

(95) 風化作用を受けた軟岩の動的変形特性

(財)電力中央研究所 正会員 西 好一
前田建設工業(株) 正会員 O石黒 健
(財)電力中央研究所 正会員 工藤 康二

1. 序 論

近年、長大斜面や切土のり面が風化作用を受けて脆弱化し、崩壊に至る事例の報告が数多く見うけられる。なかでも、崩壊事例の多い軟岩系統の材料は、風化に対する耐久性が特に低く、風化軟岩斜面の崩壊問題に対処するためには、その力学特性の解明が急務とされる¹⁾。さらに、このような風化岩層の崩壊が、強大な地震によって誘発される可能性は大きく、通常の静的安定性の検討と共に、動的な安定性を評価する事も必要不可欠であると考えられる。また動的安定性については、風化斜面の崩壊問題に限らず、風化岩盤層を基礎地盤とする各種構造物の地震時安定性の評価という設計面での必要性も無視できない。一方、動的安定性の評価に際しては、せん断弾性係数Gや減衰定数h等の動的変形パラメータに関する情報を用いた地震時応答解析が必要とされるにもかかわらず、風化軟岩を対象とした、動的物性に関する系統的研究は極めて少なく、その動的変形特性は、いまだ十分に解明されているとは言えない状況にある。本報は、このような問題意識に基づき、室内で人工的に作成した各種風化軟岩を用いて弾性波速度試験および振動三軸試験を行ったものであり、この結果より得られた、風化軟岩の動的変形特性に関する基礎的データについて報告する。

2. 供試体および実験方法

本研究で用いた供試体は、いずれも第三紀中新世の堆積軟岩であり、珪藻泥岩と呼ばれる珪藻質軟岩、大谷石と通称される多孔質凝灰岩、および、金谷石と通称される砂岩の三種類である。物理的性質を表1に示す。図1は実験のフローである。供試体は、ブロック状の試料からコアカッターにて円柱形に切り出し、直径5cm、高さ10cmに整形した比較的新鮮なもので、以下このような試料を未風化軟岩と称して使用する。一方、風化軟岩とは、これらに対し、炉乾燥湿潤、室内乾燥湿潤、自然気象による風化、凍結融解等、種々の人工的風化作用を加えたものであり、この後水浸し、サクシオンにて十分に脱気して完全飽和の状態状態で実験に供した。以上のプロセスを経た後、弾性波速度(せん断波速度Vs)の計測を行い、直ちに振動三軸試験を実施した。装置は、三軸セル内に高感度ロードセルと非接触型変位計を装備し、装置自体の摩擦の影響を除去することによって広範囲のひずみ領域に渡る動的変形試験が可能なもので、文献2)に詳述されている。さらに、供試体セット時には、高強度の石膏にてキャッピングし、端面の不陸の除去に努めた。一方、弾性波速度試験は、三軸セル内に弾性波検出用ピック(発振、受振ともに圧電セラミックスを使用)を装備した試験装置により、種々の拘束圧下における弾性波速度の計測を行ったものである。また、本報で用いた拘束圧は $\sigma_c' = 0.2 \sim 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ と、比較的小さな範囲内にとどめた。これは、実際に風化の生じうる範囲が深部までは及ばない事を想定し、土かぶりの小さな位置での拘束圧に対応づけたものである。

3. 実験結果および考察

地盤材料は通常、ランダムな入力に対し非線形な応答を示す。従って、地盤を対象とした地震時応答解析を行う際には、これを、せん断弾性係数Gと減衰定数hの2つのパ

表1 供試体の物理的性質

	珪藻質軟岩	凝灰岩	砂岩
間 隙 比 e	2.72	0.62	0.71
乾燥密度 $\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	0.60	1.40	1.57
湿潤密度 $\gamma(\text{g/cm}^3)$	1.32	1.78	1.98
含水比 w(%)	120.0	25.9	26.2
比 重 G_s	2.27	2.40	2.71
単位面積質量 (kg/m^2)	20	50	80

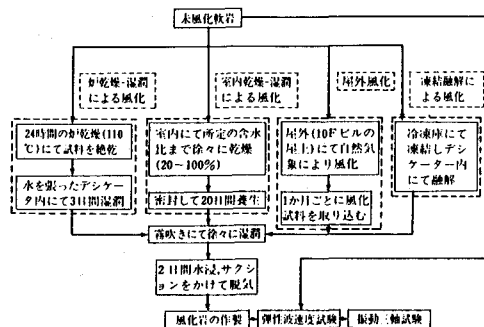


図1 実験のフロー

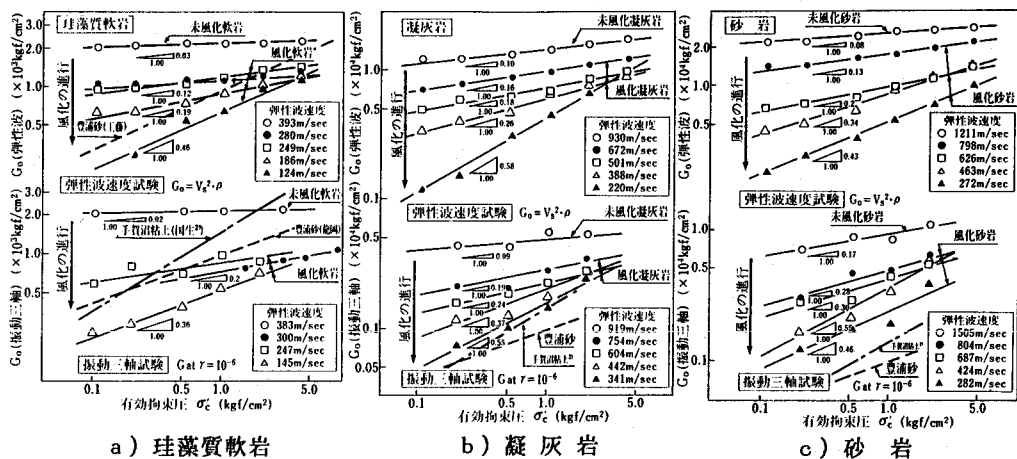


図2 微小ひずみ時のせん断弾性係数 G_0 s, G_0 tと拘束圧の関係

ラメータをもつ等価な線形物質におきかえて計算する等価線形化手法を用いる事が多い。この際必要とされる情報としては、弾性波速度 V_s より求まる微小ひずみ時のせん断弾性係数 G_0 、 G のひずみ依存性を表わす $G/G_0 \sim \gamma$ ひずみ振幅 γ 関係、および減衰定数 $h \sim \gamma$ ひずみ振幅 γ 関係の三者である。従って以下、各々についてのデータを示し、考察を加えるものとする。

1) 微小ひずみ時のせん断弾性係数 G_0

動的応答解析においては、通常、微小ひずみ時のせん断弾性係数 G_0 を、弾性波速度 V_s と密度 ρ より、 $G_0 = V_s^2 \times \rho$ にて算出する方法がとられ、この値が、振動三軸試験等における $\gamma = 10^{-6}$ 付近での G の値に対応すると言われている。図2 a)~c)は、各種の未風化・風化軟岩に対し、弾性波速度試験より得られた G_0 と拘束圧との関係を図の上に、振動三軸試験より得られた G_0 ($\gamma = 10^{-6}$)と拘束圧との関係を下にまとめたものである。岩種、および風化・未風化に限らず G_0 は拘束圧に対し両対数紙上でほぼ直線的に増加し、定性的には土質材料と同傾向を示す。しかし、定量的には、拘束圧に対する依存性は未風化軟岩では極めて小さく、風化の進行に伴って拘束圧依存性が次第に増大し、図中に併記した土質材料の値に接近していく傾向が明瞭に表われている。このような傾向は、軟岩の物性が、風化によって土質材料の物性へと近づいていくプロセスを表現するものとして興味深い。図3は、弾性波速度より算出した G_0 (以後 G_0 s) と、振動三軸試験より得られた G_0 (以後 G_0 t) とを比較したものである。 G_0 sと G_0 tを量的に比較すると、未風化珪藻質軟岩で G_0 s $\approx$ G_0 tとなっている以外は、一般に G_0 s $>$ G_0 tとなる場合が多く、特に凝灰岩や砂岩では、風化、未風化を問わず G_0 sは G_0 tの3~5倍と両者の差異は著しい。このような傾向は西ら³⁾の未風化軟岩に対する研究においてすでに指摘されており、その原因として、不均一性の高い供試体においては、両試験法の違いが強く反映される点が挙げられている。本結果は、この推定を裏付けるものであり、比較的均一な珪藻質軟岩では試験法の違いが顕著に現われず、不均一性の高い凝灰岩や砂岩ではその違いが明瞭に現われたものと考えられる。

2) せん断弾性係数 G のひずみ依存性

本節は、風化軟岩の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線について検討する。図4は、 $\sigma_c' = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ における、各種未風化、風化軟岩の $G/G_0 \sim \gamma$ カーブを示したものである。図中に併記した、Seed・Idriss等の、土質材料に関する従来のデータと比

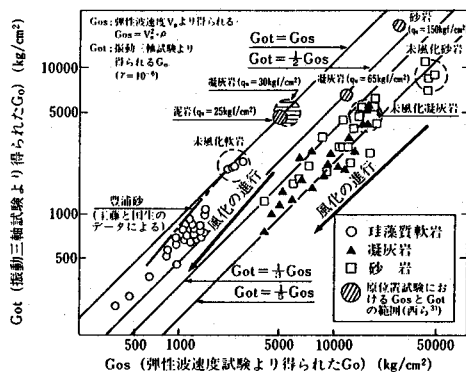


図3 G_0 sと G_0 tの相関性

較すると、特に未風化の凝灰岩や砂岩において、同一の γ に対する G の低下が著しく、非線形性が早く現われる点が特徴的である。一方、風化作用により弾性波速度が低下し、脆弱化が進むにつれて $G/G_0 \sim \gamma$ カーブは右方へ移動し、せん断ひずみに対する G の低減率が減って土質材料のカーブに近づく傾向を示す。また、珪藻質軟岩では、風化が進行すると、土質材料のカーブよりもさらに右方へ移動する傾向も見られる。さらに、 G のひずみ依存性は拘束圧にも依存しており、図5からは、風化軟岩の $G/G_0 \sim \gamma$ が、拘束圧の増大と共に右方へ移動し、非線形性の出方が遅くなるという、土質材料と同様の傾向が見られる。以上の結果より、風化軟岩の $G/G_0 \sim \gamma$ カーブは、拘束圧および風化度の両者に依存する事が判明したが、これらのカーブを、基準ひずみ γ_r ($G/G_0 = 0.5$ に対応するひずみの値)にて正規化し、 $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_r$ 曲線にまとめた結果が図6である。図より、軟岩の $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_r$ 曲線が、岩種、拘束圧および風化度等に依存せず、非常に狭い範囲内にプロットされることがわかる。さらに、図中に併記した土質材料に関するデータもまた、ほぼ同一のカーブを描くことから、広く、土質材料から軟岩および風化岩に至るひずみ依存カーブを、規準ひずみ γ_r のみを推定することにより統一的に評価し得るという結論を得た。さて、図7は、規準ひずみ γ_r を拘束圧に対してプロットした結果である。未風化・風化に限らず、軟岩の規準ひずみ γ_r は、拘束圧の増加に伴って、両対数紙上でほぼ直線的に増大しており、図中に示した豊浦砂のデータと、定性的には同一傾向を示す。一方、図に示された拘束圧の範囲内では、未風化軟岩の規準ひずみ γ_r は、珪藻質軟岩では豊浦砂に近い値を示し、凝灰岩、砂岩の順に高強度の軟岩になるほど、その値は小さくなる。また、その拘束圧依存性はいずれも豊浦砂よりやや大きい。これに対し、風化軟岩の規準ひずみ γ_r については、データの範囲が比較的狭いため、ハッチして示したが、全体的に未風化軟岩よりも γ_r の値が増加し、かつ拘束圧

依存性は豊浦砂と同程度にまで低下している事が判る。このような傾向もまた、軟岩の物性が、風化を受けることによって土質材料の物性へと変化していくプロセスを表現するものとして興味深い。

3) 減衰特性

本節では、未風化および風化軟岩の減衰定数 h について検討する。図8は、各種の未風化・風化軟岩の $h \sim \gamma$ 関係を、図7に示す規準ひずみ γ_r で正規化した h

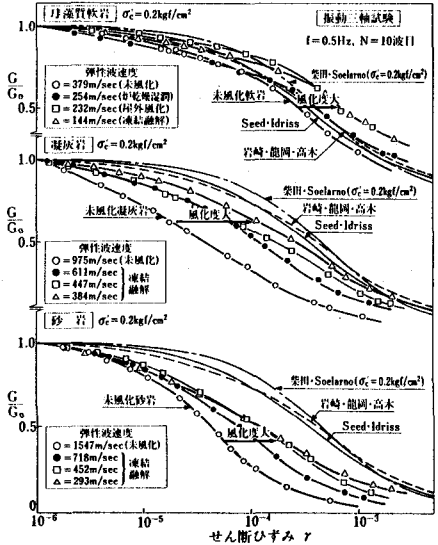


図4 $G/G_0 \sim \gamma$ に及ぼす風化度の影響

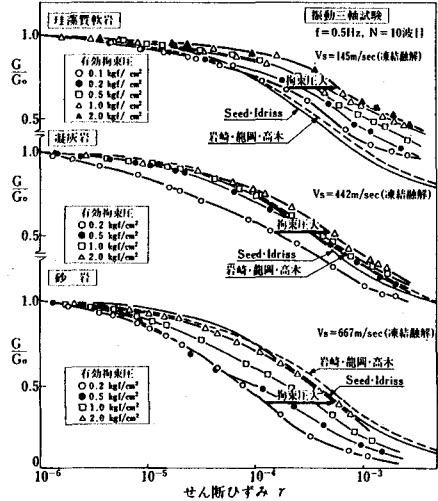


図5 $G/G_0 \sim \gamma$ に及ぼす拘束圧の影響

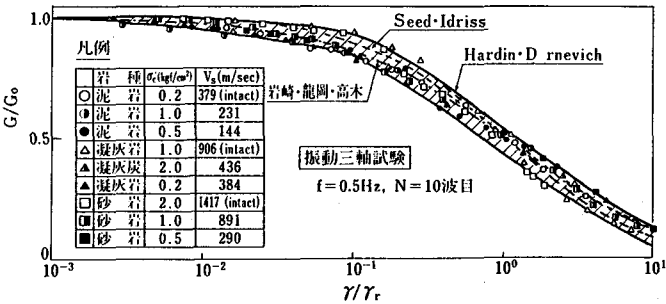


図6 各種未風化、風化軟岩の $G/G_0 \sim \gamma/\gamma_r$ 曲線

$\sim \gamma / \gamma_r$ にてとりまとめた結果である。軟岩における特徴的な減衰特性として、まず、微小ひずみ領域における減衰量が挙げられる。すなわち、軟岩材料は、豊浦砂等と異なり、 $\gamma = 10^{-5}$ 付近の微小ひずみ領域において既に数%の減衰を有し、その値は珪藻質軟岩で2~5%、凝灰岩で4~6%のデータ範囲を示す。これは、図中に併記した、西³⁾らが、各種未風化軟岩に対して得たデータ範囲 $h = 3 \sim 6\%$ によく対応している。この中で砂岩については傾向が異なり1~2%程度で、むしろ豊浦砂のデータに近い。一方、図中に示した粘土(手賀沼粘土)のデータは、微小ひずみ領域において3%程度の h を有しており、これは珪藻質軟岩の値に近いものである。ここで、珪藻質軟岩と粘土、および砂岩と砂とが類似した構造組織を有する事を考え併せると、このような関連性は、微小ひずみ領域における減衰特性を、材料の構造特性に対応づけて考え得るのではないかと期待を抱かせるものである。次に、 h のひずみ依存性に関

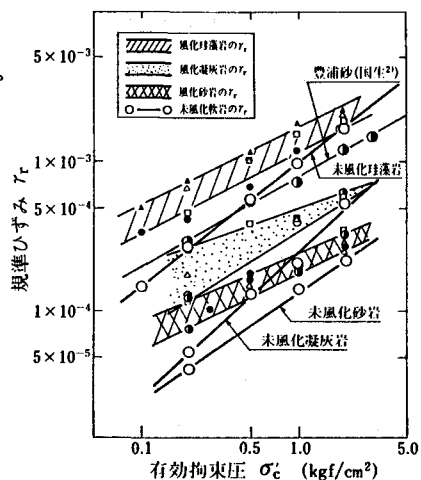


図7 規準ひずみ γ_r と拘束圧の関係

しては、風化作用の有無により明らかに様相が異なり、未風化軟岩では、あるひずみ領域まではほとんどひずみ依存性を示さず、急激に減衰が増加するsteepなカーブを示すのに対し、風化軟岩では、ひずみに対し、緩やかな h の増加が観察され、 h のひずみ依存性が認められる。また、風化軟岩の $h \sim \gamma / \gamma_r$ 曲線は、凝灰岩の $\sigma'_c = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$ のデータを除けば、いずれも、図中にハッチした比較的狭い範囲内にプロットされており、このような結果は、風化軟岩の $h \sim \gamma$ 関係を、規準ひずみ γ_r によって統一的に評価する可能性を示唆するものであると言えよう。

4. 結 論

本報にて得られた結論を以下に示す。1) 風化作用は微小ひずみ時のせん断弾性係数 G_0 を低下させ、かつ、その拘束圧依存性を増大させる効果をもつ。2) G_{os} と G_{ot} は必ずしも一致せず、特に凝灰岩や砂岩では顕著に異なる。また、両者の関係は風化による影響をあまり受けない。3) 風化軟岩の G のひずみ依存性は岩種、拘束圧、風化度により異なるが、規準ひずみ γ_r による正規化によって、土質材料も含めたユニークな関係が得られた。4) 風化作用は規準ひずみ γ_r を増加させ、かつその拘束圧依存性を低下させる。このような現象は、1) と共に軟岩の物性が、風化によって土質材料の物性へ近づくプロセスに対応するものと考えられる。5) 未風化および風化珪藻質軟岩・凝灰岩は微小ひずみ領域において数%の減衰を有す。一方、砂岩ではこれらに比べて小さく、豊浦砂と同程度の値を示す。6) 風化軟岩の $h \sim \gamma$ 関係を、規準ひずみ γ_r による正規化を施すことにより統一的に解釈する可能性が示された。

(参考文献) 1) 「切土のり面および斜面の風化と安定に関するシンポジウム」発表論文集 (1985) 2) 国生; 「土の動的変形特性と地盤の非線形震動応答」電研総合報告 (1982) 3) 西・江刺・国生; 「振動載荷時における軟岩の動的強度-変形特性」電研報告 (1985)

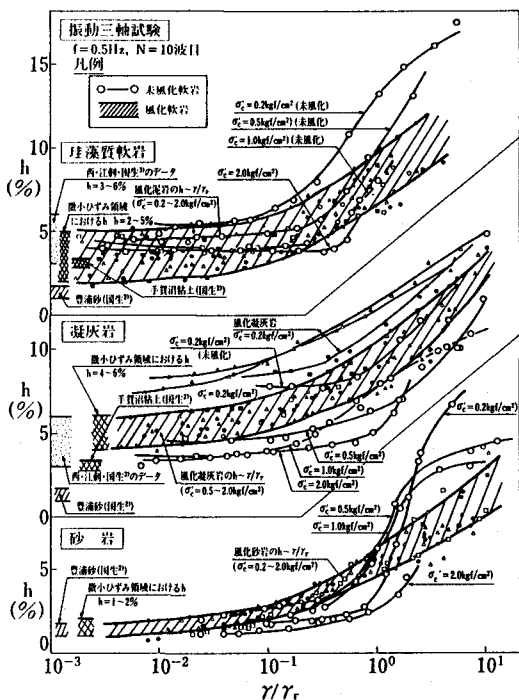


図8 各種未風化・風化軟岩の $h \sim \gamma / \gamma_r$ 曲線

図8 各種未風化・風化軟岩の $h \sim \gamma / \gamma_r$ 曲線。この図は、珪藻質軟岩、凝灰岩、砂岩のそれぞれについて、異なる拘束圧 (σ'_c) での試験結果を示している。珪藻質軟岩の上部には、西・江刺・国生のデータと、豊浦砂(国生²)のデータも示されている。各曲線は、規準ひずみ γ_r による正規化を施したものである。

(95) DYNAMIC DEFORMATION PROPERTIES OF WEATHERED SOFT ROCKS

by Koichi NISHI, Koji KUDO

Central Research Institute of Electric Power Industry
and Takeshi ISHIGURO

MAEDA Construction Engineering.

ABSTRACT

Recently there are many reports about the slope failure caused by weathering. Especially soft rock materials are easily weakened by weathering, so we must clarify the mechanical properties of weathered soft rocks for estimating the stability of slopes formed by weathered rocks.

Furthermore when a strong earthquake occurs, such slopes can easily be failed, so we must also remark the dynamic stability of weathered rocks together with the static stability. And it is also necessary for a design of structures built on a weathered soft rock layer.

When we estimate the dynamic stability of ground by response analysis using equivalent linear method, informations for dynamic deformation properties such as shear modulus G and damping ratio h are needed. On the other hand, there are few researches for such dynamic properties of weathered rocks.

So this study reports the results of elastic wave velocity (V_s) test and dynamic triaxial compression test for soft rocks weathered artificially, and shows some informations about dynamic deformation properties of weathered soft rocks.

The contents of this report are as follows.

1) Maximum shear modulus G_0 at very small strain

Test results for maximum shear modulus G_0 obtained by elastic wave velocity V_s and by dynamic triaxial test ($\gamma=10^{-6}$) are shown and compared.

2) Strain dependency of shear modulus G

The strain dependent curve $G/G_0 \sim \gamma$ for weathered soft rocks are shown and influence of weathering on $G/G_0 \sim \gamma$ curve is considered.

3) Damping characteristics

Test results for damping ratio h are shown, and influence of weathering on the damping characteristics of soft rocks is considered.