

除荷—再載荷過程を含む飽和粘土の圧密特性

松田 博*・下隠 俊作**・永谷 達也***

Consolidation Characteristics of Saturated Clay Including Unloading and Reloading Stages

Hiroshi MATSUDA, Shunsaku SHIMOKAGE and Tatsuya NAGATANI

Abstract

To predict the settlement of soft clay layers, the stress-strain-time relations for the undisturbed sample are usually observed by conducting the standard consolidation tests and the scaling laws that the strain-time relationship is converted by the H^2 relationship are used. However, in practice the scaling laws are more complex than such a simple hypothesis as H^2 relation; this problem is closely related to how creep occurs as a separate phenomenon during primary consolidation. The objective of this paper is to observe the creep deformation during primary consolidation in the loading-unloading-reloading stages. In this paper, a separate-type consolidometer is used and from the precise measurement of strain and pore pressure inside the consolidating specimens, the following results are obtained. 1) Preconsolidation duration affects the settlement in the following loading stage. 2) At the end of primary consolidation, the distributions of void ratio inside the clay layer are not uniform.

1. 緒 言

軟弱粘土地盤上に盛土等を行うと沈下を生じるが、沈下量は数mに及ぶことがあり、設計段階においてはこの沈下量を正確に予測することが工期あるいは経済性から非常に重要である。沈下予測を行う際には、室内圧密試験で得られる応力—ひずみ—時間関係が用いられるが、圧密試験はその機構上模型実験であることから現場と室内試験の対応を考える上で常に粘土の層厚の影響を考慮する必要がある。ところが、この問題に関しては実に多くの研究が行われているものの、いまだに実際の沈下を正確に予測する手法は開発されていない。すなわち粘土の圧密についての相似則の問題に

関連して、Ladd¹⁾は1977年に、Fig. 1に示される2通りの曲線を示した。図中、Curve Aは一次圧密中にクリープ沈下が起こらない場合であってTerzaghiの圧密論でいう二次圧密が生じない場合を示し、Curve Bはアイソタッチ²⁾する場合を示している。一方、網干ら³⁾は、粘土の層厚を2 cm, 4.8cm, 20cm, 40cm, 100cmとして長期にわたる圧密試験を行い、沈下曲線はCurve A, Curve Bいずれでもなく、その間に位置することを示した。この問題に関する研究は、近年特に多く行われているが、層厚の異なる供試体の圧密特性に関連して前段階の載荷期間を変化させることにより異なるタイプの時間—沈下曲線が得られるとの報告が今井ら⁴⁾によってなされた。Fig. 1に示された3つの考え方は粘土層の沈下予測を行う上できわめて重要であって、早急に結論を出すべき問題である。さらに、実際の軟弱地盤の改良においては、プレロード工法が有効な手法であることから多く用いられており、軟弱地盤対策上、載荷—除荷—再載荷過程を含む粘土の圧密に関しては、

*社会建設工学科

**広島県庁

***社会建設工学専攻

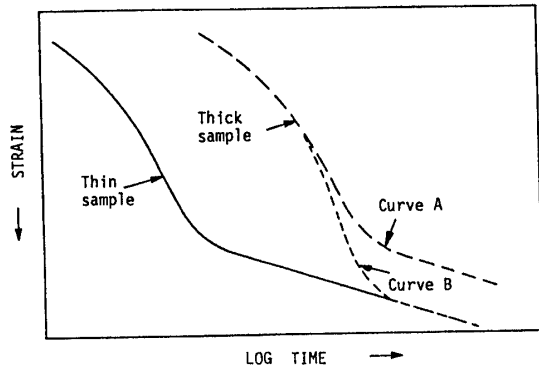


Fig. 1 Effects of sample thickness on the amount of primary consolidation.

常に考慮する必要がある。そこで本研究ではまず、今井⁴⁾が示した考え方に沿って実験を行い、特に層厚を大きくした場合にも同様な傾向が得られるかどうかということを層別計測型圧密試験装置を用いて検討した。さらに、プレロード工法において粘土層が載荷—除荷—再載荷される場合の粘土層内部における間隙水圧および沈下ひずみの時間的变化についても検討した。

2. 試料及び実験方法

実験で用いた試料は、山口県柳井市で採取された沖積海成柳井粘土 ($G_s = 2.642$, $w_L = 77.30\%$, $I_p = 43.20$) である。本実験に使用された実験装置は、従来より用いられている層別計測型圧密試験装置の載荷装置⁵⁾に改良を加えたものであり、その系統図をFig. 2に普通のOedometerとの比較をFig. 3に示す。すなわち供試体は直径6 cm, 厚さ2 cmの分割供試体を5個直列に連結したもので、全体として層厚10cmの粘土に対して圧密試験を行うことになる。

まず、各分割供試体毎に両面排水とした上で、荷重39.2kPaで、24時間予圧密を行った。その後の載荷は以下の2通りの方法を用いた。

1) 予圧密後、層全体で片面排水とした上で、荷重78.4 kPaで一次圧密終了時まで圧密し、その後、荷重を156.8 kPaとして7日間圧密する。(本報告の図においては図番号に(a)を付ける)その後、荷重を一旦78.4kPaまで除荷し負圧が消散したことを確認した上で再び荷重を156.8kPaとして再載荷を行う。

2) 予圧密後、層全体で片面排水状態にした上で、荷重78.4kPaで長期間(13日間)圧密した後荷重156.8kPaとして圧密を継続する。(本報告の図においては図番号に(b)を付ける)

いずれの場合も、実験中は恒温水槽において供試体

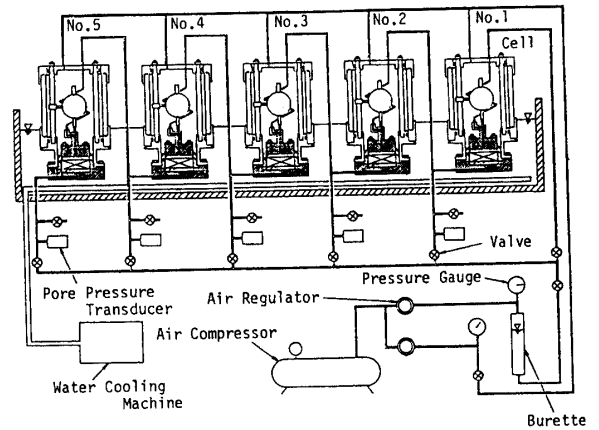


Fig. 2 Separate-type consolidometer.

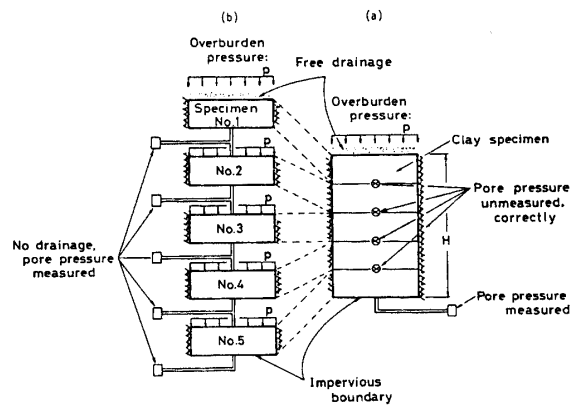


Fig. 3 Comparisons between separate-type consolidometer and large size oedometer with equivalent height.

の温度を一定 ($15 \pm 0.5^\circ\text{C}$) に保ち、各分割供試体の高さ、各分割供試体底面の過剰間隙水圧の時間的变化を測定した。なお、バックプレッシャーとして98kPaを負荷した。

3. 予圧密期間が粘土の圧密特性に及ぼす影響

荷重段階78.4kPa—156.8kPaにおいて得られた間隙比増分 Δe の経時変化を示したものがFig. 4 (a) (b)で、Fig. 4 (a)は予圧密期間を4110分とした場合であり、Fig. 4 (b)は予圧密期間を13日として得られた結果である。また、図中、No. 1は排水面側の層、No. 5は非排水面側の層を示している。Fig. 4 (b)では前段階の載荷期間がFig. 4 (a)より長いことから、二次圧密の影響をより長期間受けていることとなり、今井⁴⁾の考え方に従うと、間隙比の変化量も小さくなるはずである。そ

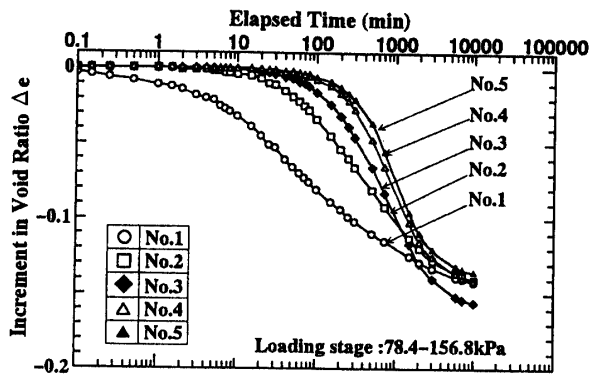


Fig. 4 (a) Increment in void ratio versus elapsed time for different subspecimens.

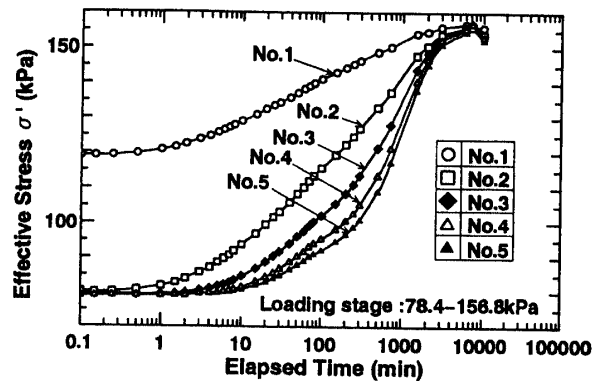


Fig. 5 (a) Effective stress versus elapsed time for different subspecimens.

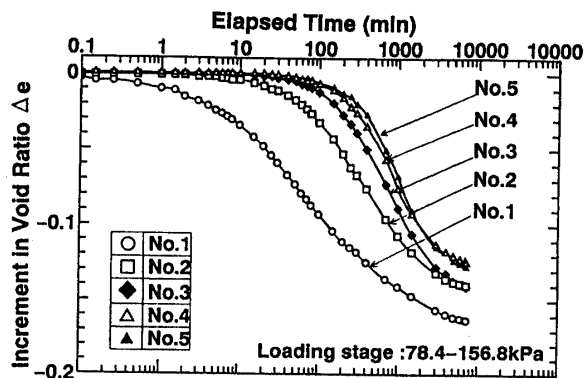


Fig. 4 (b) Increment in void ratio versus elapsed time for different subspecimens.

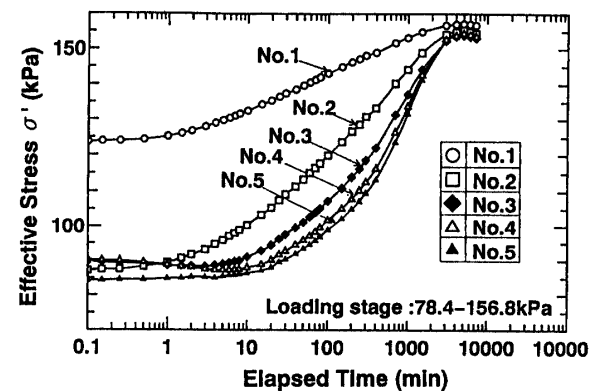


Fig. 5 (b) Effective stress versus elapsed time for different subspecimens.

ここで、Fig. 4 (a) (b)を比較すると、層全体としては明らかに Δe はFig. 4 (b)の方が小さくなっていることがわかる。また、既に一次圧密終了時において粘土層内部の沈下ひずみは一定とはならないことが示されている³⁾が、ここでも同様の傾向がみられた。特に、前段階の圧密期間を長くした場合、その傾向は顕著にみられる。すなわちFig. 4 (a), Fig. 4 (b)いずれにおいても一次圧密終了時の Δe は各分割層で異なっており、その状態からほぼ同時にクリープ沈下を生じ、その直線群はほぼ平行になっていることがわかる。このような傾向は既に得られている結果³⁾とよく一致している。

次に、各分割供試体の端面で得られた間隙水圧をもとに、分割層の平均有効応力 σ'_i を式(1)によって求め、経過時間との関係で整理したものがFig. 5 (a), (b)である。

$$\sigma'_i = \sigma - 1/2 \cdot (u_{i-1} + u_i) \quad (1)$$

ここに、 u_i は第*i*番目の分割供試体下面で測定される過剰間隙水圧、 σ は各分割供試体に負荷される全応力である。

それぞれ荷重段階が78.4~156.8kPaでの結果である。図中No. 1の有効応力が圧密開始時において大きい値を示しているのは、上述したように、有効応力を分割供試体端面の間隙水圧の平均値から求めているためである。いずれの図からも、間隙水圧の消散は6000~8000分の範囲でほぼ終了しており、その時間をもとにFig. 4の沈下曲線を見ると、明らかに一次圧密終了時において、粘土層内部の間隙比は一樣でないことがわかる。

Fig. 5において、特定の σ' ($\sigma' = 100\text{kPa}, 120\text{kPa}, 140\text{kPa}, 150\text{kPa}$)に至るに要する時間を求めると、その時間までに生じた間隙比変化 Δe がFig. 4によって得られることから、有効応力一定のもとでの間隙比の時間的变化を見出すことができる。Fig. 6 (a) (b)はその結果である。結果のばらつきが大きい、いま有効応力一定の点を直線で近似し、その勾配を C_α^* とおくと、

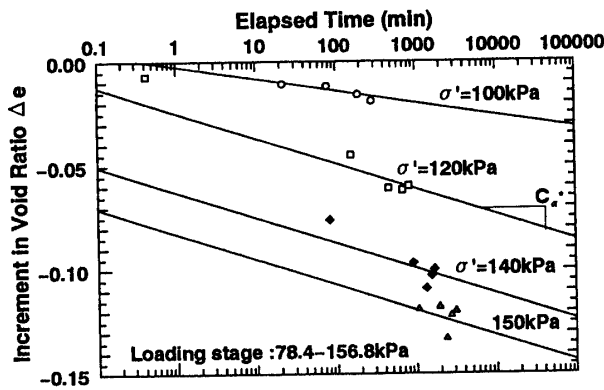


Fig. 6 (a) Increment in void ratio for constant stress during primary consolidation.

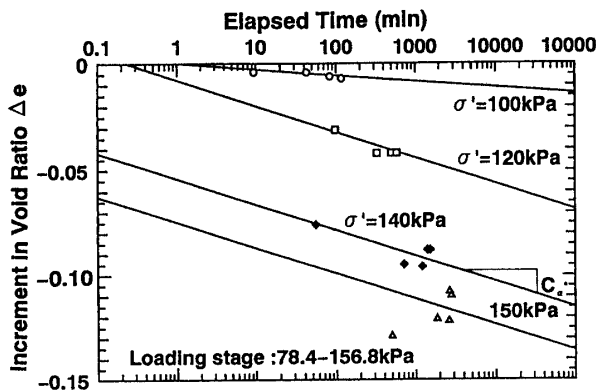


Fig. 6 (b) Increment in void ratio for constant stress during primary consolidation.

C_{α}^* は有効応力が増加すると大きくなる傾向がみられる。そして、有効応力が最終的に上載圧に等しくなると C_{α}^* は二次圧密係数 C_{α} に一致する。すなわち、Fig. 6 (a) (b)より、一次圧密中有効応力一定のもとで生じる間隙比変化すなわち二次圧密係数は必ずしも一定ではなく、有効応力の増加とともに大きくなることを示している。ただ、二次圧密係数は、圧密先行荷重によって大きく影響される⁵⁾⁶⁾ことから、さらに検討を要する。

Fig. 7 (a) (b)は荷重段階78.4kPaおよび、156.8kPaにおける各分割層の間隙比変化と有効応力の関係を示したものである。各荷重段階において、有効応力が比較的小さいとき、同一有効応力のもとでは非排水面側の間隙比変化が顕著であるが、有効応力が増加し、上載圧近くまで上昇すると排水面側の層の間隙比変化が大きくなる傾向が見られる。いま、一次圧密中にクリープ沈下が生じないとするならば、各分割層の状態経路は同一になるが、Fig. 7 (a) (b)からはそのような傾向はみられない。

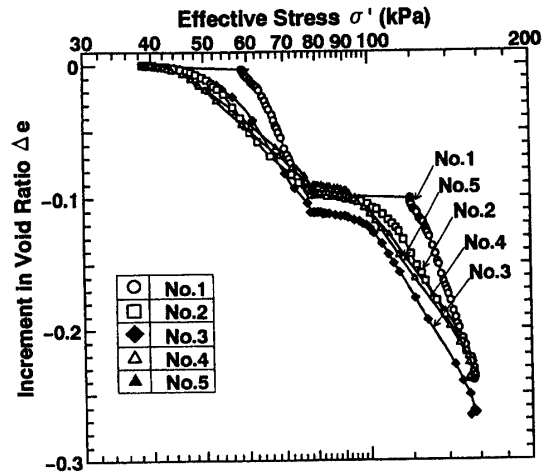


Fig. 7 (a) Relationships between Δe and effective stress for different subspecimens.

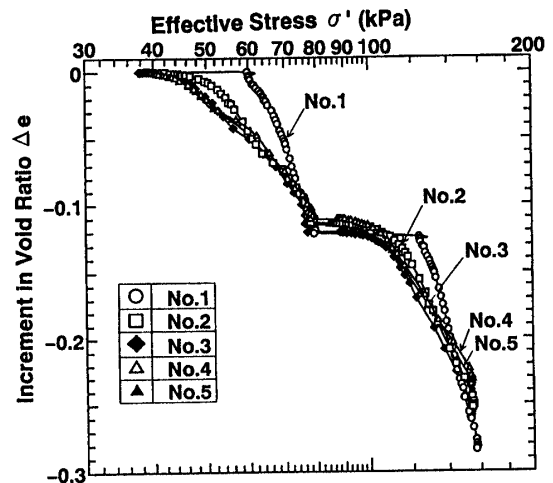


Fig. 7 (b) Relationships between Δe and effective stress for different subspecimens.

一方、Fig. 4 (a) (b)において $\Delta e \sim \log t$ 関係が得られているが、いま $\Delta e \sim t$ 関係の曲線を描くとその勾配から間隙比変化速度 \dot{e} を得ることができる。そこで各分割層について、この間隙比変化速度の時間的変化を示したものが、Fig. 8 (a) (b)である。各分割層ごとに得られた \dot{e} はいずれも時間経過とともに減少する傾向がみられる。そして、一次圧密終了時の \dot{e} は各分割層において一定ではなく、非排水面側で大きくなる傾向がある。

4. 除荷-再載荷過程を含む粘土の圧密

プレロード工法においては、通常載荷-除荷-再載

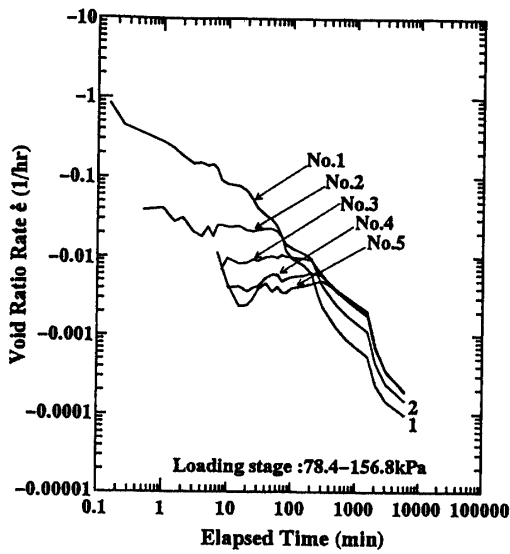


Fig. 8 (a) Void ratio rate versus elapsed time.

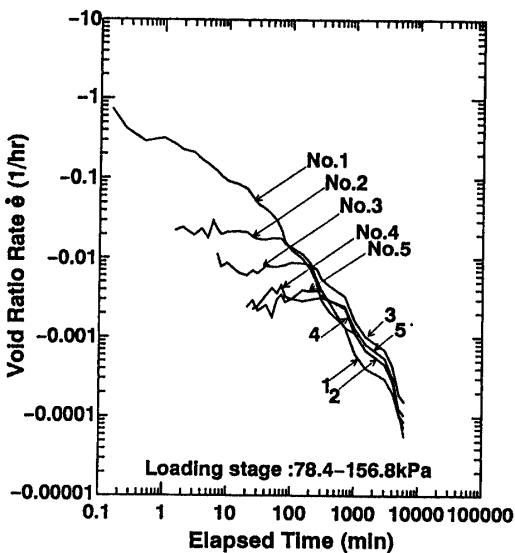


Fig. 8 (b) Void ratio rate versus elapsed time.

荷という荷重履歴を粘土層に与えた後最終的な荷重を負荷するという手法が用いられる。その際、除荷をいつの時点で行うか、すなわち除荷時の圧密度をいくらに設定するかということが最終荷重負荷後の沈下に大きく影響する。この点に関しては、Fig. 9 に示したように、除荷時の圧密度を34.0%, 56.8%, 91.9%として除荷-再載荷を行った場合の再載荷後の圧密特性について調べられている⁵⁾。これらの結果はいずれも除荷時において間隙水圧が粘土層内に残留した状態にある。ただ、近年のようにサンドドレーン工法を併用することは多くみられ、その場合除荷時の圧密度が一次圧密終了後ということも考えられることから、そのような条件下における除荷-再載荷特性についても明確にしておく必要がある。そこで、ここでは一次圧密終了を非排水面側の間隙水圧の測定によって確認した後除荷-再載荷を行った。

Fig.10とFig.11は、それぞれ載荷-除荷-再載荷段階における各分割層毎の間隙比および平均有効応力の

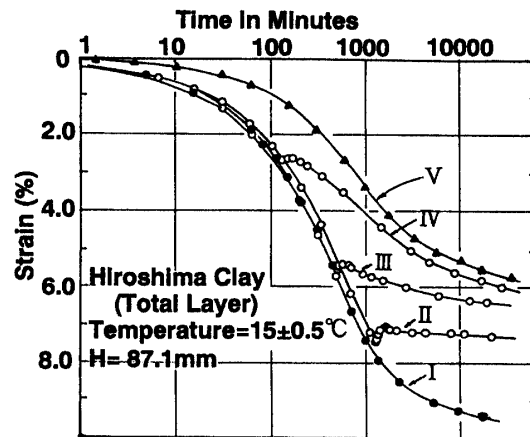


Fig. 9 Settlement-time relations of total layer in precompression technique⁵⁾.

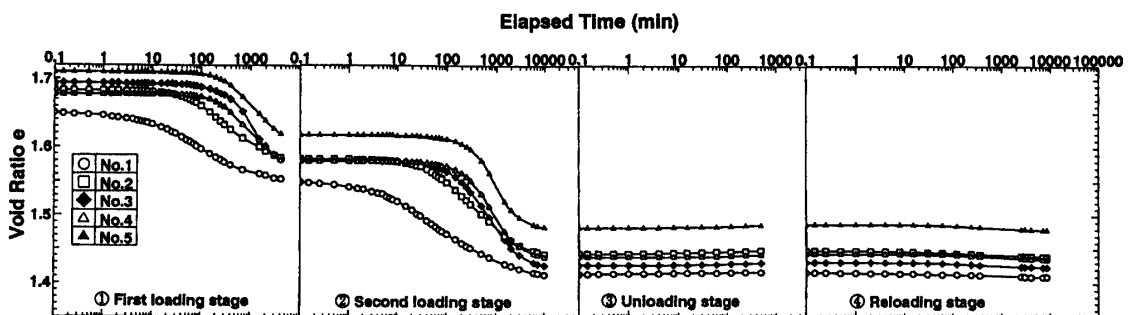


Fig.10 Void ratio and elapsed time for different subspecimens at the loading-unloading-reloading stages.

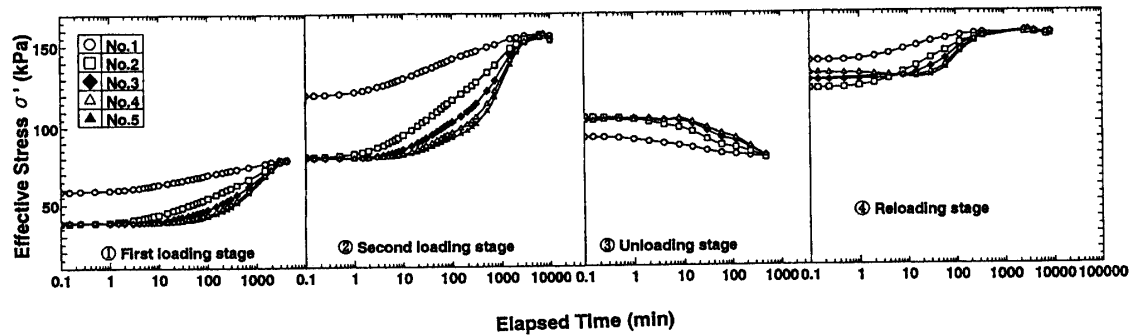


Fig.11 Effective stress versus elapsed time for different subspecimens at the loading-unloading-reloading stages.

経時変化を示したものである。図中、①、②はそれぞれ圧密圧力78.4kPa、および156.8kPaによる載荷段階を示し、③、④は除荷、再載荷時の挙動を示している。Fig.11の①、②で示される載荷過程においては、排水面側の層で急激な有効応力の増加が生じているのに対して除荷-再載荷段階③、④では、非排水面側でも有効応力の急激な変化がみられ、また各分割層間の有効応力の差も小さくなっている。

Fig.12は、載荷-除荷-再載荷時の各分割層の状態経路を示したものである。今回の実験では除荷直前の圧密度をほぼ100%としたため、再載荷時の間隙比の減少はほとんどみられない。一方、ばらつきが大きく明確ではないが、除荷-再載荷時においても粘土層内の間隙比は一樣ではなく、排水面側の層ほど大きくなる傾向がみられる。

5. 結 論

ここでは層別計測型圧密試験装置を用いて、特に前段階の圧密期間が粘土層の圧密特性に及ぼす影響、さらに載荷-除荷-再載荷時の粘土の圧密特性に関して、除荷時の圧密度が100%を越えるような場合について、除荷-再載荷時の挙動を調べた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 前段階の載荷期間を長くすると、圧密沈下量は相対的に減少する。
- 2) 均質な粘土層の圧密を行うとき、一次圧密終了時の粘土層内部の間隙比は一樣ではなく、排水面側の層ほど間隙比の減少量は大きい。
- 3) 一次圧密中に有効応力一定条件のもとで生じる間隙比変化速度は一定ではなく、有効応力の増加とともに大きくなる。この点に関しては、圧密先行荷重の影響が大きいことから、さらに検討を要する。

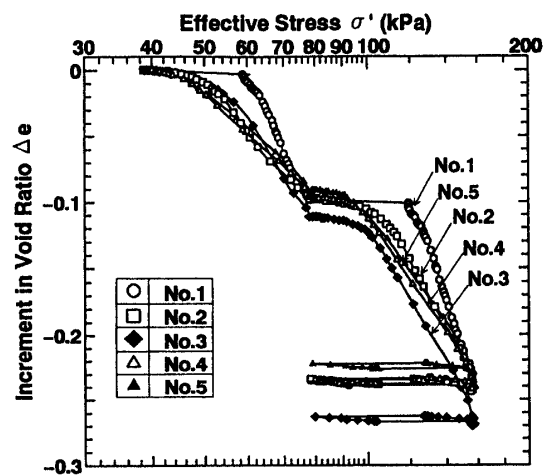


Fig.12 Relationships between Δe and effective stress for different subspecimens.

- 4) 除荷-再載荷時においても粘土層内部の間隙比は一樣でない状態が継続する。

参考文献

- 1) Ladd,C.C., Foott,R., Ishihara,K., Schlossen,F., Poulos,H.J.: State of the Art Report, Stress-Deformation and Strength Characteristics, Proceeding of 9th ICSMFE, 2, 421-494 (1977).
- 2) Suklje L.: The Analysis of the Consolidation Process by the Isotaches Method, Proceedings of 4th ICSMFE, 200-206 (1957).
- 3) 網干寿夫, 松田博: 粘土の二次圧密と沈下解析, 土と基礎, 29 [3], 19-24 (1981).
- 4) Imai,G. and Tang,Y.X.: A Constitutive Equation of One-Dimensional Consolidation Derived from Inter-Connected Tests, Soils and

- Foundations, 32 [2], 83-96 (1992).
- 5) Aboshi, H., Matsuda, H. and Okuda, M.: Preconsolidation by Separate Type Consolidometer, Proceedings of 10th ICSMFE, 577-580 (1981).
- 6) 松田博, 網干寿夫: 層別計測に基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).

(平成5年10月15日受理)