

臨海部に堆積する沖積粘性土地盤の強度異方性

Undrained Strength Anisotropy of Aluvial Marine Clay

正垣 孝晴*・須藤 剛史**

Takaharu.Shogaki and Tsuyoshi.Sudho

The undrained strength anisotropy of aluvial marine clay were investigated through a unconfined compression tests. In the case of the Kuwana clay and Amagasaki clay, the both ratios of q_u and E_{50} of horizontal specimen to the vertical specimen are about 0.8, and the ratios of that of Tokuyama clay are about 0.6 and 0.5, respectively. The relationship between undrained strength and angle between axis of sample and horizontal is given as a function of I_p , q_u and overconsolidation ratio. Keywords: (clay, undrained strength, anisotropy)

1. はじめに

地盤の安定および変形問題に関する設計を精度良く行うために、自然地盤の異方性を取り入れた解析が行われている^{1)・2)}。従来、自然地盤の強度異方性の測定は、堆積面からの角度を変えた試料採取が困難であることから、ベーン縦横比を変えたベーン試験³⁾や非排水圧縮強度と伸張強度の比⁴⁾が一般に採用されていた。深度方向に採取した通常の試料から、強度異方性が直接測定できれば有利である。著者⁵⁾は、直径(1辺) $d15\text{mm}$ の円形および正方形断面の供試体が、 h/d (h :高さ)や塑性、地盤強度の広い範囲で標準寸法($d35\text{mm}$, $h80\text{mm}$)のそれと同じ応力 σ ~ひずみ ϵ 関係を与えることを示した。そして、シウォールサンプラで採取した試料($d75\text{mm}$)に対し、堆積面からの切り出し角度を変えた小サイズ(S)供試体を用いた一軸圧縮試験から強度異方性が測定できること⁶⁾を示した。

本稿では、大阪湾や瀬戸内海表層部に広く堆積する沖積海成粘性土を対象として、芦屋市と徳山市臨海部の深度方向に採取した試料について、S供試体の適用性を検討した後にS供試体を用いた強度異方性を先の報告⁶⁾と同じ方法で測定した。そして、桑名市⁶⁾と尼崎市⁷⁾の粘性土に対する結果を統合して、臨海部に堆積する沖積粘性土地盤の強度異方性に及ぼす堆積地域、塑性、地盤強度、応力履歴の影響を定量的に検討した。

2. 供試土と試験方法

本研究で用いた試料は、芦屋市と徳山市の臨海部から採取した乱さない沖積海成粘性土である。試料採取は、固定ピストン式シウォールサンプラによって注意深く行われた。図-1(a), (b)は、それぞれ徳山、芦屋の土性図である。

徳山は水深が15m程度あり、標高-(15~25)mの深度に沖積粘性土が堆積している。徳山粘土は、標高-25m付近で40%程度砂分を含むが、それ以浅では粘土、シルトを同程度含む均質な粘性土層である。一軸圧縮強度 q_u と圧密降伏応力 p_o に着目すると、深度とともに漸増している。過圧密比OCRは(1.2~2)程度の値を示すが、地質学的に正規圧密地盤と判断される。

芦屋の調査地では、5年程前に7m程度の埋立てが行われた。標高-(13~23)mの粘性土は、この増加荷重による圧密が終了していない未圧密地盤である。これらの試料の物理・力学的性質が表-1に示される。徳山、芦屋粘土の塑性指数 I_p は(18.6~96.4)の範囲である。

携帯型一軸圧縮試験機⁵⁾を用いてJIS A 1216に従う一軸圧縮試験を行った。S供試体の適用性の検討では、1試料片($d75\text{mm}$, $h100\text{mm}$)から通常サイズ(O)の供試体($d35\text{mm}$, $h80\text{mm}$)を1個、S供試体($d15\text{mm}$, $h35\text{mm}$)を2個作成した。また、異方性の検討を行う場合は、 $d15\text{mm}$, $h35\text{mm}$ の供試体サイズを用いた。堆積面からの供試体の切り出し角度 β は($0\sim90^\circ$)の、

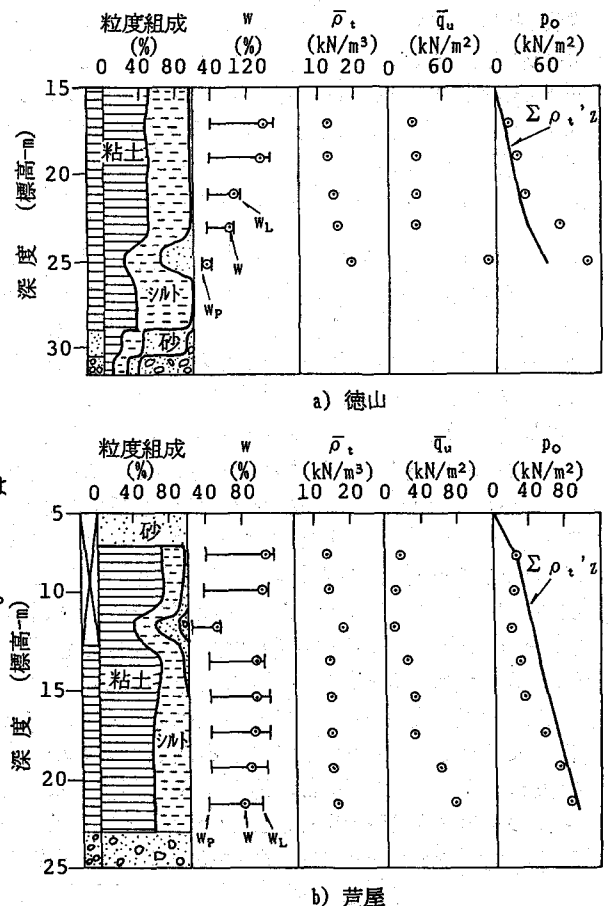


図-1 土性図

*正会員 防衛大学校土木工学教室 (239 横須賀市走水1-10-20)

**正会員 興亜開発(株)

表-1 供試土の物理・力学的性質

試 料		徳 山					芦 屋				
		T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8
標 高 (m)		17.4	19.4	21.4	23.4	25.4	13.4	15.4	17.4	19.4	21.4
粒 度 特 性	レ キ (%)	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0
	砂 (%)	2	2	2	2	41	4	3	3	1	4
	シルト (%)	45	47	51	46	32	26	23	31	33	32
	粘土 (%)	53	51	47	52	25	70	74	66	66	64
	最大粒径 (mm)	0.425	0.425	2.000	0.425	4.75	0.85	0.85	0.425	0.85	0.425
液 性 限 界 w_L (%)		138.1	130.5	100.5	89.5	32.7	106.8	110.6	110.6	105.7	96.1
塑 性 指 数 I_p (%)		96.4	87.90	67.0	57.6	18.6	67.14	71.0	69.3	65.7	59.0
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.641	2.615	2.672	2.677	2.653	2.686	2.659	2.665	2.654	2.692
日 本 統 一 分 類 法		(CH)	(CH)	(CH)	(CH)	(CL)	(CH)	(CH)	(CH)	(CH)	(CH)
一軸圧縮強度 q_u (kN/m ²)		27.0	30.9	30.3	29.3	113.4	23.2	32.6	31.7	56.5	77.4
変形係数 E_{50} (kN/m ²)		1130	1400	1260	1330	2670	900	840	790	3050	3870
圧密降伏応力 p_c (kN/m ²)		10.8	20.4	36.0	74.0	111.0	28.5	34.5	58.0	74.0	86.0
有効土被り圧 $\Sigma \rho_e' z$ (kN/m ²)		8.9	16.8	26.2	36.5	54.1	51.4	60.8	70.3	80.6	92.0
過 圧 密 比 OCR		1.213	1.215	1.374	2.027	2.051	0.554	0.567	0.825	0.918	0.935

範囲とし、1試料片からは各 β に対し(2~3)個の供試体を作成した。 $\bar{q}_u, \bar{E}_{50}$ は q_u, E_{50} の平均値である。一軸圧縮試験は1%/minの軸ひずみ速度でせん断した。 q_u は15%以下の軸ひずみ ε に対する最大応力とした。また、変形係数 E_{50} は c_u/ε_{50} と定義している。ここに、 ε_{50} は $q_u/2$ に対するひずみである。

3. 非排水強度特性に及ぼす供試体寸法の影響

0とS供試体の $\sigma \sim \varepsilon$ 関係の1例として、芦屋T-8の結果が図-2に示される。0とS供試体の応力~ひずみ関係は同じと判断される。 q_u に関して、S供試体と0供試体のそれらの値の比が図-3に I_p に対してプロットされる。徳山粘土、芦屋粘土ともに、 q_u 比は I_p の違いによらず約1の一定値と判断される。このような傾向は、他の地域の沖積粘性土⁸⁾や洪積粘性土⁹⁾、珪藻泥岩¹⁰⁾のそれと同じである。また、図-4に0供試体に対するS供試体の E_{50} 比と I_p の関係を示す。 E_{50} 比は I_p によらずほぼ1の一定値である。すなわち、S供試体は徳山、芦屋の沖積粘性土に対しても0供試体と同じ強度・変形特性を持つことが分かる。

2. で述べたように、芦屋粘土は未圧密粘土である。未圧密状態の粘性土に対するS供試体の適用性を検討することは、埋立地盤の工事例が多くなった今日の実務の趨勢を考えると必要なことである。そこで、S供試体の非排水強度特性に及ぼす過圧密比OCRの影響を検討する。図-5, 6は、それぞれ q_u 比、 E_{50} 比をOCRに対してプロットしたものである。 q_u 比、 E_{50} 比は、OCRの値の違いによらずほぼ1の一定値を示している。このことは、芦屋粘土のような未圧密

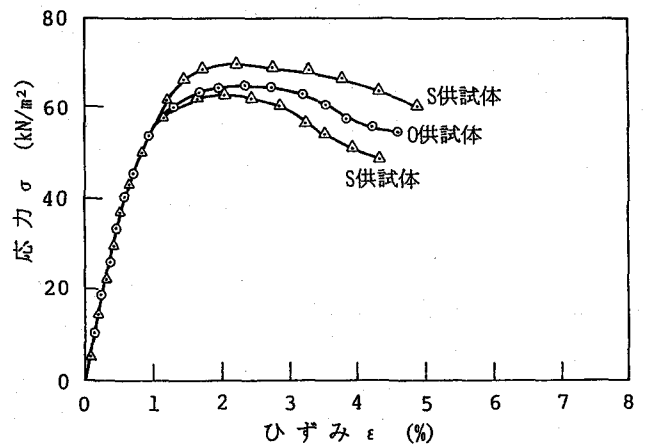
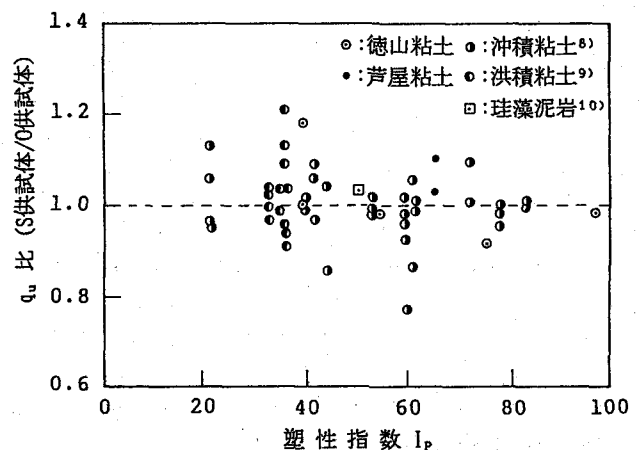


図-2 応力とひずみの関係(芦屋T-8)

図-3 q_u 比と I_p の関係

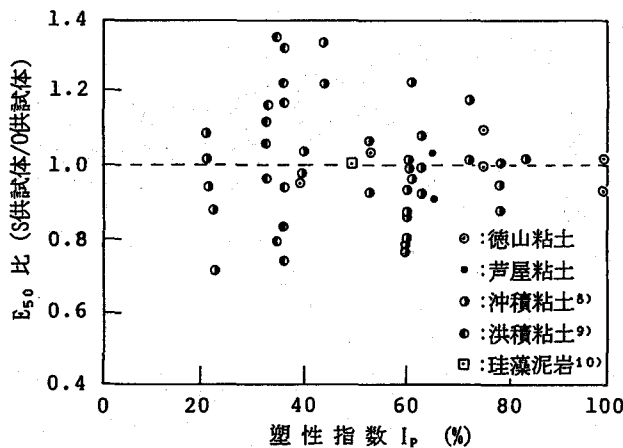


図-4 E_{50} 比と I_p の関係

地盤の強度異方性を検討する場合にもS供試体が有用であることを意味している。

4. 強度異方性に及ぼす調査地、塑性、強度、応力履歴の影響

図-7は、1例として徳山T-1について堆積方向と最大主応力のなす角 β が $\sigma \sim \epsilon$ 関係に与える影響を見たものである。図中の各曲線は β によって記号を変えて示している。 β の増大によって曲線の立ち上がり勾配が低下し、破壊ひずみ ϵ_x が大きくなっている。特に $\beta = 60^\circ, 90^\circ$ では σ のピークが明瞭に現れない。この傾向は試料の違いによらず共通している。また供試体の破壊すべり面の角度は β によらず約 60° であった。

図-8,9は、それぞれ各 ϵ および σ レベルに対する割線変形係数 E を示している。 $E \sim \epsilon$ 曲線を見ると ϵ の小さい領域で E の変動は大きいが全体として双曲線の形状を示している。図-7の $\sigma \sim \epsilon$ 曲線を反映して、一定の ϵ 下で β の増大とともに E が低下する。また、 E は ϵ の増大によって β の値に関係なく一定値に収束する。一方、 E と σ/q_u の関係を見ると、 σ/q_u 値が一定の下で β の増大とともに E が低下している。このような傾向は、徳山の深さの異なる試料や芦屋粘土、桑名粘土⁶⁾、尼崎粘土⁷⁾のそれと同じである。

徳山粘土について、鉛直供試体 ($\beta=0$) の $\bar{q}_u$ に対する各 β の $\bar{q}_u$ の比と β の関係を図-10に示す。非排水強度の異方性は、すべり線の方角によって左右される。主応力の回転によって発生する間隙水圧の大きさが異なるのが理由¹¹⁾とされている。前述したように破壊すべり面の角度は β によらず約 60° であるため、 $(60-\beta)^\circ$ が堆積面と破壊すべり面のなす角度となる。図には、正規圧密状態に近い桑名粘土⁶⁾、尼崎粘土⁷⁾、Vienna粘土¹¹⁾の結果を併記している。 $\bar{q}_u$ 比は β が大きくなると低下し、 $\beta=90^\circ$ の $\bar{q}_u$ 比が他のそれより概ね小さい。徳山粘土の場合、 $\beta=90^\circ$ の $\bar{q}_u$ 比は平均で約0.6と尼崎⁷⁾や桑名⁶⁾、Vienna粘土¹¹⁾のそれ(約0.8)に比べて小さい。また、図-11は同様に徳山粘土の $\bar{E}_{50}$ 比と β の関係である。 $\bar{E}_{50}$ 比と β に $\bar{q}_u$ 比のようなエックな関係は見られないが、 $\beta=90^\circ$ の $\bar{E}_{50}$ 比は(0.3~0.8)の範囲にある。そして、この値は、桑名⁶⁾、尼崎⁷⁾の(0.6~1.0)に比べて小

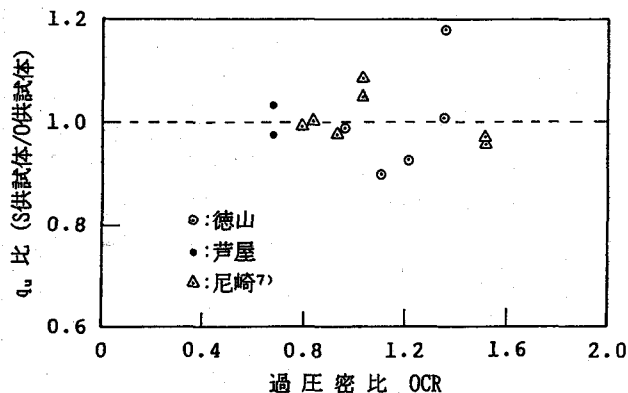


図-5 q_u 比とOCRの関係

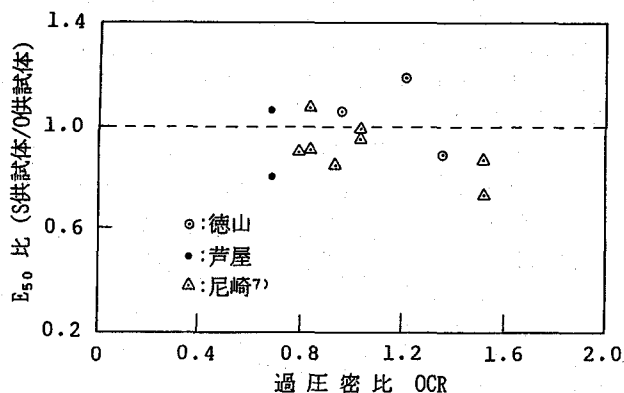


図-6 E_{50} 比とOCRの関係

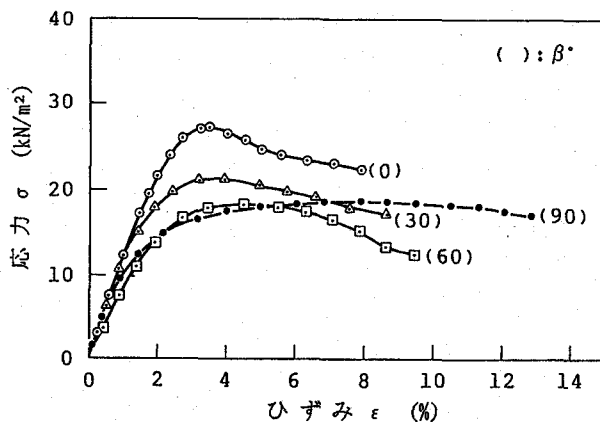


図-7 応力とひずみの関係(徳山T-1)

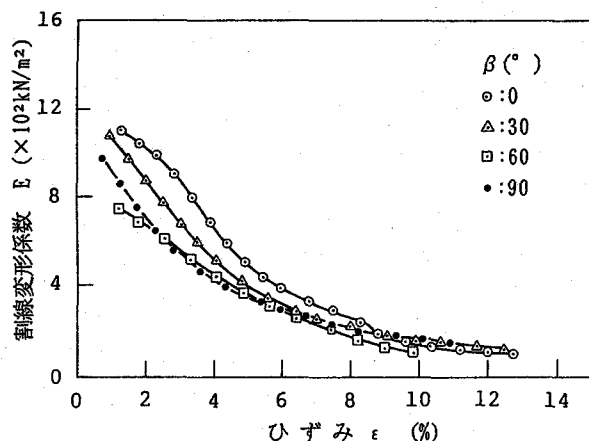


図-8 割線変形係数とひずみの関係(徳山T-1)

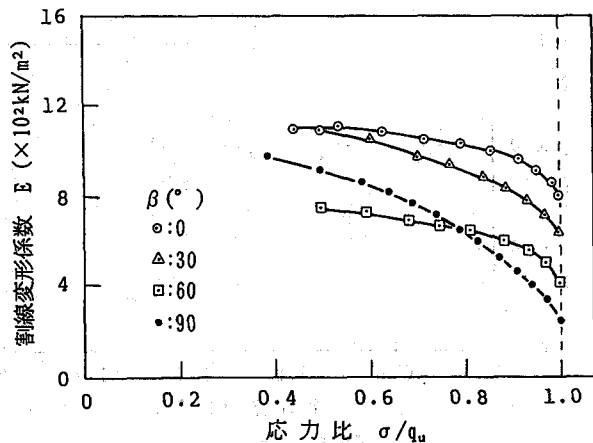


図-9 割線変形係数と応力比の関係(徳山T-1)

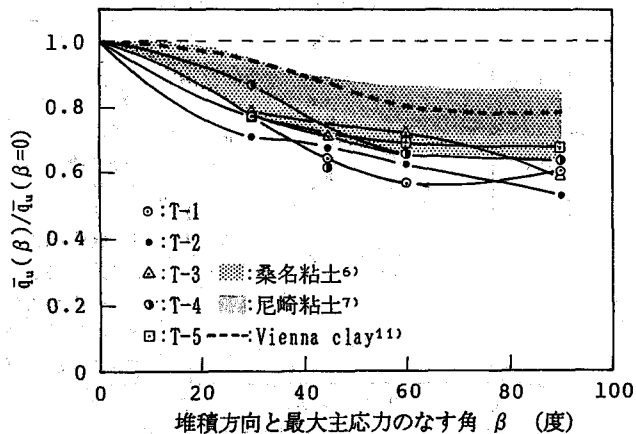


図-10 $\bar{E}_u$ 比と β の関係(徳山)

い。徳山粘土の場合、安定および変形解析に関し、他の地域と同じ安全率を用いると危険側の設計を行う可能性を示唆している。

桑名⁶⁾、尼崎⁷⁾、川田・来島・木節粘土¹²⁾の結果を統合して強度異方性に及ぼす調査地、塑性、強度、応力履歴の影響を検討する。図-12は塑性図である。 $I_p \approx (1 \sim 96)$ の広い範囲の粘性土を対象としていることが分かる。表-2は、鉛直供試体の $\bar{q}_u$ に対する各 β における $\bar{q}_u$ の比の平均値 q_u^* をまとめている。徳山粘土の q_u^* は β が大きくなると低下し、この傾向は桑名粘土、尼崎粘土のそれと同じである。図-13は、鉛直供試体の $\bar{q}_u$ に対する水平供試体($\beta=90$)の $\bar{q}_u$ の比と I_p の関係である。 $\bar{q}_u$ 比は I_p に関係なくほぼ一定値と判断される。Bjerrum¹³⁾やLadd⁴⁾は、非排水伸張強度と圧縮強度の比で定義した強度異方性が、低塑性土になるほど著しくなるとしている。低塑性土の方が k_0 値が小さく、一次元圧密状態における応力状態の異方性の程度が大きい¹⁴⁾のが理由である。しかし、このような関係があるのは桑名粘土の水平供試体の場合のみであり、他の粘性土では見られない。

図-14は、鉛直供試体の $\bar{q}_u$ に対する水平供試体のその比と鉛直供試体の $\bar{q}_u$ の関係である。正規圧密粘土に近い桑名粘土、徳山粘土に着目すると、 $\bar{q}_u$ が小さくなると $\bar{q}_u$ 比が減少し異方性が大きくなる。図-15に、 $\bar{q}_u$ 比とOCRの関係を示す。一般に、 K_0 圧密が進みOCRが大きくなると応力誘導異方性が顕著になり水平供試体の $\bar{q}_u$ は大きくなる。しかし、図-15においてOCR<1.6と小さいため、このような傾向は見られない。OCR=0.6の未圧密粘土の場合、 $\bar{q}_u$ 比=1.0である。これは荷重増加による粘土の攪乱が起因して、強度異方性が消滅するため¹⁵⁾と考えている。今後、粘土鉱物を含む微視的構造特性(固有異方性)や K_0 値の測定等の詳細な検討が必要であると考えている。

図-16, 17, 18は、それぞれ鉛直供試体の $\bar{E}_{50}$ に対する各 β の $\bar{E}_{50}$ 比と I_p 、 $\beta=0$ の $\bar{q}_u$ 、OCRの関係である。 $\bar{E}_{50}$ 比に与える $\bar{q}_u$ の影響は見られない。徳山粘土の場合、一定の I_p 下で $\bar{E}_{50}$ 比は β が大きくなると小さくなるが、 I_p と $\bar{E}_{50}$ 比の間には一定の関係は見られない。しかし、OCRと $\bar{E}_{50}$ 比には負の関係がある。これは、OCRが大きくなると変形に対する異方性が大きくなることを意味している。このような傾向は有明粘土¹⁶⁾でも見られる。

図-19は、 $\beta=0$ の破壊ひずみの平均値 $\bar{\epsilon}_f$ に対する各 β のその比

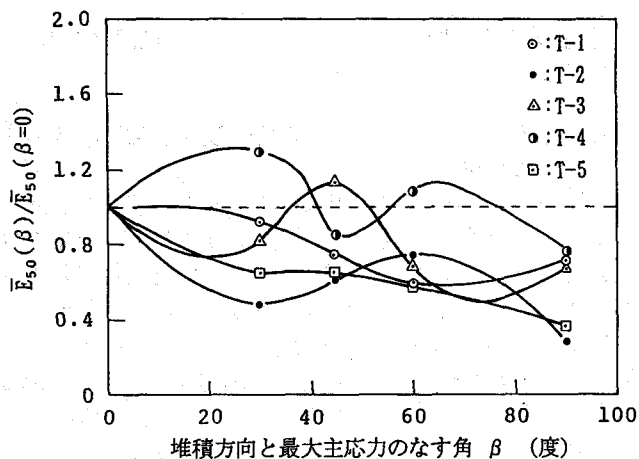


図-11 $\bar{E}_{50}$ 比と β の関係(徳山)

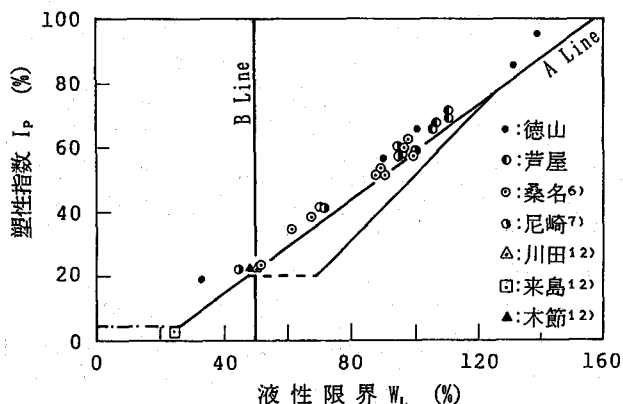


図-12 塑性図

表-2 q_u 比の平均値

β (度)	q_u^*			
	桑名 ⁶⁾	尼崎 ⁷⁾	徳山	芦屋
15	0.932	—	—	—
30	0.813	0.895	0.786	0.967
45	0.842	0.913	0.647	1.107
60	0.779	0.787	0.703	0.949
90	0.788	0.789	0.608	1.084

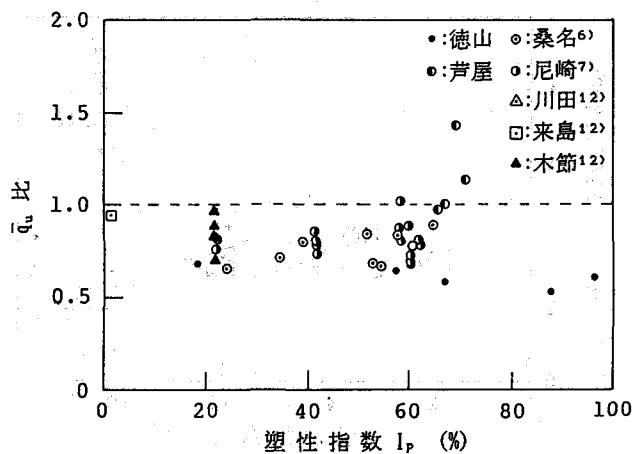


図-13 $\bar{q}_u$ 比と I_p の関係

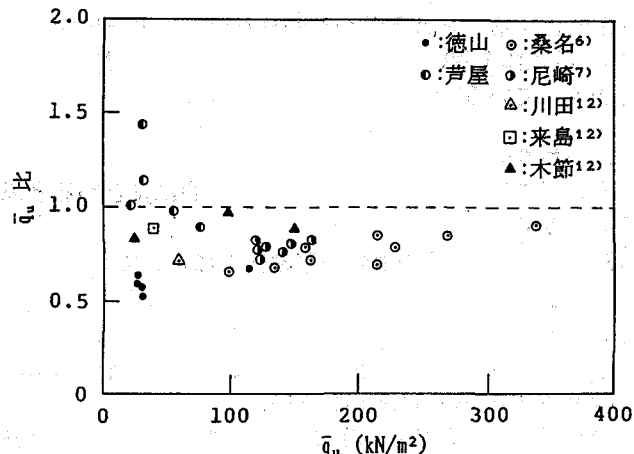


図-14 $\bar{q}_u$ 比と $\bar{q}_u$ の関係

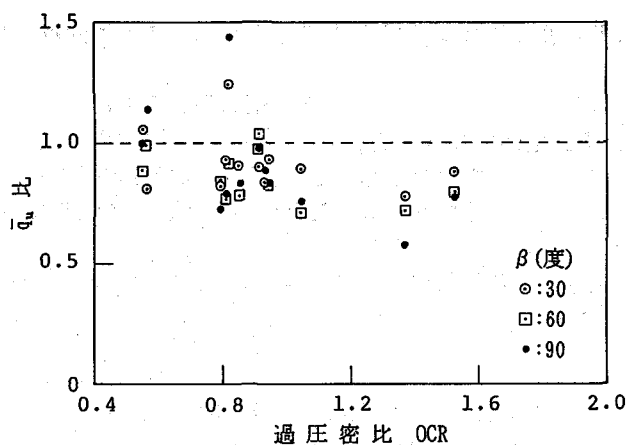


図-15 $\bar{q}_u$ 比とOCRの関係

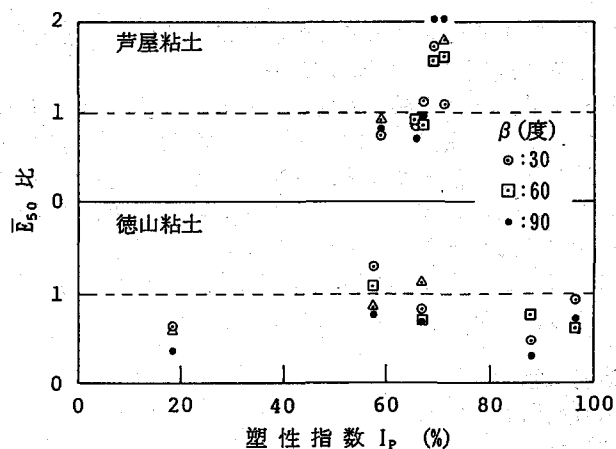


図-16 $\bar{E}_{s0}$ 比と I_p の関係

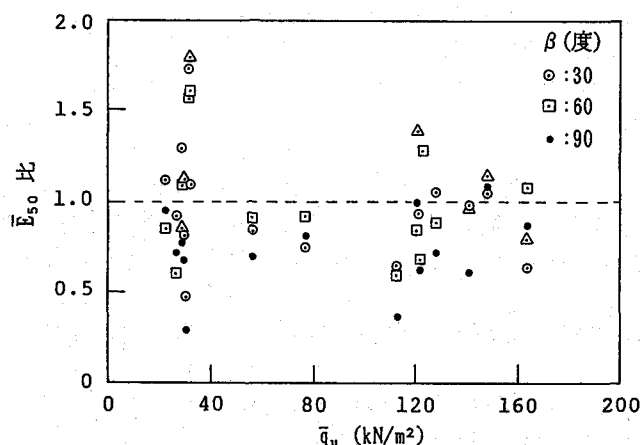


図-17 $\bar{E}_{s0}$ 比と $\bar{q}_u$ の関係 (新潟、徳山、芦屋)

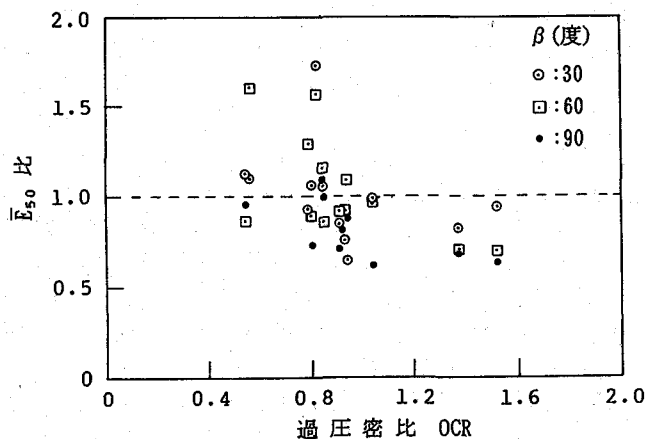


図-18 $\bar{E}_{s0}$ 比とOCRの関係 (新潟、徳山、芦屋)

($\bar{\epsilon}_z(\beta)/\bar{\epsilon}_z(\beta=0)$)を I_p に対してプロットしたものである。 $\bar{\epsilon}_z$ 比は I_p の減少に伴って増大する傾向が見られ、この傾向は $\beta=90^\circ$ の場合に顕著である。中瀬ら¹⁷⁾は、三軸圧縮試験に対する三軸伸張試験の破壊ひずみ比($\epsilon_z)_E/(\epsilon_z)_C$ と I_p の関係を検討し、 I_p が減少するに従って破壊ひずみ比が急激に増大している。図-19の傾向は中瀬ら¹⁷⁾の結果と概ね一致している。これは、低塑性土になるほど破壊ひずみに関する異方性が大きいことを意味している。

地盤の強度異方性に影響する要因とそれが結果に及ぼす程度は複雑であり、特定のパラメータから一義的に強度・変形に関する異方性を求めることは現時点では困難であることが分かった。異方性を考慮した安定・変形解析を行うには設計対象地盤で強度・変形に関する異方性を直接測定することが望ましい。S供試体による一軸圧縮強度は、強度異方性を考慮した安定解析のための非排水強度として実務で充分適用可能であると考えている。しかし、変形に関しては、一軸圧縮試験の場合、せん断時の拘束がないために拘束圧の大きな深部破壊における変形特性

を定量化することは困難かも知れない。この点に関しては、S供試体を用いて圧縮・伸張条件下の三軸試験の実施を予定している。

5. おわりに

本研究で得られた主要な結論を要約的にまとめると以下のようである。

- 1) S供試体は、本調査地の沖積粘性土においてもO供試体と同じ強度・変形特性を持つ。
- 2) β が大きくなると $\sigma \sim \varepsilon$ 曲線の立ち上がり勾配が低下し、破壊ひずみ ε_f が大きくなる。この傾向は、地盤強度やOCRの大小に依存しない。
- 3) β が増大すると各 σ および ε レベルで E が低下する傾向にある。この傾向は、塑性や強度、OCRの大小に依存しない。
- 4) $\beta=0^\circ$ の $\bar{q}_u$ に対する各 β の $\bar{q}_u$ 比は、 β の増大とともに低下し $\beta=90^\circ$ の $\bar{q}_u$ 比が概ね最小となる。この傾向は、塑性やOCRによらず共通している。
- 5) 桑名粘土と尼崎粘土の場合、 $\beta=0^\circ$ の $\bar{q}_u$ に対する $\beta=90^\circ$ のその比は約0.8であるが、徳山粘土のそれは約0.6である。同様に E_{50} 比の場合、前者で0.8、後方で0.5である。地盤の強度・変形特性に与える異方性の要因とそれが結果に及ぼす程度は複雑であり、特定のパラメータから一義的に異方性を求めることは現時点では困難である。
- 6) 増加荷重に起因した未圧密粘土の場合、 $OCR=0.6$ で $\bar{q}_u, E_{50}$ の異方性はなくなる。これは攪乱によって固有異方性が消滅するためと考えられる。
- 7) $\beta=0^\circ$ の $\bar{\varepsilon}_f$ に対する各 β の $\bar{\varepsilon}_f$ 比は、 I_p が小さくなると大きくなる。特に、 $\beta=90^\circ$ においてこの傾向は顕著であり、 $I_p=40$ で $\bar{\varepsilon}_f$ 比 ≈ 3 である。

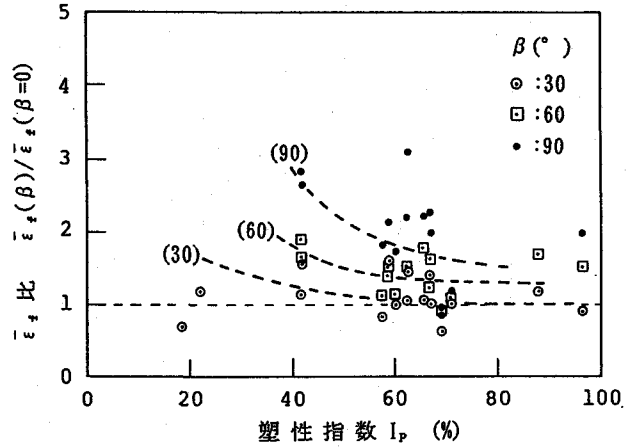


図-19 $\bar{\varepsilon}_f$ 比と I_p の関係 (尼崎、徳山、芦屋)

参考文献

- 1) Lo, K.Y., : Stability of slopes in anisotropic soils, Proc., ASCE, Vol. 91, SM4, pp. 85-106, 1965.
- 2) Sani, A.C. and Sreenivasulu, V., : Strength anisotropy on slope stability and bearing capacity of clays, Proc. 7th ICSMFE, Vol. 1, pp. 659-667, 1969.
- 3) Aas, G., : A study of the effect of vane shape and rate of strain on the measurement of in-situ shear strength of clays, Proc. 6th ICSMFE, Vol. 1, pp. 141-145, 1965.
- 4) Ladd, C.C., Foott, R., Ishihara, K., Schlosser, F. and Poulos, H., : Stress-deformation and strength characteristics, Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, pp. 421-49, 1977.
- 5) Shogaki, T., T., : Strength properties of clay by protable unconfined compression apparatus, International Conference on Geotechnical Engineering for Coastal Development, pp. 85-88, 1991.
- 6) 正垣・白川・木暮：正規圧密粘性土地盤の強度異方性、第26回土質工学研究発表会講演集、pp. 641-642, 1991.
- 7) 正垣・須藤・河東・永島：大阪湾に堆積する沖積粘性土地盤の強度異方性、関西地盤の地質構造と土質特性に関する最近の知見シンポジウム論文集、pp. 41-46, 1992.
- 8) 正垣・塚本・須藤：非排水強度特性の形状・寸法効果に及ぼす地盤強度の影響、第20回土木学会関東支部概要集、pp. 194-195, 1993.
- 9) Shogaki, T., Watanabe, K. and Sudho, T., : Effects of size and shape of specimen on undrained shear strength of diluvial clay, Int. Symposium on Hard soils and soft rocks, 1993.
- 10) 正垣・塚本・松本・道：珪藻泥岩の非排水強度特性に及ぼす供試体の寸法効果、第28回土質工学研究発表会講演集、1993.
- 11) Duncan, J.M. and Seed, H.B., : Anisotropy and stress reorientation in clay, Proc. of ASCE, Vol. 20, SM5, pp. 21-50, 1966.
- 12) 正垣・丸山・森山：粘性土地盤の強度異方性に及ぼす塑性と地盤強度の影響、土木学会第47回年次学術講演概要集、pp. 406-407, 1992.
- 13) Bjerrum, L., : Problems of soil and construction on soft clays and structuaily unstable soils, Proc. 8th ICSMFE, pp. 111-159, 1973.
- 14) 三笠・高田・大島：一次元圧密粘土と自然堆積粘土の強度異方性、土と基礎、Vol. 32, No. 11, pp. 25-30, 1984.
- 15) 正垣ら：一軸圧縮下の有効応力経路に及ぼす異方性の影響、第28回土質工学研究発表会講演集、1993.
- 16) 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.
- 17) 中瀬・日下部・亀井・鈴木：粘性土地盤の異方性と塑性指数、土と基礎、Vol. 32, No. 11, pp. 19-24, 1984.