

沖積海性粘土の原位置圧密パラメータの推定法

A method for estimating *In-situ* consolidation parameters of alluvial marine clay

正垣 孝晴*
Takaharu Shogaki

Sample disturbance was investigated in terms of the volumetric strain, ε_v , measured effective overburden pressure of $e - \log p$ curve plotted end-of-primary consolidation, EOP, and 24 hours after, STD, loading in the standard oedometer test. A series of unconfined compression tests and standard oedometer tests were performed on specimens of natural deposits of seven different sites in Japan. A method for estimating the preconsolidation pressure, σ'_p , compression index, C_c , and $e - \log p$ curve for the *in-situ* soil are proposed from the measured ε_v , σ'_p , C_c and I_p values of disturbed samples in the standard oedometer test.

Keywords: cohesive soil, consolidation, sample disturbance, volumetric strain

1. はじめに

標準圧密試験の間隙比 e と圧密圧力 p の対数の関係($e - \log p$)は、攪乱の影響を反映して変化する性質^{1), 2)}を利用して、標準圧密試験の有効土被り圧下の体積ひずみ ε_v と試料の乱れの間隔を室内試験によって明らかにした³⁾。そして、 ε_v を用いた原位置の圧密パラメータの推定法を示し我が国の異なる10の堆積地の海成粘性土について、塑性指数 I_p 、過圧密比 OCR 、堆積地がこの推定法に与える影響を検討した⁴⁾。これらの検討で用いた ε_v は、JIS A1217に規定された圧密試験とその整理法に依っているため、載荷24時間後(STD)の鉛直ひずみに相当する e と $\log p$ の関係から得ていた。

Mesri et alは、一次圧密終了時(EOP)に相当する鉛直ひずみ下の e と $\log p$ の関係が粘性土層の層厚の違いによらず一様に決定されることを見出し⁵⁾、実測沈下を精度良く説明できることを示している⁶⁾。また、Ladd⁷⁾は、EOPは通常の実務において十分に納得できる

概念であり、段階載荷の圧密試験ではSTDでなくEOPの $e - \log p$ が適していることを指摘している。

本稿では、STDとEOPによる ε_v に試料の乱れが及ぼす影響を検討し、STDを含めた原位置の圧密パラメータの推定法を検討する。主要な結論は、STDから得た ε_v 、圧縮指数 C_c 、圧密降伏応力 σ'_p は、EOPから得たそれより大きく、STDに対するEOPのこれらの比は試料の乱れの程度に依存しないことが明らかにされる。また、 I_p と ε_v から原位置の C_c 、 σ'_p を推定する方法が示される。

2. 供試土

供試土は、桑名市、岩国市、横浜市磯子区、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。指数的性質を表-1に示す。 I_p と q_u は、それぞれ(26~102)%, (15~220)kPaの広い範囲の土を対象にしている。

表-1 供試土の指数的性質

Sites	W_o (%)	W_l (%)	W_P (%)	I_P (%)	CF^* (-2 μ %)	σ'_{vo} (kPa)	σ'_p / σ'_{vo}	q_u (kPa)
Kuwana	34-71	51-95	25-38	26-57	3-30	99-205	1.2-2.9	92-220
Iwakuni 6	52-58	61-92	31-34	30-58	5-32	61-135	1.1-2.6	89-118
Iwakuni 11	99	110	38	72	30	66	1.8	49
Iwakuni 16	88	98	39	59	33	140	1.1	85
Iwakuni 81	60	81	38	42	25	117	1.9	147
Isogo 2	73	61	28	33	19	75	2.0	108
Tokuyama	68-130	82-150	29-48	48-102	36-42	8-57	0.95-3.1	15-54

*: Clay fraction, less than 2 μ m

* 正会員 防衛大学校 土木工学教室 (〒239 横須賀市走水1-10-20)

3. 実験方法と結果の整理方法

図-1²⁾は、試料の攪乱装置とその方法を示したものである。試料の乱れは、図-1 a)に示すサンプルチューブの刃先に試料変形装置を装着した後、押し出し装置によって与えた。チューブ内径の断面積に対する攪乱装置の断面積の比 R_a は、1.0, 0.95, 0.9, 0.8, 0.7である。これらの試料は、本稿でそれぞれA, B, C, D, Eと名付けている。試料Fは練り返し土であり、Aは“乱さない土”とみなしている。長さ80mmの試料がアルファベットの順にチューブから押し出された。この方法で得た乱れた試料の強度・変形特性は、現地のサンプリングから室内試験に至る過程で発生する要因によって乱れた試料のそれと同じ傾向を持つことは他の文献²⁾で確認している。

圧密試験と一軸圧縮試験に用いる供試体寸法は、それぞれ高さ h 20mm、直径 d 60mmと h 35mm、 d 15mmのS供試体⁸⁾である。 $I_p=(20\sim 85)\%$ 、 $q_u=(10\sim 220)$ kPaの広い範囲の土に対して、 h 80mm、 d 35mmの通常寸法の供試体とS供試体の強度・変形特性に差がないことは他の文献で確認している^{8), 9)}。

一軸圧縮試験の供試体数は、(4~7)、標準圧密試験のそれは1である。 $\bar{q}_u$ は(4~7)個の試験結果の平均値である。本研究の標準圧密試験は、荷重増分比1でコントロールされて行われた。各荷重増分に対する載荷期間は1日である。圧密係数 c_v と σ'_p 値は、それぞれTaylor法と三笠法に従っている。これらの方法は、土の圧密試験に

対する仕様書としてJISに規定されている¹⁰⁾。三笠とCasagrande法¹¹⁾による σ'_p 値の間に差がないことは奥村¹²⁾によって報告されている。

一軸圧縮試験の供試体は、非排水条件下で1%/minの軸ひずみでせん断した。 q_u は15%以下の軸ひずみ ε に対する最大応力から求めている。

図-2は、標準圧密試験から得た e と $\log p$ の関係の概念図である。いくつかのパラメータの記号がまたこの図に示される。有効土被り圧 σ'_{vo} 下の間隙比 e_i を $e-\log p$ 曲線から求め、 ε_v を式(1)のように定義する。

$$\varepsilon_v = \frac{e_0 - e_i}{1 + e_0} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここに、 e_0 は試料の初期间隙比である。

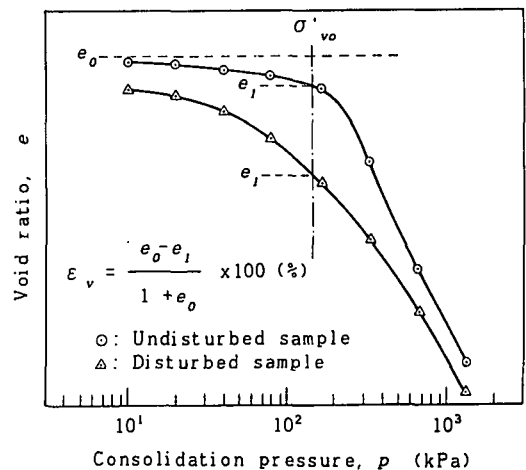
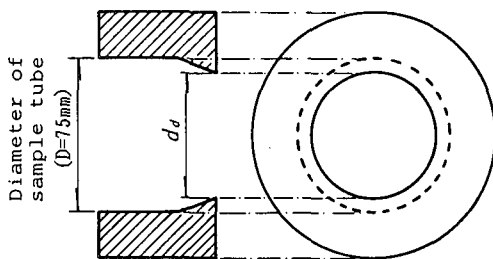
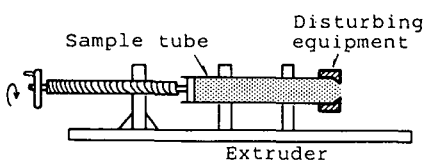


図-2 体積ひずみの定義



Sample	d_s (cm)	A_s (cm ²)	R_a
A	7.50	44.18	1.00
B	7.31	41.95	0.95
C	7.12	39.86	0.90
D	6.72	35.47	0.80
E	6.30	31.44	0.70
F	Remolded soil		

a) Disturbing equipment



b) Procedure of disturbing

図-1 試料の攪乱装置とその方法²⁾

4. $e-\log p$, σ'_p , c_v , ε_v に及ぼすSTDとEOPの影響

図-3, 4は、それぞれ桑名粘土のK-3, K-18の試料Aに対する e と $\log p$ の関係である。STDとEOPによる ε_v , σ'_p , 圧縮指数 c_v もまたこれらの図中の表にまとめられている。ここで、EOPは、Casagrandeの方法によって得た e を用いた。K-3, K-18の I_p と q_u は、それぞれ26%, 54%と92kPa, 220kPaの値を持つが、表中のこれらの値は、EOPの方がSTDのそれより小さい。このような傾向は、他の試料についても同様であった。

ε_v (STD) に対する ε_v (EOP) と I_p の関係が図-5に示される。 I_p が大きくなると ε_v (EOP) / ε_v (STD) 値は小さくなる傾向がみられるが、同じ I_p 下で試料の乱れがこの値に与える一定の傾向は明らかでない。このことは ε_v (EOP) / ε_v (STD) と試料Aに対する各試料の q_u 比の関係を整理した図-6においても明瞭である。すなわち、図-6において、 ε_v (EOP) / ε_v (STD) 値は総ての試料に対して1より小さな値を示すが、 q_u 比に依存せずほぼ

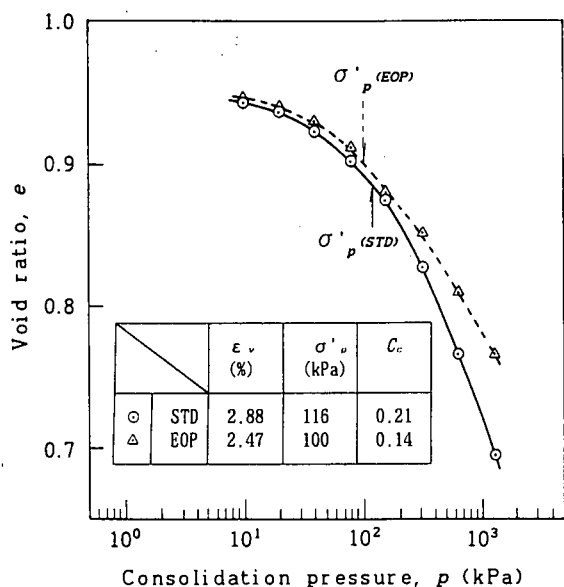


図-3 e と $\log p$ の関係(桑名、K-3、試料A)

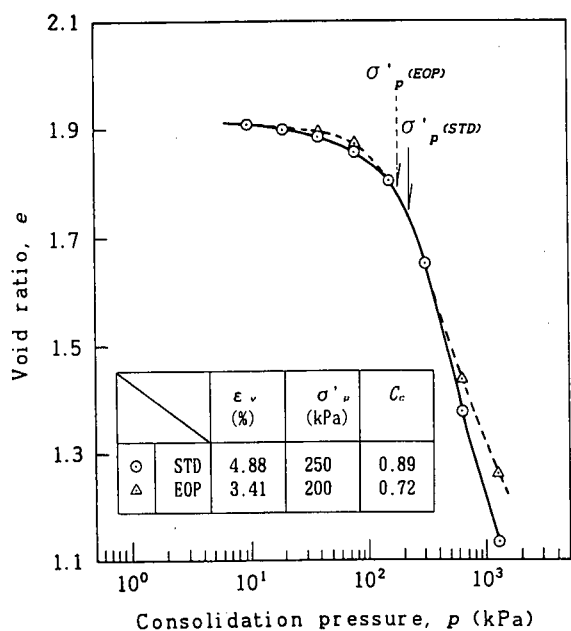


図-4 e と $\log p$ の関係(桑名、K-18、試料A)

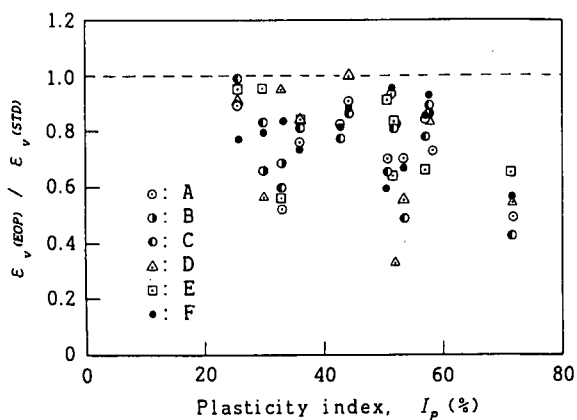


図-5 $\epsilon_v(EOP) / \epsilon_v(STD)$ と I_p の関係

一定値と判断される。

$C_c(EOP) / C_c(STD)$, $\sigma'_p(EOP) / \sigma'_p(STD)$ と q_u 比の関係が、それぞれ図-7, 8に示される。 q_u 比=1.0の乱さない試料において、 $C_c(EOP) / C_c(STD)$ 値は(0.56~0.98)の範囲にあり、平均値は0.81である。EOPの C_c は、STDのそれより小さいが、この値と I_p との間には、一定の関係は見い出せない。また、 $C_c(EOP) / C_c(STD)$ 値は q_u 比に依存しない。一方、図-8において、 q_u 比=1.0下の $\sigma'_p(EOP) / \sigma'_p(STD)$ 値は(0.58~1.24)の範囲にあり、平均値は0.92である。

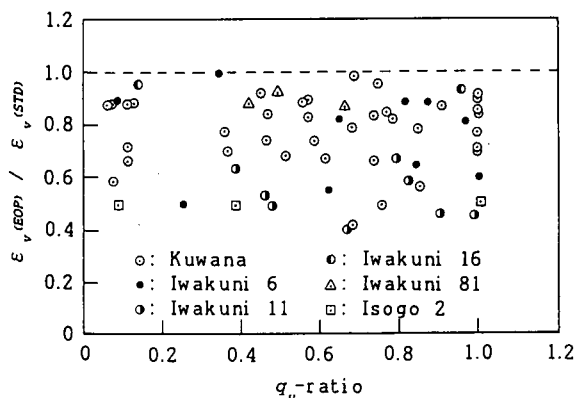


図-6 $\epsilon_v(EOP) / \epsilon_v(STD)$ と q_u 比の関係

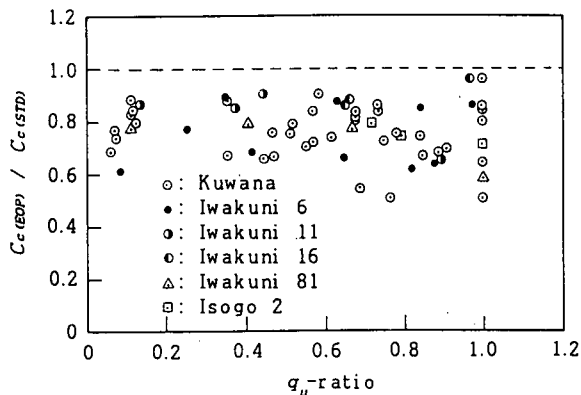


図-7 $C_c(EOP) / C_c(STD)$ と q_u 比の関係

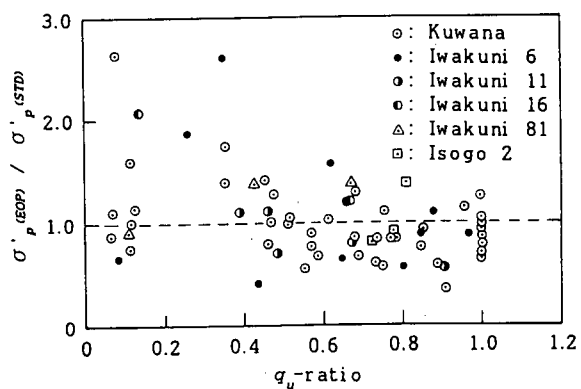


図-8 $\sigma'_p(EOP) / \sigma'_p(STD)$ と q_u 比の関係

EOPの σ_p' は、 q_u 比 $\approx (0.5 \sim 1.0)$ の領域で、STDのそれより小さな値を与えるが、 I_p との間には特徴的な傾向はみられない。 q_u 比が0.5より小さな領域において、 $\sigma_p'(\text{EOP})/\sigma_p'(\text{STD})$ 値は1.0を中心に大きく変動している。試料の乱れが大きい場合、 $e-\log p$ 曲線から得た σ_p' の物理的意義を考えると、このような挙動を一定の傾向として見ることは無理がある。STDによる $\varepsilon_v, C_c, \sigma_p'$ 値をEOPによるそれらに換算するには、上述した平均値を用いることができる。

Ladd⁷⁾は、STDによる σ_p' がEOPによるそれより10±10%小さいことを述べている。また、土田・永野¹³⁾は大阪湾、東京湾、伊勢湾の粘性土に対する試験結果を整理して、STDによる σ_p' はEOPによるそれより約30%小さいことを示している。Ladd、土田らの結果は著者のそれとは逆の傾向である。Laddや土田らの論文には、 σ_p' の求め方に対する記述はないが、EOPに相当する鉛直ひずみと σ_p' の求め方の差が $\sigma_p'(\text{EOP})/\sigma_p'(\text{STD})$ 値の差の主因と考えられる。

5. 原位置の σ_p' と C_c の推定法

図-9, 10は、それぞれ η_1, η_2 と I_p の関係であり、 ε_v の範囲を7区分してプロットしている。ここで η_1, η_2 は、それぞれ原位置の $\sigma_p'_{(1)}, C_{c(1)}$ を圧密試験で得た σ_p', C_c で除した値であり、 σ_p', C_c を原位置のそれに補正する係数を意味している。なお、図-10の

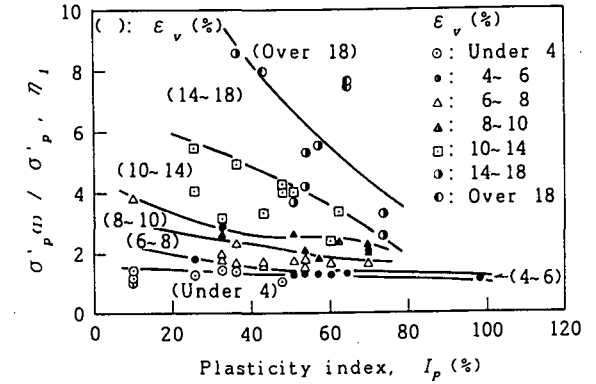


図-9 η_1 と I_p の関係

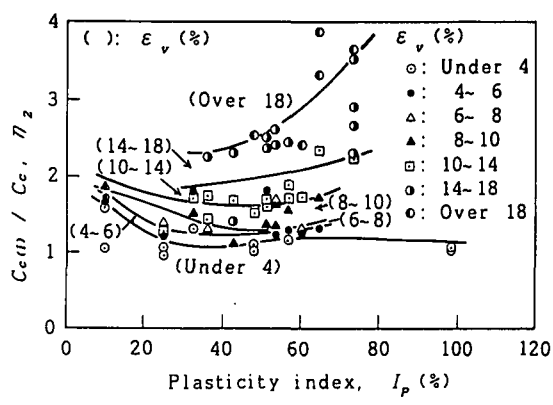


図-10 η_2 と I_p の関係

C_c は実務の載荷 I_p を考慮して、 σ_p' と $2\sigma_p'$ の応力 I_p の間で整理して得た値を用いている。 η_1, η_2 は、同じ ε_v の領域においても I_p によって変化している。図-9, 10は試料の I_p と ε_v から原位置の $\sigma_p'_{(1)}, C_{c(1)}$ を与える補正係数を得るための図として用いることができる。

原位置から採取された試料は、地盤内で受けていた応力を維持しようとして鉛直方向に膨張し、水平方向に収縮する。このように変形した試料から鉛直方向に供試体を成形し、圧密リングにセットして載荷する過程で、これらの要因が ε_v 値に与える効果は、試料の乱れによって異なることが予想される。しかし、この影響は、現時点では小さいと考えている。

6. 原位置の $e-\log p$ 曲線の推定結果

図-11は、桑名K-13に対する e と $\log p$ の関係である。ここで、 e はSTDによる値である。各供試体の $\bar{q}_u, \sigma_p', C_c, \varepsilon_v$ 値と図-9, 10から読み取った η_1, η_2 と $\sigma_p'_{(1)}, C_{c(1)}$ が表-2にまとめられている。試料の乱れが大きくなると $\bar{q}_u, \sigma_p', C_c$ は小さくなり、 $\varepsilon_v, \eta_1, \eta_2$ は大きくなる。図-11には、表-2に示す $\sigma_p'_{(1)}$ と $C_{c(1)}$ を用いて、原位置の $e-\log p$ の関係が示されている。ここに、原位置の試料に対する e_{ol} は、不攪乱試料のそれを用いている。これは、不攪乱試料の e_{ol} が原位置のそれ

表-2 $\sigma_p'_{(1)}, C_{c(1)}$ の推定結果(桑名、K-13)

Samples	$\bar{q}_u$ (kPa)	σ_p' (kPa)	C_c	ε_v (%)	η_1	η_2	$\sigma_p'_{(1)}$ (kPa)	$C_{c(1)}$
A	144	204	0.93	3.57	1.07	1.058	218.3	0.984
C	98	187	0.83	5.76	1.27	1.226	237.5	1.018
D	82	137	0.69	9.73	2.27	1.532	311.0	1.057
E	74	115	0.61	11.02	2.87	1.789	230.1	1.091
F	18	45	0.44	17.68	5.33	2.316	239.9	1.019

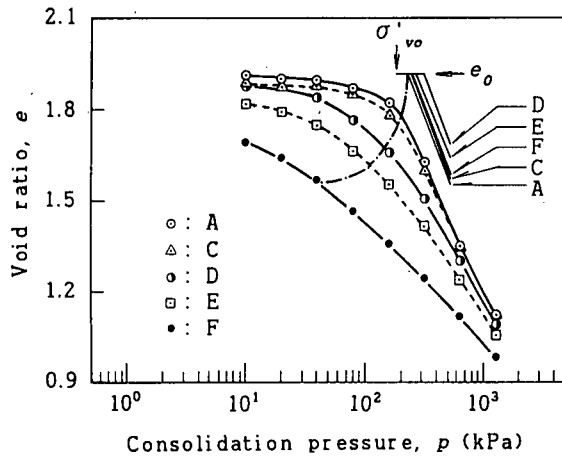


図-11 原位置の e - $\log p$ 関係の推定(桑名、K-13)

と同じであるという仮定に基づいている。この仮定は、含水比の変化がないように e_0 を測定した場合には一般に許される。原位置の e と $\log p$ の関係と不攪乱試料のそれとの差は、次の2つの原因が考えられる。

- サンプリングから供試体の成形の過程で発生する機械的攪乱による間隙比の減少
- 応力解放後の再圧密による間隙比の減少

図-11に示す一点鎖線は、各 e - $\log p$ 曲線上の σ'_{vp} に相当する応力を結んだ曲線である。試料Aの e_0 、 $\sigma'_{p(1)}$ 、 $C_{c(1)}$ を用いて描いた原位置の e と $\log p$ の関係は、乱れの程度の異なる5つの試料に対するそれとの比較から、リーズナブルであると判断される。乱れの程度の異なる各供試体から推定した原位置の e と $\log p$ の関係は、試料によって多少異なっている。しかし、練り返し土を含む乱れの大きな試料の e - $\log p$ 曲線から推定されたことを考えると、かなり良好な精度で推定が出来たとも判断される。これらに関する解釈や提案法の精緻化は今後の課題である。

7. おわりに

本研究で得られた主要な結論は以下のようにまとめることができる。

- $\varepsilon_{v(EOP)} / \varepsilon_{v(STD)}$ 値は、 I_p が大きくなると小さくなるが、同じ I_p 下では試料の乱れに依存しない。
- q_u 比=1.0の乱さない試料において、 $C_{c(EOP)} / C_{c(STD)}$ 値は(0.56~0.98)の範囲にあり、平均値は0.81である。また、 I_p と q_u 値はこれらの値に依存しない。
- q_u 比=1.0下の $\sigma'_{p(EOP)} / \sigma'_{p(STD)}$ 値は、(0.58~

1.24)の範囲にあり、平均値は0.92である。STDによる ε_v 、 C_c 、 σ'_p 値をEOPによるそれらに換算するには、上述した平均値を用いることができる。

- I_p と ε_v 値とから $\sigma'_{p(1)}$ 、 $C_{c(1)}$ を与える補正係数を得るための図を提案した。これらの図を用いて推定された原位置の e - $\log p$ 曲線は、乱れの程度の異なる試料に対するそれとの比較からリーズナブルであると判断された。

参考文献

- Schmertman, J. H. (1955): "The undisturbed consolidation behavior of clay," Transactions ASCE, Vol. 120, pp. 1201-1233.
- Shogaki, T. and Kaneko, M.: "Effects of sample disturbance on strength and consolidation parameters of soft clay," Soils and Foundations, Vol. 34, No. 3, pp. 126-135, 1994.
- 正垣・須藤: 標準圧密試験の有効土被り圧下の体積ひずみに及ぼす攪乱の影響、第39回土質工学シンポジウム論文集 -海底地盤と海洋施工技术-, pp. 119-126, 1994.
- 正垣、標準圧密試験の体積ひずみを用いた試料の乱れに対する圧密パラメータの補正法、サンプリングシンポジウム論文集、pp. 165-172, 1995.
- Mesri, G. and Choi, Y. K.: "The uniqueness of the end of primary (EOP) void ratio effective stress relationship," Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, Vol. 2, pp. 587-590, 1985.
- Mesri, et al.: "Settlement of embankments on soft clays," Geotech. Special Pub. No. 40, Vol. 1, pp. 8-56, 1994.
- Ladd, C. C.: "Stability evaluation during staged construction," Journal of Geotech. Eng., ASCE, Vol. 117, No. 4.
- Shogaki, T. (1991): "Strength properties of clay using portable unconfined compression apparatus," Proc. of Int. Conf. on Geotechnical Engineering for Coastal Development, Yokohama, pp. 85-88.
- Shogaki, T. et al. (1994): "Undrained strength anisotropy of Osaka alluvial clay and effect on slope stability," Proc. of the 4th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Osaka, pp. 518-523.

- 10) Japanese standards Association, (1993): "Test method for Onedimensional consolidation properties of soils JIS A 1217-1990, pp. 1-13.
- 11) Casagrande, A. (1936): " The determination of the preconsolidation load and its practical significance," Proc., 1st ICSMFE, Cambridge, Mass., Vol. 1, pp. 60-64.
- 12) 奥村樹朗(1974): 粘土のかく乱とサンプリング方法の改善に関する研究、運輸省港湾技術研究所、運輸省港湾技術研究資料、No. 193, p. 145.
- 13) 土田・永野、一次圧密終了条件 (EOP) で求められる圧密降伏応力について、第29回土質工学研究発表会概要集、pp. 283-284, 1994.