

サンドドレーン改良地盤の圧密メカニズムの考察

住岡宣博*・吉國 洋**

サンドドレーンで改良された粘土の圧密変形メカニズムを、実地盤の調査結果をもとに考察した。粘土内では、圧密中に応力の配分が行われ排水面側の粘土に応力集中が生じ、一次圧密終了後も応力やひずみの分布は一様とならない。これは弾塑性圧密挙動に起因しており、沈下量や圧密係数がドレーンピッチによって変化する因子となることを示した。さらに、圧密係数の変化は平均的ひずみ速度と相関があることを示した。

Keywords : sand drain, clay, consolidation, stress distribution, field data soil investigation, strain rate

1. まえがき

Barron¹⁾はパーチカルドレーン打設地盤を中空円柱としてモデル化し、上端面の沈下性状、打設に伴う攪乱帯の影響、および、ドレーンの透水性を考慮して圧密過程を検討し、解析法を提案した。彼の提案した解析法は、現在でもパーチカルドレーンの設計法の基本的な理論として、広く用いられている。ところで、パーチカルドレーンで改良された地盤の圧密速度や沈下量が設計時に予測したそれと異なることがしばしば報告されている。従来、パーチカルドレーンによる圧密が理論どおりに進行しない理由として、地盤性状の複雑さ不均質性、土質定数の不正確さ、施工に伴うドレーン周辺粘土の攪乱の影響、ウェルレジスタンス、ドレーンの剛性等による複合効果などがあげられている。著者の一人吉國は、三次元圧密論を軸対称問題に適用し、ドレーンの剛性や透水性を考慮した解析解を示した²⁾。赤井らはサンドドレーンによる圧密の模型実験を行い、Barronの理論の適用性の検討を行った³⁾。これによると、過剰間隙水圧の消散過程や沈下と時間の関係から、ほぼBarronの理論の適用に問題はないとした。攪乱帯の問題についてもこれまで数多くの研究がある。尾上⁴⁾は、模型実験によってドレーン周辺の攪乱帯の透水係数の分布等を調べ、粘土を攪乱帯と非攪乱帯の2領域に分けて解析するモデル⁵⁾の実用性を示した。そのほかに排除型砂柱打設に伴って発生する過剰間隙水圧と、それが強度に与える影響・効果を模型実験によって検討した例もある^{6),7)}。

一方、現場データや現場比較試験をもとに、パーチカルドレーンの効果に関して、多くの議論が展開された。その代表的なものに、久しく続いたパーチカルドレーン

の有効性の議論がある⁸⁾。しかしそこでは、現象や結果のみを用いての議論に終始し、地盤内部の応力やひずみがどのように分布しているのか、そのメカニズムの解明に踏み込んだ検討にまでは至っていない。

上述のように、パーチカルドレーンの圧密に関して、理論的あるいは実験的研究は数多く行われているが、現場の圧密現象については、地盤内の詳細な調査データも少なく未解明な点が多い。そこでサンドドレーンによる地盤改良工事現場で、ドレーン間の粘土を採取しその圧密状態を詳細に調べた。また、荷重および土質条件はほぼ同一でドレーンピッチのみが異なる場合の圧密沈下の測定も行った。本報告では、これらの調査データをもとに、サンドドレーンの改良ピッチによって、圧縮量や圧密係数が変化するメカニズムについて考察した。

2. 地盤改良工事の概要

(1) 埋め立て方法

この工事は火力発電所用地を確保するために、軟弱海底地盤上を50万m²埋め立てたもので⁹⁾、図-1に示すように1工区と2工区に分かれている。1工区は面積約12万m²で、海底沖積粘性土地盤上を良質な海砂と山土で埋め立てたものである。2工区は面積約38万m²で、前述の海底沖積粘性土地盤上に浚渫粘性土をポンプで投入し、その上を海砂と山土で埋め立てたものである。

(2) 地盤概要

当地点の地盤は上層に沖積粘性土が層厚16m~18mにわたって堆積し、以下砂質土層、砂礫層、風化軟岩層で構成されている。上層の沖積粘性土層の土性は、図-2に示すように、自然含水比 $w_n=75\sim 100\%$ 、間隙比 $e=2.0\sim 2.5$ 、標準圧密試験から求めた $c_c=0.8\sim 1.3$ と高圧縮性を示す軟弱粘性土である。この粘性土層は、堆積状況から正規圧密地盤であると考えられるがセメンテーション、二次圧密などの時間効果を受けて軽い疑似

*正会員 中電技術コンサルタント(株)土木第二本部総括課長 (〒734 広島市南区出汐2-3-30)

**正会員 工博 広島大学教授 工学部第四類

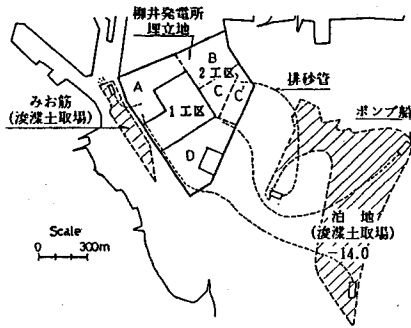


図-1 埋め立て地平面図

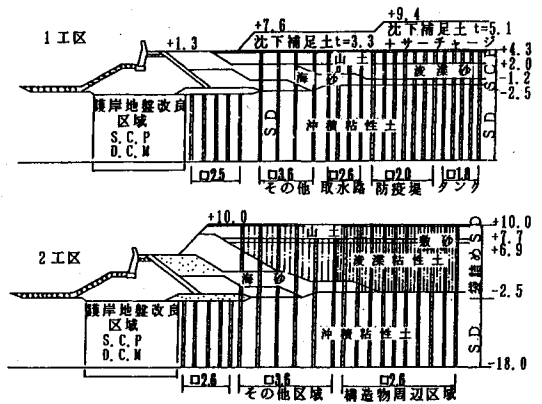


図-3 地盤改良概要図

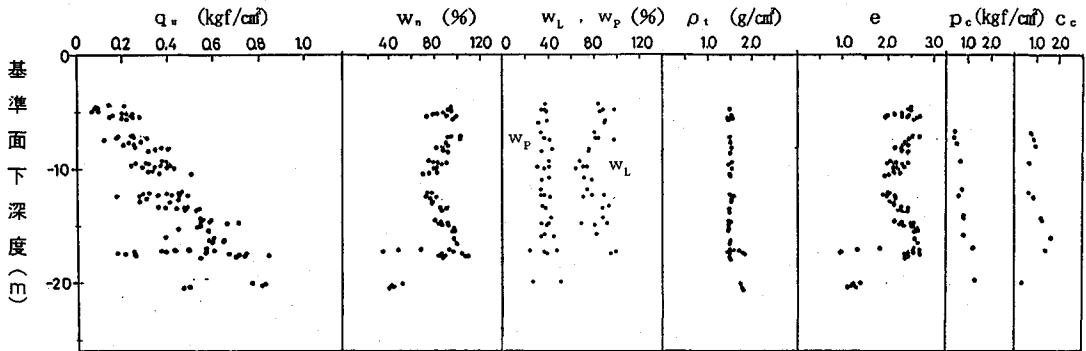


図-2 土性図

過圧密性状を呈している。また、圧密特性から判断すると、この層は4層に分けられる。各層の平均的圧密諸定数を表-1に示す。表中の c_v は、正規圧密状態ではほぼ一定になった値である。

なお、浚渫粘土層は場所毎に複雑な堆積をしており、場所毎にその土質定数は大きく異なっている¹⁰⁾。

(3) 地盤改良概要

この工事では地盤の早期利用を計るために、埋め立て地全面にサンドドレーン工法による地盤改良が行われている¹¹⁾。サンドドレーンの打設ピッチは区域別に異なり、正方形ピッチで1.8m, 2.0m, 2.6m, 3.6mの4種類が施工されている。サンドドレーンの打設は、パイロハンマーによってマンドレルを粘性土地盤へ貫入させる方式でいわゆる排除型サンドドレーンである。なお、サンドドレーンの直径は500mmである。地盤改良の概要を図-3に示す。

3. 実測沈下

(1) 沈下測定

沈下の測定は、171基の表層沈下板と9基の層別沈下計によって行われている。測定頻度は1回/3~5日で

表-1 沖積粘性土の平均的圧密定数

層	深度	p_c (kgf/cm ²)	e_0	C_c	C_v (cm/day)
I	GL ~ -5.0	0.244	2.18	0.88	165 (133~206)
II	-5.0 ~ -7.5	0.364	2.42	1.18	138 (112~169)
III	-7.5 ~ -12.5	0.550	2.05	0.85	310 (234~409)
IV	-12.5 ~ 下限	0.861	2.33	1.28	133 (101~175)

ある。ここでは、このうち38基の沈下板と8基の層別沈下計の測定データを取りあげた。

(2) 沈下曲線

今回取り上げた沈下曲線の一部を図-4に示す。図示した沈下曲線は、表層沈下板と層別沈下計によって得られたもので、計器設置以前の沈下量は含まれていない。計器設置以前の沈下量は場所によって異なるが、小さいもので80cm, 大きいものでは300cm前後となっている。盛土は段階施工されているため、沈下曲線形状は一括瞬時載荷のものとは異なり、複数の屈曲点がみられる。双曲線法で求めた最終沈下量をもとに推定した、沈下に関する圧密度は、いずれも99%以上である。後述する圧密係数は、圧密がほぼ完了したこれらの沈下曲線から求めたものである。

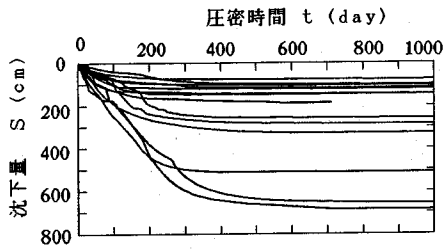


図-4 実測沈下曲線

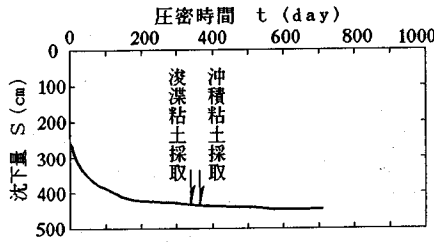


図-5 試料採取地点の沈下曲線

4. 土質調査

(1) 試料採取位置

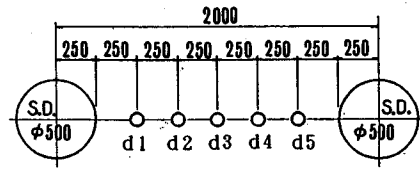
水路建設のための掘削工事に際して、サンドドレーン間の粘土の試料採取を行った。場所は前述の2工区で、海底沖積粘性土地盤上を浚渫粘性土と海砂・山土で埋め立てた地点である。試料の採取は、浚渫粘性土層で二箇所、沖積粘性土層で一箇所である。試料採取を行った地点は、沈下の圧密度に換算すると95%以上に達しており一次圧密についてはほぼ終了段階にあると判断される。図-5は試料採取位置近傍の沈下曲線で、沈下計設置以前の沈下が260cm程度ある。図中に、試料採取時点を示した。

(2) サンドドレーン間粘土の試料採取

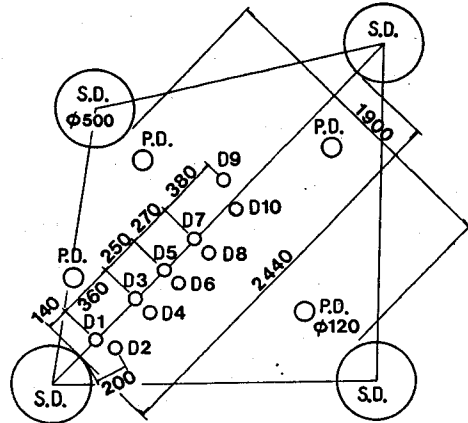
サンドドレーン間の粘土の応力やひずみの分布を調べるために、ドレーンからの距離を様々に変えて内径75mmのシンウォールチューブによるサンプリングを行った。図-6、図-7に三箇所のサンプリング位置を示す。浚渫層では、サンドドレーン打設以前にバックドレーンが施工されている。但し、図-6の(a)に示した試料採取は他の二つとは別の場所で行っており、図-5に示した沈下曲線および試料採取時期とは異なるものである。

(3) 土質試験

地盤から鉛直に採取した不攪乱試料を、シンウォールチューブから慎重に取り出したのち、標準圧密試験を行った。標準圧密試験はJIS規格にしたがって行った。なお、ろ紙は使用しなかった。また、試験結果は \sqrt{t} 法により整理した。また、浚渫粘土に対しては、JIS規格にしたがって一軸圧縮試験も行った。供試体の直径は



(a) 浚渫層表層付近



(b) 浚渫層中間付近

図-6 浚渫粘性土の試料採取位置

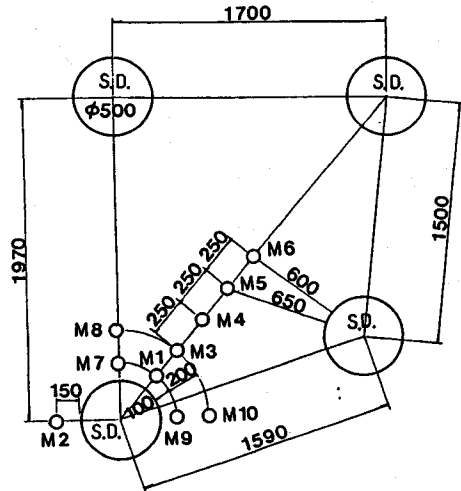


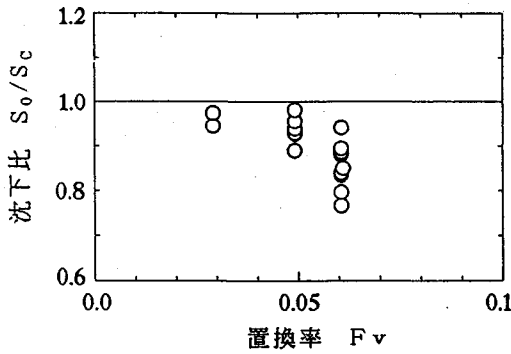
図-7 沖積粘性土の試料採取位置

50 mm で、ひずみ速度は1%/minである。

5. 沈下解析結果

(1) サンドドレーンピッチと沈下量

サンドドレーンピッチのみが異なり、ほかはほぼ同一の地盤条件と荷重条件のもとに圧密された地点の実測沈下データを、事前の計算沈下量と比較したのが図-8である。検討に用いたデータは、先述の1工区沖積層で得られたもので、粘土層厚はほぼ一定で、一次元沈下と見



図—8 ドレーン置換率と沈下比率の関係

做せるものである。図の縦軸は実測最終沈下量 S_o を計算沈下量 S_c で除したもので、計算値を基準にした沈下比率を表している。ここに、 S_c は実測値をもとに双曲線法で予測した最終沈下量である。表層沈下板による沈下測定開始前の沈下は、海砂投入開始前に原地盤海底面に設置した沈下板の測定値と、改良効果確認のためのチェックボーリング結果から判定した原地盤海底面の沈下量をもとに求めている。 S_c は事前の標準圧密試験結果をもとに式(1)で算定した値である。計算では、先述の軽い疑似過圧密性状を考慮した。沈下管理の結果では、全域を正規圧密状態として取り扱った計算値は、実際の沈下量よりも約20%程度過大であった。施工の土量収支からも過圧密領域を考慮した計算の方が精度が良い。

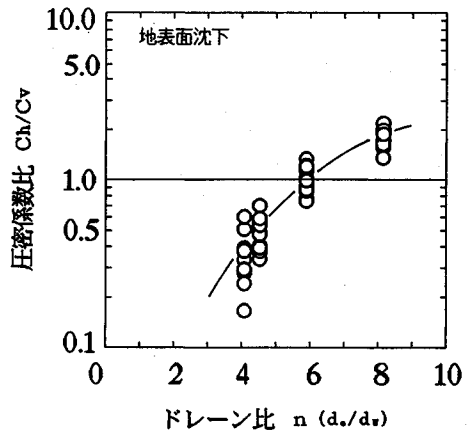
$$S_c = \sum_{i=1}^4 \left\{ \frac{C_{si}}{1+e_{oi}} H_{oi} \log \left(\frac{P_{ci}}{P_{fi}} \right) + \frac{C_{ci}}{1+e_{oi}} H_{oi} \log \left(\frac{P_{fi}}{P_{ci}} \right) \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

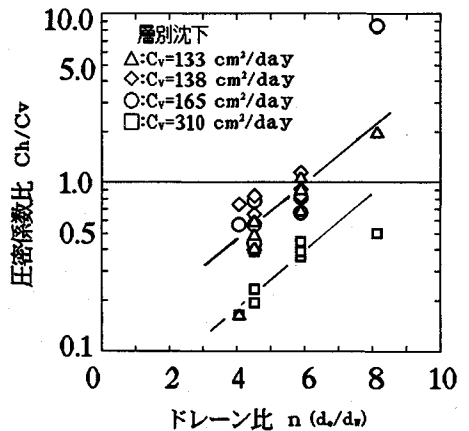
- C_{si} : 各層の膨潤指数
- C_{ci} : 各層の圧縮指数
- e_{oi} : 各層の初期間隙比
- H_{oi} : 各層の初期層厚
- p_{oi} : 各層の圧密初期応力
- p_{ci} : 各層の圧密降伏応力
- p_{fi} : 各層の圧密最終応力

である。

図の横軸、置換率 $F_v (= 1/n^2)$ は有効円の面積に占めるドレーン面積の割合で、ドレーンピッチの違いを示している。ここではサンドドレーンの有効径 d_e とサンドドレーンの径 d_w の比 $n (= d_e/d_w)$ (以下ドレーン比と称する) が 4.1, 4.5, 5.9 の三種類について示した。一般にサンドドレーン改良の場合ではドレーンピッチの相違による沈下量の変化は考慮しないことが多い。しかし図—8の結果は、サンドドレーン改良の場合でもドレーンピッチが異なると、同一の荷重条件のもとでありなが



図—9 ドレーン比と圧密係数比の相関



図—10 粘土層別の圧密係数比

ら沈下量が異なることを示している。すなわち、ドレーンピッチが小さいほど計算値に対する実測沈下量の比は小さくなる傾向にある。

(2) サンドドレーンピッチと圧密係数

地表面沈下データを解析し、サンドドレーンの改良ピッチによって、圧密係数が変化する様子を図—9に示した。図の横軸はドレーン比 n である。縦軸は門田法¹²⁾で逆解析して求めた圧密係数 c_n を事前の圧密試験から得られた圧密係数 c_v で除したもので、圧密係数比と呼ぶ。ドレーン比 n が小さいほど圧密係数比 c_n/c_v は小さく、ドレーンピッチが小さいほど現場の圧密係数は小さくなる傾向にあることを示している。この結果は、網干・井上らの報告¹³⁾と同様の傾向で、ペーパードレーンについても同様の報告がある¹⁴⁾。

(3) 粘土層別の圧密係数

前述の結果は、多層地盤を単層と考えたときの圧密係数に相当するものなので、これからは個別の粘土層の圧密係数の変化傾向は把握できない。そこで、粘土各層では前述の傾向がどのように変化するかを調べるために、

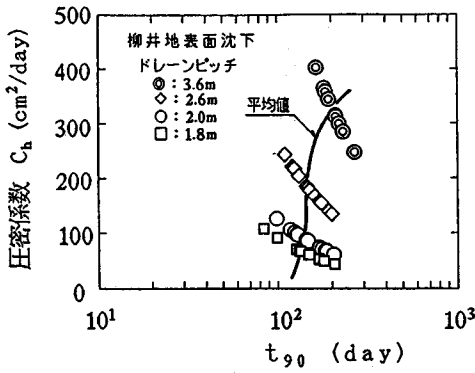


図-11 圧密係数と t_{90} の関係 (柳井表面沈下)

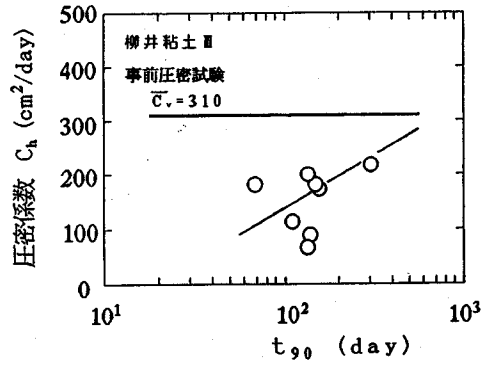


図-13 圧密係数と t_{90} の関係 (柳井粘土Ⅲ層)

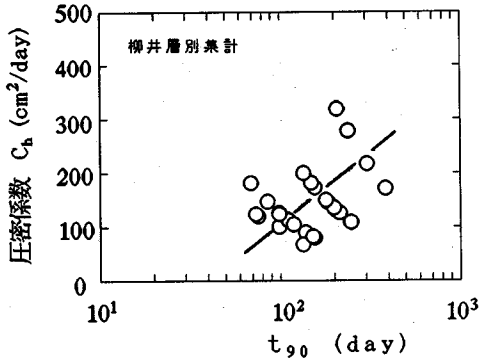


図-12 圧密係数と t_{90} の関係 (層別解析集計)

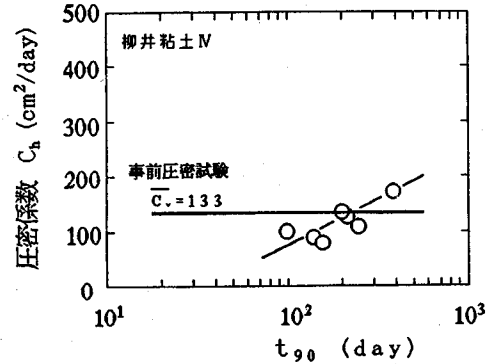


図-14 圧密係数と t_{90} の関係 (柳井粘土Ⅳ層)

層別沈下計の測定データを門田法¹²⁾によって解析し、その結果を図-10に示した。図中の凡例に示した値は、事前の標準圧密試験結果の平均値である。この図によると、圧密係数比 c_h/c_v は大きく二つのグループに分かれる。すなわち c_v が 133 cm²/day~165 cm²/day のグループと、 c_v が 310 cm²/day のグループである。一般的に c_v が 310 cm²/day のグループの方が c_h/c_v が小さい。つまり、現場では圧密係数の大きい粘土の方が圧密係数の低下比率が激しいことを示している。 c_v が大きい粘土ほど攪乱の影響が大きいのか、あるいは更に別の要因が有るのかは慎重に検討する必要がある。

(4) ひずみ速度と圧密係数

前項の整理結果を読み替えてみると、ひずみ速度の大きいものほど圧密係数の低下比率が激しいと考えることができる。そこで、平均的ひずみ速度を表す指標としての t_{90} と、門田法によって同定された圧密係数 c_h の関係を整理し図-11~図-14に示す。図-11には地表面沈下について前述の関係を整理した。同一のドレーンピッチでありながら、 c_h の値に幅があるのは、段階載荷や漸増載荷であったりする現場の載荷を瞬時載荷と置き換えて解析したり、沈下測定以前の圧密の影響が考慮できずに解析したための誤差もあると考えている。そこで全体的な傾向を把握するために、各ドレーンピッチの

c_h の平均値を結んだのが、図中の実線である。これを見ると、 t_{90} が小さいほど、つまり平均的ひずみ速度が大きいほど c_h は小さい傾向にある。この結果は、現場の圧密ではドレーンピッチを小さくしても、それに応じた設計理論どおりの圧密期間短縮の効果は期待できないことを示唆している。図-12~図-14は同様の整理をした層別解析の結果である。図-12ではI層~IV層の解析結果をまとめて示した。この結果は上述の傾向を追認している。図-13は事前の圧密試験で得られた c_v が最も大きいⅢ層の解析結果で、図-14は事前の圧密試験で得られた c_v が最も小さいⅣ層の解析結果の例である。Ⅲ層の場合は t_{90} の絶対値が大きいデータの数が少ないので、余り明瞭とは言えないものの、Ⅳ層の場合は前述の傾向を明瞭に示しており、 t_{90} の小さいほど c_h は小さい。ここでの整理結果は、圧密係数の変化とひずみ速度との間に相関のあることを示唆している。

6. 土質調査結果

(1) $e \sim \log \sigma'_v$ 関係

標準圧密試験から求めたサンドドレーン間の粘土の、 $e \sim \log \sigma'_v$ 関係を図-15と図-16に示す。図-15は浚渫粘性土層、図-16は沖積粘性土層の試験結果である。浚渫粘性土層は、埋め立て地内にポンプで搬送投入され

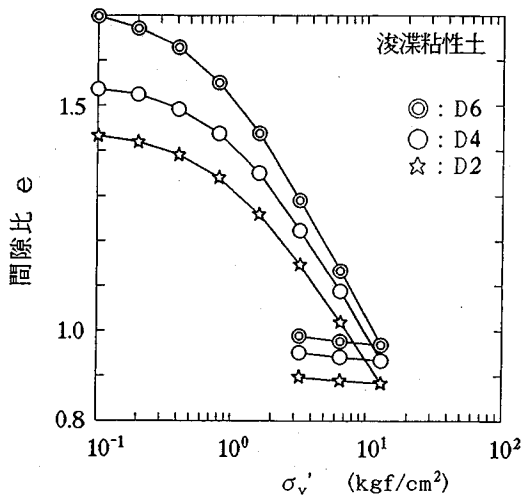


図-15 ドレーン間粘土の圧縮曲線 (浚渫粘性土)

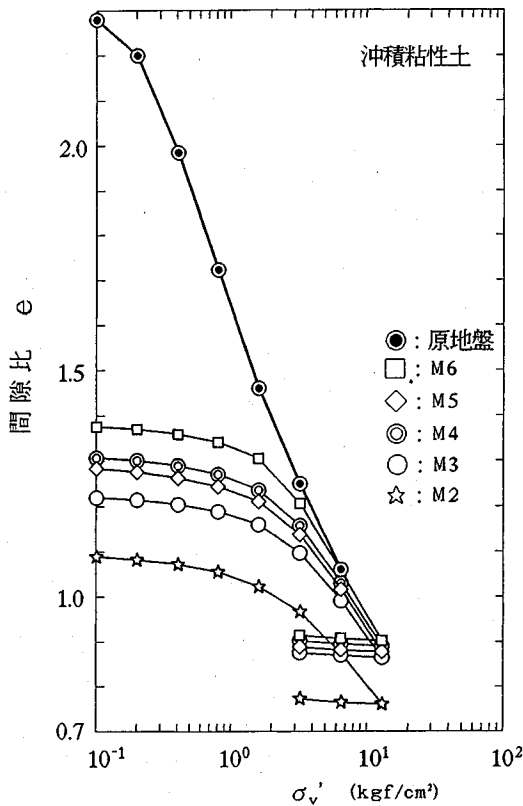


図-16 ドレーン間粘土の圧縮曲線 (冲積粘性土)

た泥水状の粘土スラリーが堆積したもので、粘土構造は完全に破壊された状態から圧密されている。一方、冲積粘性土層はサンドドレーン施工時に構造の一部が破壊された状態から圧密されたものと考えられる。冲積粘性土層の場合は、工事施工前の原地盤状態の不攪乱試料の標準圧密試験が実施されているので、その結果も

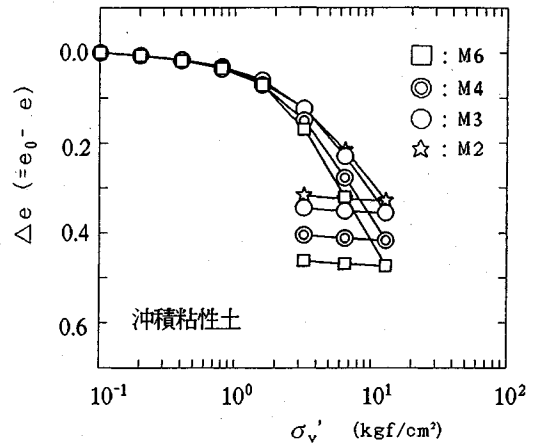


図-17 ドレーン間粘土の圧縮曲線勾配の比率

合わせて示した。両図の圧縮曲線を見ると、明らかな共通点が認められる。つまり、ドレーン近傍ほど間隙比が小さい。粘土の応力ひずみ関係に弾性を仮定すれば、圧密の最終状態では、半径方向には応力やひずみの状態は一樣になるのであるが、現場の調査結果は明らかにこれを否定している。

図-17は冲積粘性土層の $e \sim \log \sigma'_v$ 曲線の正規圧密領域の勾配を比較したものである。勾配を比較するために縦軸には試料採取時の間隙比 e_0 からの間隙比の変化分 $\Delta e (=e_0 - e)$ を採った。この結果によると、サンドドレーン近傍ほど圧縮曲線の勾配が緩やかとなっている。奥村等¹⁵⁾は単純せん断試験機で非排水の繰り返し破壊試験を行ったのち圧密試験を行い、攪乱が間隙比~圧密圧力関係に及ぼす影響を調べた。そして攪乱が大きいほど圧縮曲線の勾配が緩やかになることを示した。これを参考にすれば、サンドドレーン近傍ほど粘土構造の乱れが大きいと判断できる。また、図-15から容易に判別されるように、同様の傾向は、完全に攪乱された状態から圧密した浚渫粘性土の $e \sim \log \sigma'_v$ 曲線からも伺えるので、この現象はドレーン打設時の攪乱による影響のみではなく、サンドドレーンによる圧密変形メカニズムにも起因していると判断される。

(2) 間隙比の分布

サンドドレーンによる圧密では、等ひずみと見做せる一次元的沈下でも間隙比の分布が生じることが、前項で明らかとなった。そこで、半径方向の間隙比分布を調べてみた。図-18は浚渫粘性土の、図-19は冲積粘性土の半径方向の間隙比分布を示している。ここで、間隙比は不攪乱試料採取時の値を採った。図の横軸はサンドドレーン外周面、すなわち排水面からの距離を示している。ただし、浚渫粘性土については、バックドレーンも含めて排水距離の短い方の値とした。図から明らかなように浚渫粘性土、冲積粘性土を問わず、両者とも排水面近

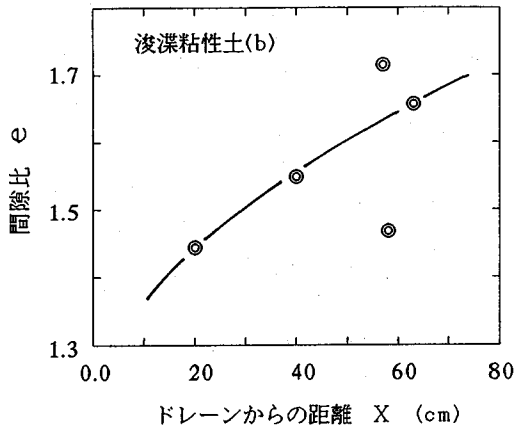


図-18 間隙比の半径方向分布 (浚渫粘性土)

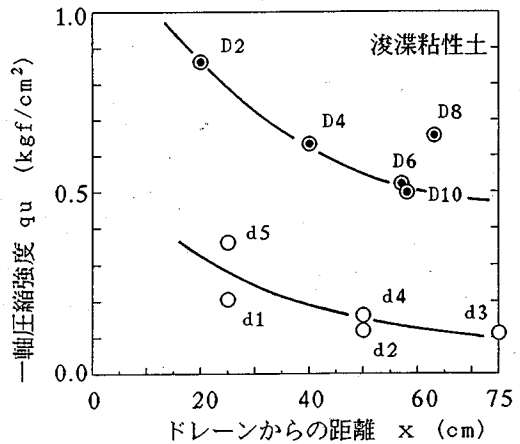


図-20 一軸圧縮強度の半径方向分布 (浚渫粘性土)

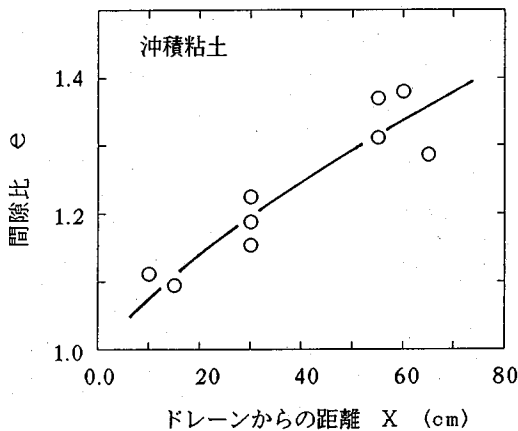


図-19 間隙比の半径方向分布 (沖積粘土)

約 1.8~3.2 となり、その差異は非常に大きい。これらの事実は、ドレーン間粘土には半径方向に非一様な応力分布が存在し、その性状はドレーン周辺粘土への応力集中となっていることを追認している。

7. 考 察

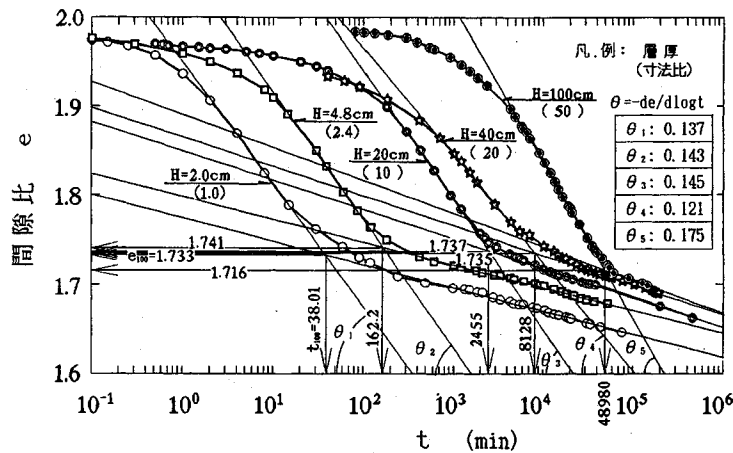
(1) 圧縮性の変化について

通常サンドドレーンのように剛性と置換率の低い改良地盤の沈下量は、最終的に応力は一様分布するとした設計法で粘土の圧縮性のみを考慮して算定する。サンドドレーン施工時の攪乱による粘土の圧縮性の変化やドレーンへの応力集中の問題は無視されてきた。しかし、図-8 に示したように、今回の調査結果からはドレーンピッチが小さいほど現場の沈下量は通常的设计法による予測結果よりも小さくなる傾向が認められる。この原因としてはピッチが小さいほどドレーンへの応力集中の影響が顕著になり、結果として粘土に作用する圧密応力の減少につながるという、複合地盤としての作用もそのひとつとして考えられる。しかしその他に図-18~図-20 に示した間隙比や一軸圧縮強度の半径方向分布性状にみられるように、サンドドレーンによる圧密では排水面側の粘土への応力集中が認められるので、ドレーンの剛性を無視しても、放射流れの粘土の圧密そのものに複合地盤と類似のメカニズムが存在すると考えられる。周知のように粘土は非線形の応力ひずみ関係をもつ材料であるので、有効応力レベルが高くなると、剛性は増し圧縮性は減少する。鉛直等ひずみの変形条件のもとでは、剛性の高い部分に応力が集中するので当然の帰結として、排水面側の粘土に応力集中した分だけ非排水面側の粘土に作用する応力は減少する。非可逆性の卓越する粘土では、この応力の配分現象は等圧縮ひずみを減少させる効果をもつ。またドレーン間での有効応力分布は、圧密が緩やかに進行するほど平均化するので、ドレーンピッチが大

傍ほど間隙比は小さく、間隙比の最大差は 0.3 前後に達している。これは排水面側ほど大きい圧密応力のもとで圧密されたことを示しており、この部分への明らかな応力集中が認められる。この間隙比の差を応力の差に換算すると、非常に大きな応力差となることは、森脇ら¹⁰⁾の解析結果を参考にしても容易に理解される。この分布性状は、サンドドレーンによる圧密のメカニズムを考える上で、無視し得ない。

(3) 一軸圧縮強度の分布

浚渫粘性土に対して行った一軸圧縮試験結果の半径方向分布を図-20 に示す。同図には、図-6 に示した浚渫層表層付近の採取試料 d1~d5 の一軸圧縮試験結果も合わせて示した。D2~D10 の q_u 分布をみると、サンドドレーン近傍ほど強度が高くなる下に凸の放物線形状を呈している。特に、ドレーン近傍での強度の増加傾向は顕著である。排水面に近い D2 と、これから離れた D10 の強度の比は約 1.8 である。d1~d5 の q_u 分布もこれと同様の傾向を示している。排水面に最も近い d1 および d5 と、排水面から最も離れた d3 の強度の比は



図—21 粘土層厚の違いと圧密曲線（一次元圧密）

大きく平均的沈下速度の遅い改良ほど有効応力分布は平均化する。したがって、沈下量は、同一荷重のもとでもドレーンピッチの大きなほど大きく小さなほど小さくなる。これが図—8に示した現象を説明するメカニズムのひとつであると考えている。

(2) 圧密速度について

a) 応力集中の影響

排水面近傍の粘土に応力集中が生じると、圧密速度が変化するメカニズムはいくつか考えられる。まずそのひとつを圧密係数 c_v の変化として考えてみよう。圧密係数 c_v は、次式で表される。

$$c_v = \frac{k}{m_v \cdot \gamma_w} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

k : 透水係数

m_v : 体積圧縮係数

γ_w : 間隙水の単位体積重量

上式は、 c_v が k と m_v の比によって定まることを示している。広範な応力変化を伴う圧密では、 m_v と k は大きく変化し k の減少率と m_v の減少率が異なる場合は、 c_v 一定の条件は成立しない。例えば k の減少率が m_v のそれより大きい場合には c_v は減少するので、 c_v 一定の場合に比べて圧密は遅延する。前述のドレーン間粘土の応力分布は、これに応じた c_v の分布を生む。特に排水面付近への応力集中は、この部分の c_v を大きく変化させ、全体の圧密速度を変化させる要因となる。ちなみに標準圧密試験結果によると、当地点の粘土は、圧密応力の増加に対して c_v 一定ないし低下するものであり c_v 一定の場合に比べて圧密は遅れる場合にあたる。標準圧密試験では、 k は計算で求め直接測定されることはない。しかし、当現場のように広範囲の応力変化と応力分布のある圧密過程を検討する場合には、 k を独立した試験で直接的に求めることの重要性が改めて問われる。

次に、応力集中によって圧密速度が変化するいまひとつの要因は、ドレーン周辺粘土の透水係数の極端な低下である。排水面周辺には圧密初期から、圧密過程を通じて、他の部分に比べて非常に透水性の低いゾーンが形成される。このゾーンを通過して連続の条件を満たしながら排水が行われるためには、この部分に高い動水勾配が生じることになる。その結果、周辺粘土の半径方向の動水勾配は低下し、間隙水圧の消散を妨げる。つまり応力集中によってもたらされる透水係数の低いゾーンの形成は、透水係数が一定な場合に比べて、粘土内の水圧分布形を異にし、圧密曲線にも影響を与えたと考えられる。

b) 攪乱効果

攪乱によって、粘土の透水係数が低下することは以前から指摘されている¹⁷⁾。今回の土質調査結果によると排水面周辺ほど粘土構造の乱れが大きい。この事は攪乱による透水係数の低下が排水面近傍ほど大きいことを意味する。前述のように、粘土構造の乱れは、サンドドレーン施工時の影響以外に、圧密メカニズムにも起因すると考えられるので、粘土の放射流れ圧密による構造の変化に、攪乱と同様の効果が存在することを予見させる。

c) ひずみ速度と圧密係数

ドレーンピッチが密なほど逆解析から求められた圧密係数が小さくなる理由を、 t_{90} との関係で整理したところ、明らかな相関が認められた。これが、サンドドレーンによる圧密のみにみられる特異な現象であるのか、あるいは圧密の速さを支配する基本的メカニズムのひとつであるのかを、別の角度から検討してみたい。

図—21は、直径6cm、高さ2cm、両面排水の標準圧密試験と、これと相似の条件で、寸法比2.4倍、10倍、20倍、50倍のOedmeter Testの結果¹⁸⁾を間隙比と経過時間の関係で整理したものである。基本的には網干ら¹⁹⁾の報告と同様のものである。図中には $\log t$ 法で求めた t_{90} の間隙比と経過時間も示した。同図の圧密曲線の最

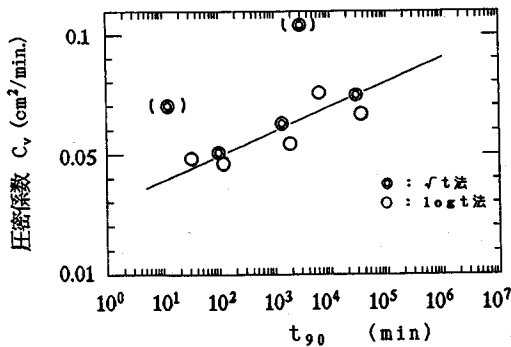


図-22 一次元圧密の場合の圧密係数と t_{90}

急勾配をみると、ひとつの特徴がみられる。それは、寸法比 20 倍のものを除くと、寸法比が大きくなるにしたがってわずかではあるが勾配が急になる傾向が認められる点である。これは、ひずみ速度の変化が、圧密係数に影響を与える可能性があることを示唆している。そこでこれらの試験結果について、サンドドレーンの場合と同様に、 t_{90} と圧密係数の関係を求めてみた。圧密係数の算定は \sqrt{t} 法と $\log t$ 法の 2 種類で行った。その結果を図-22 に示す。これを見ると、圧密係数と t_{90} の間には強い相関が認められる。 t_{90} が大きいほど、つまり平均的なひずみ速度が小さいほど圧密係数は大きくなる。これは、サンドドレーンの場合と定性的に一致する。更にこのことは、従来、未解明であった標準圧密試験結果の c_v に比べて、現場の一次元圧密の c_v は数倍大きいという事実²⁰⁾を説明している。この検討から、ひずみ速度は圧密係数に影響を与える基本的因子のひとつと推察される。

8. 結 論

一次元沈下の現場沈下実測データと土質調査結果をもとに、サンドドレーンによる圧密のメカニズムについて考察した。その結論をまとめると以下のようである。

(1) 鉛直等ひずみの放射流れの圧密では、最終的にドレーン間粘土の半径方向に一樣でない応力やひずみの分布が生じる。その分布は、排水面側の粘土への応力集中となる。これは粘土の弾塑性挙動に起因する。

(2) ドレーン間粘土の $e \sim \log \sigma'_v$ 曲線を比較すると、排水面側の粘土ほど圧縮指数が小さい。これは、排水面側の粘土ほど構造の乱れが大きいことを示す。この現象は、完全攪乱状態から圧密された浚渫粘土、構造の一部を攪乱された状態から圧密された沖積粘土ともに共通するので、施工時の攪乱のみではなく、圧密メカニズムにも起因している。

(3) ドレーン間粘土の応力分布は、鉛直ひずみに影響を与える因子となる。非線形な応力～ひずみ関係をもつ粘土では、最終的に応力が一樣分布する場合に比べて

非一樣な応力分布の生ずる方が、鉛直ひずみは小さくなる。実測沈下データでは、ドレーンピッチが小さいほど鉛直ひずみが小さい。

(4) 広範な応力変化を伴う圧密では、 m_v や k は大きく変化するので、ドレーン間粘土には応力分布に応じた m_v や k が分布し c_v が分布する。すなわち、粘土間の非一樣な応力分布は、圧密速度を変化させる因子となる。その変化の仕方は圧縮特性と透水特性によって定まる。

(5) 応力集中によって、排水面側の粘土の透水係数は周辺のそれに比して大きく低下し、一種の不透水ゾーンを形成するので、透水係数が一定な場合に比べると、圧密は遅れる。つまり弾性圧密論で考えるよりも実際の粘土の圧密は遅れる。

(6) 実測沈下曲線を逆解析して求めた圧密係数は、平均的なひずみ速度の大きくなる圧密ほど、小さくなる傾向を示す。この傾向は、供試体の大きさの異なる複数の一次元圧密沈下データからも認められた。この結果よりひずみ速度は、圧密係数を変化させる因子のひとつではないかと判断される。これは、サンドドレーンピッチが小さい方が、大きい場合に比して圧密係数が小さくなったり、現場の一次元圧密速度は、標準圧密試験で求めた圧密係数で算定したそれよりも数倍早いという事実を定性的に説明している。

謝 辞：最後に、本研究を進めるにあたり、中国電力(株)土木部森平猛氏、一瀬泰啓氏をはじめとする工事関係者各位には、土質試料採取等に際して多大なる御協力を頂いた。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) R.A. Barron : Consolidation of fine-grained soils by drain wells, Transactions A.S.C.E. Vol.113, No.2346, pp.718~742, 1948.
- 2) 吉國洋：多次元圧密理論とその軸対称問題への適用，東京工業大学博士論文，1973年。
- 3) 赤井浩一ほか：サンドドレーンによる圧密の模型実験と考察，第13回土質工学研究発表会，土質工学会，pp.233~236, 1978年。
- 4) 尾上篤生：パーチカルドレーン周辺の攪乱帯の透水係数について，第16回土質工学研究発表会講演集，土質工学会，pp.2015~2018, 1991年。
- 5) 例えば S.Hansbo : Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains, Proc. of the 10th I.C.S.M.F.E., Vol.3, pp.677~682, 1981.
- 6) 赤井浩一ほか：サンドドレーンの打設方法と圧密効果に関する室内実験，第15回土質工学研究発表会講演集，土質工学会，pp.261~264, 1980年。
- 7) 赤井浩一ほか：サンドドレーン打設による圧密効果に関する室内実験，第16回土質工学研究発表会講演集，土質工学会，pp.233~236, 1981年。
- 8) 例えば，土質工学会：第15回土質工学シンポジウム「軟弱地盤改良工法とその効果」，1970。

- 9) 柴田勝也：柳井発電所埋立工事の概要，電力土木 No. 200, 1986 年。
- 10) 住岡宣博他：浚渫粘性土による埋立地盤の沈下管理，土質工学会誌「土と基礎」土質工学会，Vol. 39, No. 7, pp. 31～36, 1991 年。
- 11) 森平猛・新谷登・田中英児：柳井火力発電所土地造成に伴う地盤改良，電力土木，No. 211, 1987 年。
- 12) H.Monden : A New-time-fitting method for settlement analysis of foundation on soft clays, Memoir. Faculty of Eng'g, Hiroshima Univ. 2-1, pp.21～29, 1963.
- 13) 網干寿夫・石井敬一・井上年行：太田川流域下水道西部浄化センター地盤改良工事に伴う情報化工，土質工学会誌「土と基礎」，土質工学会，Vol. 30, No. 7, pp. 37～44, 1982 年。
- 14) Uehara, H. et al. : Case study of vertical Drain in Shimajiri marine clay, Proc. of the International conference on geotechnical engineering for coastal development, Theory and Practice on Soft Ground, Port and Harbour Research Institute, Vol.1, pp.411～416, Yokohama Japan, 1991.
- 15) 奥村樹郎・梅田裕史・成田実：粘土試料の攪乱に関する研究（第 3 報），港湾技術研究所報告，10 卷，1 号，pp. 77～106, 1971 年。
- 16) 森脇武夫ほか：飽和粘土の K_0 値に関する実験的研究，土質工学会論文報告集，Vol. 28, No. 2, pp. 205～215, June, 1988.
- 17) 例えば，L.Casagrande, S. Poulos : On the effectiveness of sand drains, Can.Geotech, Vol.6, pp.287～326, 1969.
- 18) 二井岡均：一次元圧密のスケールエフェクトに関する実験的研究，広島大学修士論文，1973 年。
- 19) 網干寿夫・松田博：粘土の二次圧密と沈下解析，土質工学会誌「土と基礎」，土質工学会，Vol. 29 No. 3, pp. 19～24, 1981 年。
- 20) 網干寿夫：軟弱地盤の圧密沈下に関する 2, 3 の考察，超軟弱地盤に関するシンポジウム発表論文集，土質工学会，pp. 13～18, 1977 年。

(1992. 5. 18 受付)

EXAMINATION ON CONSOLIDATION MECHANISM OF A SOFT CLAY LAYER IMPROVED BY SAND DRAINS

Nobuhiro SUMIOKA and Hiroshi YOSHIKUNI

Deformation characteristics of a soft clay deposit improved by sand drains were examined based on a set of field data. Stress concentration takes place along the drainage boundaries of the clay due to the re-distribution of stresses during consolidation process, resulting in non-uniform distribution of stress and strain even after the primary consolidation. This phenomenon can not be fully explained by theories of elastic consolidation and may be considered to be stemmed from the elasto-plastic characteristics of the clay. It forms one of the factors affecting the amount of settlement and the value of coefficient of consolidation (C_v) depending upon a given drain pitch. Observed also was a trend that the higher the average strain rate is, the smaller the C_v value becomes.