

層別計測にもとづく 粘土の繰返し圧密機構に関する基礎的研究

松田 博*・清水 豊**

Study on the Consolidation Mechanism of Clays under Cyclic Loading by Using the Separate-Type-Consolidometer

Hiroshi MATSUDA and Yutaka SHIMIZU

Abstract

The soft clay layers are often subjected to the change in vertical load due to the tide, the pumping of ground water and the repetition of the process of filling and discharging from oil storage tank, etc. From the results observed in the field or in laboratory tests, it can be seen that the settlement characteristics of clay layers under such a cyclic loading conditions are different from that under static loading conditions. The consolidation mechanism under cyclic loading conditions, however, has not been clarified.

So, in this paper, consolidation tests using the separate-type-consolidometer for the Ariake Clay were performed under cyclic loading conditions. The excess pore water pressure and the deformation inside the clay specimen were then measured and evaluated using Wilson's consolidation theory.

As a conclusion, the following properties are obtained.

- 1) The distribution of the settlement in strain inside the clay layer does not become uniform in the drainage direction even if the number of cycles increase remarkably.
- 2) The distribution of the excess pore water pressure is considerably affected by the number of loading cycles; when the number of cycles is high, it converges to a constant state.

1. 緒 言

地盤が潮汐、地下水の汲み上げあるいは石油タンクのオイルレベルの変動等による応力変化を周期的に受けることは数多くみられるが、現場計測結果あるいは室内試験結果からその沈下特性は静的な荷重によって生じる沈下特性とは異なる場合のあることが知られている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。一方、このような繰返し圧密機構を明らかにするための理論的研究も行われているか⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾、繰返し圧密時の過剰間隙水圧あるいはひずみの時間的変化に関する粘土層内部の値について実測値との対応まで

考慮した例はなく、繰返し圧密機構に関してはいまだ明確にされていない点が多い。

本研究は、従来より用いている層別計測型圧密試験装置に改良を加えて飽和粘土について繰返し圧密試験を行い、載荷時および除荷時の粘土層内部の過剰間隙水圧、沈下・膨張ひずみの深さ方向の時間的変化を調べたものである。

2. 繰返し載荷に対する Wilson の一次元圧密理論

Wilson らは粘土層が繰返し載荷を受けるときの一次元圧密について理論解を得ている⁵⁾。それによると、用いられた仮定は静的載荷に対する Terzaghi の圧密理論での仮定と同様であるが、ただ体積圧縮係数と体積膨張係数に関しては両者が等しいという仮定が付加され

*土木工学科

**大学院土木工学専攻

ている。Wilson らが導いた繰返し載荷に対する圧密方程式は次式であらわされる。

$$C_v \partial^2 \sigma'_{(z,t)} / \partial z^2 = \partial \sigma'_{(z,t)} / \partial t \quad (1)$$

ここに、 C_v は圧密係数、 $\sigma'_{(z,t)}$ は深さ z での有効応力である。いま、Fig. 1 のように層厚 H の粘土層の上部境界が排水層、下部境界が非排水層であって、上部境界に $\sigma_{(t)}$ (周期 T の矩形波) なる繰返し荷重が与えられた場合を考えると、境界条件は次のようになる。

- (1) $0 \leq z \leq H, t=0$ のとき $\sigma'_{(z,t)} = 0$
- (2) $z=H, t \geq 0$ のとき $\partial \sigma'_{(z,t)} / \partial z = 0$
- (3) $z=0, t \geq 0$ のとき $\sigma'_{(z,t)} = \sigma_{(t)}$

ここに、 $\sigma_{(t)}$ は後述する Fig. 4 で示すように、周期 T の矩形荷重であり、

$$rT < t < rT + T_1 \text{ のとき } \sigma_{(t)} = \Delta \sigma \quad (2)$$

$$rT + T_1 < t < (r+1)T \text{ のとき } \sigma_{(t)} = 0 \quad (3)$$

(ただし、 $r=0, 1, 2, \dots$)

であらわされる。

式(1)を上述の境界条件のもとで解くと、まず、 $rT < t < rT + T_1$ ($r=0, 1, 2, \dots$) のとき、時間 t 、深さ z における過剰間隙水圧 $u_{(z,t)}$ は

$$u_{(z,t)} = \frac{4\sigma}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin(MZ) \left[\frac{e^{\beta_m(T_1-t_1)} - e^{\beta_m(T-t_1)}}{1 - e^{\beta_m T}} - \frac{e^{-\beta_m(t-T_1)} - e^{-\beta_m(t-T)}}{1 - e^{\beta_m T}} + e^{-\beta_m t} \right] \quad (4)$$

ここに

$$M = (2m+1) \frac{1}{2} \pi \quad (5)$$

$$Z = z/H \quad (6)$$

$$\beta_m = C_v M^2 / H^2 \quad (7)$$

となり、圧密度であらわすと

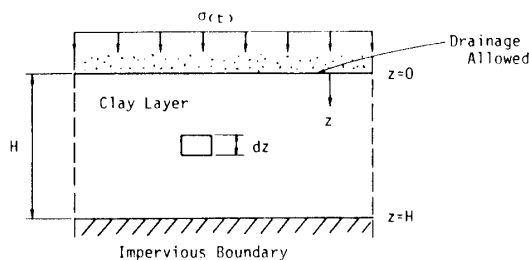


Fig. 1 Section through soil

$$U_{(z,t)} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin(MZ) \left[\frac{e^{\beta_m(T_1-t_1)} - e^{\beta_m(T-t_1)}}{1 - e^{\beta_m T}} - \frac{e^{-\beta_m(t-T_1)} - e^{-\beta_m(t-T)}}{1 - e^{\beta_m T}} + e^{-\beta_m t} \right] \quad (8)$$

となる。

一方、 $rT + T_1 < t < (r+1)T$ ($r=0, 1, 2, \dots$) のとき、時間 t 、深さ z における過剰間隙水圧は次式であらわされる。

$$u_{(z,t)} = -\frac{4\sigma}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin(MZ) \left[\frac{e^{\beta_m(T-T_1-t_1)} - e^{\beta_m(T-t_1)}}{1 - e^{\beta_m T}} + \frac{e^{-\beta_m(t-T_1)} - e^{-\beta_m(t-T)}}{1 - e^{\beta_m T}} - e^{-\beta_m t} \right] \quad (9)$$

また、圧密度は

$$U_{(z,t)} = \frac{4}{\pi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{2m+1} \sin(MZ) \left[\frac{e^{\beta_m(T-T_1-t_1)} - e^{\beta_m(T-t_1)}}{1 - e^{\beta_m T}} + \frac{e^{-\beta_m(t-T_1)} - e^{-\beta_m(t-T)}}{1 - e^{\beta_m T}} - e^{-\beta_m t} \right] \quad (10)$$

となる。ここで、式(4)、(8)、(9)、(10)において t は繰返し載荷開始直後からの経過時間、 t_1 は $\Delta \sigma$ を載荷直後からの経過時間、 t_2 は除荷直後からの経過時間である。

3. 層別計測型圧密試験装置による粘土の繰返し圧密試験

3.1 実験装置

ここで用いた装置は、従来より用いている装置⁹⁾をもとに新たに作成したもので、その特徴としては、

- 1) 分割された各部分ごとの沈下量が正確に測定できること。
- 2) 各層間の間隙水圧を容易に測定できること。
- 3) 全体としては比較的大きな層厚になるにもかかわらず、各層ごとに載荷を行っているために側面摩擦による応力減少が小さいこと。

などがあげられる。

Fig. 2 では、この装置と Oedometer との対比が行われている。図中 (a) は普通の Oedometer に対するものであり、排水長が大きい場合を示している。一方 (b) は同じ排水条件をもつ粘土供試体について、層別計測型圧密試験を行う場合を示している。

両者を比較すると、(a) では圧密中の間隙水圧の測定を行う場合、非排水面での測定を行うが、特に粘土層内部の間隙水圧の測定を行う場合は、先端にポーラ

スチップのついた細管を挿入して測定が行われる。

しかし、このような方法で測定を行うと、ポラスチップ先端付近においては応力集中あるいは試料の乱れによる測定誤差を生じることから正確な測定はできない。一方、図に示したような排水長の長い供試体に载荷を行うと、側面摩擦による応力減少が顕著になることが知られている。また沈下ひずみについては、層全体の沈下量の測定が行われるが、層厚が20mm程度の供試体では層内部のひずみの変化は測定できない。これは大型供試体で用いられる層別沈下計といった計器を挿入することが困難なためである。

これに対して、(b)のような機構の圧密試験装置では、载荷重が分割された各層ごとに加わるために、供試体の層厚が増すことによって生じる側面摩擦による応力減少が抑制され、深さ方向の応力が比較的均一になる。また間隙水圧については、各分割層の境界面における値を正確に測定できるとともに、沈下量についても各層ごとに測定が可能である。すなわち、粘土層内部のひずみや間隙水圧の時間的変化を正確に測定できる。

本装置において、分割供試体の寸法は厚さ20mm、直径60mmである。この分割供試体を5個直列に連結することにより、層厚が100mm、片面排水状態での圧密試験が行われることになる。この装置の系統図を示したものが Fig. 3 である。

沈下量および間隙水圧の測定にはひずみゲージタイプの圧力変換器(受圧面の直径5.7mm) およびひずみゲージタイプの変位変換器を用いた。そして、それらのデータはデータロガーおよびマイクロコンピュータを介してフロッピーディスクに記録された。载荷装置および記録装置の系統図が Fig. 4 である。

実験は次のようにして行った。まず後述する粘土供試体を圧密容器にセットした後、各分割供試体につい

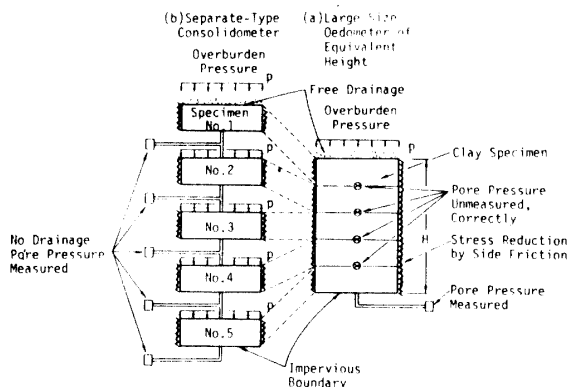


Fig. 2 Comparison between separate-type-consolidometer and large size oedometer of equivalent height.

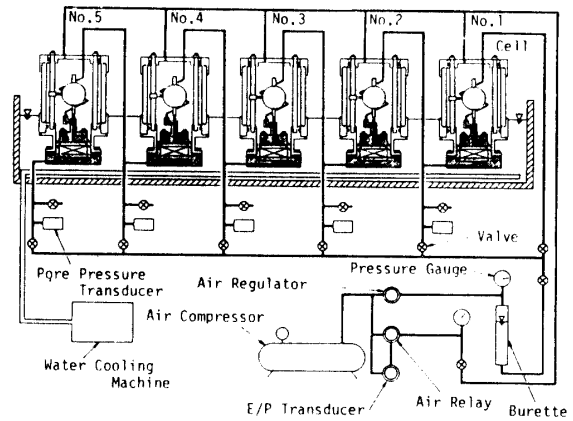


Fig. 3 Separate-type-consolidometer

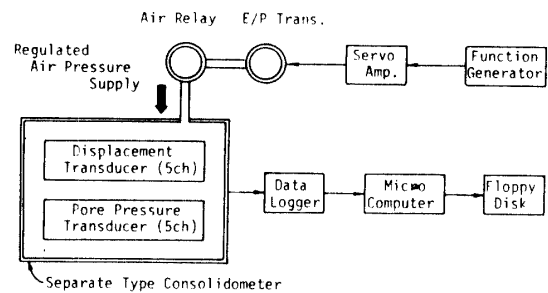


Fig. 4 Loading and recording apparatus

て片面排水状態としたうえで2段階の予圧密を行った。圧密圧力は $\sigma_0/2$ および σ_0 ($\sigma_0=98\text{kPa}$) とし、予圧密時間はそれぞれの圧力に対して24時間、6時間とした。予圧密後は、バルブ操作によって5個の分割層を管で連結し、層全体で片面排水条件としたうえで、 $\Delta\sigma=98\text{kPa}$ として繰返し载荷を行った。繰返し荷重の波形は Fig. 5 に示したような矩形波であり、载荷期間は $T=1000$ 秒(载荷期間 T_1 /除荷期間 $T-T_1=1$)とした。また、繰返し载荷を約17000分を行った後は、 $\Delta\sigma$ を载荷した状態で圧密を継続した。繰返し载荷中の実測波形を示したのが Fig. 6 である。

実験中は恒温水槽で供試体の温度を一定 ($15\pm 0.5^\circ\text{C}$) に保ち、各分割層の境界面での過剰間隙水圧、分割層の高さの測定を行った。なおバックプレッシャーとして98kPaを負荷した。

3.2 試料および供試体

実験に用いた試料は、佐賀県有明海沿岸で採取した通称有明粘土である。試料の物理的性質を Table- 1 に示す。

まずこの粘土を含水比が200%のスラリー状にした上

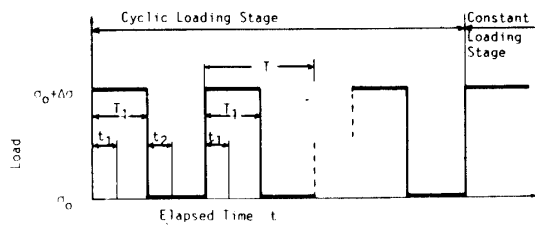


Fig. 5 Changes of the loading intensity

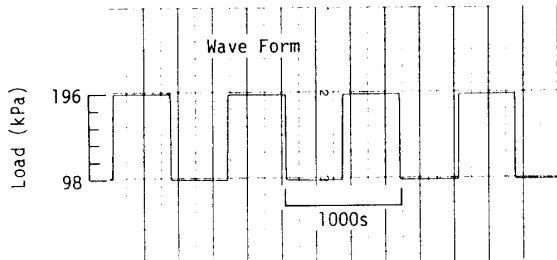


Fig. 6 Wave form during cyclic loading

Table 1 Physical properties of specimen

Specific gravity	G_s	2.633
Compression index	C_c	0.86
Liquid limit	w_L (%)	118.4
Plasticity index	I_p	79.2

で $420\mu\text{m}$ のフルイを通し、これを直径 30cm の圧密容器に入れて一次元圧密を行った。圧密圧力は 49kPa で圧密期間は約2ヶ月とした。そしてこのようにして作成したものから所定の寸法に切り出したものを供試体とした。

3.3 実験結果および考察

Fig. 7は各分割層の沈下曲線を示したものである。図中 No. 1は排水面側、No. 5は非排水面側の層の結果を示している。沈下曲線は排水面側の層ほど繰返し載荷による振幅が大きくなっている。また $t=6000\sim 17000$ 分の部分ほどの沈下曲線もほぼ平行になっているが、ひずみの大きさは排水面に近いほど大きく、深さ方向にある分布を持っている。このような傾向は静的載荷による層別計測型圧密試験でも得られている⁹⁾。

一方 $t=17000$ 分以降の部分は繰返し載荷後に $\Delta\sigma$ を継続載荷させて得た結果である。排水面側より非排水面側の沈下量が大きくなり沈下曲線が交差しているが、網干・松田¹⁰⁾による粘土の載荷-除荷-再載荷試験でも

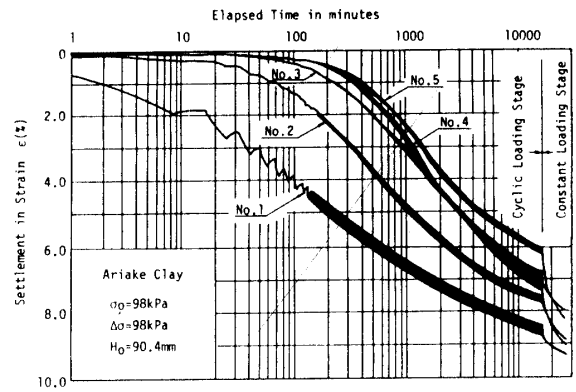


Fig. 7 Consolidation curves by separate-type-consolidometer for each layer

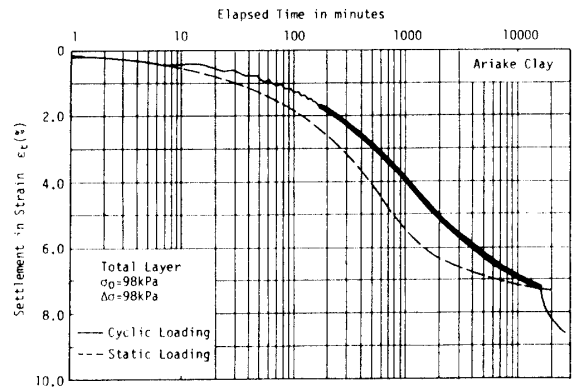


Fig. 8 Consolidation curves by separate-type-consolidometer for total layer

同様の傾向がみられる。

Fig. 8は繰返し載荷および静的載荷によって得られる層全体の沈下曲線を示したものである。両者を比較すると17000分までは静的載荷によって得られる沈下量が明らかに大きくなっていることがわかる。しかし、その後は、繰返し載荷による沈下量が大きくなっており、このような傾向は既に報告されている結果¹⁾²⁾³⁾⁴⁾と一致している。

また、実験では約17000分(繰返し回数=1000回)で繰返し載荷を止め、その後 $\Delta\sigma$ を載荷した状態で放置したが、その場合沈下速度は繰返し載荷中に比べて著しく大きくなることわかる。このことは、長期間繰返し応力が作用した後応力が一定の状態で放置される場合、 $\Delta\sigma$ が負荷された状態で放置されるかあるいは $\Delta\sigma=0$ の状態で放置されるかによって沈下特性は大きく異なることを示している。

つぎに各分割層境界面での過剰間隙水圧の経時変化を示したものがFig. 9 (a), (b), (c)で、それぞれ $z/H=0.2, 0.4$ および 1.0 の結果である。いずれの図に

においても実線は実測値、点線は先述した Wilson の解であって、繰返し载荷の各サイクルにおいて $\Delta\sigma$ の载荷および除荷後20秒から500秒の間の変化を示したものである。なお Wilson の解を求めるために、ここでは C_v の値として静的载荷による層別計測型圧密試験での層全体の沈下量をもとに \sqrt{t} 法によって得られた値 ($C_v = 0.048\text{cm}^2/\text{min}$) を用いた。

Fig. 9 (a) ($z/H=0.2$) では、実測値において $\Delta\sigma$ の载荷・除荷にともなう過剰間隙水圧の変化が明確にみられるのに対して、Wilson の解ではその変化がほとんどみられない。また、圧密初期においては $\Delta\sigma$ の载荷直後および除荷直後の過剰間隙水圧の経時変化を実測値と Wilson の解とで比較するとほぼ等しくなることがわかる。

一方、Fig. 9 (b) ($z/H=0.4$) では $\Delta\sigma$ の载荷・除荷にともなう過剰間隙水圧の変化は Fig. 9 (a) ($z/H=0.2$) の場合に比べると小さい。また、圧密初期における $\Delta\sigma$ の载荷および除荷直後の過剰間隙水圧の経時変化は $z/H=0.2$ の結果と同様に Wilson の解とほぼ一致している。同様な傾向は Fig. 9 (c) ($z/H=1.0$) でも見られる。

ただ $z/H=0.2$ において $\Delta\sigma$ の载荷・除荷にともなう過剰間隙水圧の変動量に関して実測値と Wilson の解をほぼ等しくするためには C_v の値を約3倍にしないといけない。しかし、その場合は大きい z/H で $\Delta\sigma$ 载荷時の過剰間隙水圧の値が実測値より小さくなる傾向がみられることから、粘土層内部では深さ方向に C_v の値が一定ではないといえる。

一方 Fig. 10 は静的载荷における各分割層境界面での過剰間隙水圧の経時変化を示している。図中実線は実測値であり、点線は層全体の沈下曲線より得た C_v をもとに得た Terzaghi の解である。両者を比較すると圧密初期には z/H のいずれの値に対しても過剰間隙水圧の消散は Terzaghi 解より速くなっているが、その後はほぼ等しくなっており z/H の各値に対してその傾向は等しく繰返し载荷の場合と傾向が異なっている。

つぎに過剰間隙水圧の深さ方向分布の時間的变化を示したものが、Fig. 11(a), (b), (c) で、それぞれ繰返し回数 $N=6$ サイクル、60サイクル、600サイクルでの結果である。図中 t_1 は繰返し载荷の各サイクルにおいて $\Delta\sigma$ の载荷の瞬間からの経過時間であり、 t_2 は除荷の瞬間からの経過時間である。また図中の実線は実測値であり、点線は先述の Wilson の解である。

Fig. 11(a) では繰返し回数 N が6サイクルと少ないので $\Delta\sigma$ の载荷中の過剰間隙水圧の消散はそれほど大きくなく、そのため除荷時の負圧の発生量も比較的小

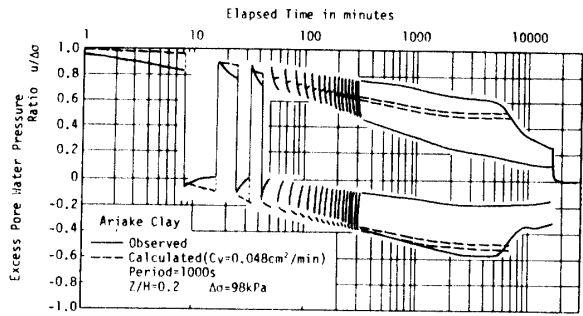


Fig. 9 (a) Changes of excess pore water pressure ($z/H=0.2$)

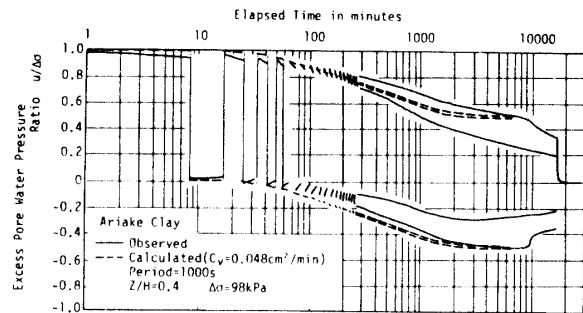


Fig. 9 (b) Changes of excess pore water pressure ($z/H=0.4$)

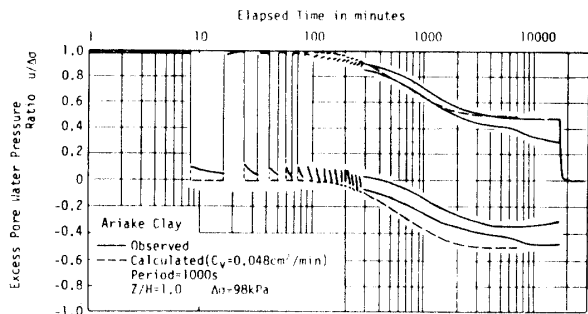


Fig. 9 (c) Changes of excess pore water pressure ($z/H=1.0$)

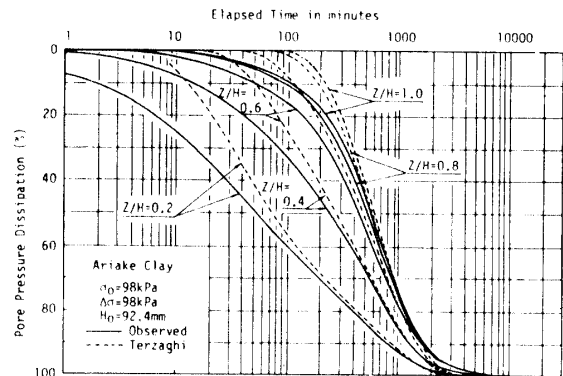


Fig. 10 Pore pressure dissipation inside the specimen for static loading

さい。一方、Wilsonの解では $z/H=0.4$ 以深では比較的実測値と一致しているが、 z/H が0.2より小さいと、Wilsonの解における過剰間隙水圧の変動は実測値より大きい。

Fig. 11 (b) は $N=60$ サイクルの結果であるが、このとき $\Delta\sigma$ 載荷中の過剰間隙水圧は50%程度まで消散している。また $\Delta\sigma$ の除荷にともなう生じる負圧も大きくなっている。さらに時間が経過して $N=600$ サイクルの結果が Fig. 11 (c) である。 $N=600$ サイクルは経過時間 t が約10000分に相当するが、このとき実測値および Wilson の解いずれにおいても曲線形は正負対称になっている。なお層全体の沈下曲線より静的圧密の場合と同様な方法で一次圧密終了時間を求めると、 $N=600$ サイクルにおいてはすでに一次圧密は終了している。また Wilson の解においては $z/H=0.4$ 以深では $\Delta\sigma$ の載荷時および除荷時において過剰間隙水圧の変化はみられないのに対して実測値においては過剰間隙水圧の変化がみられる。

合と同様な方法で一次圧密終了時間を求めると、 $N=600$ サイクルにおいてはすでに一次圧密は終了している。また Wilson の解においては $z/H=0.4$ 以深では $\Delta\sigma$ の載荷時および除荷時において過剰間隙水圧の変化はみられないのに対して実測値においては過剰間隙水圧の変化がみられる。

4. 結 語

以上層別計測型圧密試験装置を用いて、繰返し圧密時の粘土層内部の過剰間隙水圧および沈下ひずみの時間的变化を調べた。その結果以下のことが明らかとなった。

- (1) 繰返し載荷による層全体の沈下曲線と静的載荷による沈下曲線を比較すると、静的載荷によって生じる沈下量は、一次圧密期間中は繰返し載荷による沈下量より大きい。しかし、その後は繰返し載荷による沈下が卓越する。また、繰返し載荷後 $\Delta\sigma$ を負荷した状態で放置すると沈下が急速に進む。
- (2) 各分割層の沈下ひずみは繰返し回数が増加しても一様にならず、深さ方向にある分布を持って沈下が進行する。
- (3) 静的載荷による層別計測型圧密試験から求めた C_v を使うと Wilson の繰返し圧密解は、載荷および除荷直後の過剰間隙水圧の経時変化については実測値とほぼ一致するが、載荷・除荷にともなう過剰間隙水圧の変化量は特に排水面に近いところにおいて実測値より小さくなる。
- (4) 深さ方向の過剰間隙水圧分布は繰返し回数によって大きく影響される。そして層全体の沈下曲線から静的圧密時と同様な方法で求めた一次圧密終了時には $\Delta\sigma$ の載荷・除荷時の過剰間隙水圧分布は正負対称な曲線形状を示す。

謝 辞

なお、本研究を行うにあたっては、本学椋木隆技官および当時の本学学生モハマド ノール シャム君の助力を得た。末筆ながらここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Fujiwara H., Yamanouchi T., Yasuhara K. and Ue S.: Consolidation of Alluvial Clay under Repeated Loading, Soils and Foundations, 25, 3, 19-30, 1985.
- 2) Fujiwara H., Ue S. and Yasuhara K.: Secondary Compression of Clay under Repeated Loading, Soils

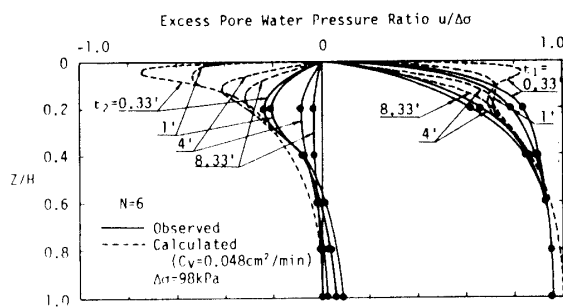


Fig. 11(a) Excess pore water pressure at any depth ($N=6$)

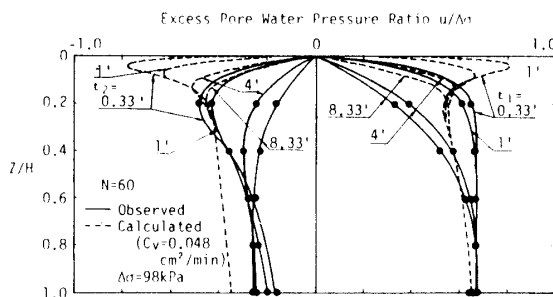


Fig. 11(b) Excess pore water pressure at any depth ($N=60$)

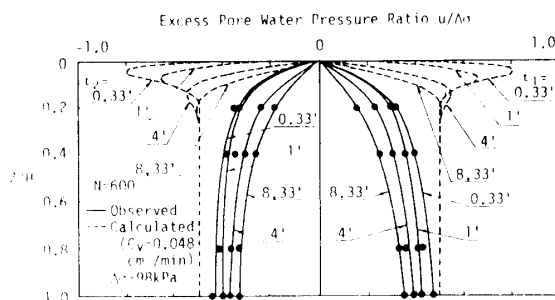


Fig. 11(c) Excess pore water pressure at any depth ($N=600$)

- and Foundations, 27, 2, 21-30, 1987.
- 3) 岩田 敏, 陶野郁雄: 新潟県六日町における消雪用揚水に伴う地盤沈下とその解析, 土と基礎, 34, 11, 19-24, 1986.
 - 4) 木下効志, 卷内勝彦, 石川敏博: 繰返し荷重による粘土の圧密特性, 第40回土木学会年次学術講演会, III-285, 569-570, 1985.
 - 5) Wilson N. E. and Elgohary M. M.: Consolidation of Soils under Cyclic Loading, Cana. Geotech. J., 11, 420-423, 1974.
 - 6) TOHNO I., IWATA S. and SHAMOTO Y.: Land Subsidence Caused by Repeated Loading, Proc. of the XII ICSMFE, 25/8, 1819-1822, 1989.
 - 7) Baligh M. M. and Levadoux J. N.: Consolidation Theory for Cyclic Loading, Proc. of the ASCE, 104, GT4, 415-431, 1977.
 - 8) 成田国朝, 奥村哲夫, 山口柏樹: 変動するタンク荷重下での圧密挙動, 第21回土質工学研究発表会, 1273-1274, 1986.
 - 9) Aboshi H., Matsuda H. and Okuda M.: Preconsolidation by Separate Type Consolidometer, 10th ICSMFE, 577-580, 1981.
 - 10) 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, 340, 139-144, 1983.
(平成2年4月14日受理)