

琉球大学学術リポジトリ

島尻層泥岩の強度異方性(農業工学科)

メタデータ	言語: 出版者: 琉球大学農学部 公開日: 2008-02-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 新城, 俊也, Shinjo, Toshiya メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/4304

島尻層泥岩の強度異方性*

新 城 俊 也**

Toshiya SHINJO : Effect of anisotropy on the shear strength of
Shimajiri Mudstone

I は し が き

土はタイ積過程において一次的に圧密され、土粒子は上載荷重の増加と長期間の荷重により水平に配向するようになる。このような地盤は成層や層状構造を形成するので力学的に異方性を示す。異方性を示す地盤に切取などを施すと、土中に作用する主応力の向きが変化するので、安定計算を行う上で強度におよぼす異方性の影響が重要になる。

タイ積岩は一般に異方性を示す。島尻層泥岩は第三紀の中新統から鮮新統にかけて、浅海、ないし半深海相でタイ積した海成タイ積物である。この泥岩はタイ積中、続成作用による結合力の影響を受けて半固結ないし弱固結の状態にあるが、乾湿による軟弱化が著しいなどの特性を示すので土質材料として取扱うことができる。タイ積後の土カブリの除去により島尻泥岩層は現在過圧密状態にあると見なせる。

著者は先に島尻層泥岩の力学特性¹⁾を調べた際、地盤における供試体の方向を考慮せず強度試験を行い、その結果をBishopら³⁾によるLondon clayの結果に準拠して、強度への異方性の影響について検討を行った。

本研究は地盤の層に対して種々の軸方向を有する不攪乱泥岩供試体について圧密圧25%までの圧密非排水三軸圧縮試験を行い、強度、間ゲキ水圧、強度定数および強度～変形関係について異方性の影響を明らかにするとともに、先の結果の妥当性を検証したものである。

II 試料および実験方法

1. 試 料

実験に使用した泥岩は別に報告⁶⁾したものと同一の飽和不攪乱試料である。

供試体はブロックサンプルからコアードリルとカッターを用いて直径50mm、高さ100mmの円柱形に成形するが、Fig. 1に示すように供試体の軸方向が水平に対して $\beta=90^\circ$ (鉛直軸供試体)、 60° 、 45° 、 30° 、 0° (水平軸供試体)、になるように切り出している。ここに β は水平から測った供試体軸までの角度である。供試体を準備する際、弱面を有する供試体は除去した。

* 土木学会第29回年次学術講演会概要集第Ⅲ部 (昭和49年10月. p 406～407)

** 琉球大学農学部農業工学科

琉球大学農学部学術報告 23: 255～267 (1976)

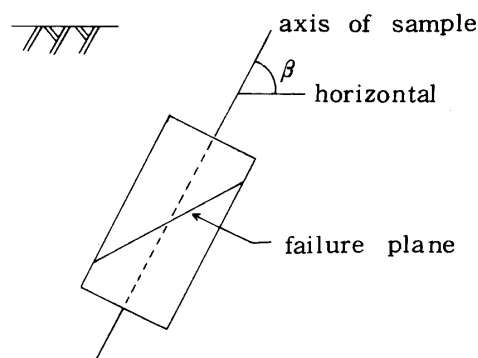


Fig. 1 Angle between axis of sample and horizontal

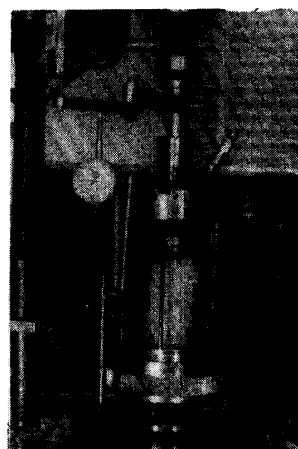


Photo. 1 Triaxial cell

2. 実験装置と方法

三軸室は側圧30%, 軸圧 3 ton の容量を有し、肉厚30mmの透明アクリル円筒でできている。載荷装置は軸変位が $0.5 \mu / \text{min}$ から $6 \text{ mm} / \text{min}$ の範囲で任意に調整可能な10ton 電動圧縮試験機を使用した。間ゲキ水圧は受圧面 5 mm 径の半導体小型圧力変換器、軸荷重はヒズミゲージ型荷重変換器を、また軸変位は L. V. D. T を使用して X Y レコーダに自記させている。なお、軸荷重測定にプループングリングを使用する場合、間ゲキ水圧のみを打点記録計で電氣的に測定した。10%以下の側圧の応力制御は高精度の air regulator を使用した空気圧による方式、また10%以上の場合、air regulator, air driven oil pump, accumulator および oil pressure regulator を使用している赤井ら²⁾による油圧発生機構を取入れた装置を製作して、油圧による方式をとっている。三軸室を Photo. 1 に示してある。

三軸圧縮試験は圧密非排水セン断 (CU-Test) を行った。供試体の再圧密は 5% から 25% まで変化させ、セン断過程中、間ゲキ水圧の測定も行っている。結果のバラツキが予想されたので、各軸方向とも同一圧密圧に対して 3 個以上の供試体について CU-Test を行った。さらに、各軸方向に対し一軸圧縮試験も行っている。

CU-Test は次の方法をとっている。供試体をセットする前に三軸室内に 1/2 程水を入れ約 1 hr 真空にして間ゲキ水圧測定系と排水系の脱気を行う。圧密の促進と間ゲキ水圧の平衡のため供試体の側面にペーパードレンを巻き、側圧10%以下のとき 0.2 mm 厚のメンブレン 2 枚、10%以上のとき 2 mm 厚のメンブレン 1 枚を被せセットする。セット後、三軸室内に水を満し、その水面に空気圧あるいは油圧を作用させるが、最初に側圧 0.2% 作用させ約 10 min 間排水を行い、セットの際混入した余分の水と空気を排除する。その後、非排水状態で所定の側圧を作用させる。側圧作用により発生した間ゲキ水圧が定常になるのを待って、バックプレッシャー 3.0% を作用させながら圧密を行う。圧密は 24 hr 以内で終了した。圧密以前の側圧と発生間ゲキ水圧の関係を Fig. 2 に示してある。各 β の供試体についての関係をまとめると $U_v = (1 \sim 0.9) \sigma_3 - (1.0 \sim 2.2) [\text{kg}]$ となり Skempton⁷⁾ の間ゲキ圧係数 B は近似的に 1 で、供試体は 1.0 ~ 2.2% のサクションを有すると考えられる。

圧密終了後、セン断速度 $0.02\% / \text{min}$ の変位制御で非排水セン断を行う。

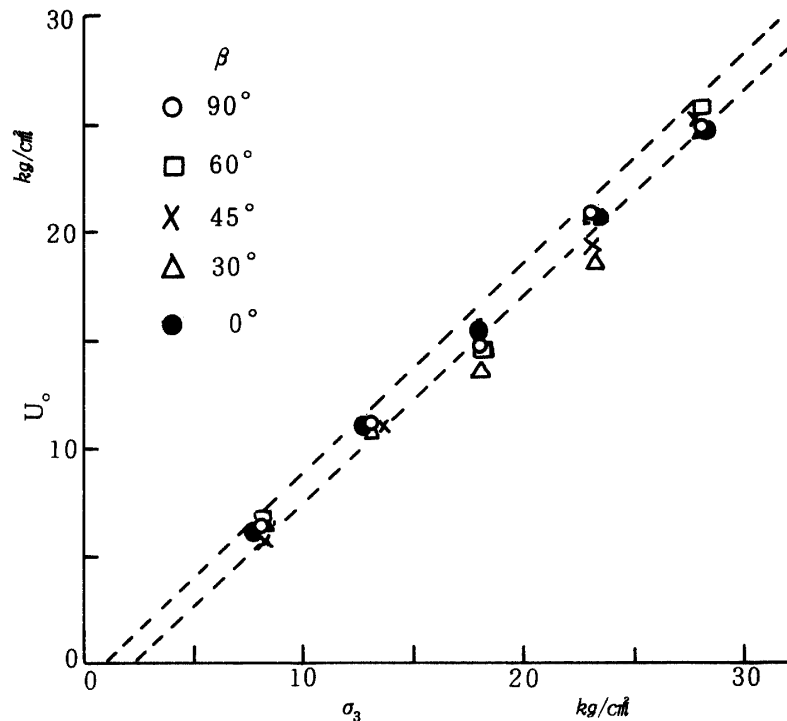


Fig. 2 Isotropic applied pressure and induced pore pressure

III 実験結果と考察

1. 応力～ヒズミ，間ゲキ水圧～ヒズミ関係

応力～ヒズミ，間ゲキ水圧，強度への異方性の影響を比較するため，圧密圧 $\sigma'_c = 5$ ㎏/㎠における応力，発生間ゲキ水圧～軸ヒズミ関係の代表例をFig. 3に示した。図中で実線は応力，点線は間ゲキ水圧の変化をそれぞれ表わし，数値は供試体の軸方向を示している。この図から応力～ヒズミ関係，強度および間ゲキ水圧は供試体の軸方向によって異なることがわかる。他の圧密圧においても同様な傾向を示した。破壊面は供試体の方向にかかわらず最大主応力作用面に対して $55^\circ \sim 70^\circ$ であったが， $\beta = 0^\circ$ の一軸圧縮試験で $70^\circ \sim 90^\circ$ の破壊面を形成した。ここでは破壊時のヒズミと間ゲキ水圧の発生状況について述べる。

Fig. 4は β と破壊時のヒズミ ϵ_f の関係を各圧密圧の平均値で示したものである。これによると破壊時のヒズミは β によりかなり異なり， $\beta = 30^\circ \sim 45^\circ$ において最小を示す。一軸圧縮においては $\beta = 0^\circ \sim 30^\circ$ で最小になる。 $\beta = 30^\circ \sim 45^\circ$ において粒子配向とせん断面が一致するので，わずかのヒズミで破壊に達する。一方 $\beta = 0^\circ$ において粒子配向と軸荷重方向が平行であるので，一軸圧縮では鉛直方向へのクラシクの発生により側方への変位を伴い小さなヒズミで破壊するが，側圧が作用すると側方への変位が拘束され，破壊ヒズミは一軸圧縮に比べて増大する。

間ゲキ水圧のピークは最大強度に達する以前かあるいは同時に生じている。いま間ゲキ水圧のピーク時と破壊時のヒズミのずれを比較するため，それらの比を圧密圧に対して示したのがFig. 5である。図は各 β に対し同一圧密圧における平均で示した。図より圧密圧の影響を調べると，低圧密圧では間ゲキ水圧のピークが破壊より先行するが，圧密圧が増加すると，間ゲキ水圧のピークと破壊は一致するようになる。間ゲキ水圧は体積変化に依存するので，上述のことは次のことを意味する。すなわち，低側圧

におけるせん断によるダイレイタンスは破壊以前に生ずるが、側圧が増加すると破壊と同時にダイレイタンスが起る。

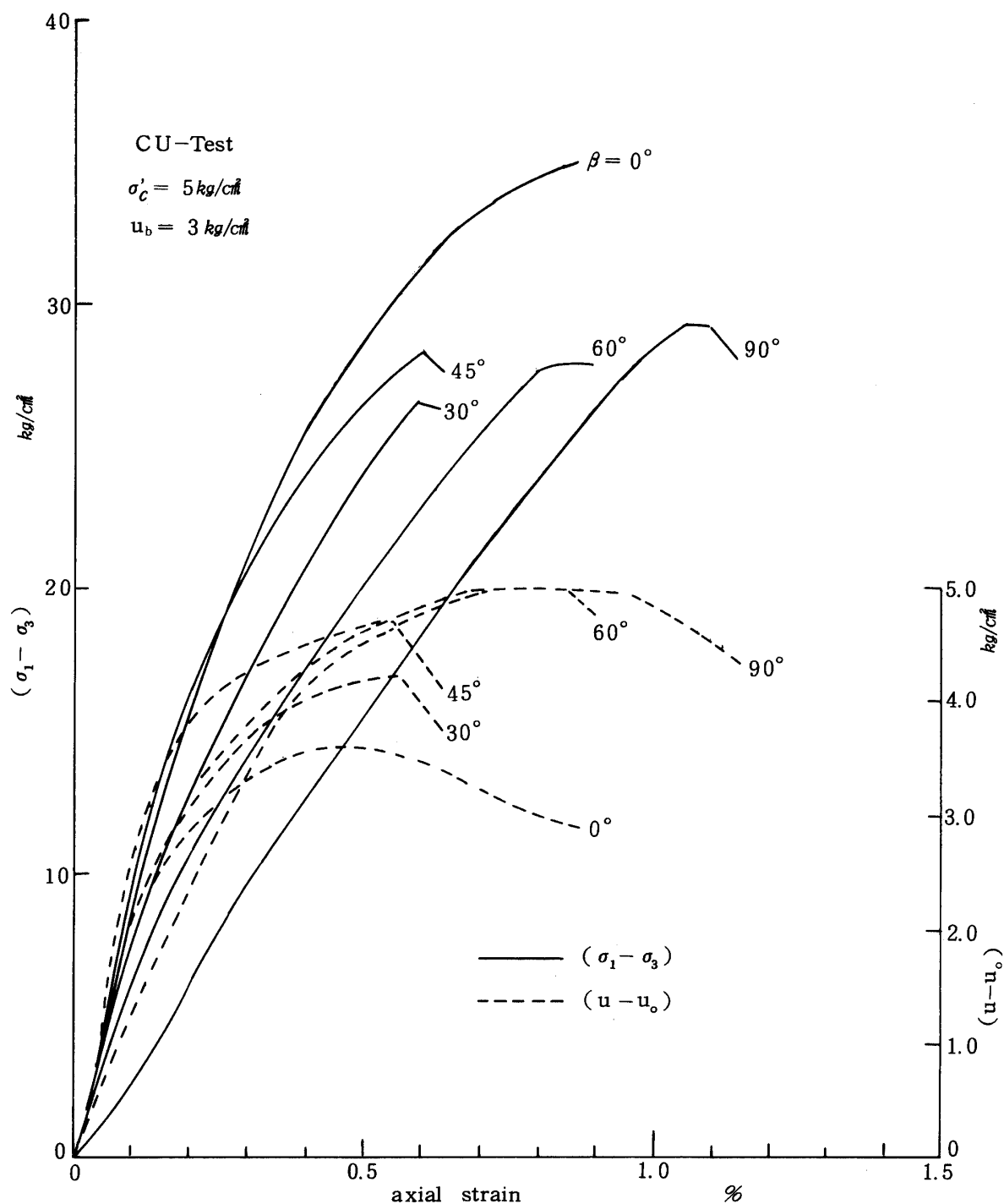


Fig. 3 Typical results of stress, pore pressure and strain relation

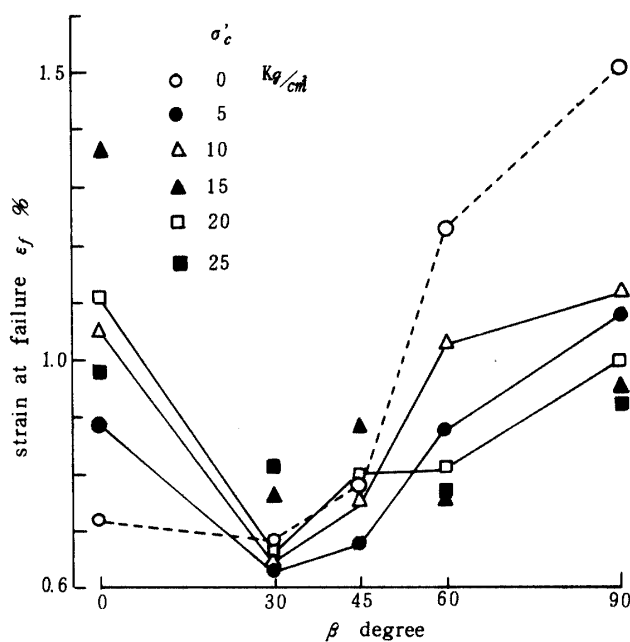


Fig. 4 Effect of orientation on strain at failure

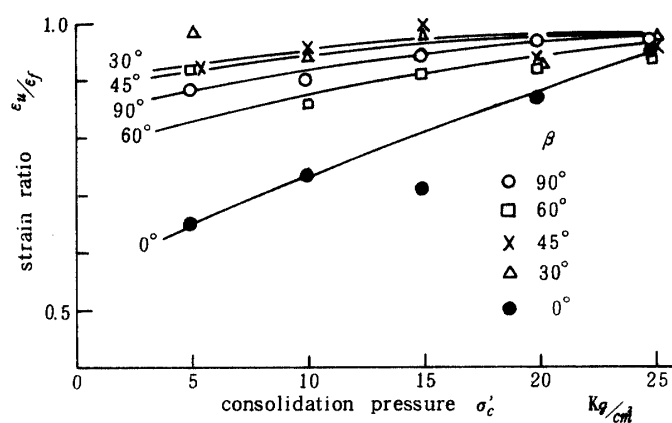


Fig. 5 Effect of orientation on dilatancy

 ϵ_u : strain at $(u - u_0)_{max}$
 ϵ_f : strain at failure

次に間ゲキ水圧のピークが破壊に先行する度合は β によって差がある。特に $\beta = 0^\circ$ においてその度合は著しい。これらは供試体の粒子配向とせん断面との関係で説明できる。 $\beta = 90^\circ$ でせん断面は水平な粒子配向層を横切るので、体積増加、ダイレイタンスは破壊直前に生じる。一方、 $\beta = 0^\circ$ において粒子配向は鉛直であるので、せん断により鉛直方向へのクラックを発生し、側方への体積増加を伴う。これによりダイレイタンスは先行するようになる。しかし、側圧が増加すると側方への変位が拘束され、

破壊と同時にダイレイタンスが生じるようになる。また、 $\beta = 30^\circ \sim 45^\circ$ においてセン断面と粒子配向がほぼ一致するので、ダイレイタンスは破壊時に生じる。

Photo. 2にセン断後、乾湿を与えた鉛直供試体を示した。水平に層を形成している様相がわかる。



Photo. 2 Vertical sample after failure

2. 強度異方性

Fig. 6は強度と圧密圧との関係を示したものである。図中、強度はバラツキの幅と平均値を同時に示し、また圧密圧は β ごとにずらして表わしてある。バラツキは大きい、平均値を比較すると、圧密による強度増加と β による強度差が認められる。いま $\beta = 90^\circ$ の平均強度を基準に各 β の平均強度との比と β の関係を各圧密圧に対して表わしたのがFig. 7である。一軸圧縮強度は $\beta = 90^\circ$ で最大をとり、 β とともに減少して、 $\beta = 30^\circ, 0^\circ$ で鉛直供試体の80%まで低下する。これに対し側圧が作用しているとき、 $\beta = 30^\circ, 60^\circ$ においてバラツキがあるが、 $\beta = 45^\circ, 0^\circ$ を考慮すると図中の実線の傾向を示す。すなわち、強度は $\beta = 45^\circ \sim 30^\circ$ において鉛直強度の90%に減少するが、逆に水平供試体の強度は10%程増加している。この傾向は過圧密粘土であるLondon clayについても認められている。水平軸供試体の強度が鉛直軸供試体のそれより大きいことは自然地盤における鉛直圧密圧より側方圧密圧が大きいこと、すなわち静止土圧係数 $K_0 > 1$ に反映されている^{1,8)}。

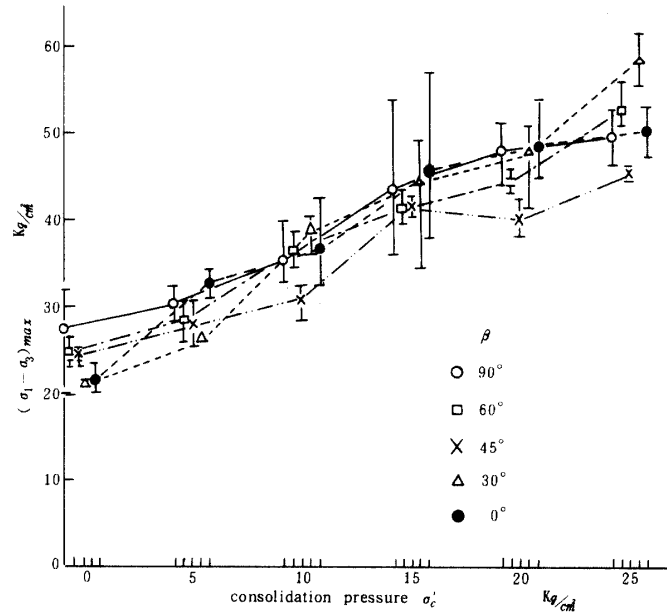


Fig. 6 Strength and consolidation pressure relation

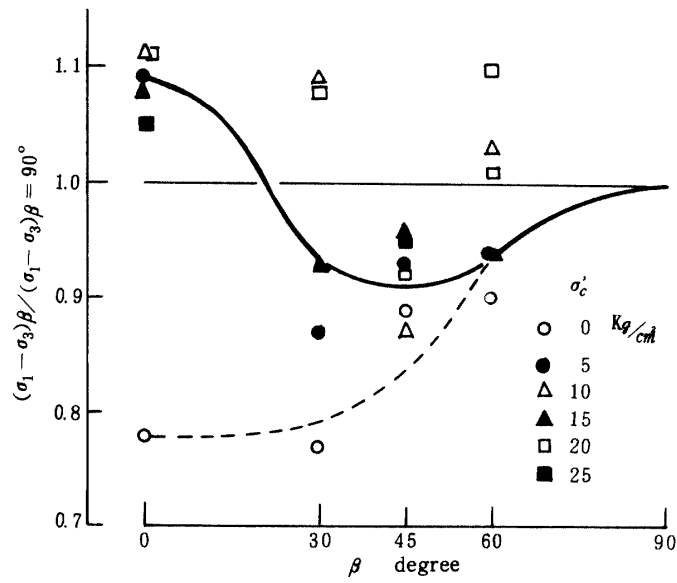


Fig. 7 Effect of orientation on strength

3. 間ゲキ水压特性

Fig. 3でセン断に伴う間ゲキ水压の大きさは供試体の軸方向によって異なることを示した。Skempton⁷⁾の破壊時の間ゲキ圧係数は $A_f = (u - u_0) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ で表わされ、過圧密状態において A_f は過圧密比に関係付けられている。一般に過圧密比が小さくなると A_f の値は増加する。島尻層泥岩の先行圧密荷重は求められていないので、圧密圧に対して A_f の変化を示したのがFig. 8である。この図は平均値で表わしてあるが、圧密圧の増加により A_f は増加している。 A_f の値は $\beta = 90^\circ$ と 60° において、また 45° と 30° においてはほぼ同じ値で、 $\beta = 90^\circ$ のとき最大、 $\beta = 0^\circ$ で最小値を示し、 A_f は方向性の影響を受けることがわかる。

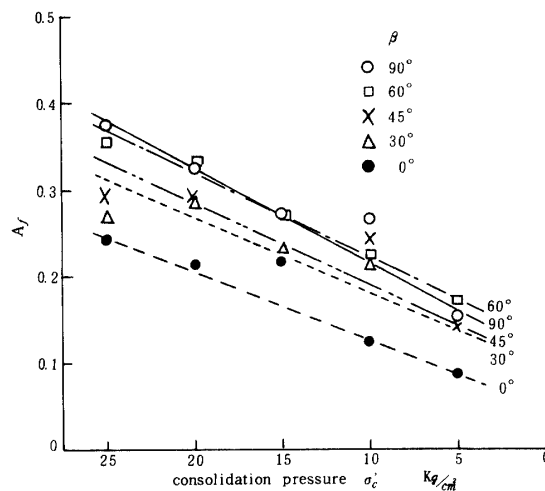


Fig. 8 Pore pressure parameter and consolidation pressure relation

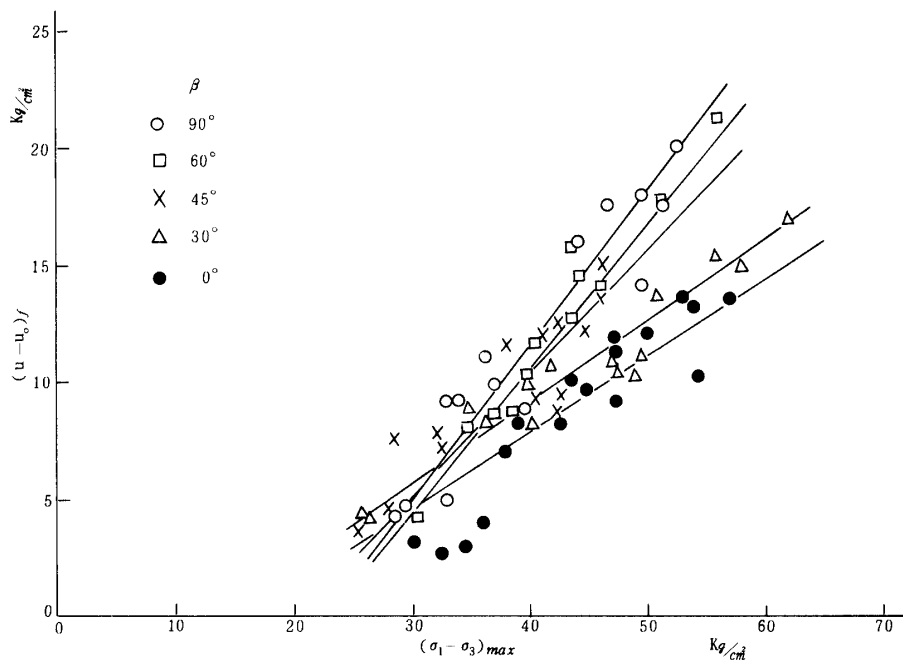


Fig. 9 Pore pressure and strength relation

Fig. 9は各 β に対し破壊時の間ゲキ水圧と強度の関係を示したものである。この図によると強度が増加すると間ゲキ水圧も増加し、各 β に対し直線関係が認められる。この直線のこう配は β によって異なり、 $\beta=90^\circ$ における0.67から $\beta=0^\circ$ の0.33まで変化している。 A_f はこの図において原点を通る直線のこう配で定義され、正規圧密領域に移行すると間ゲキ水圧と強度の関係は原点を通る直線上に存在することになる。過圧密領域における直線関係のこう配の意味について今後検討する必要があるが、正規圧密領域でのこの泥岩の A_f は直線関係のこう配の値を超えることはない。鉛直供試体について推算すると正規圧密領域での A_f は0.53であった⁶⁾。

結論として間ゲキ水圧は方向性の影響を受ける。

4. 強度～有効応力関係

Fig.10は圧密圧10%と20%における各 β に対する有効応力経路の代表例を示したものである。この図より有効応力経路は β によって異った経路をたどって破壊に至ることがわかる。間ゲキ水圧は方向性の影響を受け、 $\beta=90^\circ$ で最大、 $\beta=0^\circ$ で最小の間ゲキ水圧を発生するので、その発生差が有効応力経路の差に反映されている。

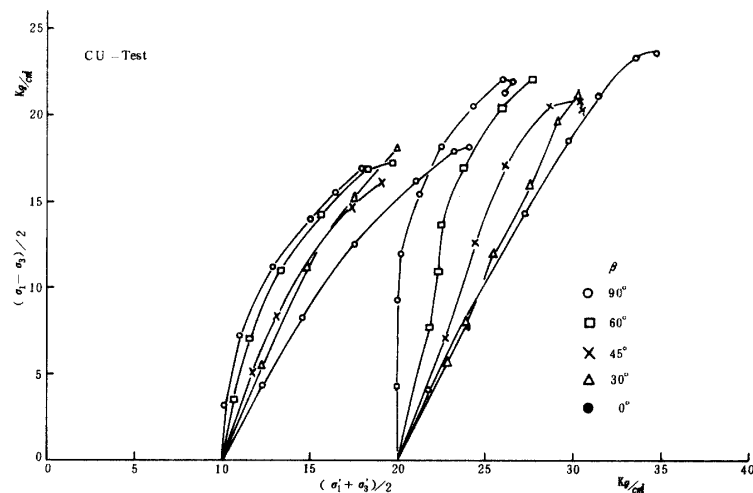


Fig. 10 Effect of orientation on stress paths

なお、Fig.10の結果は先に供試体の方向性を考慮せずに行ったCU-Testで有効応力経路が著しく異なるものについて鉛直供試体と水平供試体にグループ分けして、その力学特性を検討したことの妥当性を示している。

Fig.11は強度定数への β の影響を比較するため、破壊時における $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ 関係を全応力で示したものである。バラツキが大きい、 $\beta=90^\circ$ と 0° を比較すると明らかに差がみられる。間ゲキ水圧は方向性の影響を受けるので、全応力による強度定数は間ゲキ水圧に反映されて方向性の影響を受ける。またせん断応力と平均主応力の関係は直線で表わせるので、全応力による破壊包絡線はMohr-Coulombの破壊規準が適用でき、強度定数 C_{cu} 、 ϕ_{cu} は β によって異なる。

Fig.12は同様に有効応力による $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)$ 関係を示したものである。これらの有効応力関係は $\beta=45^\circ$ を除いて、 β による差は著しくない。特に $\beta=90^\circ$ と 0° に対する有効応力関係は接近している。この関係はDuncanら⁵⁾の過圧密カオリン粘土とBishopら³⁾のLondon clayについての結果、すなわち、有効応力による破壊包絡線は方向性の影響を受けないことと一致している。破壊時の有効応

力関係は曲線で示されるので、有効応力による破壊包絡線はMohrの破壊規準が適用でき、応力範囲を定めて直線近似で求められる強度定数 C' 、 ϕ' は方向性の影響を受けないようである。

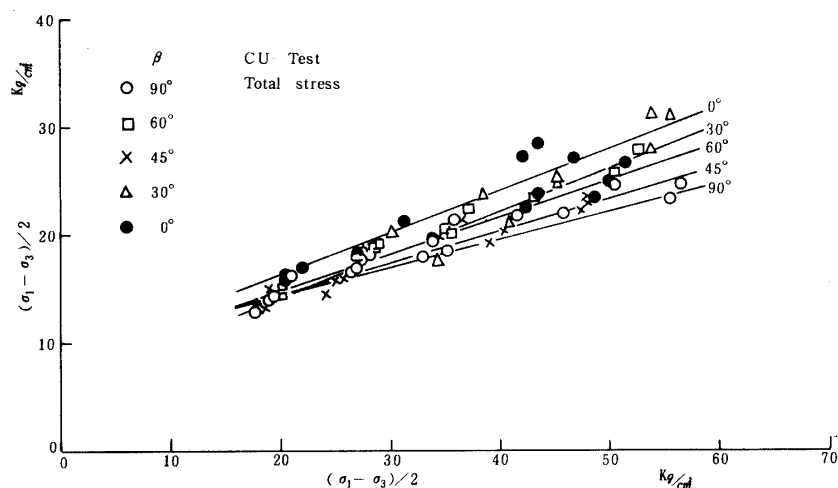


Fig. 11 Relationship between $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ and $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ for samples with various axis

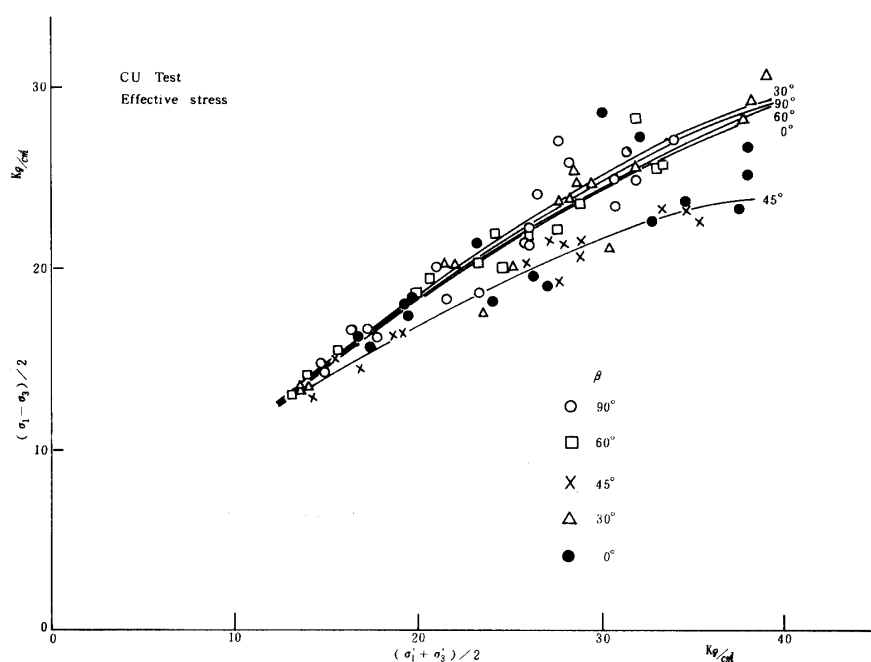


Fig. 12 Relationship between $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ and $(\sigma_1' + \sigma_3')/2$ for samples with various axis

5. 強度と変形係数

Fig. 3において応力～ヒズミ関係は圧密圧と β によって変化している。Miller⁴⁾は強度と変形係数で岩石の分類を行っている。また竹中¹⁰⁾はチュウ積粘土および洪積粘土に対して $E = 105q_u$ を提唱して

いる。ここに q_u は一軸強度である。いま強度と変形係数との関係への β の影響を調べるため、一軸強度およびCU-Testの強度と変形係数との関係を示したのがFig.13である。ここに変形係数 E_{50} は応力～ヒズミ関係で強度の1/2点における接線こう配で求めている。 E_{50} と $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ の比を各 β に対して平均値で示すと

$$\beta = 90^\circ, 60^\circ \text{ に対し} \quad E_{50} = 120 (\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$$

$$\beta = 45^\circ \text{ に対し} \quad E_{50} = 150 (\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$$

$$\beta = 30^\circ, 0^\circ \text{ に対し} \quad E_{50} = 170 (\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$$

が得られ、この比は β の値によって異なる。

しかし、圧密圧の大きさによって $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ は変化するので、 E_{50} も変化する、 E_{50} と $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ の比は一定にならず、一般に

$$E_{50} = a (\sigma_1 - \sigma_3)^b$$

ここに、 a 、 b ： 定数

の関係で表わせる。圧密圧60%までの鉛直供試体に対して $E_{50} = 10.8 (\sigma_1 - \sigma_3)^{1.635}$ が得られている⁶⁾。圧密圧25%までについて各 β に対してこの関係を調べたが、 β による影響は明確でなかった。今後、応力範囲を拡張して β の影響を明らかにする必要がある。

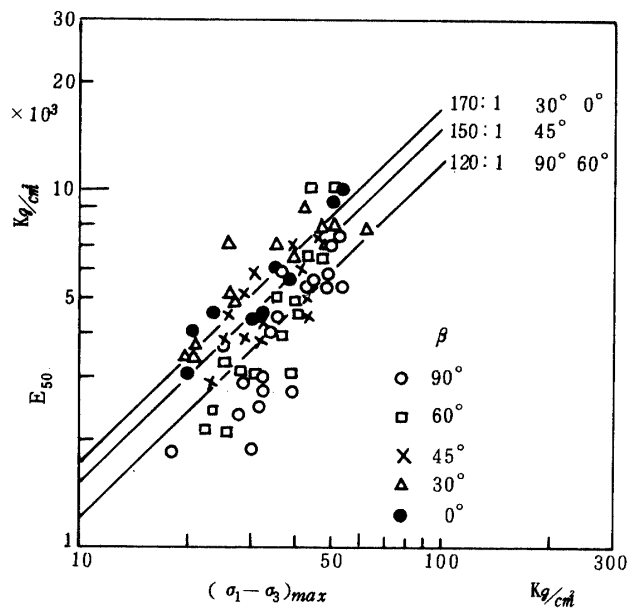


Fig. 13 Strength and deformation coefficient relation

IV あとがき

本研究において地盤の水平に対し種々の軸方向を有する不攪乱の島尻層泥岩供試体を切り出し、一軸圧縮試験および圧密圧25%までの圧密非排水三軸圧縮試験を行い、強度、間ゲキ水圧、強度定数および変形係数への方向性の影響について明らかにした。本研究の応力範囲内で得られた結果をまとめると次のようになる。

1. 低圧密圧においてセン断によるダイレイタンスーは破壊に先行して生じる。特に水平供試体にお

いて先行する度合いが大きい。しかし、圧密圧が増大するとダイレイタンスーは破壊と同時に生じるようになる。

2. 強度は供試体の軸方向によって異なる。鉛直方向供試体の強度を基準にすると、 $\beta = 30^\circ, 45^\circ$ において約10%の強度減少、水平軸供試体において約10%の強度増加を示す。

3. 間ゲキ水圧は方向性の影響を受けて、セン断に伴う発生間ゲキ水圧は同一圧密圧に対して鉛直供試体で最大、水平供試体で最小値を生じる。

4. 間ゲキ水圧の異方性により、全応力による強度定数 C_{cu} 、 ϕ_{cu} も方向性を示す。同様に有効応力径路も方向性の影響を受けるが、有効応力による強度定数 C' 、 ϕ' は方向性の影響をあまり受けない。

5. 変形係数と強度の比は圧密圧25%の範囲の平均値で示すと、 $\beta = 90^\circ, 60^\circ$ に対し 120 : 1、 $\beta = 45^\circ$ で 150 : 1、 $\beta = 30^\circ, 0^\circ$ で 170 : 1である。

以上の結果は圧密圧25%までであり、過圧密領域にある。この泥岩を正規圧密圧領域に移行させるにはさらに大きな圧密圧を必要とするので、正規圧密圧領域を含めた応力範囲で実験を行うことにより、セン断特性におよぼす異方性の影響はより明らかになると考えられる。

最後に本研究を行う上で御指導を頂いた京都大学赤井浩一教授、また実験に御助力を惜しまなかった楚南正明（沖縄県庁南部農林土木事務所）に謝意を表する次第であります。

参 考 文 献

1. 赤井浩一，足立紀尚，新城俊也 1973 沖縄，島尻層泥岩の力学特性，京都大学防災研究所年報，16 (B)，753 ~ 764
2. ————，———，田伏宣夫 1975 空気圧制御方式による三軸試験装置とその適用（その1），土と基礎，23 (3)：39 ~ 45
3. Bishop, A. W., Webb, D. L. and Lewin, P. I. 1965 Undisturbed samples of London clay from the Ashford Common Shaft; Strength-effective stress relationships, Geotechnique, 15 : 1 ~ 31
4. たとえば Deere, D. U. 1968 Rock Mechanics in engineering practice, ed. by Stagg and Zienkiwicz, p 4 ~ 12, John Wiley and Sons
5. Duncan, J. M. and Seed, H. B. 1966 Anisotropy and stress reorientation in clay, Proc. ASCE, 92 (SM 5) : 21 ~ 50
6. 新城俊也 1976 島尻層泥岩のセン断特性，琉球大学農学部学術報告，23 : 237 ~ 254
7. Skempton, A. W. 1954 The pore-pressure coefficients A and B, Geotechnique, 4 : 143 ~ 147
8. ———— 1961 Horizontal stress in over-consolidated Eocene clay, Proc. 5th Inter. Conf, Soil Mech, 1 : 351 ~ 357
9. ———— and Hutchinson, J. 1969 Stability of natural slopes and embankment foundation, Proc. 7th Inter. Conf, Soil Mech., State of the art volume, p 271 ~ 340
10. たとえば 竹中準之助 1968 土質調査試験結果の解釈と適用例，土質工学会，p 155 ~ 190

Summary

In this paper effect of anisotropy on the shear strength of Shimajiri Mudstone from Okinawa Island, Ryukus, are investigated under consolidated-undrained test up to the consolidation pressure as high as 25 kg/cm².

Undisturbed samples were trimmed with their axis vertical, inclined at 60°, 45° and 30°, and horizontal toward bedding plane.

The strength associated with the specimen axis inclined at 45° and 30° is smaller 10% than those of vertical, but the strength with axis horizontal greater about 10%.

The pore pressure exhibits anisotropic behaviour during shear. Therefore the difference in stress path and shear strength parameter in terms of total stress for various axis of specimen reflects the effect of anisotropy on pore pressure. On the other hand the shear strength parameter in terms of effective stress would be expected to show little effect of anisotropy.