

粘土シームの岩盤の力学挙動に及ぼす影響に関する研究

EFFECT OF CLAYEY SEAM ON MECHANICAL BEHAVIOR OF ROCK MASS

足立紀尚*・八嶋 厚**・松蔭茂男***

By Toshihisa ADACHI, Atsushi YASHIMA and Shigeo MATSUKAGE

The mechanical behavior of saturated model rock mass with a clayey seam was investigated by conducting a series of undrained triaxial compression tests. In the tests, a rock mass was modeled by a specimen made by sandwiching an alluvial clay seam between two pieces of Ohya-stone (tuff). The effects of the thickness of clayey seam, the inclination of seam plane to the maximum principal stress direction, the shear strain rate, the confining pressure and the over-consolidation ratio on the mechanical behavior of rock mass were studied based on the effective stress concept. From the experimental results, even if the thickness of clayey seam was so thin, the shear strength of rock mass is found to be governed by that of the clayey seam.

1. 序 論

岩盤は岩石や岩塊が節理、層理等の地質分離面（不連続面）を境に接している集合体であり、岩盤の力学挙動を知るには不連続面の影響を把握する必要がある。岩盤に内在する不連続面の影響に関しては、これまで数多くの研究がなされている。著者らも軟岩を用いた実験を行うことによって、岩盤の強度は不連続面の特性により岩石の最大強度と残留強度の範囲内にあることなど^{1),2)}を明らかにしてきた。

ところで、不連続面には自然風化による軟化層、造山作用による断層破砕物あるいは斜面の初期すべりによって生成されたすべり粘土等の薄層（シーム）で充填されているものがある。このようなシームは岩盤の力学挙動に大きな影響を与え、岩盤強度の支配的要因となることが多い。

薄層の力学特性を把握する目的で行われたものとしては、Kutter・Rautenberg³⁾の研究がある。彼らは、砂、

粘土および砂と粘土の混合物を砂岩の間に挟んだ供試体を作成し、室内排水直接せん断試験を行い、その残留強度について詳しく調べた。その結果、シームの厚さが厚いほど、せん断強度は低下して、その下限値はシーム材料自体の強度となることを結論づけている。この研究は排水条件下で行われているものの、せん断速度によってはシーム内に間隙水圧が残留するため、必ずしも結果を有効応力で統一的に解釈できない。

本研究は、あらかじめ切断面を与えた軟岩（大谷石）に沖積粘土を挟んだ人工的な粘土シームをもつ供試体で、粘土シームを有する岩盤をモデル化し、有効応力で検討できるよう間隙水圧の測定を伴う非排水三軸圧縮試験を行った。そして、粘土シームの厚さ、主応力面とシーム面との成す角度、せん断速度、拘束圧およびシーム粘土の過圧密比が岩盤の力学挙動に及ぼす影響を実験的に考察した。

2. 実験試料および実験方法

実験試料として、岩石試料には従来の研究^{1),4)-6)}によって特性が明らかにされている第三紀堆積の凝灰岩（大谷石）を、粘土シームには大阪南港の不攪乱沖積粘土を用いた。これらの物理諸量を Table 1 に示してある。なお供試体作成時の沖積粘土の含水比は 53～63 % で

* 正会員 Ph.D. 京都大学教授 工学部交通土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

** 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所 (〒611 宇治市五ヶ庄)

*** 正会員 中国電力(株) 土木部 (〒730 広島市中区小町 4-33)

あった。

供試体はあらかじめ切断面を与えた直径 5 cm, 高さ 10 cm の円柱形大谷石に所定の厚さにスライスした沖積粘土を挟んで円柱形に整形したものである。大谷石の切断にはダイヤモンドカッターを用い、切断面と軸荷重作用面とのなす角度（以後切断角とよぶ）を 45°, 60° の 2 種類とした。沖積粘土はワイヤソーを用いて、5, 3, 1 mm の厚さにスライスしたが、その精度はそれぞれ、 5.2 ± 0.1 mm, 3.2 ± 0.1 mm, 1.2 ± 0.1 mm 程度であった。粘土シームの厚さがきわめて薄い供試体は繰り返した沖積粘土を大谷石切断面にへらで塗りつけて準備した。

実験装置は Fig. 1 に示すとおりである。三軸セルは側圧容量 30 kgf/cm^2 のアクリル製で、 10 kgf/cm^2 以下の側圧およびバックプレッシャーは空気圧を水圧に変換して与え、 10 kgf/cm^2 以上の側圧は油圧を水圧に変換して与えた。また、載荷軸下端に直径 7.5 cm の剛な円板を取り付けるとともにキャップ上面にボールベアリングを配

置し、試験過程で粘土シームに沿うすべり変形が増大しても軸荷重の偏心による上部大谷石の回転が生じない機構となっている。

圧密、せん断過程で生じる粘土シーム内の間隙水圧は下部供試体の中心に直径 3 mm の孔をあけ、シガレットフィルターを充填したナイロンチューブを差し込んで粘土シームとペダスタル間を連結することで測定した。なお、間隙水圧の測定径路は圧密時の排水径路と分離されている。試験中、軸荷重はロードセルで、間隙水圧は間隙水圧計で、また軸変位量はダイヤルゲージでそれぞれ計測した。

行った実験の種類は Table 2 に示すとおりである。す

Table 1 Material parameters.

(a) Ohya-stone			
void ratio	e	0.72	
porosity	n	42.0%	
wet density	γ_t	1.86 g/cm^3	3
dry density	γ_d	1.44 g/cm^3	3
specific gravity	G_s	2.48	
(b) Alluvial clay			
fraction of silt		37%	
fraction of clay		63%	
liquid limit	L.L.	100.5%	
plastic limit	P.L.	37.2%	
plasticity index	P.I.	63.3%	
specific gravity	G_s	2.67	

Table 2 Test conditions ($1 \text{ kgf/cm}^2 = 98 \text{ kPa}$).

displacement rate \dot{s} (mm/min.)	degree of pre-cut plane α (deg.)	thickness of clayey seam t (mm)	confining press. $P_0, 2$ (kgf/cm^2)	OCR
0.95	60	5	1, 3, 10, 20	1
0.095	60	5	1, 2, 3, 5, 10, 20	1
		3	1, 3, 10, 20	1
		1	1, 3, 10, 20	1
		very thin	1, 3, 10, 20	1
		non	1, 2, 3, 5, 10, 20	1
0.095	45	5	1, 2, 3, 5, 10, 20	1
0.095	60	5	0.5 2	1, 5, 10 2, 5, 10
0.0099	60	5	10	1
0.0014	60	5	10	1
0.095	(alluvial clay)		1 → 5 → 10 → 20 (multiple stage triaxial test)	1

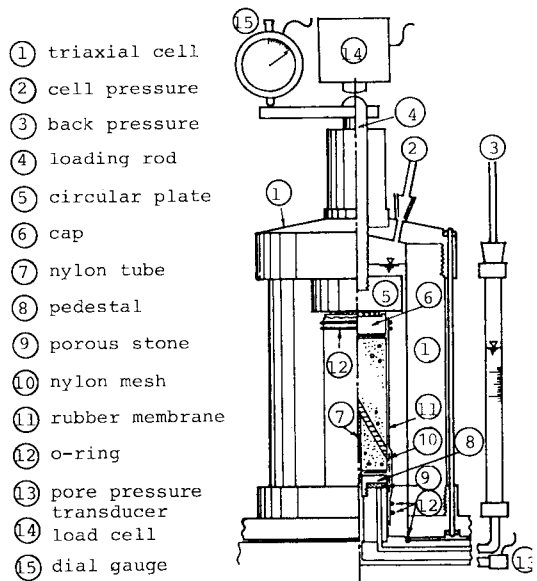


Fig. 1 Triaxial testing apparatus.

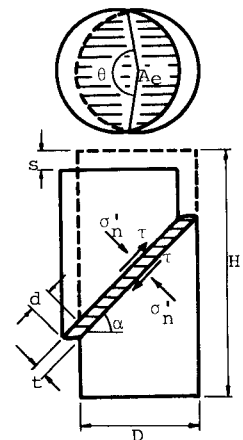


Fig. 2 Effective cross section of specimen.

なわち、粘土シームの厚さを $t=5, 3, 1$ mm および極薄 (0.1 mm 以下) の 4 種、大谷石の切断角を $\alpha=45^\circ$, 60° の 2 種、軸変位速度 (以後せん断速度とよぶ) を $\dot{s}=0.95, 0.095, 0.0099, 0.0014$ mm/min. (同一寸法供試体の軸ひずみ速度に換算するとそれぞれ $\dot{\epsilon}=1, 0.1, 0.01, 0.001$ %/min. に対応) の 4 種、初期有効側圧を 1, 2, 3, 5, 10, 20 kgf/cm² (以後 CU-... と表わす) の 6 種を実験パラメーターとした。CU-1 を除いてシーム粘土は正規圧密状態であったが、シーム粘土が過圧密状態にある場合を想定して $t=5$ mm の CU-0.5, 2 においてシーム粘土の過圧密比を 2, 5, 10 と変化させた実験も行った。さらに比較のため、粘土シームをもたず岩と岩が切断面で直接接しているものの非排水三軸圧縮試験およびシーム粘土そのものを用いた多段階非排水三軸圧縮試験も行った。なお、実験に供した供試体の本数は Table 2 に示すいずれの場合とも各 1 本である。

変位特性を議論するうえで、ひずみという力学量は欠くことのできないものである。しかし、本供試体は軟岩と粘土が互層をなすモデルであり、要素とは考えられないから、軸変位からひずみをいかに見積もるかが問題である。本実験においては、いずれも粘土シームに沿うすべり破壊となったので、すべり面に沿うせん断変位をもって変形特性を考察することにした。軸変位はシーム粘土の圧縮変形およびその絞り出しによるシーム層の減少とすべり面に沿うせん断変位の和として測定されると考えられる。柴田・星野⁷⁾は粘土の三軸スライスせん断試験において、圧縮変形と絞り出しが生ずることを確認しているが、同時にそれは無視できる程度の量であると述べている。本研究においても、これらによる層厚の減少を無視し、軸変位 s はせん断変位 d のみよるとして整理した (Fig. 2)。また応力はすべり面における有効垂直応力 σ'_n とせん断応力 τ で整理した。供試体の断面補正には堀⁸⁾の方法を用い、有効断面積 A_e は Fig. 2 に示す幾何学的関係から次式により算定した。

$$A_e = D^2/4 \times (\theta - \sin \theta)$$

ここに

$$\theta = 2\cos^{-1}(s/D \tan \alpha)$$

せん断変位が大きくなると、測定される軸荷重にはゴム膜のせん断抵抗が付加される。このゴム膜のせん断抵抗の補正に関してはいくつかの研究^{8), 9)}があるものの、いずれもすべり面に沿う方向の抵抗のみを考慮しているだけで、すべり面に直交する方向に働くゴム膜の緊張力、すなわち σ'_n の増分を考えていない。したがって、本研究ではせん断変位が大きくなってゴム膜の緊張力が無視できない値となる $d > 10$ mm の範囲については、考察の対象としないことにした。

3. 実験結果と考察

実験におけるパラメーターは、前述のように粘土シームの厚さ、切断面と主応力面の成す角度、せん断速度および粘土シームの過圧密比である。以下順次それぞれの影響について考察することにする。

(1) 粘土シームの厚さの影響

Fig. 3 は粘土シームの厚さの影響を $\tau \sim \sigma'_n$ 平面での有効応力径路について比較したものである。厚さ $t=1, 3, 5$ mm の場合は正規圧密粘土の非排水有効応力径路に、極薄の場合は大谷石のみの場合の応力径路に類似であり、シームの厚さによって発生する間隙水圧、すなわち、せん断特性に差異のあることがわかる。Fig. 4 は間隙水圧とせん断変位との関係を示している。この図から、シームが薄いほど生じる間隙水圧は小さい値となることが認められる。Fig. 5 は粘土シームをもたない切断角 60° の不連続面のみをもつ大谷石とシーム材に用いた沖積粘土供試体の軸差応力の増加に伴う間隙水圧の発生過程を初期側圧 P_0 で規準化して表わしたものである。すなわち、本研究に用いた供試体は大谷石と粘土の互層体であるから、せん断過程に生じる間隙水圧は粘土シーム内で大きく、大谷石内で小さな不等分布となり、非排水試験といえども供試体内部でシームから岩への水の移動が生じていると考えられる。したがって、シーム厚が薄いほど排水距離が短く、岩部への排水が速いため発生する間隙水圧は当然小さな値となる。

次に、破壊時の応力比 $(\tau/\sigma'_n)_{max}$ に及ぼすシーム厚の影響を検討する。Fig. 6 は応力比が最大となる時 (応力比が明確なピークを示さない場合は有効応力径路における折れ曲がり点) のせん断応力 τ と有効垂直応力 σ'_n の関係を示したものである。なお、図中の一点鎖線は粘土シームをもたない岩と岩が直接接触している場合の摩擦強度を、実線はシーム粘土自体のせん断強度をそれぞれ

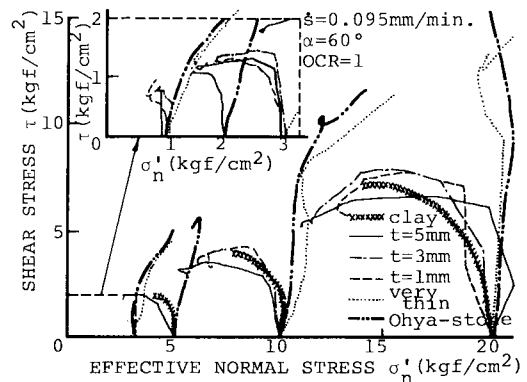


Fig. 3 Effective stress paths (effect of the thickness of clayey seam). (1 kgf/cm²=98 kPa)

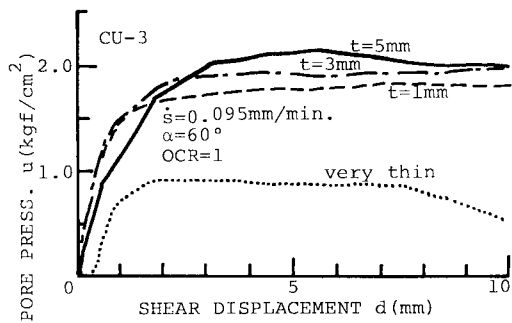


Fig. 4 Relationships of pore water pressure and shear displacement. (1 kgf/cm²=98 kPa)

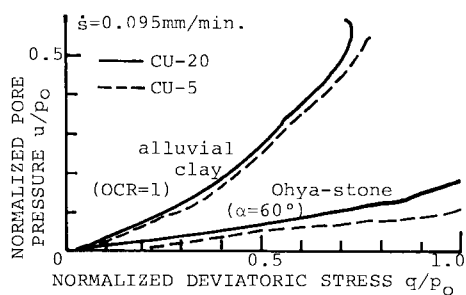


Fig. 5 Pore water pressure vs. deviatoric stress of Ohya-stone and alluvial clay.

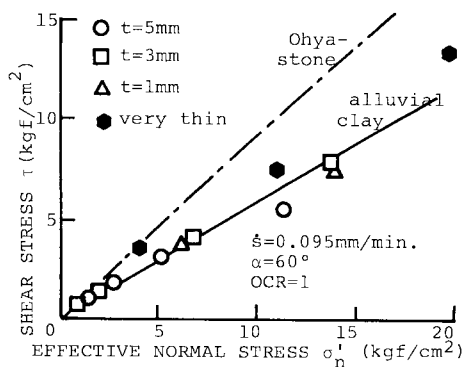


Fig. 6 Failure conditions (effect of the thickness of clayey seam). (1 kgf/cm²=98 kPa)

れ示している。Fig. 6で明らかなように、シーム厚さ $t = 1, 3, 5$ mm では強度の間に顕著な差がみられず、岩の摩擦強度から大きく低下し、シーム粘土自体のせん断強度とほぼ等しい値を示す。一方、極薄の場合には、低拘束圧下で岩の摩擦強度、高拘束圧下で粘土の強度に近い、両者の中間的強度を呈している。すなわち、強度は粘土シームの厚さが1 mm 以上では差がなくシーム粘土の強度に等しく、厚さが1 mm 以下のある厚さで強度特性の変化する境界があるものと考えられる。

(2) 切断面の角度の影響

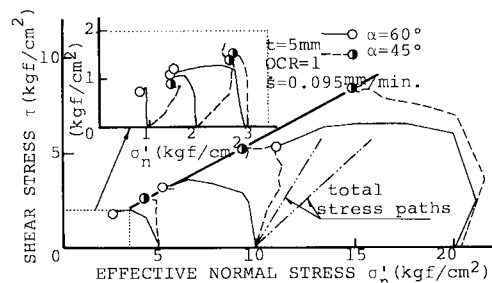


Fig. 7 Effective stress paths (effect of the degree of pre-cut plane). (1 kgf/cm²=98 kPa)

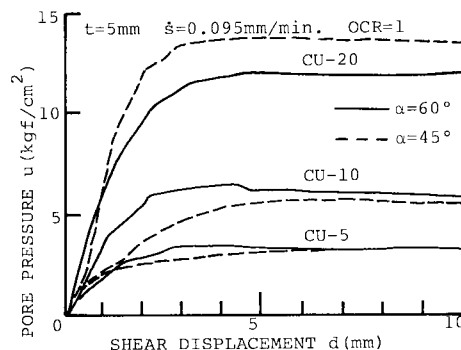


Fig. 8 Relationships of pore water pressure and shear displacement. (1 kgf/cm²=98 kPa)

Fig. 7はせん断速度0.095 mm/min., 粘土シームの厚さ5 mm の場合で、切断面の角度が60°と45°の有効応力径路の相違を示したものであって、図中の丸印は応力比 (τ/σ'_n) が最大となる点を表わしている。これより、破壊時の応力比には切断面の角度の相違による有意な差は認められない。

また、間隙水圧は全応力径路からの横距で与えられるが、この過程の変化を Fig. 8 に示してある。ある程度のばらつきはあるが、切断面の角度の違いによる差異は認められない。

(3) せん断速度の影響

切断面の角度60°で、粘土シームの厚さが5 mm の場合のせん断速度の異なる有効応力径路を Fig. 9 に示している。図において、破壊時の応力比 (τ/σ'_n) にはせん断速度は有意の影響を及ぼさないことが明らかである。

より詳しくせん断速度の影響を調べるために、ほぼ4オーダーのせん断速度の範囲で実験を行った。

Fig. 10 は間隙水圧とせん断変位の関係であって、速度が遅くなると $(s \leq 0.0099)$, 粘土シームから岩質部への排水によって発生間隙水圧の値は小さくなる。

Fig. 11 は応力比 (τ/σ'_n) とせん断変位との関係を示すが、せん断速度の違いにより、破壊時の応力比に有意の差がないことは先に述べたとおりである。これは

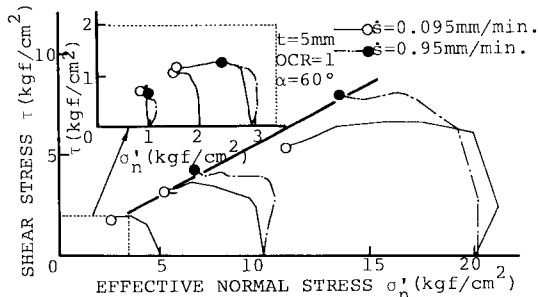


Fig. 9 Effective stress paths (effect of shearing strain rate). (1 kgf/cm²=98 kPa)

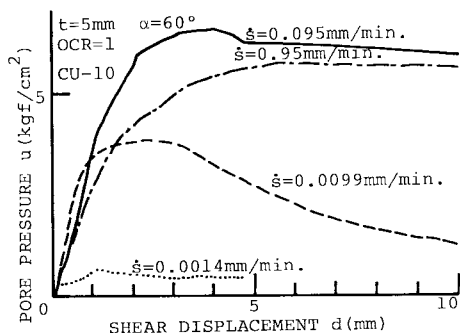


Fig. 10 Relationships of pore water pressure and shear displacement. (1 kgf/cm²=98 kPa)

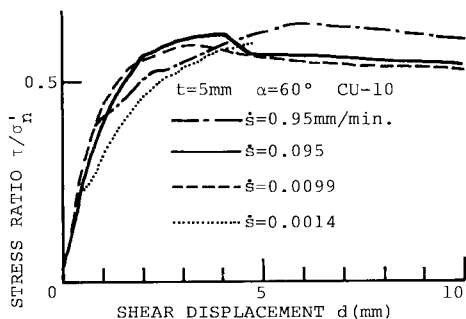


Fig. 11 Relationships of stress ratio and shear displacement.

Fig. 12 に与えた有効応力経路においても明らかであり、4 オーダーのせん断速度の範囲においても破壊時の (τ/σ'_n) -線は何ら変わらないことがわかる。

(4) 粘土シームの過圧密比の影響

シーム粘土は、必ずしも正規圧密状態にはない。そこで側圧 2 kgf/cm² で過圧密比 OCR=1, 2, 5, 10 に対して実験を行った。Fig. 13 には有効応力経路を、Fig. 14 には間隙水圧とせん断変位、Fig. 15 には応力比とせん断変位の関係をそれぞれ与えている。

Fig. 13 の図中の丸印は応力比が最大となる点であって、いずれの過圧密比においてもほぼ同一の応力比線上にあることがわかる。また、間隙水圧の発生量は、粘土

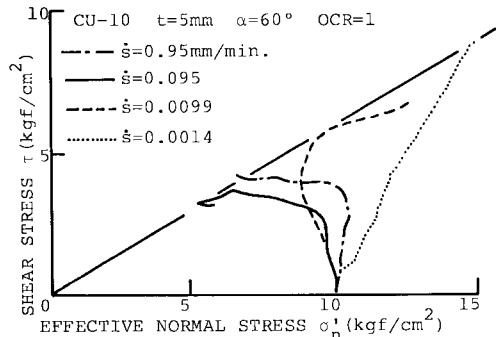


Fig. 12 Effective stress paths (effect of shearing strain rate). (1 kgf/cm²=98 kPa)

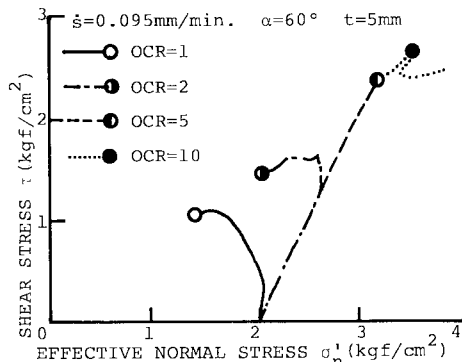


Fig. 13 Effective stress paths (effect of the over-consolidation ratio). (1 kgf/cm²=98 kPa)

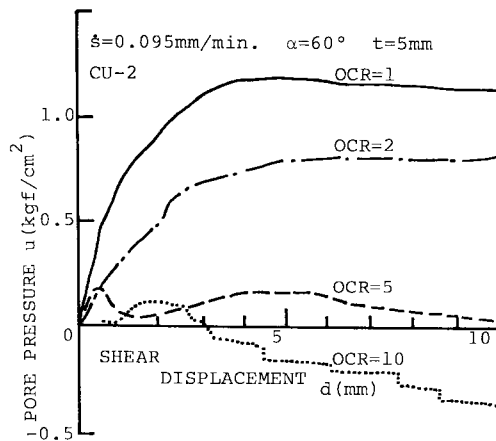


Fig. 14 Relationships of pore water pressure and shear displacement. (1 kgf/cm²=98 kPa)

シームの過圧密比が大きいかほど小さく、OCR=10 では負圧となり、過圧密粘土のダイレイタンシー特性そのものが反映していると考えられる。

Fig. 15 において、正規圧密 (OCR=1) の場合、応力比は最大値に達した後もほぼその値に停留しているが、過圧密の場合最大強度に達した後応力比は減少して

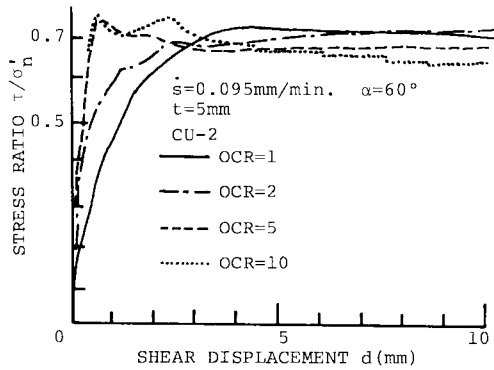


Fig. 15 Relationships of stress ratio and shear displacement.

残留強度状態に至る傾向を示している。また、初期の立上がり勾配からみて、過圧密比の大きいほどその勾配は大きく剛性は大きいことは明らかである。

4. 結 論

不連続面に粘土シームをもつ岩盤の力学特性に関する基礎資料を求めため、モデル化した供試体を用いた非排水三軸圧縮試験を行い、粘土シームの厚さ、主応力作用面と弱面の成す角度、せん断速度および粘土シームの過圧密比のその力学特性に及ぼす影響について考察した。その結果得られた知見をまとめると以下のようである。

(1) 岩盤が不連続面に粘土シームをもつとき、その面に沿うせん断強度はシームの厚さがわずか1mmであっても、シーム粘土のせん断強度に支配される。

(2) シーム面に沿うせん断強度は発生する間隙水圧によって変化するが、間隙水圧は同一拘束圧下であっても粘土シームの厚さが厚いほど(粘土シームから岩質部への透水性が低いほど)、粘土シームが正規圧密状態に近いほど大きく、したがってそのときのせん断強度は小さな値となる。このように、岩質部と粘土シームの間の水のやりとりという意味での寸法効果がある。

(3) 破壊時の最大応力比 (τ/σ'_v) は粘土シームの

厚さ(1mm以上)、シーム面の主応力面と成す角度、せん断速度にかかわらず一定値となる。

(4) 完全なすべり破壊となる以前の粘土シームのせん断変位、すなわち粘土シームを挟む岩と岩の相対変位は粘土シームが厚いほど、またシーム粘土が正規圧密に近いほど大きくなり、したがって変形剛性は小さくなる。

上記のことから、不連続面に粘土シームをもつ岩盤の力学挙動を予測するには、シーム粘土のせん断特性と透水性に加え岩石および岩盤の透水性を把握する必要がある。また、シーム粘土の力学特性は不攪乱試料の採取が困難な場合には試料を練り返し、再成試料について実験することである程度の推定は可能であろう。

参 考 文 献

- 1) 足立紀尚・林 正之：軟岩の力学特性に及ぼす不連続面の影響，土木学会論文報告集，No. 305，pp. 97～110，1981。
- 2) 足立紀尚・森田栄治：不連続面を有する軟岩の力学挙動と破壊規準，土木学会論文報告集，No. 320，pp. 99～111，1982。
- 3) Kutter, H.K. and Rautenberg, A.: The residual strength of filled joints in rock, Proc. Int. Cong. Rock Mech., Montreux, Vol. 1, pp. 221～227, 1979.
- 4) 赤井浩一・足立紀尚・西 好一：堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の弾塑性挙動，土木学会論文報告集，No. 271，pp. 83～95，1978。
- 5) 赤井浩一・足立紀尚・西 好一：堆積軟岩(多孔質凝灰岩)の時間依存性と構成式，土木学会論文報告集，No. 282，pp. 75～87，1979。
- 6) 足立紀尚・小川豊和：堆積軟岩の力学特性と破壊規準，土木学会論文報告集，No. 295，pp. 51～63，1980。
- 7) 柴田 徹・星野 満：粘土の三軸スライスせん断試験について，土と基礎，第119号，pp. 3～9，1968。
- 8) 堀 正幸：三軸試験結果に及ぼす面積及びメンブレン補正について，土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集，III-15，1978。
- 9) Chadler, R.J.: The measurement of residual strength in triaxial compression, Géotechnique, Vol. 16, pp. 181～186, 1966.

(1984. 10. 16・受付)