

プラスチックドレーン材を利用した真空圧密工法に関する実験

Consolidation of A Clayey Layer Treated by Plastic Drains

by Means of Vacuum

渡 義 治* (Yoshiharu Watari)

新 舎 博** (Hiroshi Shinsha)

林 健太郎** (Kentaro Hayashi)

キーワードズ：圧密／地盤改良／粘土／負圧／プラスチックドレーン (I.G.C. : D 5 / K 6)

1. まえがき

軟弱地盤の地盤改良工法の1つとして、Kjellman¹⁾の考案による真空圧密工法が我国に導入されたのは1960年代である。以来数多くの現場施工が行なわれ、現在既に一工法として確立された感があるが、現場の施工データ^{2) 3) 4) 5) 6) 7)}をみると、いくつかの不明確な点があるように思われる。すなわち、現場の施工データから主な問題点を把握すると、

1). 粘土層内部の負圧の伝播過程が明確でない。

2). 真空圧密工法はバーチカルドレーン工法と併用して用いられることが多いが、その際粘土層深部での改良効果が表層部分より小さくなる傾向がある。

などである。

本文は、まず最初に、真空排水と空気圧载荷による一次元圧密過程、すなわち沈下と粘土層内部の間隙水圧の挙動を比較し、上記1)の問題点を実験的に明らかにすることを試みた。次に、真空圧密工法とバーチカルドレーン工法との併用のモデル実験として、円筒土槽内にプラスチックドレーン材を打設し、その上部に負圧を作用させて、粘土層内部の圧密挙動を測定する実験を行なった。上記2)の問題は、主に改良域外からの水の浸透によって、粘土層の深部まで所定の負圧が伝播しないことが原因と考えられており、ここで行なった外部からの浸透水が全くない場合の実験結果は、この外部からの浸透水の影響を把握することはできないが、間接的な基礎データになるものと考えられる。

最後に、真空圧密工法の応用的研究として、軟弱粘土層内にプラスチックドレーン材を水平に布設し、ドレーンの一端に負圧を作用させた圧密実験を行なった。これは一般にHori-Vac工法 (Horizontal drain ⊕ Vacuum工法)⁸⁾と呼ばれるものであるが、現状では圧密改良効果および施工方法などに多くの未解明の点があり、実際の施工の段階までには至っていないものである。特に水平ドレーンの場合は、鉛直ドレーンに比べて、ドレーンの布設長が非常に長くなり、ドレーンの先端部分ではウェルレジスタンスによる圧密の遅れが生じることが考えられる。ここではウェルレジスタンスの影響を実験的に調べることを試みたものである。

2 真空排水と空気圧载荷による一次元圧密の比較

2.1 試料の物理特性

用いた試料は、2mmのふるいを通して雑物を除去した東京湾有明粘土であり、表-1に物理特性を示す。尚、後述する鉛直ドレーンおよび水平ドレーンに関する実験も表-1の試料を用いたものである。

表-1 試料の物理特性

	G_s	w_L	w_p	Clay	Silt	Sand
Ariake Clay of Tokyo Bay	2.60	83.3%	40.1%	57.3%	34.8%	7.9%

* 五洋建設(株) 技術研究所所長, ** 同左土質基礎研究室

2.2 実験方法

図-1は実験装置と実験方法を示したものである。真空圧密の負圧は水銀マンノメーターが所定の値になるように負圧弁を調整して作用させ、また載荷圧密は空気圧載荷とし、 $0.4 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ のバックプレッシャーを作用させて実験を行なった。

供試体は、圧密容器内に含水比を110%に調整した攪乱粘土の投入と間隙水圧計（ $\phi 6 \text{ mm}$, $t 3 \text{ mm}$ ）の設置後、水中で上部にゴムチューブ付きメンブレンを被せ、試料上部とメンブレンとの間の水をこのゴムチューブから除去して作成した。また、間隙水圧計はモールド側面に穴を開けて所定の位置に設置し、その後穴にゴム栓を押し込んで試料を密封した。

表-2は、実験条件を示したものであり、実験は $\phi 10 \text{ cm} \times \text{H} 4 \text{ cm}$ の供試体を用いた実験-Iと $\phi 10 \text{ cm} \times \text{H} 10 \text{ cm}$ の供試体を用いた実験-IIの2種類である。

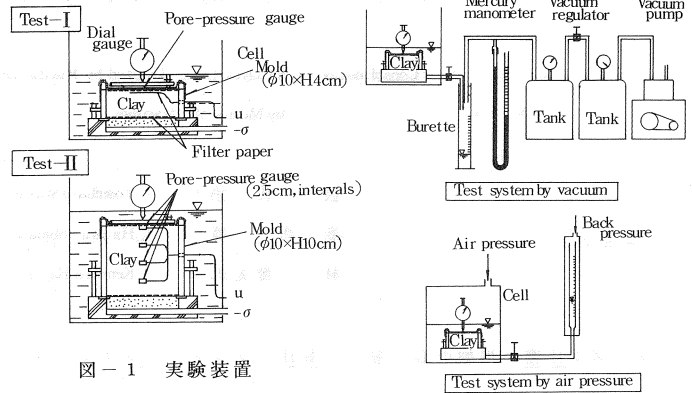


図-1 実験装置

表-2 実験条件

	$w_0 (\%)$	$\sigma (\text{kgf/cm}^2)$
Test-I	110	-0.05, -0.1, -0.25, -0.4, -0.8 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8
Test-II	110	-0.8 0.8

2.3 実験結果と考察

図-2および図-3は、それぞれ実験-Iの沈下と間隙水圧の測定結果を示したものである。真空圧密と載荷圧密の沈下曲線を比較すると、 $|\sigma| = 0.05$, 0.1 および 0.8 kgf/cm^2 の最終ひずみ量は幾分異なる傾向はあるが、すべての荷重レベルにおいて、圧密度が80~90%までの両者の沈下曲線はほぼ同一であり、また $|\sigma| = 0.8 \text{ kgf/cm}^2$ の長期沈下の結果をみると、両者は $\log t$ に対して平行に沈下することがわかる。一方間隙水圧の測定結果をみると、 $|\sigma| = 0.05$ および 0.1 kgf/cm^2 の場合は、真空圧密の負圧の伝播過程と載荷圧密の間隙水圧の消散過程はやや異なる傾向がある

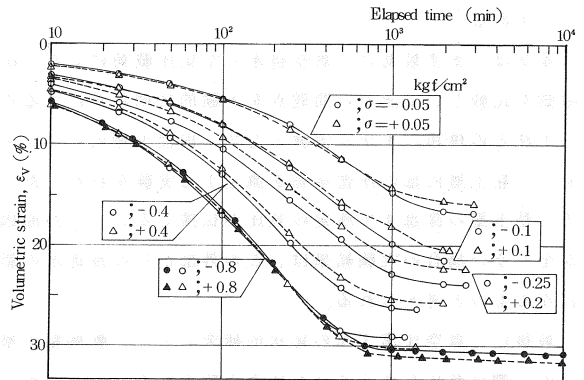


図-2 沈下曲線 (Test-I)

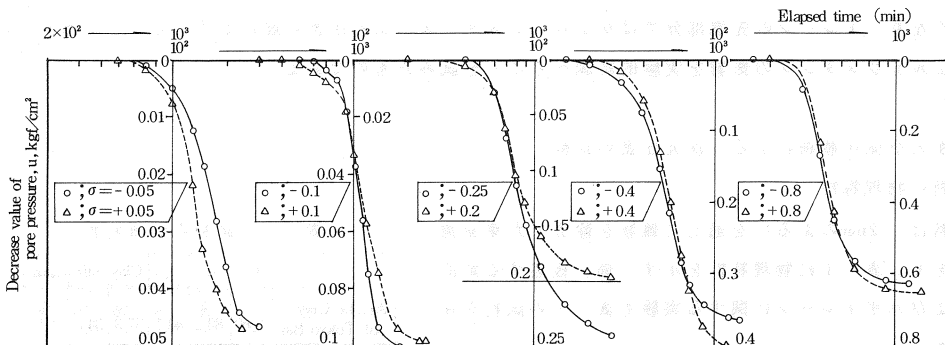


図-3 間隙水圧の測定結果 (Test-I)

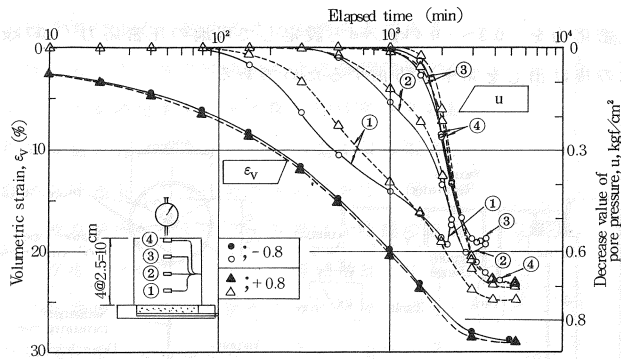


図-4 沈下と間隙水圧の測定結果 (Test-II)

が, $|\sigma| = 0.4$ および 0.8 kgf/cm^2 の場合は両者の間隙水圧の挙動は全く同一であることがわかる。

図-4 は実験-II の沈下と間隙水圧の測定結果を示したものである。この図を見ると, 真空圧密と載荷圧密の沈下曲線は非常によく一致していることがわかる。また, 両者の間隙水圧の挙動を比較すると, 多少の相違は見られるが両者はよく一致していると思われる。尚, 実験-I と II の圧密終了時の間隙水圧の値をみると, 実験-I の $|\sigma| \leq 0.4 \text{ kgf/cm}^2$ においては両者とも作用させた圧密応力に等しい量が真空圧密の場合は発生し, また載荷圧密の場合は消散しているが, 実験-I と II の $|\sigma| = 0.8 \text{ kgf/cm}^2$ の場合は, 両者とも $|u_f| = 0.65 \sim 0.75 \text{ kgf/cm}^2$ となり, 間隙水圧の値が作用させた圧密応力よりも幾分小さくなる傾向がある。この原因は現在のところ不明である。また, 実験-II の真空圧密の場合の間隙水圧の結果 (①~③) をみると, $u < 0.6 \text{ kgf/cm}^2$ までは間隙水圧は次第に減少するが, $u \approx 0.6 \text{ kgf/cm}^2$ に達すると, 間隙水圧が逆に上昇する傾向がある。これは間隙水中の溶存空気が負圧によって膨張することが一因であると考えられる。

図-5 は, 圧密終了後の含水比と密度の測定結果であるが, 真空圧密と載荷圧密の含水比と密度は全く同一であることが明らかである。

以上の結果より, 一次元圧密に関しては真空圧密と載荷圧密は現象論的には全く同一として取り扱ってよいと考えられる。

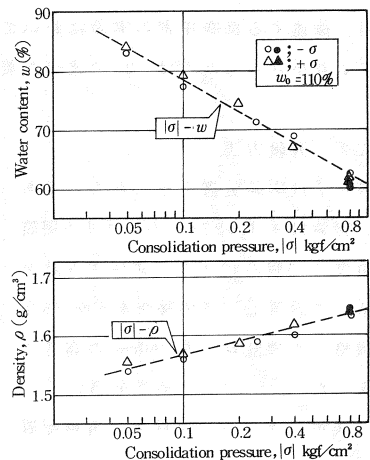


図-5 圧密後の含水比と密度

3. 鉛直ドレーンを打設した粘土層の真空圧密モデル実験

3.1 土中ひずみ計の改良

著者らは, 粘土層内のひずみ分布の測定を目的としたピストン式ひずみ計 (従来型) を開発したことを既に報告⁹⁾しているが, 粘土が一次元的に変位だけでなく, 水平方向にも移動する場合は, 従来型では粘土と一体化するために取りつけた金網の水平方向への移動により, ピストン下端を支点としたモーメントが作用してピストンが円筒内にスムーズに移動しないことが明らかになったので, 図-6 に示すような改良を行なった。主な改良点は以下のようなものである。

1). 金網をジョイント用のビニールチューブ内に取り付けて, 上記のモーメントの作用を取り除いた。

2). 真空圧密の場合は, 粘土層内の負の間隙水圧が大きくなると, ピストンと円筒とのすき間から円筒内の着色水が微量ながら外へ抜け出すことが明らかとなったので, 着色水上部に機械オイルを1~2滴入れてこの抜け出しを完全に防止した。

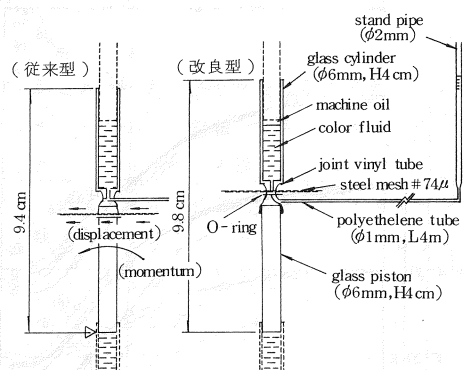


図-6 ピストン式ひずみ計

尚、後述する真空圧密の実験において、圧密応力を $-0.3 \sim -0.4 \text{ kgf/cm}^2$ と設定して現地の圧密応力(-0.7 kgf/cm^2 程度)より小さくしたのは、2)で述べた着色水の抜け出しを完全に防止するためである。

3.2 実験方法

図-7は実験装置を示したものである。実験はまず $\phi 27 \text{ cm}$ のアクリル円筒の中央に19個のピストン式ひずみ計を連結して設置し、その後含水比を105%に調整した攪乱粘土を166cmの高さで投入した。次にガイド装置を用いて、プラスチックドレーン材を三角形配置で鉛直に6本打設した。実験に用いた

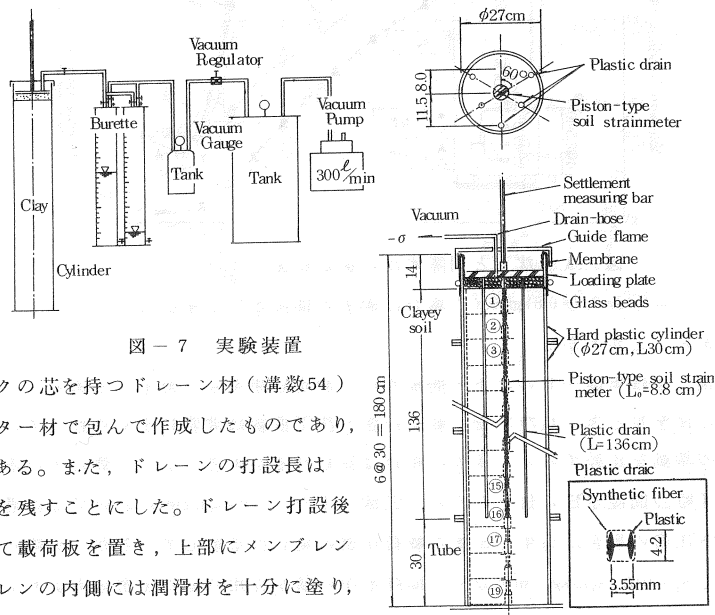


図-7 実験装置

ドレーン材は、幅が10cmでプラスチックの芯を持つドレーン材(溝数54)を2溝に切り出し、その外周をフィルター材で包んで作成したものであり、ドレーン材の通水面積は実物の $1/27$ である。また、ドレーンの打設長は136cmとし、下部に30cmの未改良層を残すことにした。ドレーン打設後は粘土層上部に5cm厚の排水層を設けて載荷板を置き、上部にメンブレンを被せて試料を密封した。尚、メンブレンの内側には潤滑材を十分に塗り、メンブレンが沈下に追従できるように配慮した。粘土に作用させた負圧の大きさは、 -0.4 kgf/cm^2 である。

3.3 実験結果と考察

図-8は沈下曲線を示したものであり、また同図内に圧密試験から得られた圧密係数 c_h ($c_h = c_v$)⁹⁾を用いて求めた理論曲線を示す。この図をみると、実測沈下と理

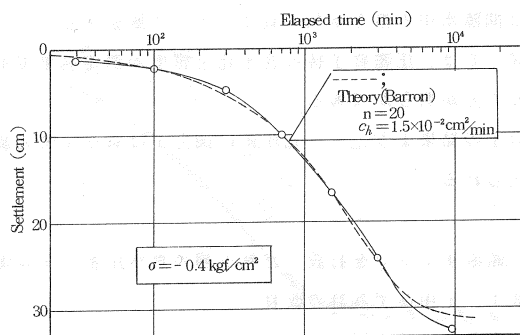


図-8 沈下曲線

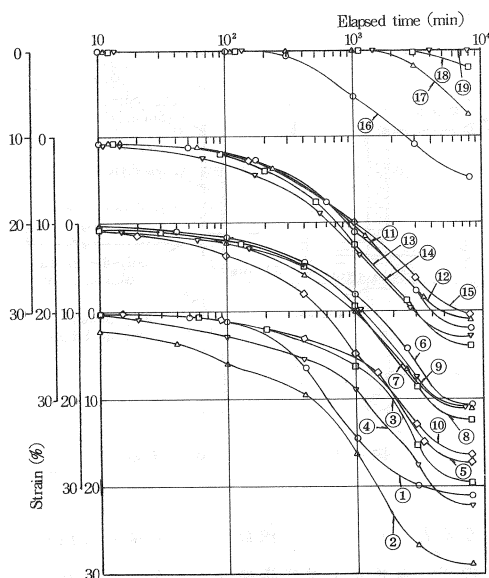


図-9 層別沈下曲線

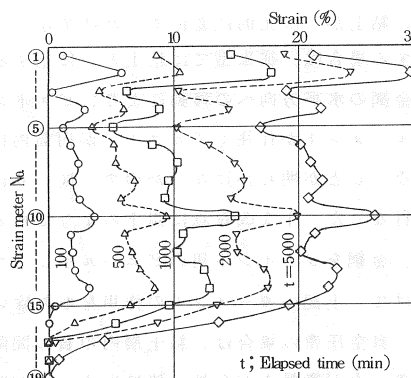


図-10 層内のひずみ分布

論曲線とは非常によく一致することが明らかである。

図-9は、ピストン式ひずみ計による層別沈下の測定結果を示したものであり、また図-10は図-9の結果から任意時刻の各ひずみ計のひずみ量を読み取り、層内のひずみ分布としてまとめたものである。図-10をみると、改良域内の粘土のひずみ量は、時間の経過とともに、深度とは無関係にほぼ一様に増加しており、ドレーンの先端部分の圧密の遅れの無い、理想的な圧密の進行状況になっていることがわかる。また、未改良域のひずみ分布をみると、ドレーン下端の粘土の圧密の進行とともに、その影響が下部まで次第に広がっていることがわかる。尚、図-10の各ひずみ計のひずみ量の相違（たとえば、①②③の結果の相違）は、ドレーン材の曲がり形状と関連し、ドレーン材がひずみ

計に近づくように曲がると、ひずみ計の位置の粘土がドレーンに引き寄せられるように水平方向に移動し、この水平移動量に相当する鉛直ひずみ量が深さによって異なるためであると考えられる。

図-11は、圧密後のドレーン材の曲がり形状と含水比分布を示したものである。この図をみると、ドレーン材は全く折れることはなく、比較的小さな曲率で滑らかに曲がり、通水性の低下は全くないことがわかる。また、ドレーン下端の位置は、粘土とドレーン材とがすべりを生じることから、当初の打設位置よりも幾分深くなるようである。一方、含水比の測定結果をみると、ドレーンの先端部までほぼ一様な含水比分布になっており、改良効果は改良域深部まで非常に大きいことが明らかである。

以上の結果、改良域外からの浸透水が全くない場合は、真空圧密工法は非常に有効な地盤改良工法であることが明らかとなった。尚、この実験で用いたドレーン長を、 $\bar{\ell}/d_w = \ell/d_w$ （ここに、 $\bar{\ell}$ と ℓ ；現地と実験のドレーンの打設長、 $\bar{d}_w$ と d_w ；現地と実験のドレーンの有効径、 $\ell=1.36\text{ m}$ 、 $\bar{d}_w=5\text{ cm}$ 、 $d_w=0.44\text{ cm}$ ）の関係が成り立つとして、現地の打設長に換算すると、 $\bar{\ell} \approx 15\text{ m}$ になる。

4. 水平ドレーンを布設した粘土層の真空圧密モデル実験

4.1 実験方法

図-12は、実験装置を示したものである。実験土槽は幅30cm×高さ65cm×長さ400cmの大きさであり、この土槽内に含水比を102%に調整した粘土を45cmの高さまで投入した。ドレーン材の布設は図-12に示すような三角形配置であり、所定の位置に水平に7本ドレーン材を設置した。尚、ドレーンの上部に18cm厚の粘土層を設けたのは、この粘土層による負圧のシール効果を期待し

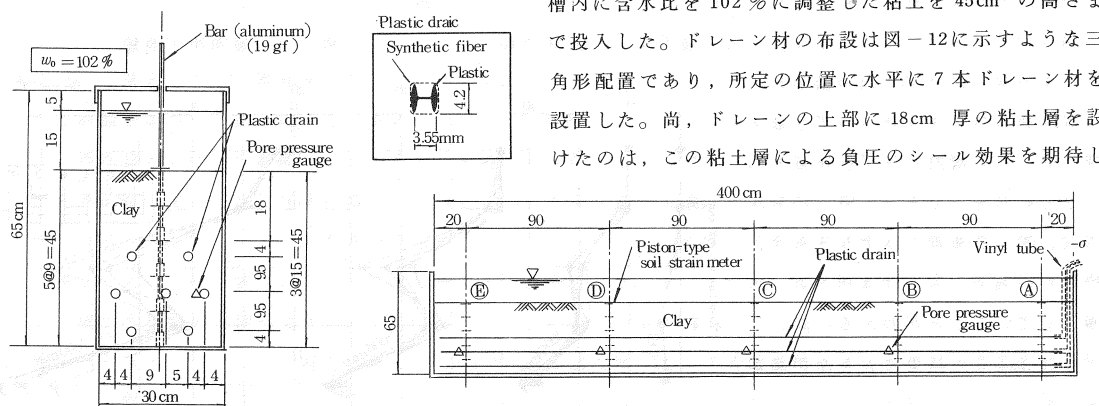


図-12 実験装置

ためである。また、粘土層上部に一定水位を保ち、粘土層表面の乾燥を防ぐことにした。実験の測定項目は、④～⑤地点の表面沈下と5連で設置したピストン式ひずみ計による層別沈下であり、またドレーン材に間隙水圧計を取り付けてドレーン内部の間隙水圧と排水量を測定した。実験に用いたドレーン材は鉛直ドレーンの実験に用いたものと同一であり、負圧の荷重装置は図-7に示すものを用いている。粘土に作用させた負圧の大きさは、 -0.35 kgf/cm^2 である。

4.2 実験結果と考察

図-13は、沈下とドレーン内部の間隙水圧の測定結果を示したものである。沈下の測定結果をみると、④～⑤地点の沈下は全く同一であり、ドレーン先端部分の圧密の遅れは全くないことがわかる。尚、④地点の最終沈下量が他の地点の測定結果と異なる傾向があるのは、④地点は負圧を作用させたビニールチューブの位置に近接しており、ドレーン材とビニールチューブを取り付けた幅10cm間は圧密がほとんど進まないで、この未圧密状態の粘土による沈下抑制の影響が現われたものと考えられる。また、実測沈下と排水量から求めた平均の沈下曲線を比較すると、粘土層の表面にクラックの発生した $t=5000 \text{ min}$ の経過時間までは、両者は全く同一であることがわかる。これは、粘土層が $t=5000 \text{ min}$ までは等ひずみ状態で沈下することを示しており、この結果は目視観察の結果と一致する。

また、図-13内に Barron の理論曲線を示したが、実測沈下と理論曲線を比較すると、両者はほぼ一致しており、従って水平ドレーンの場合にも Barron の理論が適用できるものと考えられる。

一方、ドレーン内部の間隙水圧の測定結果をみると、 $\sigma = -0.35 \text{ kgf/cm}^2$ の圧密応力に対して全体的に $\pm 0.02 \sim 0.03 \text{ kgf/cm}^2$ の変動があるが、任意時刻の各測定結果に明確な差が認められないので、圧密期間を通じてドレーンの先端まで一定の負圧が作用しているものと判断される。尚、測定結果の変動は、実験を恒温室内で行なわなかったことによる計器の温度変化に対する安定性の問題であると考えられる。

図-14は、ピストン式ひずみ計による層別沈下の結果であり、また図-15は図-14の結果から任意時刻の各ひずみ計のひずみ量を読み取って、層内のひずみ分布としてまとめたものである。図-15をみると、④～⑤地点のひずみ分布は、時間の経過とともにほぼ同じように増加していることがわかる。尚、ひずみ計③④⑤の結果に大きな相違があるのは、ひずみ計④はドレーンに近接しており（図-12参照）、粘土

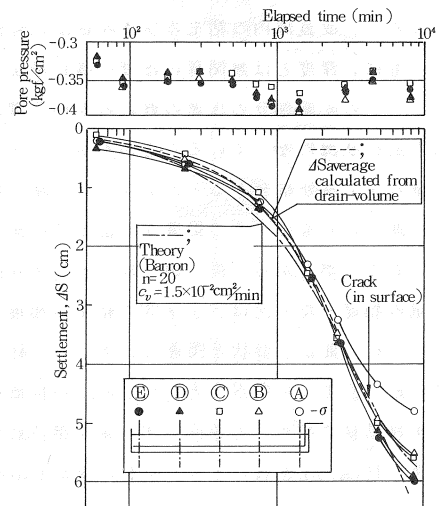


図-13 沈下とドレーン内部の間隙水圧

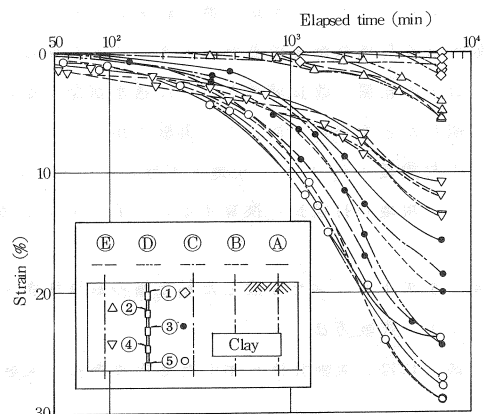


図-14 層別沈下曲線

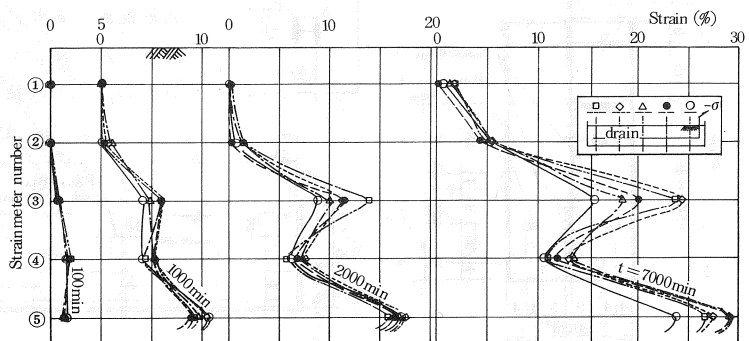


図-15 層内のひずみ分布

はドレーンに引き寄せられるようにしてひずみ計の周りに集まるためひずみ量が小さくなり、一方ひずみ計③と⑤は、ひずみ計がドレーン間の中央に位置し、ひずみ計の位置にある粘土がドレーンに向かって吸い出されることにより、この水平方向への粘土の移動量に相当する鉛直ひずみ量が圧密によるひずみ量に加算されるため大きくなったものと考えられる。またこの推察は、鉛直ドレーンの実験結果(図-10)において推察したものと同一である。

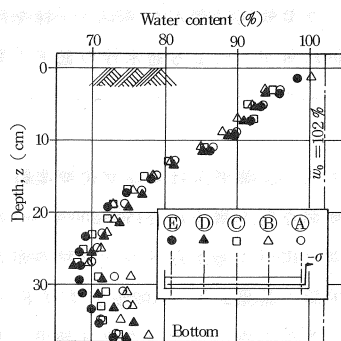


図-16 圧密後の含水比分布

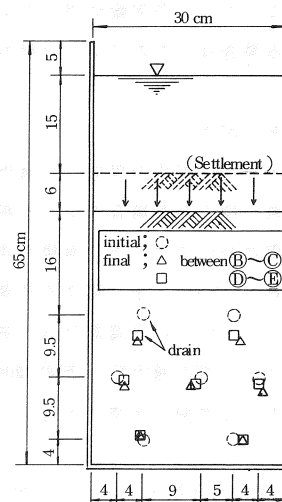


図-17 圧密後のドレーンの位置

図-16および図-17は、それぞれ圧密後の含水比分布とドレーンの位置を示したものである。図-16をみると、深さが30cm以深においてはややバラツキがみられるが、④～⑤地点の全体的な分布形状はほぼ同一であり、 $z=18\text{cm}$ 以深の改良域内では初期含水比、 $w_0=102\%$ の軟弱な粘土が圧密効果によって、 $w=70\%$ 程度にまでほぼ一様に改良されることがわかる。一方、図-17の圧密後のドレーンの位置を初期に設置した位置と比較すると、ドレーンは平面的には平行で、かつほぼ鉛直に沈下していることがわかる。

さて、この実験結果を用いて、ドレーン材の透水性の検討を試みる。吉国¹⁰⁾によると、ドレーンの透水性が有限の場合の圧密方程式とその解が求められており、圧密の遅れを表わすウェルレジスタンス係数、 L は次式で表わされる。

$$L = \frac{32 k_c}{\pi^2 k_w} \left(\frac{\ell}{d_w} \right)^2 \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 k_c および k_w はそれぞれ粘土とドレーンの透水係数、 ℓ はドレーン長および d_w はドレーンの有効径である。当実験においては、ドレーン先端部分の圧密の遅れが全くないことから L を0.1以下と設定し、 $k_c=10^{-7}\text{cm/sec}$ 、 $\ell=400\text{cm}$ 、 $d_w=0.44\text{cm}$ を(1)式に代入して k_w を求めると、 $k_w \geq 2.7\text{cm/sec}$ となる。これは、ドレーン材の透水係数として一般に考えられている $10^{-1} \sim 10^0\text{cm/sec}$ と比較すると、やや大きい値である。

以上の結果、ドレーン材を粘土層内に水平に布設したHori-Vac工法は、地盤改良工法として有効であることが明らかとなった。また、当実験に用いたドレーン長を $\bar{\ell}/\bar{d_w} = \ell/d_w$ の関係が成り立つとして現地の布設長に換算すると、 $\bar{\ell} \approx 45\text{m}$ になる。

5. 結論

本文では、著者らがここ数年来実施してきた真空圧密工法に関する実験的研究の結果とその考察について述べた。主な結論を述べると以下のようなものである。

- (1). 真空排水と空気圧载荷による一次元圧密特性を比較すると、両者の沈下と間隙水圧の挙動は全く同一であり、従って、一次元圧密に関しては真空圧密と载荷圧密は現象論的には同一であると考えられる。
- (2). プラスチックドレーン材を用いたバーチカルドレーン工法と真空圧密工法との併用に関する圧密実験結果によると、改良域外からの浸透水が全くない場合は、ドレーン下端まで負圧の大きさに対応した、ほぼ一様な改良効果が期待できる。
- (3). プラスチックドレーン材を利用したHori-Vac工法に関する圧密実験結果によると、Hori-Vac工法は軟弱地盤の改良工法として有効である。

ただし、(2)の結論は、地盤の沈下につれてドレーン材に圧縮力が作用し、ドレーン材が比較的小さな曲率で曲

がることから、当実験に用いたような柔軟性に富んだドレーン材を用いる場合はよいが、他の折れやすい材料を用いる場合は、このドレーン材の折れ曲がりによる通水性の低下の影響について、別途検討する必要がある。

6. あとがき

Hori-Vac 工法の現地への適用として、著者らはポンプ式浚渫船で海底に堆積している軟弱な粘土を浚渫し、埋立地へ投入した場合のような超軟弱な粘土層 ($w_0=150\sim 200\%$) への適用を考えているが、こうした埋立地盤への適用においては、その面積が非常に広いことからドレーン材の布設長は 200~300m 程度必要である。ここで述べた Hori-Vac 工法に関する基礎実験の結果、 $w_0=102\%$ およびドレーンの現地への換算布設長、 $\bar{\ell}=45\text{m}$ において、ドレーンの先端部分の圧密の遅れのない、均一な改良効果が期待できることが明らかとなったが、今後、①ドレーン材の通水性、② $\bar{\ell}=200\sim 300\text{m}$ の場合のウェルレジタンスの影響および③ $w_0=150\sim 200\%$ の場合の改良効果などの把握が必要である。

謝 辞

ここに述べた一連の実験を手伝っていただいた五洋建設㈱調査試験課の三上壮緑氏と横本康人氏に謝意を表します。また、本文をまとめるに当って、適切な御助言をいただいた同社土質基礎研究室の樋口洋平氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Kjellman, W (1949): Consolidation of clay soil by means of atmospheric pressure, Conference on Soil Stabilization in MIT, pp. 1-6.
- 2) 奥田, 渡, 水谷 (1968): ベーバードレーン工法と大気圧载荷について, 第 3 回土質工学研究発表会講演集 pp. 211-215.
- 3) 渡辺, 鈴木, 高橋 (1974): ビート地盤における大気圧工法試験工事, 第 12 回土質工学研究発表会講演集, pp. 1257-1260.
- 4) 岡田, 橘田 (1974): ベーバードレーン・大気圧工法による軟弱地盤の改良, 建設と機械化, 11, pp. 19-25.
- 5) 佐々木, 高見, 森岡 (1974): 中立応力低下による地盤改良実験, 土と基礎, Vol. 22, No. 7, pp. 31-36.
- 6) 佐々木, 笠島, 阿久根 (1973): 中立応力低下による海底地盤の改良, 土木学会論文集, 第 214 号, pp. 9-15.
- 7) ベーバードレーン工法と大気圧工法 (1968), 理工図書, pp. 205-215.
- 8) 網干, 吉国 (1964): 軟弱地盤の真空排水工法に関する二, 三の実験的研究, 第 19 回土質工学研究発表会講演集第 3 部, pp. 45-1-4.
- 9) 網干, 渡, 新舎, 浜崎 (1984): ピストン式ひずみ計による軟弱粘土の層別沈下測定, 第 19 回土質工学研究発表会講演集, pp. 213-214.
- 10) 吉国 洋 (1979): パーチカルドレーン工法の設計と施工管理, 技報堂, pp. 40-49.