

風化花崗岩の強度特性について

村山 朔郎・八木 則男・石井 義明

ON THE STRENGTH CHARACTERISTIC OF WEATHERED GRANITE

By *Sakuro MURAYAMA Norio YAGI*
and *Yoshiharu ISHII*

Synopsis

In this paper the strength characteristic of weathered granite are investigated in relation with propagation velocity of ultrasonic longitudinal and shear waves. The uniaxial compression test and Brazilian test were carried out. Two kind of sample were used in these test. One is naturally weathered granite gathered at Rokko mountains, the other is artificially weathered granite by applying freezing and drying cycles.

Main results from these test are as follows;

- 1) The uniaxial compression strength q_u and the tensile strength S_t increase linearly with the velocity of the longitudinal and the shear waves (Fig.-2).
- 2) q_u decreases hypabolically and S_t decreases linearly with the weathering index. q_u/S_t increases with increasing of the weathering index.
- 3) The propagation velocities of ultrasonic waves diminish somewhat with increasing of repetition number of freezing and drying cycles.

1. ま え が き

わが国には花崗岩地帯が多く、とくに風化部の斜面や基礎の安定性が常に問題となっている。安定性を検討するには花崗岩の力学的な性質とくに強度特性を熟知する必要がある。しかし岩石は不均質な場合が多く、現地試験の精度も現在のところ十分とはいえないうえ、その費用も多大である。

そこで本文では花崗岩の風化部分の強度などの力学的性質をその中を通過する弾性波速度で推定することを試みた。すなわち六甲山系の現地より採取した風化の度合の異なった岩石に対して圧縮および引張強度試験、超音波による弾性波速度の測定を行ない、それらの間の相関関係を求めた。

一方、室内で岩石を凍結融解の温度変化を強制的に与え物理的な風化を促進させた場合についての強度、超音波伝播速度の変化についても調べた。

2. 風化の程度の表わし方

岩石の強度は力学的には応力状態、物理的には密度、化学的には風化変質の影響を受ける。しかし常に物理、化学的な風化が同時に生ずるためその機構が複雑である。したがって風化の度合を定量的に表わす方法はまだ確立されていない。風化の度合を表わすために現在主に使われているものは次の諸量である。(1) 空けきの大きさ、(2) 単位体積重量、(3) 透水性、(4) 弾性波速度などがあり、風化の進行の状態は花崗岩中を流れる水中のカルシウムイオンまたは重炭酸イオンによって示される。例えば松尾¹⁾らは供試体を

48時間水浸後その表乾重量 W_w を計かり

$$\text{吸水率} = \frac{W_w - W_0}{\gamma_w V} \dots\dots\dots (1)$$

により表わしている。ただし W_0 は乾燥重量, V は体積, γ_w は水の単位体積重量である。北野²⁾ らは六甲山系の住吉川および芦屋川流域の天然水を分析, 風化の進行状態を調べた。その他増田³⁾ はダム地点の基礎岩盤内の弾性波速度と地質技術者によって判定された岩質の分類基準と対比させている。

吸水量などにより表わす方法は風化がかなり進行し, 水がクラックに浸透しやすい場合は比較的よい結果を示すと考えられるが, 水が浸入できない程度のクラックなどについては無視されることになり不都合である。また天然水の分析による方法は北野²⁾ らが指摘するように特殊な地下水(温鉱泉水に匹敵する)の混入が予想されたり, 山系全体の風化の度合を表わすには都合よくても, 表層や, 基岩など部分的に表わそうとするときには困難な点がある。また弾性波による方法は微少なクラックでも敏感に速度に影響し吸水量などによる方法の欠点を補うが, 間げき流体の影響を受ける場合がある。そこで本文では吸水などによる方法と, 超音波伝播速度による二通りを用いて強度などとの対応を調べた。ここでは供試体を2週間水中に浸したときの風化指数を風化の度合の表示に用いた。弾性波速度についてはそのまま強度などに対応させる方法によった。

3. 岩石試料と実験装置

使用した岩石は六甲山系より採取した種々な風化の度合を有する花崗岩(以下A群供試体とする)と採取場所不明で, かなり堅固な花崗岩(以下B群供試体とする)の2種類である。

供試体の寸法は圧縮試験機の載荷能力を考慮して, $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ の大きさの角柱供試体とした。

供試体両端面の仕上げは sand paper で, 両端面平行度が $1/20\text{ mm}$ の範囲になるまで, また不陸のないよう注意深く仕上げた。

超音波伝播速度の測定器は振動子は送受が一組となったもので, 両者ともチタン酸バリウムが振動子として用いられている。これを供試体両端に密着させ, 送信用は電気衝撃を機械的振動に変換し試料の一端に与え他端にその透過した弾性波を受信用振動子により再び電気信号に変換してこれを充分に増幅しブラウン管に映像する。また振動子は縦波を発生するものと, ねじれによる横波すなわちせん断波を発生するものを用い周波数は前者が 50 kc/sec , 後者が 25 kc/sec である。横波速度 V_s の測定は振動子を供試体端面に密着するだけでは波の減衰が著しく測定しにくいので振動子を軸方向に 0.5 kg/cm^2 の圧力を作用させて測定したものである。圧縮試験は 30 ton の載荷能力を有する万能試験機を使用した。圧縮試験に際し両端の摩擦が変形や強度におよぼす影響を減少させるため両端面にグリースをぬった。引張強度は圧裂引張試験(Brazilian test)を採用し万能試験機を用いた。圧縮, 圧裂試験の載荷速度は $7\text{ kg/cm}^2/\text{sec}$ である。

4. 実験結果および考察

材料を弾性体と仮定すると弾性波の伝播速度から次式によって弾性諸常数が計算できる。

$$V_l = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \dots\dots\dots (2)$$

ここに, V_l および V_s は縦波および横波の伝播速度である。また ρ は材料の密度であり λ, μ は Lamé の常数である。この λ, μ を用いれば動的なヤング係数 E_d , ポアソン比 μ_d , 体積弾性係数 K_d , せん断弾性係数 G_d が次式によって計算できる。

$$E_d = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \dots\dots\dots (3)$$

$$\mu_d = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \dots\dots\dots (4)$$

$$K_d = \lambda + \frac{\mu}{3} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$G_d = \mu = \frac{E_d}{2(1 + \mu_d)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

したがって本研究においても超音波伝播速度から動弾性諸常数はこれらの式を用いて計算した。

圧裂引張強度は次式により求めた。

$$S_t = \frac{2P}{\pi dl} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、 S_t は引張強度、 P は荷重、 d 、 l は供試体の直径および長さである。

4-1 超音波伝播速度と風化指数の関係

岩石の弾性は空げきが大きくなるほど、また粒子間の結合力が弱いと小さくなり、これにともない弾性波速度が小さくなることが考えられる。本文で用いる風化指数すなわち2週間水浸後の含水比はある条件のもとではその岩石の空げきを表わし伝播速度との間に深い関係がある。Fig. 1は縦軸に超音波伝播速度、横軸に風化指数 i をプロットしたもので、風化の進行とともに V_l 、 V_s ともに減少し、これと i との間に密接な関係のあることを表わしている。そしてその関係は採取場所に無関係である。ただし V_l 、 V_s とも自然乾燥状態で測定したものである。また風化が進行すると i の変化に対して伝播速度の変化の割合が少なく、風化の進んだものを伝播速度で表示することが困難になり、逆に新鮮な岩石になるほど伝播速度の変化に対して i の変化が少なくなる。このことより風化が進んでいない場合は伝播速度で、風化の進んだものについては含水比など吸水による表示が適当と考えられる。

4-2 超音波伝播速度と圧縮強度の関係

岩石が風化されるとその強度は低下しその中を通る弾性波伝播速度も低下する。弾性波速度から岩石の硬軟、割れ目の状態、風化の程度の推定が現場でなされることが多い。そこで弾性波速度より強度の推定の可能性を調べるために超音波伝播速度と一軸圧縮強度 q_u の関係を示すと Fig. 2 となる。図から明らかなように縦波 V_l および横波 V_s の増加とともに q_u は直線的に増加している。 V_l と q_u および V_s と q_u の関係を直線関係としてA試料に対する相関係数を求めると 0.92 および 0.95 となり十分な相関性が認められる。各々の回帰線は次のようである。

$$V_l = 3.58 q_u + 1230 \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$V_s = 2.47 q_u + 545 \quad \dots\dots\dots (9)$$

B試料についても上記の直線の付近にプロットされるがバラツキは多い。したがって同一の組成を有する花崗岩の風化による強度変化は十分に V_l および V_s で表わせる。また V_s より V_l との関係のほうがややばらつきが多いのは含有流体により V_l は影響を受けるのに対し、 V_s は影響を受けないためであろう。こ

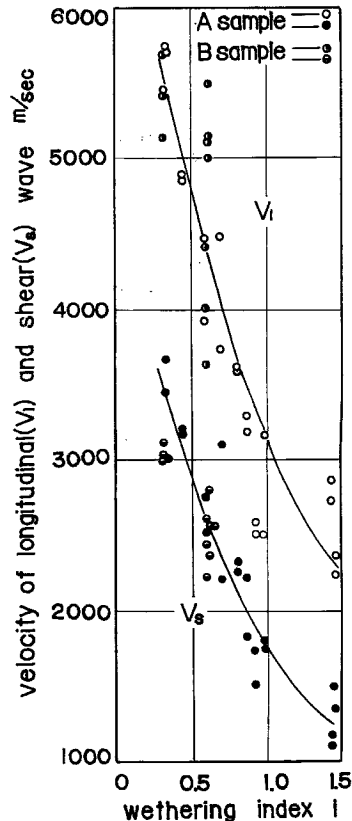


Fig. 1 Relationship between weathering index and velocity of ultrasonic wave.

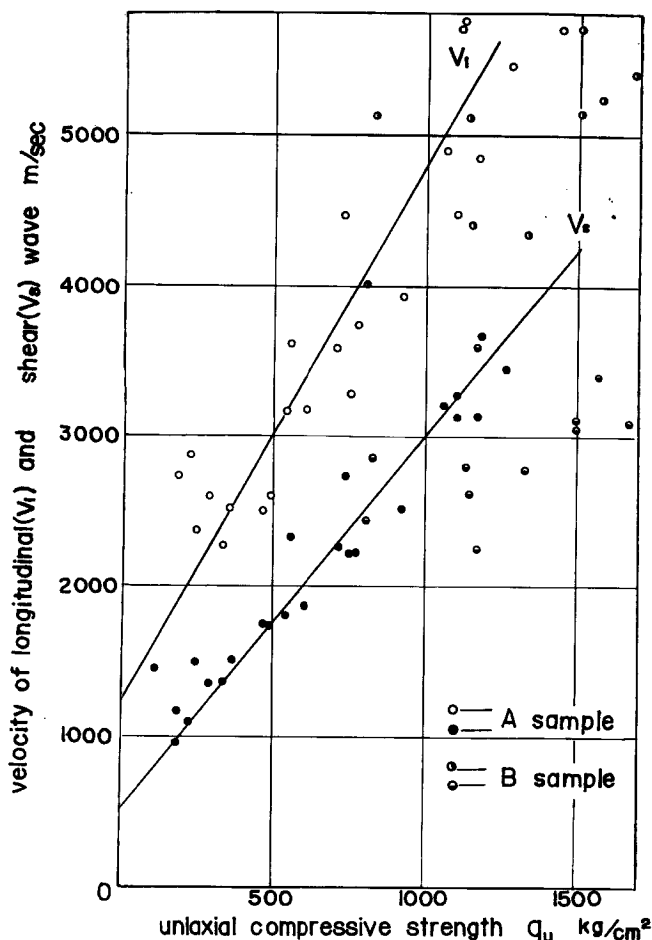


Fig. 2 Relationship between uniaxial compressive strength and velocity of ultrasonic wave.

のことに実証するために含水比と V_l および V_s の関係を風化指数 i をパラメーターにして示したのが Fig. 3 である。風化指数は前述したように岩石の最大含水比で、ここでは2週間水浸した時の含水比である。これは浸水後毎日重量の測定をしたところ、2週間たてば重量に変化のなくなるところから含水比が最大となったと判定した。したがって i が大きいものほど風化が進んでいる。図から含水比の増加とともに V_l は増加し新鮮な岩石ほど著しく影響を受けるが、 V_s は含水による影響はほとんどなく、含水比の増加とともにわずかに増加する傾向がみられた。これらのことより V_l から岩質を調べる場合、(例えば強度や動的な弾性係数など) 含水比の影響を考慮する必要がある。したがって花崗岩の強度のように間隙き水の飽和によって影響されないものは V_s から推定するのが望ましい。一方著者⁴⁾ は以前より粘土や泥岩について動的なせん断弾性係数 G_d と一軸圧縮強度 q_u との間に直線関係のあることを示してきた。花崗岩についてもそれらの関係を示すと Fig. 4 のようになり V_l , V_s と q_u との関係よりも明らかに大きいが、したがってこの場合は G_d と q_u の関係よりも V_s と q_u の関係の方が直線としてのよい相関が得られる。Fig. 4 の関係を直線と仮定してその相関係数を求めると 0.77、回帰線は次式のようなになる。

$$q_u = 29.7 G_d + 333 \quad \dots\dots\dots (10)$$

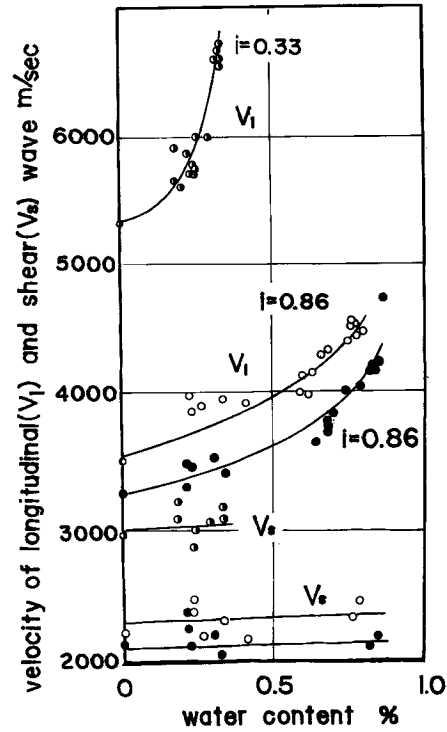


Fig. 3 Variation of velocity of ultrasonic wave versus water content.

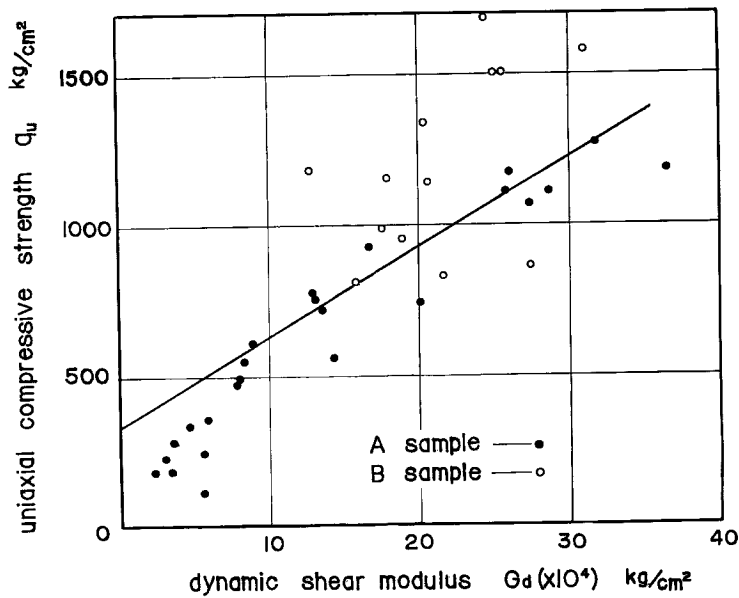


Fig. 4 Relationship between dynamic shear modulus and uniaxial compressive strength.

したがって G_d と q_u の関係を直線と仮定しても Fig. 4 のような q_u の範囲では一応相関があるといってもよいであろう。ここで Fig. 4 のバラツキの原因について考えてみると、 G_d の計算に際して V_s は 2 乗なのでバラツキがより大きくなること、また単位体積重量 ρ の測定にもバラツキが含まれるので、 V_s と q_u の関係よりもバラツキが大きいと考えられる。一方 q_u は V_s よりも供試体の寸法や端面の仕上げによる実験誤差を多く含む。実際同一強度と思われる花崗岩でも 14~21% の変動があることが報告⁹⁾ されている。

4-3 風化指数と強度の関係

岩石の強度には圧縮強度、引張強度、せん断強度、曲げ強度がありそれぞれに応じた試験法がある。しかし圧縮強度はすべり面に沿って破壊すると考えるとせん断強度を表わし、曲げによる破壊は引張破壊から生ずる。したがってここではそれらの代表として一軸圧縮強度 q_u および引張強度 S_t (Brazilian test による) を用いた。風化の進行にともなう q_u の変化を示すと Fig. 5 となる。図より i が 2~3 になると q_u はほとんど抵抗を示さず、これらの関係が双曲線に近い曲線により表わされる。 $i=0.9$ までの q_u は急速に低下するがそれ以後の低下は i の変化に対して比較的小さくなる。これは新鮮な岩石に近いほど風化などによる弱目の形成が強度に大きく影響するが、風化がかなり進行すると岩塊が細片化され岩塊間に密なみ合いがなくなり、あたかも大きな粒子が密につまった状態となり、破壊の mechanism が異なるためと考えられる。

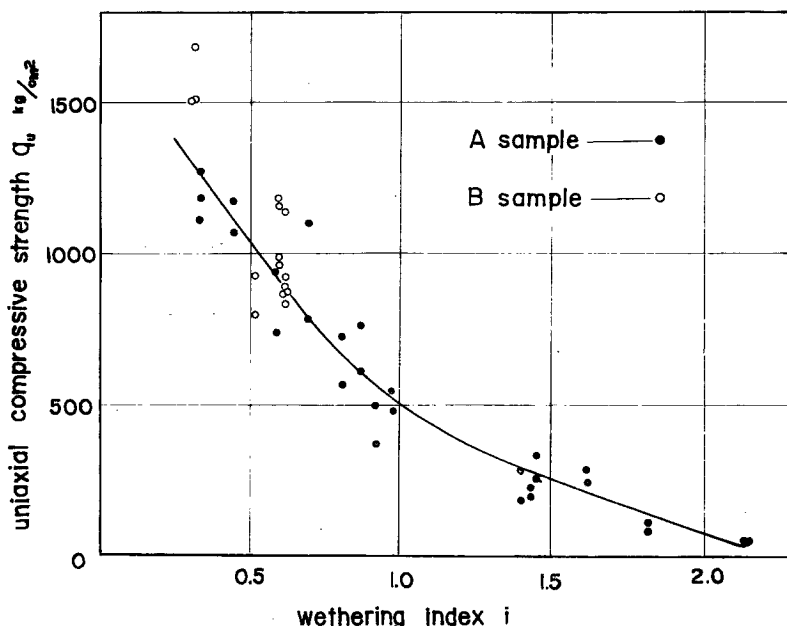


Fig. 5 Relationship between wethering index and uniaxial compressive strength.

一軸的な引張応力状態は岩盤内において生ずることはなく、岩盤を掘さくして斜面を形成した場合背後に、また岩盤内空洞周辺に生ずる。また岩石の風化は岩石中のある元素とある元素との間の結合が切れることが基本的な原因と考えられ、これは引張強度 S_t と関係が深い。

一軸的引張試験を行うには試験片の加工整形が困難なため、実施が容易な圧裂試験が広く行なわれる。しかし一般には圧裂試験により求めた S_t は一軸引張強度より求めた S_t より大きいといわれてきたが、ほぼ等しいと報告された例¹⁰⁾ もある。圧裂試験より求めた S_t と i の関係を示せば Fig. 6 となる。図は i の増加とともに S_t は直線的に減少している。 i が 1.0 近くになると S_t はほとんどゼロに近くなる。

q_u と S_t の比 q_u/S_t は岩石の種類により異なるが、R. G. Wuerker⁷⁾ によれば q_u が $2000 \sim 2500 \text{ kg/cm}^2$ の花崗岩については $q_u/S_t = 70$ である。同一岩塊から得られた q_u の平均値と S_t の平均値より q_u/S_t を求め、 i との関係を示せば Fig. 7 となる。これは風化が進むと q_u/S_t が大きくなり、風化によるクラックなどが大きく影響していると考えられ、風化に対して S_t が q_u にくらべて敏感であるといえる。

4-4 静的ヤング係数と動的ヤング係数の関係

岩石は完全な弾性体でないため動的な手法より求めたヤング係数 E_d は静的ヤング係数 E_s とは異なり一般には $E_d \geq E_s$ とされている。 E_d を (3) 式から求め、 E_s を一軸圧縮試験の応力・ひずみ関係の直線部勾配より求め花崗岩について得られた E_d , E_s の関係を示すと Fig. 8 となる。結果はかなりのバラツキを示しているが E_s が小さくなると E_d も小さくなっている。 E_s の小さいときは $E_d > E_s$ となっているが、大きくなると必ずしもいえず破線で示した $E_d = E_s$ の線に近づく傾向がみられる。

4-5 超音波伝播速度におよぼす圧力の効果

外部から加えた圧力により弾性波伝播速度が異なることはすでに多くの実験で確かめられている。それによれば圧力が増加すると伝播速度は増加し、その増加率は岩石の種類、産地、あるいは試料により異なる。

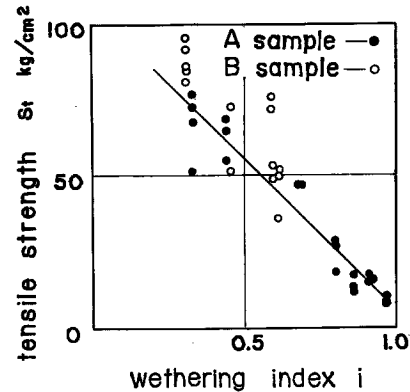


Fig. 6 Relationship between weathering index and tensile strength.

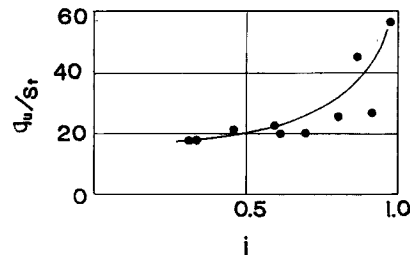


Fig. 7 Variation of strength ratio q_u/S_t versus weathering index.

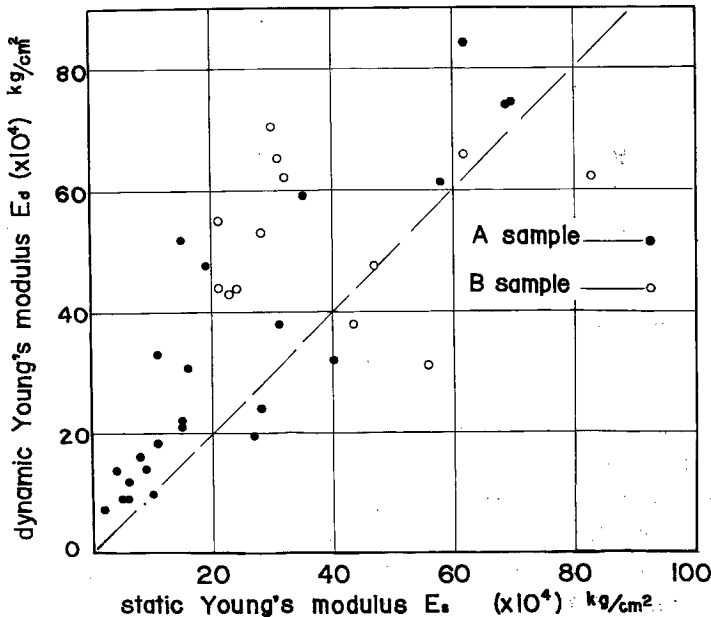


Fig. 8 Relationship between static young's modulus and dynamic one.

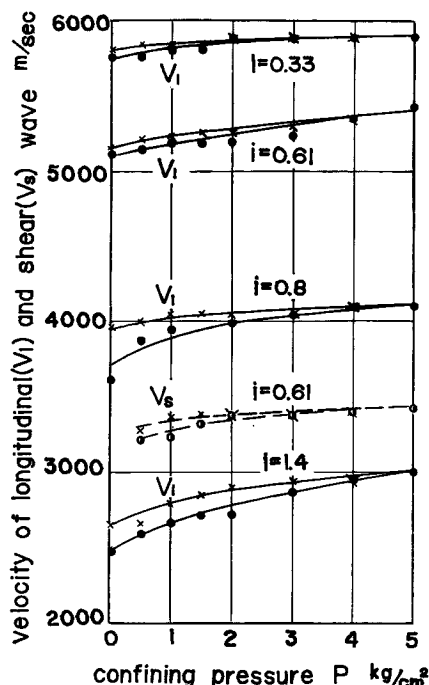


Fig. 9 Variation of velocity of ultrasonic wave versus confining pressure.

これは岩石内部の空けきが圧力の増加により閉じるためであり、減圧時の伝播速度のほうが同じ大きさの圧力でも伝播速度が大きいことから、一度閉じた空けきがもとのように開かないためであるとされている。そこで花崗岩についてこれらの関係をみるため三軸装置のセル内に供試体を振動子とともにセットし、これにゴムスリーブをかぶせ空気により圧力 P を等方的にかけ各圧力段階で超音波伝播速度を測定した。なお周圧により供試体内に間げき圧が生じないよう供試体はパイプにより外部と通じ排水、排気状態で測定した。その結果を風化指数をパラメーターに、 P と V_i の関係を示すと Fig. 9 のように i が大きいほど V_i は小さく、伝播速度の増加率は大きい。●印は加圧時の V_i 、×印は減圧時の V_i を示し、減圧時の V_i が加圧時の V_i より大きいことがわかる。この傾向は V_s についても同じであり、図中に破線で V_s の一例を示した。

V_i 、 V_s が圧力とともに大きくなることは圧力とともに弾性係数が大きくなることであり岩石の応力・ひずみ関係が応力の値により変化すると考えられる。岩石の圧縮試験による応力ひずみ曲線の勾配が応力が小さい範囲では応力の増加とともに大きくなることから、 E_s についても E_d と同様に応力により E_s が異なるといえる。

4-6 人工的に風化を促進させた岩石の強度

地表の岩石が温度変化や水の作用により破壊され、長年月のあいだに土壤にまで変化する風化作用は物理的風化と化学的風化に大別されることはすでにのべた。物理的風化は鉱物の膨張率の差や、表面と内部との温度差、氷霜の凍結融解作用のくり返しが考えられる。

凍結融解のくり返しによる風化が強度、超音波伝播速度に及ぼす影響をみるためつぎのサイクルを繰り返した供試体について各試験を行なった。すなわち24時間浸水、24時間 -4°C で凍結、24時間 110°C で乾燥といったサイクルである。

凍結時と乾燥時との温度差は 114°C あり自然状態ではこれほどの差は生じないが、風化を急速に促進しその効果をみるために特に温度差を大きくした。

凍結融解などの繰返し回数 n と超音波伝播速度の関係を示すと Fig. 10 となる。これはA群試料の一岩塊から8個の供試体を切り出したものについての結果で、本来は同一強度、同一伝播速度をもつものだが、岩石内クラックなどの影響により V_i は 500 m/sec の範囲で、 V_s は 300 m/sec の範囲内の差がある。

図より V_i は n がゼロにくらべて1回の繰返し履歴により急速に低下している。これは $n=0$ は自然乾燥状態で測定したものであるのに対し、それ以後は炉乾燥後に測定したため含水量の差により急に低下したものである。その後 n の増加とともにわずかに減少している。

一方 V_s は n の増加にしたがいざん減しているが、5~10 サイクル以上ではほとんど一定の速度になっている。これは鉱物粒子間の付着力が凍結や乾燥時の温度差などにより発生する応力より小さいものは n の増加とともに急速に内部破壊を生ずるが、大きいものについては n の増加とともに繰返し効果による内部破壊が進行するため V_i 、 V_s も徐々に減少したと考えられる。

風化が進行すると強度が減少することはすでに 4-3 で述べたとおりである。人工的に風化を促進させた

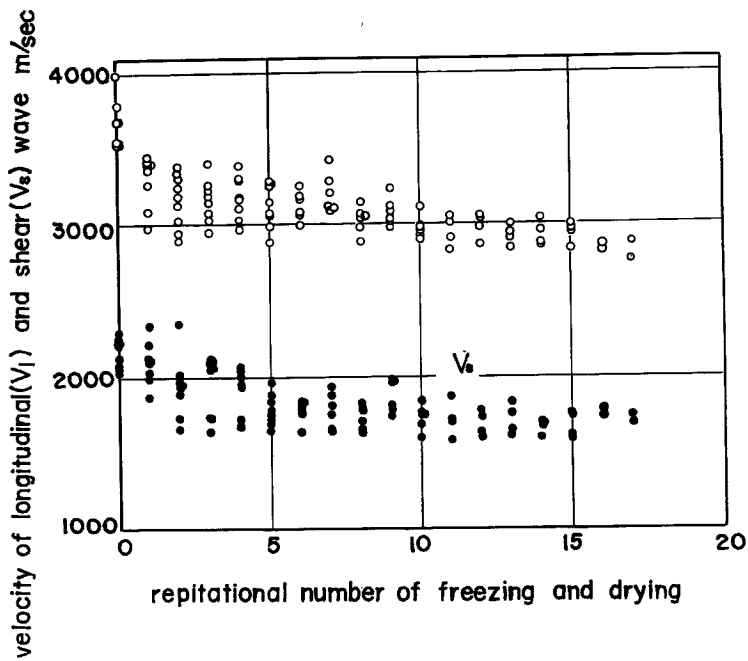


Fig. 10 Variation of velocity of ultrasonic wave versus repetition number of freezing and drying cycle.

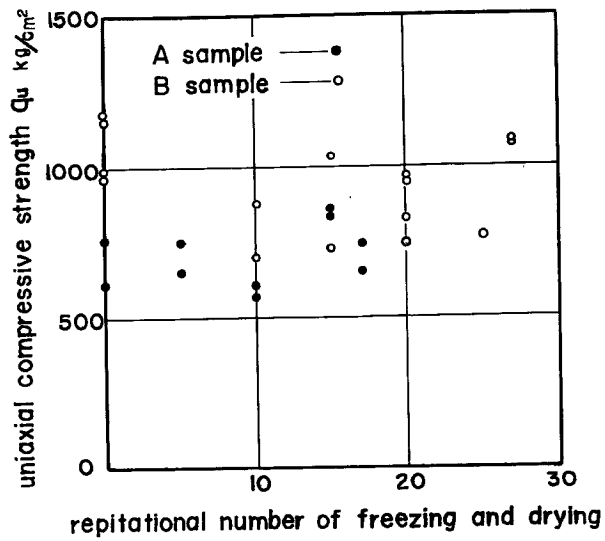


Fig. 11 Variation of uniaxial compressive strength versus repetition number of freezing and drying cycle.

場合 n の増加に対する q_u の変化を示したものが Fig. 11 である。●印はA群供試体についての結果を、○印はB群供試体についての結果である。両供試体に対してバラツキが大きく一定の傾向が得られなかった。岩石の強度は岩石内のクラックなどの存在により本質的にバラツキといわれているが、山口⁵⁾ は花崗岩の圧縮強度のバラツキについて55個の供試体を用いて調べ、変動係数が15～21%になることを指摘している。したがって凍結融解の繰り返しによる強度の変化はこのバラツキの範囲内にあり、その影響を調べることができなかった。しかし Fig. 10 から明らかなように n の増加とともに V_L , V_s は減少しているところから推定すれば、風化が進みいくらか q_u が減少することは明らかであろう。

V_L , V_s が減少するのは凍結作用によるものか、乾燥、あるいは吸排水作用によるものか、いずれが最も大きく寄与するかを知ることは物理的な風化の原因を考える上に必要となる。これについては今後さらにくわしく調べるつもりである。

5. 結 び

今回は花崗岩の風化にともなう強度や超音波伝播速度の変化に重点をおき調べた結果、主に次のことが明らかとなった。

(1) V_L , V_s と q_u の関係は採取場所が同じで、ほぼ同じ組成を有すると思われる花崗岩については直線的関係でその相関性は非常によいが、 G_d と q_u の関係は G_d を計算する際 V_s の2乗や密度 ρ が入ってくるためバラツキやすい。

(2) 供試体を2週間水に浸したとき供試体が示す含水比を風化指数として、これと q_u の関係は双曲線のような曲線で示される関係となり、また S_r との関係は直線的となり、ともに風化指数が大きくなると減少する。

(3) 強度が変らなくても含水比が増加すると V_L は増加するが V_s は影響を受けない。新鮮な岩石ほど含水比による V_L の影響は大きくなる。

(4) q_u/S_r は風化が進むと急速に大きくなり、 S_r は q_u より風化に対して敏感である。

(5) 圧力が増加すると V_L , V_s も増加し、従来よりいわれているように加圧時の速度より減圧時のもののほうが大きい。

(6) 人工的に物理的な風化を行なうと伝播速度は減少するが、 q_u の変化は誤差の範囲内に入り、凍結融解のサイクルが少ない時は明確な関係が得られない。

今後これらの実験を続け、人工的な物理的および化学的風化の機構を調べるとともにその強度特性を研究するとともに風化の程度を定量的に表現する方法についても考えたい。また圧縮試験と並行して軸方向とこれに直角方向から伝播速度測定を行ない、岩石内クラックの状態を超音波伝播速度から推定し岩石破壊の機構に関連づけることに努力したい。

なお、この研究は文部省科学研究費の補助によるものであることを付記し、ここに謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 松尾新一郎・沢考平：マサ土の風化度と引張強度について，土木学会関西支部年次学術講演会概要，昭44.5，Ⅲ6.
- 2) 北野康他：水質調査による岩石崩壊の予知の可能性，京都大学防災研究所年報，第10号A，昭42.3，pp.557～587.
- 3) 増田秀夫：わが国におけるコンクリートダム基礎岩盤の弾性波速度に関する応力地球物理学的研究，電力中央研究所技術研究報告，1961.
- 4) 村山朔郎・八木則男：泥岩の力学特性，京都大学防災研究所年報，第9号，昭41.3，pp.403～408.
- 5) 山口梅太郎：岩石強度の確率論的考察，材料，17，181，昭43.10，pp.902～907.
- 6) 平松良雄・岡行俊：岩石の引張試験に関する検討，日本鉱業会誌，70(793)，昭29，pp.285～289.