

# 複合地盤の改良形式による圧密特性の相違

石崎仁<sup>1</sup>・中井照夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 住友大阪セメント(株) ミノト・コンクリート研究所 (〒551 大阪市大正区南恩加島 7-1-55)

<sup>2</sup>正会員 工博 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

バーチカルドレーン工法ではドレーン材を杭状に配置する改良形式が用いられているが、この杭状改良が圧密促進効果に最も合理的な形式というわけではない。本研究では、粘土中に砂材を杭状および格子状に配置した複合地盤要素の圧密試験を行い、低置換率では格子状改良の方が杭状改良より速く圧密が進行し、高置換率では逆になるという現象や格子状改良は杭状改良より沈下量が小さいなどの結果を得た。土の変形特性を考慮した構成式を用いて解析すれば、この圧密特性は妥当に予測できるものであり、局部荷荷を受ける複合地盤でも同様の現象が生ずることを示す。さらに、種々の条件におけるシミュレーション結果より、格子状改良の設計計算に関する簡便計算法を提案した。

**Key Words :** composite ground, sand, soft clay, vertical drain, construction type, consolidation, constitutive equation, FEM analysis

## 1. はじめに

深い軟弱地盤の改良工事では、サンドドレーン工法やサンドコンパクションパイル工法のように杭状の改良材を定間隔に設置して置換する施工法が多く用いられる。これらの工法では、杭径と設置間隔より、等価円柱モデルに換算して設計が行われる。また、ペーパードレーン工法やプラスチックドレーン工法において、改良材の平面形状は矩形でも、設計は等価円柱モデルで行われるので、杭状改良形式に含まれると考えられる。現状では、杭状改良形式は施工的にも効率のよい方法と言える。ただし、ドレーン工法は置換材の応力分担を期待しない。一方、深層混合処理工法は、荷重条件に対して有効な改良形状に施工できるということで、建設費高を克服している。深層混合処理工法では、図-1に示すように、杭状、格子状あるいは櫛歯状改良など多種類の改良形式が採用されている。模型実験によると、同じ置換率では、杭状改良より格子状改良の方が変形に対する抵抗性が大きいという報告もある(たとえば、塚口ら<sup>1)</sup>)。

しかし、広範囲の地盤を改良する場合や長期間の支持力安定性を考えると、原地盤の圧密による強度増加を期待する工法は信頼性が高い。本文では、砂材置換による圧密促進工法において、杭状改良形式と格子状改良形式を取り上げ、それら改良形式が地盤改良効果(圧密速度の促進および沈下量の低減)におよぼす影響を、複合地盤要素による実験を行って調べた。さらに、その結果が地盤材料の特性を考慮した構成式により妥当に表現でき

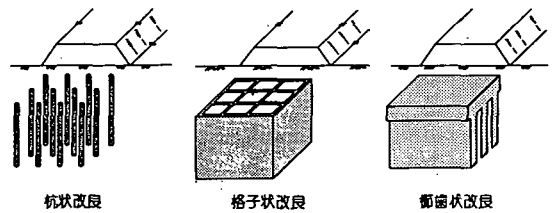


図-1 地盤改良形式の例

ることを示し、改良形式と置換率に着目した合理的な地盤改良の考え方を述べる。杭状改良形式、たとえば、サンドドレーン工法を前提とした圧密実験は以前から多く行われている。しかし、それらの内容は圧密定数(特に、水平圧密係数 $C_h$ )の同定に関するもので、最近の実験および解析的研究として小林ら<sup>2)</sup>の報告がある。一方、格子状改良形式の圧密実験に関する報告は見当たらないが、外向き放射排水は三軸圧縮試験における部分排水状態を推定するために用いられることがある(たとえば、関口ら<sup>3)</sup>)。

通常、バーチカルドレーン工法はドレーン材の密配置により排水長が短くなって圧密を促進すると説明されているが、排水長の違いだけで圧密速度を比較できるのは排水面積が等しい場合である。同じ改良ピッチ(等価有効円径)の杭状改良および格子状改良地盤において、ドレーン材の置換率が小さい場合、両改良地盤の排水長は大差ないが、格子状改良地盤の排水面積は杭状改良地盤

表-1 豊浦砂の物理特性

$D_{50}$	$U_c$	$G_s$	$e_{max}$	$e_{min}$
0.2 mm	1.3	2.65	0.95	0.58

表-2 藤の森粘土の物理特性

$W_L$	$W_P$	$I_P$	$G_s$
41 %	23 %	18 %	2.67

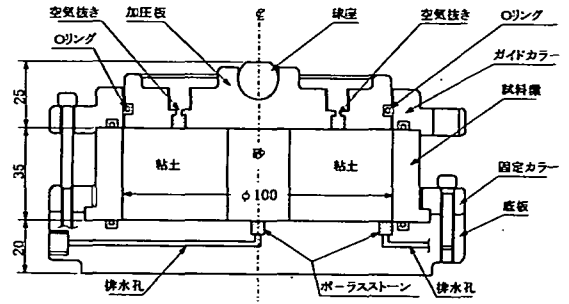


図-4 複合供試体用の圧密容器

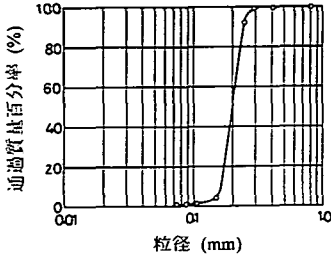


図-2 豊浦砂の粒径加積曲線

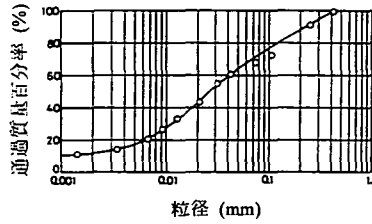


図-3 藤の森粘土の粒径加積曲線

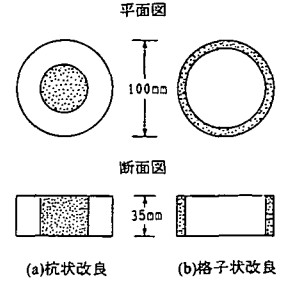


図-5 地盤改良形式の例

よりかなり大きい(図-5参照)。この場合、明らかに格子状改良地盤の方が速く圧密する。置換率が50%を超えると、杭状改良地盤の排水面積は格子状改良地盤より大きく、かつ排水長は短くなるため杭状改良地盤の圧密の方が速くなる。中程度の置換率では、ドレーン材の剛性は圧密速度に複雑に影響するため、ドレーン材と粘土の応力・変形における相互作用について考察する必要がある。圧密解析では、内向き排水はBarron解、外向き排水はSilveira解がよく用いられるが、ドレーン材の剛性による相互作用は考慮できない。

## 2. 試料と試験装置

### (1) 試料土

本実験では、改良材に密な砂、軟弱地盤に正規圧密粘土を想定し、試料土として豊浦砂と藤の森粘土を用いる。豊浦砂および藤の森粘土の物理特性を表-1, 2に、粒度分布を図-2, 3に示す。正規圧密粘土は乾燥粉末に水を加え(含水比で約80%), ミキサーで十分練り返した後、ステンレス製の大型圧密容器(内径25cm×高さ23cm)に流し込んで、 $K_v$ 圧密したものである。最終圧密圧力 $p=49\text{kPa}$ ( $=0.5\text{kgf/cm}^2$ )までを4段階に分け、各圧密段階で一次圧密がほぼ終了したのを確認して、次段階の圧密圧力を載荷した。最終圧力での圧密が終了した後、吸水膨張させずに除荷し、圧密容器より切出して用いた。切出し後の粘土の含水比はほぼ $w=34\%$ であった。砂は煮沸により飽和させて用いた。

### (2) 圧密試験装置と圧密圧力

供試体寸法は $\phi 100\text{mm} \times H35\text{mm}$ で、圧密容器の概要を図-4に示す。加圧板と圧密リングの間はOリングによりシールされているので、加圧板と圧密リングの隙間から排水することはなく、砂材の設置位置に設けられた排水孔により排水される。したがって、粘土部の排水は砂材を通してのみ行われるようになっている。

載荷は通常の標準圧密試験装置を用い、圧密圧力は $p=28.3\text{kPa}, 56.5\text{kPa}, 113\text{kPa}, 226\text{kPa}, 452\text{kPa}, 904\text{kPa}$ の6段階とした。粘土試料作製時の圧密圧力 $p=49\text{kPa}$ であるので、第2段階の圧密圧力( $p=56.5\text{kPa}$ )以降が正規圧密状態の試験となる。圧密圧力は標準圧密試験に対して、供試体の断面積比率( $(6/10)^2=0.36$ )だけ異なるものの、圧密圧力増加率 $\Delta p/p=1$ は同じである。第1段階の載荷時間は24時間以上とし、第2段階以降はほぼ12時間間隔とした。

厳密には、格子状改良単位の平面形状は正方形であるが、本文では、等価な平面面積の円形モデルに換算して、実験および解析を行うことにする。

### (3) 供試体の作製方法

ここでは、粘土中に砂材が杭状および格子状に置換された複合地盤要素を想定しており、杭状および格子状改良の供試体の断面概要は図-5のようになる。本文で用いる置換率 $A_s$ は、供試体全体積に対する砂材の体積比率のことで、この場合は平面積比率と等しい。

表-3 複合供試体の寸法諸元

置換率 As(%)	高さ (cm)	影響径 (cm)	杭状改良 砂杭径(cm)	格子状改良 粘土径(cm)
12.5	3.5	10.0	3.54	9.35
25			5.00	8.66
50			7.07	7.07

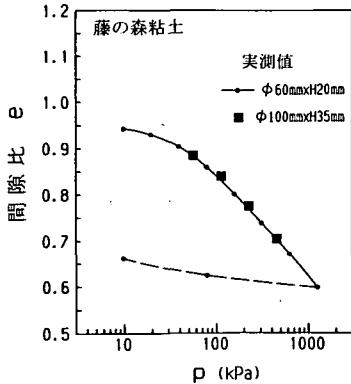


図-6 藤の森粘土の  $e \sim \log(p)$

杭状改良形式の供試体は、まずカッターリングにより、 $\phi 100\text{mm} \times H35\text{mm}$  の粘土試料を圧密リング中に成形し、ドリルとワイヤーソーを用いて、中心部に設置換率の円孔を削孔する。そして、圧密リングを圧密容器にセットし、円孔部に砂を突き棒により所定間隙比 ( $e = 0.68$ ) になるように詰めた。格子状改良形式の場合は、トリマーとマイターボックスにより、所定外径に成形した粘土円板 (高さ 35mm) を圧密容器中心にセットし、圧密リングと粘土円板の間に砂を所定間隙比になるように詰める。粘土および砂が圧密リングや加圧板などと接触する面にはシリコングリースを塗り、摩擦を極力低減するようにした。置換率は  $As=12.5\%$ ,  $25\%$ ,  $50\%$  の 3 種類とし、各置換率における複合供試体の寸法諸元を表-3 に示す。

(4) 圧密試験装置の検証

本圧密試験装置は加圧板と圧密リングの間に Oリングがあるため、Oリングの摩擦抵抗により載荷荷重が設定通りに供試体に伝達されない可能性がある。そこで、粘土のみの試料により試験を行い、従来の標準圧密試験装置 (供試体寸法  $\phi 60\text{mm} \times H20\text{mm}$ ) で得られた結果と比較し、摩擦抵抗の影響を調べた。さらに、両試験装置の間には、供試体寸法および排水長の違いによる影響も考えられる。

図-6 は間隙比～圧密圧力 ( $e \sim \log(p)$ ) 関係で、図中の ■ プロットは本圧密試験装置による実測値、● プロットは標準圧密試験装置による実測値である。図より、両者の圧縮指数  $C_c$  はほぼ一致しているから、試験装置や供試体寸法などの影響はほとんどないと言える。

表-4  $t_{ij}$ -sand モデルの  
パラメータ

$C_c$	$0.84 \times 10^{-2}$
$C_e$	$0.60 \times 10^{-2}$
$\alpha$	0.85
$D_r$	-0.6
$m$	0.3
$\nu_e$	0.0
$\phi$ (comp.)	$40.5^\circ$

表-5  $t_{ij}$ -clay モデルの  
パラメータ

$\lambda / (1 + e_0)$	$5.08 \times 10^{-2}$
$\kappa / (1 + e_0)$	$1.12 \times 10^{-2}$
$\alpha$	0.7
$\nu_e$	0.0
$\phi$ (comp.)	$33.7^\circ$

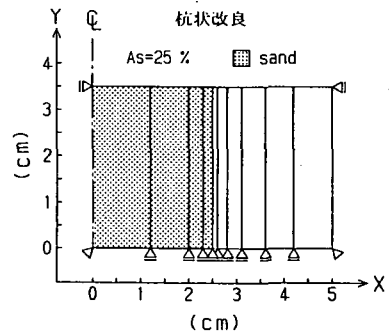


図-7 軸対称 FEM の要素分割例

3. 複合供試体による圧密試験結果

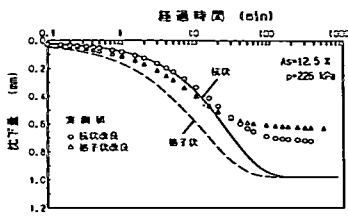
(1) 解析モデル

著者らは、”砂杭を含む粘土” (本文中では杭状改良された粘土に対応する) の軸対称応力下の種々の試験を行い、それら実測値は土特有の変形特性を考慮した構成式により妥当に説明できることを検証している<sup>4)</sup>。その結果、解析に用いる構成式には、

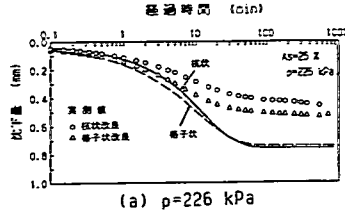
- 1) 砂における正・負のダイレタンシーおよび正規圧密粘土における負のダイレタンシー
- 2) 変形・強度に及ぼす中間主応力の影響
- 3) ひずみ増分方向の応力経路依存性

などを表現できる必要があることを示した。本文中では、砂に  $t_{ij}$ -sand モデル<sup>5)</sup>、粘土に  $t_{ij}$ -clay モデル<sup>6)</sup> を用いるが、両モデルとも上述の変形特性を適切に表現できる弾塑性構成式である。ただし、二次圧密による時間効果は考慮していない。表-4, 5 は計算に用いた材料パラメータであるが、表中の  $C_c, C_e, \lambda, \kappa$  は圧縮・膨張指数、 $e_0$  は初期間隙比、 $\phi_{(comp.)}$  は三軸圧縮排水断試験の内部摩擦角、その他はダイレタンシー特性に関するものなどである。この値は従来より  $t_{ij}$ -sand および  $t_{ij}$ -clay モデルの検証に用いているものであり、終始一貫した値である<sup>5), 6)</sup>。また、圧密試験結果より、粘土の透水係数  $k$  と間隙比増分  $\Delta e$  の間に、以下の関係が得られている<sup>7)</sup>。

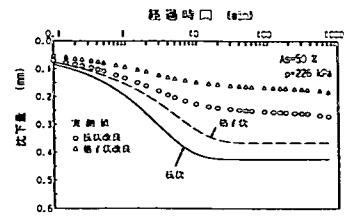
$$k = k_0 \cdot \exp(\Delta e / C_k) \quad (1)$$



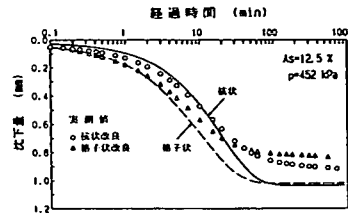
(a)  $p=226$  kPa



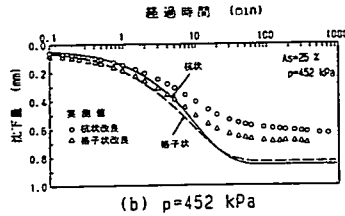
(a)  $p=226$  kPa



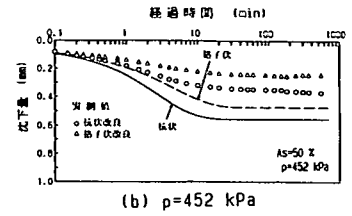
(a)  $p=226$  kPa



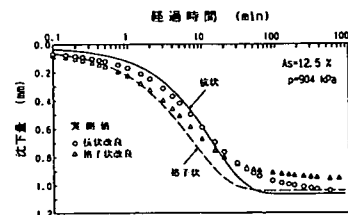
(b)  $p=452$  kPa



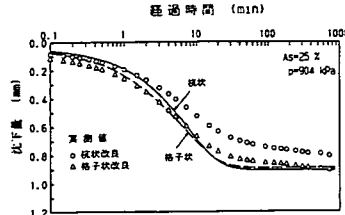
(b)  $p=452$  kPa



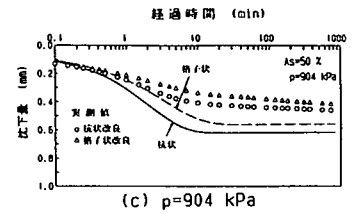
(b)  $p=452$  kPa



(c)  $p=904$  kPa



(c)  $p=904$  kPa



(c)  $p=904$  kPa

図-8 沈下量 $\sim\log(t)$ 関係 ( $A_s=12.5\%$ )

図-9 沈下量 $\sim\log(t)$ 関係 ( $A_s=25\%$ )

図-10 沈下量 $\sim\log(t)$ 関係 ( $A_s=50\%$ )

ここに、 $C_k$  : 透水係数指数  $C_k=0.199$

$k_0$  : 初期透水係数  $k_0=1 \times 10^{-5}$  cm/min

ただし、圧密圧力  $p=78.5$  kPa

解析値は圧密連成 (Biot の圧密式) の軸対称 FEM による計算値とするが、砂部は透水係数が著しく大きいので、常に排水状態としている。軸方向の要素分割は 1 層であるが、半径方向には砂部 4 要素、粘土部 6 要素に分割する (図-7 参照)。各要素は等軸ひずみとし、粘土部の排水境界は砂部との境界面のみとする。粘土試料の圧密圧力  $p=49$  kPa であるので、砂および粘土の初期鉛直応力は第 2 段階の圧密圧力と同じ応力  $\sigma_v=56.5$  kPa とし、初期  $K_v$  値は 0.5 とする。計算は圧密圧力  $p=113$  kPa, 226 kPa, 452 kPa, 904 kPa に対して行うが、荷重載荷時は各粘土要素を非排水状態として解析する。

## (2) 複合供試体の沈下量 $\sim$ 時間関係

図-8 は置換率  $A_s=12.5\%$  で、圧密圧力  $p=226$  kPa, 452 kPa, 904 kPa における沈下量 $\sim$ 時間関係である。各図中のプロットは実測値 (○は杭状改良, △は格子状改良)、曲線は解析値 (実線は杭状改良, 破線は格子状改良) である。図中の実測値に注目すると、各圧密圧力段階とも、格子状改良 (△) の方が杭状改良 (○) より明らかに速く圧密が進行している。また、最終沈下量は杭状

改良の方がやや大きい。全沈下量に対する両者の差はわずかである。一方、解析結果を見ると、格子状改良 (破線) の圧密速度は杭状改良 (実線) よりかなり速く、杭状改良の最終沈下量は格子状改良よりわずかに大きくなっており、これらは実測値の傾向と同じである。圧密圧力  $p=226$  kPa での実測沈下量は解析値よりかなり小さいのであるが、圧密圧力が大きくなると実測値は解析値に近づいている。これは、圧密圧力が小さい段階では、供試体作製時の乱れや初期応力の影響がまだ残っているためと思われる。

図-9 は置換率  $A_s=25\%$  における沈下量 $\sim$ 時間関係である。各圧密圧力段階の最終沈下量に注目すると、解析結果では、杭状改良 (実線) は格子状改良 (破線) よりわずかに大きい程度であるが、実測値では、逆に格子状改良 (△印) は杭状改良 (○印) より大きくなっている。しかし、圧密速度について見ると、実測値および解析値とも格子状改良の方が杭状改良より速い。

図-10 は置換率  $A_s=50\%$  における沈下量 $\sim$ 時間関係である。各圧密圧力段階の実測沈下量では、格子状改良 (△印) は杭状改良 (○印) より明らかに小さい。解析値は実測値と差はあるものの傾向は同じである。圧密速度に関しては、両改良最終沈下量が異なり、図-10 の曲線からでは判断するのは難しいが、次節の  $t_{50}$  (圧密

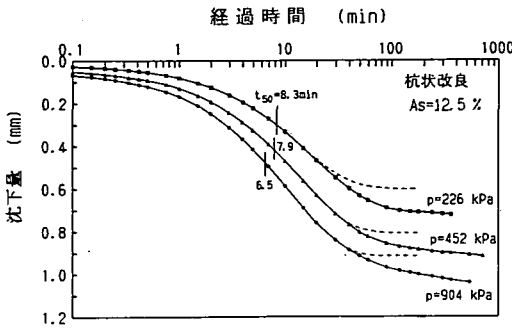


図-11 沈下量曲線における $t_{50}$ の決定例

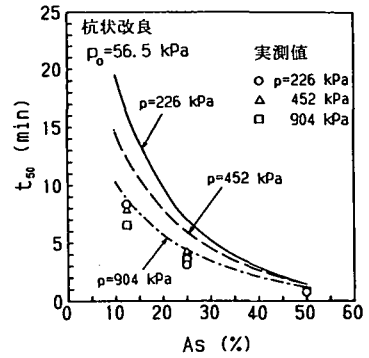
度50%に達する時間)の比較でみれば杭状改良の方が速い。

複合供試体はマクロ的には一次元圧密変形であるが、砂部および粘土部は水平方向にも変形するので、砂部の変形の不均一性(例えば、砂杭が樽状に変形する)が生ずる可能性がある。不均一性の要因として、供試体の作製精度や試料土と圧密容器内面の摩擦などが考えられる。置換率(砂部の体積)が大きくなると、砂部の不均一な変形が複合供試体全体に及ぼす影響も大きくなる。この不均一性が、置換率 $As=25\%$ 、 $50\%$ の実測沈下量と解析値の差の一因であると考えられる。解析において、不均一性の影響を考慮するためには、軸方向にも要素分割し、ジョイント要素などで周面摩擦を表現することができるが、不均一性の初期分布や摩擦の構成則が必要となるので、本文では理想条件下の解析値と比較している。

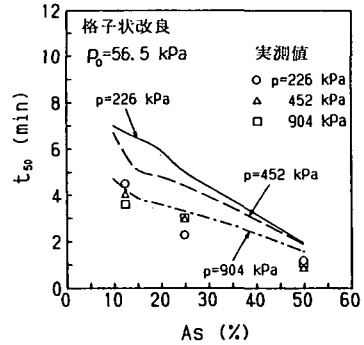
図-8~10より、低置換率では格子状改良の圧密速度は杭状改良より速いが、高置換率では逆に杭状改良の方が速くなるのがわかる。一方、解析による最終沈下量は低置換率ではほぼ同じ、高置換率では格子状改良の方が杭状改良より小さくなっており、置換率 $As=25\%$ 以外の実測値は解析値と同傾向となっている。置換率 $As=25\%$ は供試体作製時の乱れが大きかったものと思われる。

### (3) 複合供試体の $t_{50}$ 関係

前節では沈下量の経時変化により圧密速度の差を比較したが、ここでは、圧密速度の指標として沈下量に対する圧密度50%の時間 $t_{50}$ を取り上げ、改良形式および置換率と $t_{50}$ の関係について述べる。標準圧密試験では、テルツァギー解の圧密定規より $t_{50}$ を求めるが、杭状改良および格子状改良は鉛直・水平両方向に変形するために圧密曲線の形状は、鉛直変形のみでのテルツァギー解とかなり異なる。そこで、杭状改良および格子状改良の圧密定規を別途作成して $t_{50}$ を求める。例えば、杭状改良の圧密曲線は、中空円筒弾性体の一次元圧密をBiotの圧密解より作成する。すなわち、内周および外周の水平変位を拘束、軸方向は等ひずみ、内周面のみ排水として解いた時間~沈下量関係を圧密定規とし、経時沈下量が最終沈下量の50%になる時間を $t_{50}$ とする。ただし、圧



(a) 杭状改良



(b) 格子状改良

図-12  $t_{50}$ ~置換率関係

密定規は径比 $n$ ( $\equiv d_e/d_w, d_w$ ; ドレーン径,  $d_e$ ; 影響径)により異なるので、置換率 $As$ ( $\equiv 1/n^2$ )毎に作成する必要がある。格子状改良の圧密曲線は、中実円柱弾性体の一次元圧密を外周面のみ排水として解いた時間~沈下量関係を用いる。図-11に $t_{50}$ の決定例を示す。

図-12は圧密圧力 $p=226\text{kPa}$ 、 $452\text{kPa}$ 、 $904\text{kPa}$ における $t_{50}$ ~置換率 $As$ 関係で、(a)は杭状改良、(b)は格子状改良のものである。図中のプロットは実測値、曲線が解析値である。杭状改良では、圧密圧力が小さい場合、各置換率の実測 $t_{50}$ は解析値よりかなり速いが、圧密圧力 $p=904\text{kPa}$ における実測値は解析値とよく合っている。また、置換率が大きくなると、 $t_{50}$ の実測値および解析値とも急激に速くなるのがわかる。格子状改良では、低置換率における実測 $t_{50}$ および解析値は杭状改良よりかなり速い。 $t_{50}$ の実測値と解析値の対応状況は杭状改良の場合と同様であるが、置換率増加にともなう $t_{50}$ の減少は杭状改良ほど急激ではない。

図-12で、低圧密圧力での実測値と解析値の対応がよくないのは、供試体作製時の乱れによる影響と思われるが、解析値は実測値の傾向をよく表していると言える。

図-13は格子状改良と杭状改良の $t_{50}$ 比~置換率 $As$ 関係である。置換率 $As=50\%$ を除けば、各圧密圧力での実

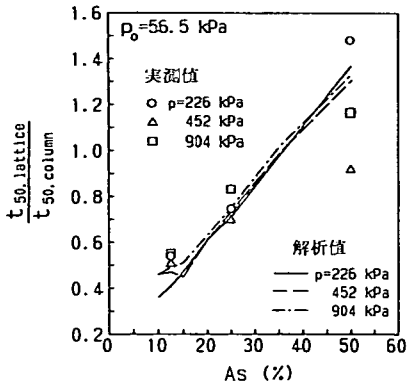
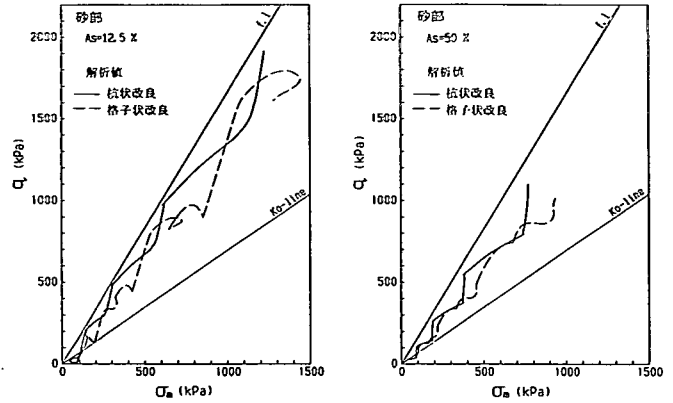
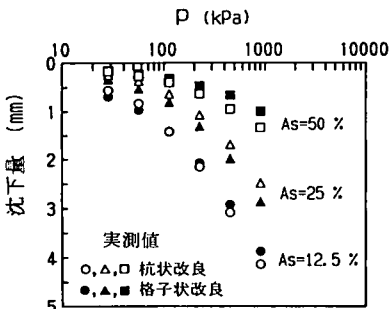


図-13 格子状改良と杭状改良の  
 $t_{50}$  比～置換率関係

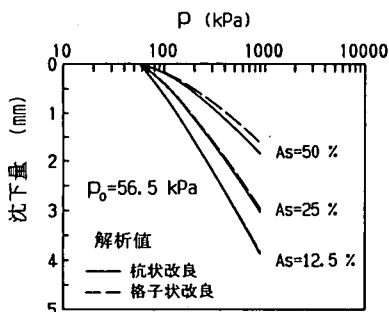


(a)  $As=12.5\%$  (b)  $As=50\%$

図-15 砂部の有効応力経路



(a) 実測値



(b) 解析値

図-14 沈下量～ $\log(p)$ 関係

測値 (図中プロット) と解析値 (図中曲線) は良く一致している。影響径が同じならば、置換率がおおよそ  $As < 35\%$  以下では、格子状改良の圧密速度は杭状改良より速く、置換率が小さいほどその差が顕著になることがわかる。すなわち、圧密速度の観点から見れば、低置換率ほど格子状改良形式が有利ということになる。

#### (4) 複合供試体の沈下量～圧密圧力関係

図-14 (a) は複合供試体 (置換率  $As=12.5\%, 25\%, 50\%$ ) の実測沈下量～ $\log(p)$  関係である。図中の白プロット (○, △, □) は杭状改良, 黒プロット (●, ▲, ■) は格子状改良である。同じ圧密圧力では、砂部の剛性により、置換率の大きいほど沈下量は小さくなっている。また、置換率  $As=25\%$  を除けば、格子状改良の沈下量は杭状改良より小さい。図-14 (b) は同関係の解析値で、図中実線は杭状改良, 破線は格子状改良である。解析は正規圧密状態で計算しているため、初期鉛直応力  $p=56.5$  kPa 以降の関係を示しているが、解析値は実測値 (図-14 (a)) とよく対応していると言える。

#### 4. 複合地盤の一次元圧密に関する解析的考察

この節では、置換率と杭状および格子状の改良形式が、圧密変形および圧密速度におよぼす影響を数値解析結果により考察する。

##### (1) 砂部および粘土部の応力～変形特性

図-15 は砂部の有効応力経路を偏差応力  $q$  ～平均主応力  $\sigma_m$  で表したものである。図-15 (a), (b) は置換率  $As=12.5\%, 50\%$  で、図中実線は杭状改良, 破線は格子状改良の応力経路である。両図より、格子状改良は複雑な応力経路を示しているが、概略的には杭状改良とほぼ同じ応力比の異方圧密である。置換率  $As=12.5\%$  の応力  $q, \sigma_m$  は  $As=50\%$  より大きくなっているが、これは砂部と粘土部の応力分担によるものである。杭状改良形式の三軸圧縮試験<sup>4)</sup>では、置換率が小さいほど砂部に大きな

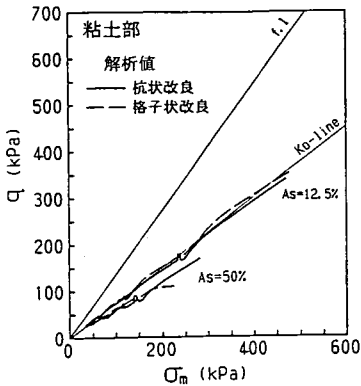


図-16 粘土部の有効応力経路

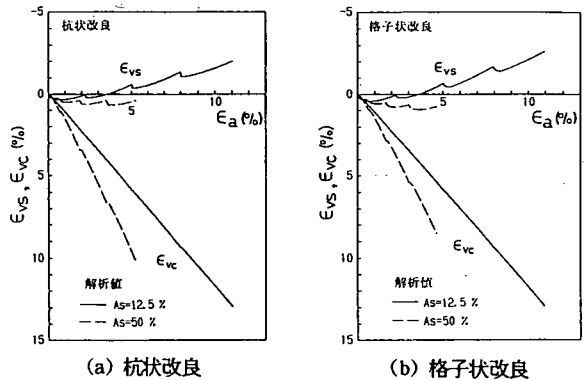


図-17 砂、粘土部の体積ひずみ～軸ひずみ関係

応力が集中しており、一次元圧密でも応力分担は置換率に依存することがわかる。

図-16は粘土部の有効応力経路であるが、杭状改良および格子状改良ともほぼ単調な異方圧密となっている。置換率  $As=12.5\%$  では、両改良の最終圧密時の応力  $q$ 、 $\sigma_m$  はほぼ同じ値であるが、 $As=50\%$  では格子状改良の  $q$ 、 $\sigma_m$  は杭状改良より小さい。複合地盤全体の变形量の多くは粘土部の变形量であるから、置換率  $As=50\%$  の応力  $q$ 、 $\sigma_m$  の差は複合地盤全体の变形量の差に表れてくる。

図-17(a), (b)は杭状改良、格子状改良における砂部の体積ひずみ  $\epsilon_{vs}$ 、粘土部の体積ひずみ  $\epsilon_{vc}$ ～軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係である。図中の実線は置換率  $As=12.5\%$ 、破線は  $As=50\%$  である。両図より、置換率  $As=12.5\%$  の体積ひずみ～軸ひずみ関係はほぼ同じであるが、 $As=50\%$  の格子状改良における粘土部の最終体積ひずみは、杭状より2%も小さい。これは、前述の粘土部の応力状態の差によるものである。

マクロ的には同じ一次元圧密変形であるが、同置換率の杭状改良と格子状改良では、砂部および粘土部の応力変化が異なり、応力分担や変形量に違いが生ずる。したがって、複合地盤の解析には、3次元の任意応力経路の变形特性をよく表現できる構成式を用いる必要がある。さらに、杭状改良地盤の解析において、砂杭を砂壁に等置換した2次元解析がよく見られるが、このような手法では、同じ置換率における杭状改良と格子状改良の相違を表現できない。

## (2) 改良形式による圧密速度の相違

実験(図-13)によれば、置換率  $As=35\%$  以下では、格子状改良の  $t_{50}$  は杭状改良より小さい。すなわち、 $t_{50}$  を圧密速度の指標とすれば、格子状改良は杭状改良より圧密速度が速いということになる。さて、実験で用いた粘土はシルト分が多く、実工事で扱う軟弱粘土に比べて

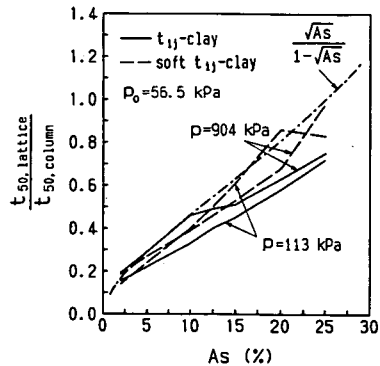


図-18 格子状改良と杭状改良の  $t_{50}$  比～置換率関係

かなり圧縮性が小さいので、粘土の圧縮性を5倍にした場合の結果と前節の結果を合せて、改良形式～置換率～ $t_{50}$  の関係について述べる。粘土の圧縮性を大きくするために、 $t_{ij}$ -clay モデルの材料パラメータ  $\lambda / (1+e_0)$  および  $\kappa / (1+e_0)$  の値を各々5倍する。 $t_{ij}$ -clay モデルでは、 $\lambda / (1+e_0)$  と  $\kappa / (1+e_0)$  の値が変化しても、その比 ( $\equiv \lambda / \kappa$ ) が同じであればストレス・ダイラテンシー関係や非排水せん断時の有効応力経路および強度は変わらない。透水パラメータ  $k_0$  および  $C_k$  も5倍すれば、圧密係数の変化をほぼ同じにすることができる(付録1参照)。ただし、砂材の材料特性は変えない。

通常、サンドドレーン工法の径比は  $n=3\sim 10$  程度である。一方、圧密促進効果をも期待するサンドコンパクションパイル工法は、最近  $As < 25\%$  の低置換率であることが多いので、置換率  $2\% \leq As \leq 25\%$  の計算結果に基づいて考察する。計算条件は3.(1)とすべて同じである。

図-18は圧密圧力  $p=113\text{kPa}$ 、 $904\text{kPa}$  における格子状改良と杭状改良の  $t_{50}$  比～置換率関係で、図中実線は  $t_{ij}$ -

clayモデル、破線は圧縮性が5倍大きい  $t_{ij}$ -clayモデル (以下、soft  $t_{ij}$ -clayモデルと呼ぶ) の結果である。なお、一点鎖線および二点鎖線については後述する。図より、ほぼ置換率  $As > 10\%$  では、soft  $t_{ij}$ -clayモデルの場合の  $t_{50}$  比は  $t_{ij}$ -clayモデルの場合より大きい。置換率とともに  $t_{50}$  比が大きくなる傾向は同じである。また、置換率  $As < 25\%$  では、両 clayモデルの  $t_{50}$  比は1より小さい。すなわち、粘土の圧縮性に関わらず、格子状改良の  $t_{50}$  は杭状改良より速いことになる。ここで述べた圧縮性の異なる両 clayモデルが実際の軟弱粘土を包括できると仮定すると、圧密速度の点では格子状改良が有利であり、置換率が小さいほど杭状改良との有利差が大きくなる。ただし、これらの結果は両改良形式の影響径が同じ場合について言えることである。

低置換率では、両改良の粘土部の半径方向排水長は大差ないが、格子状改良の排水(砂部との境界)面積は杭状改良に比べてかなり大きい(図-5参照)ので、格子状改良の圧密が杭状改良より速くなることは容易に理解できる。一方、置換率  $As = 50\%$  で、両改良形式の排水面積は同じになるが、格子状改良の排水長は杭状改良より長いので、杭状改良の方が速く圧密する。実験および解析によると、置換率  $As = 35\%$  付近で両改良の  $t_{50}$  が等しいが、この範囲では、排水面積、排水長および砂と粘土の応力~変形特性が複雑に影響する。

### (3) 格子状改良における圧密の簡便計算法

現行の簡便設計法では、パーチカルドレーン工法の圧密計算は Barron の等ひずみ解を用いて行われている(たとえば、文献8)などが、Barron 解が適用できるのは杭状改良形式の場合だけである。また、パーチカルドレーン工法の置換率  $As$  は数パーセント程度とかなり小さく、ドレーン材の剛性による圧密速度や沈下量低減への影響は無視できるので、結局は所定の圧密時間が得られるように砂杭径と打設間隔を決めることが設計上の要点である。ここでは、材料の力学特性に関係なく、格子状改良と杭状改良の圧密速度比を表す簡便式を示し、杭状改良の計算値を補正するだけで、格子状改良の設計ができる方法を提案する。

粘土部から砂部へ流出する半径方向の単位時間当たり流量  $Q$  は、次式で与えられる。

$$Q = -S \cdot \frac{k_h}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u(r)}{\partial r} \Big|_{r=a} \quad (2)$$

ここに、 $S$  ; 排水(砂と粘土の境界)面積  
 $k_h$  ; 半径方向の透水係数  
 $\gamma_w$  ; 間隙水の単位体積重量  
 $u(r)$  ; 間隙水圧分布

$a$  ; 砂と粘土の境界面の半径

両改良形式の圧密速度の違いは、同じ圧密度、すなわち、同じ平均間隙水圧  $\bar{u}$  における流出流量  $Q$  を比較することによって考察できる。そこで、圧密度50%時の流出流量  $Q_{50}$  に注目して、両改良形式の  $Q_{50}$  比を次式のように仮定する。

$$\frac{Q_{50, lattice}}{Q_{50, column}} = \frac{(S/L)_{lattice}}{(S/L)_{column}} \quad (3)$$

ここに、 $L$  ; 代表排水長であり、杭状改良では粘土円筒の肉厚、格子状改良では粘土円柱の半径を採用する(図-5参照)。また、添字の *column*, *lattice* は杭状改良、格子状改良を意味している。式(3)は圧密度50%における間隙水圧勾配  $\partial u(r) / \partial r|_{r=a}$  と  $\bar{u} / L$  の比が両改良形式とも同程度であると仮定している。排水境界における間隙水圧勾配を  $\bar{u} / L$  で表せるということではないことに留意されたい。式(3)は両改良形式の圧密速度の比であるから、圧密度50%の所要時間  $t_{50}$  比は式(3)に反比例する。すなわち、次式が得られる。

$$\frac{t_{50, lattice}}{t_{50, column}} = \frac{(S/L)_{column}}{(S/L)_{lattice}} \quad (4)$$

式(4)の右边を置換率  $As$  で表すと、最終的に次式が得られる(付録2参照)。

$$\frac{t_{50, lattice}}{t_{50, column}} = \frac{\sqrt{As}}{1 - \sqrt{As}} \quad (5)$$

式(5)の関係を図示したものが図-18の一点鎖線である。式(5)はFEM解析値よりやや大きめの値を示すが、格子状改良と杭状改良の  $t_{50}$  比のほぼ上限値と見なせる。また、図-18の二点鎖線は、Silveiraの解による格子状改良の  $t_{50}$  と Barronの解による杭状改良の  $t_{50}$  比~置換率  $As$  関係である。このSilveira解とBarron解による  $t_{50}$  比はFEM解析より求めた  $t_{50}$  比の下限値と見ることができ、この下限値を用いると、格子状改良の圧密速度を(FEM、すなわち、応力~変形解析値に対して)過大に見積もるため危険側の設計を、逆に、式(5)は安全側の設計を行うことになる。

式(5)を用いた格子状改良の設計フローを図-19に示す。すなわち、置換率が等しい杭状改良で圧密所要時間  $t'$  を算出し、その  $t'$  に式(5)右辺の値を乗ずれば、格子状改良の圧密所要時間  $t$  が求まるのである。

上述の簡便法は杭状改良の慣用設計法(解で圧密計算)を援用しているが、Barron解は「間隙水は水平方向に排水するのに土骨格は鉛直方向のみ変形する」という



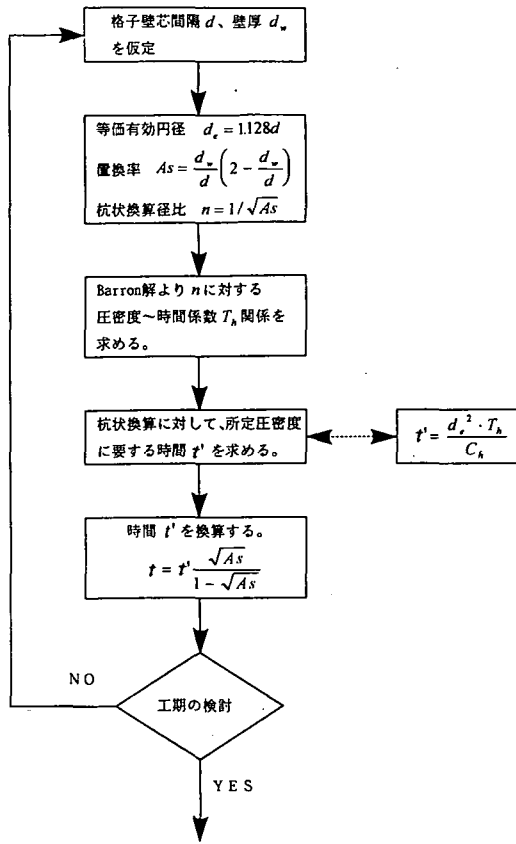


図-19 格子状改良の設計計算フロー

矛盾を持っているので、慣用法の妥当性を確認しておく必要がある。杭状改良の慣用法は砂杭の剛性を考慮できないので、砂杭の影響の少ない置換率  $As=2\%$  の場合の軸対称 FEM 結果と比較する。慣用法の計算では、径比  $n=7.07$ 、粘土の圧縮指数  $\lambda/(1+e_0)$  は表-5 の値を、水平圧密係数  $C_h$  は (鉛直) 圧密係数  $C_v$  と等しいとして用いる。圧密係数  $C_v$  は付録の式(A4) の  $p$  を各圧密段階の平均圧密圧力  $p$  として計算する。図-20 は圧密圧力  $p=113\text{kPa}$ 、 $904\text{kPa}$  における沈下ひずみ～時間関係で、図中実線は軸対称 FEM 解、破線は Barron 解を用いた慣用法の結果である。ここで、沈下ひずみは簡便ひずみ ( $\equiv \Delta H/H_0$ ) とし、 $H_0$  は初期高さ ( $H_0=3.5\text{cm}$ )、 $\Delta H$  は各圧密圧力段階での圧密量である。図より、砂杭の剛性のため、軸対称 FEM の最終沈下量は慣用法より小さめであるが、両者の沈下量の経時変化 ( $\equiv$  圧密速度) はよく合っている。砂杭の剛性を考慮しない弾性圧密問題において、田村<sup>9)</sup> は Barron 解の優秀性を述べているが、本文で用いている材料モデルのように応力～変形～透水関係が履歴とともに変化する場合でも、Barron 解は有用と

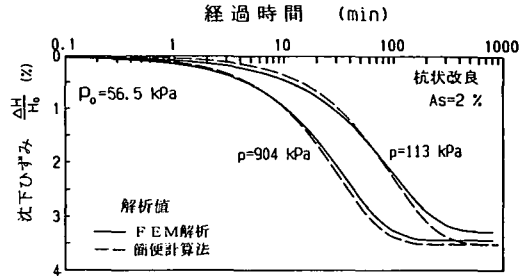


図-20 杭状改良の圧密沈下ひずみ～ $\log(t)$ 関係

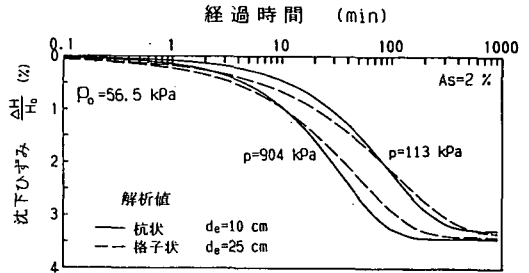


図-21 杭状改良および格子状改良の圧密沈下ひずみ～ $\log(t)$ 関係

言える。

さて、提案した簡便計算法の適用例を考えてみよう。今、影響径  $d_e=10\text{cm}$ 、置換率  $As=2\%$  の杭状改良で設計されたとすると、図-20 中の実線で示された圧密関係が得られる。式(5)より、 $t_{50}$  比は 0.16 であるから、格子状改良は杭状改良より 6.25 倍ほど圧密が速い。同じ置換率では、格子状改良の圧密速度は影響径の 2 乗に反比例するので、影響径  $d_e=25\text{cm}$  の格子状改良は、 $d_e=10\text{cm}$  の杭状改良と同等の圧密速度になる。

図-21 は軸対称 FEM で計算した置換率  $As=2\%$  の杭状改良 ( $d_e=10\text{cm}$ ) と格子状改良 ( $d_e=25\text{cm}$ ) の沈下ひずみ～時間関係である。圧密圧力  $p=904\text{kPa}$  では、格子状改良 (図中破線) の圧密速度は杭状改良 (図中実線) よりやや遅くなっているが、これは砂杭の剛性による影響と考えられる。提案法は杭状および格子状改良の置換率や配置間隔を簡単に比較できる利点を持っている。

## 5. 局部载荷を受ける複合地盤の圧密解析

4. では、一次元圧密変形に限定して、圧密速度でみれば格子状改良が杭状改良より有利であることを述べた。ここでは、大きな側方変形が生ずる局部载荷問題を取り上げる。堤防のように一方向に長い荷重が杭状改良および格子状改良地盤に作用する場合に、著者らは準 3 次元

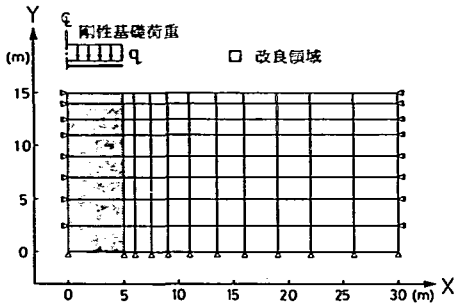
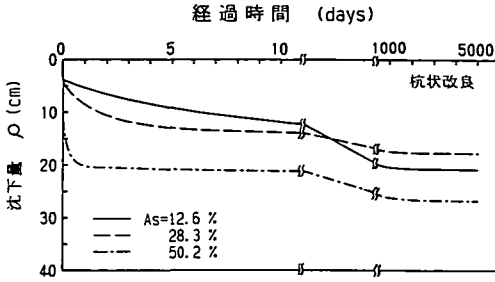


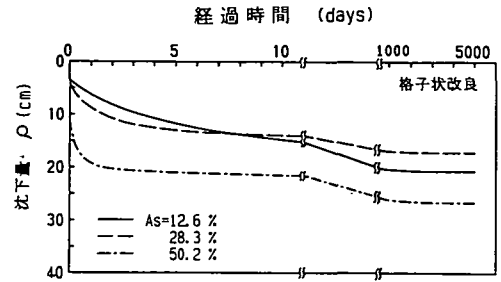
図-22 解析モデルの有限要素分割

表-6 モデル地盤の改良諸元

置換率 As(%)	改良 列数	改良間隔 b (m)	抗 状 抗径 (m)	格子状 壁厚 (m)	載荷荷重 q (kPa)
12.6	2	2.5	1.0	0.163	29.4
28.3	3	1.667		0.256	39.2
50.2	4	1.25		0.368	98.1



(a) 杭状改良



(b) 格子状改良

図-23 複合地盤の圧密沈下量～時間関係

有限要素「マザリンク・エレメント」<sup>10), 11)</sup>による解析法を提案している。この「マザリンク・エレメント」は改良材と原地盤の剛性差により生ずる3次元変形を考慮でき、関口らの「マクロエレメント法」<sup>12)</sup>を併用してドレーン材の集水効果を表現している。

### (1) 解析モデル

図-22は解析モデルの要素分割図で、左右対称として半断面で解析する。改良部(図中斜線部)に「マザリンク・エレメント」、その他に平面ひずみ要素を用い、複合地盤の改良諸元を表-6に示す。地下水位は地盤表面とし、初期応力は単位体積重量(砂の $\gamma_{sat}=19.4\text{kN/m}^3$ 、粘土 $18.1\text{kN/m}^3$ )とK。値より設定している。荷重は底面が滑らかな剛性基礎荷重で、各置換率に対し表-6の荷重を載荷し、間隙水圧消散にともなう応力・変形を地盤内の間隙水圧がほぼ0になる(5000日)まで計算する。この載荷荷重は各置換率の非排水載荷の降伏荷重に相当する。

### (2) 圧密沈下量～時間関係

図-23(a), (b)は杭状改良および格子状改良地盤の荷重基礎沈下量 $\rho$ ～時間関係である。図より、置換率が同じであれば、両改良地盤の最終(5000日)沈下量はほとんど同じである。しかし、圧密速度(沈下量の経時変化)に着目すると、置換率 $As=28.3\%$ 、 $50.2\%$ では両改良地盤にあまり差はないが、 $As=12.6\%$ では格子状改良は杭状

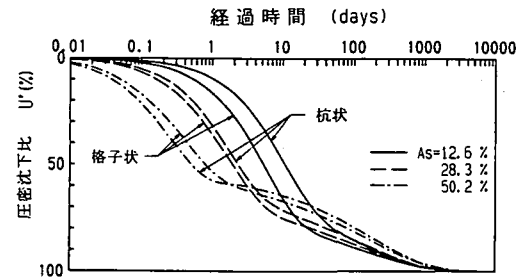


図-24 圧密沈下比～時間関係

改良よりかなり速くなっている。

図-24は各置換率における両改良地盤の圧密沈下比 $U'$ ～時間関係で、圧密沈下比 $U'$ は次式で定義される圧密度である。

$$U' = \frac{\rho(t) - \rho_0}{\rho_{5000} - \rho_0} \quad (6)$$

ここに、 $\rho(t)$  ; 時刻 t における沈下量

$\rho_{5000}$  ; 時刻 t=5000日における沈下量

$\rho_0$  ; 非排水載荷時(t=0)の即時沈下量

各曲線とも逆S字カーブ状を示しており、後半部の $\log(t)$ に比例する部分は一次圧密が終了したかのように見えるが、解析に用いた構成式は二次圧密を考慮してい

ない。この  $\log(t)$  比例部分は、改良部の間隙水圧が消散した後も続く未改良地盤の間隙水圧消散による圧密である。置換率  $A_s=12.6\%$  では、格子状改良の圧密は杭状改良より圧倒的に速く、 $A_s=28.3\%$  の杭状改良と同等であるが、置換率  $A_s=50.2\%$  では、両改良はほぼ同じ圧密速度である。すなわち、両局部載荷においても、置換率と改良形式による圧密速度の関係は一次元圧密と同様である。

## 6. 結論

本文では、置換率の異なる杭状改良および格子状改良された複合地盤要素の一次元圧密試験を行い、その結果が土特有の力学特性を考慮した構成式によれば妥当に説明できることを示した。さらに、種々の条件の解析結果をもとに、杭状改良および格子状改良地盤の圧密特性を考察した。まとめると、以下ようになる。

- 1) 低置換率では格子状改良は杭状改良より速く圧密するが、高置換率では逆に杭状改良の方が速くなる。
- 2) 解析では、置換率が大きくなると格子状改良の圧密沈下量は杭状改良より小さくなるが、実測値でも概ね同様の傾向が見られる。
- 3) 現行の杭状改良に対する設計法を若干修正するだけで計算できる格子状改良の簡便設計法を提案した。
- 4) モデル地盤解析より、局部載荷を受ける場合でも圧密速度に関して、一次元圧密と同じ結果が得られた。

本文では、圧密速度に限定して、杭状改良および格子状改良による影響について考察したが、沈下量低減や支持力増加効果まで言及するには、改良材と原地盤土の応力分担について検討する必要がある。

最近では、良質な改良材（砂など）の確保が困難なため低置換率の改良が多用されているが、格子状改良は杭状改良より少ない置換率で同等の圧密速度を得られるので、資源利用の面からも有効な改良形式である。現状の施工法で格子状に砂壁を構築することは難しいかもしれないが、プラスチックドレーンやペーパードレーンを格子状に配置する方法も考えられる。

液状化対策のグラベルドレーンの配置ピッチは Barron 解により計算しているので、本文の簡便法を用いれば、格子状のグラベルドレーンの設計も可能である。

**謝辞：**複合地盤要素の圧密試験に協力戴いた元名古屋工業大学社会学科学生米本知代氏に感謝致します。また、本研究の一部は平成7年度文部省科学研究費補助金（試験研究(B)、課題番号07555153、代表者研究者：中井照夫）の助成を受けて行った。

### 付録1

式(1)より、粘土の透水係数は間隙比変化に依存するの

で、圧密係数  $C_v$  も間隙比変化とともに値が変わる。したがって、 $t_{ij}$ -clay モデルの材料パラメータ  $\lambda/(1+e_0)$  を変えると、圧密係数  $C_v$  ~ 間隙比変化関係も変化してしまうが、透水パラメータと  $\lambda/(1+e_0)$  を相対変化させれば、同じ圧密係数  $C_v$  ~ 間隙比変化関係にさせることができる。式(1)を体積ひずみ  $\varepsilon_v$  で表すと、次式になる。

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{1+e_0}{C_k} \cdot \varepsilon_v\right) \quad (A1)$$

$t_{ij}$ -clay モデルでは、塑性ひずみを流動則による成分と拘束応力による成分に分けることで、ひずみ増分方向の応力経路依存性を表現しているが、応力比一定で平均主応力  $p$  が増加する応力経路、すなわち、異方圧密時の体積ひずみ  $\varepsilon_v$ （弾性体積ひずみと塑性体積ひずみの和）は次式で与えられる。

$$\varepsilon_v = \frac{\lambda}{1+e_0} \ln\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (A2)$$

体積圧縮係数  $m_v$  は、式(A2)を  $p$  で微分して得られる。

$$m_v = \frac{d\varepsilon_v}{dp} = \frac{\lambda}{1+e_0} \cdot \frac{1}{p} \quad (A3)$$

式(A1)、(A2)、(A3)の関係を用いて、圧密係数  $C_v$  は次式で表される。

$$C_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v} = \frac{k_0}{\gamma_w} \cdot \frac{1+e_0}{\lambda} \cdot p_0^{\frac{\lambda}{C_k}} \cdot p^{\left(1-\frac{\lambda}{C_k}\right)} \quad (A4)$$

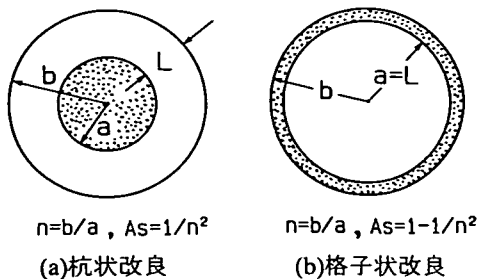
式(A4)で  $e_0$  を固定すると、 $k_0/\lambda$  および  $C_k/\lambda$  が一定であれば、 $p_0 \rightarrow p$  における圧密係数  $C_v$  の変化は同じである。式(A4)は異方圧密において成り立つものであり、実際には応力比の変化にともなう体積ひずみ（ダイレタンシー）も生ずるので、 $k_0/\lambda$  および  $C_k/\lambda$  を一定にするだけで、圧密係数の変化を同じにすることはできない。しかし、応力比がほぼ一定となるような応力変化の場合では、式(A4)を用いても大差ない。

### 付録2

図-1Aは杭状および格子状改良モデルの各諸元である。単位高さで考えると、杭状改良の排水面積  $S$  と排水長  $L$  の比は次式で表される。

$$\left(\frac{S}{L}\right)_{\text{column}} = \frac{2\pi a}{b-a} = \frac{2\pi}{n-1} = \frac{2\pi}{1/\sqrt{A_s}-1} \quad (A5)$$

一方、格子状改良は常に  $(S/L)_{\text{lattice}} = 2\pi$  であるから、



図一A 杭状改良および格子状改良の排水面積と排水長

両改良の  $S/L$  の比は次式となる。

$$\frac{(S/L)_{column}}{(S/L)_{lattice}} = \frac{\sqrt{As}}{1-\sqrt{As}} \quad (A6)$$

式(A6)より、本文中の式(5)が得られる。

#### 参考文献

1) 塚田幸広, 川村浩二, 村井逸夫, 後藤年芳: 水平力を受ける深層混合処理地盤の変形特性, 第23回土質工学研究発表会, pp. 2267~2270, 1988.  
 2) 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, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第2号, pp. 63~83, 1990.

3) Sekiguchi, H., Nishida, Y. and Kanai, F.: Analysis of partially drained triaxial testing of clay, *Soils and Foundations*, Vol. 21, No. 3, pp. 53~66, 1981.  
 4) 石崎仁, 松岡元, 中井照夫: "砂杭を含む粘土"の軸対称応力下の応力・変形特性, 土木学会論文集, No. 406, pp. 127~136, 1989.  
 5) Nakai, T.: An isotropic hardening elastoplastic model for sand considering the stress path dependency in three-dimensional stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 29, No. 1, pp. 119~137, 1989.  
 6) Nakai, T. and Matsuoka, H.: A generalized elasto-plastic constitutive models for clay in three dimensional stresses, *Soils and Foundations*, Vol. 26, No. 3, pp. 81~98, 1986.  
 7) 都築頼司, 中井照夫, 三宅正人, 石川和彦: 部分排水条件下における粘土の粘塑性挙動とその解析, 第42回土木学会年次講演会, III部, pp. 208~209, 1986.  
 8) 地盤工学会: 軟弱地盤対策工法, 現場技術者のための土と基礎シリーズ No. 16, pp. 95~106, 1991.  
 9) 田村武: 等ひずみサンドドレーンの固有値による評価, 第55回土木学会年次学術講演会, III部, pp. 117~118, 1980.  
 10) 石崎仁: 複合地盤の準三次元圧密変形解析, 土木学会論文集, No. 457, pp. 137~145, 1992.  
 11) 石崎仁: 複合地盤の変形特性に及ぼす改良形式の影響, 土木学会論文集, No. 487, pp. 89~98, 1994.  
 12) 関口秀雄, 柴田徹, 藤本朗, 山口博久: 局部載荷を受けるパーチカルドレーン打設地盤の変形解析, 第31回土質工学シンポジウム論文集, pp. 111~116, 1986.

(1996. 6. 6 受付)

## DEFORMATION DEPENDENCY OF COMPOSITE GROUND ON CONSTRUCTION TYPE

Hitoshi ISHIZAKI and Teruo NAKAI

Oedometer tests of composite ground were performed to investigate the effects of construction type on consolidation behavior. Specimens of composite ground are made of soft clay replaced by sand in column type or lattice type. In the experiment it is clarified that at low replacement by sand consolidation speed of lattice type is faster than that of column type, and at high replacement this relationship is reversed. Also at high replacement settlement of lattice type is smaller than column type. FEM analyses using constitutive equations for sand and clay predict well the test results. A practical design method of composite ground of lattice type is proposed on the bases of these analyses.