

(27) 風化に伴う珪藻質軟岩の力学特性と弾性波速度の関係

(財) 電力中央研究所 正会員 西 好一
(株) 建設企画コンサルタント 正会員 ○西 剛整
(財) 電力中央研究所 正会員 工藤 康二

1. はじめに

風化岩の力学特性は従来、斜面の崩壊に関連して、数多くの研究が行われている分野の一つであるが、成因の複雑さや不攪乱試料の採取が困難なこともあって、これらの強度－変形特性が充分究明されているとは言えない状況にある。著者らはこの内、特に未解明な点の多い動的力学特性に関する実験的研究を幾つか行ってきた¹⁾²⁾。これらの研究を通じて、せん断弾性波速度 V_s が様々な風化過程にある軟岩の力学特性を表現するインデックスとして有用であるものとの結論を得ている。これらは主に一軸圧縮条件下での挙動に着目して進められたものであるが、ここでは更に論を進め、第三紀中新世に属する珪藻質軟岩を人工的に劣化させ、それを対象とした超音波試験、圧密非排水三軸圧縮試験及び等方圧密試験を実施し、風化に伴う V_s の変化と力学特性との相関について述べたものである。

2. 試料及び試験方法

実験に用いた試料は、石川県能登地方に分布する珪藻軟岩である。試料の物理的性質を表－1に示す。本試料は非常に均質であり、同一のブロックから採取した供試体であれば、その物性にほとんど差はみられない。この試料を用いて、新鮮な状態の供試体と、乾燥－湿潤作用を与えた供試体、凍結－融解作用を与えた供試体を作成し、せん断波速度 V_s を測定するための超音波試験、等方圧密試験、及び圧密非排水三軸圧縮試験を行った。実験のフローを図－1に示す。ここで、新鮮な試料のうち弾性波速度 V_s が 420 m/s 程度のものを供試体A、 330 m/s 程度のものを供試体B、供試体Aに対して炉乾燥－湿潤作用を与えたものを供試体C、凍結－融解作用を与えたものを供試体Dとする。それぞれの供試体の一軸圧縮強度 q_u は、 $2.0, 1.7, 1.0, 4\text{ kgf/cm}^2$ であった。供試体Cは急激な吸水による破壊を防ぐため、スプレーにより徐々に湿潤させた。供試体Dは $V_s \approx 120\text{ m/s}$ になるまで繰返し劣化させた。各供試体の V_s の誤差は、最大でも $\pm 10\text{ m/s}$ 以内とした。超音波試験には、圧電セラミックを使用したせん断弾性波速度測定用ピックを用いており、 V_s と各種力学特性との相関をみる場合、以下の図－4と5以外には、すべて供試体に受信用ピック以外の拘束圧は加わっていない状態で得られた V_s を用いている。

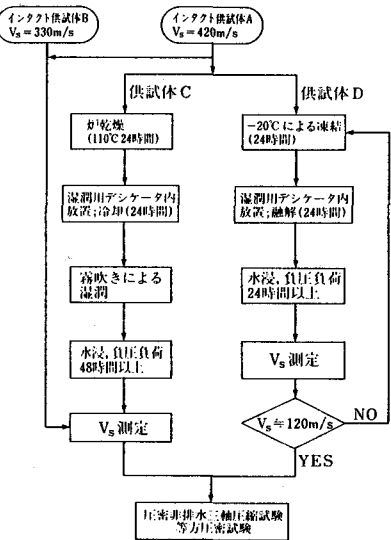
表－1 試料の物理的性質

比 重 G_s	2.27
含 水 比 w	120 (\%)
乾 燥 密 度 ρ_d	0.61 (g/cm^3)
間 隙 比 e	2.62
液性限界 w_L	148.1 (\%)
塑性限界 w_p	92.5 (\%)

3. 実験結果とその考察

3-1 圧密非排水三軸圧縮試験

供試体A～Dに対して圧密非排水三軸圧縮試験を行った。図－2は実験の結果の一例として、 $\sigma_3' = 3\text{ kgf/cm}^2$ の下における軸差応力－軸ひずみ関係（実線）、及び間隙水圧－軸ひずみ関係（点線）を示したものである。図をみると、最大軸差強度は、 V_s の低下に伴い明らかに低下している。残留軸差強度についても同様の事が示されている。また、応力－ひずみ関係をみると、 V_s の低下に伴い脆性的挙動から延性的な挙動へと移行しており、D供試体では明瞭なピーク点は表わ



図－1 実験のフロー

れなくなっている。一方、 V_s の低下による間隙水圧の変化は比較的少ないものと言ってよい。図-3は、各供試体における有効応力径路の例を示している。なお、図中(●)は残留強度を示している。図をみると軸差強度に差はあるが、いずれも過圧密粘土と類似した間隙水圧挙動を示している事が明らかである。

拘束圧を加えた超音波試験の結果から、 V_s と拘束圧の関係は両対数紙上で直線近似できる事を別途報告³⁾しているが、この関係に基づきA～D供試体の三軸圧縮条件下における V_s 値を推定し、それと圧密非排水三軸圧縮試験で得られる最大軸差強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 及び変形係数 E_{50} の関係を示したのが図-4及び図-5である。図には、一軸圧縮試験から得られる強度 q_u と E_{50} の値もあわせて示している。これらの図から $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 及び E_{50} の値は両対数紙上において V_s と直線関係にあることが判る。一軸圧縮試験による q_u 及び E_{50} と V_s の関係から、風化軟岩の力学特性予測に対する V_s の有用性について別途考察している⁴⁾が、図-4及び図-5の結果からも V_s によって種々の拘束圧条件下での風化軟岩の強度-変形特性が簡便に推定できる可能性が示されている。なお、供試体C、Dのように全く異なる方法で劣化作用を与えた場合でも、 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f - V_s$ 、 $E_{50} - V_s$ 関係はユニークに定まるようであり、風化の仕方がこれらの関係に影響されないという興味深い結果も示されている。

3-2 有効応力に基づく破壊規準

図-6は、有効応力に基づく最大軸差強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 及び残留軸差強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ と平均有効応力 P の関係を示したものである。すでに足立ら⁴⁾及び吉中ら⁵⁾が示したように、珪藻質軟岩においても $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 及び $(\sigma_1 - \sigma_3)_r$ と P の間には、両対数紙上において直線関係が得られる。すなわち、

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{P_0} = \alpha_f \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\beta_f} \dots (1)$$

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_r}{P_0} = \alpha_r \left(\frac{P}{P_0} \right)^{\beta_r} \dots (2)$$

ここで、 P_0 は単位圧力、 α_f 、 β_f 、 α_r 、 β_r は材料定数を表わす。図によれば、 α_r 、 β_r は供試体の劣化程度に左右されず、 $\alpha_r = 2.12$ 、 $\beta_r = 0.909$ として唯一的に表わされるようである。 α_f 、 β_f に関して、上田ら⁶⁾及び新城ら⁷⁾は、第三紀

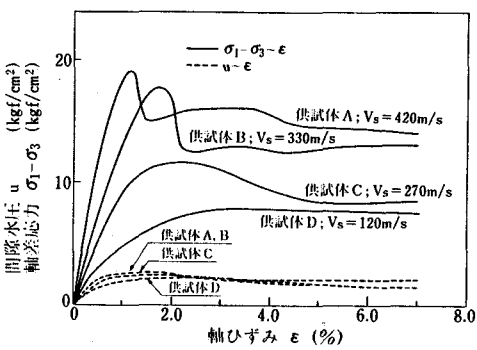


図-2 軸差応力及び間隙水圧と軸ひずみの関係 ($\sigma_3' = 3 \text{ kgf/cm}^2$)

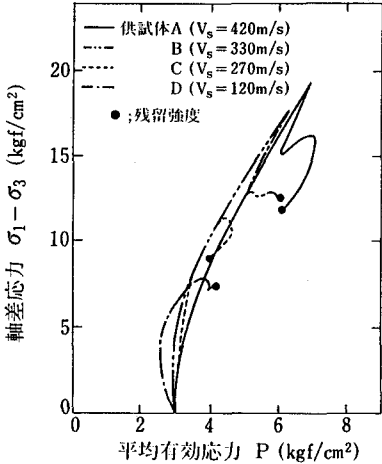


図-3 有効応力径路

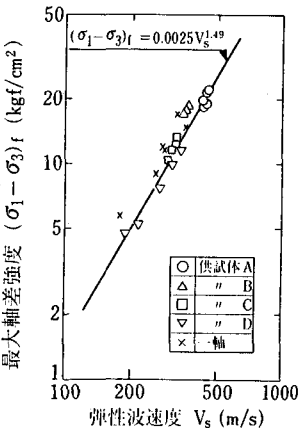


図-4 最大軸差強度と V_s の関係

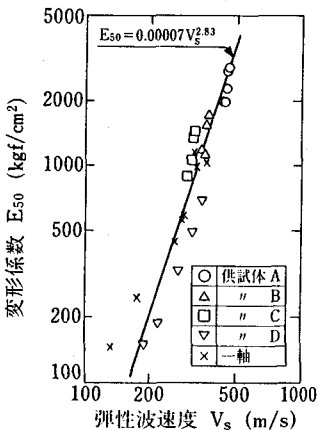


図-5 E_{50} と V_s の関係

泥岩に関する実験から定数 α_f は風化の進行に伴い低下するが β_f はほぼ一定である事を示している。しかしながら図にみられる通り、珪藻質軟岩では α_f のみならず β_f の値も劣化の進行に伴い変化する傾向が伺える。この

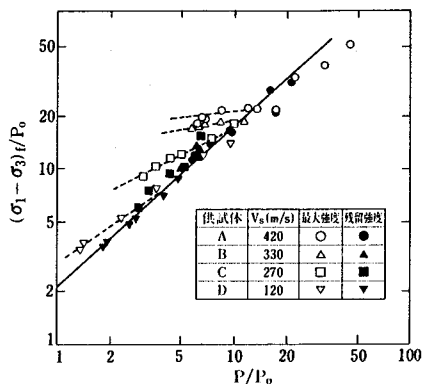


図-6 最大軸差強度・残留強度と平均有効応力の関係

様な供試体の劣化に伴う α_f 、 β_f の変化と V_s の関係を示したのが図-7である。但し、 V_s として一軸状態での値を用いている。図によれば、 α_f と V_s は正比例の関係が、一方 β_f と V_s の間には逆比例の関係が認められる。これらの関係式は図に示した通りである。この内特に、 $V_s = 0$ の時の β_f が β_r に、一方 α_f が0に等しい値をとる事が示されており興味深い。

3-3 圧密特性

図-8は、未風化及び風化軟岩に対し等方圧密試験により得られた間隙比 e と平均有効応力 P の関係を示したものである。図中で、矢印で示される点はそれぞれの供試体の圧密降伏応力 P_c を示しているが、この値は劣化の進行に伴って低下する傾向が伺われる。また、供試体の初期間隙比は劣化に伴い大きくなることも示されている。図をみると、圧密降伏応力以上の応力下での圧密特性には、ほぼ同一の傾向が認められる。この点に着目し、各供試体の圧縮指数 C_c と V_s の関係を示したものが図-9である。図中には除荷時の膨張指数 C_s の関係も示されている。図から、 C_c は $V_s = 120 \text{ m/s}$ の点で多少大きい値を示すもののその差は小さく、圧縮指数に対する供試体の劣化の影響は少ない事が示されている。また、除荷時の膨張特性は劣化の程度によらず、ほとんど一定である結果が得られた。

図-10は、図-8から得られた圧密降伏応力 P_c と V_s の関係を示している。この図から、両者の間には原点を通る直線関係が伺われる。風化に伴う P_c の低下は、新城ら⁹⁾も示しているが、図から V_s の測定により風化に伴う P_c の変化はある程度推測できるものと思われる。

3-4 圧密降伏応力と強度の関係

前川ら⁹⁾は、Roscoeらの提案したCam-Clayモデルの降伏関数を引用し、圧密排水三軸圧縮試験により得られる珪藻質軟岩の初期降伏特性への近似を行っている。Cam-Clayモデルの降伏関数は次

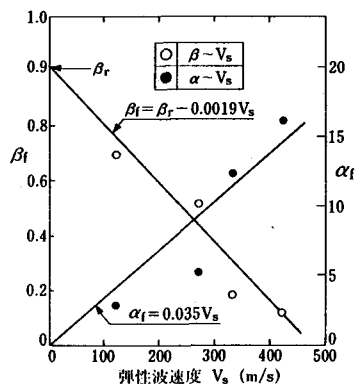


図-7 α_f 及び β_f と V_s の関係

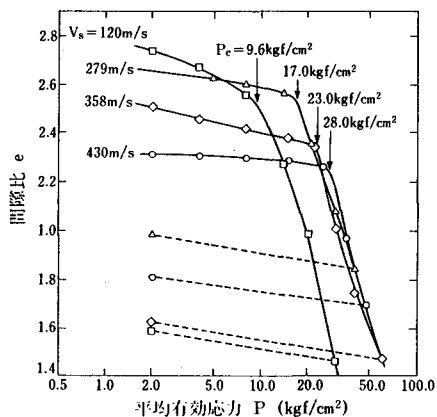


図-8 間隙比と平均有効応力の関係

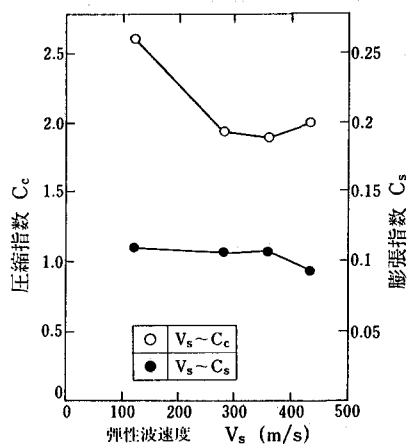


図-9 C_c 及び C_s と V_s の関係

の式で与えられる。

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{P} + M \ln \frac{P}{P_c} = 0 \quad \dots\dots (3)$$

ここに、Mは限界状態での $(\sigma_1 - \sigma_3) / P$ の値を示している。図-10中に示した P_c と V_s の関係から、各供試体A、B、C、Dの P_c を V_s から求めてみる。一方、残留強度時の軸差応力と平均有効応力の関係を直線的と仮定し、Mを求め $(=2.0)$ 、これらから求められる降伏関数と、実験により得られた過圧密領域での最大軸差強度を合わせて示したものが、図-11である。図をみると、多少のバラツキはあるが、式-(3)により、各劣化段階での最大軸差強度は、良く近似できるものと言える。有効応力に基づけば、残留強度は劣化の程度、方法によらず一義的に決定できることから、新鮮な軟岩に対するMを求め、また V_s から圧密降伏応力を推定することにより、有効応力に基づく過圧密領域での風化珪藻質軟岩の最大軸差強度に対する破壊規準、ひいては $(\sigma_1 - \sigma_3)$ とP座標上における降伏値が簡便に推定できる可能性が示されたものと言えよう。

4. 結 論

今回の実験により得られた結論を列記すると以下の通りである。

(1) 圧密非排水三軸圧縮試験により得られた珪藻質軟岩の最大軸差強度及び、変形係数 E_{s0} は、供試体の劣化方法にかかわらず、せん断弾性波速度 V_s と良い相関を示す。

(2) 最大軸差強度、残留強度はともに有効平均応力Pに対するべき関数として表示できる。この内、残留強度は劣化程度によらず一義的に決定されるが、一方最大軸差強度に対する係数 α_f, β_f は変化し、これらは各劣化段階での V_s から推定できる事が示された。

(3) 劣化の進行に伴い圧密降伏応力 P_c は低下する。この低下度合いと V_s のそれとの間には良い対応がみられた。

(4) 限界状態での強度定数Mと P_c から決定されるCam-Clayモデルによる降伏曲線により、有効応力に基づく未風化及び風化軟岩の過圧密領域での最大軸差強度の推定の可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 西、工藤、石黒、西；風化泥岩の動的変形特性、第21回土質工学研究発表会講演集(1986)
- 2) 西、石黒；風化軟岩における弾性波速度 V_s と強度-変形特性との関係、第41回土木学会学術講演集(1986)
- 3) 西、石黒、工藤；風化作用を受けた軟岩の動的変形特性、第19回岩盤力学に関するシンポジウム講演集(1987)
- 4) 足立、小川；堆積軟岩の力学特性と破壊規準、土木学会論文報告集第295号、
- 5) 吉中、山辺；軟岩の破壊規準に関する研究、埼玉大学建設系研究報告(1980)
- 6) 上田、中崎、山本；泥岩のスレーキングによる強度低下と切土斜面の安定、切土のり面及び斜面の風化と安定に関するシンポジウム講演集(1985)
- 7) 新城、小宮；泥岩の強度、変形特性に及ぼす乾湿の影響、第14回土木学会学術講演集(1986)
- 8) 小宮、新城；乾湿風化に伴う泥岩の力学特性の変化、切土のり面及び斜面の風化と安定に関するシンポジウム講演集(1985)
- 9) 前川、宮北；珪藻質軟岩の力学的特性、土木学会論文報告集、第334号(1983)

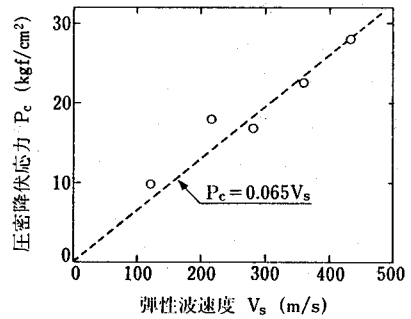


図-10 圧密降伏応力と V_s の関係

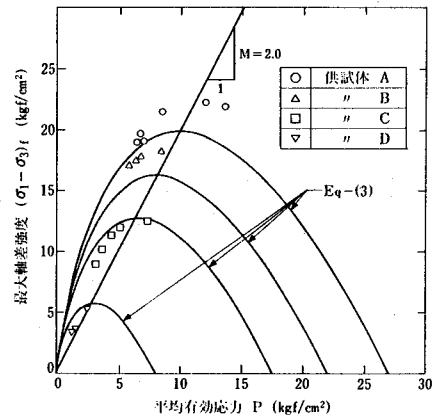


図-11 有効応力に基づく過圧密領域での最大強度と降伏曲線

(27) RELATIONS BETWEEN MECHANICAL PROPERTIES OF WEATHERED DIATOMACEOUS SOFT ROCK
AND ITS ELASTIC WAVE VELOCITY

by Koichi NISHI and Koji KUDO

Central Research Institute of Electric Power Industry
and Tsuyoshi NISHI
Construction Project Consultants

ABSTRACT

This research has been performed as the object to make clear strength-deformation properties of weathered soft rocks and in particular the correlations between some mechanical properties obtained under consolidated undrained condition by triaxial compression apparatus and shear wave velocity by ultrasonic wave tests have been investigated. Used material is diatomaceous soft rock deposited in Tertiary Period which is widely distributed in the Noto peninsula. The specimens with a variety of strength have been made by artificial weathering methods such as the repeat of drying-wetting and freezing-thawing.

Through this study, the following conclusions are obtained.

- 1) Maximum deviator strength and modulus of deformation have the good correlation with shear wave velocity despite of the method of weathering.
- 2) Relations between maximum deviator strength and effective mean stress P , residual strength and P are given by power function. In these relations, relations between residual strength and P are uniquely determined without depending on the extent of weathering. On the other hand, two coefficients involved in power function giving the relations between maximum deviator strength and P make a change with the progress of weathering. Also, it is shown that these coefficients may be estimated by shear wave velocity.
- 3) Consolidation yield stress P_c degrades with the progress of weathering and good correlations between P_c and shear wave velocity are shown.
- 4) It is suggested that the relations between maximum deviator strength and P at heavily over-consolidated states may be predicted by the yield function based on Cam-clay model which is given by strength parameter M at critical state and P_c .