

層別計測による事前圧密工法の基礎的研究

A STUDY ON PRECOMPRESSION TECHNIQUE, BY
SEPARATE-TYPE CONSOLIDOMETER

網 干 寿 夫*・松 田 博**

By Hisao ABOSHI and Hiroshi MATSUDA

1. 緒 言

軟弱地盤上に構造物を築造する際には、支持力不足や工期短縮のため、建設後の不等沈下・残留沈下等の問題を生じることが多く、近年のように構造物が大型化・精密化している現在では、沈下抑制あるいは施工精度に対する要求度も一段と増してきている。さらに、将来的には地盤沈下に対する規制も社会情勢からみて一段と強化されることが予測され、二次圧密も含めた残留沈下を事実上なくすような工法の開発が望まれるところである。

このようなニーズに対処する最も有効な施工法の1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）があり、この工法はサンドドレーン工法と併用されて、軟弱地盤改良工法としてよく用いられている。特に不等沈下に対する制限が厳しい場合、たとえば、軟弱地盤上の下水処理場の建設において、杭基礎とした場合には、ネガティブフリクションによる影響が大きいこと、構造物と周辺地盤の間の沈下量の差によって、建設後配管系統に損傷を生じること、あるいは経済的に安価であること等からこの工法が用いられたという報告がある¹⁾。

事前圧密工法においては、地盤はサーチャージとその除荷、さらに構造物建設によって、圧密-膨張-再圧密という過程を経ることとなる。そして、再圧密時には粘土層内部において過圧密と正規圧密部分が同時に含まれることになり、そのときの圧密挙動は複雑で、それは除荷時の有効応力分布によって大きく影響される。

このような、圧密-膨張-再圧密を含む地盤の挙動のうち、膨張過程を含む圧密については、すでにその解析解も得られており²⁾、またサーチャージ除荷後の残留沈下予測法に関する研究もいくつかみられる³⁾。これに対し

て、再圧密過程での圧密特性については、いまだに明確にされていない点が多い。

本論文は、粘土層内部の沈下ひずみや間隙水圧の正確な測定が可能な、層別計測型圧密試験装置を用いて、事前圧密を受けた粘土層の再載荷後の沈下挙動、あるいは間隙水圧の変化等を調べて、事前圧密工法でみられる圧密現象をより明確にしようとするものである。

なお再圧密過程の解析にあたっては、その基礎方程式は得られているものの、その解析は複雑になることから、ここでは有限要素法による一次元圧密解析を行った。さらに、事前圧密を受けた粘土の二次圧密特性についても新たな知見が得られたので報告するものである。

2. 層別計測による一次元圧密試験

(1) 試 料

実験に用いた試料は、1965年に旧広島大学工学部構内（現在は東広島市へ移転）に、圧密沈下の研究のために設けられた模型粘土地盤より不攪乱状態で採取したものである。同粘土試料は広島市丹那沖の埋立地造成工事の際に採取したもので、異物を取り除いた後、下部を砂層とした地下水面下のトレンチに層厚が約1.3mになるように流し込み、その上に30~40cmの砂質土をのせて約16年間放置したものである。したがって、試料採取にあたっては比較的均質な試料を得ることができるとともに、長時間圧密によってエイジング効果（Aging Effect）も十分発揮されているために、現場の状態に近くなっているものと思われる。

この試料の物理的性質を表-1に示す。

表-1 試料の物理的性質

	Clay	Silt	Sand	ω_L	ω_p	$\rho_s(\text{kg/m}^3)$	C_c
Hiroshima Clay	27%	68%	5%	100.0%	58.2%	2 650	0.699

* 正会員 工博 広島大学教授 工学部第四類（建設系）

** 正会員 工博 山口大学講師 工学部土木工学科

(2) 実験装置

ここで用いた装置は、層別計測型圧密試験装置とよばれるもので、その特徴を普通のオーエドメーターと比較して、図-1に示す。図中(b)は、普通のオーエドメーターの試験状態で、直径に対して排水長がかなり大きい場合を示している。一方(a)は、同じ排水長をもつ粘土供試体について層別計測型圧密試験の状態を示している。

図より明らかなように、(b)の装置では、①圧密中の間隙水圧は下端の非排水境界面で測定できるが、粘土層内部の値については正確な測定ができない、②直径に対して排水長が長い供試体に荷重を行うと、側面摩擦による応力減少が顕著になる、③沈下ひずみは、層全体についての測定が行われるが、層内部のひずみの変化は正確に測定できない、等の欠点がある。

これに対して、(a)の機構をもつ層別計測型圧密試験装置では、荷重重が分割された各層ごとに加わるために、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。また各分割層の境界面での間隙水圧および各分割層ごとの沈下ひずみを正確に測定できる等の特徴がある。

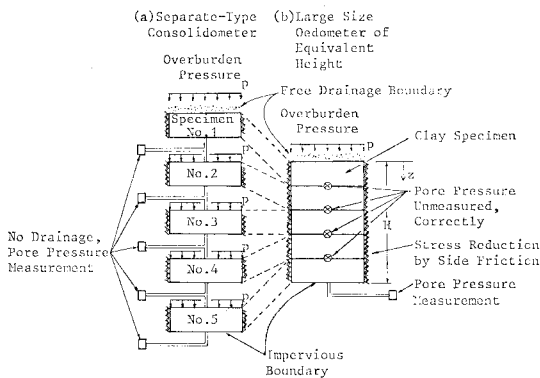


図-1 層別計測型圧密試験装置とオーエドメーターの比較

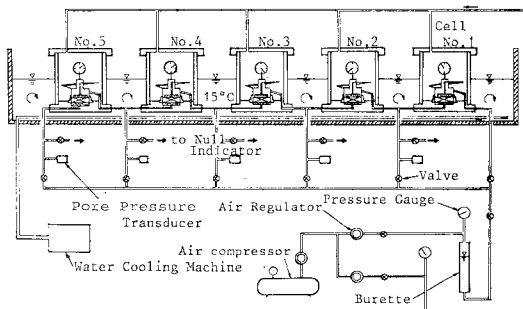


図-2 層別計測型圧密試験装置

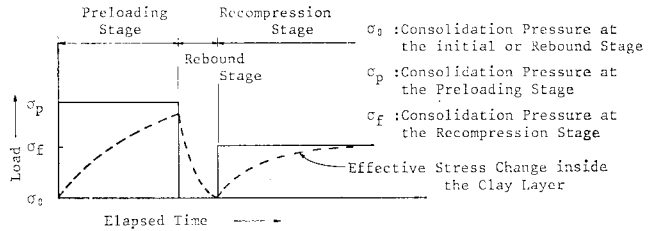


図-3 荷重プロセス

本装置において、分割供試体の寸法は厚さ 20 mm、直径 60 mm であって、それを 5 個直列に連結することにより、層厚が 100 mm、片面排水条件での圧密試験が行われるようになっている。この装置の系統図を図-2に示す。

実験中、圧密容器はすべて恒温水槽（幅 650 mm、長さ 1500 mm、深さ 300 mm）に入れることによって、供試体の温度を $15 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に保った。また間隙水圧の測定には、ひずみゲージタイプの小型圧力変換器（ダイヤフラムの直径 5.7 mm）を用い、特にゼロ点移動による測定誤差のチェックも同時に行うとともに、バックプレッシャーとして 49 kN/m^2 を負荷した。

(3) 荷重方法

まず供試体を各圧密容器にセットした後、予圧密後の供試体の間隙比を均一にするという目的で、各分割層ごとに両面排水状態にし、圧密圧力 $\sigma_0/2 = 39.2 \text{ kN/m}^2$ 、 $\sigma_0 = 78.4 \text{ kN/m}^2$ で 2 段階予圧密を行った。各荷重段階の荷重期間は、それぞれ 24 時間である。そして、予圧密後はバルブ操作によって各層を直列に連結し、層全体として片面排水条件としたうえで、プレロード $\Delta\sigma_1 (= \sigma_p - \sigma_0) = 112 \text{ kN/m}^2$ を荷重した。ここに σ_p は事前圧密荷重である。そして、間隙水圧より求めた層全体の有効応力に関する平均圧密度 U が 91.1%、56.8%、34.0% に達したとき $\Delta\sigma_1$ の除荷を行った。除荷後、間隙水圧は全層にわたって負圧になるが、それがほぼゼロに収束したことを確認したうえで、構造物荷重に相当する $(\sigma_f - \sigma_0) = 39.2 \text{ kN/m}^2$ を再荷重した。これらの圧密曲線は次節の図-4の曲線 II、III、IV にそれぞれ対応する。

このような荷重プロセスを図-3に示しているが、上記の荷重条件のもとでは層全体の平均圧密度が 34.0% のときに除荷を行うと、そのときの平均有効応力は、最終荷重 σ_f にほぼ等しくなる。

なお、上記以外に予圧密後に $(\sigma_p - \sigma_0)$ または $(\sigma_f - \sigma_0)$ を荷重し、除荷および再荷重を行わない場合の実験も行った。（それぞれ、図-4の曲線 I および V に対応する）

3. 一次元圧密における荷重～除荷～再載荷過程

(1) 実験結果・考察

典型的な沈下ひずみ～時間の関係を 図-4 に示す。事前圧密を行った場合の曲線, II, III, IV はすべて曲線 I と V の間におさまり, 除荷時の平均圧密度が大きいとき, リバウンドも大きくなるが, 再載荷後の残留沈下は大幅に抑制されており, 事前圧密による効果が明確に現われている。

また, 特に注目すべきこととして, 曲線 IV は除荷時の平均圧密度が 34.0% であって, これは先述したように, 事前圧密によって平均有効応力が最終荷重 σ_f とほぼ等しくなるケースである。平均的には最終荷重に等しい事前圧密を行っているにもかかわらず, 除荷時の圧密度が小さいと明らかに再載荷後大きい残留沈下が生じる。

このような, 荷重～除荷～再載荷過程をさらに詳しくみるために, IV のケースについて各分割層ごとの沈下曲線を示したものが 図-5 である。図中, No. 1 は排水面側の層を示し, No. 5 は非排水面側の層を示している。粘土層内部においても非排水面に近い層では, 再載荷によって大きい沈下が生じ, 一方排水面に近い層では再載荷後の沈下がきわめて小さいことが明確に示されている。

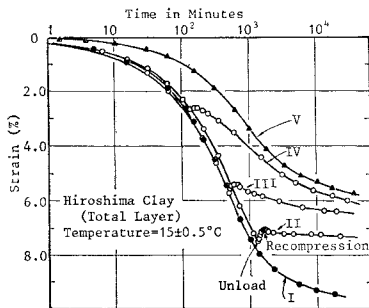


図-4 荷重-除荷-再載荷過程での沈下ひずみ

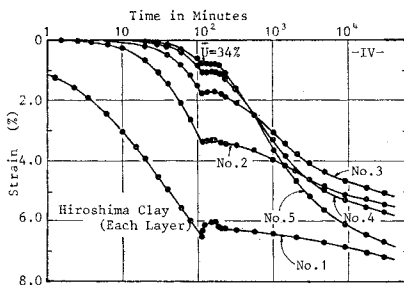


図-5 粘土層内部の沈下ひずみ

る。なお, 図中 No. 2, 3, 4, 5 の沈下曲線は再載荷後互いに交差し, 複雑な挙動を示しているが, この点に関しては次のように考えることができる。

いま有効応力に関する圧密度とひずみに関する圧密度を等しいと仮定し, No. 2 と No. 5 を比較すると, No. 2 の場合は除荷時の沈下ひずみが約 3.4% であり, これは平均圧密度が 38.6% に相当することから, そのときの平均有効応力は 121.6 kN/m^2 と考えられる。したがって, 再載荷によって荷重を 117.6 kN/m^2 とした場合の荷重変化は -4.0 kN/m^2 となることから, それによって生じる一次圧密はほぼゼロである。一方, No. 5 の場合は, 除荷時の沈下ひずみが 0.8% であり, それは平均圧密度にして約 9.1% である。したがって, そのときの平均有効応力は 88.6 kN/m^2 と考えられる。そして再載荷によって再び 117.6 kN/m^2 とした場合に, 有効応力増加は 29.0 kN/m^2 となり, これによる沈下ひずみは 3.0% と推定される (ただし, $e_{0IV}=1.82$)。したがって, その単純な比較からいえば, 後者の方の沈下ひずみが大きくなってもおかしくはない。実際には, それに二次圧密による沈下ひずみが加算されるので, その差はさらに大きくなると考えられる。

また, 図-5 の No. 5 の沈下ひずみは, 経過時間 10000 分においては最終的な有効応力が等しいにもかかわらず, 図-4 の V の沈下ひずみより大きくなっている。これは, すでに示されているように, 層全体の平均的な沈下ひずみは, 粘土層内各部分の沈下ひずみとは異なること, また 図-5 は粘土層内部が部分的に過圧密となった圧密のケースであって, 後述するように 図-4 の場合とは圧密速度が異なること等に起因していると考えられる。

次に, 粘土層内部の間隙水圧の変化を示したものが, 図-6 である。除荷後間隙水圧は全層にわたりいったん負圧となり, それはほぼ同一の径路をたどって急速にゼロに収束している。そして再載荷は間隙水圧がほぼゼロになったとき行われるが, それによって粘土層内部には新たに正の間隙水圧が発生し, それは時間とともに消散して最終的にはゼロとなる。

図-7 は, 図-5, 6 の沈下曲線と間隙水圧消散曲線中, 再載荷以降について再載荷時を始点として描いたも

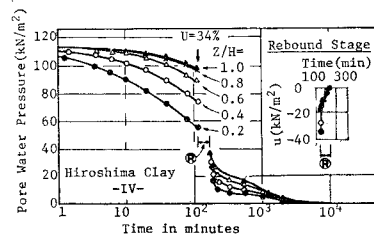


図-6 間隙水圧消散過程

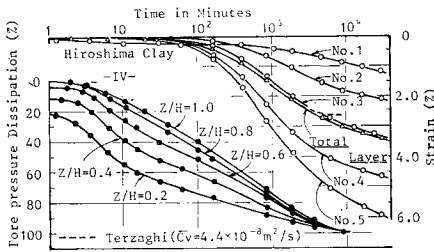


図-7 再載荷時を始点として描いた沈下ひずみおよび間隙水圧の変化

のである。図中ひずみについてみると、排水面寄りの層から得た曲線形は、荷重増加率が小さいときの圧密曲線の形と類似しているのに対し、非排水面寄りの層から得たものは、Terzaghi 型の曲線形となっている。これは、各切片ごとの有効増加応力率（すなわち、再載荷時に加えられた増加応力と、再載荷直前に到達していた有効応力の比）が違うためである。

同図には、層全体の沈下ひずみも同時に示されているが、点線で示した Terzaghi の理論曲線とよく一致していることから、それよりみかけの圧密係数 \bar{C}_v を求めると、 $\bar{C}_{vIV} = 4.4 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ となる。一方、図-4 においてプレロードを行わず、構造物荷重に相当する $(\sigma_f - \sigma_0)$ のみの載荷を行った V の曲線より、 C_v を求めると $C_{vV} = 3.78 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ となることから、事前圧密により再載荷後のみかけの圧密係数 \bar{C}_v は大きくなる傾向がみられる。同様に曲線 II, III について再載荷後の \bar{C}_v を求めると、 $\bar{C}_{vII} = 2.83 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ 、 $\bar{C}_{vIII} = 2.45 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ となり、除荷時の圧密度が大きくなるに従って \bar{C}_v も大きくなり、特に $\bar{C}_{vII}/C_{vV} \approx 7$ となっている。

すでに過圧密粘土の圧密係数は正規圧密粘土のそれより大きくなるということが指摘されている⁴⁾が、事前圧密によって部分的に過圧密となった層を含む粘土層においても、みかけの圧密係数の増加がみられる。

(2) 再載荷過程を含む一次元圧密解析

事前圧密工法でみられるように、粘土層を圧密後ある時間膨張させ再圧密をする場合、有効応力径路が除荷曲線上を戻ると考えると、再載荷時の圧密は正規圧密時に到達していた有効応力以下では膨張時の圧密方程式に支配され、それ以上では正規圧密時の圧密方程式に支配されると考えるのが一般的である。このような考え方に立ち、山口²⁾はすでにその基礎方程式を得ているが、このような場合の解は有限要素法によるか、差分法によるかと容易に得られる。

そこで、ここでは Biot の圧密理論に対して適用された有限要素法による一次元圧密解析³⁾を行った。解析に用いたモデルは、図-8 に示した線要素モデルである。

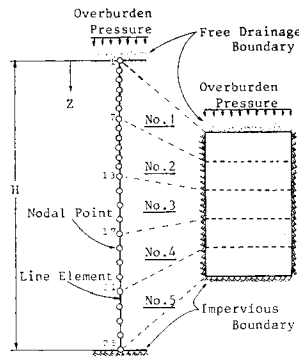


図-8 解析に用いられた線要素

排水条件および変位拘束条件としては、実験との対応を考慮して、上端のみ排水、下端で変位拘束とした。なお、このモデルを用い正規圧密時について Terzaghi 理論と比較することによって、両者はよく一致することを事前に確認した。

また粘土の応力-ひずみ関係としては、 $e \sim \log \sigma'$ の直線性を仮定する方がより実際に近いと考えられることから、一例として示した図-9 のような応力-ひずみ関係を用いた。まず、正規圧密過程、除荷過程では、 $C_C' = C_C / (1 + e_0)$ 、 $C_E' = C_E / (1 + e_0)$ の勾配をもつ直線と考え、再載荷時には正規圧密時に到達した有効応力以下では $C_R' = C_R / (1 + e_0)$ 、それ以上の有効応力では C_C' になると仮定した。ここに、 C_C 、 C_E 、 C_R はそれぞれ正規圧密、膨張、再圧密時の圧縮指数、 e_0 は初期間隙比である。

一方圧密中の透水係数については、正規圧密、除荷、再載荷時を通じて大きく変わらないという報告⁵⁾があることから、今回行った実験条件下では全過程を通じて近似的に一定とした。

このようにして得られた結果を、用いられた定数とともに図-10 に示す。同図には実測値も示している。両

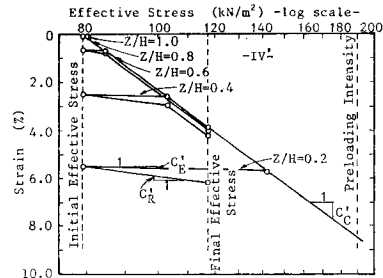


図-9 解析に用いられた応力-ひずみ関係

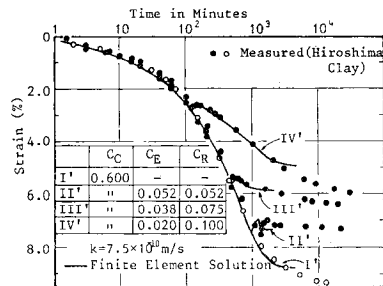


図-10 解析結果

者を比較すると、いずれも 図-6 で示されるように間隙水圧の消散中についてはよく一致している。ただ、II' は正規圧密過程での実測値のずれのために、多少相違がみられる。

ここでは、一次圧密過程について、有限要素法等によって、このような複雑な荷重条件に対しても、内部の状況もこめて予測計算することが可能であることを示した。しかし、この解析では二次圧密については考慮されていないことから、今後さらに研究を進める必要がある。

(3) 再載荷後の二次圧密沈下について

すでに述べたように、除荷時の圧密度を変化させたときの層全体、および各分割層ごとの沈下ひずみ～時間関係より、間隙水圧がほぼ消散する荷重してから約 10000 分以降の沈下曲線をもとに二次圧密係数 ϵ_a を次式によって求めた。

$$\epsilon_a = \frac{d\epsilon}{d \log t} = \frac{\Delta H/H_0}{d \log t} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 H_0 は初期層厚であり、 ΔH は間隙水圧消散後のある時間内に生じる沈下量である。

そして、 ϵ_a を除荷時の圧密度 U との関係で整理したものが 図-11 である。多少のばらつきはあるものの、二次圧密係数 ϵ_a は除荷時の圧密度によってほぼ一義的に決まり、その値が大きいほど二次圧密係数は減少することがわかる。ただし同図は荷重条件を等しくし、除荷時の圧密度のみを変化させた場合に得られたものである。

一方、表-2 に示した荷重条件でも同様の実験を行い、再載荷後の二次圧密係数を求めた。そして、新しく定義した有効過圧密比 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ という応力比との関係で整

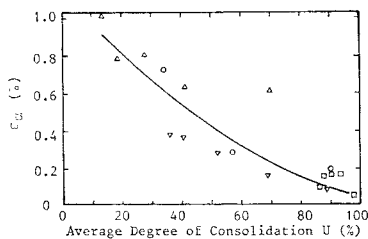


図-11 二次圧密係数と除荷時の圧密度の関係

表-2 載荷-除荷-再載荷段階での荷重

	σ_0 (kN/m ²)	σ_p (kN/m ²)	σ_0 (kN/m ²)	σ_f (kN/m ²)	U (%)
a	78.4	190.4	78.4	117.6	34.0
b	78.4	190.4	78.4	117.6	56.8
c	78.4	190.4	78.4	117.6	91.1
d	78.4	147.1	78.4	117.6	56.0
e	78.4	121.4	78.4	117.6	89.1
f	78.4	392.0	78.4	196.0	43.4
g	58.8	190.4	58.8	78.4	45.2

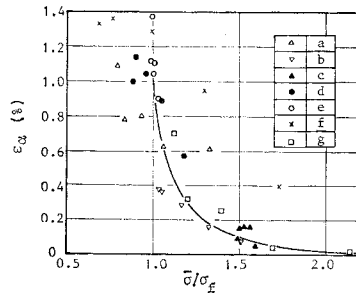


図-12 有効過圧密比と二次圧密係数の関係

理したものが 図-12 である。ここに、有効過圧密比とは、事前圧密荷重除荷時の有効応力 $\bar{\sigma}$ と最終荷重 σ_f との比によって定義される応力比である。過圧密比といえば、一般には σ_p/σ_f で定義されるが、除荷時の有効応力が事前圧密荷重に一致する、すなわち事前圧密段階で 100% 圧密に到達していれば、有効過圧密比は過圧密比と等しくなる。

図から明らかなように、二次圧密係数はばらついてはいるものの、有効過圧密比 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ が 1.0 のときほぼ最大値をとり、 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ が増加すると急速に減少し、 $\bar{\sigma}/\sigma_f \approx 1.8$ でほとんどゼロに収束している。

このことより、事前圧密を行うことによって、再載荷後の二次圧密係数は減少し、その大きさは有効過圧密比 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ によって決まるといえるようである。ただし、 $\bar{\sigma}/\sigma_f \leq 1.0$ の場合は、正規圧密状態での二次圧密特性によって決まり、同一間隙比のもとでは ϵ_a は荷重増加率によって影響されないという報告⁷⁾があることから、ほぼ一定になると考えられる。

ただし、図-11 では ϵ_a-U の関係で整理して、両者の間にほぼ一義的な関係をみたが、それは $\sigma_p, \sigma_0, \sigma_f$ が一定であることから、 U と $\bar{\sigma}$ が比例関係となるためである。

二次圧密沈下に関する以上の結果をもとに、層厚および荷重強度が変化した場合の二次圧密係数について、次のように考えることができる。

二次圧密係数 ϵ_a は式 (1) で表わされる。

そこで、粘土の微少厚層(層厚 H_i) を考え、その層の有効応力が事前圧密によって $\bar{\sigma}_i$ にまで達し、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、

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

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

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

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

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

で表わされる。

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制御が可能となる。

以上のことから、事前圧密工法の採用にあたって特に注目すべき知見が得られた。

すなわち、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、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らすことができるものと考えられる。

なお、有効過圧密比と二次圧密係数の関係は、粘土の種類によって多少異なるものと思われるので、今後はさらに研究を続けたいと考えている。

4. 結 言

層別計測に基づき、事前圧密工法でみられる正規圧密、除荷、再載荷過程の粘土の圧密特性を調べた。その結果、事前圧密を受けた粘土層内の再載荷後の挙動、特に二次圧密沈下についての新たな知見を得ることができた。その中でおもなものをまとめて以下に述べる。

(1) 荷重条件を同一とすると、除荷時の平均圧密度を大きくすると、除荷によるリバウンドも大きくなるが、再載荷後の沈下は大幅に抑制される。特に、除荷時の平均有効応力を再載荷時の荷重強度と等しくしただけでは、残留沈下抑制効果を十分に得ることはできない。

(2) 粘土層内部の再載荷後の沈下～時間関係は、非排水面寄りの圧密度の低い層では、有効増加応力率が大きくなることから、Terzaghi 型の曲線形を呈し、排水面寄りの圧密度の高い層では、荷重増加率が小さいときの挙動を示す。

(3) 再載荷後の層全体の沈下曲線は Terzaghi 型の沈下曲線となることから、それよりみかけの圧密係数を求めると、それは除荷時の圧密度が増大すると大きくなり、特に事前圧密を行わない場合に比べると数倍も大きくなる。

(4) 除荷～再載荷過程を含む粘土の沈下挙動は、応力～ひずみ関係の非線形性を考慮した有限要素法による一次元圧密解析によって示され、実測値とのよい一致をみた。

(5) 事前圧密を行うことによって、再載荷後の二次圧密係数は減少し、その大きさは有効過圧密比 $\bar{\sigma}/\sigma_f$ によって決まるということが明らかにされた。

参 考 文 献

- 1) Aboshi, H., H. Matsuda and M. Okuda: Preconsolidation by separate-type consolidometer, X ICSMFE, Vol. 3, pp. 577~580, 1981.
- 2) 山口柏樹: 膨張過程を含む圧密について, 第 7 回土質工学研究発表会概要集, pp. 141~144, 1972.
- 3) たとえば, Johnson, S.J.: Precompression for improving foundation soils, ASCE, Vol. 96, No. SM 1, pp. 111~144, 1970.
- 4) 中瀬明男: 過圧密粘土の圧密特性, 第 6 回土質工学研究発表会概要集, pp. 117~120, 1971.
- 5) Yokoo, Y., K. Yamagata and H. Nagaoka: Finite element method applied to Biot's consolidation theory, Soils and Foundations, Vol. 11, No. 1, 1971.
- 6) 山口柏樹・村上幸利・竹前榮男: 除荷・再負荷時の粘土の圧密特性について, 土木学会第 28 回年次学術講演会講演概要集, III, 1973.
- 7) Wahls, H.E.: Analysis of primary and secondary consolidation, ASCE, Vol. 88, No. SM 6, pp. 207~231, 1962.

(1983.2.7・受付)