

構造異方性を有する飽和沖積粘土の 三次元強度変形特性

棚橋 由彦*・山中 稔**
持下 輝雄*

Three-Dimensional Mechanical Properties of Saturated Alluvial Clay with Anisotropic Fabric

by

Yoshihiko TANABASHI*, Minoru YAMANAKA**
and Teruo MOCHISHITA*

Natural in-situ clay deposits display fabric anisotropy due to parallel alignment of their beds. The fabric anisotropy may have considerable influence on the mechanical properties of clay. Some experimental investigations on the above mentioned influence have been already done with tri-axial and direct shear, except true tri-axial testing apparatus.

Presented herein is an experimental study of the influence of the fabric anisotropy on the mechanical properties of saturated alluvial clay under three dimensional stress condition with true tri-axial testing apparatus.

Tests as follows were carried out on cubical specimen of saturated alluvial clay with combination of cutting angle β between the principal stress direction and sedimentary plane and b-value.

- (1) One-direction restrained consolidation test
- (2) Two-direction restrained consolidation test
- (3) Isotropic consolidated undrained (CIU) shear test
- (4) Ko-consolidated undrained (CKoU) shear test

From these test results, some three-dimensional mechanical properties were clarified as follows:

- (1) The ratio of the anisotropic stress ratio at rest K_{13} to K_{12} may be useful as a quantitative index for the anisotropic fabric.
- (2) K_{13}/K_{12} increases with increasing cutting angle β , and reaches about unity at $\beta=90^\circ$ degree.
- (3) Alluvial clay with the anisotropic fabric has a deformation characteristics as a cross anisotropy material.
- (4) Both excess pore water pressure and effective stress ratio at failure are subjected larger influence in extension ($b=0.5-1.0$) rather than in compression ($b=0$) due to the anisotropic fabric.

平成2年10月1日受理

*土木工学科 (Department of Civil Engineering)

**土木工学専攻修士課程 (Graduate Student, Department of Civil Engineering)

1. まえがき

負荷を受ける土中の応力状態 (Fig. 1 参照) を示すと、一般に最大主応力 σ_1 軸は、盛土中心直下より外側に移行するに従って鉛直軸より傾いて行く。

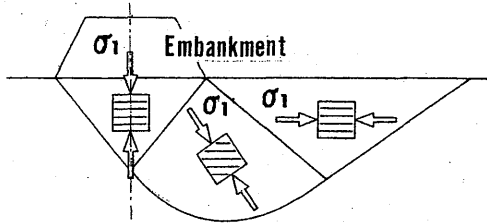


Fig. 1 General Stress Condition due to loading

また自然に堆積した粘土層では軽い薄片状の粘土粒子が方向性を持って配列されることにより配向構造をなしており、かつ堆積面内では等方的な二軸直交異方性を呈する。粘土の構造異方性に着目した実験的研究には、一面せん断試験機を用いた高田ら¹⁾、東ら²⁾の研究、三軸試験機を用いた鬼塚ら³⁾の研究がある。しかし、三主応力下における飽和沖積粘土の力学的特性に及ぼす構造異方性の影響は、未だ解明されていない現状にある。

これまでに著者らは、この方面の研究に資するために、実地盤の応力状態が再現できる純粋三軸試験機を開発してきた (Fig. 2 参照)。今回は、構造異方性の定量化を目的として、全国でも屈指の軟弱かつ鋭敏な沖積海成粘土として知られる有明粘土を試料とし、一次元予圧密によりあらかじめ構造異方性を付与した粘土試料から切出し角を種々変えた供試体を作成し、一方向拘束圧密・二方向拘束圧密試験を行った。さらに等方および K_0 圧密した供試体に純粋三軸圧密非排水せん断試験 (CIU, CKoU) を行い、構造異方性の主軸

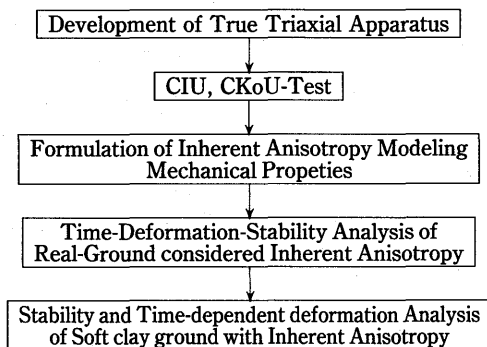


Fig. 2 Flow Chart

と主応力軸の狭角および圧密履歴の相違がせん断特性に与える影響の解明を試みた。

2. 試験装置

用いた試験装置は、Lade の開発した試験機⁴⁾を参考に試作したもので、三主応力がそれぞれ独立に制御でき、しかも均一な応力負荷が可能で、かつ均一なひずみを生じさせる多軸試験機である。また、圧密現象の顕著な粘性土の大変形にも十分追従可能な中間主応力載荷装置を具備しており、その主な機能は既報⁵⁾に詳しい。

3. 試料及び供試体

試料は、液性限界 W_L 以上の含水比で練返し煮沸した有明粘土を、内径15.5cmのモールドに詰め6段階にわたって圧密レベルを上げ最終圧密圧 $p_c=1.5\text{kgf/cm}^2$ で予圧密を行う。供試体は予圧密試料から切出し角 β を種々変えて一辺7.5cmの立方体を切り出す。ここで切出し角 β は Fig. 3 に示すように、最大主応力 σ_1 軸と堆積面とのなす角で定義する。

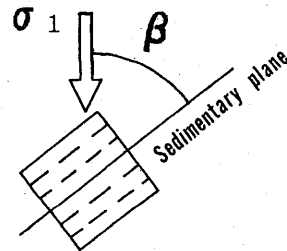


Fig. 3 Definition of Cutting-Angle, β

4. 試験方法及び試験条件

4.1 圧密試験

(1) 一方向拘束圧密

Fig. 3 の $\beta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の3種類の供試体について、初期値 $\sigma_c=1.5\text{kgf/cm}^2$ から $\sigma_1=1.5\text{kgf/cm}^2$ に保ち、セル内圧 σ_c を除荷しながら中間主ひずみ ϵ_2 をゼロに保持し、間隙水圧消散までの最小主ひずみ ϵ_3 を測定する。

(2) 二方向拘束圧密 (K_0 圧密)

2種類の異なった初期応力状態よりそれぞれ K_0 圧密を行った。

Case-1 ; $\sigma_c=1.5\text{kgf/cm}^2$

Case-2 ; $\sigma'_1=1.5\text{kgf/cm}^2, \sigma'_2=0.72\text{kgf/cm}^2$

一方向拘束圧密と同じ応力状態である Case-1 は、 $\beta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の3種類、予圧密終了時の載荷応力と同じ応力状態である Case-2 は、 $\beta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ,$

Table. 1 Conditions of CIU-Test and its results

b-value	Cutting angle β	void ratio at Shear starting e	$\left(\frac{\Delta U}{\sigma_c}\right)_f$	$\left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}\right)_f$
0.0	0°	3.24	0.69	4.69
	30°	3.20	0.58	3.17
	60°	3.21	0.71	4.78
	90°	3.05	0.74	4.34
0.5	0°	3.05	0.58	3.50
	30°	3.24	0.77	6.17
	60°	3.36	0.65	4.31
	90°	2.98	0.72	5.41
1.0	0°	3.20	0.45	3.45
	30°	3.02	0.76	5.89
	60°	3.07	0.47	2.67
	90°	3.02	0.76	4.93

Table. 2 Conditions of CKoU-Test and its results

b-value	Cutting angle β	void ratio at Shear starting e	$\left(\frac{\Delta U}{\sigma_c}\right)_f$	$\left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'}\right)_f$
0.0	0°	2.75	0.35	3.50
	30°	2.69	0.40	4.03
	45°	2.60	0.47	4.43
	60°	2.64	0.35	3.55
	90°	2.92	0.53	4.97
0.5	0°	2.61	0.57	5.67
	30°	2.74	0.63	6.07
	45°	2.57	0.60	5.33
	60°	2.56	0.59	5.69
	90°	2.86	0.69	7.37
1.0	0°	2.78	0.67	5.99
	30°	2.79	0.60	5.28
	45°	2.69	0.71	7.52
	60°	2.69	0.73	7.92
	90°	2.83	0.60	5.68

60°, 90°の5種類の供試体について行った。Ko 圧密は、それぞれの初期応力状態より、どちらもセル内圧 σ_c と中間主圧荷装置を用い両側方変位をゼロに保持するように、応力、ひずみを間隙水圧消散まで制御する。

4. 2 せん断試験

(1) 圧密過程

等方圧密は過去に求めた有明粘土の Ko 値0.48より $\sigma_1' = \sigma_2' = \sigma_3' = Ko\sigma_c = 0.72\text{kgf/cm}^2$ で間隙水圧消散まで行う。Ko 圧密は、予圧密終了時の荷重応力と同じ応力 $\sigma_1' = 1.5\text{kgf/cm}^2$, $\sigma_2' = 0.72\text{kgf/cm}^2$, から、セル圧 σ_3 と中間主圧荷装置を用い両側方変位をゼロに制御しながら間隙水圧消散までの σ_2' , σ_3' を測定する。なお、バックプレッシャーは、両圧密・せん断過程を通じて、 $\sigma_B = 1.0\text{kgf/cm}^2$ を作用させている。また圧密終了後の間隙圧係数 B より飽和度は90%以上であることを確認している。

(2) せん断過程

間隙水圧消散後、b 値一定、 σ_3' 一定で最大主力 σ_1' をひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.076\%/min$ で荷重するひずみ制御方式の非排水せん断試験を行う。CIU, CKoU の試験条件 b 値, β は一括して Table. 1, 2 に示す。なお, b 値は中間主応力 σ_2 の相対的大きさを示すパラメーターであり $b = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ で表され, $b = 0$ のときは三軸圧縮 ($\sigma_2 = \sigma_3$), $b = 1$ のときは三軸伸張 ($\sigma_2 = \sigma_1$) に相当する。

5. 試験結果及び考察

5. 1 圧密試験

(1) 一方向拘束圧密

Fig. 4 は一方向拘束圧密の最小主ひずみ ϵ_3 の経時変化を表す。なお、図中には $\beta = 0^\circ$ の間隙水圧 u 及び、 $\sigma_3' / \sigma_1' | \epsilon_2 = 0$ も併せ示している。 ϵ_3 及び $\sigma_3' / \sigma_1' | \epsilon_2 = 0$ は、間隙水圧の消散とともに一定の値に収束している。 ϵ_3 は、 $\beta = 90^\circ$ の場合ゼロであり、 β の減少に伴い膨張が増大し、 $\beta = 0^\circ$ で最大値 (-2.9%) となっている。

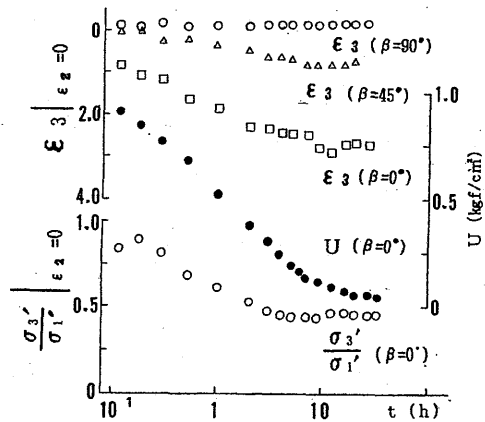
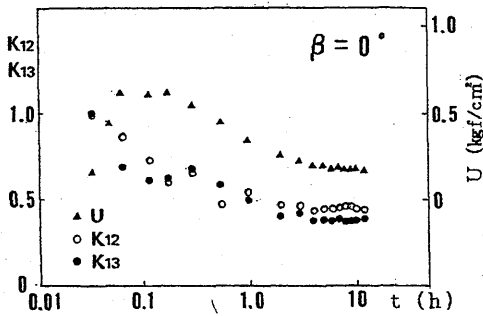
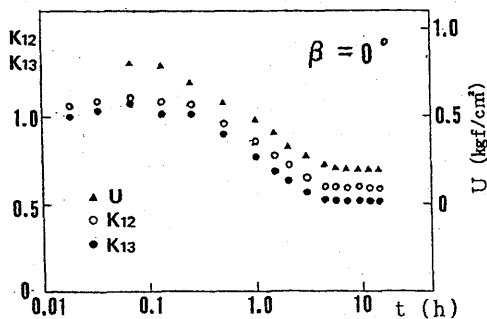
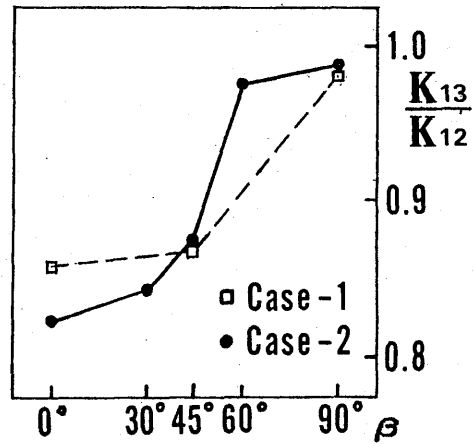


Fig. 4 Results of One-Direction Fixed Consolidation Test

(2) 二方向拘束圧密 (Ko 圧密)

異方静止土圧係数として、 $K_{12} = \sigma'_2 / \sigma'_1 \mid \epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$ 、 $K_{13} = \sigma'_3 / \sigma'_1 \mid \epsilon_2 = \epsilon_3 = 0$ を定義する。Fig. 5 (a), (b)は一例として Ko 圧密の $\beta = 0^\circ$ の K_{12} 、 K_{13} の経時変化を示している。また、構造異方性の尺度として K_{13}/K_{12} の収束値(間隙水圧ゼロ時の値)を採用し、切り出し角 β との関係を図. 6 に示している。

Fig. 5 (a), (b)より、異方性の尺度 K_{12} 、 K_{13} は、Case-1、Case-2 共に間隙水圧の消散とともに一定の値に収束するのがわかる。また、Fig. 6 からは次のことが言える。 $\beta = 90^\circ$ の場合、どちらも $K_{13}/K_{12} = 1$ であることから、供試体は堆積面内で等方性となり、二軸直交異方性とみなし得ることが明らかである。また、切り出し角 β の減少に伴い K_{13}/K_{12} は減少し、 $\beta = 0^\circ$ で最小値 (Case-1 = 0.87, Case-2 = 0.82)となる。このことは、 β の減少に伴い ϵ_2 方向のひずみをゼロに制御するに必要な反力(応力)は増大することを意味している。また、Case-1とCase-2の K_{13}/K_{12} の値の差は、構造異方性の保持の差を示している。従ってこの $K_{13}/K_{12} \sim \beta$ 関係は、構造異方性の度合の定量化への有力な指標となる。

Fig. 5(a) Temporal Change of K_{12} , K_{13} for Case-1Fig. 5(b) Temporal Change of K_{12} , K_{13} for Case-2Fig. 6 Cutting-Angle, β versus K_{13}/K_{12}

5. 2 セン断試験

Table. 1, 2にそれぞれ CIU と CKoU の b 値, β , セン断開始時の間隙比 e と破壊時の諸量を示す。

(1) 変形特性

Fig. 7に一例として、 $b = 0$ の有効応力比 (σ'_1 / σ'_3) と主ひずみの関係を示す。 $b = 0$ は、応力状態が $\sigma'_2 = \sigma'_3$ であり、理想的な等方体であれば $\epsilon_2 = \epsilon_3$ となるはずである。CIU の $\beta = 0^\circ$ (Fig. 7(a)) のとき、 ϵ_2 と ϵ_3 が大きく異なっているが、 $\beta = 90^\circ$ に近づくほど ϵ_2 と ϵ_3 の差が減少し、 $\beta = 90^\circ$ (Fig. 7(b)) では $\epsilon_2 = \epsilon_3$ となる。このことは堆積面内より、堆積面の法線方向に膨張が顕著であること、すなわち予圧密時に付与した構造異方性が十分保持されていることを意味し、鬼塚ら³⁾の指摘とも一致する。図は省略したが、 $b = 1.0$ のときは ϵ_2 と ϵ_3 に同様のことが言えるが、 $b = 0$ ほど顕著でなく、 $b = 0.5$ のときは、変形に及ぼす構造異方性の影響は最も小さいことが認められる。CKoU の $\beta = 0^\circ$ (Fig. 7(c)) からは CIU よりも ϵ_2 と ϵ_3 の差が小さくなっている。これは異方圧密により構造異方性が乱され、逆に等方体としての性質を示すものと考えられる。

(2) 間隙水圧特性

Fig. 8は切り出し角 β と破壊時の間隙水圧との関係に着目したもので、CIU (Fig. 8(a)) では $\beta = 90^\circ$ の場合、 b 値にかかわらず破壊時の間隙水圧 ($\Delta U / \sigma_c$)_f は約0.75であり、既報^{5) 6)}の間隙水圧特性と一致するが、 $\beta < 90^\circ$ では、 b 値により大きく異なる。切り出し角との関係に注目すると、 $b = 0$ は β の影響が最も小さく、 $b = 0.5, 1.0$ は大きい。また、 β の増加に伴う間隙水圧の大きさも圧縮側 ($b = 0 \sim 0.5$) と伸張側

($b=0.5\sim 1.0$) でその様相を異にしている。CKoU (Fig. 8(b)) では CIU と異なり, $b=0$ の場合相対的に $(\Delta U/\sigma_c)_f$ が低くなっている。また全体的に最大値と最小値の差が小さく, β による影響が小さいことが認められる。

(3) 強度特性

切り出し角 β と破壊時の有効応力比 $(\sigma'_1/\sigma'_3)_f$ の関係を Fig. 9 に示す。CIU (Fig. 9(a)) では, 先の間隙水圧特性と同様 $b=0$ が β の影響が最も小さく, $b=0.5, 1.0$ で β の影響を強く受ける。また圧縮

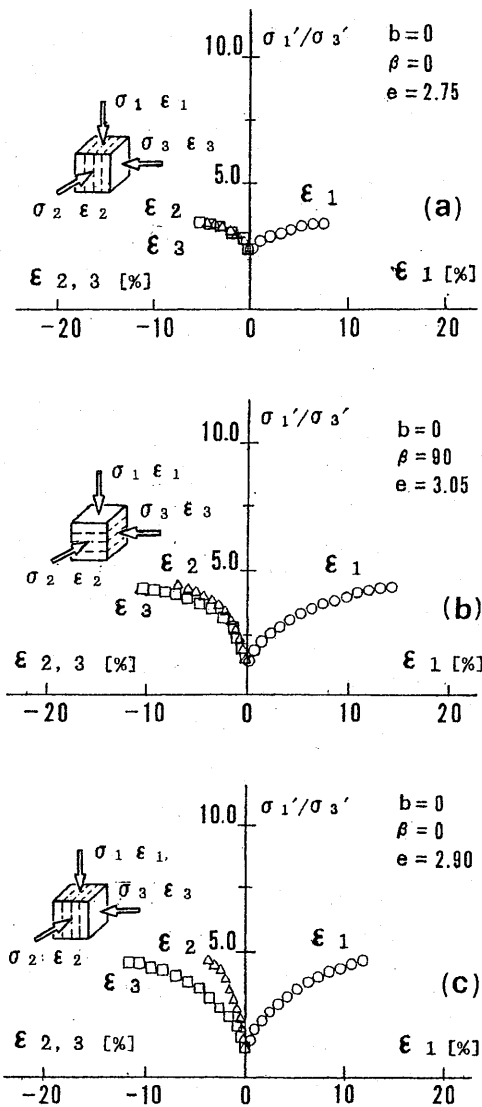


Fig. 7 Effective Stress Ratio-Principal Strains Relationship for CIU, CKoU

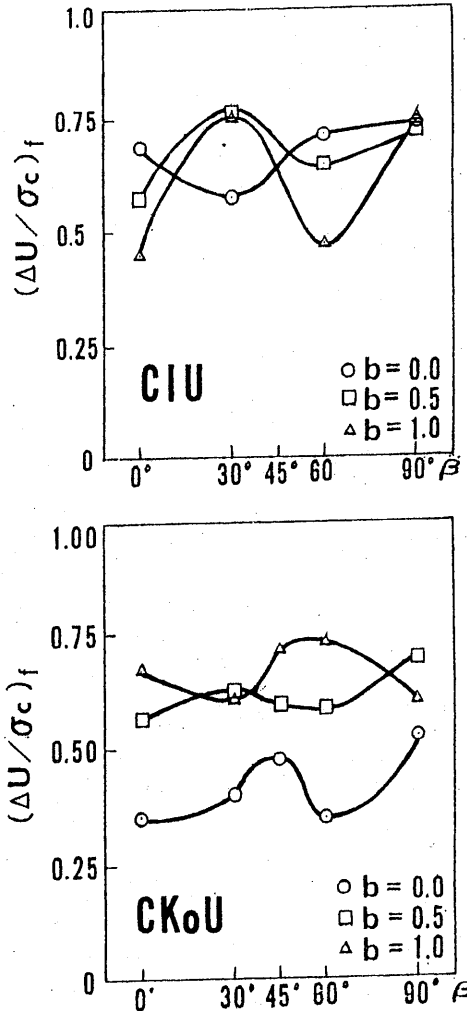


Fig. 8 Relation between Cutting Angle, β and Pore Water Pressure at failure

($b=0$) で $(\sigma'_1/\sigma'_3)_f$ は $\beta=30^\circ$ で最小値, $\beta=60^\circ$ で最大値を示すが, 伸張側 ($b=0.5\sim 1.0$) では, 相反する傾向を示す。CKoU (Fig. 9(b)) では, CIU に比べ全体的に β の影響が小さくなっていることが分かる。CIU の圧縮条件 ($b=0$) における β と $(\sigma'_1/\sigma'_3)_f$ の関係は, 鬼塚ら³⁾ の結果と全く同様であり, 潜在すべり面と推積面のなす角度から, この特性は定性的に説明し得る。なお, β が $0^\circ\sim 45^\circ$ と β が $45^\circ\sim 90^\circ$ では反対の様相を示すとの知見は, 三笠ら¹⁾ のいう主働せん断・受働せん断が, それぞれ圧縮・伸張と対応していると考えれば説明がつく。

Fig.10は, 縦軸に破壊時の有効応力比の最大値と最小値の差 D_m をとり横軸に b 値をとって関係を示したものである。いずれの b 値においても, D_m は CKoU

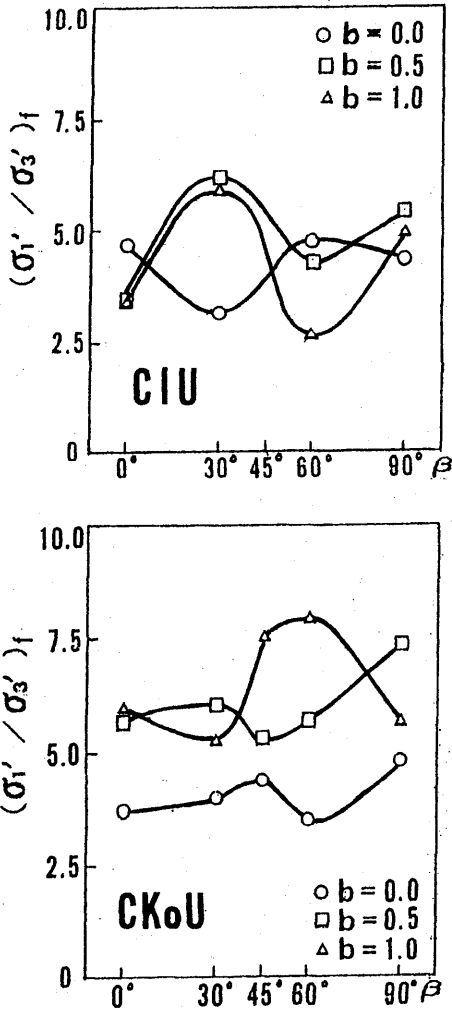


Fig. 9 Relation between Cutting Angle, β and Effective Stress Ratio at failure

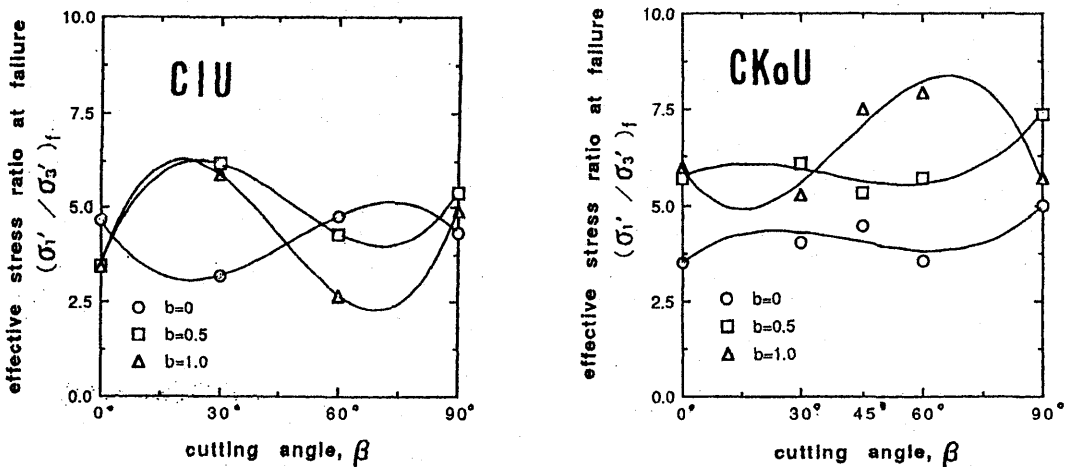


Fig.11 Correlation between Observed value and Three-dimensional Curve

よりも CIU の方が大きい。これは、CIU の方がより異方性が保存されていることを明らかにしている。 b 値が 0 から 1 に移行するに伴い、CIU, CKoU とともに D_m の差及び、それぞれの D_m の値が大きくなっている。これは、 $b=0$ (圧縮側) から $b=1.0$ (伸張側) になるにつれ、強度特性 $(\sigma'_1 / \sigma'_3)_f$ が構造異方性の影響をより強く受けることを意味し、さらに圧密過程の相違による乱され具合に着目すれば、 $b=0$ よりも $b=1.0$ の方がより異方圧密による構造異方性の等方化の度合いが大きくなっているのが分かる。

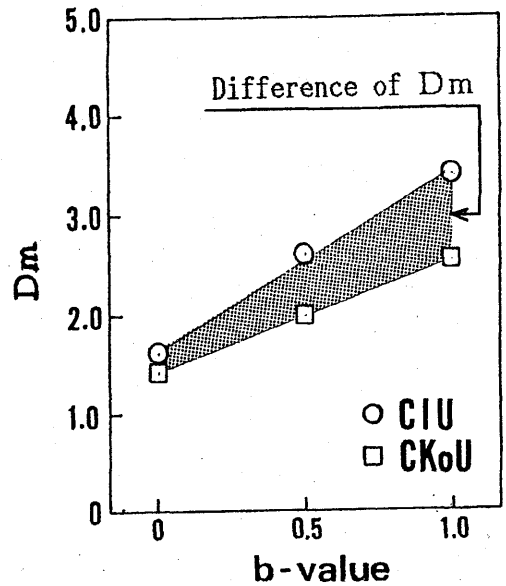


Fig.10 Difference between Maximum and Minimum of Effective Stress Ratio at failure, D_m versus b -value

6. 強度特性の定式化

切出し角 β 及び圧密履歴の相違が、強度特性に及ぼす影響の定式化を試みた。CIU, CKoU 両試験における b 値の違いによる強度出現を、切出し角 β を変数とする高次方程式で近似すると、 β の三次曲線が最も Fig. 9 の実測値と一致した。

Fig.11(a)(b)はそれぞれ、CIU, CKoU 両試験における破壊時の有効応力比の実測値と三次曲線との相関関係を示している。CIU の方が CKoU よりも三次曲線と一致しているが、どちらも高い相関性を示しており、今後構造異方性を考慮した力学特性のモデル化には、この切出し角 β を変数とした三次式を導入して行く予定である。

7. 結論

一連の試験結果から、構造異方性を有する飽和沖積粘土に関して、次の諸特性が明らかになった。

1) 一方向拘束圧密において ε_3 の収束値は、 $\beta=90^\circ$ の場合ゼロであり、 β の減少に伴い膨張が増大する。

2) 二方向拘束圧密 (Ko 圧密) において、堆積面の法線方向により膨張しようとするひずみをゼロに制御するには、圧密開始時の初期応力の違いにかかわらず、切出し角 β の減少に伴って、より大きな反力を必要とする。すなわち、Ko 圧密 ($\varepsilon_2=\varepsilon_3=0$) における、 ε_2 , ε_3 方向の静止土圧係数 K_{12} と K_{13} の比は、構造異方性への有力な指標となり得る。また、初期応力の違いは構造異方性の保持に影響を与える。

3) 破壊時の間隙水圧 ($\Delta U/\sigma_c$)_f、有効応力比 (σ'_1/σ'_3)_f とともに圧縮 ($b=0$) が β の影響が最も小さく、伸張側 ($b=0.5\sim 1.0$) で切出し角 β の影響を強く受ける。

4) CKoU は、CIU よりも β の影響が小さく、より力学特性が等方化している。圧密履歴の相違 (等方・異方) が、付与されている構造異方性の等方化に差異をもたらす。

5) 切出し角 β と破壊時の有効応力比の関係は、 β を変数とする三次式で表される。

6) 構造異方性を有する実地盤を考慮する場合には、荷重中心直下の主働域 ($b=0$) から受働域 ($b=1$) に移行するに伴い構造異方性の強度特性に与える影響が大きく変化することに、十分留意しなければならない。

8. あとがき

破壊時の間隙水圧、有効応力比とともに圧縮側が切出

し角の影響が最も小さく、伸張側で切出し角 β の影響を強く受ける事実、および圧縮側と伸張側で強度特性が逆転する事実は、構造異方性を有する地盤の支持力、安定解析にとって重要である。今後は本研究の成果を踏まえ、Fig. 2 に示すように構造異方性の定量化及び、三主応力下における力学特性のモデル化を行い、さらには構造異方性を考慮した実地盤の経時的変形安定解析手法の構築に努めて行きたい。

謝辞

末筆ながら本研究の実験に協力頂いた、有須田富雄 (現青木建設㈱)、鎌塚茂伸 (現三井石化産資㈱)、古澤正彦 (現東京都庁)、山口洋介 (現長崎市役所)、田添耕治 (現住友建設㈱) 各君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 三笠・高田・大島；一次元圧密粘土と自然体積粘土の非排水強度の異方性，土と基礎，Vol. 32, No. 11, pp. 25-30, 1984
- 2) 東・高山；有明粘土の強度異方性，農業土木学会論文集，Vol. 119, pp. 39-47, 1985
- 3) 鬼塚・林・平田・村田；有明粘土の異方性について，土質工学会論文報告集，Vol. 16, No. 3, pp. 111-121, 1976
- 4) Lade, P. V: Cubical Triaxial Apparatus for Soil Testing, Geotechnical Testing Journal, Vol. 1, No. 2, pp. 93-101, 1979
- 5) 棚橋・川口他；三主応力下における有明粘土の強度変形特性，長崎大学工学部研究報告第27号，pp. 165-173, 7月, 1986
- 6) 棚橋・川口他；三主応力下における正規圧密粘土のせん断特性，第20回土質工学研究発表会，Vol. 1, pp. 417-418, 1985
- 7) 棚橋・川口他；三主応力下における等方圧密粘土の非排水せん断特性，第21回土質工学研究発表会，Vol. 1, pp. 431-432, 1986
- 8) 棚橋・有須田他；有明粘土の力学的特性に及ぼす構造異方性の影響について，土木学会西部支部研究発表会概要集，pp. 438-439, 1988
- 9) 棚橋・山中他；構造異方性を有する正規圧密粘土の力学的特性に関する実験的研究，土木学会西部支部研究発表会概要集，pp. 410-411, 1990
- 10) 棚橋・山中他；正規圧密粘土の力学特性に及ぼす構造異方性の影響，第25回土質工学研究発表会，Vol. 1, pp. 649-652, 1990