

複合地盤の変形特性に及ぼす改良形式の影響

石崎 仁*

杭状改良地盤解析用の準三次元有限要素法を、格子状改良地盤に適用できるように修正し、砂と正規圧密粘土より成る複合地盤の要素解析より、非排水載荷時の応力・変形特性および間隙水圧消散にともなう圧密変形を妥当に計算できることを確認した。そして、準三次元有限要素法を用いて、杭状改良地盤および格子状改良地盤のモデル解析を行い、改良形式が複合地盤の変形や応力分担などに及ぼす影響について考察した。

Key Words : composite ground, FEM, improved form, consolidation

1. まえがき

サンドコンパクション工法や深層混合処理工法などの深い地盤改良工法は、施工の容易さから、離散的に杭状改良する形式が多く用いられているが、最近では、ブロック状や格子状に改良する形式も見られるようになった。道路盛土や堤防のような帯状荷重が作用する場合、ブロック状改良では二次元問題として解析できるが、格子状改良では、あらゆる荷重条件下でも三次元応力状態にあるため、三次元解析が必要となる。帯状荷重が作用する杭状改良地盤に対して、三次元変形を考慮しながらも経済的に計算できる準三次元有限要素「マルチリンク・エレメント」を提案¹⁾し、非排水載荷時の変形²⁾や圧密変形³⁾を解析しているが、この解析法では、改良材および原地盤土の構成式を限定していないので、改良材と原地盤土の配置を入れ換えると、格子状改良地盤にも適用できる。本文では、図-1に示すような帯状荷重を受ける格子状改良地盤を、「マルチリンク・エレメント」により解析し、改良形式(杭状改良と格子状改良)による応力・変形特性の相違について述べる。

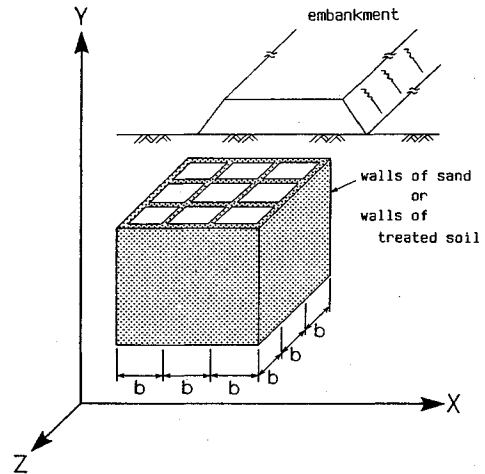


図-1 帯状荷重を受ける格子状改良地盤

2. 改良材および原地盤土の構成式

セメント系固材材による地盤改良において、改良形式の違いによる支持力や変形特性に着目した報告(たとえば、文献4)、5)などもあるが、本文では、改良材は密詰め砂、原地盤土は正規圧密粘土を想定する。材料の応力~ひずみ関係式は、これまで一連の解析結果^{1), 6)}より、砂にSMP*モデル⁷⁾、粘土に t_{ij} -clayモデル⁸⁾を用いる。両モデルは、土材料特有のダイレタンシー特性や中間主応力の影響を良く表現できる弾塑性構成式で、材

表-1 SMP*モデルのパラメータ

λ^*	0.9	
μ^*	0.27	
μ'^*	0.41	
γ_o^*	γ_{oi}^*	0.10 %
	C_d^*	0.066%
	σ_{mo}	98kN/m ²
$C_c/(1+e_o)$	0.928%	
$C_e/(1+e_o)$	0.578%	
K_o	0.45	
ν_o	0.3	
$\phi_{(comp.)}$	40.0°	
γ_{sat}	19.4kN/m ³	

表-2 t_{ij} -clayモデルのパラメータ

$\lambda/(1+e_o)$	5.08 %
$\kappa/(1+e_o)$	1.12 %
α	0.7
ν_e	0.0
$\phi_{(comp.)}$	33.7°
K_o	0.47
γ_{sat}	18.1kN/m ³

料パラメータを表-1, 2に示す。また、粘土の透水係数 k は、間隙比増分 Δe との間に次式の関係がある。

$$k = k_0 \cdot \exp\left(\frac{\Delta e}{C_k}\right) \dots \dots \dots (1)$$

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.

* 正会員 工博 住友セメント(株)中央研究所セメント・コンクリート研究所 土質研究室長 (〒274 千葉県船橋市豊富町 585)

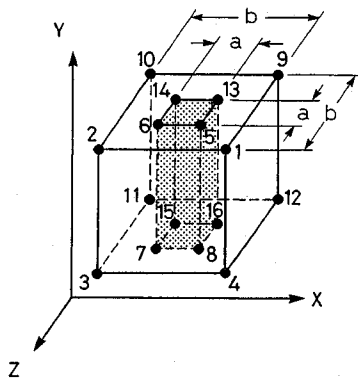


図-2 「マルチリンク・エレメント」の概要図

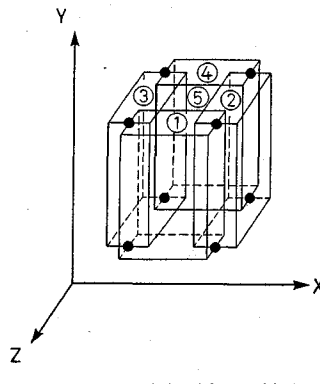


図-3 内部要素の分割図

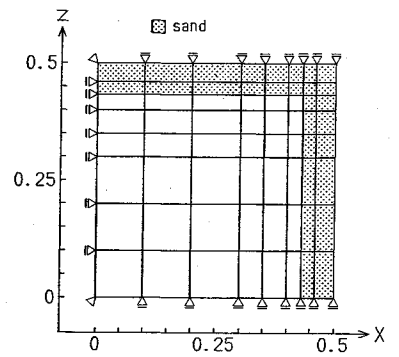


図-4 三次元解析のモデル図(平面図)

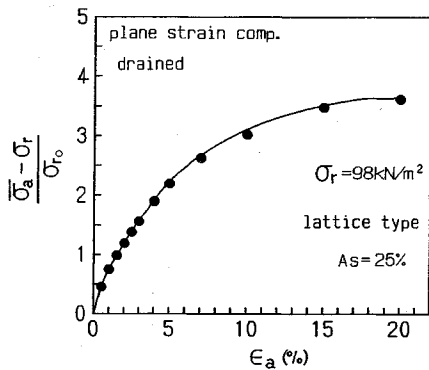


図-5 平面ひずみ圧縮排水試験の軸差応力～軸ひずみ関係

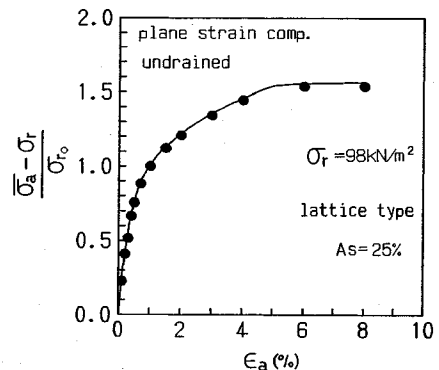


図-6 平面ひずみ圧縮非排水試験の軸差応力～軸ひずみ関係

ただし、基準間隙比 $e_0 = 0.828$

圧密応力 $p = 78.4 \text{ kN/m}^2 (= 0.8 \text{ kgf/cm}^2)$

3. 格子状改良用の「マルチリンク・エレメント」

「マルチリンク・エレメント」¹⁾は、改良杭径 a 、分担径 b の杭状改良単位を図-2のような16節点より成る三次元ブロックで考える。このブロックを5個の内部要素に分割(図-3)して、各内部要素の剛性を積算した後、変位間の内挿関係により、図-2の節点1~8の変位で表現できるようにしたものである。杭状改良では、図-2の中央の斑点4角柱(内部要素⑤)が改良杭、周辺要素(内部要素①~④)が原地盤土に対応するが、格子状改良では、内部要素⑤が原地盤土、周辺要素(内部要素①~④)が改良材となる。

また、間隙水圧との連成解析においては、各内部要素毎に間隙水圧を定義されるが、改良材(砂)は透水性が極めて良いとして、常に排水状態にあるとする。したがって、間隙水圧は内部要素⑤にのみ生ずる。

杭状改良の置換率は $As = 1/n^2$ であるが、格子状改良の置換率は $As = 1 - 1/n^2$ で表される。ここに、 $n = b/a$ である。ここでは、「マルチリンク・エレメント」を格

子状改良に用いた場合の妥当性を、側圧一定の平面ひずみ圧縮試験解析により検討する。解析条件は置換率 $As = 25\%$ 、改良材(砂)と原地盤土(粘土)は等軸ひずみ変形とする。初期応力は、改良材および原地盤土とも等方応力状態 $\sigma = 98 \text{ kN/m}^2 (= 1 \text{ kgf/cm}^2)$ とする。比較解は三次元有限要素結果とし、対称性より1/4モデル(図-4)で計算する。アインパラメトリック1次要素を用い、原地盤土と改良材の等軸ひずみ変形よりY方向(軸方向)には1層のみとする。図-5は、原地盤土が排水状態の場合の正規化軸差応力 $(\bar{\sigma}_a - \sigma_r) / \sigma_{r0}$ ~ 軸ひずみ ϵ_a 関係で、図-6は原地盤土が非排水状態の場合の同じ関係である。ここに、 $\bar{\sigma}_a$ は砂部と粘土部の平均軸応力、 σ_{r0} は初期側圧である。両図中の実線は三次元解析結果、プロットは「マルチリンク・エレメント」による結果であるが、両者は良く一致している。

置換率 $As = 50\%$ でも、図-5、6と同様の結果が得られている(図省略)。以上から、排水状態および非排水状態とも、「マルチリンク・エレメント」は格子状改良地盤にも適用できると言える。

表-3 改良領域の諸元

置換率 As (%)	列数	杭状改良地盤		格子状改良地盤	
		砂杭径 a (m)	分担保径 b (m)	粘土径 a (m)	分担保径 b (m)
12.6	2	0.886	2.5	2.337	2.5
28.3	3		1.667	1.411	1.667
50.2	4		1.25	0.882	1.25

表-4 モデル地盤の初期応力 (×9.8 kN/m²)

層	砂部		粘土部	
	σ_v	σ_h	σ_v	σ_h
1	0.490	0.221	0.425	0.200
2	1.715	0.772	1.488	0.699
3	3.185	1.433	2.763	1.298
4	4.900	2.205	4.250	1.998
5	6.860	3.087	5.950	2.797
6	8.820	3.969	7.650	3.596
7	11.025	4.961	9.563	4.494
8	13.475	6.064	11.688	5.493

表-5 各解析における降伏荷重 (×9.8 kN/m²)

置換率 As (%)	0	12.6	28.3	50.2
杭状改良	2.25	3.2	4.5	10.5
格子状改良	2.25	4.7	7.2	11.0

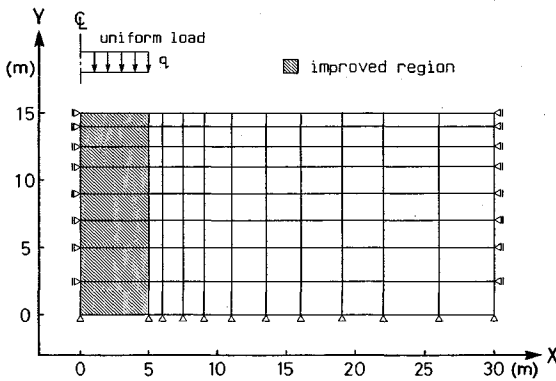


図-7 解析モデルの有限要素分割

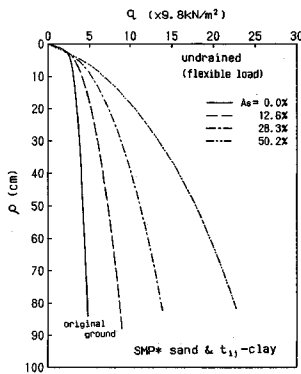


図-8 荷重～沈下量関係 (杭状改良地盤)

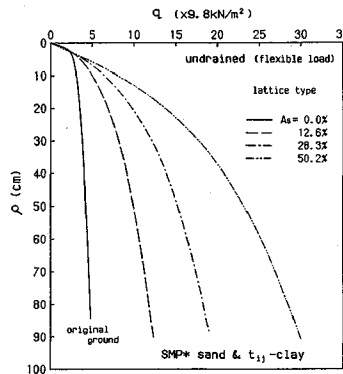


図-9 荷重～沈下量関係 (格子状改良地盤)

4. 格子状改良地盤の非排水載荷時の応力・変形特性

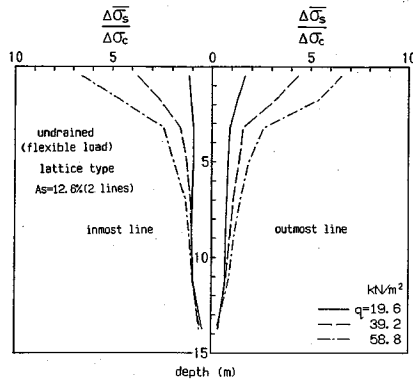
ここでは、格子状改良されたモデル地盤に荷重が非排水状態で載荷された場合の応力・変形特性を杭状改良地盤と対比しながら述べる。ただし、改良部内の砂は排水状態、粘土（格子内の粘土および改良部外側の原地盤）は非排水状態として解析する。

図-7はモデル地盤の要素分割図で、左右対称と考えて半断面だけを計算する。図中の斜線部が改良部で、置換率 $A_s=12.6\%$ 、 28.3% 、 50.2% の三種類とし、各諸元を表-3に示す。改良部は「マルチリンク・エレメント」、非改良部は二次元平面要素を用いる。荷重はたわみ性荷重とし、初期応力はモデル地盤が地下水位以下にあるとして、水中有効重量で計算した（表-4）。

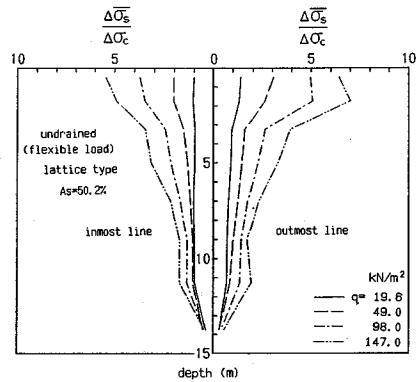
(1) 荷重～沈下量関係

図-8は格子状改良地盤、図-9は杭状改良地盤の荷重 q ～解析断面对称中心線（図-7のCL線）上の地表面沈下量 ρ 関係である。両図より、同じ荷重に対する沈下量は、杭状改良地盤の方が格子状改良地盤より大きい。CL線上には、杭状改良地盤では粘土部、格子状改良地

盤では砂部が位置するので、CL線上の沈下量は材料特性の違いも含まれる。しかし、格子状改良地盤において、CL線上（砂部）の沈下量とCL線に最も近い粘土部の沈下量はほとんど差がない（両者の差は2%以内）ので、両改良地盤の荷重沈下量関係はCL線上の沈下量で比較できる。表-5は $\log(q) \sim \log(\rho)$ 曲線の折れ曲がり点より求めた降伏荷重 q_v を各置換率別にまとめたものである。表より、置換率 $A_s=12.6\%$ 、 28.3% では、格子状改良地盤の降伏荷重は杭状改良地盤より大きくなっており、深層混合改良による実験^{1),5)}と同様の結果である。杭状改良および格子状改良では、図-2に示す周辺要素、とりわけ、図-3の内部要素①と④の剛性および強度が大きく寄与する。これは、以下のように説明できる。図-7に示す地盤条件では、荷重下の地盤は側方にも変形するので、各「マルチリンク・エレメント」にはXY面内のせん断変形が生ずる。「マルチリンク・エレメント」の内部要素のXY面内の“高さ／幅比”に注目すると、内部要素①、④の“高さ／幅比”は内部要素②、③より小さいので、XY面内のせん断変形に対しては、内部要素②、③より抵抗できる。したがって、内部要素①と④が改良材（砂）に対応する格子状改良の降伏



図一〇 非排水載荷時の応力分担比の深度分布（格子状改良地盤， $A_s=12.6\%$ ）



図一一 非排水載荷時の応力分担比の深度分布（格子状改良地盤， $A_s=50.2\%$ ）

荷重は、杭状改良より大きくなる。しかし、置換率 $A_s=50.2\%$ では、両改良地盤の降伏荷重はほぼ同じである。さて、置換率 $A_s=100\%$ では、改良部はすべて砂で占められるので、格子状改良でも杭状改良でも応力・変形は同じである。したがって、置換率が大きくなると、両改良形式の差は小さくなると考えられる。本文で用いた構成式とモデル地盤の場合、置換率 $A_s=50\%$ 以上では、両改良地盤の降伏荷重に有意な差はないということである。以上から、格子状改良は、置換率が小さい場合に有利であると言える。

一方、杭状改良地盤解析でよく見られる二次元近似解析（改良材と等価面積を持つ平面要素解析）では、置換率が同じであれば、杭状改良地盤の支持力は、格子状改良地盤と同じになる。表一五の差は、三次元変形を考慮して、初めて表現できるものである。

(2) 応力分担比

深層地盤改良の設計において、応力分担比は支持力および沈下量を求めるのに重要な因子で、格子状改良の場合の応力分担比は、次式で定義される。

$$\text{応力分担比} = \frac{\Delta\sigma_s}{\Delta\sigma_c} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $\Delta\sigma_s$ ：砂部の平均鉛直応力増分
 $\Delta\sigma_c$ ：粘土部の鉛直応力増分

ただし、砂部の平均鉛直応力増分は内部要素①～④（図一三）の平均値である。

図一〇は置換率 $A_s=12.6\%$ （列数2列）の場合の応力分担比の深度分布である。図中の左側は中央に最も近い列の応力分担比を、右側は最も外側（荷重端側）の応力分担比を、荷重レベル $q=19.6, 39.2, 58.8 \text{ kN/m}^2 (=2, 4, 6 \text{ tf/m}^2)$ 別に示している。図より、応力分担比は地表面で最も大きく、GL-3 m 以深では急減している。

図一一は置換率 $A_s=50.2\%$ での同関係であるが、荷重 $q=19.6, 49, 98, 147 \text{ kN/m}^2 (=2, 5, 10, 15 \text{ tf/m}^2)$ 別に示している。この場合は、地表面から1～2層の要

素で最大となっているが、両図とも、応力分担比は地表面付近で最も大きく、ある深度以下ではあまり変化しないと言える。これは、杭状改良地盤の結果²⁾と同じである。

5. 格子状改良要素の連成圧密解析法

杭状改良用の「マルチリンク・エレメント」では、関口らの「マクロ・エレメント法」⁹⁾を併用して、改良杭のドレーン効果を考慮した連成圧密解析法³⁾を提案した。「マクロ・エレメント法」は周辺要素より改良杭に向う“内向き排水”と考えて、間隙水圧の形状関数に Barron の等ひずみ解を用いている。しかし、格子状改良では、中心要素より周辺要素に向う“外向き排水”であるので、Barron 解は使えない。ここでは、“内向き排水”の Barron 解の影響境界線を対称軸に採ることによって、“外向き排水”の間隙水圧の形状関数を誘導する。

間隙水の排水を軸対称問題と考え、原地盤土内の間隙水圧分布を、図一十二のように仮定する。図中の半径 a' および b' は、「マルチリンク・エレメント」の中心要素および周辺要素と平面面積が等価になるとして、図一2の a, b を $1/\sqrt{\pi}$ 倍したものである。間隙水圧の分布 $u(r)$ を次式で表す。

$$u(r) = f(r) \cdot u^* \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 u^* は代表間隙水圧であり、「マルチリンク・エレメント」内の間隙水圧分布値 $u(r)$ と関数 $f(r)$ の比率を表すもので、要素内の代表点（たとえば、要素重心）の間隙水圧ではない。Barron 解において、 $r \rightarrow b' - r$ とすれば、 $u(a') = 0, \partial u(r)/\partial r|_{r=0} = 0$ なる境界条件を満足するので、形状関数として用いることができる。すなわち、形状関数 $f(r)$ は次式で表される。

$$f(r) = \ln \frac{b'-r}{b'-a'} - \frac{r^2 - 2b'r + a(2b'-a)}{2b'^2} \dots\dots\dots (4)$$

式(4)の $f(r)$ は圧密方程式を解いて得た間隙水圧分布ではないので、その妥当性は三次元圧密解析との比較

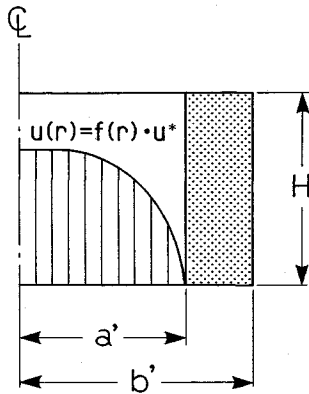


図-12 格子状改良部の間隙水圧分布の考え方

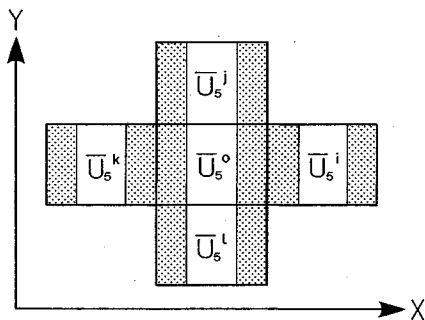


図-13 格子状改良部の隣接要素の配置例

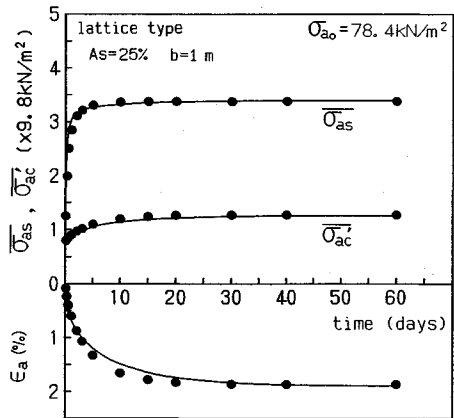


図-14 格子状改良単位の軸応力～時間～軸ひずみ関係

$$= \left(n^2 \ln \frac{n}{n-1} + \frac{1}{4n^2} - \frac{1}{3n} - \frac{1}{2} - n \right) u^* \dots \dots \dots (6)$$

式(6)を式(5)に代入すれば、流量 Q を平均間隙水圧 \bar{u} で表すことができる。

「マルチリンク・エレメント」の流量収支は、XY 面内の隣接要素との流出入量および改良材への流出量の和である。格子状改良では、各「マルチリンク・エレメント」の外周は改良材(砂)であるので、間隙水圧は 0 である。したがって、隣接要素との流出入に関しては、図-13 で左右に位置する「マルチリンク・エレメント」間との間隙水の移動はなく、上下に位置する「マルチリンク・エレメント」間との流量収支を考えればよい。図-13 において、要素 o, j, l の内部要素⑤に対して、連続の式(文献3)参照)を立てればよい。

上記の連成圧密解析法の妥当性を、一次元圧密解析により検討する。置換率 $As=25\%$ 、初期応力は砂、粘土とも軸応力 $\sigma_a=78.4 \text{ kN/m}^2 (=0.8 \text{ kgf/cm}^2)$ 、半径応力 $\sigma_r=39.2 \text{ kN/m}^2 (=0.4 \text{ kgf/cm}^2)$ とし、粘土と砂は等軸ひずみ変形とする。比較解は三次元解析結果とし、要素分割は図-4 と同じであるが、すべての外周の垂直変位を固定する。また、粘土と砂の境界上の間隙水圧を 0 とする。荷重 $q=98 \text{ kN/m}^2 (=1 \text{ kgf/cm}^2)$ を非排水状態で載荷(砂部は排水状態)し、その後の間隙水圧消散に伴う応力・変形の経時変化を計算する。

図-14 は砂部の平均軸応力 $\bar{\sigma}_{as}$ 、粘土の有効平均軸応力 $\bar{\sigma}_{ac}$ ～軸ひずみ ϵ_a ～時間関係で、図中の実線は三次元解析結果、プロットは本提案法による結果である。図より、両解析法の砂および粘土の軸応力は、ほぼ一致しているが、本提案法による圧密中期の軸ひずみは、三次元解析より大きくなっている。これは、本提案法の間隙水圧分布式が間隙水圧の消散を速めに計算するからであるが、最終軸ひずみ量は三次元解析結果と良く一致しているから、本提案法は実用的には許容できると言える。

によって論じられるべきであり、それについては後述する。

次に、原地盤土から改良材へ流出する間隙水の流量 Q は次式で表される。

$$Q = -2\pi a' H \frac{k_s}{\gamma_w} \left. \frac{\partial u(r)}{\partial r} \right|_{r=a'} \\ = -2\pi H \frac{k_s}{\gamma_w} \left(\frac{n-1}{n^2} - \frac{1}{n-1} \right) \cdot u^* \dots \dots \dots (5)$$

ここに、 k_s : 原地盤土の水平方向透水系数

γ_w : 間隙水の単位体積重量

H : 要素の高さ, $n=b'/a'$

式(5)において、間隙水圧分布の微分(動水勾配)の符号が、“内向き排水”の場合と逆符号になることに注意しよう。剛性方程式は、力の平衡を各要素内の応力積分で表したものであるから、間隙水圧分布が関数 $f(r)$ の相似形で与えられても、剛性方程式中には要素内の積分値で示される。ここでは、間隙水圧 $u(r)$ を要素内で積分平均した値、すなわち、平均間隙水圧 \bar{u} で要素剛性および隣接要素との流量収支を計算する。平均間隙水圧 \bar{u} は次式で表される。

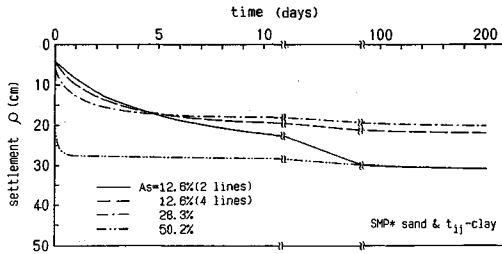
$$\bar{u} = \frac{\int_0^{a'} 2\pi f(r) u^* r dr}{\pi a'^2}$$

表—6 改良領域の諸元

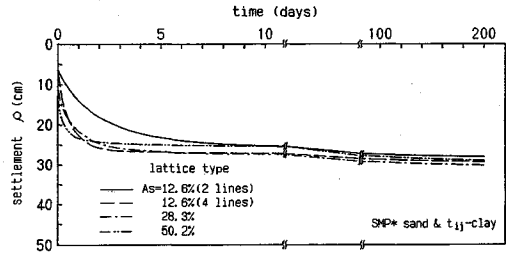
置換率 As (%)	列数	杭状改良地盤			格子状改良地盤		
		砂杭径 a (m)	分担径 b (m)	載荷荷重 (×9.8kN/m ²)	粘土径 a (m)	分担径 b (m)	載荷荷重 (×9.8kN/m ²)
12.6	2	0.886	2.5	3.0	2.337	2.5	4.0
12.6	4	0.443	1.25	3.0	1.169	1.25	4.0
28.3	3	0.886	1.667	4.0	1.411	1.667	7.0
50.2	4	0.886	1.25	10.0	0.882	1.25	10.0

表—7 モデル地盤の透水データ

層	初期透水係数 k ₀ (m/day)	初期間隙比 e ₀	透水係数 指数 C _k
1	1.514×10 ⁻³	1.108	0.199
2	5.571×10 ⁻⁴	0.989	
3	3.393×10 ⁻⁴	0.930	
4	2.384×10 ⁻⁴	0.888	
5	1.822×10 ⁻⁴	0.856	
6	1.489×10 ⁻⁴	0.832	
7	1.248×10 ⁻⁴	0.811	
8	1.064×10 ⁻⁴	0.792	

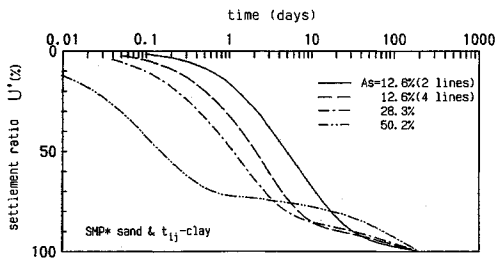


(a) 杭状改良地盤

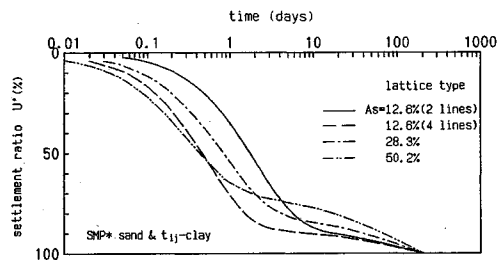


(b) 格子状改良地盤

図—15 地表面沈下量～時間関係



(a) 杭状改良地盤



(b) 格子状改良地盤

図—16 圧密沈下比～時間関係

6. 格子状改良地盤の圧密変形特性

ここでは、非排水載荷された後の応力・変形および間隙水圧の経時変化を解析するが、載荷重は非排水載荷時の降伏荷重よりわずかに小さい値(表—6)とした。また、置換率 $As=12.6\%$ で、列数が2倍異なる(杭径、分担径は1/2になる)ケースについても計算する。解析モデルは図—7と同じであるが、排水に関する境界条件は、地表面および改良部と非改良部の境界面を排水境界(間隙水圧を0)とする。また、透水定数を表—7に示す。

(1) 圧密沈下量～時間関係

図—15は杭状改良地盤および格子状改良地盤における地表面沈下量(CL線上) ρ ～時間関係である。なお、経時変化は杭状改良地盤解析³⁾と同条件とするために、載荷後200日まで計算している。4.(1)で述べたように、CL線上の沈下量は、杭状改良地盤では粘土部、格子状改良地盤では砂部の値である。しかし、格子状改良地盤の場合、圧密沈下量に関しても、CL線上(砂部)の

沈下量とCL線上に最も近い粘土部の沈下量はほとんど同じなので、CL線上の沈下量により両改良地盤の圧密特性を比較する。杭状改良地盤(図—15(a))の置換率 $As=12.6\%$ で、杭列数が2列(図中の実線)と4列(図中の破線)では200日後の沈下量はかなり異なるのに対して、格子状改良地盤(図—15(b))ではあまり差がない。杭状改良地盤のCL線上の沈下量は、粘土の鉛直変位であるのに対して、格子状改良地盤は砂部の鉛直変位である。格子状改良地盤では、砂部の剛性が大きいので、地表面沈下量は列数や分担径の影響を受けにくいと考えられる。両図より、置換率 $As=12.6\%$ 、 28.3% では、格子状改良地盤の沈下速度は杭状改良地盤より大きい。置換率 $As=50.2\%$ では、逆になっている。

本文では、載荷後200日までの圧密度として、次式の圧密沈下比 U' を用いる。

$$U' = \frac{\rho(t) - \rho_0}{\rho_{200} - \rho_0} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $\rho(t)$: 時刻 t の地表面沈下量

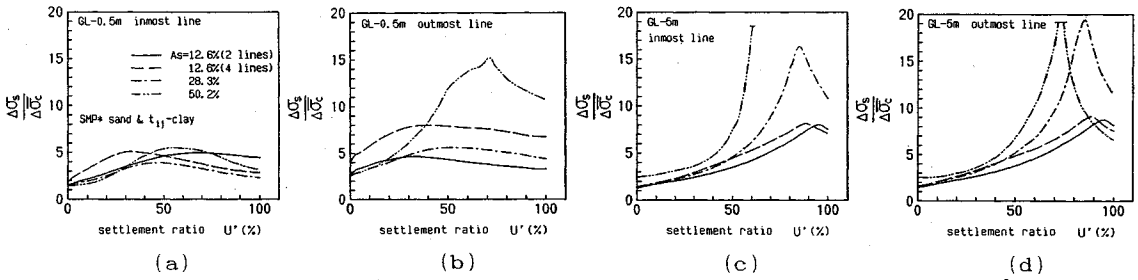


図-17 杭状改良地盤における応力分担比～圧密沈下比関係

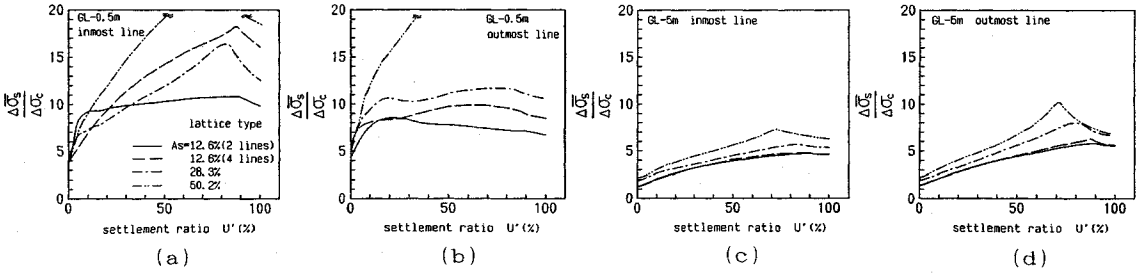


図-18 格子状改良地盤における応力分担比～圧密沈下比関係

ρ_0 : 非排水載荷直後 ($t=0$) の地表面沈下量

ρ_{200} : 200 日後の沈下量

図-16 は杭状改良地盤および格子状改良地盤における圧密沈下比 U' ～時間関係である。両図において、各置換率とも逆 S 字曲線の後半部分に二次圧密に似た直線部分が見られるが、この部分は、改良部の間隙水圧が消散した後の非改良部の間隙水圧の遅れ消散による変形である。同時刻における圧密沈下比に注目すると、置換率が同じ ($As=12.6\%$) であっても、杭列 4 列 (両図中破線) は杭列 2 列 (両図中実線) より圧密が速く進行している。これは、杭列 4 列の粘土径および分担径が杭列 2 列の半分であるからである。さて、杭状改良地盤では、置換率 $As=28.3\%$ の圧密沈下比は、 $As=12.6\%$ (杭列 4 列) より大きい、格子状改良地盤では、逆に置換率 $As=12.6\%$ (杭列 4 列) の方が大きくなっている。これは、改良部内の粘土の間隙水圧の消散速度の違いによるものである。格子状改良地盤では、柱状の粘土の径だけが排水長に相当するのに対して、杭状改良では、環状の周辺粘土の内径および径比 ($n'(=b'/a')$) に影響されることに注意が必要である。また、置換率 $As=50.2\%$ では、同時刻における格子状改良地盤の圧密沈下比は杭状改良地盤よりかなり小さい。格子状改良地盤の地表面沈下量 (CL 線上) ρ は砂部の鉛直変位であるから、置換率が大きくなる (砂部の体積が増える) と、改良部内の粘土が圧密しても、砂部はあまり変形しないことを表わしている。

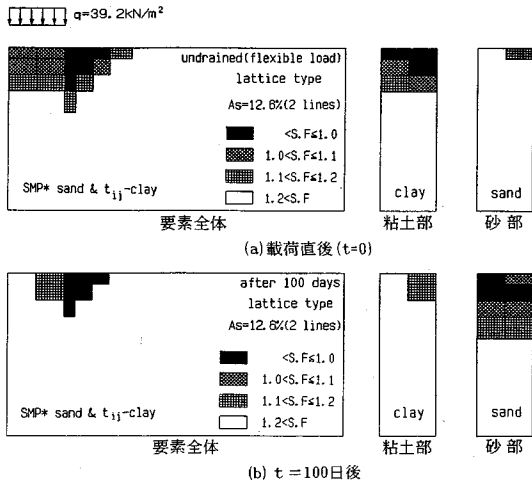
(2) 応力分担比

図-17, 18 は杭状改良地盤および格子状改良地盤における置換率別の応力分担比 $\Delta\sigma_s/\Delta\sigma_c$ ～圧密沈下比 U' である。両図の (a) は第 1 層の要素 (中心は GL-0.5 m) のうちでモデル中心 (CL 線) に最も近い列の応力分担比, (b) は同深度における荷重端下の列の応力分担比, (c) は第 4 層の要素 (中心は GL-5 m) のうちでモデル中心 (CL 線) に最も近い列の応力分担比, (d) は同深度における荷重端下の列の応力分担比である。ただし、杭状改良地盤では、周辺粘土部の鉛直応力を平均するので、応力分担比 $\Delta\sigma_s/\Delta\sigma_c$ と表記する。両図で、各置換率とも、圧密の進行に伴って応力分担比が増加し、その後減少する傾向が見られる。しかし、同じ置換率の応力分担比について見ると、杭状改良地盤 (図-17) では、地中部 (GL-5 m) の応力分担比は、地表面付近 (GL-0.5 m) より大きい、格子状改良地盤 (図-18) では、逆に地表面付近の応力分担比の方が大きい。すなわち、格子状改良地盤では、地表面付近の砂部に、多くの応力が集中することを意味している。改良形式により、応力分担比の傾向が異なるという現象は、設計上で留意すべきことである。

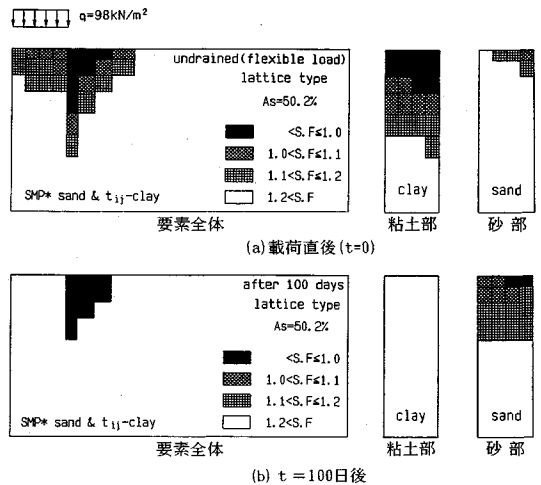
(3) 要素安全率分布

本文で用いている SMP*モデルおよび t_{ij} -clay モデルのせん断特性は空間滑動面上 (Spatial mobilized plane) のせん断・垂直応力比 $X(= \tau_{SMP}/\sigma_{SMP})$ に支配されるので、安全率 S.F を次式で定義する。

$$S.F = \frac{X_f}{X} \dots \dots \dots (8)$$



図一十九 安全率分布の経時変化 (格子状改良地盤, $A_s=12.6\%$, 2列)



図一二十 安全率分布の経時変化 (格子状改良地盤, $A_s=50.2\%$)

ここに, X_f : 破壊時の応力比 X

図一十九, 20 は格子状改良地盤における置換率 $A_s=12.6\%$ (列数 2 列), 50.2% の場合の要素安全率分布である. 各図の (a) は非排水載荷直後 ($t=0$ 日), (b) は 100 日後の分布である. 図中の要素全体の安全率のうち, 改良部の安全率は砂部と粘土部各々の安全率を体積平均したもの, 非改良部は要素単独の安全率である. なお, 改良部の安全率は次式で表される.

$$S.F. = A_s \cdot \overline{S.F.}_s + (1 - A_s) \cdot S.F.}_c \dots\dots\dots (9)$$

ここに, $\overline{S.F.}_s$: 砂部の平均安全率

$S.F.}_c$: 粘土部の安全率

また, 各図の右側に改良部内の砂部および粘土部の安全率も示す. 図一十九, 20 で, 非排水載荷により改良部外側の原地盤土が受働破壊 ($S.F. \leq 1$) しているが, この部分の安全率は圧密が進行しても回復せず, 新たに破壊する要素もある. これは, 改良部の圧密沈下に引きずられて, せん断変形が増加するからである. しかし, 非排水載荷で破壊に達していない ($S.F. > 1$) 原地盤土および改良部内の粘土は, 圧密とともに安全率が上昇している. 一方, 荷重端下の砂部の安全率は圧密とともに減少し, 破壊 ($S.F. \leq 1$) する要素も見られる. これは, 改良部内の粘土が体積圧縮し, 砂部が主働破壊するからであると考えられる. 上記の格子状改良地盤の安全率分布の変化は, 杭状改良地盤で得られた結果³⁾と同じである.

(4) 間隙水圧分布

図一二十, 22 は置換率 $A_s=12.6\%$ (列数 2 列) の場合の杭状改良地盤および格子状改良地盤における正規化間隙水圧分布の経時変化である. ここで, 正規化間隙水圧は間隙水圧 u を載荷重 q で除したものである. 両図の (a) は非排水載荷直後 ($t=0$), (b) は $t=10$ 日後,

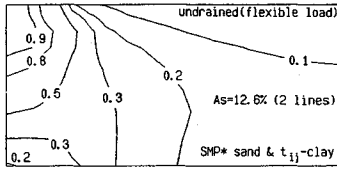
(c) は $t=100$ 日後の分布図である. 格子状改良地盤の改良部における粘土の間隙水圧は, 左右に隣接する格子列内の粘土とは独立している (砂壁により絶縁されている) が, ここでは, 改良部の粘土の間隙水圧は「マルチリンク・エレメント」内に様に分布するとして, 等高線を描いている. 杭状改良地盤 (図一二十 (a)) における非排水載荷時 ($t=0$) の間隙水圧は, 荷重中心下の地表面付近で最大となるが, 格子状改良地盤 (図一二十 (a)) では, 荷重中心下の地盤内部で最大値をとる. また, 改良部における間隙水圧は, 格子状改良地盤では, $t=10$ 日以後はほとんど 0 であるが, 杭状改良地盤では, $t=10$ 日でもかなりの間隙水圧が残存している. しかし, 両地盤における非改良部 (改良部外側の原地盤土部) の間隙水圧分布に, 大きな差はない. 図一二十, 24 は置換率 $A_s=50.2\%$ の場合の正規化間隙水圧分布である. 非排水載荷時の改良部の間隙水圧は, 格子状改良地盤では, 深さ方向に増加するのに対して, 杭状改良地盤では, ほぼ一様 ($u/q \approx 0.65$) に分布している. しかし, $t=1$ 日以後では, 両地盤とも, 改良部の間隙水圧はほとんど 0 であり, 非改良部の間隙水圧分布もほぼ同じである. 図一二十~24 から, 分担径が同じであれば, 低置換率では, 格子状改良地盤における改良部の間隙水圧は, 杭状改良地盤より速く消散することがわかる. また, 両地盤における非改良部の間隙水圧分布は, ほとんど同じである.

7. ま と め

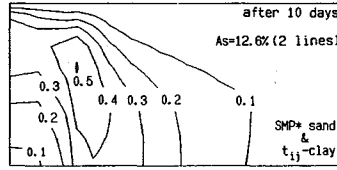
本文では, 「マルチリンク・エレメント」を用いて, 格子状改良されたモデル地盤を解析し, 杭状改良地盤と対比しながら変形特性について考察したが, まとめると以下のようである.

- 1) 「マルチリンク・エレメント」を格子状改良地盤に

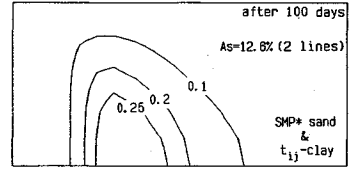
$q=29.4\text{kN/m}^2$



(a) 載荷直後 ($t=0$)



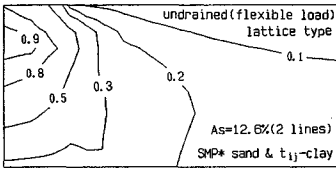
(b) $t=10$ 日後



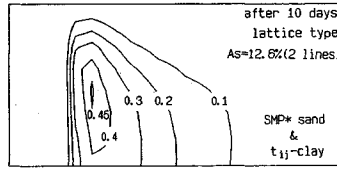
(c) $t=100$ 日後

図—21 正規化間隙水圧分布の経時変化 (杭状改良地盤, $A_s=12.6\%$, 2列)

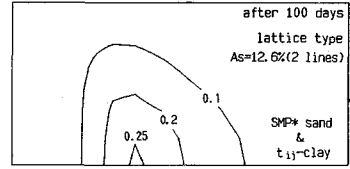
$q=39.2\text{kN/m}^2$



(a) 載荷直後 ($t=0$)



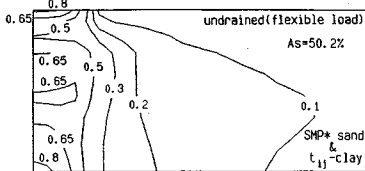
(b) $t=10$ 日後



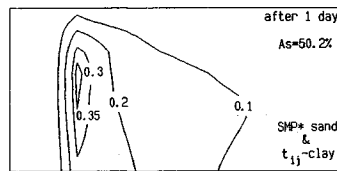
(c) $t=100$ 日後

図—22 正規化間隙水圧分布の経時変化 (格子状改良地盤, $A_s=12.6\%$, 2列)

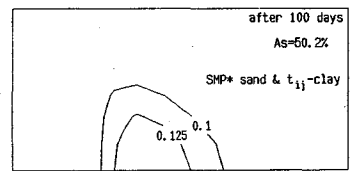
$q=98\text{kN/m}^2$



(a) 載荷直後 ($t=0$)



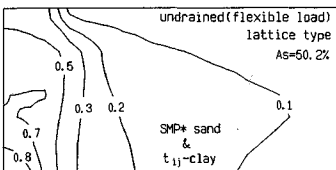
(b) $t=1$ 日後



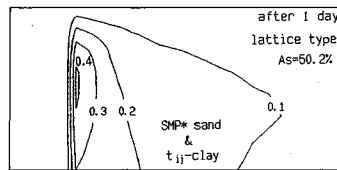
(c) $t=100$ 日後

図—23 正規化間隙水圧分布の経時変化 (杭状改良地盤, $A_s=50.2\%$)

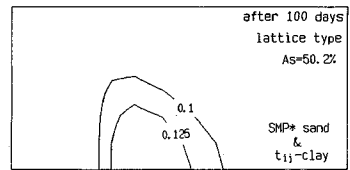
$q=98\text{kN/m}^2$



(a) 載荷直後 ($t=0$)



(b) $t=1$ 日後



(c) $t=100$ 日後

図—24 正規化間隙水圧分布の経時変化 (格子状改良地盤, $A_s=50.2\%$)

も適用できるように修正し, 改良材の排水効果を考慮した圧密解析が妥当に計算できることを示した。

2) 非排水載荷において, 低置換率では, 格子状改良地盤の降伏荷重は杭状改良地盤より大きい。

3) 置換率と分径径が同じ場合, 格子状改良地盤は杭状改良地盤より圧密速度が大きい。

4) 同置換率で列数 (分径径) が異なる場合, 杭状改良地盤では, 杭列数が多い方が圧密沈下量は小さくなるが, 格子状改良地盤では列数にほとんど影響されない。

5) 圧密中において, 杭状改良地盤では, 地盤深部の応力分担比が地表面付近より大きい, 格子状改良地盤では, 地表面付近の応力分担比の方が地盤深部より大きい。

6) 格子状改良地盤および杭状改良地盤とも, 圧密の進

行に伴って, 砂部の安全率は低下し, 改良部内の粘土部の安全率は大きくなる。

7) 改良部の間隙水圧は, 低置換率では, 格子状地盤の方が杭状改良地盤より速く消散するが, 非改良部の間隙水圧の消散速度は両地盤に大差はない。

参考文献

- 1) 石崎仁: 杭状改良地盤における構成式および解析手法の適用性, 第35回土質工学シンポジウム論文集, pp.31~38, 1990.
- 2) 石崎仁: 杭状改良地盤の非排水載荷時の応力・変形特性, 土木学会論文集, 第448号, pp.53~62, 1992.
- 3) 石崎仁: 複合地盤の準三次元圧密解析, 土木学会論文集, 457号, pp.137~145, 1992.

- 4) 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.
- 5) 奈須徹夫・梅本健児・黒田実・真海一昭・境友昭：深層混合処理工法による側方流動抑止に関する模型実験，第25回土質工学研究発表会，pp.1921～1922，1990.
- 6) 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，第406号，pp.127～136，1989.
- 7) Nakai, T. and Matsuoka, H. : Constitutive equation for soils based on the extended concept of “Spatial mobilized plane” and its application to finite element analysis, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, pp.87～105, 1983.
- 8) 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.
- 9) 関口秀雄・柴田徹・藤本朗・山口博久：局部載荷を受けるバーチカル・ドレーン打設地盤の変形特性，第31回土質工学シンポジウム論文集，pp.111～116，1986. (1993. 4. 19 受付)

THE EFFECT OF IMPROVED FORM ON DEFORMATION OF COMPOSITE GROUND

Hitoshi ISHIZAKI

The quasi-three-dimensional FEM which has used for composite ground improved by sand columns is arranged for composite ground of 'lattice form' which is assembled by walls of sand. The proposed method takes into account the drainage to walls of sand. The proposed method shows well the characteristics of latticed composite ground on some tests by unit element. Analyses for the both composite grounds which are 'column form' and 'lattice form' are performed by the proposed method. Consequently at low replacement factor of sand the undrained capacity of the latticed composite ground is larger than that of the columned one. Stress concentrated to sand during consolidation is considerably different between the both composite grounds. It is clarified that the latticed composite ground has the advantage of the dissipation of pore-water pressure.