

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 29 NO. 2 JUNE 1990

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第29巻 第2号 (Vol. 29, No. 2), 1990年6月 (June 1990)

目 次 (CONTENTS)

1. 斜め入斜波による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究
.....高橋重雄・木村克俊・谷本勝利..... 3
(Stability of Armour Units of Composite Breakwater Mound against
Oblique Waves.
.....Shigeo TAKAHASHI, Katsutoshi KIMURA
and Katsutoshi TANIMOTO)
2. 碎波帯内の底質粒度の変動特性
——波崎海洋研究施設における現地調査——
.....加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・磯上知良・村上裕幸・藤田 誠.....37
(Changes of Grain Distribution of Bed Material in the Surf Zone
——Field Observation at Hazaki Oceanographical Research Facility——
.....Kazumasa KATOH, Shin-ichi YANAGISHIMA, Yoshiaki KURIYAMA,
Tomoyoshi ISOGAMI, Hiroyuki MURAKAMI and Makoto FUJITA)
3. 粘性土の水平方向圧密係数の決定法
.....小林正樹・水上純一・土田 孝.....63
(Determination of the Horizontal Coefficient of Consolidation c_h
.....Masaki KOBAYASHI, Jun-ichi MIZUKAMI and Takashi TSUCHIDA)
4. 事前混合処理工法による処理土の強度・変形特性
.....善 功企・山崎浩之・佐藤 泰.....85
(Strength and Deformation Characteristics of Cement Treated
Sands Used for Premixing Method
.....Kouki ZEN, Hiroyuki YAMAZAKI and Yasushi SATO)
5. 低置換率 SCP 工法により改良された粘性土地盤の支持力
.....寺師昌明・北詰昌樹... 119
(Bearing Capacity of Clay Ground Improved by Sand Compaction
Piles of Low Replacement Area Ratio
.....Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)
6. 曲げおよびせん断を受けるハイブリッドはりの耐力特性
.....横田 弘・清宮 理... 149
(Load Carrying Capacity of Hybrid Beams Subjected to Flexure
and Shear Forces.....Hiroshi YOKOTA and Osamu KIYOMIYA)
7. ケーソンに作用する地震時土圧に関する模型振動実験とその解析
.....風間基樹・稲富隆昌・大塚幸治... 177
(Model Vibration Tests for the Seismic Earth Pressure Acting
on the Rigid Caisson Foundation and Its Analyses
.....Motoki KAZAMA, Takamasa INATOMI and Kohji OHTSUKA)

3. 粘性土の水平方向圧密係数の決定法

小林 正樹*・水上 純一**・土田 孝***

要 旨

軟弱地盤に対してバーチカドレーン工法を用いて地盤改良を行う場合、適切な沈下管理をするためには粘土の水平方向圧密係数を求める必要がある。しかし、通常室内試験から得られる水平方向圧密係数を設計に用いると圧密速度を過大に評価してしまう例が多い。

本報告では、合理的に圧密係数を求めるために新たに水平方向圧密容器を開発し圧密特性を調べた。また、ドレーン打設時に生ずる粘土の乱れの影響を調べるために人工的に攪乱を与えた試料を用いて実験を行った。さらに、各々の結果に対して有限要素法を用いた数値解析を行って検討を加えた。主な結論は以下のとおりである。

- 1) 基本的な圧密試験結果である $e-\log p$ 曲線および体積圧縮係数 m_v と平均圧密圧力 \bar{p} の関係は排水方向による差は認められず同じ挙動を示す。
- 2) 水平方向圧密試験の場合でも時間一沈下量の関係から圧密係数を求める場合 \sqrt{t} 法に準じた方法が有効である。この場合、試験条件に応じてカーブフィッティングのための定数を設定する必要がある。
- 3) 今回用いた試料では、水平方向圧密係数 c_h は鉛直方向圧密係数 c_v の1.5倍、最大でも2倍程度であり、両者は極端に異なる値とはならない。このことは、均質な軟弱粘土地盤における透水性は、完全な等方状態ではないが極端な異方性を持たないことを示している。
- 4) 完全に練り返した粘土を用いて人工的にスミヤードゾーン(攪乱帯)を設けた供試体に対しても、圧密係数はドレーンの体積と同体積を完全に練り返したとしても、2分の1程度までしか低下しない。

以上の結論から、原地盤の水平方向圧密係数 c_h は、鉛直方向圧密係数 c_v よりも若干大きいのが、ドレーン打設時の攪乱帯やマットあるいはドレーンウェルのレジスタンス等そのほかの要因によって低下し、 $c_h=c_v$ と設定すると現場における沈下データを説明できることが明らかになった。

キーワード：圧密、バーチカドレーン、沈下、有限要素法、攪乱

* 土質部 土性研究室長
** 土質部 土性研究室
*** 土質部 滑走路研究室長

3. Determination of the Horizontal Coefficient of Consolidation c_h

Masaki KOBAYASHI*

Jun-ichi MIZUKAMI**

Takashi TSUCHIDA***

Synopsis

The coefficient of consolidation is a fundamental parameter to estimate the rate of settlement of clayey ground. When clay is improved by vertical drains such as sand drains, the horizontal coefficient of consolidation c_h is needed as well as the vertical coefficient of consolidation c_v . However the rate of settlement tends to be overestimated if we use c_h that was obtained by conventional laboratory tests.

In this report, a horizontal consolidation test is developed by using an improved consolidation device and a series of horizontal and vertical consolidation test is carried out. The main conclusions are as follows:

- 1) The horizontal coefficient of consolidation c_h of uniform Japanese marine clay is two times of the vertical one c_v .
- 2) The disturbance by installing sand piles reduces c_h to 1/2~2/3 of undisturbed value.

Key Words: Consolidation, Vertical Drain, Settlement, Finite Element Method, Disturbance.

* Chief, Soil Mechanics Laboratory, Geotechnical Engineering Division

** Member, Soil Mechanics Laboratory, Geotechnical Engineering Division

*** Chief, Runway Laboratory, Geotechnical Engineering Division

目 次

要 旨	63
1. ま え が き	67
2. 水平方向圧密特性に関する既往の研究	67
2.1 水平方向圧密試験とバーチカルドレーンで改良された地盤における事例解析	67
2.2 従来の水平方向圧密試験装置の問題点	69
3. 試料および試験方法	70
3.1 試料	70
3.2 圧密試験方法	71
4. 試験結果	72
4.1 水平方向圧密係数の求め方	72
4.2 鉛直方向圧密特性と水平方向圧密特性の比較	73
4.3 数値解析による試験結果の検討	75
4.4 従来の試験方法の問題点の検討	77
5. 攪乱帯が水平方向圧密係数に与える影響	78
5.1 攪乱粘土の圧密特性	79
5.2 攪乱帯を有する粘土の水平方向圧密係数	80
6. 結 論	82
参 考 文 献	83

1. まえがき

バーチカルドレーン工法とは、粘土地盤中に鉛直なドレーン（排水帯）を形成し、排水距離を短くすることにより圧密を促進させる工法である。バーチカルドレーン工法は、ドレーンの材質として砂を用いるサンドドレーン、砂を袋詰めにしたバックドレーン、紙やプラスチック樹脂を用いるカードボードドレーン等の各種工法に分類できる。この工法の目的は、大別すると次の二点になる。ひとつは、施工後の長期間にわたる残留沈下の低減であり、もうひとつは短期間に軟弱な粘性土地盤の強度増加をはかるものである。この工法は1930年代にサンドドレーン工法として開発され、それ以来世界各地で広く用いられており、わが国でも数多くの施工実績がある。しかし、設計に用いる定数を設定する場合には、いくつかの問題点があることが明らかにされている。

バーチカルドレーン工法によって改良された地盤の排水は水平方向に生じ、それに伴って過剰間隙水圧は水平方向に消散する。このため圧密速度を求めるためには、水平方向の圧密係数が重要な定数になる。従来、室内で実施された水平方向の圧密試験結果によると、粘性土の水平方向圧密係数 c_h は、通常の標準圧密試験から求められる鉛直方向圧密係数 c_v より数倍大きいと報告されてきた。しかし、バーチカルドレーンで改良された地盤の現地計測結果によると、 c_h を用いて沈下計算を行うと実測値よりも沈下を早めに予測する傾向にある。一方、通常の標準圧密試験から得られる c_v を用いて計算すると、実測結果と一致する例が多いとされている¹⁾。 c_h よりも c_v で沈下計算を行った方が圧密の進行を予測できる原因としてドレーンの打設に伴ってドレーン周辺部の粘性土地盤に攪乱帯が発生し、本来の大きな水平方向圧密係数が数分の一に低下して、 c_h は c_v と等しくなるためではないかとされている。

本報告では、水平方向の圧密特性を明らかにするために、まず既往の研究について文献調査を行い、従来の主な研究結果を総括した。次に、従来の水平方向圧密試験機および試験結果の整理法を検討したうえで、改良した圧密容器を用いて、大阪湾海底地盤の不攪乱沖積粘性土に対して、水平方向圧密試験を実施した。また、ドレーン打設時に発生する攪乱帯が地盤の圧密特性に与える影響を定量的に調べるために、ドレーン周辺に人工的な攪乱帯を設けた水平方向圧密試験を行った。さらに、今回行った各々の試験条件に対して有限要素法を用いた数値解析を行い検討を加えた。

2. 水平方向圧密特性に関する既往の研究

2.1 水平方向圧密試験とバーチカルドレーンで改良された地盤における事例解析

1930年代に開発され、1940年代に施工技術が急速に進歩したバーチカルドレーン工法に対して、初めて理論的解析法を確立したのが Barron²⁾ である。Barron は粘土層表面の沈下性状、ドレーン打設により発生する攪乱帯の影響、ドレーン自体の透水性等の要因を考慮して中空円柱の圧密方程式の解を与えた。それは Barron の等ひずみ条件と自由ひずみ条件の二つの解として知られている。ここで、ひずみ条件とは粘土層表面の沈下に関するもので、表面が平面を保ったまま沈下するものを等ひずみ条件、ドレーンに近い部分から沈下が進むものを自由ひずみ条件という。現在では吉国¹⁾ の解析によると Barron の自由ひずみ条件は、じつは等ひずみ条件に相当することが知られている。しかしながら自由ひずみを等ひずみと読み直すことにより、この Barron の解はいまなお設計に広く用いられている。

水平方向圧密係数を求めるために、種々の水平方向圧密の試験方法、結果の整理方法が提案されている。

中瀬ら³⁾ は、岡山県錦海湾で採取された不攪乱粘土に対して、鉛直、水平両方向の圧密試験を実施した。水平方向圧密試験は、供試体中心部にドレーン材としてポラスメタルを挿入して、バーチカルドレーンによる改良地盤を再現した試験機を用いて行っている。試験結果の整理は、Barron の自由ひずみ条件に対する曲線定規を用いて圧密係数を求めている。図-1は、圧密係数と平均

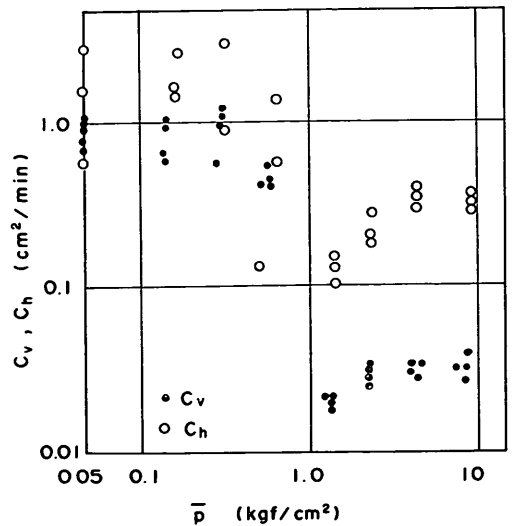


図-1 圧密係数と平均圧密圧力の関係(中瀬ら³⁾)

圧密圧力の関係を示したものである。正規圧密領域である \bar{p} が 1 kgf/cm^2 をこえた領域では、水平方向圧密係数 c_h は鉛直方向圧密係数 c_v のほぼ6倍になっており、両者の差が大きいことがわかる。この結果は排水方向が違々と非常に圧密速度が異なることを示している。

McKinlay⁴⁾ は、沈下量を時間の t^2 に対して整理し、その沈下量-時間曲線から標準圧密試験における \sqrt{t} 法

LAMINATED PLASTIC CLAY (GOVAN. GLASGOW)				
LL	PL	SIZE FRACTIONS(% or		
		CLAY	SILT	FINE SAND
39	23	50	45	5

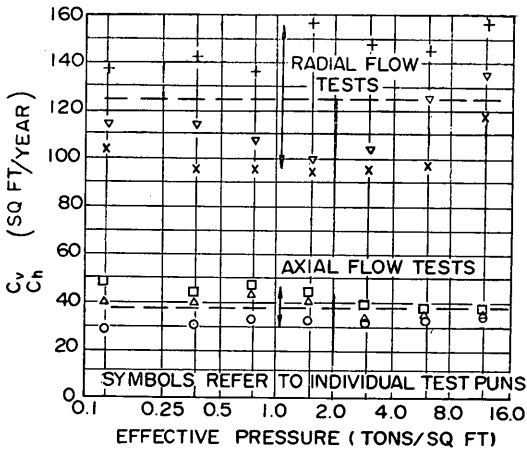


図-2 圧密係数と圧密圧力の関係 (McKinlay⁴⁾)

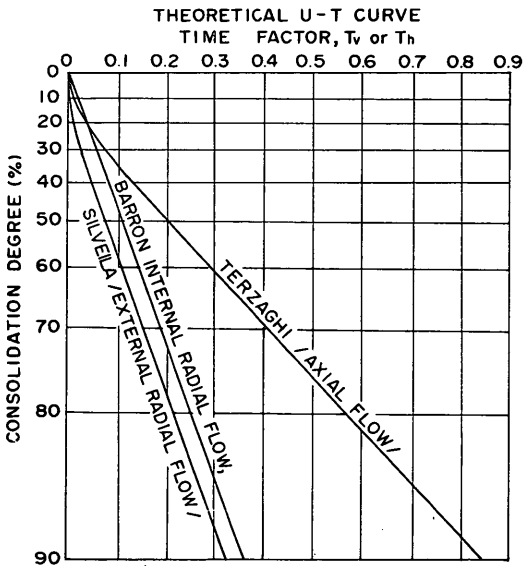


図-3 圧密度と時間係数の関係 (網干ら⁵⁾)

と同様に、载荷初期の直線部分に注目して t_{90} を求め圧密係数を求める方法を提案している。水平方向圧密試験装置は排水面を外周面として、透水性の圧密リングを用い、外向きの放射流れを再現するものである。圧密係数と圧密圧力の関係を図-2に示すが、 c_h は c_v の3倍程度になっている。

網干ら⁵⁾ は、外向きの放射流れを再現する水平方向圧密試験とともに、内向きの流れを再現するため、供試体中心部に透水性のドレーン材を設置した水平方向圧密試験を実施している。整理法として、図-3に示すように Barron の解によると $\log(1-U)$ が、時間係数 T_h あるいは時間 t に対して直線となる性質を利用して c_h を求める方法を提案している。

Trautwein ら^{6),7)} は McKinlay の整理法を発展させ、4.1 で詳述する方法を用いて圧密係数の精度を向上させた。試験条件としては網干らと同様、内向きと外向きの2種類の放射流れの試験を行っている。試験結果を図-4

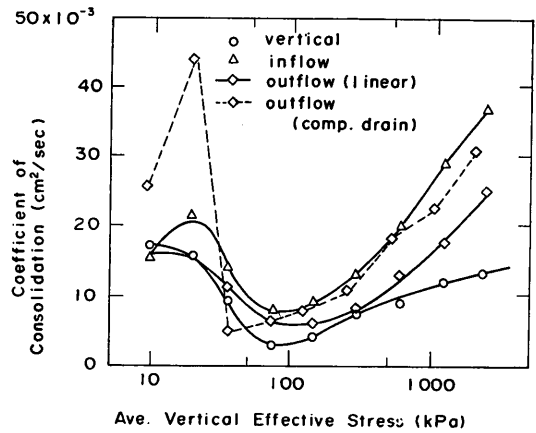


図-4 圧密係数と圧密圧力の関係 (Trautwein ら⁶⁾)

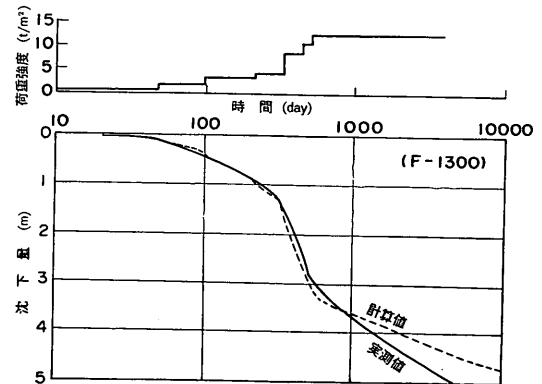


図-5 実測沈下と計算沈下曲線 (中瀬ら³⁾)

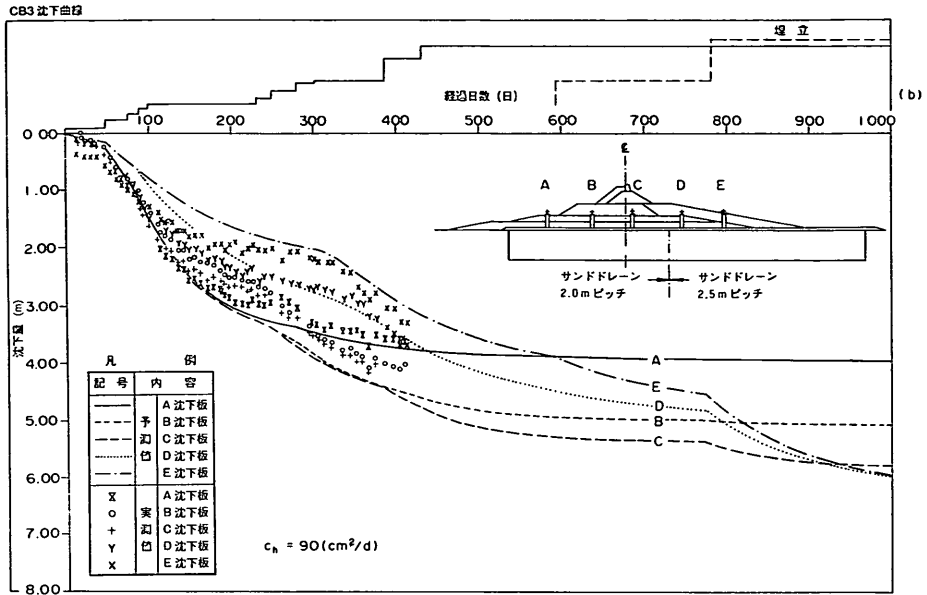


図-6 関西国際空港における沈下曲線（前田⁸⁾）

に示す。この図から、内向きの放射流れの試験から得られた c_h の方が外向きの試験による c_h よりも大きいことがわかる。Trautwein らは、この結果に関して、外向き放射流れの試験には、透水性の圧密リングとして剛なものと同様の透水性のあるものの二種類の透水性材料を用いているが、剛な圧密リングは沈下に伴って連続的に粘土を攪乱するので、圧縮性のあるリングに比べて圧密係数を低下させていると結論づけている。

試験方法の開発の一方で、バーチカルドレーンで改良された地盤の沈下挙動に対する事例解析も行われている。

中瀬³⁾ は、錦海湾と広島空港でのサンドドレーン工法を用いた建設工事に対して事例解析を行い、計算沈下曲線と実測値との比較を行っている。錦海湾での比較を図-5 に示す。この図を見ると c_v を用いた計算沈下曲線は実測値とよく一致しており、設計で圧密係数として c_v を用いることの妥当性を示す一例となっている。また、広島空港の建設工事の例でも同様の結果を得ている。

前田⁸⁾ は、大阪湾泉州沖に建設中の関西国際空港建設工事において事例解析を行っている。空港島護岸での観測結果を図-6 に示す。事前土質調査によって建設地点における沖積粘土地盤の土質定数として、圧密係数 c_v は、 $90 \text{ cm}^2/\text{d}$ と決定された。図中の計算曲線は、この c_v を用いて求められている。護岸直下のC沈下板の実測値を見ると、圧密速度を求めるために c_v を用いた予測曲

線は、実測値とよく一致することがわかる。

バーチカルドレーンで改良された地盤の圧密沈下速度を予測するうえで、最も重要な定数となるのは水平方向圧密係数 c_h である。しかし、上記の事例解析をみると、室内試験結果から得られる c_h では実際の沈下を説明できず、むしろ c_v を用いた方がよいことになる。従来はこの説明として、ドレーン打設時にドレーン周辺部に攪乱帯が発生し c_h が低下して、 c_h が c_v と一致するとされていた。しかし、均質で様な我が国の海底沖積粘土地盤において、圧密特性は圧密係数が数倍も異なるほど大きな異方性をもつと考えることには疑問が残る。

2.2 従来の水平方向圧密試験装置の問題点

水平方向圧密係数 c_h を求めるためには、標準圧密試験とは別に水平方向圧密試験を行う必要がある。しかし、水平方向圧密試験には、鉛直方向の標準圧密試験のように標準化された試験方法および試験結果の整理法がない。そこで、今回は従来の水平方向圧密試験の問題点を調べるために、当研究室で過去に行われた試験⁹⁾ について検討した。

水平方向圧密試験装置が満たすべき条件は、圧密荷重の載荷は鉛直方向で、供試体からの排水は水平方向となることである。過去に港研で用いられた圧密容器を図-7 (a) に示す。この圧密容器は標準圧密試験装置の圧密箱をもとにしたもので、載荷キャップを改造して用いている。供試体上下面は非排水面となっており、排水は中央

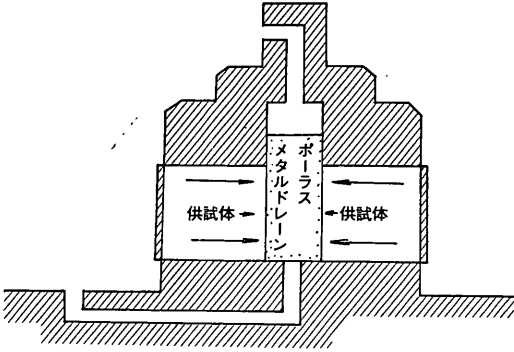


図-7(a) 既往の水平方向圧密試験容器

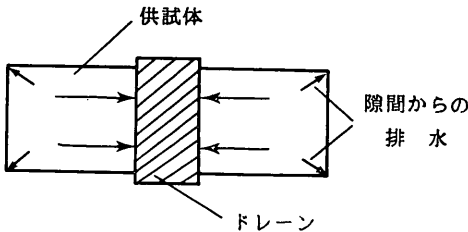


図-7(b) 供試体中の水の流れ

のポーラスメタル製のドレーンからなされる。また、圧密荷重は標準圧密試験機の載荷枠を用いて載荷されている。

水平方向圧密試験における排水に関して重要な点は、このような試験機を用いる場合供試体中央部のドレーンのみが排水面となり、図-7(b)に示すように供試体外周部の排水点が存在しないことである。しかし、図-7(a)の圧密容器は、標準圧密試験機を改造したものであるので、供試体外周部での水漏れに対して配慮がなされていない。通常の鉛直方向圧密試験では、供試体外周部からの排水は問題とならないが、図のように中心方向に水平に排水する場合には、外周部からの漏れがあると排水距離が小さくなることにより、圧密速度が大きくなることは明かである。さらに、試験結果の整理は中心からの排水だけを考慮した理論に基づいているので、圧密係数を大きく計算してしまうことになる。

尾上¹⁰⁾は、港研と同様の試験機を用いて水平方向圧密試験を行い、 c_h は c_v の3~6倍という結果を得ている。しかし、同じ試料を用いて外周を排水面とした外向き排水の試験から得られた c_h は、 c_v と等しいと報告している。尾上は、内向きと外向き排水とによる c_h の相違を、外向き排水の場合は周面摩擦の影響で c_h が低下したとし、 c_h は c_v よりも数倍大きいとしている。

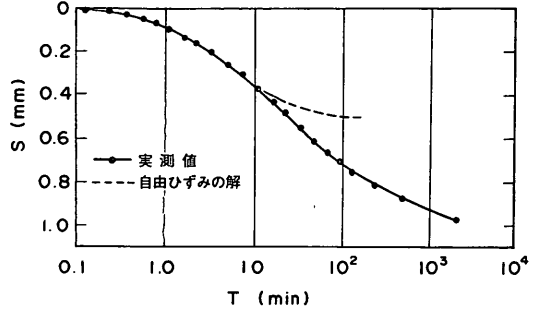


図-8 曲線定規法によるフィッティング例

ここで、供試体外周部からの排水があることを仮定する。外向き排水の場合には外周部の排水は問題とならず、内向き排水の場合にだけ試験結果に影響を与え、圧密係数を大きく評価してしまうことになる。仮定が正しいとすると、試験装置に問題があったのは外向き排水の試験ではなく、実は内向き排水の試験であったことになる。室内試験から水平方向圧密係数を正しく求めるためには、このようなあいまいさのない試験装置を用いて試験を行う必要があると考えられる。

試験結果の整理法として、水平方向圧密係数を求める場合には、Barronの自由ひずみ条件の解から得られる曲線定規を用いた曲線定規法を用いることが多い。一例として、試験結果を曲線定規法で整理したものを図-8に示す。この図からわかるように、理論曲線と実測値はかなり早い時点から離れ始め、一次圧密量 d_{100} を見ると、一次圧密比がかなり小さくなることになる。曲線定規法は、圧密の初期部分になんらかの測定誤差があった場合、その影響を強く受ける性質を持っている。また、個人誤差により結果のばらつきが大きくなる可能性も大きい。

本報告では、以上の疑問点を打ち消すために、供試体外周部からの排水を許さないように圧密試験装置を改良して試験を行い、曲線定規法ではなく、試験結果のばらつきが、より小さくなる整理法を用いることにした。

3. 試料および試験方法

3.1 試料

試験に用いた試料は、大阪湾泉州沖から採取した乱さない自然粘性土である。今回のサンプリング地点は水深20mで、図-9はこの地域の土質柱状図である。これまでに多数行われた土質調査結果から、採取地点付近には軟弱な沖積粘性土地盤がほぼ一様に約20mの厚さで堆積していることがわかっている。今回用いた試料の物理特性を表-1に示す。

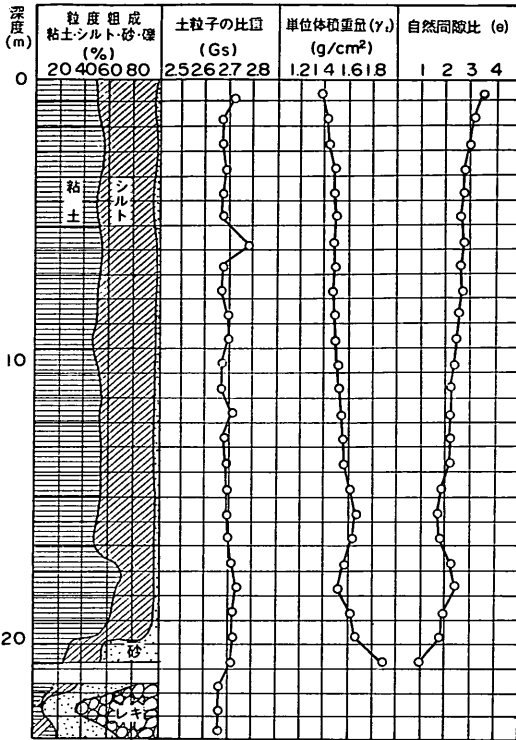


図-9 土質柱状図

表-1 試料の物理特性

自然含水比 ω_n (%)	液性限界 ω_L (%)	塑性限界 ω_p (%)	塑性指数 I_p
80	70	30	40
90	95	40	60

3.2 圧密試験方法

鉛直方向と水平方向の圧密特性の異方性を調べるために、鉛直方向圧密試験および水平方向圧密試験を行った。水平方向圧密試験は、供試体中心部にドレーン材を配置し、内向きの放射流れを再現して行った。また、供試体外周部からの排水が起こると、圧密係数を過大に評価してしまうので、供試体からの排水をドレーンからのみとするように試験機に改良を加えている。両試験ともに、間隙水圧の消散過程からも圧密係数を求められるように、間隙水圧を測定しうる構造の試験機を用いた。

鉛直方向圧密試験は、図-10 に示すように供試体底面で間隙水圧を測定できる圧密容器を用いた試験と、通常の標準圧密試験を実施している。間隙水圧測定型の試験機は、載荷ピストンの摺動部にベロフラムを用いること

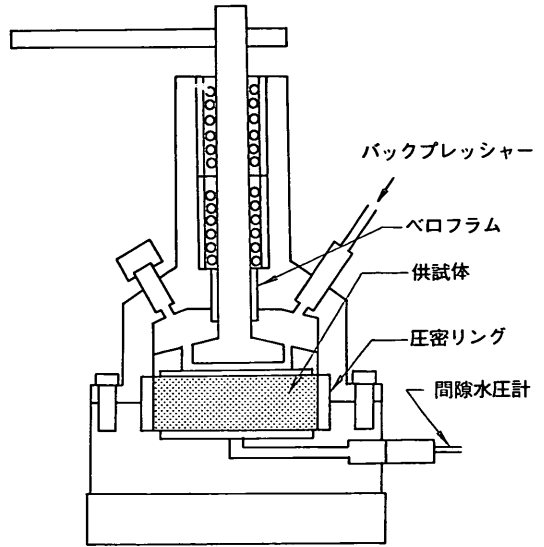


図-10 鉛直方向圧密試験容器

によって容器を密閉型としており、間隙水圧測定の精度をあげるためバックプレッシャーを加えられるようにしてある。バックプレッシャーは 1.0 kgf/cm^2 とした。排水条件は上端面からのみの片面排水であり下端面は間隙水圧測定のため非排水面となっている。供試体寸法は、直径 60 mm 、高さ 20 mm である。圧密荷重の載荷は、標準圧密試験と同様に、 $0.1 \sim 12.8 \text{ kgf/cm}^2$ まで、荷重増加率 1 とし、載荷時間 24 時間で段階的に行っている。試験は長期間にわたって行われるので、荷重載荷およびデータ計測は、パーソナルコンピュータを用いて自動的に行っている。荷重は自動化するために、載荷枠に連動した空圧シリンダーで載荷しており、空圧は電動レギュレーターで減圧している。測定系はすべてひずみゲージ式の変位計、荷重計および間隙水圧計を用いている。標準圧密試験は JIS-A-1217 によって行った。

水平方向圧密試験は、図-11 に示すように、過去に港研で用いたタイプに改良を加えた水平方向圧密容器を用いて行った。主な改良点は、載荷キャップとカラーにゴム膜を被せることによって、供試体外周部からの排水を遮断している点である。供試体は直径 60 mm 、高さ 20 mm で、中心部に直径 12 mm のポーラスメタルのドレーン材を設置した中空円柱状である。ドレーン材を挿入する際にドレーン周辺に生じる供試体の攪乱を小さくするため、圧密リングにいたれた供試体を穴あきのモールドにいれ、エッジ付きの薄肉円筒を押し込んで、シンウォールサンプリングと同様の方法で穿孔している。

供試体の上下面は非排水面としており、排水面は供試体中心部のドレーン材との接触面のみとなっている。したがって、排水はパーチカルドレーンで改良された地盤と同様に内向きの放射流れとなる。今回は、沈下挙動だけでなく間隙水圧の消散過程からも圧密係数を求めるために、底面の二点で間隙水圧を測定している。間隙水圧測定点の位置は中心点から、それぞれ 15mm, 24mm 離れた点である。

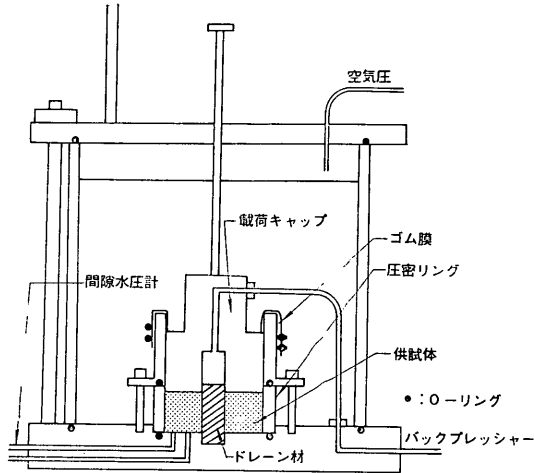


図-11 改良した水平方向圧密試験容器

圧密荷重は、空気圧を使って圧力室内に水圧を発生させ、載荷キャップに水圧として作用させている。それと同時に、カラーと載荷キャップとの間のゴム膜にも水圧が作用していることにより供試体外周部からの排水を防止している。載荷キャップは、図に示すように中央のドレーンに当たる部分が中空となっており、ポーラスメタルに応力が集中したり沈下の妨げにならないように考慮している。圧密荷重は、空気圧を用いているためコンプレッサーの能力で規制されるので、 $0.1 \sim 6.4 \text{ kgf/cm}^2$ までとし、鉛直方向圧密試験と同様に荷重増加率 1 で段階的に載荷している。試験時には、各段階初期に非排水状態で圧密荷重を載荷し、間隙水圧が平衡状態になるのを確認した後排水バルブを開き圧密を開始している。

また従来試験で、本当に供試体外周部からの排水が生じていたのかを調べるために、図-12 に示す圧密容器を用いて水平方向圧密試験を行った。この容器は、図-11 の装置を以下のように改造したものである。まず外周部からの排水の有無を確認するために、止水用ゴム膜を取り除いた。載荷条件を同じにするために、従来と同様に標準圧密試験機の載荷枠を用いられるように、沈下量測定用ロッドを載荷ロッドと交換した。荷重条件は、標準圧密試験と同じである。

4. 試験結果

4.1 水平方向圧密係数の求め方

水子方向圧密係数を求める場合、2.2 で曲線定規法を用いると、一次圧密比が非常に小さく、また、結果のばらつきが大きくなることを示した。このような試験結果の整理法の問題点を解消するために、標準圧密試験の \sqrt{t} 法と同様の考え方をういた整理法が提案されている^{6),7)}。この整理法は図-13 に示すように、時間を t とし、沈下を i^n に対してプロットすると通常の \sqrt{t} 法と

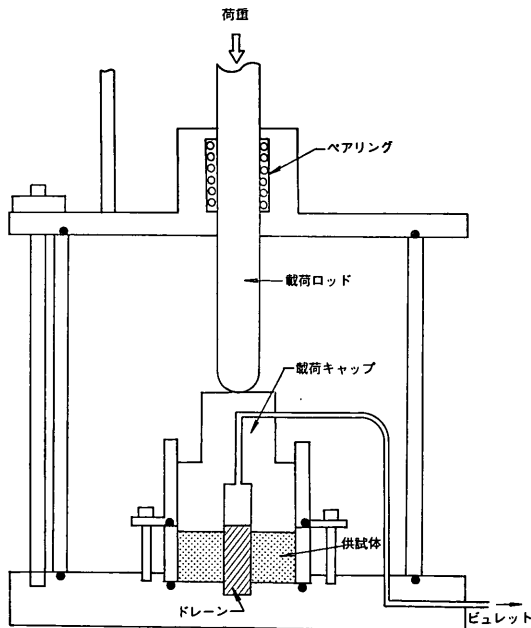


図-12 従来型の水平方向圧密試験容器

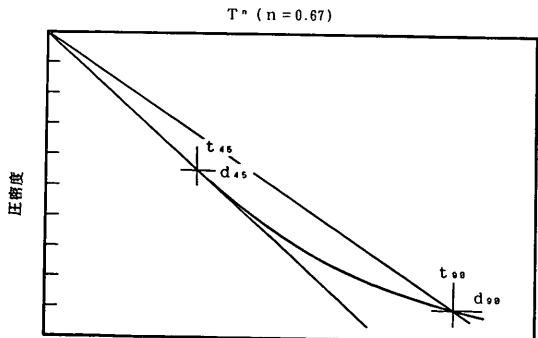


図-13 i^n 法によるプロット

同様に初期部分が直線になる。初期の直線部分が決まると、 \sqrt{t} 法と同様に、得られた直線の勾配のF倍の勾配を持つ直線と沈下曲線の交点から圧密度90%の点に対応する t_{90} と d_{90} が求められる。この d_{90} から d_{45} を求め、対応する t_{45} を用いて圧密係数を得ることができる。実際の n や F の値は、ひずみ条件や有効円の径とドレン径との比、あるいは内向きか外向きかの流れの方向によって変化する。指数 n の決定には、平均圧密度 U と時間係数 T についてのBarronの解を、 U を T^n に対してプロットし、初期部分の直線が最も長くなるように n を決める。 n が決まったら、 $U-T^n$ 曲線上で圧密度が90%の点に対して F を決めることができる。今回の試験条件の場合には、 $n=0.67$ 、 $F=1.31$ また時間係数 $T_{45}=0.066$ である。これらの値を用いて(1)式から、沈下一時間関係から圧密係数 c_h を求めた。

$$c_h = \frac{T_{45} \cdot d_e^2}{t_{45}} \times 1440 \quad (1)$$

d_e : 有効等価円径

本報告ではこの整理法を、 t^n 法と呼ぶ。

今回の試験では、排水面からの距離が異なる二点で間隙水圧を測定しているの、その消散過程からもそれぞれ c_h を求めることが可能である。初期非排水状態で平衡状態に達してからの間隙水圧を測定しているの、初期間隙水圧からの消散割合で圧密度を定義している。間隙水圧から c_h を求める場合には、圧密度50%に達する時間 t_{50} を求め、Barronの自由ひずみ条件の結果から求められる時間係数 T_{50} を用いて計算を行った。今回の各間隙水圧測定点での時間係数 T_{50} は、排水面に近いものからそれぞれ0.0565と0.0973である。

4.2 鉛直方向圧密特性と水平方向圧密特性の比較

水平方向圧密特性を明らかにするために、同一深度の試料、つまり一本のシンウォールチューブ内から供試体を切り出して、水平方向と鉛直方向の圧密試験を行い、その結果を比較した。図-14~16に代表的な圧密定数の比較例を示す。図-14は、間隙比 e と圧密圧力 p の関係($e-\log p$ 曲線)を比較したものである。水平方向圧密試験では最大圧密圧力が 6.4 kgf/cm^2 に規制されているため、高い圧力での鉛直方向圧密試験結果との比較は行っていない。しかし、この図から初期間隙比には若干の相違が認められるものの、 $e-\log p$ 曲線の全体的な傾向はよく一致していることがわかる。この比較例では、水平方向と鉛直方向の圧密試験で、圧密降伏応力 p_e はそれぞれ 0.75 kgf/cm^2 と 0.80 kgf/cm^2 、圧縮指数 C_c はともに1.2であった。ここで、 p_e は、Casagrandeの方法¹⁾を用いて決定した。

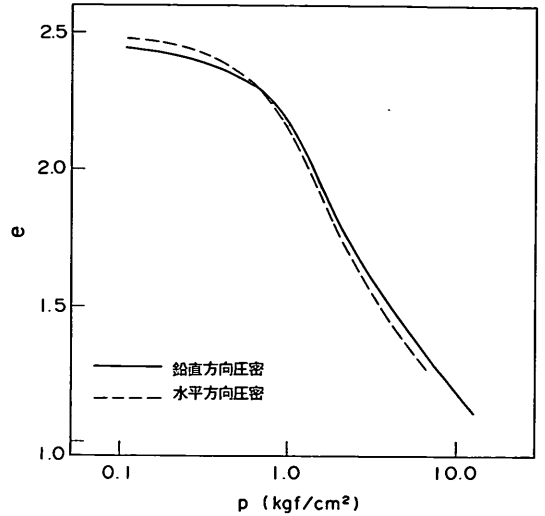


図-14 $e-\log p$ 曲線の比較

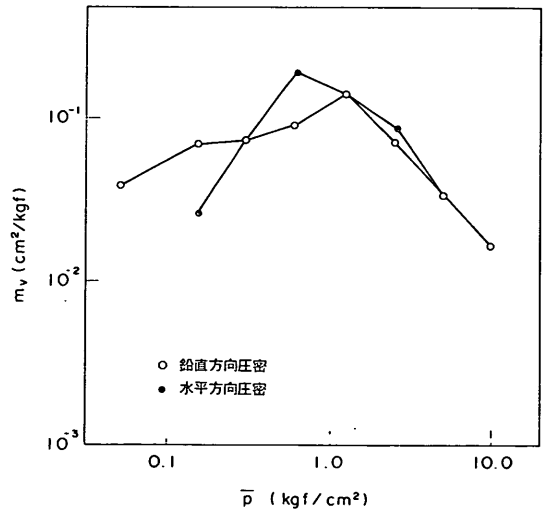


図-15 体積圧縮係数 m_v と平均圧密圧力 \bar{p} の関係の比較

図-15は、体積圧縮係数 m_v と平均圧密圧力 \bar{p} の関係について比較したものである。過圧密領域では m_v の精度が低いためばらつきが大きく両者の値は異なっている。しかし、正規圧密領域においては、両者の値は一致しており、 m_v には排水方向による差が認められない。この結果は、尾上による既往の研究の総括と一致している。

図-16は、圧密係数 c_h 、 c_v と平均圧密圧力 \bar{p} を整理したものである。ここで、 c_v は \sqrt{t} 法から求め、 c_h は4.1

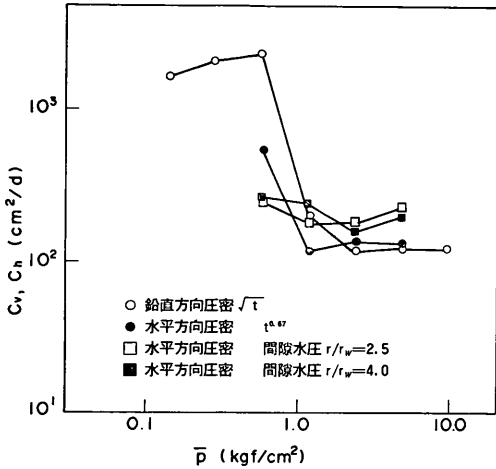


図-16 圧密係数 c_v , c_h と平均圧密圧力 \bar{p} の比較

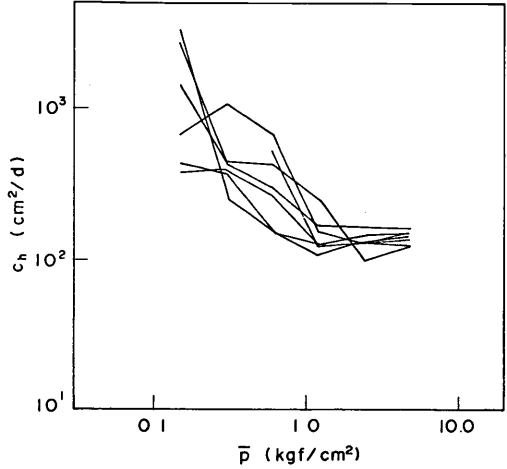


図-18 圧密係数 c_h と平均圧密圧力 \bar{p} の関係 (沈下量)

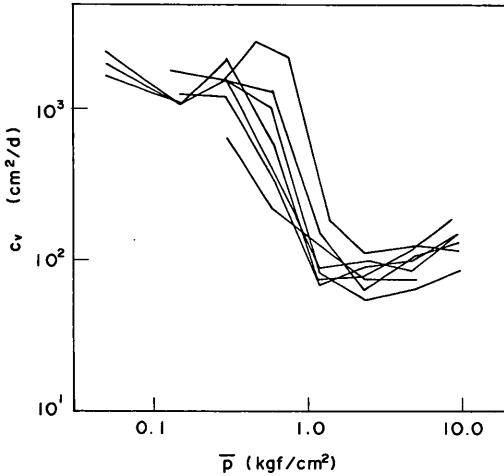


図-17 圧密係数 c_v と平均圧密圧力 \bar{p} の関係

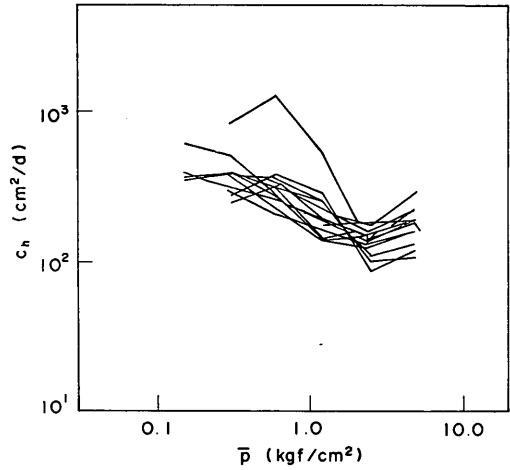


図-19 圧密係数 c_h と平均圧密圧力 \bar{p} の関係 (間隙水圧)

に示した i^n 法と間隙水圧の消散から求めた値をプロットしている。 c_h に関しては、過圧密領域においては沈下量が少なく信頼しうるデータが得られなかったため、プロットしていない。

図-16 からわかるように、正規圧密領域では、これまでに報告されているような c_h は c_v の数倍になるという結果に反して、 c_h と c_v はそれほど大きな違いはなく、最大でも c_h が c_v の2倍程度の値となっていることがわかる。この点を、他の試験結果についても調べるために、 c_h , c_v と平均圧密圧力との関係を整理したものが図-17~19である。図-17は、 c_v 、図-18は沈下量から求めた c_h 、図-19は間隙水圧の消散から求めた c_h につ

いて示している。これらの図を見ると、 c_h は c_v より若干大きい傾向があるが、やはり数倍大きいという結果にはなっていない。

c_h と c_v の比を定量的に調べるために、縦軸に c_h 、横軸に c_v をとり、同一深度の試料で同じ圧密圧力段階のときの圧密係数の対応関係について整理したものが図-20(a), (b)である。図-20(a)は沈下量から求めた c_h について比較したものであるが、ほとんどの点が $c_h=1\sim 2c_v$ の範囲に入っている。図-20(b)は、間隙水圧の消散から求めた c_h について比較したのものである。沈下量から求めた c_h よりも若干ばらつきは大きく、 $c_h=1\sim 3c_v$

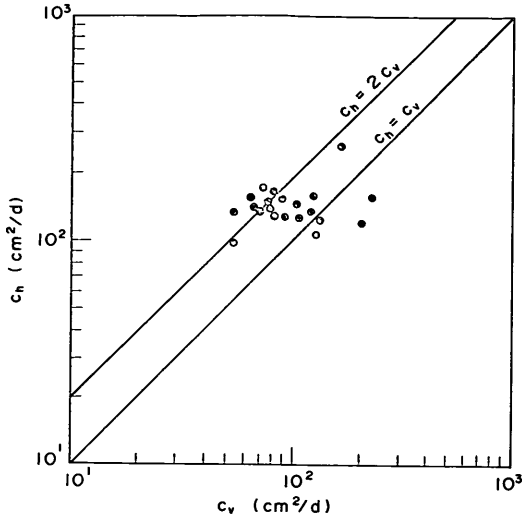


図-20(a) 圧密係数の比較 (沈下量)

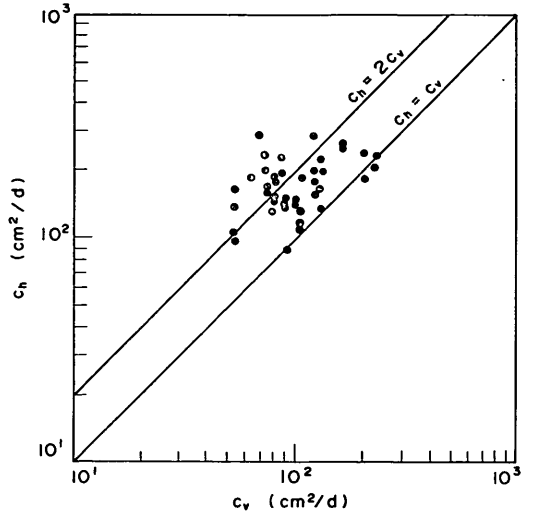


図-20(b) 圧密係数の比較 (間隙水圧)

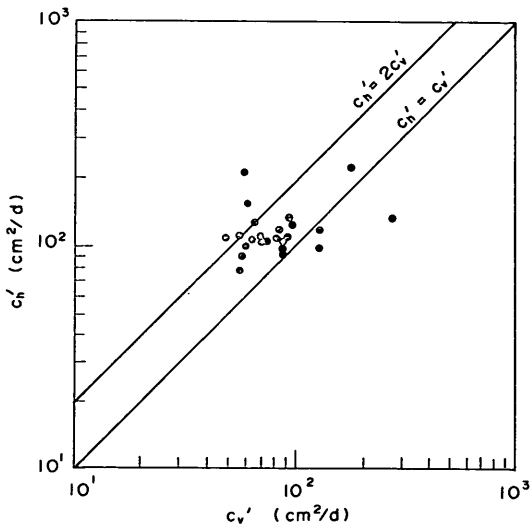


図-21(a) 一次圧密比で補正した圧密係数の比較 (沈下量)

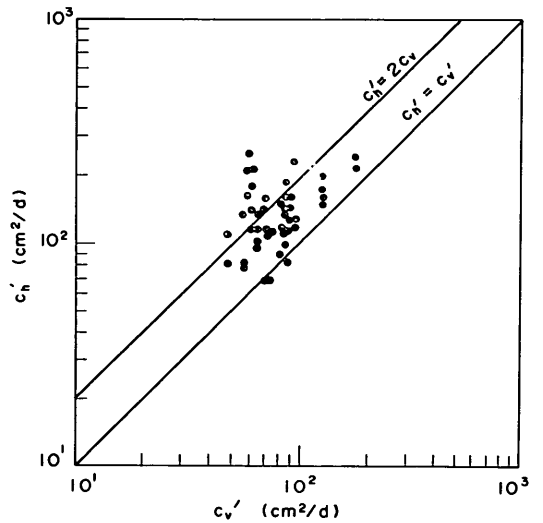


図-21(b) 一次圧密比で補正した圧密係数の比較 (間隙水圧)

程度まで範囲が広がるが、やはり c_h は従来いわれていたような c_v の数倍とはなっていない。

ここで考慮しなければならないのは、放射排水の水平方向圧密と鉛直排水の標準圧密の各試験では、排水距離が異なることと排水方向の相違があることである。本報告では、これらの違いを一次圧密比を用いた整理を行うことによって考慮する。標準圧密試験では、二次圧密の影響を補正するために、圧密係数に一次圧密比を乗じて補正圧密係数を求める方法が示されている。そこで、一

次圧密比で補正した圧密係数について、図-20 と同様のプロットを行ったものが図-21(a), (b) である。圧密係数を一次圧密比で補正しても、図-20 と同様に、沈下量、間隙水圧ともに c_h は c_v のほぼ 1~2 倍であることが確認できる。

4.3 数値解析による試験結果の検討

今回の試験結果に対して二次圧密も考慮にいれて検討するために、修正関口・太田の弾・粘塑性構成式を用いた FEM による解析を行った^{12), 13)}。この構成式では、

表-2 弾・粘塑性解析における入力定数

	鉛直排水試験		放射排水試験	
	$p=3.2$	$p=6.4$	$p=3.2$	$p=6.4$
$\lambda/1+e_0$				
$\kappa/1+e_0$	0.182	0.167	0.166	0.152
M	1.5	1.5	1.5	1.5
α	0.004	0.005	0.004	0.004
v_0	4×10^{-5}	10^{-4}	7×10^{-4}	6×10^{-4}
c_v	115	115	104	104

自然対数での圧縮指数 λ , 膨潤指数 κ , 初期間隙比 e_0 , 限界状態での応力比 M , 自然対数に関する二次圧密指数 α , および載荷直前の体積ひずみ速度 \dot{v}_0 が必要になる。今回の解析では, λ は全沈下量から求め, α と \dot{v}_0 は実測の沈下と時間の関係から求めた。 κ と M は結果にあまり影響を与えないので, $\kappa = \lambda/10$, $M = 1.5$ とした。圧密係数は正規圧密状態で一定値となるように, 透水係数を間隙比の関数として変化させて決定した。

計算は正規圧密状態にあるものを対象とし, 圧密圧力として 3.2 kgf/cm^2 および 6.4 kgf/cm^2 の二段階の荷重に対して結果を解析した。表-2に計算に用いた定数を示

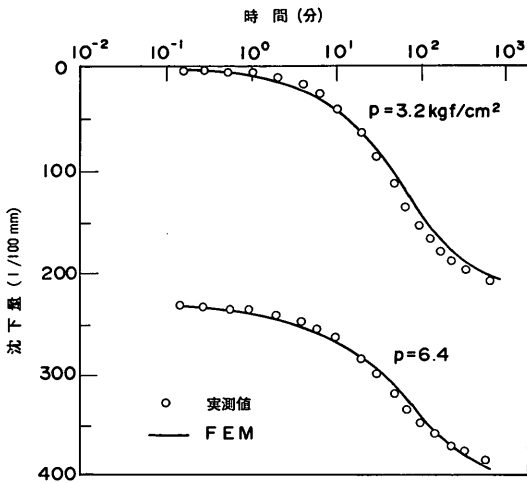


図-22(a) 鉛直方向圧密試験の数値解析による計算値と実測値の比較 (沈下量)

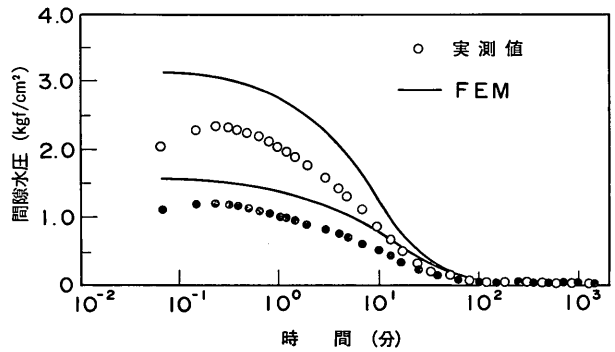


図-22(b) 鉛直方向圧密試験の数値解析による計算値と実測値の比較 (間隙水圧)

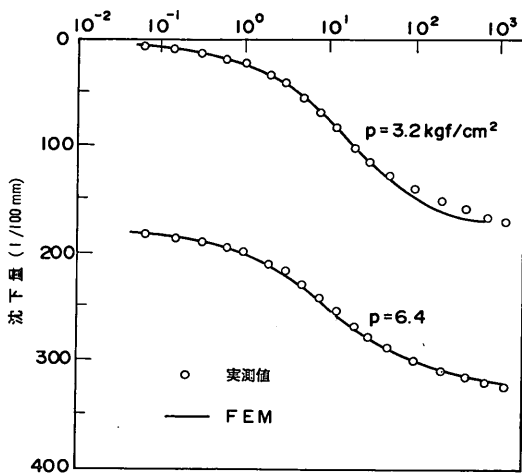


図-23(a) 水平方向圧密試験の数値解析による計算値と実測値の比較 (沈下量)

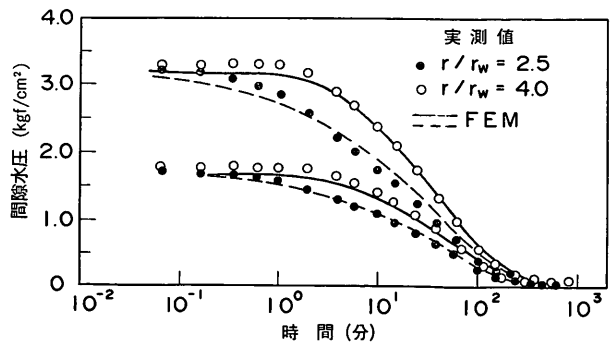


図-23(b) 水平方向圧密試験の数値解析による計算値と実測値の比較 (間隙水圧)

す。図-22(a), (b) は、鉛直方向圧密試験の沈下および間隙水圧と時間の関係について実測値と計算値を比較したものである。この図に示されるように、沈下に関しては弾・粘塑性構成式を用いた解析結果は実測値とよく一致する。一方、間隙水圧に関しては計算値の方が大きい値を示している。これは、鉛直排水試験では載荷初期に非排水条件とすることができないことから、間隙水圧の発生に時間遅れが生じているためと考えられる。図-23(a), (b)は、水平方向圧密試験に関して同様の比較を行ったものである。ここでは、初期の非排水状態での間隙水圧が測定されているので、沈下、間隙水圧とも一致している。したがって、今回行った二次圧密沈下も考慮した弾・粘塑性構成式による解析は、試験結果を非常によく再現できることがわかる。この計算には表-2の値を用いたわけであるが、 c_h と c_v には大きな違いはみられず、 c_h は c_v に比較してそれほど大きな値ではないことを示しており、試験結果を裏付けるものとなっている。

4.4 従来の試験方法の問題点の検討

ここまでの議論で、今回の試験から求められた c_h は c_v とそれほど大きな差はないことが明らかになった。ではこれまで何故 c_h は c_v の数倍も大きいといわれてきたのか検討してみた。

今回の試験と従来の試験で最も異なっていると考えられる点は、供試体外周部での排水条件である。今回の試験では、圧密容器は圧力室となっておりセル内の拘束圧を用いて圧密圧力を載荷している。また載荷キャップとカラーの間は、ゴム膜で密閉され、セル圧で拘束している。したがって、排水バルブを用いてほぼ完全に排水状態と非排水状態とを制御し得る構造になっているので、載荷初期に間隙水圧が平衡状態に達するまで圧密開始を遅らせることができる。このため間隙水圧の消散過程から容易に圧密係数を求めることが可能になっている。

ところが従来の圧密容器では、供試体の外周部、すなわちキャップとカラーの間、あるいはリングと底板の間からの排水を完全にコントロールしているとはいえず、供試体内部での状態を正確に把握することが困難である。そこで、図-11に示す改良型の試験機と、図-12の従来の試験機での結果の比較を行った。

図-24 は沈下量を時間に対してプロットしたものである。この図から、従来の試験方法から得られた結果の方が、今回のものよりも圧密速度が大きくなることがわかる。その差は、最終沈下量に対する圧密度が50%になる時間で比較すると、従来型のものが改良型の約2分の1である。つまり、圧密速度は約2倍になっている。また、従来型の試験結果を i^* 法で整理したところ、初期

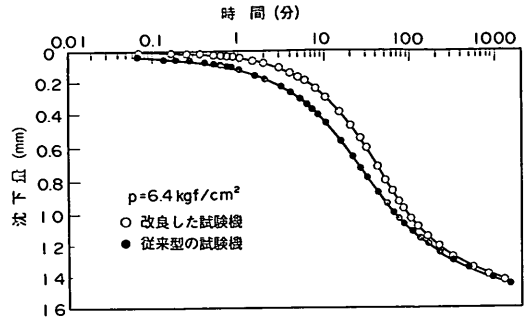


図-24 沈下量と時間の関係（従来型試験機）

部分が直線にならないことがわかった。このことは、今回の試験条件である $N = 5$ で内向き排水という条件を満たしていないことを示している。

この理由を調べるために、圧密試験中に供試体の様子を詳しく観察すると、やはり載荷キャップとカラーの間から水が漏れ出ていることがわかった。このことから、完全には排水条件が内向きの放射流を満たしておらず、部分的に内向きと外向きの放射流が存在していることが考えられた。したがって、このような試験結果からは、正しい圧密係数は求められず、大きな値となることは明らかである。

なお、図-12の試験機では、圧密リングと底板の間はOリングで止水しているので下部からの漏出はみられず、上部からの漏れだけであった。一方、図-7に示した、過去に港研で用いていた容器では、圧密リング下部からも排水していたことが考えられ、今回の比較よりも差が大きくなったものと考えられる。

FEMを用いて供試体外周部からの排水も考慮して数値解析を行った。計算に用いた構成方程式は、修正関口・太田モデルの粘性項を除いた弾塑性構成式である。計算条件としては、圧密リング下部にOリングを用いていない場合も考慮して、図-25に示すように、上部排水点のみ有する場合、および上部、下部の両排水点を持つ場合の2種類の解析を行った。図-26に、排水点のないものと、上記の排水点を持つものの計算結果を比較したものを示す。この図から排水点の有無によって圧密速度に差が現われることが明らかである。このような載荷板外周部からの排水は、鉛直排水の圧密試験では問題とならないが、水平方向の圧密試験では圧密係数を過大に評価する要因になる。今回の排水点に関する解析では、供試体寸法として直径 60 mm、高さ 20 mm として計算を行った。しかし、実際の試験では圧密が進むにつれて供試体高さが小さくなるので、排水点までの排水距離が

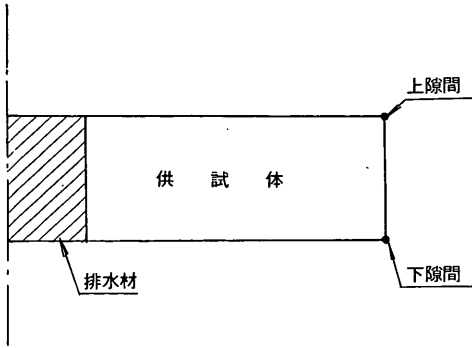


図-25 供試体外周部の排水点

短くなり、その影響はこの計算結果よりも大きくなると考えられる。

また、今回の報告での圧密試験結果の整理法は \sqrt{t} 法に準じた方法(t^n 法)を採用している。図-27に、4.2で比較例に用いた結果に対して、 \sqrt{t} 法に準じた方法、間隙水圧、Barronの曲線定規法をそれぞれ用いて求めた圧密係数の比較を示す。同じ試験結果をBarronの曲線定規で圧密係数を求めると、同じ試験結果でも2~3倍程度大きめの圧密係数を与えることがわかる。今回行った全試験結果の一次圧密比を整理すると、鉛直圧密試験で0.7~0.9、水平方向圧密試験で0.5~0.85であった。ここでは、一次圧密比は鉛直圧密では \sqrt{t} 法、水平方向圧密では t^n 法で整理した結果から求めている。水平方向圧密試験の結果を曲線定規法で整理すると、一次圧密比は0.25~0.35と非常に低い値を示した。排水方向の違いにより、圧密の進行に相違があることは予想できるが、この値から考えると水平方向圧密試験の沈下は大半が二次圧密沈下ということになり不自然である。これは、曲線定規法を用いた場合、時間軸が対数であるため、載荷初期になんらかの測定誤差が生じた場合、圧密係数により大きな影響を与えるためと考えられる。

今回試験を行った大阪湾海底地盤の沖積粘性土層のような、ほぼ均一で一様に堆積している地盤において水平方向圧密係数 c_h が、鉛直方向圧密係数 c_v の数倍も大きいとすることには疑問がある。本報告では時間一沈下量の関係からだけでなく、間隙水圧の消散過程からも圧密係数を求めている。また、二次圧密をも考慮した有限要素法を用いて試験結果に対して検討を加えている。以上のことをよく吟味すると、今回得られた $c_h=1\sim 2c_v$ という値は妥当なものであると考えられる。

5. 攪乱帯が水平方向圧密係数に与える影響

水平方向圧密係数 c_h は、改良前では鉛直方向圧密係数 c_v よりも数倍大きい、バーチカルドレーンで改良した地盤では、ドレーン打設時に攪乱帯が発生し低下するため、 c_h は c_v と等しくなるとされてきた。しかし4.では、乱さない粘土の c_h は、 c_v の1~2倍であり、 c_v より数倍も大きいものではないことを述べた。このことを考えると、粘性土の乱れが圧密特性に及ぼす影響を従来は過大に評価していたのではないかと疑問が生じる。

攪乱帯の影響を定量的に検討するために、今回用いた試料について、攪乱粘土の圧密特性を調べ数値解析を行った。また、人工的に攪乱帯を設けた試料の水平方向圧密試験を行った。

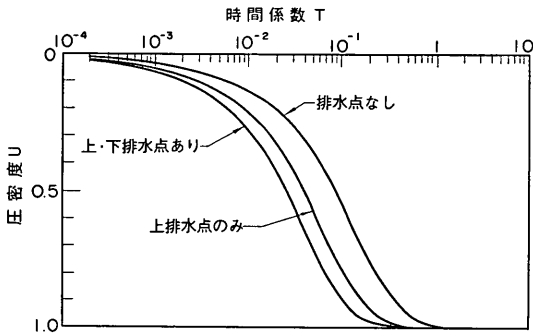


図-26 供試体外周部に排水点を持つ場合の数値解析による解析結果

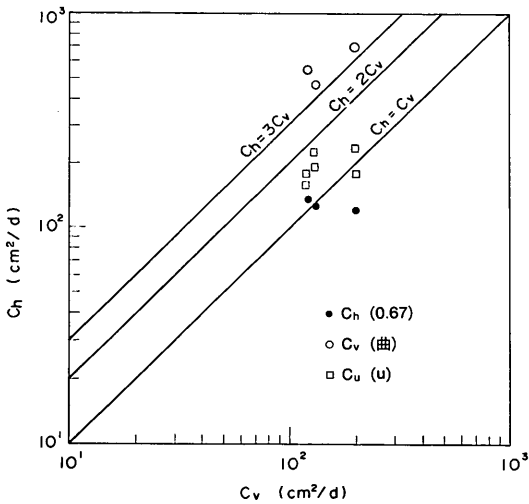


図-27 整理法による圧密係数の相違

5.1 攪乱粘土の圧密特性

攪乱粘土の鉛直方向の圧密特性については、これまで多くの研究がなされており、よく知られている。ここでは今回用いた粘土に攪乱を与えた場合の圧密特性を明らかにし、5.2で行う数値解析で用いる定数とする。

攪乱粘土の鉛直方向圧密試験装置および荷方法は、標準圧密試験に準じている。試料は、一軸圧縮試験で鋭敏比を求める際の練り返し方法に従って十分に練り返した粘土を、隙間ができないように注意して圧密リングに詰めて供試体とした。

不攪乱試料と練り返し試料について、図-28に間隙比 e と圧密圧力 p の関係、図-29に体積圧縮係数 m_v と平均圧密圧力 \bar{p} の関係を比較して示す。これらの図からわかるように、不攪乱試料と練り返し試料では、圧密特性はかなり異なっている。まず、 $e-\log p$ 曲線について

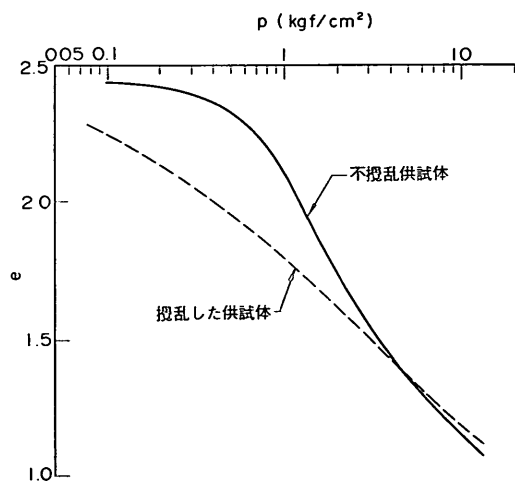


図-28 攪乱した粘土の $e-\log p$ 曲線

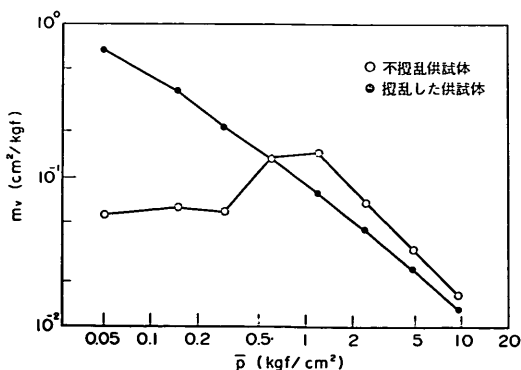


図-29 攪乱した粘土の体積圧縮係数 m_v と平均圧密圧力 \bar{p} の関係

見ると、不攪乱試料においては圧縮指数 C_c は圧密降伏応力 p_c の前後で大きく変化するが、練り返し試料ではゆるやかに増加している。また、ある程度まで圧密圧力が大きくなると、攪乱の影響が消えて $e-\log p$ 曲線は一致してくることが確認できた。同様に m_v についてもまた、不攪乱試料では過圧密領域では一定あるいは増加し、正規圧密領域では減少するが、練り返し試料では一様に減少し、圧密が進行するにつれて両者はほぼ平行な関係となることがわかる。

圧密係数 c_v と平均圧密圧力 \bar{p} の関係について見たものが図-30である。不攪乱試料においては、 c_v の値は過圧密領域と正規圧密領域では大きく異なるが、それぞれの領域においてはほぼ一定値となる。一方、練り返した試料では、 c_v は $\log p$ に対してほぼ一定の割合で増加する。ここで、パーチャルドレーン工法を用いる場合には、正規圧密領域での圧密係数を考える必要がある。図-30から、過圧密領域では c_v の値は大きく異なるといえるが、正規圧密領域では練り返しによっても c_v は2分の1程度にしか低下しない。この試験結果は、攪乱の程度がいちばん大きな練り返し粘土を用いたものであることから、通常は c_v は攪乱によってもそれほど大きく低下しないと考えられる。

攪乱の影響を透水係数 k から調べたものが図-31~33である。通常 k は、一次圧密比で補正した圧密係数 c_v' を用いて計算するが、ここでプロットした k は $k=c_v m_v r_w$ として求めている。平均圧密圧力 \bar{p} と透水係数 k の関係を示した図-31を見ると、やはり過圧密領域では差は若干大きい、正規圧密領域では両者の差はそれほど

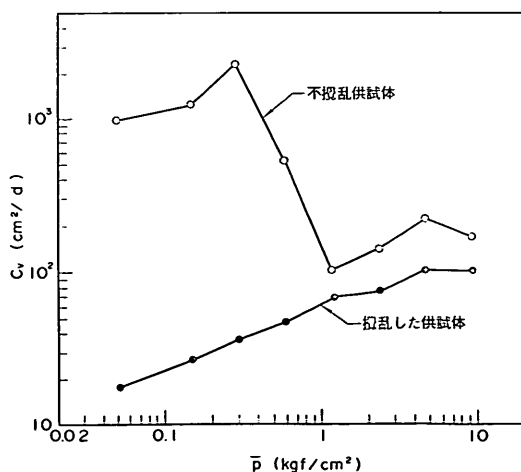


図-30 攪乱した粘土の圧密係数 c_v と平均圧密圧力 \bar{p} の関係

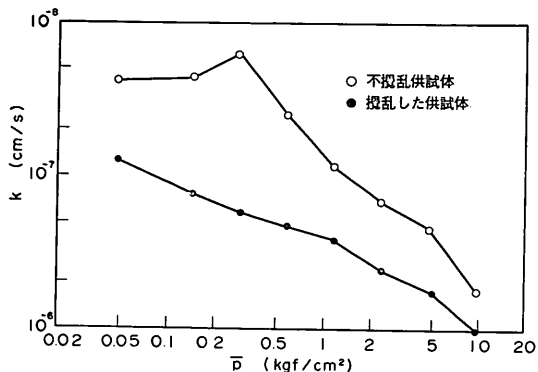


図-31 攪乱した粘土の透水係数 k と平均圧密圧力 \bar{p} の関係

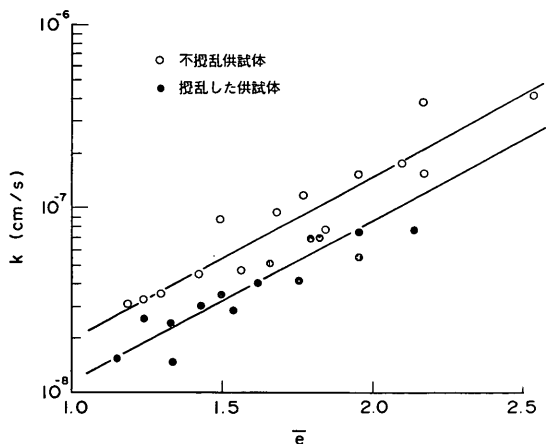


図-33 攪乱した粘土の透水係数 k と平均間隙比 \bar{e} の関係

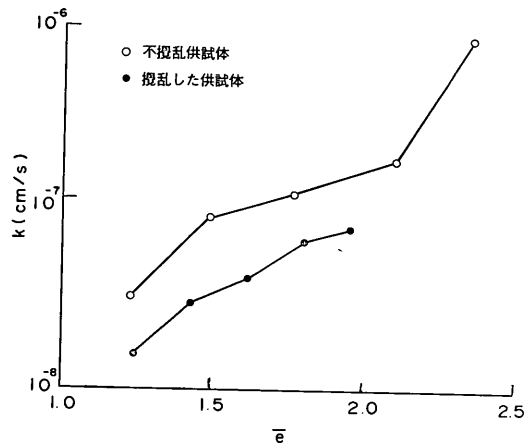


図-32 攪乱した粘土の透水係数 k と平均間隙比 \bar{e} の関係

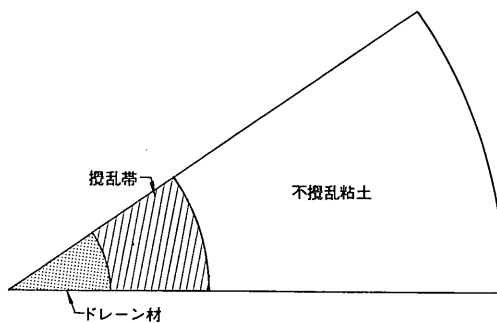


図-34 人工的に与えた攪乱帯

大きくないことがわかる。また、5.2で行う攪乱帯を考慮した数値解析においては、間隙比に対して透水係数がどのように変化するかを求めておく必要があり、そのため透水係数 k と間隙比 e の関係を求めたものが図-32、33である。ここでは、間隙比 e は各圧密圧力段階での初期間隙比と一次圧密沈下による間隙比との平均間隙比 \bar{e} として整理している。図-32を見ると、 k は正規圧密領域において透水係数と間隙比は直線関係に近いことがわかる。より詳しく調べるために、正規圧密領域における全試験結果の k と平均間隙比 \bar{e} について整理したものが図-33である。この図から、 k と \bar{e} の関係は直線で近似でき、不攪乱試料を繰り返すことによってその直線は透水係数が低下する方向に平行移動し、同一間隙比における透水係数は、約3分の2に低下することがわかる。

5.2 攪乱帯を有する粘土の水平方向圧密係数

パーティクルドレーン打設時に乱される攪乱帯、いわゆるスミヤードゾーンの影響を調べるために、人工的に攪乱帯を与えた供試体を用いて水平方向圧密試験を行った。攪乱帯として考慮すべき領域については様々な説があるが、打設されるドレーンと同体積の粘土が攪乱されると考えると攪乱帯の直径 d_s とドレーン径 d_w の比は1.4となる。今回の試験では、図-34に示すように、与える攪乱帯の直径をドレーン材の直径の2倍と設定した。この領域に、完全に繰り返した粘土をつめて水平方向圧密試験を行った。

図-35に沈下一時間曲線を示す。最終沈下量が異なり比較が難しいので、ここでは最終沈下量に対する圧密度として沈下をプロットしている。この図からわかるよう

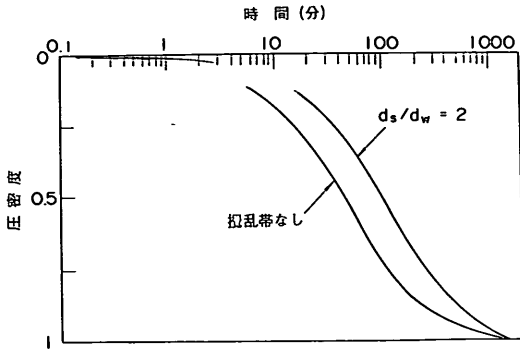


図-35 攪乱帯を有する粘土の沈下—時間関係

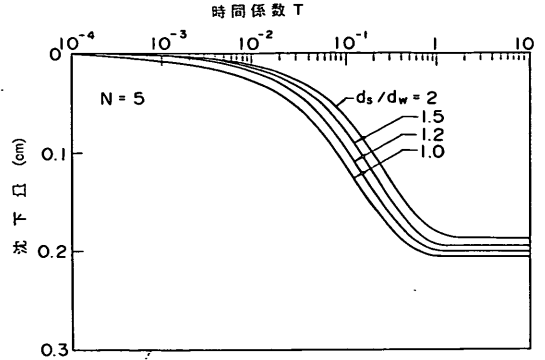


図-38 時間—沈下関係におよぼす攪乱帯の影響 (N=5)

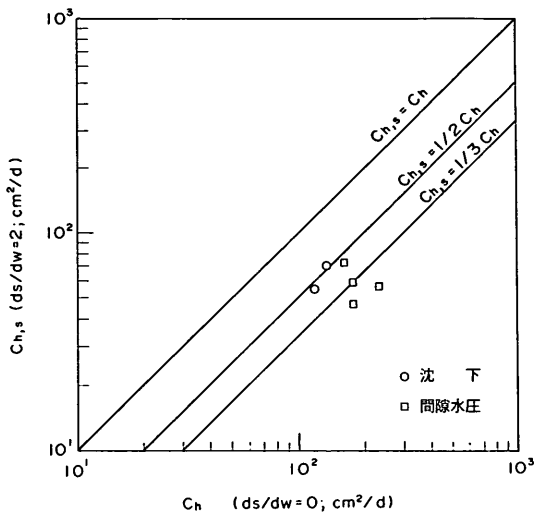


図-36 圧密係数の比較

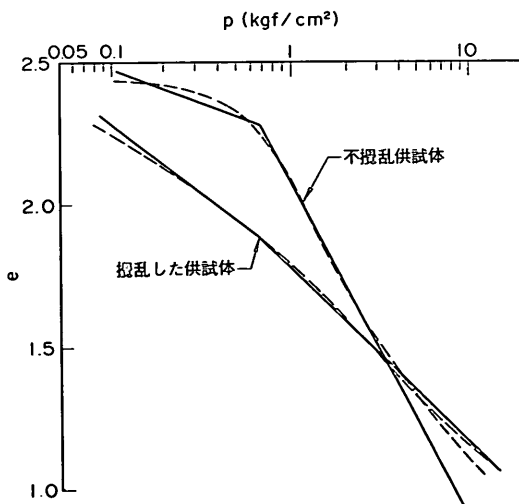


図-37 e—log p 曲線の直線近似

に、攪乱帯の存在によって圧密速度は低下し、圧密度50%までに要する時間は、不攪乱粘土の約2倍程度である。図-36に攪乱帯のない試料の c_h に対して、攪乱帯を設けた場合の $c_{h,s}$ をプロットしたものを示す。この図から、 $d_s/d_w=2$ の場合、攪乱帯の存在による水平方向圧密係数は不攪乱粘土から得られるものの2分の1に低下することがわかる。

バーチカルドレーン打設時の乱れの影響、つまりスマイヤードゾーンの影響を調べるために有限要素法による数値解析を行った。乱した粘土の圧密特性は、5.1で述べたように圧密圧力と間隙比によって変化するので、単純な線形圧密計算では現象の再現が困難であることが予想される。そこで今回は挙動をできるだけ忠実に再現するために、解析には修正関口・太田モデルの粘性項を除いた弾塑性構成式を用いた。この解析で必要になる条件は、間隙比 e と圧密圧力 p の関係および透水係数 k と間隙比 e の関係である。 $e-\log p$ 曲線に関しては、図-28を図-37のように直線で近似して用いた。透水係数と間隙比の関係は、図-32に示した2本の直線で不攪乱と攪乱を与えた試料の値を近似した。

計算は、有効円の直径 d_e とドレーンの直径 d_w の比 N を、今回の試験と同じ条件となる5と、参考のために10として計算を行った。ここでは、攪乱された粘土は、完全に繰り返した粘土の力学特性に従うものと仮定している。図-38は、 $N=5$ の場合の沈下量と時間係数の関係を示したものである。攪乱された範囲を示す直径 d_e が d_w の1.0(攪乱がない場合)、1.2、1.5、2.0倍の4ケースについて計算を行った。また時間係数を求める際の圧密係数には、不攪乱粘土の値を用いた。この図から攪乱帯が広がるにつれて圧密の速度が低下することがわかる。この整理では攪乱帯の大きさと最終沈下量に差があ

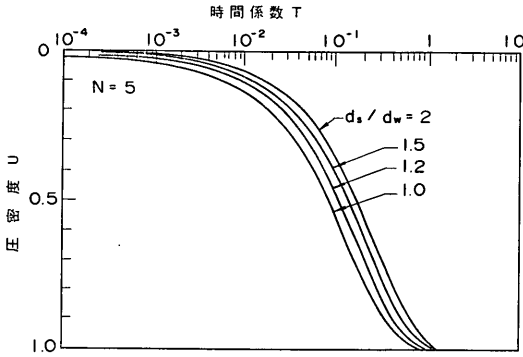


図-39 時間一沈下関係におよぼす攪乱帯の影響 (N=5)

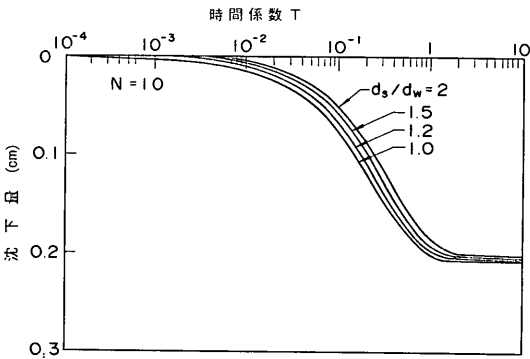


図-40 時間一沈下関係におよぼす攪乱帯の影響 (N=10)

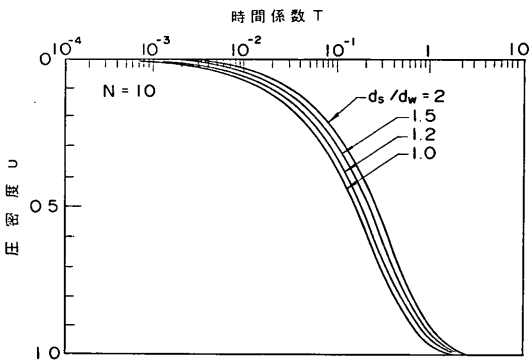


図-41 時間一沈下関係におよぼす攪乱帯の影響 (N=10)

るので、この結果を最終沈下量に対する圧密度で整理して同様の比較を行ったものが図-39 である。ドレーン打設により攪乱される領域を d_s/d_w の値が 1.4 程度であるとすると、攪乱による圧密速度の低下はそれほど大きくなく、約 3 分の 2 程度である。この結果は、4.2 での試験結果である c_h は c_v の 1~2 倍であるという結果に対応している。つまり攪乱の影響により本来地盤が有している水平方向の圧密係数が低下し、見かけ上圧密速度が鉛直方向の圧密係数を用いたものとはほぼ等しくなるためである。このことは、従来行われてきた議論と同様とも考えられるが、内容的には今回の試験および解析結果は、攪乱の影響と排水方向による圧密係数の低下がこれまでいわれてきたものよりも小さいという点で大きく異なっている。

図-40, 41 は、 $N=10$ の場合について同様の整理を行ったものであるが、攪乱の影響は $N=5$ の場合のものよりも小さくなっている。

6. 結 論

本報告ではバーチカドレーンを打設した場合に問題となる水平方向圧密特性について調べた。特に圧密沈下速度を予測する際に大きな影響を与える水平方向圧密係数を精度よく求めるために、これまで用いられてきた水平方向圧密試験機を改良し試験を行った。また、その結果に対して有限要素法を用いた数値解析による検討を行った。今回得られた結論は以下のようにまとめられる。

- 1) 基本的な圧密試験結果である $e - \log p$ 曲線および体積圧縮係数 m_v と平均圧密圧力 \bar{p} の関係は排水方向による差は認められず同じ挙動を示す。
- 2) 水平方向圧密試験の場合でも時間一沈下量の関係から圧密係数を求める場合 \sqrt{t} 法に準じた方法が有効である。この場合、試験条件に応じてカーブフィッティングのための定数を設定する必要がある。
- 3) 今回用いた試料では、水平方向圧密係数 c_h は鉛直方向圧密係数 c_v の 1.5 倍、最大でも 2 倍程度であり、両者は極端に異なる値とはならなかった。このことから、均質な軟弱粘土地盤における透水性は、極端な異方性を持たないと考えられる。
- 4) ドレーン周辺部に攪乱帯があると、水平方向圧密係数は低下する。攪乱帯の直径がドレーン径の 2 倍である場合、圧密係数は約 2 分の 1 に低下する。
- 5) 従来の水平方向圧密試験は排水条件を十分に制御できないため、圧密係数を過大に評価していたことがわかった。

(1990年3月31日受付)

謝 辞

本報告をまとめるにあたって、多くの方々の協力を頂いた。田中洋行地盤調査研究室長には、本研究を進める上で終始有益なご意見をいただいた。佐藤勝久土質部長には、本稿をとりまとめるにあたって、貴重なご指導をいただいた。関西国際空港㈱工務一部、建設事務所の方々には、試料の採取、運搬について非常にお世話になった。ここに記して深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 吉国 洋：バーチカルドレーン工法の設計と施工管理，技報堂。
- 2) Barron, R. A.: Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells, *Trans. A.S.C.E.*, Vol. 113, pp. 718~754, 1948.
- 3) 中瀬明男, 小林正樹：圧密による軟弱地盤の改良効果，土と基礎，Vol. 20, No. 8, 1972.
- 4) McKinlay, D. G.: A Laboratory Study of Rates of Consolidation in Clays With Particular Reference to Conditions of Radial Porewater Drainage, *Proc. 5th I. C. S. M. F. E.*, Vol. 1, pp.

- 225-228, 1961.
- 5) Aboshi, H. and Monden, H.: Determination of the Horizontal Coefficient of Consolidation of an Alluvial Clay, *Proc. 4th Aust.-N. Z. Conf. Soil. Mech.*, Vol. 1, pp. 559-562, 1963.
- 6) Trautwein, S. J. Olson, R. E. and Thomas, R. L.: Radial Flow Consolidation Testing, *Proc. 10th I. C. S. M. F. E.*, Vol. 1, pp. 811-814, 1981.
- 7) Olson, R. E.: State of the art: Consolidation testing, Consolidation of soil: *Testing and evaluation, ASTM STP892*, 1986.
- 8) 前田 進：大規模沖合人工島の建設におけるサンドドレーン改良地盤の沈下安定管理システムに関する研究，九州大学学位論文，1988.
- 9) 小林正樹, 中瀬明男：粘土の水平方向圧密係数について，第31回土木学会年次学術講演会第3部，pp. 167-168, 1976.
- 10) 尾上篤生：ドレーンのウェルレジスタンスに関する基礎的研究，東京工業大学学位論文，1989.
- 11) 土質試験法：第2回改訂版，土質工学会。
- 12) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clays, Speciality session 9, *9th ICSMFE*, 1977.
- 13) 小林正樹：有限要素法における非線形多次元圧密解析，第14回土質工学研究発表会，1979.