

粘土シームを弱面にもつ岩盤の力学挙動 に関する実験的研究

足立 紀尚・八嶋 厚・松蔭 茂男

EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANICAL BEHAVIOR OF ROCK MASS WITH CLAYEY SEAM

By Toshihisa ADACHI, Atsushi YASHIMA and Shigeo MATSUKAGE

Synopsis

The mechanical behavior of a rock mass with clayey seams was investigated by conducting a series of 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. From the experimental results, it has been found that even if the thickness of the clayey seam is so thin, the shear strength of a rock mass is almost governed by that of the clayey seam.

1. は じ め に

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って、岩盤の力学挙動を知るには、この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、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等^{1),2)}が明らかにされてきた。

しかし、この不連続面間には、自然風化による軟化層、造山作用による断層破砕物、或いは斜面等の初期すべりによって生成されたすべり層等の弱層（シーム）が充填されている場合がある。このような弱層は、岩盤の力学挙動に大きく影響し、岩盤強度の支配的要因となることもある。その力学特性を把握する目的で行われた研究に、Kutter & Rautenberg³⁾の研究がある。彼らは、砂、粘土および砂・粘土混合物を砂岩の間にはさんだ供試体を作成し、室内における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ている。その結果、弱層の厚さが厚い程、岩面がなめらかである程せん断強度は低下し、その下限値は弱層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が、そのせん断速度からシーム内に間隙水圧が蓄積するため、必ずしも有効応力で結果を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に沖積粘土をはさんだ、人工的な粘土シームをもつ供試体によって粘土シームを有する岩盤をモデル化し、間隙水圧を測定し、有効応力で結果を考察できるよう、非排水三軸圧縮試験を行うことによって、粘土シームの厚さ、主応力面とシーム面とのなす角度、せん断速度、拘束圧およびシーム粘土の過圧密比の影響を、実験的に考察したものである。

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^{4)~6)}によって特性が明らかな第三紀堆積岩の多孔質凝灰岩である通称大谷石を、粘土シームには大阪南港からシンウォールサンプラーで採取した不攪乱沖積粘土をそれぞれ用いた。これらの物理諸量をそれぞれ **Table 1** に示すが、供試体作成時の沖積粘土の含水比は53~63%

Table 1 Material parameters for samples

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

- ① triaxial cell
- ② cell pressure
- ③ back pressure
- ④ loading rod
- ⑤ rigid circular plate
- ⑥ cap
- ⑦ nylon tube
- ⑧ pedestal
- ⑨ porous stone
- ⑩ nylon mesh
- ⑪ rubber membrane
- ⑫ O-ring
- ⑬ pore pressure
- ⑭ load cell
- ⑮ dial gauge

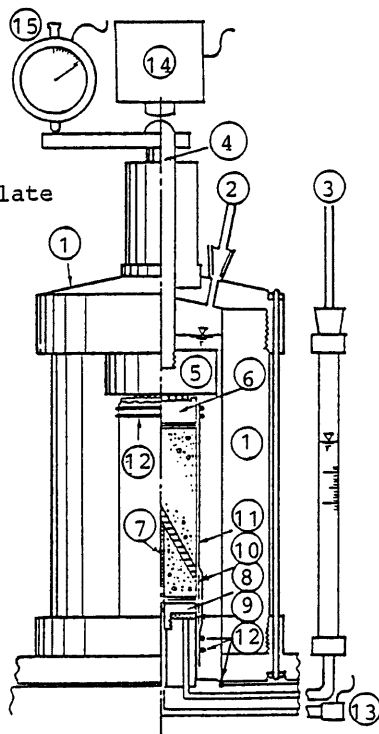


Fig. 1 Sketch of triaxial compression testing apparatus

であった。

供試体は、あらかじめ切断面を与えた直径 5 cm, 高さ 10 cm の円柱大谷石に所定の厚さにスライスした沖積粘土をはさ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、その切断面と軸荷重作用面となす角度（以後切断角という）を 60°, 45° 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, $1.2 \pm$

0.1 mm 程度であった。また粘土シームの厚さが極めて薄い場合の供試体も作成したが、これは繰り返した沖積粘土を大谷石切断面にへらで塗り付けたものである。

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 のアクリル製であり、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るものであるが、側圧が 10 kgf/cm^2 以上の場合、油圧を水圧に変換して側圧を与える。また载荷軸下端に直径 7.5 cm の剛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し、試験中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を生じない構造となっている。なお、せん断に伴って発生する粘土シーム内の間隙水圧を測定するため、下部大谷石の底面中央部から直径 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した。この間隙水圧の測定経路は、圧密時の排水経路すなわちバックプレッシャー径路と分離されている。試験中、軸荷重は载荷軸を介してロードセルに伝え、間隙水圧は Fig. 1 内に示す間隙水圧計、軸変位は载荷軸に固定したアームにダイヤルゲージをセットし、各々電気的信号に変えて測定する。

実験ケースは Table 2 に示すとおりであり、粘土シームの厚さを $t=5, 3, 1 \text{ mm}$ および極薄の 4 種類、大谷石の切断角を $\alpha=60^\circ, 45^\circ$ の 2 種類、軸変位速度（以後せん断速度という）を $\dot{\epsilon}=0.95, 0.095, 0.0099, 0.0014 \text{ mm/min.}$ （同す供試体の軸ひずみ速度に換算するとそれぞれ $\dot{\epsilon}_1=1, 0.1, 0.01, 0.001\%$ /min.）の 4 種類、有効拘束圧を $1, 2, 3, 5, 10, 20 \text{ kgf/cm}^2$ （以後 CU-…の形式で表現する）の 6 種類変化させた。上記ケースは、CU-1 を除いてシーム粘土を正規圧密状態としたが、土かぶりが浅く、シーム粘土が過圧密状態にある場合を想定し、 $t=5 \text{ mm}$ の CU-0.5, 2 において、シーム粘土の過圧密比を $\text{OCR}=2, 5, 10$ と変化させた実験も行った。また、比較のため、粘土シームをもたず岩と岩が人工切断面で接している場合の非排水三軸圧縮試験およびシーム粘土そのものの多段階非排水三軸圧縮試験を行った。なお、実験した供試体の本数は、Table 2 に示すいずれのケースとも 1 本である。

変形特性を議論する上で、ひずみという力学量は欠くことのできないものであるが、本供試体は軟岩と粘土が互層をなした地盤モデルであって要素供試体でないため、得られる軸変位からひずみをいかに見積るかが問題となる。本実験においては、いずれの供試体も粘土シームに沿うすべり破壊となったが、この点に着目して、すべり面に沿うせん断変位をもって変形特性を考えることにした。軸変位は、シーム粘土の弾性変形およびその絞り出しに原因するシーム厚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ことが想

Table 2 Details of testing conditions

displacement rate $\dot{\epsilon}$ (mm/min.)	degree of cutting plate α (deg.)	thickness of clayey seam t (mm)	confining press. P_0 (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	1, 5, 10
			2	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

像される。柴田・星野⁷⁾は粘土の三軸スライスせん断試験において、前者すなわち側方膨張の存在を確認し、同時にそれは無視できる程度の量であると述べている。本実験においてもこの層厚減少を無視し、あえて軸変位 s はせん断変位 d のみに起因するとして整理した (Fig. 2)。また応力も同様に、すべり面におけるせん断応力 τ および有効垂直応力 σ'_n として整理した。断面補正については堀⁸⁾の方法を用い、Fig. 2 に示す幾何学的関係から、有効断面積 A_e を次式により算定した。

$$A_e = -\frac{D^2}{4}(\theta - \sin \theta)$$

ここに、

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

さらにせん断変位が進むと、測定される軸荷重にはゴム膜のせん断抵抗も含められると考えられる。このゴム膜のせん断抵抗の補正に関する研究はいくつかあるものの⁹⁾、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 の増加を考えていない。したがって、本研究ではせん断変位が大きくなり、ゴム膜の緊張力が有意な値を示す領域については考慮せず、せん断変位 d が 10 mm までの範囲の挙動のみを考察の対象とした。

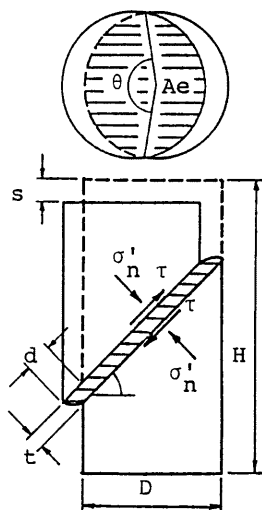


Fig. 2 Calculation of effective cross section of specimen

3. 実験結果と考察

実験において変化させたパラメータは、粘土シームの厚さ、切断角、せん断速度および粘土シームの過圧密比であるが、各パラメータごとにその影響を考察する。

3.1 粘土シームの厚さの影響

Fig. 3 は、 $\tau \sim \sigma'_n$ 平面における有効応力径路について粘土シームの厚さの影響を比較したものであるが、 $t=1, 3, 5$ 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自身の応力径路にそれぞれ類似しており、シーム厚によって発生する間隙水圧に差異のあることがうかがえる。Fig. 4 はこの間隙水圧に注目し、せん断変位と関連づけて整理したものである。この図から、シーム厚が薄い程発生する間隙水圧は小さい傾向が認められる。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およびシーム試料として用いた沖積粘土そのものの、軸差応力の増加に伴う間隙水圧の発生過程をそれぞれ初期拘束圧 P_0 で除した比で表わしたものであるが、同じ軸差応力下であっても岩より粘土の方が大きな間隙水圧を発生することが明らかである。本研究に用いた供試体は、この岩と粘土の互層体であり、せん断初期の間隙水圧は Fig. 5 から粘土シーム内で大きく、大谷石内で小さい不均一な状態になっていると考えられ、非排水試験といえども供試体内部で粘土から岩へと排水が生じていると想像される。すなわち、シーム厚が薄い程その排水距離が短く、岩への排水が速いため発生する間隙水圧が小さくなるものと考えられる。

次に、シーム厚の $(\tau/\sigma'_n)_{peak}$ (以後破壊規準と呼ぶ) に及ぼす影響を検討するが、Fig. 6 は応力比が最大となるとき (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 ~ 有効垂直応力関係を示したものであり、あわせて粘土シームをもたない岩と岩が接触している場合の摩擦強度およびシーム粘土自体のせん断強度をも比較のため図示している。本実験で得られた岩と岩との摩擦強度をべき関数型の破壊規準で表わすと、 $\alpha_R=1.91$, $\beta_R=1.97$ となり、足立・林¹⁾が行った排水三軸圧縮試験に

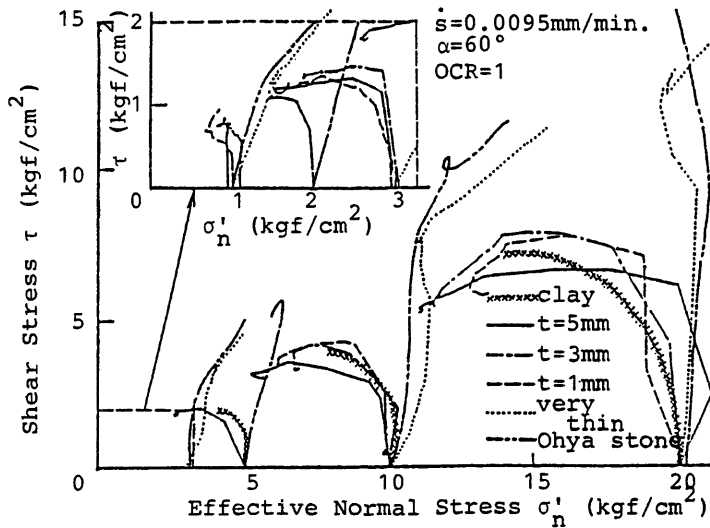


Fig. 3 Effective stress path (influence of thickness of clayey seam)

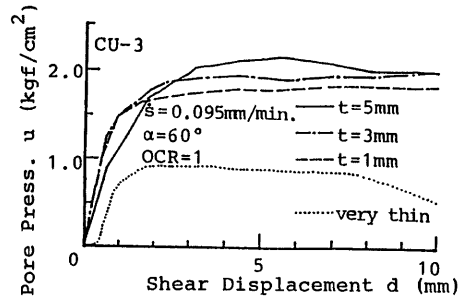


Fig. 4 Relationships between pore pressure and shear displacement

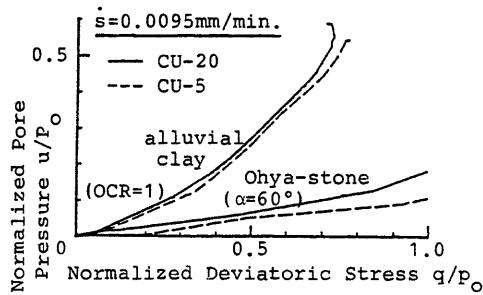


Fig. 5 Developments of pore pressure of rock and clay

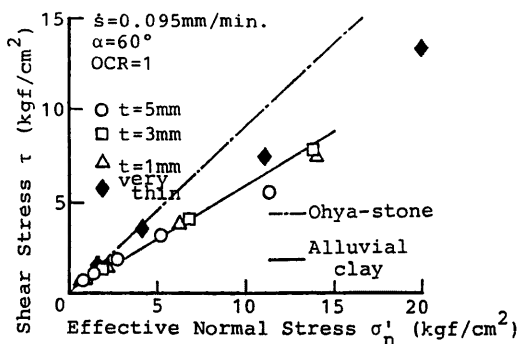


Fig. 6 Failure criteria (influence of thickness of clayey seam)

よる残留強度と比較してほぼ妥当な数値である。粘土については、三村¹⁰⁾が既に得ている $c' = 0.1 \sim 0.2 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi' = 27 \sim 29^\circ$ に対し、本多段階三軸圧縮試験では $c' \approx 0$, $\phi' \approx 30^\circ$ を得た。Fig. 6 から明らかなように、 $t = 1, 3, 5 \text{ mm}$ の間では顕著な差異がみられず、岩と岩と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に等しいかやや大きい程度の値を示す。一方極薄の場合には、低拘束圧下で岩と岩、高拘束圧下で粘土自体の強度に近いものの、ほぼ両者の中間的強度を呈している。すなわち破壊規準は、粘土シームの厚さが 1 mm 以上では大きな差がなく、 1 mm と極薄の間に特性が大きく異なる境界があるものと考えられる。

3.2 切断角の影響

Fig. 7 は、せん断速度 0.095 mm/min. 、粘土シームの厚さ 5 mm の場合に、切断角 60° および 45° の有効応力径路を比較して示したものであり、図中丸印は、応力比 (τ/σ'_n) が最大となる点を表わす。これより破壊規準には、切断角の違いによる有意な差が認められない。

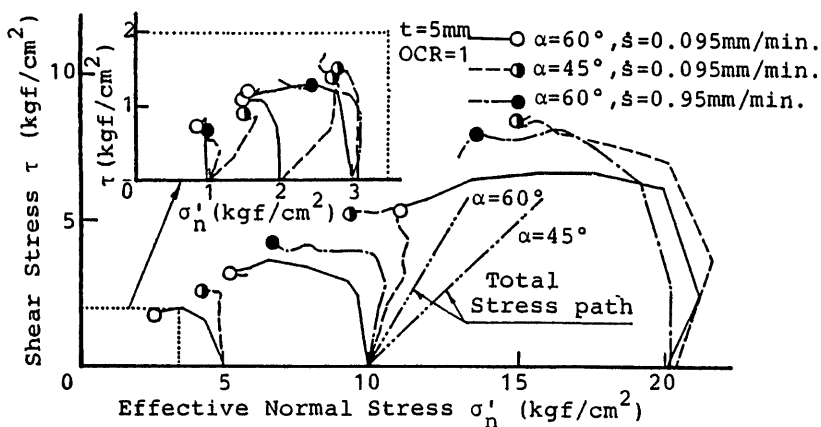


Fig. 7 Effective stress path (influence of degree of cutting surface and shear rate)

3.3 セン断速度の影響

Fig. 7 には、切断角 60° 、粘土シームの厚さ 5 mm において、せん断速度を速くした場合の実験結果を併せて示してある。Fig. 7 から、 $(\tau/\sigma'_n)_{peak}$ にはせん断速度の違いによる有意な差はないと判断される。なお、Fig. 8 はせん断速度が $0.0014\sim 0.95\text{ mm/min.}$ の有効応力経路を比較したものであるが、3 オーダーのせん断速度の範囲においても、破壊規準は何ら変わることはないことが読み取れる。

3.4 粘土シームの過圧密比の影響

CU-0.5, 2 において粘土シームの過圧密比を変化させた場合の実験結果として、有効応力経路、間隙水圧および応力比とせん断変位の関係をそれぞれ Fig. 9, 10, 11 に示す。Fig. 9 内の丸印は Fig. 7 と同様に応力比が最大となる点であるが、いずれの過圧密比においてもほぼ同一の破壊規準線上ですべてていることがわかる。また間隙水圧は、粘土シームの過圧密比が大きい程小さく、OCR=10 では負となるなど過圧密粘土のダイレイタシー特性そのものである。さらに Fig. 11 の応力比をみても、正規圧密の場合、ピーク値に達した後もほぼその値に停留しており、一方過圧密の場合には、最大強度に達した後応力比が減少して残留強度に至る傾向を示し、粘土の応力比～ひずみ関係に似ている。加えて、Fig. 11 の初期立上がり勾配から OCR が大きい程その勾配が急であり、剛性が大きいと判断される。

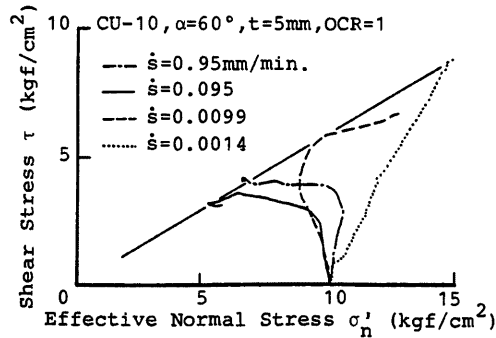


Fig. 8 Effective stress path (influence of shear rate)

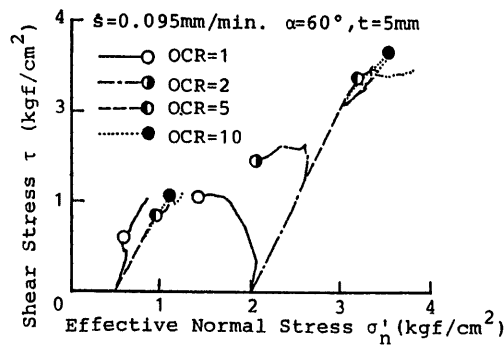


Fig. 9 Effective stress path (influence of over consolidation ratio)

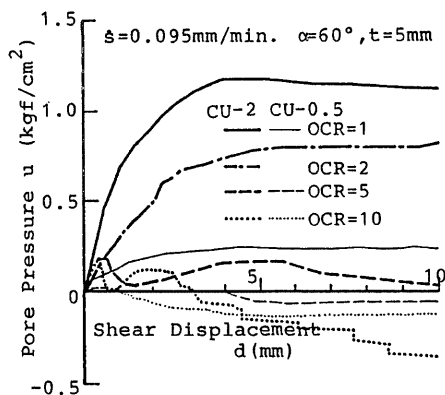
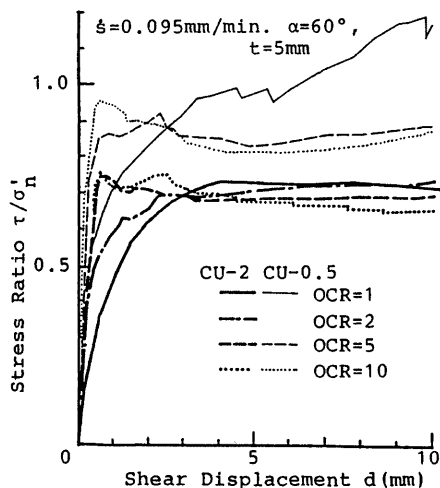


Fig. 10 Relationship between pore pressure and shear displacement

Fig. 11 Relationships between stress ratio (τ/σ'_n) and shear displacement

4. 結 論

弱面に粘土シームをもつ岩盤の力学特性に関する基礎的な知見を得るため、モデル化された供試体の非排水三軸圧縮試験を行って、粘土シームの厚さ、主応力軸に対する弱面の存在角、せん断速度および粘土シームの過圧密比が、その力学特性に及ぼす影響について考察を加えた。以下に得られた知見を列記する。

1. 岩盤がその弱面に粘土シームをもつとき、その弱面に沿うせん断強度は、シームの厚さがわずか1 mmであっても、シーム粘土そのもののせん断強度にはほぼ等しいか、やや大きい程度のもとなる。
2. 粘土シームをもつ岩盤は、粘土、岩石および岩盤全体としての透水性や、対象とするタイムスケール

に影響を受ける。また弱面に沿うせん断強度は、発生する間隙水圧の大小によって決定されるが、その間隙水圧は、同一拘束圧下であっても粘土シームの厚さが厚い程、粘土シームから岩への透水性が低い程、粘土シームが正規圧密状態に近い程大きく、最大せん断応力すなわち強度は小さい。

3. 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はさむ岩と岩の相対変位は、同一の偏差応力下であっても粘土シームの厚さが厚い程、粘土シームが正規圧密に近い程大きく、変形剛性は小さい。

上記事項から、弱面に粘土シームをもつ岩盤の力学挙動を予測する上で、粘土シーム自体のせん断強度、透水性および過圧密比、加えて岩石および岩盤の透水性についても前もって把握しておく必要があると判断する。

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, 1981, pp. 97-110.
- 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, 1982, pp. 99-111.
- 3) Kutter, H. K. and A. Rautenberg: The Residual Strength of Filled Joints in Rock, ISRM, Swiss, 1979, pp. 221-227.
- 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, 1978, pp. 83-95.
- 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, 1979, pp. 75-87.
- 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, 1980, pp.51-63.
- 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，1968, pp. 3-9.
- 8) 堀 正幸：三軸試験結果に及ぼす面積およ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概要集，Ⅲ-15, 1978.
- 9) Chadler, R. J.: The Measurement of Residual Strength in Triaxial Compression, Geotechnique, Vol. 16, 1966, pp. 181-186.
- 10) 三村 衛：飽和粘性土の単調載荷条件下における構成式に関する研究，京都大学修士論文，1983.