

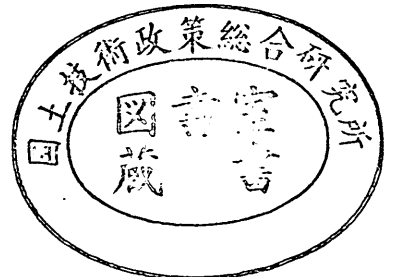
運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 30 NO. 2(1) JUNE 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第30巻 第2号 (Vol. 30, No. 2) 1991年6月 (June, 1991)

目 次 (CONTENTS)

1. Investigation of Cross-shore Sediment Transport Rates and Flow Parameters
in the Surf Zone using Field Data Yoshiaki KURIYAMA 13
(現地データによる砕波帯内の岸沖漂砂量と流速特性の検討
..... 栗山 善昭)
2. 避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動に関する検討
..... 平石 哲也・本城 智 59
(Characteristics of the motion and tension of a ferry moored in a storm
..... Tetsuya HIRAISHI and Satoshi HONJO)
3. 離散渦法による構造物周りの流れシミュレーション
..... 細川 恭史・古川 恵太 155
(Modeling of Discrete Vortices Induced by an Inclined Flat Plate
Yasushi HOSOKAWA and Keita FURUKAWA)
4. プラスティックボードドレーンで改良された不均一地盤の沈下特性
..... 田中 洋行・太田 一己・丸山 隆英 211
(Performance of Vertical Drains for Soft and Ununiform Soils
..... Hiroyuki TANAKA, Kazumi OHTA and Takahide MARUYAMA)
5. 杭の横抵抗における捨石層の評価
..... 高橋 邦夫・壹岐 幸史 229
(Lateral Resistance of a Pile in Rubble Mound
..... Kunio TAKAHASHI and Yukifumi IKKI)
6. サンドドレーンの効果に関する有限要素解析
..... 小林 正樹 275
(Finite Element Analysis of the Effectiveness of Sand Drains
..... Masaki KOBAYASHI)
7. 接円式深層混合処理地盤の挙動
..... 北誥 昌樹・中村 健・寺師 昌明 305
(Reliability of Clay Ground Improved by the Group Column Type DMM with
High Replacement)
..... Masaki KITAZUME, Takeshi NAKAMURA and Masaaki TERASHI)

8. 斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗	寺師 昌明・北誥 昌樹	327
(Influence of a slope on the Lateral Resistance of a Long Pile	Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)	
9. 液状化による矢板岸壁の変形の数値解析	井合 進・亀岡 知弘	349
(Analysis of Deformation in Sheet Pile Quaywall due to Liquefaction	Susumu IAI and Tomohiro KAMEOKA)	
10. 盛土の地震被災事例に基づく円形すべり安定解析手法の検討	上部 達生・長田 信	381
(Circular Arc Analysis of Earthquake Damage of Embankments on Saturated Sand Layers	Tatsuo UWABE and Makoto OSADA)	
11. ねじりを受ける長大ケーソンの力学特性	清宮 理・山田 昌郎	445
(Mechanical Properties of Long Caisson Subjected to Torsion	Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA)	
12. 歩行式水中調査ロボットの開発		
— (第2報) 軽量防水型実験機の設計 —	朝倉 修・秋園 純一・岩崎 峯夫・根本 孝志	483
(Development on Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection	— (Second Report) Design of the Light-weight Type Aquatic Walking Robot —	
Osamu ASAKURA, Jun-ichi AKIZONO, Mineo IWASAKI	and Takashi NEMOTO)	
13. 水平管における空気混入軟泥の流動特性	岡山 義邦・鮎貝 基和・鈴木 誠・福本 裕哉	533
(Fluidity Characteristics of Muddy Slurry with Compressed Air in	Horizontal Pipe	
Yoshikuni OKAYAMA, Motokazu AYUGAI, Makoto SUZUKI	and Hiroya FUKUMOTO)	

プラスチックボードドレーンで 改良された不均一地盤の沈下特性

田 中 洋 行^{*}
太 田 一 己^{**}
丸 山 隆 英^{***}

要 旨

本報告は、東京国際空港沖合展開工事で実施されたプラスチックボードドレーンによる改良工事で得られた沈下データをもとに、軟弱な粘性土で埋め立てられた不均一地盤の沈下特性について述べたものである。解析は一次圧密の沈下速度と、二次圧密によって生じる沈下について重点的に実施した。

主要な結論は次の通りである。

- ① 沈下から逆算された圧密速度はドレーンピッチによって影響されるが、その原因として対象土層に含まれる砂層の存在が考えられる。
- ② 今回のドレーン長の最大は17mであるが、この範囲内ではウェルレジスタンスによる圧密の遅れは観測されなかった。
- ③ 二次圧密による沈下速度は一次圧密沈下量に比例する。この関係を用いれば不均一地盤の二次圧密沈下を精度よく推定できる。

キーワード：圧密、バーチカドレーン、沈下、二次圧密

^{*} 土質部 地盤調査研究室長
^{**} 第二港湾建設局 東京空港工事事務所 第三工事課長
^{***} 第二港湾建設局 横浜調査設計事務所 建設専門官

Performance of Vertical Drains for Soft and Ununiform Soils

Hiroyuki TANAKA^{*}
Kazumi OHTA^{**}
Takahide MARUYAMA^{***}

Synopsis

In Japan recently the coastal area is often reclaimed by soft clayey soil due to difficulty in obtaining sand or deposition of dredged soil. A large variety in properties of reclaimed soil bothers geotechnical engineers in decision of their design values.

A large amount of vertical drains was installed to reduce settlement at the offshore expansion project of the Tokyo International Airport. The paper describes the performance of vertical drains on ground reclaimed by soft soil, analyzing data obtained at this project.

Key Words : consolidation, vertical drain, settlement, secondary consolidation

^{*} Chief of Geotechnical Survey Laboratory, Geotechnical Engineering Division.
^{**} Member of Tokyo Airport Construction Office, the Second District Port Construction Bureau.
^{***} Member of Yokohama Investigation and design Office, the Second District Port Construction Bureau.

目 次

要 旨	211
1. ま え が き	215
2. 調査地点の概要	215
2. 1 地盤の概要	215
2. 2 AC ₁ 層の土質特性	215
2. 3 ドレーンの打設と沈下の計測方法	217
3. 計 測 結 果	218
3. 1 今回の沈下データの特徴と整理方法	218
3. 2 一次圧密における沈下速度	220
3. 3 二次圧密による沈下速度	224
4. ま と め	226
参 考 文 献	226
記号一覧表	227

1. まえがき

良質な埋立土砂の不足、あるいは航路浚渫によって生じたへどろや産業廃棄物を処分するために、軟弱な粘性土で埋立をするケースが増大している。このようにして造成された土地を有効に利用するために、残留沈下量の低減を目的としたパーティカルドレーンを施す場合が多い。しかしながら、自然に堆積した地盤とは異なり、軟弱粘性土で人工的に埋め立てられた地盤の土の定数、特に圧密定数のばらつきは非常に大きい。このため、ドレーンの設計に当たっては、土の設計定数をいくらに設定したらよいか、頭を悩ますことが多い。

海上工事ではパーティカルドレーン工法として、地中に砂杭を形成するサンドドレーンが多く採用されてきた。一方、陸上の工事では、施工機械が軽量であるとの理由から、プラスチックボードドレーン工法が多く使われている。この工法は開発当初にドレーンの材料として紙を用いたため、砂を用いるサンドドレーンに対して、ペーパードレーンと呼ばれていた。しかし、化学産業の発達によって、石油から作られた耐久性の高い製品がドレーン材料として使われるようになってきた。このため、工法の名前もプラスチックボードドレーン、単にボードドレーン、あるいは現在ではドレーン材料として紙は用いられてはいないがペーパードレーン工法の名称も、しばしば使われている。外国の文献においても、band drain, prefabricated band drain とか呼ばれている¹⁾。本論文では、現段階で比較的多くの人々に使われている名称であるプラスチックボードドレーンを用いることにする。

現在用いられているプラスチックボードドレーンは、材料のメーカーによって多少異なるが、幅10cm、厚さ3から5mm程度の矩形の断面を有している。サンドドレーン工法は港湾工事において使用実績が多く、その設計法は理論的あるいは経験的にみても、かなり精度が高いと考えられる。一方、プラスチックボードドレーン工法の設計で問題となるのは、その断面が矩形であることからドレーンの等価径、あるいはその断面積が小さいことからウェルレジスタンスをどう評価したらよいか、である。また、サンドドレーンも含めて、スミヤーと呼ばれるドレーン打設時の乱れによる周辺地盤の透水係数の低下をどう評価するかについては、未解決なのが現状である。また、一次圧密終了後に長期間持続する二次圧密沈下についても不明な点が多い。

現在、運輸省が進めている東京国際(羽田)空港沖合展開事業の新A滑走路の建設を目的とした第一期工事

では、残留沈下量の低減のために総延長7,000kmにも及ぶプラスチックボードドレーンが打設された。改良の対象となった土層は、航路浚渫によって生じた土砂、あるいは下水処理場から発生した汚泥を捨て込んで作られたため、圧密定数のばらつきが非常に大きい。本報告は当地区で観測された沈下データを用いて、プラスチックボードドレーンで改良された不均一地盤の沈下特性を明らかにするものである。なお、本報告の内容の一部は、すでに文献^{2), 3), 4)}で発表されている。

2. 調査地点の概要

2.1 地盤の概要

東京国際空港沖合展開地区の地盤は、東京都が廃棄物処分場として、図-1に示す埋立過程を経て形成された。すなわち、以前は海面近くまで多摩川によって運ばれた砂が堆積していた(AS層)のが、昭和40年代に埋立材料として掘削され、その後を東京湾の航路浚渫あるいは下水処理場で生じた汚泥を捨て込み(AC₁層)、さらにその上を建設残土によって覆土(BS層)して造成された地盤である。このため、BS層、AC₁層、AS層の境界は複雑に入り組み、またAC₁層の土質特性も非常にばらついている。第一期工事では、このAC₁層を対象としてドレーン工法が施工された。

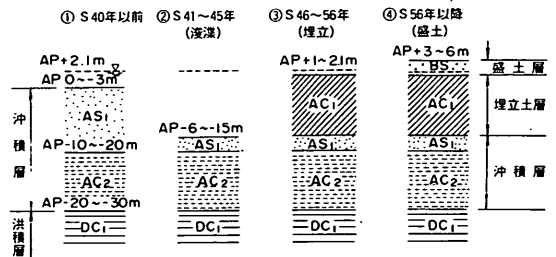


図-1 羽田沖展地区の地盤の形成過程

AS層の下にはAC₂層と呼ばれる沖積粘性土が20m程度堆積しており、さらにその下には洪積粘性土(DC)層があり、工学的に基盤とみなすことができるN値が50以上の層は深いところでAP(荒川水量標)-65mもの深度にある。当地区でBS層を盛る前に実施された土質調査試験の結果の一例を図-2に示す。

2.2 AC₁層の土質特性

ドレーン工法の対象となったAC₁層は、すでに述べたように極めて軟弱な土を捨て込んで作られた人工的な土層なので、その土質特性のばらつきは非常に大きい。

図-3にAC₁層の塑性図を示すが、液性限界 w_L は

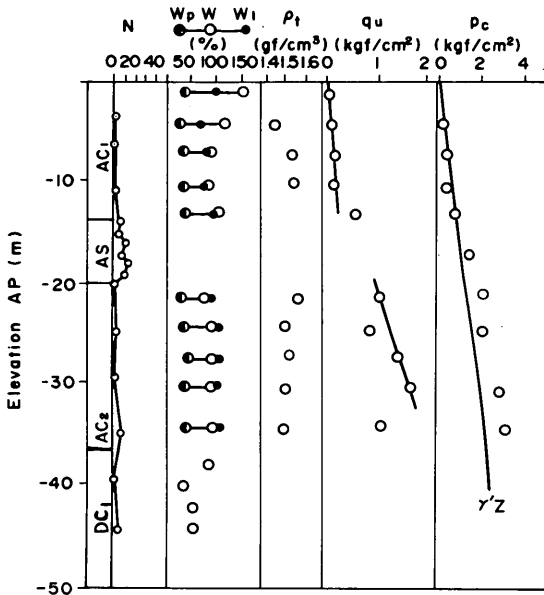


図-2 土質試験結果の一例

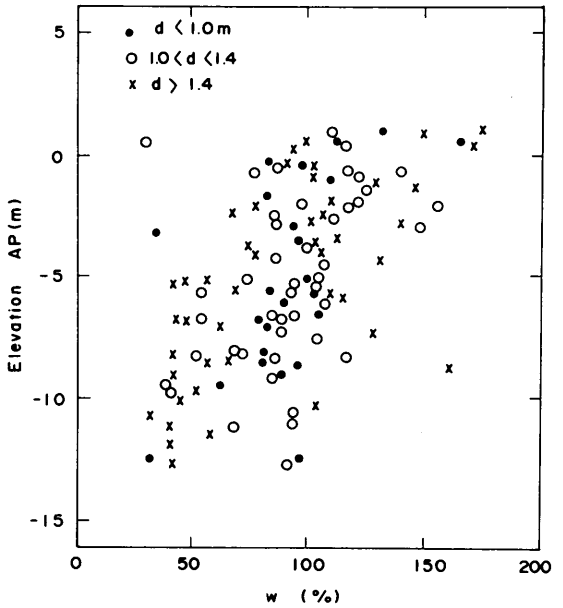


図-4 AC₁層の含水比の分布

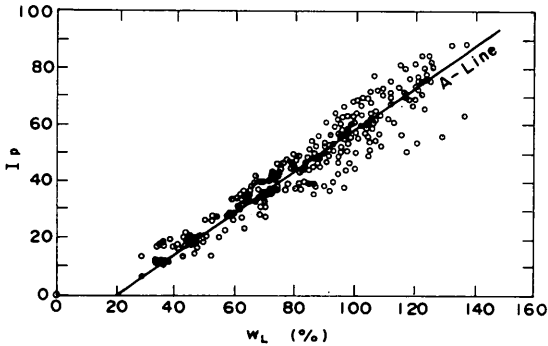


図-3 AC₁層の塑性図

35%から140%まで広く分布している。しかし、我国の港湾区域の粘性土と同様に、AC₁層のコンシステンシー特性はA線に集中している。自然含水比、 w の深度方向の分布を図-4示すが、 w もまた非常にばらついており、しかもかなり高含水比である。図はドレーンピッチ d が異なる工区ごとに記号を区別している。

圧密特性を図-5から図-7に示す。図-5から土の圧縮性を表わす $C_c/(1+e_0)$ (C_c : 圧縮指数, e_0 : 初期間隙比) は、0.2から0.3の範囲に多く分布している。図-6は圧密降伏応力 p_c と有効土被り圧 γz (γ : 土の水中単位体積重量, z : 深さ) の関係を表わしたものである。図から p_c が γz と一致している試料と、 γz より

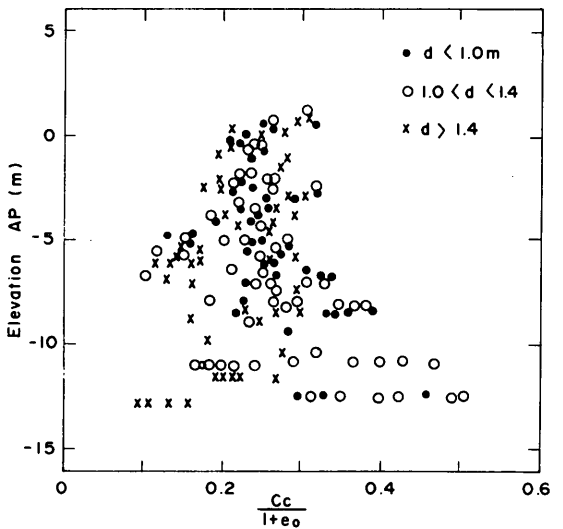


図-5 AC₁層の圧縮性の分布

かなり小さな試料があるのがわかる。これは、へどろを捨て込んだ時期、BS層を盛った時期の違い、あるいはAC₁層に含まれる砂層の有無によって圧密の進行が異なるために、図に示すように p_c の値がばらつくものと

プラスチックボードドレーンで改良された不均一地盤の沈下特性

推測される。図-7は圧密係数 c_v を示すが、 c_v は対数としてプロットされているにもかかわらず、ばらつきはかなり大きい。

2.3 ドレーンの打設と沈下の計測方法

経済性、施工性の観点から、第一期工事地区ではドレーン

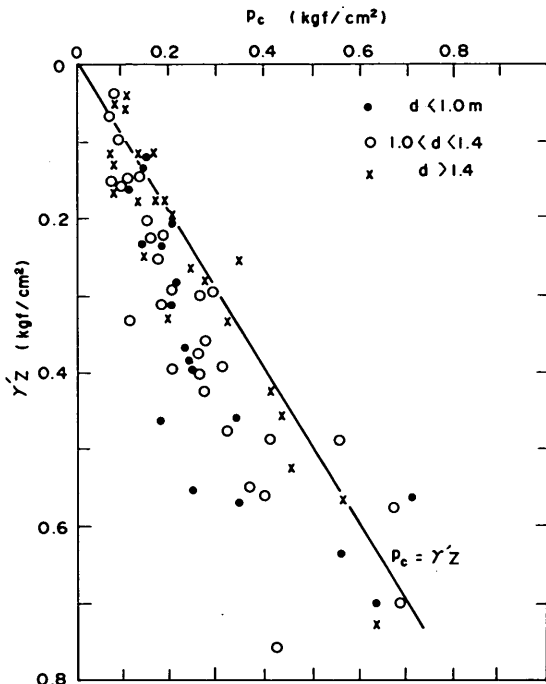


図-6 AC₁層の圧密降伏応力

材としてプラスチックボードドレーンが採用された。改良場所は図-8に示す第一期工事地区のうち、新A滑走路、誘導路および排水工の基礎とこれらの影響範囲である。ドレーンピッチはドレーン打設後の放置期間によって、0.76mから2.0mとした。

ドレーン打設の施工手順は以下の通りである(図-9参照)。

- ①建設残土を計画地盤高さ (AP+5.5m) まで盛り

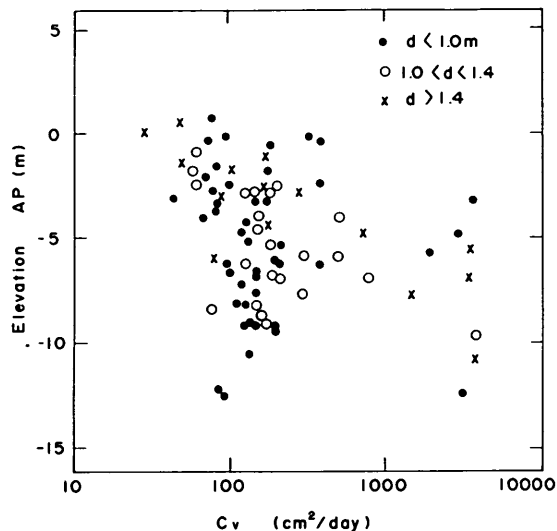


図-7 AC₁層の圧密係数の分布

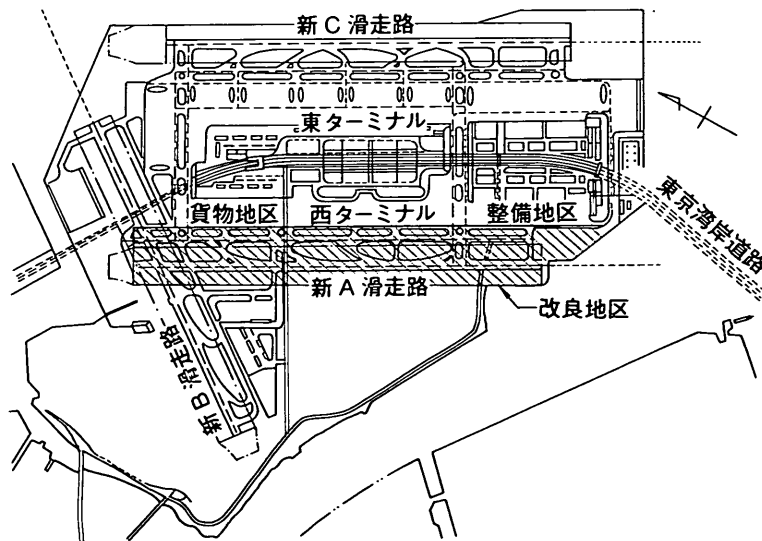


図-8 第一期の工事地区

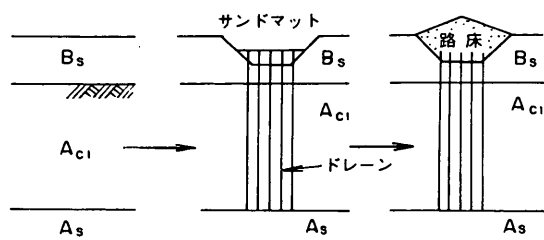


図-9 ドレーンの打設順序

上げる。

- ②滑走路，誘導路の路床工のための掘削。
- ③パーティカルドレーンのための敷砂（排水層）をかねた路床工の施工。
- ④AS層までドレーンを打設。
- ⑤打設後，直ちに路盤と舗装体に等しい荷重を載荷。
- ⑥舗装の施工まで放置。

今回の工事で用いたプラスチックボードドレーンは4種類で，その詳細については4.2で述べる。ドレーンの打設方法はマンドレルを有する displacement（押し）方式である。マンドレルの形状は使用するドレーンの材質によって異なっており，断面が円，正方形，矩形形状のものを使用した。

ドレーン施工後，直ちに沈下の計測に入った。沈下の計測は，改良層である AC₁層の下にも AC₂層の軟弱層があるので，層別に行った。計測方法は，各層ごとにボーリング孔を設け，孔壁を塩ビ管で保護した後，先端にスクリーを有する鉄棒を目的の地層に固定し，経時的な沈下をレベルによって計測した。

3. 計測結果

3.1 今回の沈下データの特徴と整理方法

現在までに，数多くの現場で沈下が計測されてきたが，本報告で取り上げるデータは，土質力学的にみて以下の特徴がある。

- ① 改良の対象となった地盤は埋め立てられて間もない若齢粘性土であり，しかもその土質特性には大きなばらつきがある。
- ② 河川堤防や道路の盛土の場合では，載荷幅が有限であるため，圧密現象が二次元であるのに加えて，観測される沈下には側方流動に見られるようなせん断変形も含まれる。しかし，今回のデータは施工深度に比べて幅が十分に広いので，圧密現象を一次的に捕えて問題はない。
- ③ ドレーンを施工した後に盛土を行う場合には，強度

増加を期待するため，載荷は段階的に実施するのが普通である。このような現場で得られた沈下データは，この段階載荷の影響を考慮する必要がある。しかし，当現場では前章の施工方法で述べたように，盛土を行ってから地盤改良を実施したため，圧密荷重が一定の条件下で沈下データが得られている（厳密に言えば沈下により圧密荷重が減少するが，その量は小さい）。

- ④ これまでに計測された沈下データでは，圧密が終了するまで計測した例が少ない。このため，双曲線法などによって最終沈下量を求めて，この沈下量から測定時の圧密度を推定する場合が多い。しかし，ここで取り扱うデータは，ほとんどの計測地点で一次圧密が終了するまで計測を行った。

羽田沖展地区では AC₁層の捨て込み，BS層の盛立てまで東京都サービス公社が実施している。このため，圧密の解析に必要なこれら土層の形成時期，およびドレーンの打設時までの沈下等の詳細な情報は入手できなかったため，今回の報告では絶対沈下量よりも沈下速度に重点を置いて話を進める。

BS層の盛立てからドレーン打設までに，かなりの日数が経過している場所では，AC₁層の圧密は相当進んでいると思われる。また，AC₁層に砂層等の排水性の良い層があると，この付近の場所の圧密は進んでおり，従ってドレーン打設時の過剰間隙水圧の分布は，深度方向に対してかなり不均一と考えられる。しかし，ドレーン打設後の過剰間隙水圧の流れは，鉛直方向から水平方向に変わるので，ドレーン材を中心とした半径方向に対する初期の過剰間隙水圧の分布は一定とみなすことができる。このため，深さによって過剰間隙水圧の値は異なるが，圧密開始時間をドレーン打設時とした場合の沈下曲線は，ドレーンによる圧密現象を表わしているものと考えられる。

図-10に経過時間を対数とした沈下曲線の代表例を示す。標準圧密試験から得られる沈下曲線と同様に，ドレーン打設後の沈下も対数時間に対して，S字形カーブを描く。圧密現象を残留沈下の低減の観点から捕らえると，一次圧密速度と長年に渡って継続する二次圧密沈下が重要となる。本報告はこの2つの特性について議論を進めることにする。

プラスチックボードドレーンはその断面の形状が矩形であるため，サンドドレーンで用いられている圧密計算式を適用するためには，プラスチックボードドレーンの断面を等価な円柱に置き換える必要がある。その方法の一つとして，ドレーンの周長に着目しプラスチックボードドレーンの幅の2倍の20cmを π で除して，直

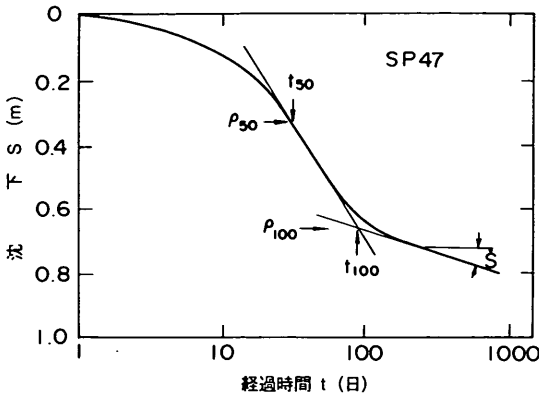


図-10 観測された沈下曲線

径が6.4cmの円柱のサンドドレーンと等価とする考え方があり、現在では、プラスチックボードドレーンは幅が小さいので、上記の考え方を多少割り引いて5cmとする方法が経験的に用いられるようである。

プラスチックボードドレーンに対して、この等価径、 d_w をいくらに設定したらよいかを検討するために、Biotの圧密理論に基づく有限要素法⁵⁾による解析を行った。今回のドレーンの打設パターンは図-11に示すように正方形配置である。この場合の一本のドレーンが支配する径、 d_e は同じ排水面積となるような円の直径を決めているのが普通で、ドレーンピッチを d とすると、(1)式で表わすことができる。

$$d_e = 1.13d \quad (1)$$

ドレーンピッチが1.0mのFEMの場合の結果を図-12に示す。図には(1)式から求められた d_e のもとで、 d_w を3, 5, 7cmとして、(2)式のBarronの近似解から求めた結果も示している。

$$U(T_h) = 1 - \exp(-8T_h/F(n)) \quad (2)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \log_e n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$$n = \frac{d_e}{d_w}$$

ここに T_h は時間係数であり、(3)式で表わすことができる。

$$T_h = \frac{c_v t}{d_w^2} \quad (3)$$

ここに c_v は圧密係数、 t は経過時間である。FEMで計算された矩形断面を有するドレーンの圧密

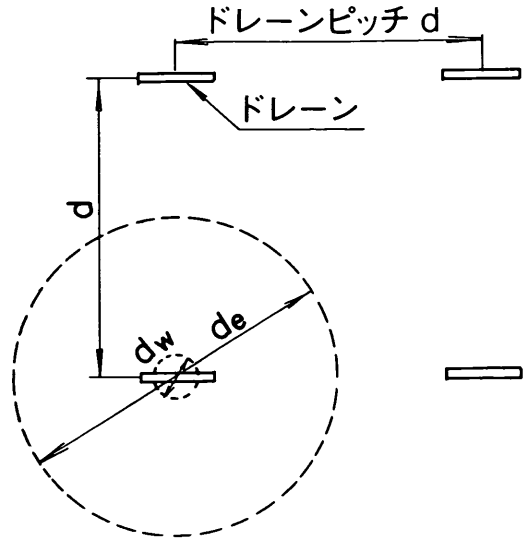


図-11 プラスチックボードドレーンの d_e と d_w

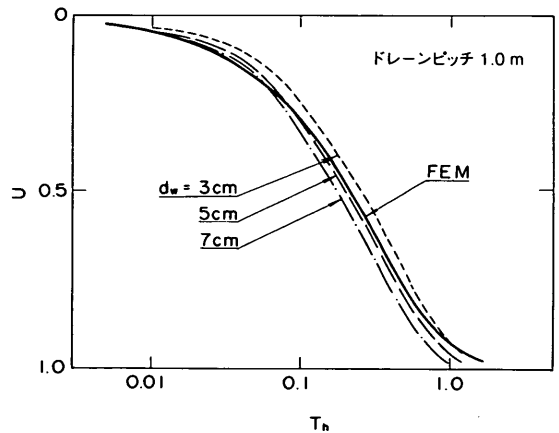


図-12 FEMによるドレーンの等価径の検討

計算結果を見てみると、図に示すように圧密の初期を除いて、ほぼ $d_w = 5$ cmの曲線とほぼ一致している。Barronの近似解は圧密初期の時点で厳密解より圧密が速く計算される⁶⁾ことを考えあわせると、プラスチックボードドレーンの等価径は、経験的に用いられている5cmとして問題がないと思われる。本報告においては、 d_w を5cmとして以降の解析を行う。

ドレーンで改良された地盤の圧密速度を考える上で、基準となる時間を求めるために、次の2つの方法を考えた(図-10参照)。第一の方法は標準圧密試験の圧密係数を求める $\log t$ 法の整理と同様に、時間の対数に対して直線となる部分を二次圧密と考え、一次圧密から

二次圧密に移行する時間を t_{100} とし、その時点の沈下量を ρ_{100} とする。そして、 ρ_{100} の 1/2 の沈下量、 ρ_{50} に対応する時間を t_{50} とし、これを圧密が 50% 進んだときの時間と考える。第二の方法は、現場の沈下管理は双曲線法で行われることが多いことを考慮して、最終沈下量を双曲線法で求め、この沈下量に対して 50% となる時の時間を t'_{50} 、75% の時間を t'_{75} と定義する。

このように定義された圧密時間を用いて、Barron の圧密の式より、等価径を 5 cm として改良地盤の c_v を逆算してみたのが、図-13 である。図において c_v は $\log t$ 法による t_{50} から、 $c_v'_{50}$ 、 $c_v'_{75}$ は双曲線法による t'_{50} あるいは t'_{75} から求めた値である。図から c_v は $c_v'_{50}$ より 1.3 倍程度大きくなるようである。これは、双曲線法では一次圧密に続く二次圧密も含めて最終沈下量を予測するため、 t'_{50} が t_{50} より大きくなるためである。しかし、両者の違いは 1.3 倍程度であり、圧密試験から求められる c_v のばらつきと比較すると、その差は小さいといえる。すなわち、圧密度が 50% となる時間を用いる限り、手法の違いによる c_v の変化は小さいと判断できる。しかし、双曲線法による t'_{75} から求めた $c_v'_{75}$ の値はかなり小さくなり、またばらつきも大きくなる。なお、以下に示す解析では、 c_v は $\log t$ 法による t_{50} から求められた値とする。

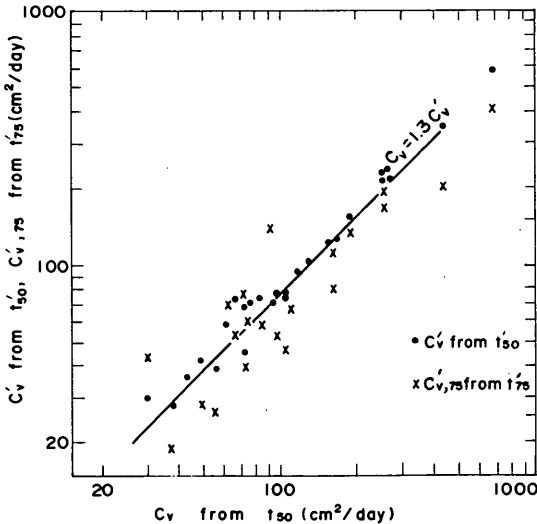


図-13 計算手法の違いによる改良地盤の c_v の値

3. 2 一次圧密における沈下速度

(1) ドレーン長による影響

プラスチックボードドレーンはサンドドレーンと比べて断面積小さいので、ドレーン長の増大に伴う圧密の遅れ、すなわちウェルレジスタンス (well resistance) の影響と、当地区は地盤が非常に軟弱なために地盤の沈下につれてドレーンの折れることによって生じる通水性の低下が心配された。

図-14に AC_1 層の厚さ、すなわちドレーン長と圧密沈下から逆算された c_v の関係を示す。図からドレーン長の増大によって c_v の低下は認められず、今回の工事ではウェルレジスタンスによる圧密の遅れは生じてはいないと判断される。プラスチックボードドレーンの鉛直方向に対する透水係数は、嘉門⁷⁾が室内試験によって計測しており、換算透水係数 k_e はプラスチックボードドレーンの材質によって変わるが、その値は 0.3 から 1.0 cm/sec と報告されている。吉国・中ノ堂⁸⁾はウェルレジスタンスによる圧密遅れを表す係数として示すウェルレジスタンス係数 L を提案した。粘性土の透水係数を 1.0×10^{-7} cm/sec として、またドレーン長さを 20 m として求めてみると、 $L = 0.04$ から 0.16 程度となる。この値から判断しても、今回の工事でのウェルレジスタンスによる影響は小さいと考えられる。

(2) ドレーンピッチの影響

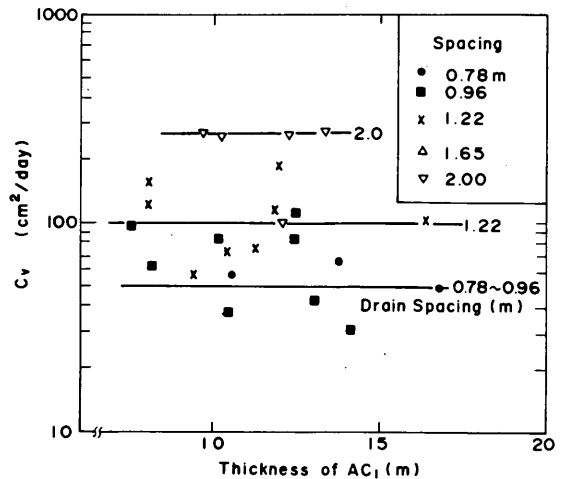


図-14 ドレーン長と c_v の関係

図-14に示すように、ドレーンの長さによる圧密速度に及ぼす影響は認められないが、ドレーンピッチが狭くなると沈下から逆算された圧密係数が小さくなる。図-14をドレーンピッチによって整理してみると図-15とな

り、明らかにドレーンピッチによって圧密速度が影響される。

今回の工事で用いたプラスチックボードドレーンは

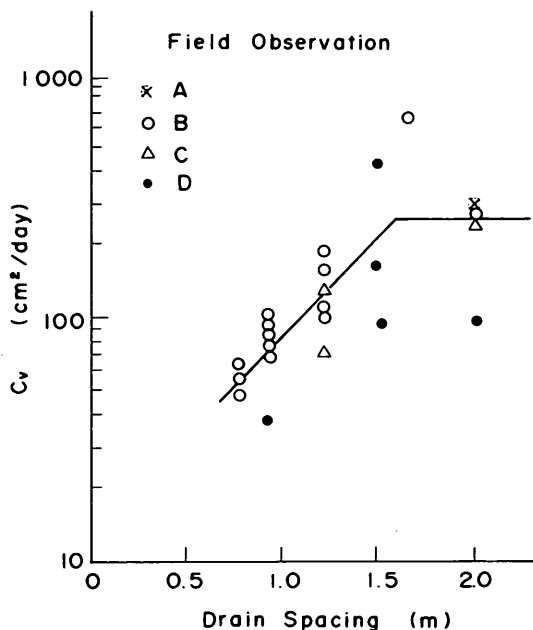


図-15 ドレーンピッチと改良地盤の c_v

4種類で、図-15に示す B, C, D タイプは化学樹脂のコアを有した不織布のフィルター材からなるタイプであり、タイプによってコアの形状が異なる。A タイプはコアを有しない不織布だけからなるドレーン材である。第一期工事で用いたドレーン材は B タイプがほとんどであったため、ドレーン材料の違いによって圧密速度の違いが生じたか否かの判断を下すことはできないが、図-15をみる限り特定のタイプによって改良された地区の圧密遅れは認めることはできない。また、図-7からわかるように、ドレーンピッチが狭い地区において特に室内試験から求めた c_v が小さいとはいえない。

ドレーンピッチによって圧密速度が異なる原因について、①ドレーンの等価径の影響、②スミヤーの影響、③砂層の影響を取り上げて考えてみる。

①ドレーンの等価径の影響

前章で有限要素法の計算から、プラスチックボードドレーンの d_w を 5 cm と考えても良いことを示した。しかし、何らかの原因で d_w が 5 cm より小さかったとすると、ドレーンのピッチが狭いほど、 d_w を 5 cm と仮定したことによる誤差が大きくなる。そこで、

d_w を 5 cm とし圧密度が 50% となる時間を t_{50} 、 d_w を変化させた場合の圧密時間を t'_{50} とし、この時間の比がドレーンピッチによってどの様に変化するのかをみたのが、図-16である。 d_w を 3, 2 cm と小さくするにつれ図に見られるように、ドレーンピッチが狭くなるにつれ圧密の遅れが認められるが、その減少割合は小さい。従って、 d_w の設定の誤差によるドレーンピッチの影響を説明することは難しい。

②スミヤーの影響

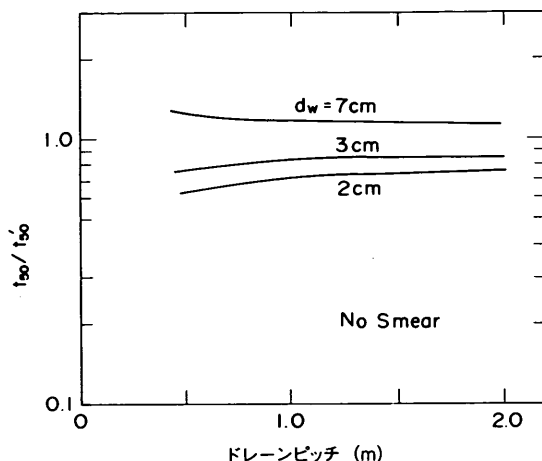


図-16 等価径の取り方による見かけの c_v の低下

スミヤー (smear) とは打設時の乱れによってドレーン周辺に生じる透水係数の低下した部分を意味する。スミヤーの影響範囲はドレーンピッチによって変化しないと考えられるので、ピッチが狭いほどスミヤーによる透水係数の低下の影響が大きくなる。このスミヤーについてはバーティカルドレーンに関する最大の研究テーマであり、古くから多くの研究者によって調査・研究されている。筆者の一人も c_v に対するドレーンピッチの影響を第10回東南アジア地域会議で発表して、Michel 教授を始め数人の研究者から、この原因をスミヤーではないかと指摘された。

Hansbo⁹⁾ は Barron の近似解をもとに、スミヤーを考慮した圧密の計算式を下のように提案している。

$$U(T_s) = 1 - \exp(-8 T_s / \mu_s) \quad (4)$$

ここに、

$$\mu_s = 1 \ln(n/s) + (k_c/k'_c) \ln(s) - 3/4$$

$$n = d_r/d_w$$

$$s = d_s / d_w$$

k_c は乱さない状態での土の透水係数、 k_c' はスミアードゾーンの土の透水係数である。また d_s はスミアードゾーンの直径である。

(4)式からスミアーの影響をドレーンピッチに対して求めた結果が図-17である。図-16と同様に図中の縦軸の t_{50} はスミアーを考慮しない場合の圧密度50%に要する時間で、 t'_{50} はスミアーを考慮した場合の時間である。Hansboの式によれば、スミアードゾーンの径が大きくなれば (s が大きくなるほど)、また透水係数が低下すれば (k_c/k_c' が大きくなるほど)、ドレーンピッチが狭くなるにつれ圧密の遅れの程度が顕著になる。しかし、その低下割合は図-15に示す実測値と比べて小さい。また、大きな s 、あるいは大きな k_c/k_c' の条件下ではドレーンピッチが大きな場合でも圧密遅れが生じ、Hansboのスミアーを考慮した数値計算では、ドレーンピッチによる圧密速度の依存性はうまく説明できない。

スミアー説の根底にある考え方は、ドレーン打設によ

を施工した地盤の圧密沈下は、標準圧密試験から求めた c_v と良く一致するとの報告が多数ある¹¹⁾。このため、スミアーによる透水係数の低下と、標準圧密試験から求められた圧密係数の過小評価とが、お互いに相殺しているとの意見が主流を占めた時期もあった。このような見解に立てば、2つの要因がバランスしない条件下では、例えば地盤の透水性の異方性が極端に異なる場合とか(具体的には北欧に見られる氷河期に堆積したしま粘土(varved clay))、ドレーンピッチが過去の事例に比べて狭いか広い場合には、実際の沈下挙動と室内試験の結果にかい離が生じることになる。しかし、少なくとも我国の海成粘性土については、圧密係数の異方性は、当初言われていたほど大きくないことが実験的に示された¹²⁾ ことから、相殺説を見直す動きもある。また、今回の対象となった AC₁ 層は自然に堆積した地盤ではないため、粘土粒子の骨格構造は発達していないので、圧密係数の異方性も大きいとは考えられない。このため、図-17に示した計算結果とあわせて、圧密係数がドレーンピッチに依存している主たる原因はスミアーによるものではないように思われる。

③砂層の影響

AC₁ 層は種々の土を捨て込んで作られた地盤であるため、所々にレンズ状の砂層を含んでいる。図-18は第二期地区で実施された三成分コーンによる AC₁ 層の土質調査の試験結果の一例である。AC₁ 層の所々に間隙水圧が低下しており、かなりの数の砂層が複雑に混在していることを示唆している。しかし、これらの砂層のほとんどは、広範囲に広がってはいないで、途中で粘性土によって分断されており、排水層としては機能してはいないと考えられる。しかしながら、いったんバーチカルドレーンが打設されると、これらの砂層は排水層として機能することになる(図-19参照)。

ドレーンによる水平方向の圧密と排水層による鉛直方向の圧密が同時に進行する場合の計算式は、Carrilloの方法を用いて(5)式で表わすことができる。

$$U(t) = 1 - (1 - U_r(t))(1 - U_v(t)) \quad (5)$$

ここに、 $U_r(t)$ 、 $U_v(t)$ は、それぞれ水平方向と鉛直方向の圧密度である。式(5)からわかるように、ドレーンによる圧密と鉛直方向の圧密とが同時に進行する場合の計算式はこれら2つの式の組合せで表わすことができる。

図-20に鉛直方向の圧密を考慮した場合の計算結果を示す。計算では式(5)の U_r は式(2)の Barron の近似式、

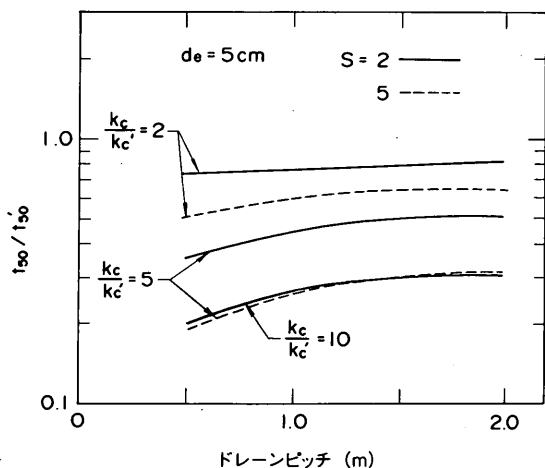


図-17 スミアーを考慮した場合の見かけの c_v の低下

り粘性土の骨格構造が破壊されてしまうので、地盤の強度低下や透水係数の大幅な減少が生じるとの考え方である。このため、ドレーン有害論まで唱える研究者も出てきた¹⁰⁾。また、本来地盤は土粒子が堆積して形成されたので、透水係数は鉛直方向に比べて水平方向に対して大きいとの考え方がある。このため、本来ならばバーチカルドレーンの設計のための圧密試験は、標準圧密試験で行われているように排水方向を鉛直とするよりも水平としたほうが良いことになる。しかしながら、ドレーン

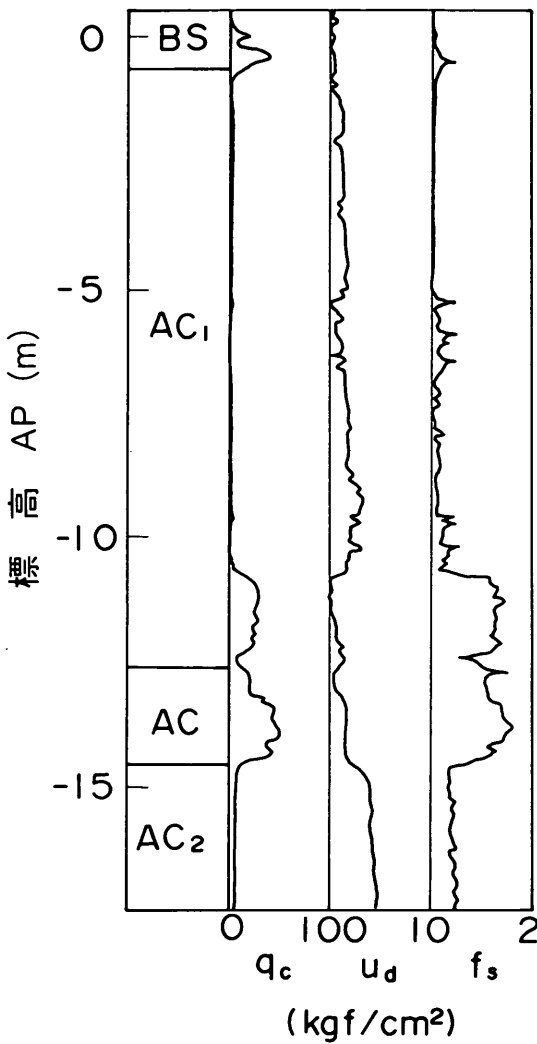


図-18 三成分コーンによる土質調査結果の一例

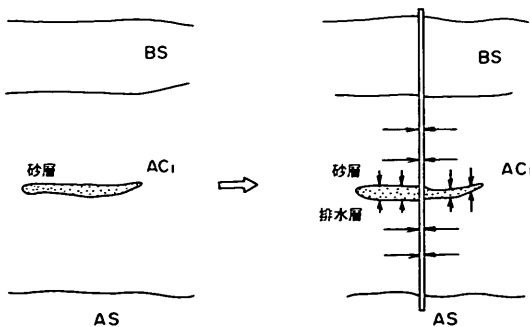


図-19 砂層がある場合の過剰間げき水圧の流れ

U_v は通常用いられてる Terzaghi の計算式によった。図-16, 17の場合と同様に、この考察においても t_{90} は砂層を考慮した時間で、 H_d は排水層の間隔である。図から H_d が小さい場合ほどドレーンピッチが大きいときの見かけの c_v が増加しているのがわかる。この考察で特徴的なのは、①、②の考え方ではドレーンピッチが大きい場合の c_v が地盤の本来の圧密特性を表わしており、等価径の取り方あるいはスミアーによって、ドレーンピッチが狭くなるにつれ圧密が遅くなるとの立場にある。これに対して、③の考え方はドレーンピッチが狭い場合の c_v が地盤の圧密特性を表わしており、ドレーンピッチが大きくなると鉛直方向の圧密が顕著になるため、見かけの c_v が大きくなるとの立場に立っている。計算結果を示す図-20から、 H を1から2 m と仮定すると、実測の c_v と傾向的には一致している。すなわち、 c_v がドレーンピッチによって影響される主要な原因は、局部的な砂層の存在であると思われる。

(3) 室内試験との関係

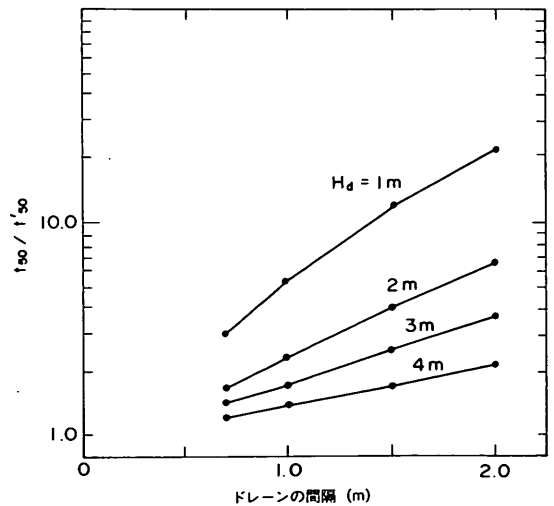


図-20 鉛直方向の圧密を考慮した場合の見かけの c_v 増加

サンドドレーンを施した地盤に対して、室内試験から求められた c_v と現場の実測沈下から逆算して求めた c_v の関係を吉国¹¹⁾ がまとめているが、多くのデータから逆算された c_v は室内試験の1/2から2倍の範囲内に入っており、これから室内試験で求めた c_v は、実用上かなりの精度を有していることがわかる。しかし、今回の地盤は既に述べたように、種々の土を捨て込んで作られたために、その c_v のばらつきは非常に大きく、どの値を

設計値としたらよいかわからない。

当地区ではかなりの数の標準圧密試験を実施しており、 c_v を対数としたヒストグラムを求めると図-21のようになる。土砂を捨て込んだ時期によって地区ごとに c_v のある程度の区分ができると思われるが、第一期工事地区全体（規模、約3,000×300m）として見た場合には、平面的にも深さ方向に対しても c_v は一様にばらついていると考えられる（図-7）。室内試験から求められた c_v と沈下データから逆算された c_v^* （室内から求めた値と区別するため*を付ける）のヒストグラムを図-21に示す。すでに述べたように、 c_v^* はドレーンピッチによって変化したので、図にはドレーンピッチが1.4m以下の値を対象としている。 c_v と c_v^* を比較すると、 c_v^* は c_v のかなり小さな所に分布しており、地盤の沈下は圧密試験から予測される値より遅く進行したのがわかる。このように、圧密試験で得られた c_v の平均値を用いてドレーンを設計すると、 c_v を過大評価することになり、危険

側の設定であることがわかる。

標準圧密試験は原則として、ボーリング孔に対して1.5mの深度ごとに実施した。そこで、室内試験から求められた c_v を調査地点（ボーリング孔）ごとに整理してみた。圧密係数が異なる複数の土層からなる地盤にドレーンを打設すると、水平方向に過剰間隙水圧が消散していくので、層ごとに独立して圧密が進行して行く。このため、地盤全体としては各層の圧密係数の平均値とした地盤と同様に圧密が進行すると思われる。図-21に同一調査地点での各深度における c_v 値の平均値（ただし c_v の対数に対して）を代表値としたヒストグラムを示す。これと、沈下から逆算された c_v^* と比較すると、室内試験の c_v の分布は大きいのがわかる。平均値の代わりに、同一調査地点で得られた c_v の一番小さな値で代表させたヒストグラムを同図に示す。これと沈下観測結果と比べると、中央値だけではなく分布形状も非常に似ていることがわかる。

今回の調査では圧密の進行を間隙水圧の消散ではなく、沈下として捉えた。図-22にAC_i層の室内試験から得られた c_v と圧縮指数 C_c の関係を示すが、 c_v の小さな試料ほど圧縮性が大きくなる傾向にある。このため、 c_v が小さな地層が圧密沈下を支配することになり、結果として図-21に示す傾向が得られたと考えられる。

3.3 二次圧密による沈下速度

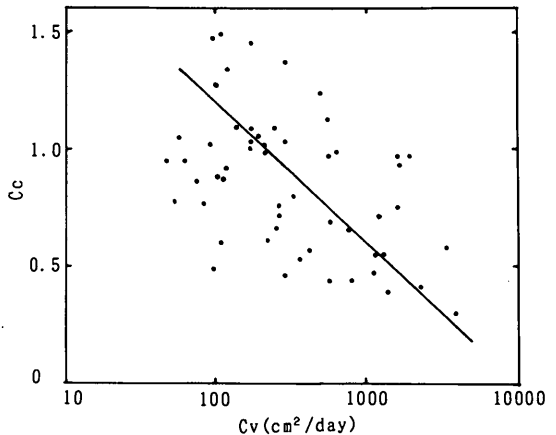


図-22 AC_i層の圧密係数と圧密指数の関係

(1) 二次圧密の重要性

粘性土地盤では、一次圧密が終了した後でも、二次圧密と呼ばれる沈下が持続する。この二次圧密による沈下は時間の対数に比例するとされている。図-23はドレーンで改良された地盤と、何もしていない未改良の地盤の

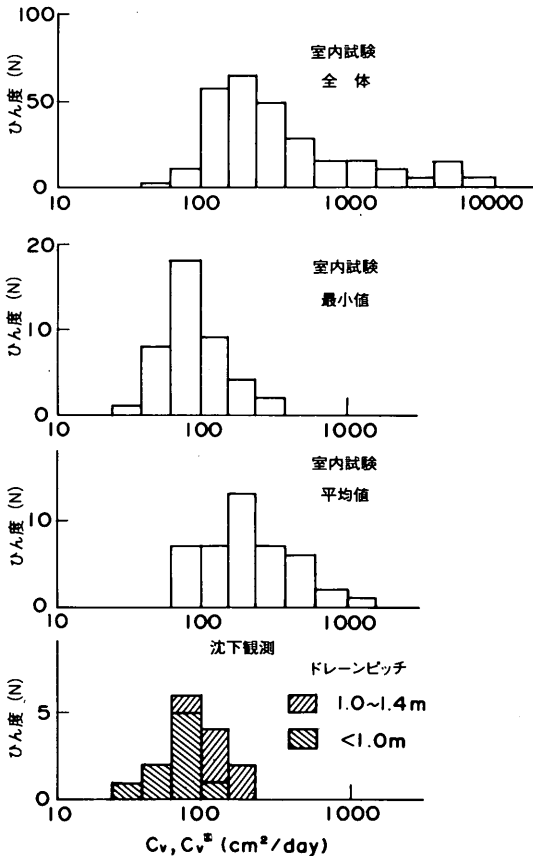


図-21 圧密試験と沈下から求められた c_v のヒストグラム

沈下曲線を模式的に表わしたものである。人工的に排水距離を短くした地盤でも、圧密時間が長い未改良地盤でも、一次圧密が終了した後に生じる二次圧密の対数時間に対する勾配（二次圧密速度）は同じと考えられる。このため、一次圧密が終了した後の一定期間（例えば1年間）に生じる二次圧密による沈下は、図に示すように時間を対数とすると、改良地盤では一次圧密が速く終わる分だけ基準となる期間が長くなるため、二次圧密による沈下は大きくなる。一方、未改良地盤では一次圧密終了に時間がかかるので、基準となる期間が短くなるので二次圧密による沈下は実用上問題とならない場合が多い。すなわち、人工的に一次圧密を速めれば速めるほど、二次圧密による沈下が目立つことになる。一般に、サンドドレーンは一次圧密の終了を1あるいは2年と比較的長い期間をとるが、プラスチックボードドレーンは等価径の小さなドレーンを密に打設して圧密を半年あるいはそれ以下の短い期間に終了させる傾向にあるので、二次圧密の特性は重要となる。

(2) 計測された二次圧密速度

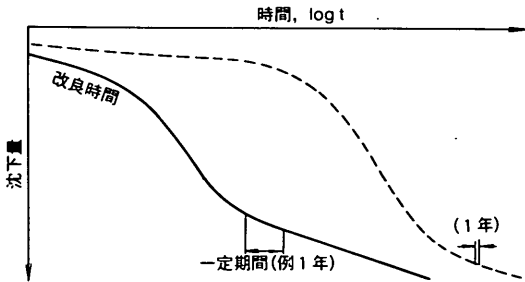


図-23 ドレーンで改良された地盤と改良されていない地盤の沈下の模式図

図-10を参考にして、二次圧密における対数時間の1サイクルに生じた沈下を二次圧密速度、 s とする。この s を層厚で除した値、すなわちひずみを $\dot{\epsilon}$ とする。二次圧密の研究論文で使用されている二次圧密係数、 C_a と $\dot{\epsilon}$ の関係は(6)式で関係づけられる。

$$\dot{\epsilon} = C_a / (1 + e) \quad (6)$$

ここに e は間隙比である。

図-24に s と AC_1 層の層厚との関係を示す。 s は AC_1 層の層厚とともに増加してはならず、このことより AC_1 層の $\dot{\epsilon}$ は一定でないことがわかる。現在までの研究結果から、 $\dot{\epsilon}$ の値は初期含水比と圧密応力によって大きく変化する値とされている。今回の改良の対象となっ

た AC_1 層は種々の土から成っているため、場所あるいは深度によって $\dot{\epsilon}$ の値は大きく変化していると考えられ、図に見られるように AC_1 層の層厚と s の間には有為な関係を認めることはできない。

図-24の点は一次圧密沈下量、 ρ_{100} の値によって区別

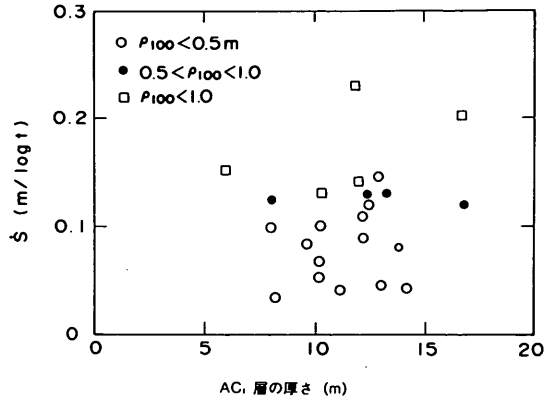


図-24 二次圧密速度と層厚の関係

してあるが、 ρ_{100} が大きい地点ほど s も大きくなっている。特に、 ρ_{100} が1mを越える地点では、 s は0.1から0.2m/log tとかなり大きな値となっている。一次圧密沈下量と二次圧密沈下量の関係をもてみると、図-25が得られる。ただし、横軸は ρ_{100} を層厚、 H で除した一次圧密ひずみ、 ϵ_c としている。図から多少のばらつきはあるものの、 $\dot{\epsilon}$ と ϵ_c の間には $\dot{\epsilon} = 0.2 \epsilon_c$ の関係が認められる。

ϵ_c は一次圧密沈下量なので(7)式から求めることがで

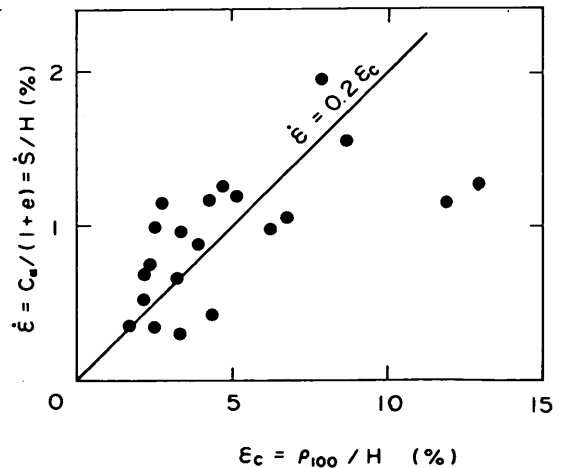


図-25 一次圧密沈下量と二次圧密速度の関係

きる。

$$\varepsilon_c = \frac{C_c}{(1+e)} \log \frac{(\Delta p + p_0)}{p_0} \quad (7)$$

ここに、 C_c は圧縮指数、 Δp は圧密増加応力、 p_0 は圧密前の有効土被り圧である。

(6)式と(7)式から $\varepsilon/\varepsilon_c$ は(8)式となる。

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} = \frac{s}{\rho_{100}} = \frac{C_a}{C_c} \cdot \frac{1}{\log \left(\frac{\Delta p + p_0}{p_0} \right)} \quad (8)$$

当地区の $(\Delta p + p_0)/p_0$ の値はおおよそ1.5から2.0の範囲内にあり、また図-25から $\varepsilon = 0.2 \varepsilon_c$ の関係を用いると、(8)式から C_a/C_c の値は0.036から0.060となる。この C_a/C_c の値はMesri and Choi¹³⁾が室内試験から求めた値とほぼ一致している。すなわち、当地区では二次圧密速度、 s は一次圧密沈下量、 ρ_{100} の0.2倍程度みておけば良いことになる。

今回の現場のように種々の土を捨て込んで形成される地盤は、圧密特性やその層厚の変化は非常に激しい。このような地盤に対して、室内試験から直接求められる ε を使って二次圧密による沈下を予測すると、大きな誤差が生じる。一方、施工後の沈下データから ρ_{100} を予測し、(8)式を用いると、不均一な地盤でも、かなりの精度で二次圧密による沈下が予測できることになる。

4. まとめ

東京国際空港沖合展開事業の第一期工事において、プラスチックボードドレーンで改良された地盤の沈下データを解析して、不均一地盤の圧密特性を明らかにした。本研究で得られた主な結論は以下の通りである。

- ① 有限要素法を用いた数値解析により、プラスチックボードドレーンの等価径の5cmは妥当な値であることがわかった。
- ② 今回のドレーン長は最大20mでドレーンの上下部に排水層がある。この条件下でウェルレジスタンスあるいは圧密中にドレーンが折れて通水性の低下による圧密の遅延は認められなかった。
- ③ 今回の施工ではドレーンピッチは0.76mから2.0であったが、ドレーンピッチによって沈下から逆算された圧密係数が著しく変化した。この原因を探るために種々の角度から考察を行った結果、対象層に含まれる砂層が原因と思われる。すなわち、ドレーンピッチが大きいと見かけ上圧密係数が大きくなる。
- ④ 室内の標準圧密試験から求められた圧密係数と沈下

から逆算して求められた圧密係数をヒストグラムにして、両者の関係を検討した。その結果、ドレーンで改良された地盤の圧密係数の分布は、各調査地点での圧密試験から得られた c_v の最小値を代表値とした分布とよく一致した。

- ⑤ へどろ等で埋め立てられた不均一地盤の二次圧密による沈下量を推定する方法として、一次圧密沈下量を用いる方法が有効であることがわかった。当地区では二次圧密速度、 s と一次圧密沈下量、 ρ_{100} の間には $s = 0.2 \rho_{100}$ なる関係が得られ、この関係は既往の室内試験から求められた研究結果からも説明できる。

今回の解析の対象となった埋立地盤の圧密は、自然に堆積した地盤と異なり、埋立材料、方法、時期などの人工的な要因に強く左右される。このため、得られた観測結果が埋立地盤全般に適用できるだけの普遍性を有しているか否かは、多少疑問が残る。しかし、今後ウォーターフロント開発計画の例に見られるように、本報告で取り上げた事例はますます増加していく傾向にある。今後この種のデータを蓄積し、経済的でしかも信頼性の高い設計法の確立が必要と思われる。

最後に今回の計測計画を立案・発注された第二港湾建設局の方々、沈下を計測された民間会社の方々にお礼の言葉を申し上げます。また、本報告をまとめるに当たり佐藤勝久土質部長には、貴重なご意見・ご指導をいただいた。ここに深く感謝の意を表します。

(1991年3月31日受付)

参考文献

- 1) The Institution of Civil Engineers: *Vertical Drains*, Thomas Telford LTD London, 1982.
- 2) 田中洋行・小野憲司: 羽田沖合展開工事(第一期)におけるパーティカルドレーン工法について, 第33回土質工学シンポジウム発表論文集, 1988年, pp. 29~34.
- 3) Tanaka, H.: Settlement of Ground Improved by Band Drain at The Development of the Tokyo International Airport, *10th Southeast Asian Geotechnical Conference*, 1990, pp. 133~pp. 138.
- 4) 田中洋行・太田一己・塩崎正孝: 東京国際空港沖合展開工事(第一期)におけるパーティカルドレーン工法, 地質と調査, '90, No. 1, 1990年, pp. 6~11.
- 5) 小林正樹: 有限要素法による圧密問題の解析, 港湾技研資料, No. 247, 1976年.
- 6) 吉国洋: パーティカルドレーン工法の設計と施工管理, 技報堂, 1979年.
- 7) 嘉門雅史: プラスチックボードドレーン材料の性質

とその特性, 基礎工, Vol.13, No. 8, 1985年, pp. 11~17.

- 8) Yoshikuni, H. and Nakanodo, H. : Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability, *Soils and Foundations*, Vol.14, No. 2, 1974,p.35.
- 9) Hansbo, S., Jamiolkowski, M. and Kok, L. : Consolidation by Vertical Drains, *Vertical Drains*, Thomas Telford LTD London, 1982, pp.45~66.
- 10) Casagrande, L. and Poulos, S. : On the Effectiveness of Sand Drain, *Canadian Geotechnical Journal*, 6, 1969, pp.287~326.
- 11) 吉国洋 : 圧密理論の役割 (その1), 土と基礎, Vol. 27, No. 2, 1979年, pp.105~111.
- 12) 小林正樹・水上純一・土田孝 : 粘性土の水平方向圧密係数の決定法, 港研報告, Vol.29, No.2, 1990年, pp.63~83.
- 13) Mesri, M. and Choi, Y. K. : Settlement Analysis of Embankments on Soft Clay, *ASCE*, Vol. 111, No. GT4, 1985年, PP.441~464.

$\dot{\epsilon}$: 二次圧密による沈下ひずみ速度
 ϵ_c : 一次圧密による沈下ひずみ
 ρ_{50} : 一次圧密が50%進んだ時の沈下量 (m)
 ρ_{100} : 一次圧密終了時の沈下量 (m)

記号一覧表

C_c : 圧縮指数
 C_a : 二次圧密係数
 c_v : 圧密係数 (cm²/day)
 c_v^* : 沈下から逆算された c_v (cm²/day)
 d : ドレーンピッチ (m)
 d_e : ドレーン一本当りの有効円の直径 (m)
 d_s : スミアードゾーンの直径 (m)
 d_w : プラスティックボードドレーンを円柱に置き換えた場合の等価径 (m)
 e_0 : 初期間隙比
 k_c : 乱さない地盤の透水係数 (m/s)
 k_c' : スミアードゾーンの透水係数 (m/s)
 k_e : プラスティックボードドレーンの鉛直方向の等価透水係数 (m/s)
 n : $= d_e/d_w$
 p_c : 圧密降伏応力 (kgf/cm²)
 p_0 : 圧密前の有効土かぶり圧 (kgf/cm²)
 \dot{s} : 二次圧密沈下速度
 t : 時間 (day)
 t_{50} : 圧密が50%進んだときの時間 (day)
 T_h : 時間係数 ($= \frac{C_v t}{d_e^2}$)
 U : 圧密度
 Δ_p : 圧密増加応力 (kgf/cm²)