

# 不均質な軟弱地盤用に開発した特殊大型圧密試験装置と その適用性について

持田文弘・利藤房男

Development of large scale specific consolidation test apparatus  
and its applicability to inhomogeneous soft ground

Fumihiro Mochida and Fusao Rito

## Abstract

Large scale specific consolidation test apparatus was developed to evaluate consolidation property of inhomogeneous soft ground precisely, which is applicable for a large scale specimen up to 300mm in diameter.

This apparatus makes it possible to precise measurement considering friction effect of a consolidation ring and to estimate horizontal coefficient of consolidation.

In order to confirm applicability of this apparatus, one-dimensional consolidation property of soil using incremental loading and horizontal drained consolidation test to inhomogeneous highly organic soil were carried out in view of scale effect of consolidation property and anisotropy of coefficient of consolidation.

Consequently, very precious results to forecast consolidation settlement in highly organic soft ground were lacquered as follows.

- ① Pressure loss by friction of consolidation ring reaches to about 10% of consolidation pressure in normally consolidation area.
- ② Consolidation tests using large scale specimen are very reliable, reducing disturbance on sampling and trimming.
- ③ Anisotropy of coefficient of consolidation is very remarkable and horizontal coefficient of consolidation,  $C_h$  is about 5 times larger than vertical coefficient of consolidation  $C_v$ .

Key words : Large scale specific consolidation test, organic soil, scale effect, anisotropy

## 1 はじめに

一般に、軟弱な粘土地盤の圧密現象を予測する場合には、直径60mm、高さ20mmの標準供試体を用いて段階荷重圧密試験が実施される。ところが、高有機質土地盤や廃棄物地盤等の不均質な地盤材料では、標準的な供試体寸法では正確な圧密特性の把握が困難であり、地盤材料に適應した供試体寸法で試験を実施する必要がある。

そこで今回、不均質な地盤材料に適用可能な装置として、径300mm、高さ100mmの供試体寸法での試験が可能な特殊大型圧密試験装置を開発した。本装置は、試験精度を向上させるため土と圧密リング間に発生する周面摩擦の影響を考慮し、供試体の中心付近での正確な圧密圧力を測定することが可能な構造であるとともに、試験中に水平方向のみの排水が可能な機能を有し、バーチカルドレーン工法の有効性を評価できるよう工夫した。また、本装置を用いて高有機質土地盤の圧密特性を評価し、不均質地盤における大型供試体の有効性を検討した。

本文では、開発した試験装置の特徴と、高有機質土地盤における圧密特性の評価例について述べる。

## 2 試験装置の特徴

### 2.1 試験装置および圧力制御システム

今回開発した特殊大型圧密試験装置の全体図を図-1に示す。試験装置は、荷重装置、圧力タンク、高精度レギュレーター（サーボモーター駆動式）、サーボロガーで構成されている。荷重装置は、最大500kNまでの荷重が可能な空圧アクチュエーターを搭載し、また、供試体全体と供試体の中心付近における圧密圧力の計測および制御が可能な構造を持つ。圧密圧力の検出にはロードセルを用い、沈下量の測定には1/1000mm感度のデジタルリニアゲージ（測長100mm）を用いている。適用供試体寸法は、径300mm、高さ100mm（現行のJISで規定している供試体寸法の相似形）とし、圧密リングの内面は周面摩擦の影響を低減するため、硬質クロムメッキ加工を施している。

圧密圧力の制御は、高精度レギュレータから圧力タンクに設定圧を一時的に蓄積し、それを電磁弁の解放によって空圧アクチュエーターに圧力を供給する構造であるため、最小圧力4.9kN/m<sup>2</sup>～最大圧力627.6kN/m<sup>2</sup>の間で安定した圧力の制御が可能な構造となっている。

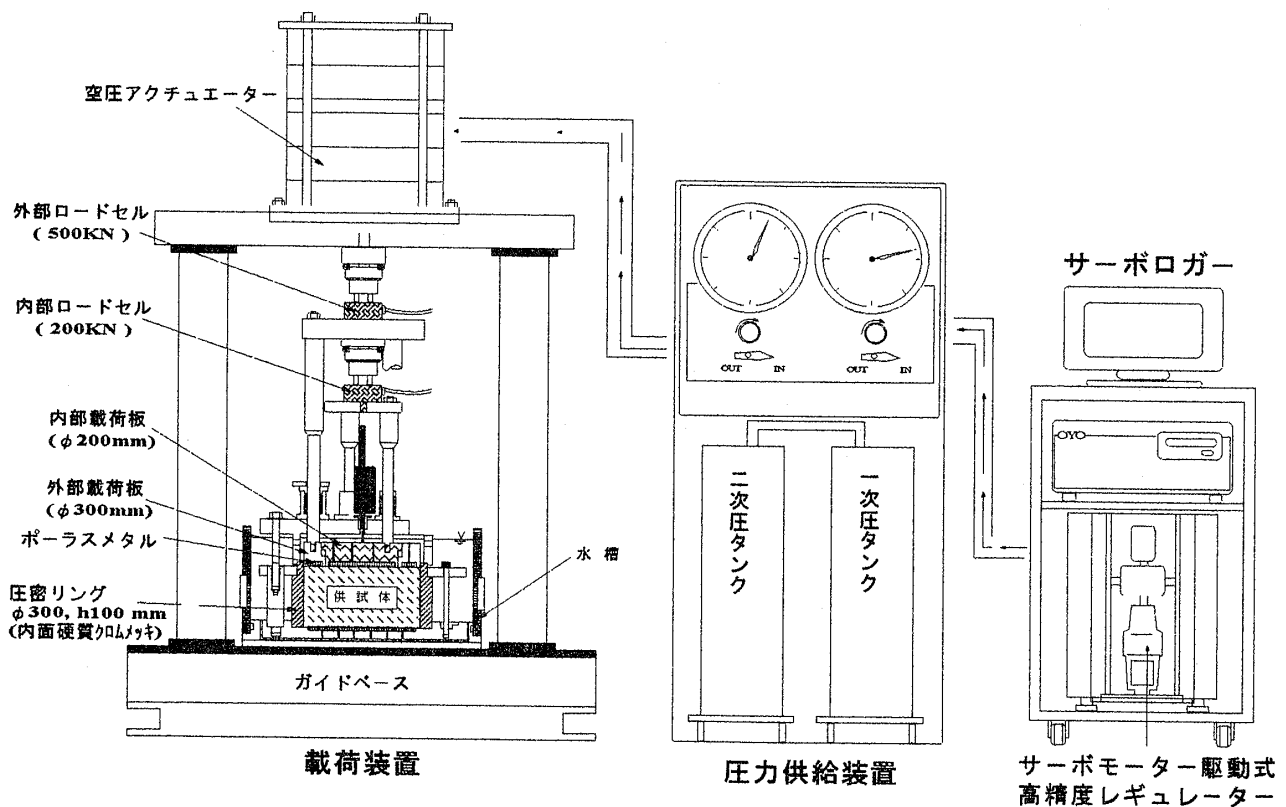


図-1 特殊大型圧密試験装置の全体図

Fig.1 Schematic diagram of large scale specific consolidation test apparatus

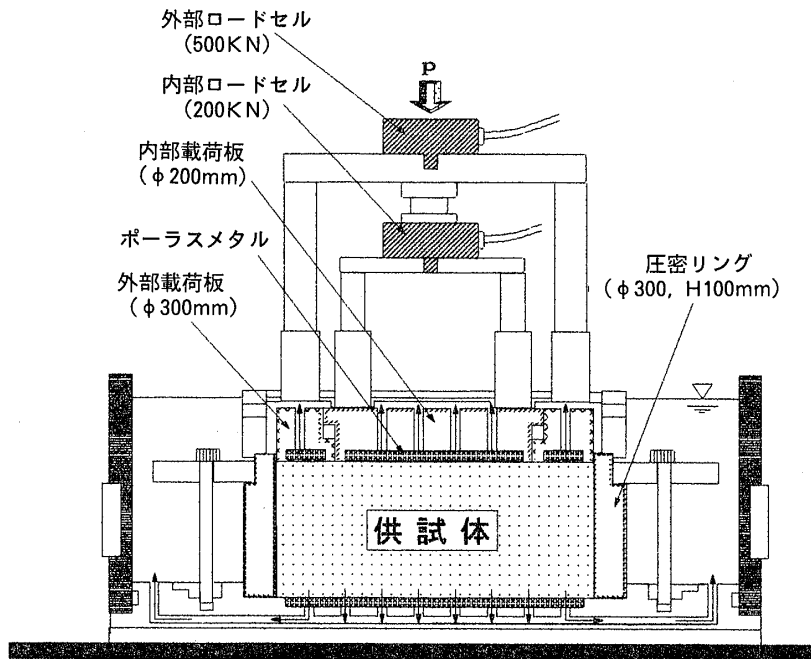


図-2 圧密圧力の測定方法  
Fig. 2 Measuring procedure of consolidation pressure

## 2. 2 リング周面摩擦の影響を受けない圧密圧力の測定

現行の圧密試験方法では、土と圧密リングの間に作用する周面摩擦の影響により、実際の圧密圧力が有効に作用していないと考えられる。この問題を解決するため、周面摩擦の影響が少ない供試体の中心付近における圧密圧力を測定することにより、正確な圧密特性を評価できるよう工夫した。

圧密圧力の測定方法の概念図を図-2に示す。載荷板は、内部載荷板(φ200mm)と、外部載荷板(φ300mm)の二重構造とし、載荷板には均等な変位が生じる構造とした。なお、外部載荷板と内部載荷板の断面積比は、軸対称の弾性解析を行い、内部載荷板にリング周面摩擦の影響が出ないように決定した。載荷板に作用する全体圧密圧力 $p$ は外部ロードセル(500kN)で測定し、内部載荷板に作用する周面摩擦の影響の少ない供試体中心付近の圧密圧力 $p'$ は内部ロードセル(200kN)で測定する構造とした。両者で得られた圧密圧力の差がリングの周面摩擦力である。また、内部ロードセルで圧密圧力を制御することで、より正確な圧密特性を得ることができる。

## 2. 3 水平方向圧密係数( $C_h$ )の測定

軟弱地盤を改良する場合、バーチカルドレーン工法が

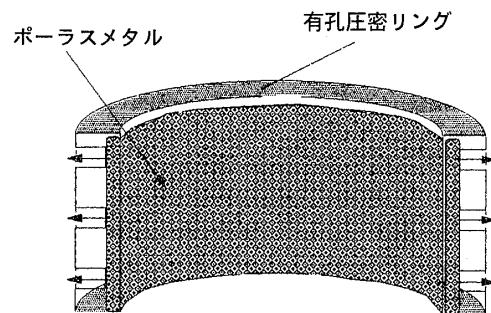


図-3 水平排水用圧密リングの断面図  
Fig. 3 Section of consolidation ring for horizontal drained consolidation test

最も一般的な方法であり、かつ、実績も多い。バーチカルドレーン工法による圧密特性の評価は、水平方向の圧密係数を正確に求めることで解析精度が向上する。そこで、水平方向の圧密係数を精度良く求めるため、圧密リングの周面からの排水が可能な透水性の圧密リングを製作した。透水性の圧密リングの断面図を図-3に示す。透水性の圧密リングは、水平方向に排水孔を設けた圧密リング内面にポラスメタル(排水材)を設置し、二次元放射排水を再現した。ポラスメタルの透水係数は、 $5 \times 10^{-3}$  cm/secである。また、試験時は外部・内部の載荷板および底板は無垢板とし、鉛直方向の排水を防いでいる。

### 3 特殊大型圧密試験装置を用いた高有機質土地盤の圧密特性の評価例

#### 3.1 実験に用いた高有機質土の特徴

実験に用いた高有機質土は、近畿圏北部の低湿地から採取したものである。サンプリングには、固定ピストン式のシンウォールサンプラー（内径：340mm，試料長：1,000mm）を用いた。シンウォールサンプラーは、大口径試料を採取するために今回特別に製作したもので、基本的な構造は一般の固定ピストン式サンプラーと同様であるが、試料の変形防止のためサンプリングチューブの肉厚を8mmと厚くしている。試料の基本的な物理特性は、自然含水比700~1000%，初期間隙比15~17，湿潤密度1.00~1.05g/cm<sup>3</sup>，強熱減量70~90%であり，有機物を多量に含み，分解が進んでいる。また，試料中には植物遺体や未分解の木片などが混入し，分解度が異なる部分が混在するなど極めて不均質である。

#### 3.2 実験結果と考察

##### 3.2.1 大型段階載荷圧密試験（圧密特性の寸法効果）

###### (1) 実験目的

網干・松田<sup>1)</sup>は，再構成粘土を用いた大規模な圧密試験結果から，層厚とともに一次圧密沈下量が增大するという実験結果を報告している。これは，層厚が大きくなるほど一次圧密沈下に要する時間が長くなり，一次圧密中に含まれる二次圧密量が大きくなることと理解される。また，圧密係数は層厚の増大とともに大きくなるという結果が得られているが，このメカニズムに対する明確な説明はなされていない。

高有機質土に関しても粘性土と同様な寸法効果が予想されるが，既往の研究成果でこれに言及した例は見られない。高有機質土地盤における圧密沈下量，沈下時間を精度良く把握するためには寸法効果の影響について検討する必要がある。このため，大型供試体を含む3種類の寸法で段階載荷圧密試験を実施して，供試体寸法が圧密特性に及ぼす影響を検討した。

###### (2) 実験方法

実験に使用した供試体の寸法は，大型径300mm，中型径150mm，標準径60mmの3種類とし，層厚はいずれも直径の1/3の相似形とした。ただし，径150mmと60mmに対する試験は，本装置と同じ機能を持たせた別の試験装置を用いた。圧密圧力は，荷重増加率を1として4.9kN/m<sup>2</sup>~627.6kN/m<sup>2</sup>間で段階的に載荷した。試験時の圧力制御は，載荷板全体に作用する圧密圧力 $p$ を

一定とした。ただし，同一の圧密度で寸法効果を評価するため，各段階の載荷時間はいずれも一次圧密終了とし，終了の判定は，曲線定規法によった。

###### (3) 実験結果と考察

各載荷段階における載荷板全体に作用する圧密圧力 $p$ （外部ロードセルの測定圧力）と内部ロードセルで測定したリング周面摩擦の影響を除いた供試体中心付近での圧力 $p'$ を，圧密圧力比 $p'/p$ ~圧密圧力 $p$ の関係で整理して図-4に示した。各試料とも，過圧密領域でばらつきが見られるが，正規圧密領域では $p'/p=0.85\sim 0.95$ の範囲に収束しており，平均的には10%程度の圧力が供試体に対して有効に作用していないことが確認された。これは，試験結果を沈下解析に適用する際に無視できない問題であると考えられる。そのため，以降の実験結果の検討では，周面摩擦の影響を考慮し，供試体に有効に作用した圧密圧力 $p'$ を用いた。

各供試体寸法での圧縮性を統一的に評価するため，圧縮ひずみ $\varepsilon$ と圧密圧力 $p'$ の関係を図-5に示す。 $\varepsilon$ ~

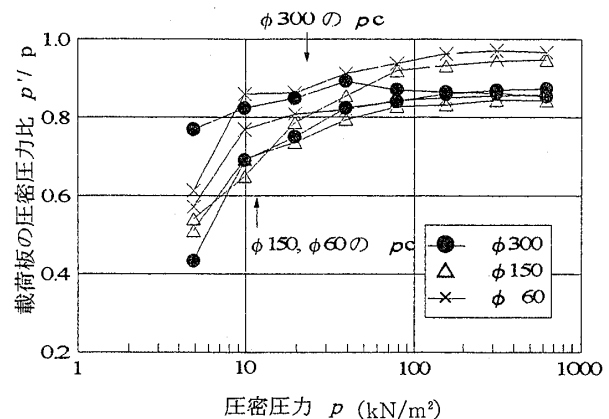


図-4 周面摩擦の影響

Fig. 4 Influence caused by friction of consolidation ring

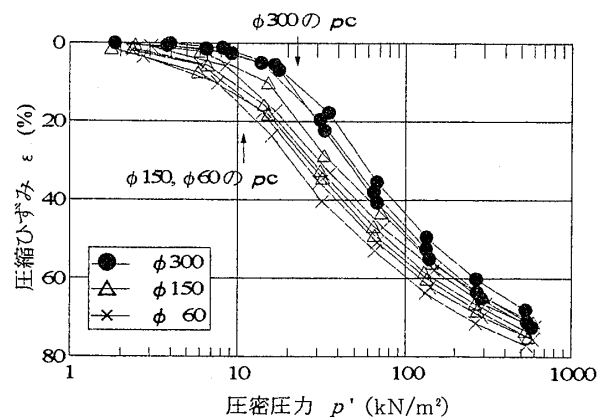


図-5 圧縮ひずみと圧密圧力の関係

Fig. 5 Relationship between accumulated settlement and consolidation pressure

$\log p'$  曲線は、径300mmが最も上位に位置し、その下に径150mmと径60mmが位置している。ただし、径150mmと径60mmの曲線形状は近似しており、両者に有意な差は見られない。また、過圧密領域における曲線勾配は、径150mmと径60mmの方が急勾配を呈し、かつ、300mmよりも低い圧密圧力で曲線の変曲点が見られる。そのため、圧縮ひずみが増大し、圧密降伏応力が低下している。一方、正規圧密領域では、径300mmが径150mm、径60mmの曲線に漸近する傾向が見られる。最終載荷圧力においては、径150mm、60mmと比較して、径300mmのひずみの方が5%程度小さな結果となった。

今回の実験結果は、層厚とともに一次圧密沈下量が増大するとする網干・松田<sup>1)</sup>の結果とは矛盾するものとなった。これは、対象とした高有機質土が非常に軟弱かつ不均質であることに起因し、サンプリング～押し出し～成形に至る過程で生じた乱れの影響が、径300mmよりも径150mm、径60mmの方が顕著であるためと考えられる。特に、成形時に発生する乱れの影響範囲（ベディングエラー）は、供試体の大小に関係なく同一であるため、大きな供試体ほど乱れの影響が相対的に小さくなると考えられる。河野<sup>2)</sup>は、高有機質土はサンプラーからの試料の押し出しや成形時に乱れの影響を受け易い性質があると指摘している。特に、供試体寸法が小さい場合には、この影響が顕在化し易く、原地盤の圧密特性を評価できる試験結果が得られていない可能性が高いと考えられる。したがって、高有機質土に対して、標準寸法である径60mm、高さ20mmでは、その圧縮性を的確に求めることは困難であると考えられる。

圧密係数 $C_v$ と平均圧密圧力 $\bar{p}'$ の関係を図-6に示す。 $C_v$ は、径300mmが最も上位に位置し、その下に径150

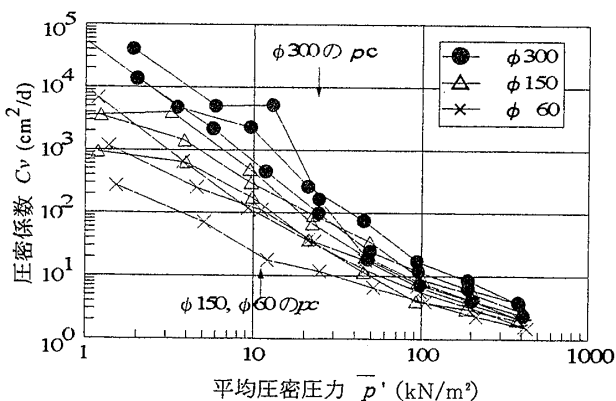


図-6 圧密係数と平均圧密圧力の関係

Fig. 6 Relationship between coefficient of consolidation and average consolidation pressure

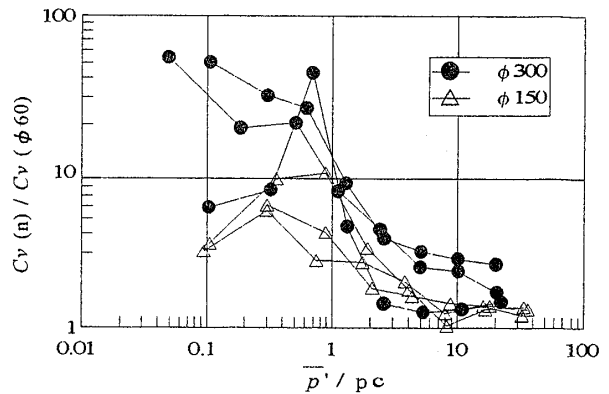


図-7 圧密係数比と正規化圧密圧力の関係

Fig. 7 Relationship between ratio of coefficient of consolidation and normalized consolidation pressure

mm、60mmが位置している。各供試体とも $C_v$ は、粘性土で見られるように正規圧密領域で一定値を示さずに、圧密圧力とともに直線的に低下する傾向が見られる。径60mm供試体を基準とした圧密係数 $C_v$ の比と、正規化圧密圧力 $\bar{p}'/p_c$ の関係を図-7に示す。これによると、 $C_v$ は供試体寸法に比例して大きくなる傾向が見られ、径300mmの $C_v$ は径60mmよりも、過圧密領域で約10～30倍、正規圧密領域で約2～3倍大きな値となっている。今回の実験結果は、前述の網干・松田<sup>1)</sup>による粘性土の圧密係数は層厚とともに大きくなるという結果と同様な傾向が認められ、沈下時間の算定に際しては供試体寸法を考慮する必要があることが指摘できる。

### 3. 2. 2 大型水平排水圧密試験(圧密係数の異方性)

#### (1) 実験目的

粘性土に関する鉛直および水平方向の圧密係数 $C_v$ 、 $C_h$ の異方性は、バーチカルドレーン工法の有効性の観点から数多く議論されている。例えば、水上ら<sup>3)</sup>によると、均一で様な海底沖積地盤においては、水平方向圧密係数 $C_h$ は鉛直方向圧密係数 $C_v$ の概ね1.5～2.0倍であり、透水異方性がさほど顕著ではないとしている。一方、北海道泥炭を対象とした佐々木ら<sup>4)</sup>、大平<sup>5)</sup>、木暮ら<sup>6)</sup>の研究では、不攪乱状態の透水係数を室内あるいは現場透水試験で求めた結果から、鉛直と水平の透水異方性は概ね $k_h/k_v = 2 \sim 6$ であると報告している。しかし、その異方性について圧密圧力との関連性について議論するには至っていない。

今回用いた高有機質土は、近畿圏に分布する高有機質土であるが、自然含水比、圧縮性等が大きいという点では北海道泥炭と類似している。ただし、気温等に起因する堆積環境が異なるため分解が進んでおり、北海道泥炭ほど明瞭な繊維が残っておらず、いわゆる「味噌泥炭状」

を呈している。

実験では、高有機質土における圧密係数の異方性を圧密圧力依存性の観点から検討するため、水平排水圧密試験（二次元放射排水）を実施した。

(2) 実験方法

供試体は、乱れの影響が小さい大型供試体（径300mm、高さ100mm）を用いた。試験装置は、図-1に示した特殊大型圧密試験装置を用い、圧密リングは図-3に示す透水性の圧密リングを用いた。また、圧密圧力、圧密時間等に関する条件は前述の「段階載荷圧密試験」と同じとした。

(3) 実験結果と考察

図-8は、排水条件の異なる試料の  $\epsilon \sim \log p'$  曲線を比較したものである。各曲線の形状はいずれも近似した形状を示し、排水条件に起因すると思われる差異は認められない。また、 $p_c$  や  $C_c$  にも差異はみられない。

図-9には、鉛直方向と水平方向の圧密係数 ( $C_v$ ,  $C_h$ ) と平均圧密圧力  $\bar{p}'$  の関係を示している。ただし、 $C_h$  は曲線定規法により求め、算定式は二次元放射流を

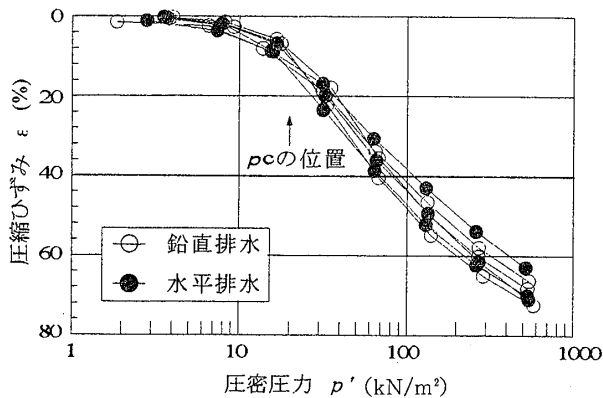


図-8  $\epsilon \sim \log p'$  曲線の比較  
Fig.8 Comparison of  $\epsilon - \log p'$  curve

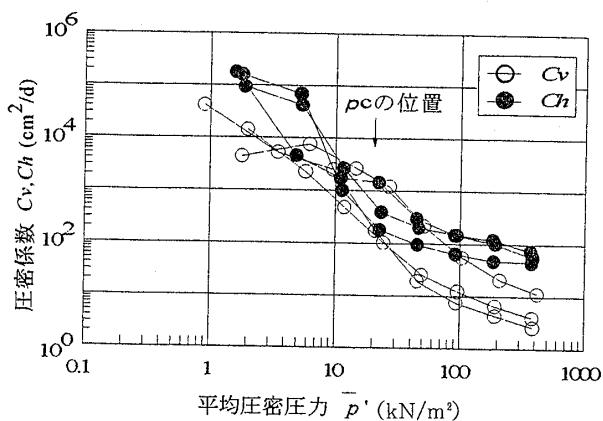


図-9 圧密係数の比較  
Fig.9 Comparison of coefficient of consolidation

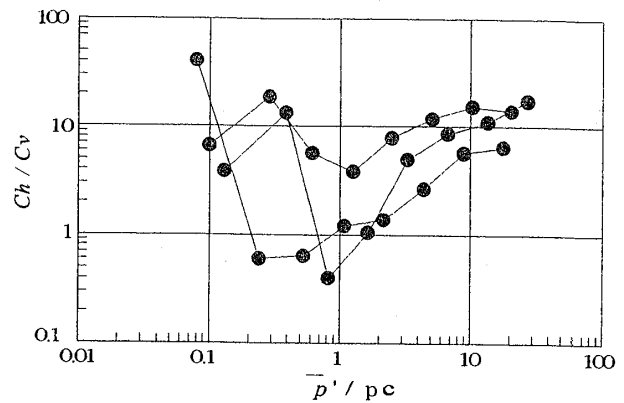


図-10 圧密係数の異方性  
Fig.10 Anisotropy of coefficient of consolidation

満たす  $C_h = 0.0665 \cdot R^2 / t_{50}$  ( $R$ : 供試体半径) を用いた<sup>7)</sup>。  $C_v$  は、前述のとおり正規圧密領域においても一定値を示さずに、 $\bar{p}'$  とともに低下する傾向を示すが、 $C_h$  は  $p_c$  付近を境界として曲線勾配が緩やかになり一定値に収束する傾向が見られる。このため、 $C_h$  は  $C_v$  よりも高い値を示し、その差は  $\bar{p}'$  とともに大きくなっている。ただし、過圧密領域では両者の関係が不明瞭である。 $C_v$  と  $C_h$  の比と正規化圧密圧力の関係を図-10に示す。正規圧密領域の  $C_h/C_v$  は、 $\bar{p}'/p_c$  に比例して増大する傾向が見られる。 $C_h$  は  $C_v$  の概ね 2~20倍を示し、平均的には  $C_h = 5 C_v$  程度となっている。

今回の結果から、本地区の高有機質土についても北海道泥炭と同様な顕著な異方性があることが確認された。また、正規圧密領域については、圧密圧力の増大とともに透水異方性が顕著になることが判明した。この理由は明確ではないが、高有機質土を構成する繊維の構造が水平方向に卓越していること、水平方向に並んだ繊維質内部のマイクロポアが高い圧力でも一定限界以上につぶされずに残っている可能性がある。本結果をもとに、高有機質土の沈下時間を正確に予測する場合には、圧密係数の圧密圧力依存性、および、異方性を適切に評価し、解析に取り込む必要がある。

4 おわりに

今回開発した特殊大型圧密試験装置は、大型供試体（径300mm、高さ100mm）での試験が可能であることに加え、圧密リングの周面摩擦の影響を考慮した正確な圧密圧力の測定や、水平方向の圧密係数の評価が可能である。本装置の有効性を確認するため、非常に不均質な高有機質土を対象に各種圧密試験を実施した。その結果は以下のようにまとめられ、今後、高有機質土の圧密沈下を考える際の大変有効な知見を得ることができた。

### (1) 圧密リング周面摩擦の影響

圧密リングの周面摩擦を測定すると、正規圧密領域において圧密圧力の10%程度が供試体に有効に作用していないことが明らかとなった。これは、試験結果を沈下解析に適用する際に無視できない問題である。

### (2) 供試体の寸法効果

段階载荷圧密試験結果から、径300mmは径150mm、径60mmと比較すると乱れや不均質性の影響が小さく、 $\varepsilon \sim \log p'$  曲線が全体に上方に位置し、相対的に圧縮性が小さく、圧密降伏応力が大きい結果となっている。

圧密係数は、粘性土地盤で従来いわれているような寸法効果（圧密係数は層厚とともに増大する）が確認された。本地区の high organic soil の正規圧密領域における圧密係数は、径300mmが径60mmの約2～3倍であった。

### (3) 圧密係数の異方性

水平排水圧密試験結果から、水平方向圧密係数 $C_h$ は、 $p_c$ 付近を境界として曲線勾配が緩やかになり一定値に収束する傾向が確認された。一方、鉛直方向圧密係数 $C_v$ は、正規圧密領域においても一定値を示さずに $p'$ とともに低下する傾向を示した。両者を比較すると、 $C_h$ は $C_v$ よりも高い値を示し、その差は $\bar{p}'$ とともに大きくなる。 $C_h$ は $C_v$ の2～20倍の範囲で変化し、平均的には $C_h = 5 C_v$ 程度であった。

## 謝 辞

本研究の実施にあたり、大阪ガス株式会社 技術部 岡井大八氏には、試験装置の開発の機会を与えていただくとともに、実験の全般にわたり貴重な御意見を賜りました。ここに記して、感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 網干寿夫・松田博(1981): 粘土の二次圧密と沈下解析, 土と基礎, Vol. 29, No.3, pp.19-24.
- 2) 河野英一(1993): 室内圧密試験および試験結果の整理上の問題点, 高有機質土の諸問題に関するシンポジウム, 土質工学会, pp.6-9.
- 3) 水上純一・小林正樹・土田孝(1996): 粘性土の水平方向圧密係数, 土木学会論文集, No.535/Ⅲ-34, pp.1-12.
- 4) 佐々木晴美・能登繁幸・木元喬之(1977): 泥炭の工学的性質の特異性に関する考察, 有機質土に関するシンポジウム, 土質工学会, pp.21-24.
- 5) 大平至徳(1971): 泥炭, 基本的性質と調査・設計, 施工技術, 4巻, 6号, pp.148-164.
- 6) K. Kogure, H. Yamaguchi, Y. Ohira and H.

Ishioroshi (1986): Physical and engineering properties of a peat ground, Procs. of advances in Peatland Engineering, NRCC, pp.95-100.

- 7) 赤木俊允(1985): 粘土の水平方向圧密係数, 第25回土質工学研究発表会講演集, pp.341-342.





**柱状図凡例**

① 崩層	④ 煎断帯-1	⑦ 煎断帯-4	⑩ 引上げ剥れ目
② 武蔵野層成層	⑤ 煎断帯-2	⑧ フォルム岩	⑪ 煎断帯-5
③ 秩父層成層	⑥ 煎断帯-3	⑨ やや幅広いフォルム岩	
④ 花崗岩		⑩ 煎断帯-6	
⑤ ベグマタイト		⑪ フォルム岩	
⑥ 塩基性岩層成層		⑫ やや幅広いフォルム岩	
⑦ 石英結晶岩			
⑧ 変質岩層			

◎ 主要造岩鉱物  
 Kfs: カリ長石    Qtz: 石英    Cld: 方解石  
 Pl: 斜長石    Ms: 黒雲母    An: 方解石  
 Bt: 黒雲母    Al: 十字石    And: 斜長石  
 Gr: 石榴石    Sp: 重晶石    Qz: 石英  
 Orl: 石炭    Cr: 重晶石    Ves: ベスズ石  
 鉱: 磁石    T: 珪酸塩類    +++: 非常に多い, ++: 多い, +: 普通, -: 少量  
 ○: 不明換算(種) ++: 多い, +: 少ない

No. 1 ボーリングの基盤岩類の地質柱状図  
 Geological columnar section of No. 1 boring of the basement rocks.



