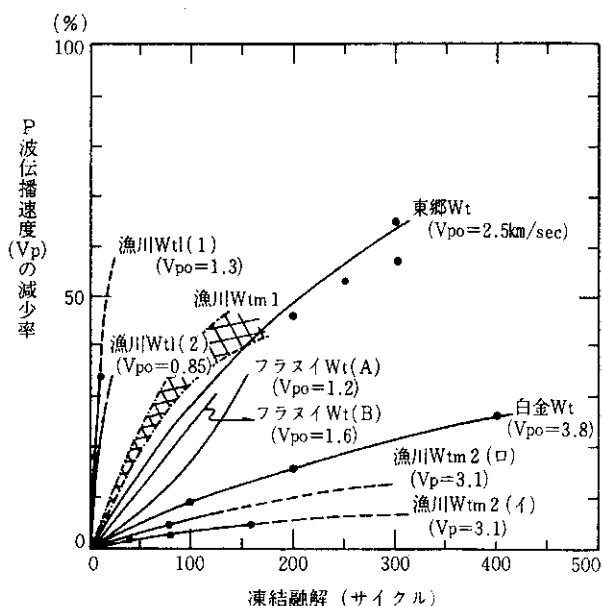
5-2-1 凍結融解サイクルと V_p の減少率の関係

凍結融解作用開始後、前述のような適当なサイクルごとに V_p を測定し、原則として5個の平均値により減少率を求めた。流理構造の存在する供試体では、 V_p の測定方向はすべて流理面に直角の方向（図一5参照）とし、 V_p の減少率は次式により算出した。

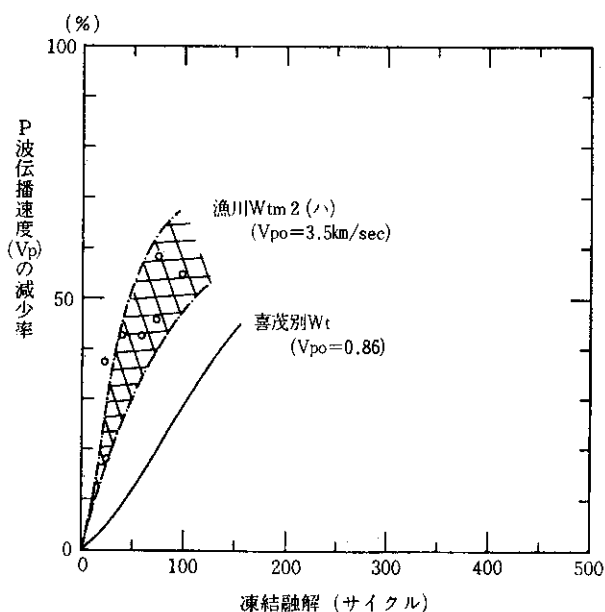
$$V_p \text{ の減少率} = \left(1 - \frac{V_{pn}}{V_{po}} \right) \times 100 (\%)$$



図一5 熔結凝灰岩の流理構造と割れ目の例



図一6 凍結融解サイクルとP波伝播速度 (V_p) の減少例



図一7 凍結融解サイクルとP波伝播速度 (V_p) の減少例

V_{po} : 凍結融解0サイクル時の平均 V_p

V_{pn} : 凍結融解各サイクル時の平均 V_p

十勝熔結凝灰岩からなる白金, フラスイ, 東郷, の各ダムサイトないしダム予定サイト, 支笏熔結凝灰岩からなる漁川ダムサイトおよび喜茂別熔結凝灰岩からなる喜茂別ダム調査サイトの各熔結凝灰岩の凍結融解作用にともなう V_p の減少率を図一6, 7, 表一2に示す。

一般に熔結度(この場合 q_{uo})の大きいものほど, 凍結融解作用に対する抵抗性は大きい。たとえば, 白金 W_t ($q_{uo}=428$)と東郷 W_t ($q_{uo}=214$)は同じ十勝熔結凝灰岩に属するが前者の熔結度は大きく, 後者の熔結度は

より小さい。両者の凍結融解作用に対する抵抗性の相違は, 同図, 表より明瞭である。たとえば, 100サイクルのときの減少率は白金 W_t で9%であるのに対し, 東郷 W_t のそれは29%である。同様に200サイクルのとき白金 W_t で16%, 東郷 W_t で49%である。

前述のように, 凍結融解作用に対する岩石の抵抗性に大きな関係を有するものとして, 熔結度のほかに, 岩石の構造がある。図一6, 7にみるように, V_p の減少率はデータのバラツキがあるにせよ, おおむねの傾向が熔結度(q_{uo})に対応しているのに対し, 漁川 W_{tm1} ($q_{uo}=500\sim700$)および漁川 W_{tm2} ($q_{uo}=1,250$)は熔結度が大きいにもかかわらず V_p の減少率が大きく, なかでも漁川 W_{tm2} (q_{uo})は極端に大きい。喜茂別 W_t ($q_{uo}=23.8$)は漁川 $W_{tl}(1)$ ($q_{uo}=35$), (2) ($q_{uo}=32$)や W_{tm1} より熔結度が小さいにもかかわらず, 減少率がこれよりかなり小さい。岩質をみると, 前者の漁川 W_{tm1} や漁川 W_{tm2} (q_{uo})は熔結凝灰岩特有の流理構造が強く発達し, 特に W_{tm2} (q_{uo})の場合は全体が黒色を帯びたガラス質が顕著である。一方, 漁川 W_{tm2} (イ), (ロ)も流理構造は顕著であり, 同じ層準に属する W_{tm2} (ハ)との差がなぜこのように大きくでたか明確でない。流理構造の影響の現われ方は微妙であり, 岩質(texture, 構成物と熔結度など)のわずかな相違が, このような結果としてでたものと推定される。後者の喜茂別 W_t は微視的には流理構造が発達しているが, 肉眼的には他に比較して, 流理構造が顕著でない。

以上のことから熔結凝灰岩の場合, 流理構造の発達の程度と全体の熔結の度合が凍結融解作用に対する抵抗性の大小に大きな影響を与えていることは確かである。一般的には流理構造が強くなると凍結融解作用に対する抵抗性は小さくなる。

5-2-2 凍結融解サイクルと q_u の減少率の関係

V_p の場合と同様に, 前述のような適当なサイクルごとに q_u を V_p と同一の方向(図一5)で測定し, 平均値により減少率を求めた。平均値は基本的には5個の供試体により求めたが, 凍結融解サイクルが多くなると供試体が割れ, 一軸圧縮試験が不可能なものが生じるので2~3個の平均になったものもある。 q_u の減少率は次式により算出した。

$$q_u \text{ の減少率} = \left(1 - \frac{q_{un}}{q_{uo}} \right) \times 100 (\%)$$

q_{uo} : 凍結融解0サイクル時の平均 q_u

q_{un} : 凍結融解各サイクル時の平均 q_u

V_p の減少率の場合と同様に, 凍結融解作用にともなう q_u の減少率を, 各種熔結凝灰岩について図一8, 9, 表一2に示す。

一般に, 熔結度(q_{uo})の大きいものほど, 凍結融解作

用に対する抵抗性が大きいが流理構造の強いものが小さい傾向があるのは V_p の場合と同じである。たとえば、 q_u の減少率は白金 W_t ($q_{uo}=428$) の熔結凝灰岩では100サイクルで18%, 200サイクルで32%である。東郷 W_t ($q_{uo}=214$) のそれは100サイクルで40%, 200サイクルで68%である。

その他、漁川 W_{tm2} や W_{tm1} など流理構造の強いもの

では、熔結度に比較して、他の熔結凝灰岩より、 q_u の減少率が多い。減少値そのものは異なるが、これらの傾向は V_p の場合と同じである。

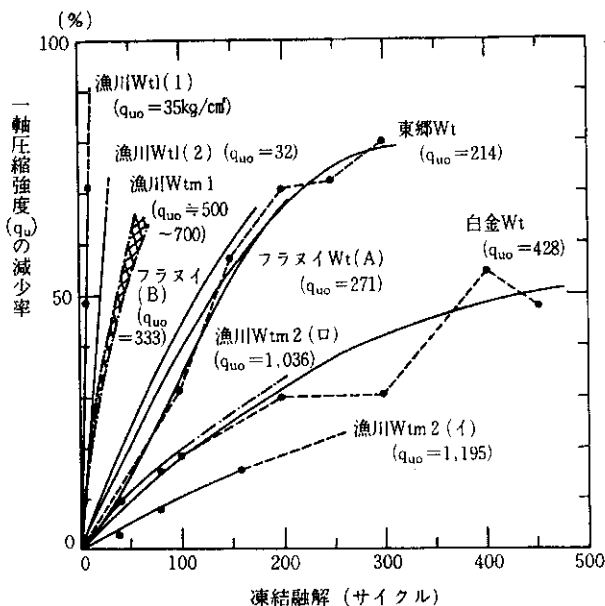
5-2-3 q_{un} と V_{pn} の関係

凍結融解作用の進行にともなう q_u および V_p 減少の直接の原因は、5-1 の項で考察を加えた、微小きれつの増大と考えられる。供試体において、微小きれつが増大

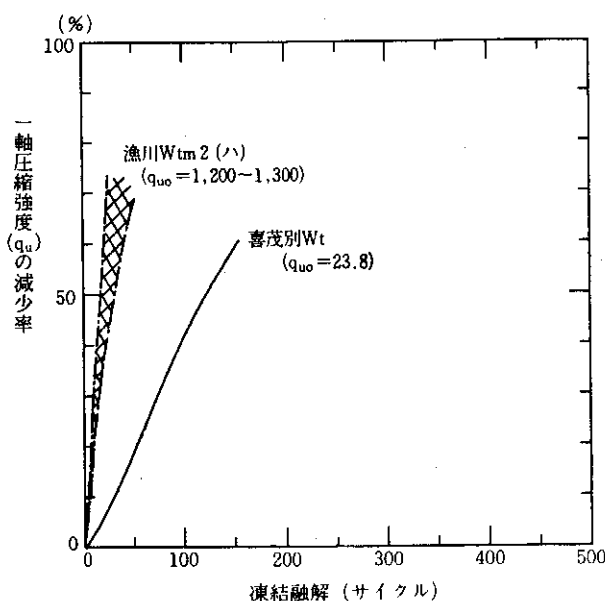
表一2 熔結凝灰岩における V_p の減少率と q_u の減少率

試料	V_p の減少率 (%)	q_u の減少率 (%)	$\frac{q_u \text{ の減少率 }}{V_p \text{ の減少率}}$	V_p の減少率 (%)	q_u の減少率 (%)	$\frac{q_u \text{ の減少率 }}{V_p \text{ の減少率}}$
白金 W_t	100 サイクル (時)			200 サイクル		
	9.0	18	2.00	16	32	2.00
東郷 W_t	100 サイクル			200 サイクル		
	28	35	1.25	49	68	1.38
フラヌイ W_t (A)	50 サイクル			100 サイクル		
	5.0	20	4.04	17	40	2.35
フラヌイ W_t (B)	50 サイクル			100 サイクル		
	8.2	24	2.93	24	44	1.82
喜茂別 W_t	25 サイクル			50 サイクル		
	5.0	8.0	1.60	12	19	1.58
漁川 $W_{t\ell}$ (1)	5 サイクル			10 サイクル		
	17	26	1.60	35	75	2.14
漁川 $W_{t\ell}$ (2)	10 サイクル			20 サイクル		
	13	20	1.54	35	50	1.43
漁川 W_{tm1}	10 サイクル			20 サイクル		
	5.0	20	4.00	9.0	34	3.78
漁川 W_{tm2} (イ)	50 サイクル			100 サイクル		
	1.8	5.1	2.83	3.1	10	3.29
漁川 W_{tm2} (ロ)	50 サイクル			100 サイクル		
	3.0	11.2	3.73	5.8	20	3.41
漁川 W_{tm2} (ハ)	50 サイクル			20 サイクル		
	8.5	22	2.59	19	38	2.00

試料	V_p の減少率 (%)	q_u の減少率 (%)	$\frac{q_u \text{ の減少率 }}{V_p \text{ の減少率}}$	V_p の減少率 (%)	q_u の減少率 (%)	$\frac{q_u \text{ の減少率 }}{V_p \text{ の減少率}}$
白金 W_t	300 サイクル			400 サイクル		
	22	43	1.93	26	49	1.86
東郷 W_t	300 サイクル					
	64	80	1.25			
フラヌイ W_t (A)	150 サイクル			200 サイクル		
	33	55	1.67		68	
フラヌイ W_t (B)	150 サイクル					
		60				
喜茂別 W_t	75 サイクル			100 サイクル		
	21	30	1.46	29	40	1.38
漁川 $W_{t\ell}$ (1)						
漁川 $W_{t\ell}$ (2)	30 サイクル					
		65				
漁川 W_{tm1}	30 サイクル			40 サイクル		
	14	41	3.04	18	50	2.78
漁川 W_{tm2} (イ)	150 サイクル			200 サイクル		
	4.4	15	3.34	5.8	19	3.20
漁川 W_{tm2} (ロ)	150 サイクル			200 サイクル		
	8.2	27	3.29	10	38	3.69
漁川 W_{tm2} (ハ)	30 サイクル			40 サイクル		
	29	55	1.90	36	75	2.08



図—8 凍結融解サイクルと一軸圧縮強度 (q_u) の減少例



図—9 凍結融解サイクルと一軸圧縮強度 (q_u) の減少例

していったとき、 q_{un} と V_{pn} の関係がどのように変化するか、以下に示す。

凍結融解作用各サイクルごとの供試体の q_{un} と V_{pn} の減少率と両者の比を表—2に示す。

たとえば、喜茂別 W_t では、 q_u の減少率は V_p の減少率の1.4~1.6倍、東郷 W_t のそれは1.2~1.4倍であるのに対し、漁川 $W_{tm2}(イ) \sim (ハ)$ 1.9~3.8倍、漁川 W_{tm1} 2.8~4.0倍である。全体的には1.2~4.5倍の範囲にあり、一般的に、岩質が硬く流理構造の強いものほど V_{pn} の減少率に比較して q_{un} の減少率の割合が大きい。

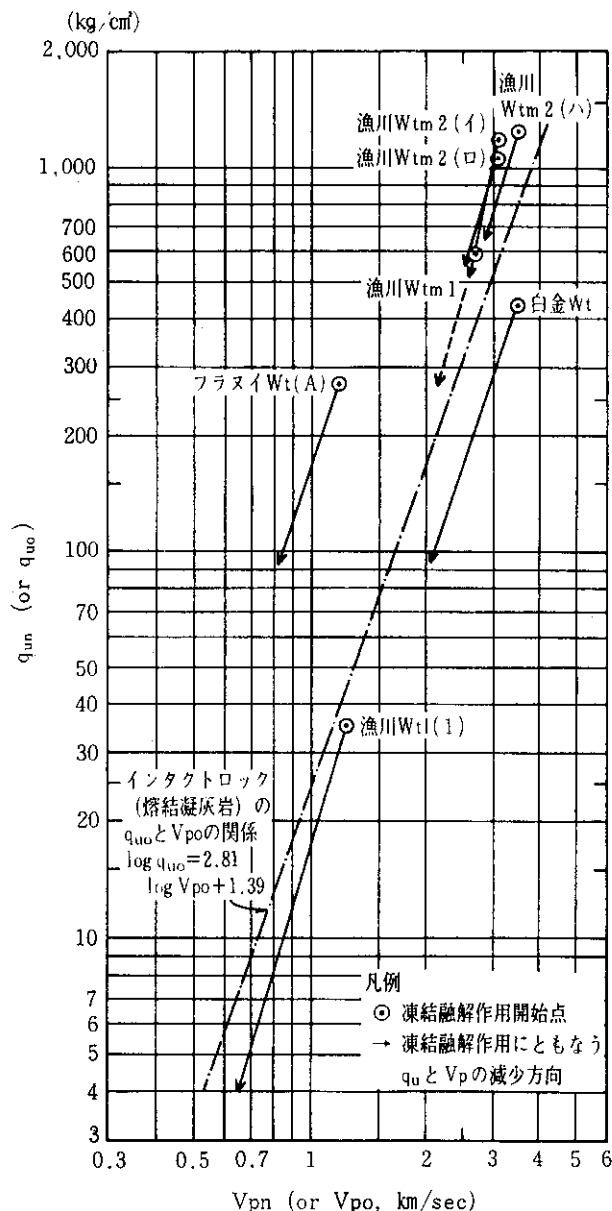
さらに q_{un} と V_{pn} の関係を直接求めてみると、 q_{un} は

V_{pn} の1.8~4.1乗の範囲で比例する (図—10, 11, 表—3, 4)。これは、明らかにインタクトな供試体における q_u と V_p の関係より大きな値である。

5-3 インタクトな岩石供試体とクラッキーな岩石

供試体における q_u と V_p の関係の相違

従来、筆者は多数のインタクトな供試体に関して、 q_u と V_p の関係を調べてきた。これによれば、各種、全岩石の平均 (北海道各地186カ所、測定個数 $n=568$) で q_u は V_p の2.7乗に比例する (図—12)。熔結凝灰岩 (11カ所、 $n=33$) だけでは、インタクトな供試体の $q_u (=q_{u0})$ は $V_p (=V_{p0})$ の2.8乗に比例している (図—13)。この q_{u0} と V_{p0} の関係と、5-2-3の項で検討した凍結融解作用を受け、微小き裂の発達したクラッキー (cracky)



図—10 凍結融解作用を受けたクラッキーな供試体の $q_u - V_p$ ($q_{un} - V_{pn}$) の関係

表一3 凍結融解作用を受けたクラッキーな熔結凝灰岩の供試体の
一軸圧縮強度 (q_{un}) と P 波伝播速度 (V_{pn}) の関係

試 料	式※	測 定 個 数
白 金 W_t	$q_{un}=10.1 \cdot V_{pn}^{3.0}$	29
東 郷 W_t	$q_{un}=40.1 \cdot V_{pn}^{1.9}$	18
フラヌイ $W_t(A)$	$q_{un}=16.2 \cdot V_{pn}^{2.9}$	10
フラヌイ $W_t(B)$	$q_{un}=92.5 \cdot V_{pn}^{2.5}$	8
喜 茂 別 W_t	$q_{un}=32.1 \cdot V_{pn}^{1.8}$	23
漁 川 $W_{tl}(1)$	$q_{un}=19.3 \cdot V_{pn}^{3.1}$	20
漁 川 $W_{tl}(2)$	$q_{un}=51.2 \cdot V_{pn}^{2.3}$	13
漁 川 W_{tm1}	$q_{un}=23.0 \cdot V_{pn}^{3.3}$	13
漁 川 $W_{tm2}(1)$	$q_{un}=12.1 \cdot V_{pn}^{4.1}$	30
漁 川 $W_{tm2}(2)$	$q_{un}=18.1 \cdot V_{pn}^{3.5}$	22
漁 川 $W_{tm2}(3)$	$q_{un}=23.4 \cdot V_{pn}^{3.2}$	13

※ q_{un} : (kg/cm^2), V_{pn} : (km/sec)

表一4 各種岩石における q_{uo} と V_{po} の関係式

岩 石 名	関係式 $q_{uo}=a \cdot V_{po}^b$	測定 個数	$\log q_{uo}$ と $\log V_{po}$ の 相 関 係 数
全 岩 石	$q_{uo}=12.3 \cdot V_{po}^{2.67}$	568	0.89
流 紋 岩	$q_{uo}=27.9 \cdot V_{po}^{2.28}$	12	0.91
安 山 岩	$q_{uo}=5.0 \cdot V_{po}^{3.33}$	160	0.85
玄 武 岩	$q_{uo}=1.0 \cdot V_{po}^{4.34}$	27	0.96
花 崗 岩 類	$q_{uo}=3.9 \cdot V_{po}^{3.30}$	27	0.81
変 朽 安 山 岩	$q_{uo}=12.0 \cdot V_{po}^{2.71}$	24	0.88
泥 岩	$q_{uo}=13.5 \cdot V_{po}^{2.31}$	37	0.87
砂 岩	$q_{uo}=13.2 \cdot V_{po}^{2.66}$	76	0.96
礫 岩	$q_{uo}=7.1 \cdot V_{po}^{3.08}$	31	0.94
頁 岩	$q_{uo}=3.6 \cdot V_{po}^{3.70}$	33	0.80
粘 板 岩	$q_{uo}=0.5 \cdot V_{po}^{4.53}$	28	0.84
熔 結 凝 灰 岩	$q_{uo}=24.6 \cdot V_{po}^{2.81}$	33	0.87
火 山 碎 屑 岩	$q_{uo}=22.9 \cdot V_{po}^{1.62}$	52	0.65
そ の 他	同一岩種における測定個数が少ないので関係式を求めず	28	

※ q_{uo} : (kg/cm^2), V_{po} : (km/sec)

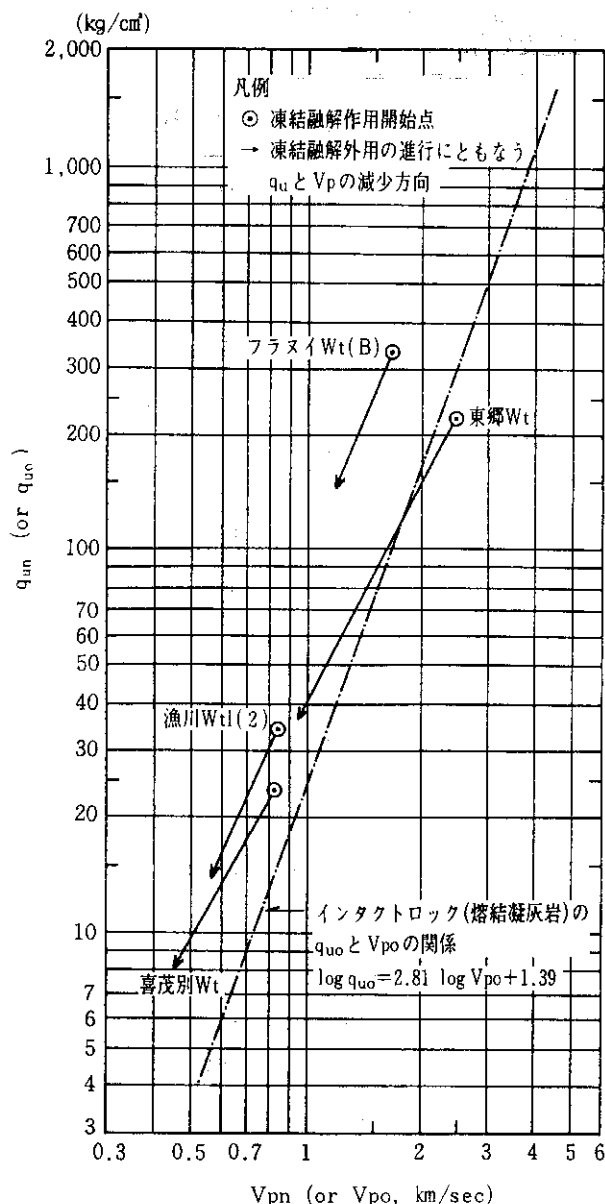


図-11 凍結融解作用を受けたクラッキーな供試体の $q_u - V_p$ ($q_{un} - V_{pn}$) の関係

な供試体の $q_u (=q_{un})$ と $V_p (=V_{pn})$ の関係を対比してみると両者の関係は異なる (図-10, 11, 表-3)。なお、同図の二重マルの点は凍結融解作用開始時の q_u と V_p 、矢印の方向は凍結融解作用の進行にともなう q_u と V_p の減少方向を示す。これによれば、11例中7例は $q_{uo} - V_{po}$ 関係以上に、 $q_{un} - V_{pn}$ の関係の方が V_p の減少 (または変化) に対し、 q_u の減少 (または変化) 比率が大きい。換言すれば、 q_u と V_p の関係を示す一般式 $q_u = a \cdot V_p^b$ の式において、クラッキーな供試体の方がインタクトな供試体より b の値が大きくなる (このとき a は小さくなる) というのである。

これらの関係の概念図を図-14に示す。同図は q_u を縦軸に、 V_p を横軸とり、凝結凝灰岩の q_{uo} と V_{po} の関係

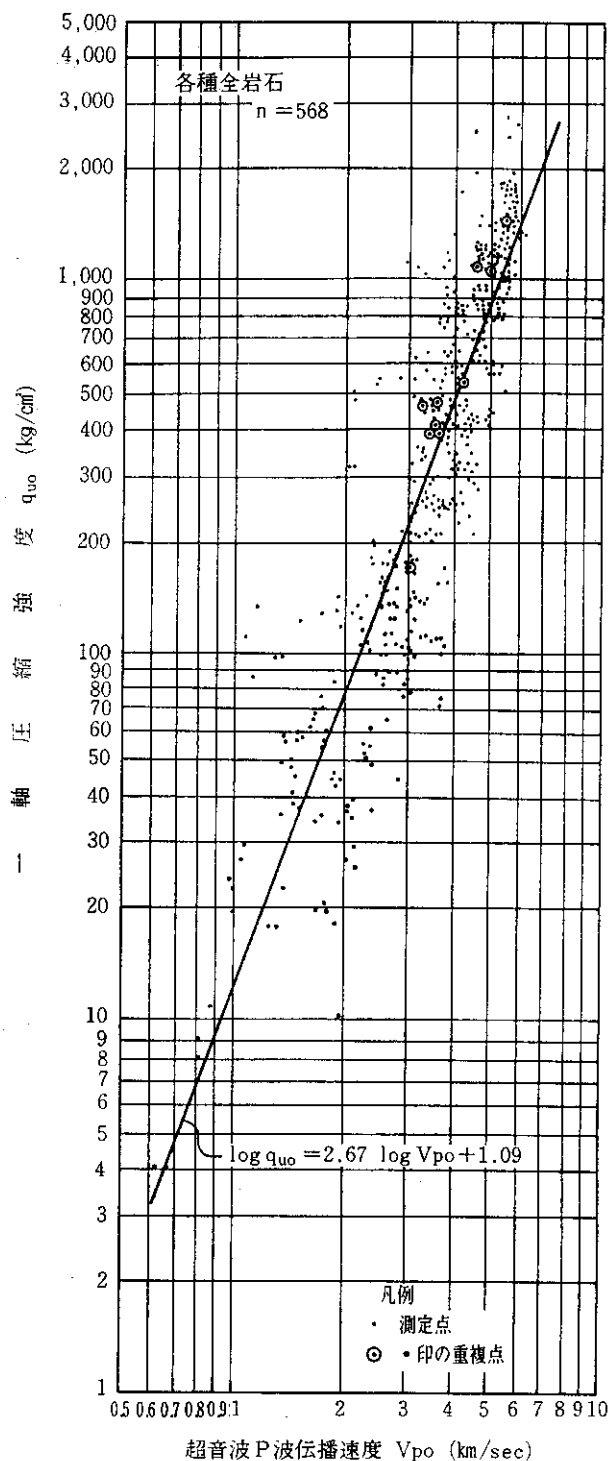
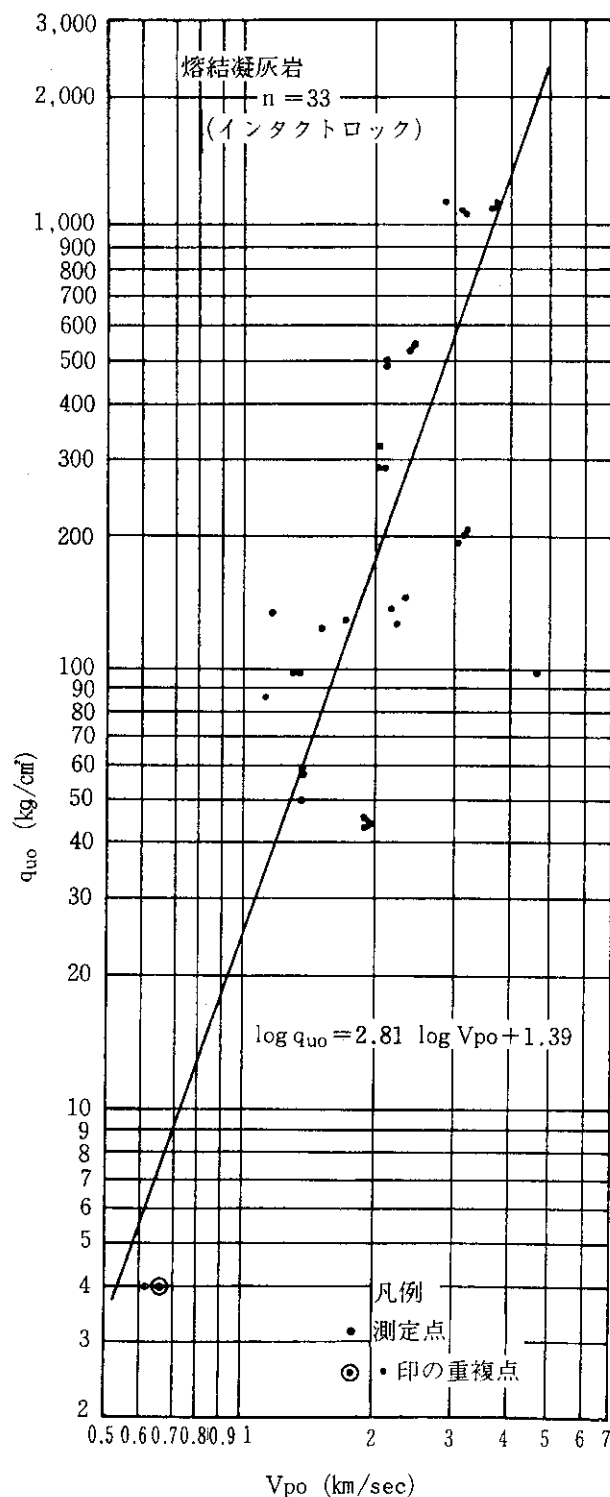


図-12 インタクトな供試体における q_u と V_p の関係 (各種全岩石)

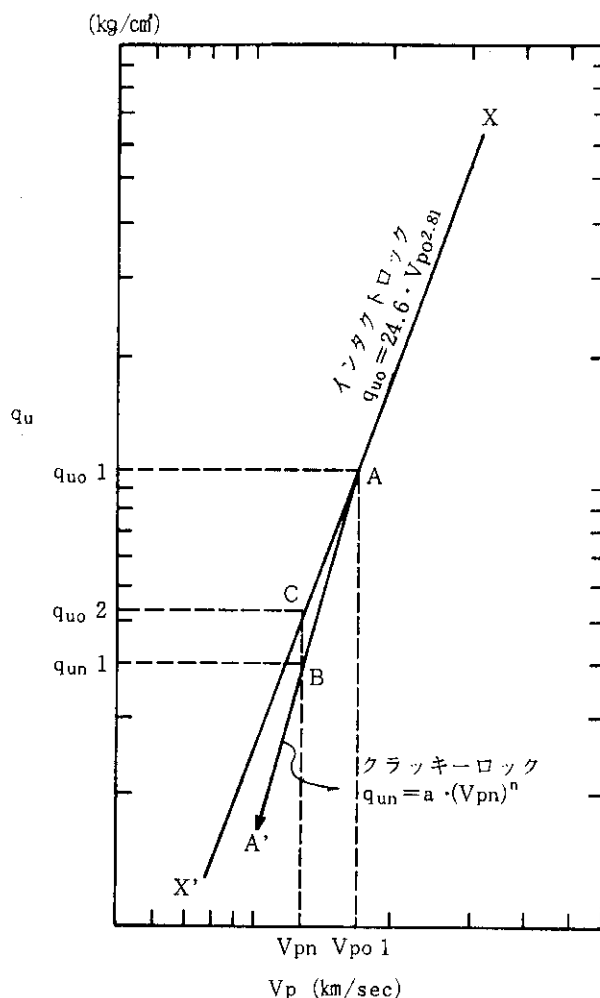
を直線 $X-X'$ 、 q_{un} と V_{pn} の関係を直線 $A-A'$ で示したものである。ある A 点に位置するインタクトな供試体に、凍結融解作用により微小きれつを生じさせながら、 q_u と V_p の関係を求めてみると、 q_{un} と V_{pn} の関係は直線 $A-X'$ 上につてくるのではなく、直線 $A-A'$ 上につてくる。したがって、凍結融解作用により V_{poi} が V_{pni} まで低下したとき強度は図の B 点の座標から求まる

q_{un1} であり、 $q_{uo2} < q_{un1}$ である。残りの5例は $q_{un} = a' \cdot V_{pn}^{b'}$ の式において、 b' の値がインタクトな供試体の式の $b = 2.8$ より小さくでた。このことについて以下のような考察をした。

前述のように、各種、全岩石の平均では、 q_{uo} は V_{po} の2.7乗に比例しているが、この関係を岩石名別にみる



図一13 インタクトな供試体における q_u と V_p の関係 (熔結凝灰岩)

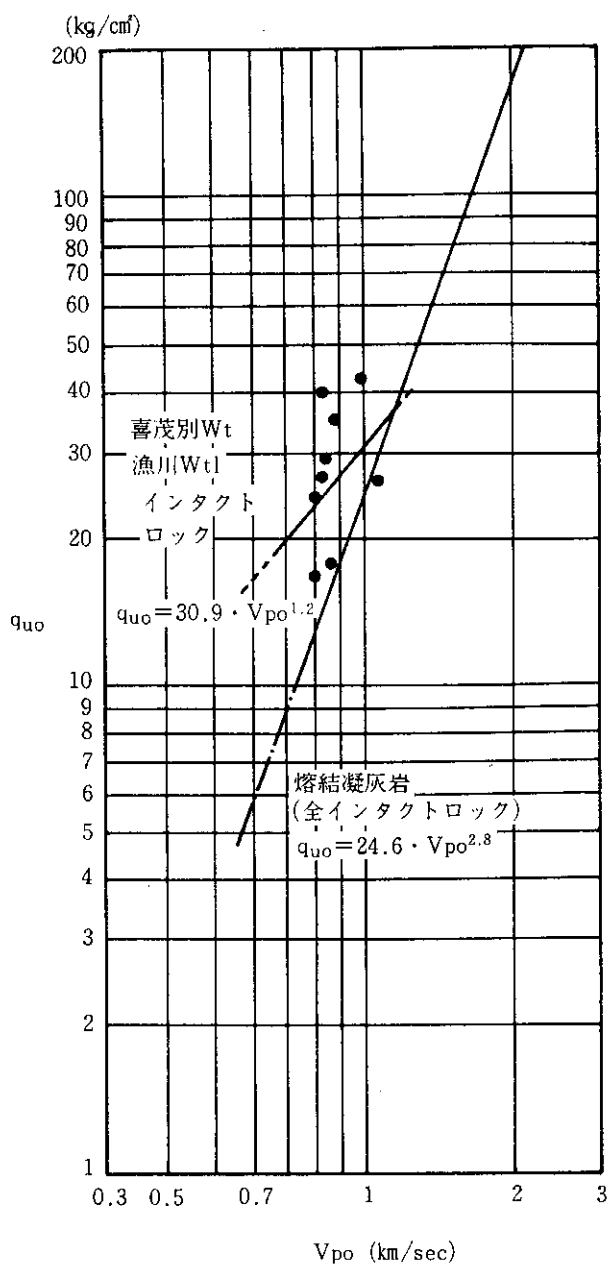


図一14 インタクトとクラッキーな供試体における q_u と V_p の関係概念図

(表一4)と、一般に岩質の硬いものが多い玄武岩が4.3乗、粘板岩が4.6乗に比例するのにに対し、軟質のものが多い泥岩と砂岩では2.3乗、火山砕屑岩で1.6乗に比例している。安山岩、頁岩などの他の岩種はこの中間の値をとっている。以上のことから q_{uo} が大きいものが多い岩種ではこの値が大きくなる傾向があることは明確である。

熔結凝灰岩では、 q_{uo} は V_{po} の2.8乗に比例するが、求めたデータは V_{po} が1.2km/sec以上のものが多い(図一13)。 V_{po} が1km/sec以下のところでも、熔結凝灰岩の q_{uo} が V_{po} の約2.8乗に比例しているかどうか検討した。

q_{uo} の小さいデータは少ないが、喜茂別 W_t と漁川 W_{t2} (2)の供試体から $V_{po} = 0.8 \sim 1.0$ km/sec 付近の q_{uo} と V_{po} の関係を求めた(図一15)。これによれば、 q_{uo} は V_{po} の1.2乗に比例している。この値は熔結凝灰岩の平均の2.8乗よりかなり小さい。このことは、いろいろの V_{po} の値を持つ岩石の q_{uo} と V_{po} の関係を一つの式で表わすことの困難性、あるいは誤差の大きいことを示していると同



図—15 P波伝播速度の小さい熔結凝灰岩における q_{u0} と V_{po} の関係

時に、 V_{po} が 1 (km/sec) 以下の小さいものは、この式で
 があまり信頼性がないことを示している。

しかしながら、現実には $V_{po} = 0.8 \sim 1.0$ km/sec 付近で
 q_{u0} は V_{po} の 1.2 乗に比例しているとすれば、喜茂別 W_t
 や漁川 $W_t(2)$ においても、インタクトな供試体より、ク
 ラッキーな供試体の方が V_p の減少に対し q_u の減少比率
 が大きいことを示している。

このようなことを考慮してもなお東郷 W_t やフラヌイ
 W_t の例のような例外もある。しかし、以上の結果より
 データの多少のバラツキがあるにせよ、次のようなこと
 がいえる。

インタクトな供試体の q_u と V_p の関係はクラッキーな

供試体の関係と明らかに異なる。ほとんどの場合、クラ
 ッキーな供試体の方がインタクトな供試体より、 V_p の
 減少（または変化）に対し q_u の減少（または変化）比
 率が大い。

6. 岩盤強度推定への適用

6-1 岩盤の準一軸圧縮強度への適用

前述のように、熔結凝灰岩のインタクトな供試体にお
 いて、 q_u は V_p の約 2.8 乗に比例する。割れ目の存在す
 る岩盤においてもこの関係が成立するものとし、供試体
 の一軸圧縮強度に相当する、一軸応力状況を仮定した岩
 盤の強度を岩盤の準一軸圧縮強度と定義すれば次式が成
 立する。

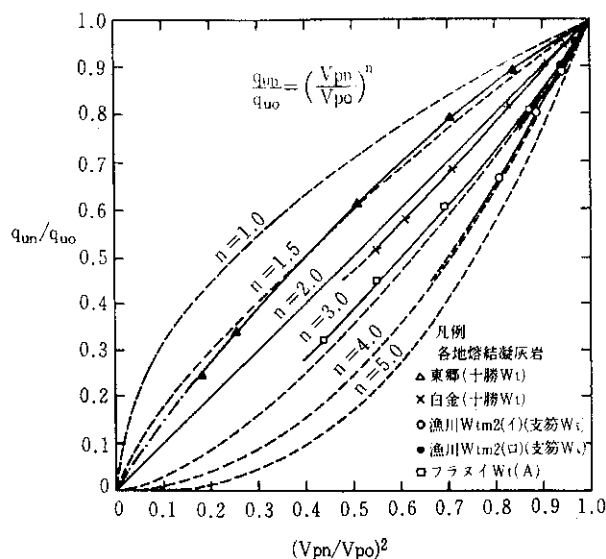
$$q_{um} = q_{u0} \cdot \left(\frac{V_{pm}}{V_{po}} \right)^{2.8} \dots \dots \dots (1)$$

ただし、 q_{um} : 岩盤の準一軸圧縮強度

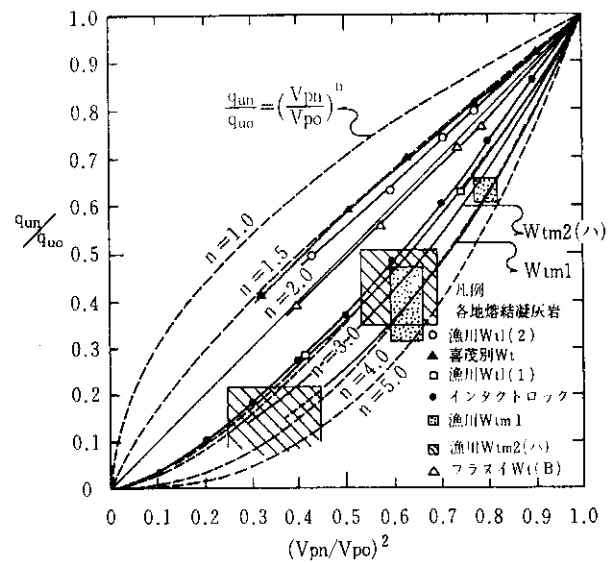
V_{pm} : 岩盤の P 波の伝播速度

しかしながら、割れ目の存在する岩盤の強度は、イン
 タクトな供試体よりもむしろ微少きれつが入ったクラッ
 キーな供試体の q_u と V_p の関係に近いものと推定され
 る。したがって、このことと 5-3-1 の項の結果より (1) 式
 で岩盤の強度を求めると実際よりも岩盤の強度はかなり
 強くでるので妥当でないことが明らかである。図—14 の
 例でみると、点 B の q_u の値 q_{um} で求めるのではなく、点
 C の q_u の値、 q_{u02} で求めることになる。

岩盤の準一軸圧縮強度 q_{um} と岩盤の P 波の伝播速度
 V_{pm} の関係が q_{un} と V_{pn} の関係にほぼ近いと考えられ
 ることより、 q_{u0} 、 V_{po} および q_{un} 、 V_{pn} がどのような関係
 にあるか検討を加えた (図—16, 17, 表—5)。図にお
 いて縦軸に q_{un} と q_{u0} の比、横軸に $(V_{pn})^2$ と $(V_{po})^2$ の比
 をとり、 q_{un}/q_{u0} が V_{pn}/V_{po} の何次に比例するか調べた。
 q_{un}/q_{u0} が V_{pn}/V_{po} の二次に比例するとすれば、座
 標 (0, 0) と (1, 1) を通る傾斜角 45° の直線になる。
 図に示した 11 例のうち 6 例が $q_{un} = q_{u0} \left(\frac{V_{pn}}{V_{po}} \right)^n$ の式に
 おいておおよそ $n = 2.8 \sim 4.5$ の範囲にあり、一部でいわ
 れているような強度が P 波伝播速度比の 2 乗のみに比例
 する事実はない。このことは、5-3-1 の項で述べたイン
 タクトな供試体の場合と同様であり、また、インタクト
 な供試体の場合より n の値が大きくなっている傾向にあ
 る。 n の値がインタクトな供試体の平均の 2.8 より小さ
 いものが 5 例あるが、喜茂別 W_t と漁川 $W_t(2)$ は、5-3-2
 の項で検討した理由により、 n の値がインタクトな供試
 体より大きくなっているといえる。しかし、白金 W_t 、
 東郷 W_t 、フラヌイ W_t の場合は $q_{u0} = 200 \sim 400$ kg/cm²、
 $V_{po} = 1.5 \sim 2.3$ km/sec と大きな値であり、明確に説明で
 きない。おそらくこれらの岩体においては、 q_{u0} と V_{po}
 の関係が岩質、構造に起因する理由より、熔結凝灰岩の



図—16 $q_{un}/q_{uo}-(V_{pn}/V_{po})^2$ の関係



図—17 $q_{un}/q_{uo}-(V_{pn}/V_{po})^2$ の関係

表—5 凍結融解サイクル数と n

試料	サイクル数	n	サイクル数	n	サイクル数	n	サイクル数	n	平均 n
白金 W _t	100	2.1	200	2.2	300	2.4	400	2.2	2.3
東郷 W _t	100	1.3	200	1.7	300	1.6	—	—	1.5
フラヌイ W _t (A)	50	3.1	100	2.7	150	2.8	—	—	2.8
フラヌイ W _t (B)	50	2.4	100	2.1	—	—	—	—	2.1
喜茂別 W _t	25	1.6	50	1.6	75	1.6	100	1.5	1.6
漁川 W _{tl} (1)	5	3.2	10	1.8	—	—	—	—	3.0
漁川 W _{tl} (2)	10	1.6	20	1.7	—	—	—	—	1.7
漁川 W _{tm1}	10	4.3	20	4.4	30	4.9	40	3.5	4.0
漁川 W _{tm2} (イ)	50	2.9	100	3.4	150	4.0	200	3.8	3.9
漁川 W _{tm2} (ロ)	50	3.1	100	3.7	150	3.7	200	4.4	3.7
漁川 W _{tm2} (ハ)	10	2.8	20	2.9	30	3.3	40	3.5	3.3

ただし、 $n = \log(q_{un}/q_{uo}) / \log(V_{pn}/V_{po})$

全平均とはかなり異なったものとなっていると推定される。しかしながら、データのバラツキはあるにせよこれらの結果(図—16, 17, 表—7)から次のようなことがいえる。

$q_{un} = q_{uo} \cdot \left(\frac{V_{pn}}{V_{po}}\right)^n$ の式において、熔結凝灰岩では全体的にみると $n > 2.8$ が多く、侵襲で流理構造の強いものほど n の値が大きい傾向にある。

この点をより明確にするために、インタクトな供試体における有効間隙率、比重、 q_{uo} と V_{po} の各と n の値の関係を求めたが、有効間隙率や比重は良い相関関係がない。 q_{uo} と V_{po} が n とやや良い相関関係があり、なかでも q_{uo} の方がより良い相関関係がある(図—18, 19)。両者の関係式は次式である。

$$q_{uo} = 372 \cdot n - 503$$

$$V_{po} = 0.60n + 0.62$$

$$\text{ただし、 } n = \log\left(\frac{q_{un}}{q_{uo}}\right) / \log\left(\frac{V_{pn}}{V_{po}}\right)$$

なお、漁川の W_{tm1} や $W_{tm2}(ハ)$ のように n の値がある範囲にバラツキものについては、その平均値でこれらの式を求めた。

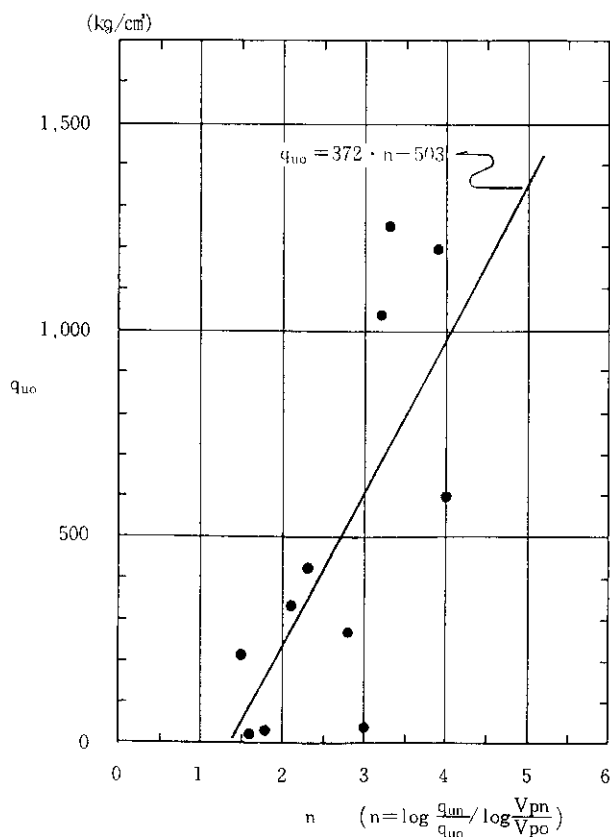
以上の結果より、熔結凝灰岩について次式がほぼ成立するといえる。

$$q_{un} = q_{uo} \cdot \left(\frac{V_{pn}}{V_{po}}\right)^n \dots\dots\dots (2)$$

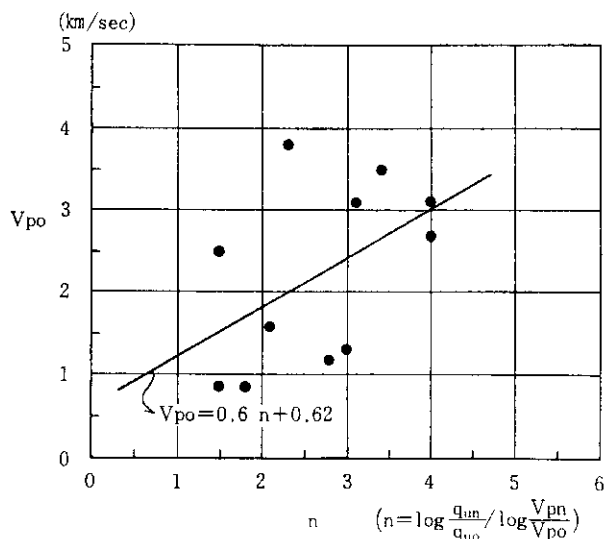
ただし、 $q_{uo} = 10 \sim 100$ (kg/cm²) 程度の軟岩のとき $n = 1.3 \sim 1.7$

$q_{uo} = 100 \sim 500$ (kg/cm²) 程度の中硬岩のとき $n = 1.6 \sim 2.8$

$q_{uo} = 500 \sim 1,000$ (kg/cm²) 程度の硬岩 I のとき $n = 2.7 \sim 4.0$



図—18 熔結凝灰岩の q_{uo} と n の関係



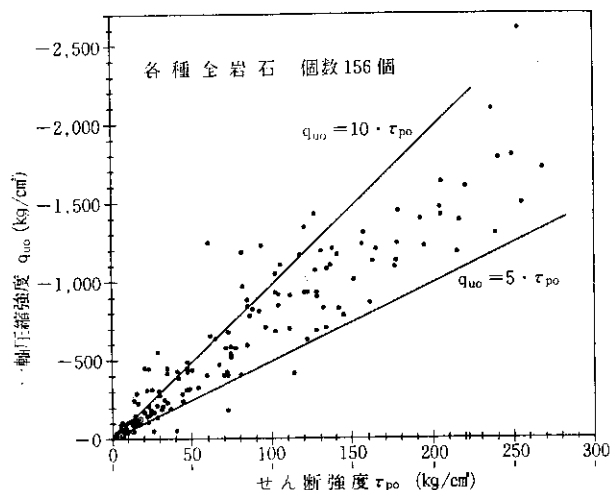
図—19 熔結凝灰岩の V_{po} と n の関係

$q_{uo} \geq 1,000$ (kg/cm²) 程度の硬岩Ⅱのとき $n = 4.0 \sim 5.5$

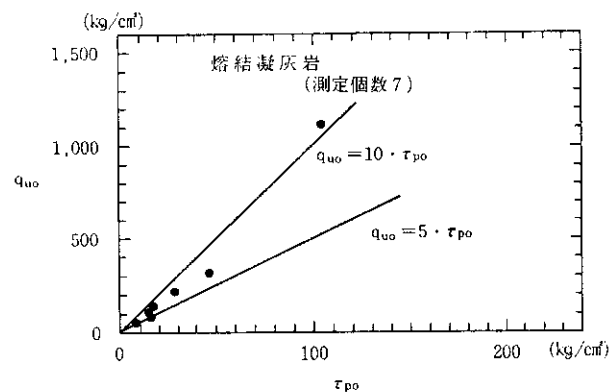
q_u と V_p の関係において、「微小きれつが入った供試体の V_p と q_u の関係は、割れ目の存在する岩盤の V_p と q_u の関係に近い」すなわち、「 $q_{un} \approx q_{um}$, $V_{pn} \approx V_{pm}$ 」とすれば、

$$q_{um} = q_{uo} \cdot \left(\frac{V_{pm}}{V_{po}} \right)^n \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 n の値は(2)式に同じ



図—20 インタクトな供試体における q_{uo} と τ_{po} の関係 (各種全岩石)



図—21 インタクトな供試体における q_{uo} と τ_{po} の関係 (熔結凝灰岩)

が成立し、熔結凝灰岩の岩盤の準一圧縮強度が求められる。

6-2 セン断強度への適用

インタクトな供試体における一軸圧縮強度 (q_{uo}) とせん断強度 (岩石の粘着力, τ_{po}) の関係は、 $q_{uo} = (5 \sim 10) \tau_{po}$ である (図—20, 21)。図は筆者が北海道の158カ所のさまざまな種類の岩石について試験を実施した結果を示すものである。 τ_{po} は q_{uo} と圧裂引張強度それぞれ3個の平均値から計算式により求めた。各種岩石 (図—20) にせよ、熔結凝灰岩 (図—21) だけにせよ、いずれも全体の70~80%が前記の式の範囲で示される。そして、データの多少のバラツキはあるが、 q_{uo} と τ_{po} はほぼ一次式の関係と考えてよいことが読みとれる。一般に一軸圧縮強度とせん断強度 (粘着力) が一次式の関係にあると考えると(3)式は岩盤のせん断強度 (粘着力) についても成立するものと考えてよい。したがって、熔結凝灰岩の岩盤において、

$$\tau_{mo} = \tau_{po} \cdot \left(\frac{V_{pm}}{V_{po}} \right)^n \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、 n の値は(2)式に同じ、 τ_{mo} : 岩盤の粘着

力
が成立する。

6-3 岩盤のせん断強度への適用

前項で求めた(4)式の有効性を検討するために、北海道内の10カ所で実施したブロックせん断試験による、原位置せん断強度(岩盤の粘着力, τ_{m-bo})とインタクトな供試体による室内せん断強度(τ_{po})の関係の検討を試みた。

6-3-1 割れ目のほとんど存在しない岩盤のせん

断強度と供試体のせん断強度の比較

一般に軟岩ほどインタクトな供試体試験値と現位置せん断試験値の差は小さいといわれているが、たとえば、利別川のピリカダム予定サイトの固結度の小さい砂岩では、ほとんど両者の差はなかった(図-22)。

一級河川、利別川に計画されたピリカダム予定サイト(瀬棚郡今金町ピリカ)は、新第三紀中新世の泥岩、頁岩および鮮新世の砂岩よりなる。鮮新世の砂岩は固結度は小さく、供試体において $q_{uo} = 3 \text{ kg/cm}^2$, $V_{po} = 0.84 \text{ km/sec}$ であり、地山の V_p は弾性波探査により 0.82 km/sec であり、両者のP波伝播速度の差はほとんどなかった。縦坑あるいは表土の掘削により露頭面からの観察でも、地層には肉眼的には肉眼的に顕著な割れ目が発達していない。

供試体強度は直径 $\phi = 30 \text{ cm}$ 厚さ $H = 10 \text{ cm}$ の不攪乱試料で、上部可動型大型一面せん断試験により求めた。原位

置せん断試験(ブロックせん断試験)は、表土を掘削して露出した地層面に通常実施されている方法(打設コンクリートブロック $60 \times 60 \text{ cm}$, 高さ 60 cm)で実施したものである。両者の試験箇所は 1 m 以内に近接している。したがって、同じ地層であると同時に、同岩質のものについての試験と考えてよい。供試体において、せん断強度 $\tau_p = 3.6 \text{ (kg/cm}^2\text{)} + \sigma \tan 3.4^\circ$ ブロックせん断試験において $\tau_{m-b} = 3.3 \text{ (kg/cm}^2\text{)} + \sigma \tan 36^\circ$ であった。式はいずれも最小2乗法により求めたものである。供試体のせん断強度 τ_{po} と岩盤のせん断強度 τ_{m-bo} において 0.3 kg/cm^2 , 両者の内部摩擦角において 0.2° の相違があったが、通常実施されている両者の試験法の精度を考慮すれば、両者の差はほとんどなかったといえる。このような地層では、室内における不攪乱試料による試験値が、岩盤の強度を推定するのに十分役立つことを示すとともに、この場合も(4)式が成立することを示している。

6-3-2 割れ目の存在する岩盤のせん断強度と供試体のせん断強度の比較

一般にいわれているように、軟～硬岩よりなる割れ目の存在する岩盤では、インタクトな供試体と岩盤の強度は異なる。問題はその異なる度合であるが、北海道内の両者の測定例を表-6に示す。

なお、表は各ダム建設事業所、道路改良事業所の報告書と筆者の試験をもとに作成した。

表において、 τ_{m-bo} はブロックせん断試験による岩盤の粘着力である。

$N = \log \frac{\tau_{po}}{\tau_{m-bo}} / \log \frac{V_{pm}}{V_{po}}$ 式に τ_{m-bo} , τ_{po} および V_{pm} , V_{po} を代入し、各地の岩盤における N の値を求めた。これによれば、10例のうち5例が $2.9 \sim 4.0$, 3例が $4.0 \sim 5.5$ の範囲にある。一般的には、 q_{uo} が大きいものほど N が大きくなる傾向がある(図-24)。

例外として、小樽内川定山溪ダムサイトの石英斑岩がある。石英斑岩の2例では、 q_{uo} が 710 , $719 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ と大きい割には、 N が 3.0 , 3.6 と小さかった。 q_{uo} に比較して、内部摩擦角が小さく、 τ_{m-bo} が 40.6 , $64.6 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ と特に大きい岩質であったので、このために計算上 N が小さくでた。逆に糠平川糠平大橋のアバットの変朽安山岩では、 $N = 7.0$ という極端に大きな値がでた。ブロックせん断試験後のせん断面の観察によれば、コンクリートブロックと岩盤の付着面の分離部分が大半を占め、岩盤内のせん断部分は全体の $5 \sim 7\%$ に過ぎなかった(図-23)。このことが、堅硬な岩盤にもかかわらず、 τ_{m-bo} が $6.0 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ と小さくでた、そのために N が大きくなったものと考えられる。この τ_{m-bo} は、この地点より約 20 m 離れた同じ変朽安山岩の風化帯部分で実施したブロックせん断試験の値と、岩質から推定されるほどの、

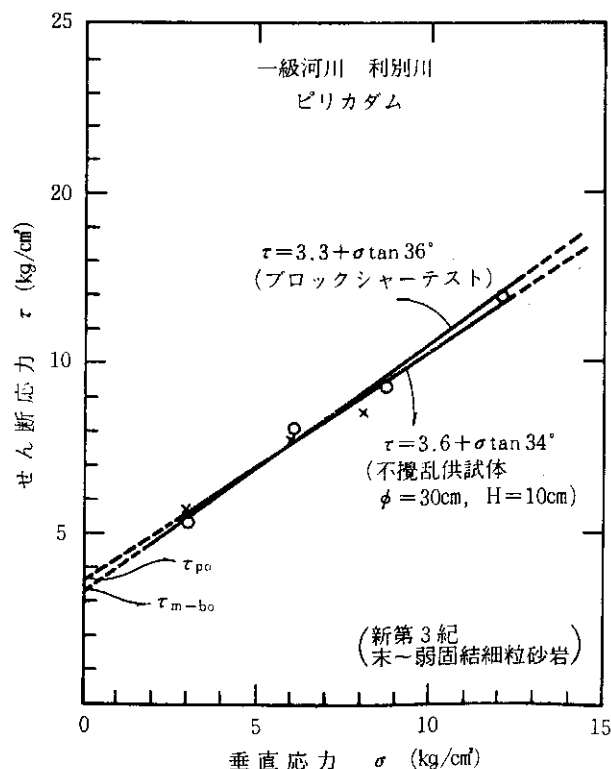


図-22 原位置と供試体せん断強度比較例

表-6 岩石と岩盤のせん断強度 (ブロックせん断試験) の測定例

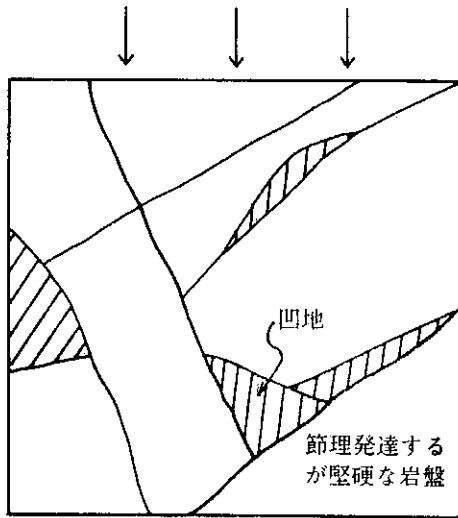
岩石名	τ_{m-bo} (kg/cm ²)	τ_{po} (kg/cm ²)	V_{pm} (km/sec)	V_{po} (km/sec)	N	q_{uo} (kg/cm ²)	せん断強度(ブロッグ) (kg/cm ²)	備	考
泥岩	4.4	20.7	1.3	2.2	2.9	100	$\tau_{m-b} = 4.4 + \sigma \tan 53^\circ$	利別川, ピリカダムサイト, 新第三紀, 弱固結	
砂岩	3.3	3.6	0.82	0.84	—	7.0	$\tau_{m-b} = 3.3 + \sigma \tan 36^\circ$	利別川, ピリカダムサイト, 新第三紀, 固結	
礫岩	6.7	29.0	3.1	4.3	4.5	205	$\tau_{m-b} = 6.7 + \sigma \tan 52^\circ$	沙流川, 二風谷ダムサイト, 新第三紀	
粘板岩	10.0	47.9	3.5	4.7	5.3	358	$\tau_{m-b} = 10.0 + \sigma \tan 50^\circ$	平取川, 平取ダムサイト, 先第三紀, 日高層群	
熔結凝灰岩	2.3	4.9	1.8	2.2	3.8	38	$\tau_{m-b} = 2.3 + \sigma \tan 45^\circ$	漁川, 漁川ダムサイト, 第四紀, 支笏熔結凝灰岩, 弱固結	
石英斑岩	40.6	118	3.2	4.3	3.6	710	$\tau_{m-b} = 40.6 + \sigma \tan 44^\circ$	小樽内川, 定山溪ダムサイト, 新第三紀	
石英斑岩	64.6	129	3.5	4.4	3.0	719	$\tau_{m-b} = 64.6 + \sigma \tan 10^\circ$	小樽内川, 定山溪ダムサイト, 新第三紀	
石英安山岩	24.4	53	3.9	4.6	4.7	450	$\tau_{m-b} = 24.4 + \sigma \tan 53^\circ$	小樽内川, 定山溪ダムサイト, 新第三紀	
風化変朽安山岩	4.8	62	1.6	3.1	3.8	218	$\tau_{m-b} = 4.8 + \sigma \tan 48^\circ$	糠平川, 糠平大橋アバット, 新第三紀, 風化顕著	
変朽安山岩	6.1	126	3.0	4.6	7.0	442	$\tau_{m-b} = 6.1 + \sigma \tan 58^\circ$	糠平川, 糠平大橋アバット, 新第三紀	

ただし, τ_{m-b} : ブロックせん断試験による破壊時のせん断強度 (kg/cm²) τ_{m-bo} : 同岩盤の粘着力 (kg/cm²), σ : 同垂直応力 (kg/cm²) $N = \log (\tau_{m-bo} / \tau_{po}) / \log (V_{pm} / V_{po})$

変朽安山岩（糠平大橋アバット）

せん断方向は上から下

試験前



試験後

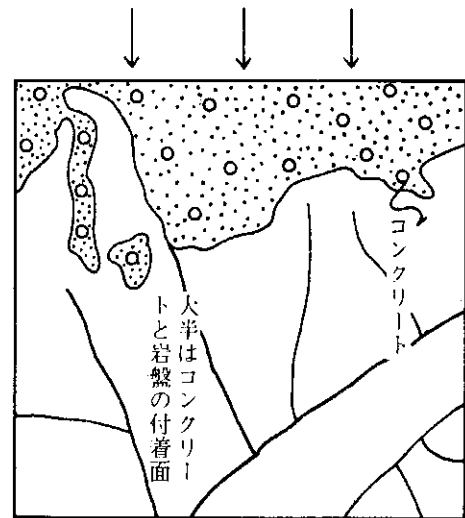


図-23 ブロックせん断試験のせん断面例

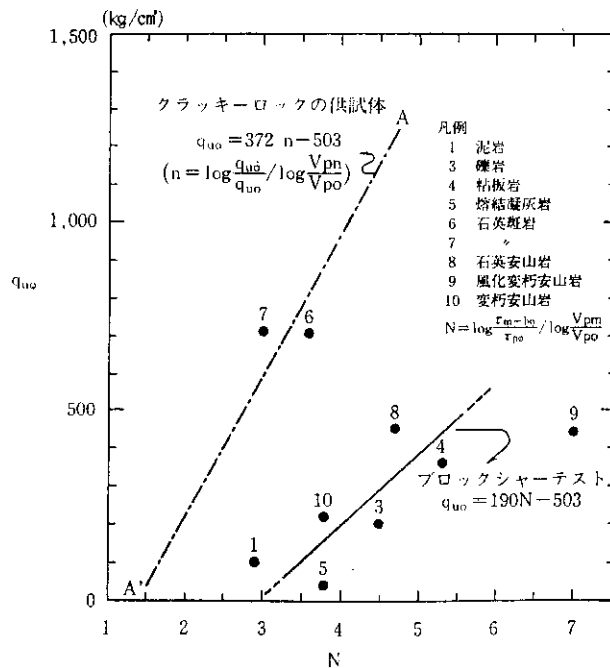


図-24 ブロックせん断試験の破壊点の強度における N と q_{uo} の関係

強度差はなかった。風化帯の場合、せん断面は全体の40～70%が岩盤内に生じていた。

これらの結果は、Nの値が非常に大きい場合はブロックせん断試験が不完全なものであることやブロックせん断試験による原位置せん断強度が必ずしも岩盤のせん断強度を示さないことを示している。

したがって、以下に真の岩盤のせん断強度とブロック

せん断試験による原位置せん断強度の相違について検討を加える。

表-6より q_{uo} と N の関係式を求めると、バラツキは大きい。ブロックせん断試験において、ほぼ $q_{uo} = 190N - 503$ ($N > 3$, $N = \log \frac{\tau_{m-bo}}{\tau_{po}} / \log \frac{V_{pm}}{V_{po}}$) である (図-24)。一方、前記の凍結融解作用を受けたクラッキーロックの供試体においては $q_{uo} = 372n - 560$ ($n > 1.5$, $n = \log \frac{q_{uo}}{q_{uo}} / \log \frac{V_{pm}}{V_{po}} \approx \log \frac{\tau_{po}}{\tau_{no}} / \log \frac{V_{pm}}{V_{po}}$) である。両者を比較すると、同じ q_{uo} に対し、後者の N の値は前者の n の値より1.5～3.0大きく、かつ硬岩ほど大きい傾向がある。このことは、後者を真の岩盤強度に近似するものとすれば、ブロックせん断試験により求まる現位置せん断強度 τ_{m-bo} は、一般に本来の岩盤強度より小さいことを示している。すなわち、図-24においてブロックせん断試験により求められた各試験点はほとんど直線 A—A' より右側にきている (直線 A—A' 上にのった場合両者の値が等しい)。

τ_{m-bo} が直線 A—A' より、計算により求められる本来の岩盤のせん断強度 (τ_{mo-o}) の何%になっているかを表-7に示す。石英安山岩および石英斑岩では q_{uo} の値が大きい割には71%および91、106%と大きい。試験が上手に実施されたことと岩質が影響しているものと考えられる。礫岩のように岩質が不均質なものと粘板岩のように潜在きれつを多数有するものでは40%余である。砂岩 (ピリカダム) では95%で大きい。岩質が弱固結で軟質のために、ほとんど岩盤中でせん断されたことによ

表一7 ブロックせん断試験によるせん断強度と岩盤のせん断強度の比率

岩石名	τ_{m-bo} (kg/cm ²)	τ_{mo-c} (kg/cm ²)	$\frac{\tau_{m-bo}}{\tau_{mo-c}} \times 100$ (%)	N	n'	q _{uo} (kg/cm ²)
泥岩	4.4	8.7	51	2.9	1.7	100
砂岩	3.3	3.5	95	— *	1.5	7
礫岩	6.7	15.3	44	4.5	2.0	205
粘板岩	10.0	23.6	42	5.3	2.4	358
熔結凝灰岩	2.3	3.7	62	3.8	1.4	38
石英斑岩	40.6	44.5	91	3.6	3.3	710
石英斑岩	64.6	60.6	106	3.0	3.3	719
石英安山岩	24.4	34.5	71	4.7	2.6	450
風化変朽安山岩	4.8	16.9	29	3.8	2.0	218
変朽安山岩	6.0	41.6	14	7.0	2.6	442

ただし、 τ_{mo-c} ：計算より予想される本来の岩盤の粘着力、 $n' = \log(\tau_{mo-c}/\tau_{po}) / \log(V_{pm}/V_{po})$
 $\times V_{po} \div V_{pm}$ のため計算せず。

る。糠平大橋のアバットの硬質な変朽安山岩では14%で小さい。

前述の τ_{mo-c} が真の岩盤強度に近似するものとすれば、以上の10例において、ブロックせん断試験により求められた現位置せん断強度は真の岩盤のせん断強度の14~106%であるが、ほとんどは15~95%であるといえる。

せん断試験後の観察によると、一般にせん断面はコンクリート、コンクリートと岩盤の付着面および岩盤の各部分からなり、その面積比率は各々の場所により異なる。 τ_{m-bo} はこれらの部分のせん断力の和をその断面積で除したものである。したがって、前記の15~95%という値がせん断面中の岩盤せん断の面積比率を表わすものではない。一般に、ブロックせん断試験のせん断面は硬岩になるほど岩盤中でのせん断面積比率が減少する。糠平大橋の変朽安山岩では上記の値が14%であるのに対し、岩盤でのせん断部分は全せん断面積の5~7%である。新第三紀の礫岩で実施したブロックせん断試験と岩盤を整形してコンクリートキャッピングしたロックせん断試験の結果では、せん断強度(粘着力)が、前者は後者の15~50%であるという例もある。

本項目においては、ブロックせん断試験により求められる岩盤のせん断強度を詳細に分析するのが目的ではなく、このせん断強度 τ_{m-bo} が、見掛け上、割れ目の入った岩盤の真のせん断強度の15~95%程度であることおよびこのことにより、同じ q_{uo} の岩盤であればNはnより1.5~3.0だけ大きいことを指摘するものである。

以上のことから、ブロックせん断試験による原位置せん断強度(τ_{m-bo})は次式で表わされる。

$$\tau_{m-bo} = \tau_{po} \left(\frac{V_{pm}}{V_{po}} \right)^N \quad \text{.....(5)}$$

ただし、 $q_{uo} = 10 \sim 100$ (kg/cm²) 程度の軟岩のとき

$$N = 3.0 \sim 3.5$$

$q_{uo} = 100 \sim 500$ (kg/cm²) 程度の中硬岩のとき $N = 3.5 \sim 5.5$

$q_{uo} = 500 \sim 1,000$ (kg/cm²) 程度の硬岩 I のとき $N = 5.5 \sim 8.0$

$p_{uo} \geq 1,000$ (kg/cm²) 程度の硬岩 II のとき $N \geq 8$

なお、原位置試験値 τ_{m-bo} や V_{pm} の決定においては次のような問題点や留意点がある。

τ_{po} や V_{po} は測定値のパラッキはあるにせよ、テストピースより求められる値なので、比較的明確に決定できる。これに対し、岩盤の値 τ_{m-bo} や V_{pm} は、たとえ原位置試験が実施されていたとしても、かなり不明確な点が多い。すなわち、 V_{pm} は一般的には下部ほど漸増するが、通常実施されている屈折法による弾性波探査では、これを何層かの速度層に区分して解析している。したがって、解析断面では同一速度層はどこでも同じ速度であるという見掛けを呈する。このために、ブロックせん断試験が実施された地点の V_{pm} が解析断面に示された速度とは限らない。特に基底速度層よりも、中間速度層でテストが実施された場合、このことに対する適切な判断が必要である。また軟岩や変質岩においては $V_{po} < V_{pm}$ となる場合がしばしばあるが、この場合(5)式は適用でき

ない。

岩盤のブロックせん断試験は通常4点のせん断試験により τ_{m-bo} と内部摩擦角 ϕ を求めたものであるが、実測データではバラツキの大きいことが多い。 τ_{m-bo} と ϕ を分離するのがむずかしい場合がしばしばあることは経験者のよく知るところである。最小二乗法で τ_{m-bo} や ϕ を求めるのが妥当でない場合もあり、その決定にあたり個人の主観が入ってくると同時に、個々のデータに対するより適切な判断が必要である。

以上のように、 τ_{m-bo} や V_{pm} 、また τ_{po} や V_{po} すら厳密に決定できるものではない。また地下水の有無、岩盤の異方性などの影響も無視できないものがある。したがって、 N の値もある範囲を有するものであるが、本文中では代表値を示した。

7. ま と め

熔結凝灰岩のインタクトな供試体に、凍結融解作用により微小きれつを生じさせ、一軸圧縮強度(q_u)とP波の伝播速度(V_p)を指標に、微小きれつが入った岩石の両者の関係を調べた。これらの関係は、インタクトな供試体における q_u と V_p の関係と明らかに異なり、割れ目が入った岩盤のP波伝播速度と岩盤の準一軸圧縮強度(一軸応力状態を仮定したときの強度)の関係に近いものと推定した。さらに、インタクトな供試体において、一軸圧縮強度とせん断強度の関係がほぼ一次式で示されることを求めた。以上のことより、 $V_{po} < V_{pm}$ となる一部の軟岩や変質岩よりなる岩盤などは別として、熔結凝灰岩などの通常の岩盤ではおおよそ次式によりせん断強度 τ_{mo} が求められることを提案する。

$$\tau_{mo} = \tau_{po} \cdot \left(\frac{V_{pm}}{V_{po}} \right)^n$$

ただし、 $q_{uo} = 10 \sim 100$ (kg/cm²) 程度の軟岩のとき
 $n = 1.3 \sim 1.7$

$q_{uo} = 100 \sim 500$ (kg/cm²) 程度の中硬岩のとき
 $n = 1.6 \sim 2.8$

$q_{uo} = 500 \sim 1,000$ (kg/cm²) 程度の硬岩Ⅰのとき
 $n = 2.7 \sim 4.0$

$q_{uo} \geq 1,000$ (kg/cm²) 程度の硬岩Ⅱのとき
 $n = 4.0 \sim 5.5$

熔結凝灰岩で求めた上式を全岩石に適用するのは多少の無理があるかも知れない。現にインタクトな供試体においてすら、玄武岩や粘板岩では一軸圧縮強度はP波伝播速度の4乗以上に比例しており、岩種による差も大きい(表一4)。しかしながら、インタクトな供試体で一軸圧縮強度とP波伝播速度の関係をみると、熔結凝灰岩は全岩種の中でほぼ平均に近い値を示している(表一4、全岩石2.67乗、熔結凝灰岩2.81乗に比例)。したがっ

て、上式を全岩石を概括的にみたときの平均的な式とすれば、多少の係数の相違はあっても他の岩種でも適用できるものとする。

さらに、北海道内10カ所で実施した各種岩盤のブロックせん断試験における岩盤のせん断強度(τ_{m-bo})とインタクトな供試体のせん断強度(τ_{po})を比較した結果、おおよそ次式で示される。

$$\tau_{m-bo} = \tau_{po} \cdot \left(\frac{V_{pm}}{V_{po}} \right)^N$$

ただし、前記の軟岩のとき $N = 3.0 \sim 3.5$

中硬岩のとき $N = 3.5 \sim 5.5$

硬岩Ⅰのとき $N = 5.5 \sim 8.0$

硬岩Ⅱのとき $N \geq 8.0$

従来の経験からみると、多くの場合硬岩になるほど岩盤のせん断強度はブロックせん断試験から求まるせん断強度よりも大きくなる。しかしながらコンクリートダムや橋のアバットなどの構造物の設計値はブロックせん断試験値が用いられている場合が多い。

ブロックせん断試験は、硬岩になると岩盤中のせん断試験よりも付着面でのせん断試験的要素が強くなる。一方、上記の構造物と基盤の強度関係において、硬質な岩盤では構造物との付着面が最弱線となることが多い。これらの点を考慮に入れると、岩盤中のせん断強度(いわゆる真の岩盤せん断強度)よりも、むしろブロックせん断試験によるせん断強度が用いられるのも当然のことかもしれない。しかし、両方のせん断強度の相違を十分に認識し、かつダムやトンネルの安全性、岩盤斜面の安定性などの目的に応じた使い分けがされなければならない。

8. あと が き

熔結凝灰岩を主とした室内試験と原位置せん断試験値から、P波の伝播速度とせん断強度の関係について、前記の式を提案した。筆者は基本的にはこのような式により、いろいろな岩種のおおよその岩盤の強度を推定できると考える。しかしながら、岩種による相違、流理構造の著しい岩石の場合の力学的異方性の影響などということも十分検討してみなければならない。

今後さらに他種類の岩石について、このような試験、検討を実施してみたい。

なお、本論文で述べた内容は原位置せん断試験の重要性を決して否定するものではない。原位置せん断試験値の解釈やそれがいないところの推定のひとつの手段としての方法論を述べたものである。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、北海道開発局土木試験所小

林雄一地質研究室長には終始御理解と御指導をいただいた。

同研究室、内山 進、前田 明、松山啓三の各技官には実験の遂行にあたり多大な御協力をしていただいた。

北海道大学理学部勝井義雄教授、筆者と同じ北海道岩盤研究会の会員である北海道開発コンサルタント(株)古田政美氏、日本工営(株)衛藤正敏氏には粗稿を読んでいただいた。もとより、当報文のいたらぬ点はすべて筆者の責任である。記して以上の方々に厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 根岸正充(1979) ; P波伝播速度を用いて岩石試験値から岩盤の強度を推定する方法について, 昭和54年度日本応用地質学会北海道支部研究発表会講演要旨集第1号, pp. 8~9
- 2) 根岸正充(1979) ; P波による岩盤の割れ目の定量化, 昭和54年日本応用地質学会研究発表会講演要旨集, pp. 60~63
- 3) ASTM Designation (1971) ; C-666-77 Standard Method of Test for Resistance of Concrete Specimens to Rapid Freezing and Thawing.
- 4) ASTM Designation ; C 170-50 (Reapproved 1958) Standard Method of Test for Compressive Strength of Natural Building Stone.
- 5) 地質研究室(1974) ; 凍結融解作用に対する岩石の抵抗性に関する研究, 昭和48年度土木試験所年報 p. 41
- 6) 根岸正充(1979) ; 凍結融解作用による軟岩の強度低減率, 第22回北海道開発局技術研究発表会論文集, pp. 51~56
- 7) 根岸正充(1979) ; 熔結凝灰岩の凍結融解作用による強度低減率, 昭和54年度日本応用地質学会北海道支部研究発表会講演要旨集第1号, pp. 6~7
- 8) 根岸正充(1978) ; 岩石の強度に関する基礎的研究, 第16回北海道開発局技術研究発表会論文集, pp. 51~62
- 9) 根岸正充, 星野 定(1973) ; 岩石の強度に関する研究, 第4回岩の力学シンポジウム講演集, pp. 103~108
- 10) 日本鉱業会(1968) ; 岩石強度測定実施基準案, 日本鉱業会誌 Vol. 84, No. 965, pp. 1479~1487
- 11) 土木学会岩盤力学委員会(1977) ; ダムの地質調査, 土木学会編, pp. 62~65
- 12) 北海道開発局漁川ダム建設事業所 (1976), 美利加建設事業所 (1978), 沙流川ダム調査事業所 (1977, 1978など), 定山溪ダム建設事業所 (1978など) ; 漁川, 美利加, 平取, 二風谷, 定山溪各ダム地質調査報告書
- 13) 永井俊一, 杉山博道(1976) ; 糠平大橋の地質調査, 第20回北海道開発局技術研究発表会論文集, pp. 51~62
- 14) 北海道開発局糠平道路改良事業所(1979) ; 一般国道273号上士幌町地内湖路第1号トンネル外一連工事の内, 岩盤ブロックせん断試験工報告書
- 15) 高橋隆孝(1980) ; 現位置せん断試験の測定例と測定結果の問題点, 昭和55年日本応用地質学会北海道支部講演要旨集第2号(通巻), pp. 2~3