

事前圧密された飽和粘土の二次圧密係数について

大原 資生*・松田 博**・網干 寿夫***

The Coefficient of Secondary Compression of Saturated Clays Subjected to Precompression

Sukeo O-HARA, Hiroshi MATSUDA and Hisao ABOSHI

Abstract

The precompression techniques are of great use for controlling the residual settlement due to secondary compression, and it is possible to estimate the settlement of the structures over long period, by using the relation between the coefficient of secondary compression and the effective over consolidation ratio $\bar{\sigma}/\sigma_f$; where $\bar{\sigma}$ is the effective stress attained in the precompression stage and σ_f is the structural loading intensity.

In this paper, the coefficients of the secondary compression during the recompression stage are obtained for several clays, and it is clarified that the greater the plasticity index I_p , the more the efficiency of the precompression technique becomes, and that to eliminate the residual settlement of the structures it is necessary to keep the effective over consolidation ratio at about 1.8, by controlling the preloading intensity and loading duration.

1. 緒 言

軟弱地盤上に構造物を築造する際には、構造物建設後に生じる残留沈下が問題になることが多い。特に、近年は構造物が大型化かつ精密化しており、沈下抑制あるいは施工精度に対する要求度も一段と厳しくなっている。なかでも二次圧密沈下については、構造物の完成後沈下が長期にわたり、かつ継続して生じることから、その影響が大きく、設計段階においてその大きさの正確な予測が必要である。また場合によってはそれを事実上なくするような工法の開発も望まれるところである。

このような要望に対処する最も有効な工法の一つに事前圧密工法（プレコンプレッションまたはプレローディング工法）がある。このことについては、既に層別計測型圧密試験装置を用いて得た結果からも明らかにしているが¹⁾、その中でこの工法は二次圧密沈下の抑制に対しても有効であること、すなわち、事前圧密

を行うことによって、構造物建設後、二次圧密による沈下も抑制され、二次圧密係数 ϵ_a は有効過圧密比（プレロード除荷時の有効応力 $\bar{\sigma}$ と最終荷重 σ_f の比 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ ）によってほぼ一義的に決まることを明らかにした。

このことは、構造物建設に際して二次圧密沈下が問題となるような場合に、建設後の残留沈下量、またはプレロードの大きさ、あるいはその放置期間を設計段階で推定する場合に用いることができることから、きわめて重要である。

本研究は、さらに多くの試料について二次圧密係数と有効過圧密比の関係を調べたもので、いくつかの興味ある知見が得られたので報告するものである。

2. 有効過圧密比と二次圧密係数

事前圧密工法においては、粘土層はサーチャージとその除荷、そして構造物の建設によって、載荷—除荷—再載荷という荷重履歴を受けることになる。

Fig. 1 は、粘土層がこのような荷重履歴を受けた場合、応力の変化の様子を示したものである。図中の実線は全応力、点線は有効応力の時間的変化を示してい

*土木工学科

**建設工学科

***広島大学工学部第四類（建設系）

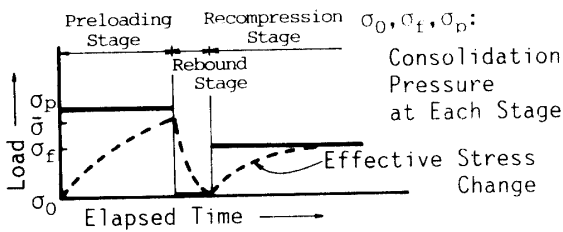


Fig. 1 Changes of the loading intensity and the effective stress.

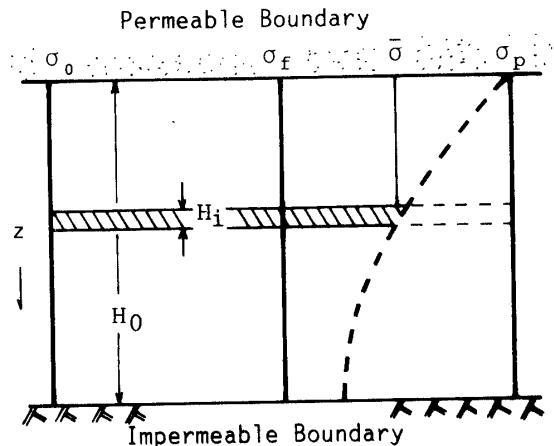


Fig. 2 Distribution of the effective stress after preloading.

る。

また、Fig. 2 は Fig. 1 のような載荷—除荷—再載荷を行ったときの地盤内の応力を概念的に描いたものである。いま、地盤内のある深さにおいて、初期の応力が σ_0 であったとする。事前圧密工法では、構造物の建設に先立って、構造物荷重に相当する $(\sigma_f - \sigma_0)$ と等しいかあるいはそれより大きいプレロード $(\sigma_p - \sigma_0)$ をある期間与え、それを一旦除去した後、構造物の建設が行われる。

ただし、道路盛土のような場合においては、最終盛土高に余盛りをすることによって事前圧密し、その後余盛り部分を除去するという方法をとることが多い。すなわち、 σ_p から σ_f へ荷重が除去される。このような、載荷—除荷過程については、既にプレロード載荷期間の相違による沈下曲線あるいは、二次圧密係数の変化等に関して述べられている²⁾ のでここでは省略する。

Fig. 2 の場合、地盤内の任意の深さにおいて、事前圧密中に到達する有効応力 $\bar{\sigma}$ は、プレロード除去時の圧密度によって異なり、この工法を用いる場合、一般的には圧密度が70~90%程度になるまで荷重を放置することが多い。

そのときの有効応力分布は、Fig. 2 から明らかな

ように深さ方向に一樣ではない。したがって、先述した有効過圧密比も各深さごとに異なり、同図の場合には、深さとともに小さくなる。既に述べたように、事前圧密後の二次圧密係数は、有効過圧密比によって決まることから、構造物建設後、二次圧密によって生じる沈下ひずみ速度は、深さによって異なることになる。

このような場合の、粘土層全体としての沈下ひずみ速度は、次のようにして求められる。

まず、二次圧密係数をここでは次式であらわす³⁾

$$\epsilon_a = \frac{d\epsilon}{d \log t} \quad \dots\dots(1)$$

粘土の微小厚層 (層厚 H_i) を考え、その層の有効応力が事前圧密によって $\bar{\sigma}_i$ になり、除荷の後再びその層には σ_f の大きさの有効応力が作用すると考える。この場合、有効過圧密比は $\bar{\sigma}_i/\sigma_f$ となる。また、その層が再圧密され、そのときの二次圧密係数が ϵ_{ai} であったとすると、沈下量 ΔH_i は、

$$\Delta H_i = H_i \times \epsilon_{ai} \times d \log t \quad \dots\dots(2)$$

となる。また、層厚 H の粘土層を n 分割し (層厚 H_i) 各分割層について同様なことがいえるとすると、層全体の沈下量 ΔH は、

$$\Delta H = d \log t \times \sum_{i=1}^n (\epsilon_{ai} \times H_i) \quad \dots\dots(3)$$

となる。式(1)、(3)より、層全体についての二次圧密係数 ϵ_a は、

$$\epsilon_a = \frac{\Delta H/H_0}{d \log t} = \frac{\sum_{i=1}^n (\epsilon_{ai} \times H_i)}{H_0} \quad \dots\dots(4)$$

であらわされる。

したがって、粘土の有効過圧密比と二次圧密係数の関係があらかじめ得られておれば、事前圧密中の地盤内の有効応力の変化を知ることにより、再載荷後の二次圧密沈下の推定が可能となる。

Fig. 3 は、層別計測型圧密試験装置を用いて得られた二次圧密係数と有効過圧密比の関係である。同図は、 σ_0 、 σ_f 、 σ_p および除荷時の平均圧密度を種々変化させて得たものである。データのばらつきはあるものの、有効過圧密比 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ が1.0を越えると、二次圧密係数は、急激に減少し、 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ が2.0ではほぼ一定となっている。ところが、この結果は、後述する広島粘土を用いた結果であって、このような関係が一般の粘性土についていえるかどうか明確でない。そこで、ここでは塑性指

数 I_p の異なるいくつかの粘土について、両者の関係を以下の方法で新たに調べた。

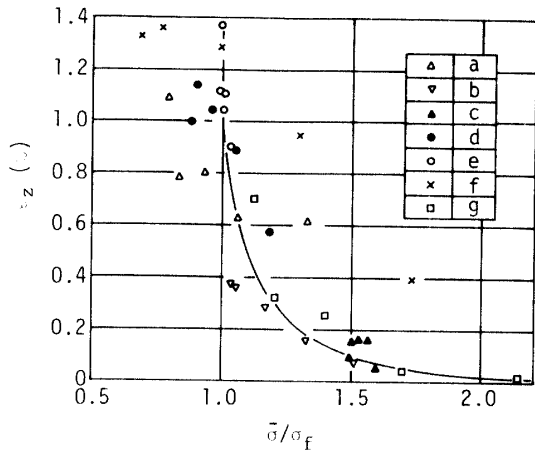


Fig. 3 Relationships between the coefficient of secondary compression and $\bar{\sigma}/\sigma_f$ for Hiroshima clay.

3. 実験方法および結果

3.1 実験方法

今回用いた実験装置は、標準圧密試験装置に改良を加えたもので、供試体上面は排水、下面は非排水とし、下面での間隙水圧を測定できるようにしたものである。

実験中は、圧密容器を恒温水槽に入れることによって、供試体の温度を $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に保った。

載荷は、上面からの片面排水条件のもとで、圧密圧力 $\sigma_0/2, \sigma_0$ で2段階予圧密を行った。各荷重段階の載荷期間はそれぞれ24時間である。その後、プレロード ($\sigma_p - \sigma_0$) を載荷するが、その期間は供試体下面での間隙水圧がゼロになるまでとした。

このとき、供試体内部の有効応力は、深さ方向にはほぼ一様になっていることから、供試体内部ではいずれの部分でも $\bar{\sigma} \approx \sigma_p$ となる。

プレロードの除荷を行うと、供試体内部には負の間隙水圧が生じるが、非排水面での間隙水圧値が、やはりゼロになったことを確認したうえで、構造物荷重に相当する ($\sigma_f - \sigma_0$) の載荷を行った。

今回の実験では、いずれも σ_0 は 78.4 kN/m^2 、 σ_f は 117.6 kN/m^2 で一定としたうえで、 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ を種々変化させた。ただし、後述する U1—試料については、 $\sigma_f = 156.8 \text{ kN/m}^2$ の場合についても実験を行った。

3.2 試料および供試体

実験に用いた試料は、宇部産の市販粘土 (U1—試

料)、カオリン粘土 (K—試料)、宇部市の港湾工事現場より採取した海成粘土 (U2—試料)、そしてカオリン粘土とモンモリロナイトを質量比で4:1の割合で混ぜた試料 (M—試料) の4種類である。

また、先述したように広島粘土 (H—試料) の結果も比較のために用いた。これは広島大学工学部の旧構内の人工的に作成した土層から不攪乱状態で採取したものであって、長時間圧密によってエイジング効果も十分発揮されている試料である。

以上の試料の物理的性質を、Table-1 に示す。

Table 1 試料の物理的性質

試料	ω_L %	ω_p %	I_p	C_c	G_s
U1—試料	61.0	28.5	33.0	0.52	2.670
U2—試料	46.9	25.5	21.4	0.44	2.711
K—試料	53.5	28.5	25.0	0.31	2.718
M—試料	80.6	30.8	49.8	0.50	2.685
H—試料	100.0	58.2	41.8	0.70	2.650

このうち、4種類の試料 (U1, U2, K, M) については、いずれも、まず液性限界の約2倍の含水比にして十分脱気後、圧密容器で 39.2 kN/m^2 の圧密圧力のもとで圧密した後成形した。

3.3 実験結果・考察

載荷—除荷—再載荷過程における典型的な沈下ひずみ—時間関係を示したものが、Fig. 4 である。

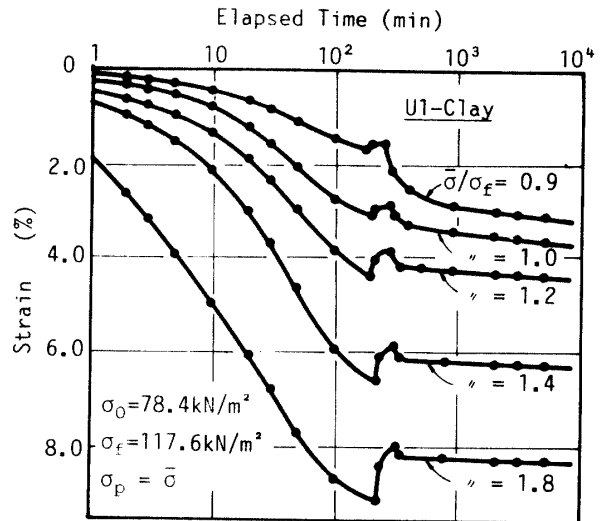


Fig. 4 Settlement in precompression techniques.

同図は、U1—試料について、 $\sigma_f = 117.6 \text{ kN/m}^2$ とした場合の結果であって、 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ を $0.9 \sim 1.8$ の間に変化させて得たものである。プレロード ($\sigma_p - \sigma_0$) の除荷は、いずれの $\bar{\sigma}/\sigma_f$ においても $200 \sim 250$ 分で行った。また、除荷後はいずれの場合もリバウンドを生じているが、その大きさは $\bar{\sigma}/\sigma_f$ が大きいほど大きくなっ

ている。

また、再載荷直後にはいずれの場合にも大きい沈下が生じている。図中、 $\bar{\sigma}/\sigma_f = 0.9$ の結果は、事前圧密中に到達する有効応力が、構造物建設後に作用する全応力より小さい場合であるが、再載荷後、特に大きい残留沈下を生じている。しかし、 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ が大きくなるにしたがって、残留沈下量は小さくなっており、 $\bar{\sigma}/\sigma_f = 1.8$ では再載荷直後にわずかの沈下を生じるものの、その後は沈下をほとんど生じていない。

ここでは、 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ がいずれの場合にも、約1000分以降において沈下がほぼ直線的に進行していることから、その勾配より二次圧密係数 ϵ_a を求めた。

Fig. 5 は、再載荷時を始点として描いた沈下曲線である。Fig. 4 と同様、 $\bar{\sigma}/\sigma_f = 0.9$ の場合、他の場合

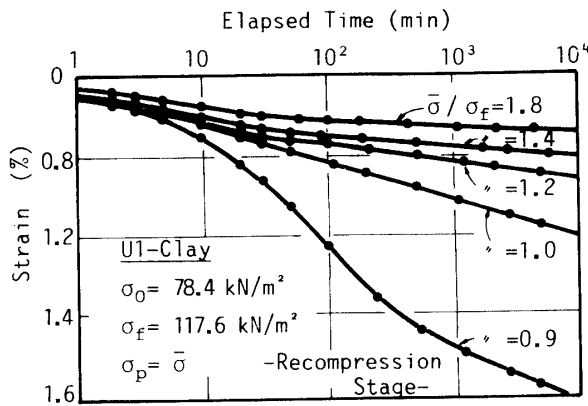


Fig. 5 Settlement during recompression stage.

に比べて沈下量が著しく大きく、その曲線形も Terzaghi 型の曲線になっていることがわかる。このことから、事前圧密工法では、プレロードの大きさを構造物荷重より小さくしたのでは、その効果が十分発揮されないことがわかる。

ここで、 $\bar{\sigma}/\sigma_f \geq 1.0$ では、ほぼ直線的に沈下ひずみが増加しており、曲線形からは一次圧密と二次圧密の区別は明確にできない。しかし、間隙水圧は、

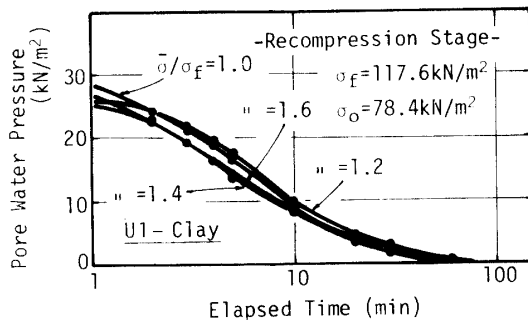


Fig. 6 Pore water pressure changes during recompression stage.

Fig. 6 から明らかなように、再載荷後約100分以内にいずれの $\bar{\sigma}/\sigma_f$ (ただし $\bar{\sigma}/\sigma_f \geq 1.0$) でも消散している。したがって、 ϵ_a は Fig. 4 において、載荷後1000分以降の沈下曲線から求めており、そのとき、間隙水圧はほぼ消散していることになる。

Fig. 7 は、Fig. 4 から得られた二次圧密係数と、先述した有効過圧密比 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ の関係を示したものである。図中には、 $\sigma_f = 117.6 \text{ kN/m}^2, 156.8 \text{ kN/m}^2$ での結果を示しているが、 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ が1.0付近において、 ϵ_a の値

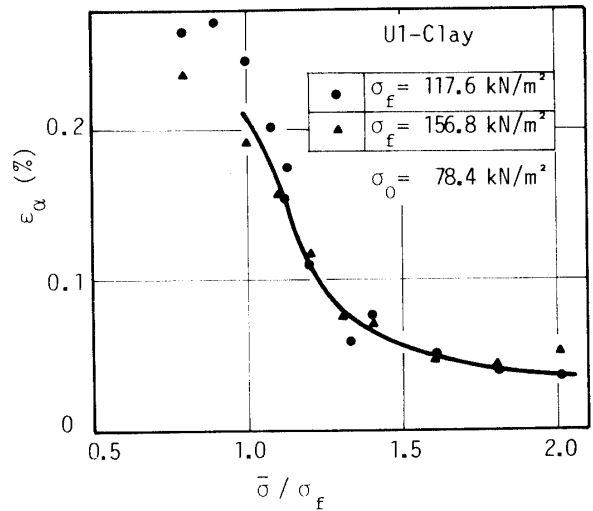


Fig. 7 Relationships between the coefficient of secondary compression and $\bar{\sigma}/\sigma_f$ for U1-clay.

は、 $\sigma_f = 156.8 \text{ kN/m}^2$ よりも $\sigma_f = 117.6 \text{ kN/m}^2$ の方が大きくなる傾向がみられる。しかし、 $\bar{\sigma}/\sigma_f \geq 1.2$ では載荷重の違いによる影響はみられない。このことは、層別計測型圧密試験で得られた結果¹⁾と一致している。

ここでは、同様な実験を先述した U2—試料、M—試料、K—試料について行った。ただし、この場合は σ_f を一定 ($= 117.6 \text{ kN/m}^2$) とした。その結果、得られた ϵ_a と $\bar{\sigma}/\sigma_f$ の関係が Fig. 8 である。

U2—試料と K—試料ではほぼ同様な傾向を示しているものの、それ以外の試料では、明らかに ϵ_a の値に相違がみられ、 ϵ_a と $\bar{\sigma}/\sigma_f$ の関係は粘土の種類によって異なることがわかる。

しかし、いずれの試料においても、二次圧密係数は、有効過圧密比の増加とともに減少している。このことは、Mesri^{3),4),5)} Jonas⁶⁾ が、先行圧縮を受けた粘土の二次圧密係数は、先行圧力以下では正規圧密状態における値よりも小さくなることを実験的に見出しており、そのことと一致している。

Fig. 9 は、塑性指数と ϵ_a の関係を示したものであ

る。同図には、H—試料の結果も示した。H—試料の結果は、他の結果と傾向が異なっているが、これは試験装置の違いによるものと考えられる。

同図より、いずれの $\bar{\sigma}/\sigma_f$ においても、 ϵ_α は塑性指数が大きい粘土ほど大きいといえる。また、同図では、 $\bar{\sigma}/\sigma_f = 1.2$ の場合の増加がもっとも著しく、 $I_p = 50$ では、 ϵ_α は約0.35%となっている。これに対して、 $\bar{\sigma}/\sigma_f = 1.8$ では、 $I_p = 50$ の場合でも、 ϵ_α の値は約0.1%であって、これは層厚が10mの粘土層を考えると1logサイクル当たり約1cmの沈下を生じるということになる。このように、 ϵ_α は I_p が大きい粘土ほど $\bar{\sigma}/\sigma_f$ の変化の影響を受けやすいということで、特に $I_p \geq 30 \sim 40$ のとき、その傾向が顕著である。

なお、Mesri⁷⁾は圧縮指数 C_c と二次圧密指数⁴⁾ C_α ($= \epsilon_\alpha \cdot (1+e_0)$, e_0 : 初期間隙比)の間に直線関係の

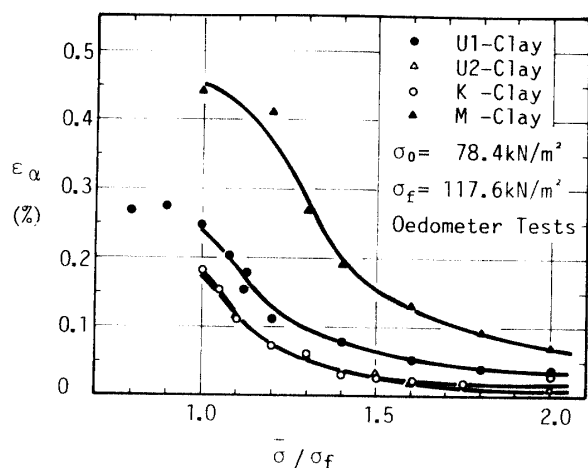


Fig. 8 Relationships between ϵ_α and $\bar{\sigma}/\sigma_f$.

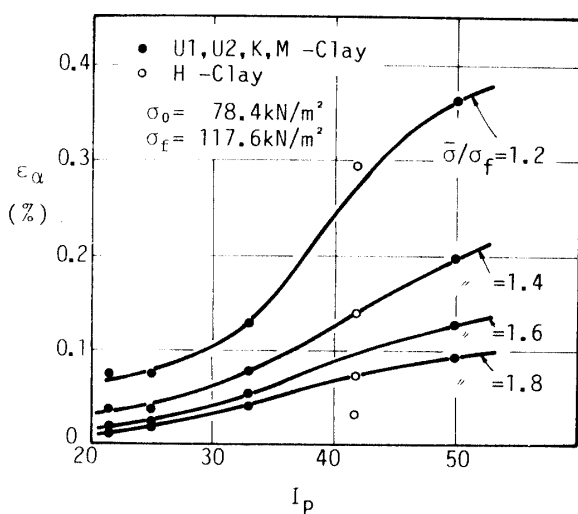


Fig. 9 Relationships between ϵ_α and I_p .

あることを示しているが、今回の実験ではそのような傾向はみられず、 C_α/C_c は $\bar{\sigma}/\sigma_f$ の増加とともに減少した。

既に、事前圧密工法で二次圧密による残留沈下をほとんど無視できる程度までに減少させるためには、事前圧密荷重の大きさを構造物荷重など粘土層に加わる最終的な荷重強度の約2倍の大きさとし、除荷時の圧密度が90%以上になるまで圧密すればよいということを示した⁴⁾。ここでは、このことがさらに多くの試料について調べられ、その妥当性が示された。

4. 結 言

二次圧密係数と有効過圧密（プレロード除荷時の有効応力と最終荷重の比）の関係をいくつかの種類粘土について調べた。その結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 事前圧密工法では、有効過圧密比が1.0以下では、沈下抑制効果を十分期待できない。
- (2) 事前圧密された粘土の二次圧密係数は、有効過圧密比が大きいほど小さく、この傾向は塑性指数の大きい粘土において顕著である。
- (3) 事前圧密工法で、構造物建設後の二次圧密による残留沈下の抑制効果を十分に期待するためには、粘土層の有効過圧密比が1.8程度となるように、プレロードの大きさとその除荷時の圧密度とを設定すればよい。

参 考 文 献

- 1) 網干寿夫, 松田 博: 層別計測による事前圧密工法の基礎的研究, 土木学会論文報告集, No. 340, 139~144 (1983)
- 2) 松田 博, 網干寿夫: 層別計測にもとづく粘土層の事前圧密工法に関する基礎的研究, 山口大学工学部研究報告, 33, 2, 39~48 (1983)
- 3) Mesri G.: Coefficient of secondary compression, Proc. ASCE, 99, No. SMI, (1973)
- 4) Mesri G. and B. F. Bohor: Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay, Geotechnique, 25, 527~554 (1975)
- 5) Mesri G. and P. L. Godlewski: Time and stress-compressibility interrelationship, Proc. ASCE, 103, No. GT 5, (1977)
- 6) Jonas Earnest: Subsurface stabilization of organic silty clay by precompression, Proc. ASCE, 90, No. SM5, 363~376 (1964)

(昭和60年4月15日受理)