

PSIII-7

3次元変形を考慮した杭状改良地盤の応力・変形解析

住友セメント(株) 正会員 石崎 仁

深層混合処理工法やサンドコンパクションパイル工法などの杭状改良地盤では、帯状荷重下(堤防、道路盛土など)においても、3次元の応力～変形状態にある。土材料の変形・強度は、中間主応力に影響されることを考えると、帯状荷重下の杭状改良地盤においても、3次元解析が必要である。ここでは、杭状改良部の3次元変形を考慮しながらも2次元要素と同様に取り扱える有限要素解析法を提案し、その解析法による杭状改良地盤のモデル解析結果について述べる。

1. 「Multi-column要素」の提案

著者は、既に杭状改良地盤解析用に「複合要素」¹⁾を提案している。「複合要素」は図-1に示すように、杭状改良単位(改良杭径 a 、影響径 b)を5個の3次元有限要素(中央の薄墨の4角柱が改良杭)で組み立てる。その後、変位モードの拘束により各節点変位自由度を2とし、2次元要素的に取り扱えるようにした。ここでは、更に「複合要素」の自由度の低減・精度の向上を考える。

まず、杭状改良単位の周辺要素および改良杭要素を図-2に示すように、5個の平板要素で表す。平面中心A-A(図-4中の一点鎖線)に対する対称性より、この平板要素組による節点変位と番号は、図-3のように12節点となる。ここでは、平板要素を考えているので、例えば、図-4中の節点 i と i' 、 j と j' の X, Y 方向変位 u, v は同じである。このことより、平板要素の X, Y 方向変位に関する変換($\{B\}$ マトリックスやヤング変換 $\{J\}$)は、2次元要素と同じものが使用できる。一方、平板要素内の Z 方向ひずみ ε_z は、次式で表せるものとする。

$$\varepsilon_z = (1/t) \cdot \{N\}^T \{w\} \quad \dots\dots (1) \quad \therefore \text{上付き} T \text{は転置を表す。}$$

ここに、 t :要素厚さ、 $\{N\}$:形状マトリックス、 $\{w\}$: Z 方向節点変位ベクトル以上から、図-2の平板要素組の剛性方程式は、すべて2次元要素のルーチンを用いて計算できる。 Y 方向変位について、「複合要素」と同じ線形分布を仮定すると、節点1～4は X, Y 変位、節点5～12は X, Z 変位となり、各節点変位自由度は2となる。更に、図-3の節点9～12の X, Z 方向変位に拘束条件を課す。図-4(図-2の平面図)で、例えば、節点9の X, Z 方向変位に対して、次式の関係を仮定する。

$$u_9 = (u_1 + u_5)/2 \quad \dots\dots (2)$$

$$w_9 = w_5/2 \quad \dots\dots (3)$$

ただし、式(3)において、図-4の斜線部の Z 方向変位 $w=0$ である。節点10～12にも同様の仮定をすると、節点9～12の変位は、節点1～8の一次従属となる。すなわち、図-2の平板要素組は、8節点16自由度となり、この要素を「Multi-column要素」(略して、「MC要素」)と呼ぶことにする。この「MC要素」による精度は、文献1)と同じ要素試験に対して、「複合要素」以上である(結果図など省略)。

2. マクロエレメント法の併用

「複合要素」では、マクロエレメント法を併用して、砂杭などのドレーン効果を考慮しているが、「MC要素」にも同様に組み込める。ここでは、周辺要素個々に、マクロエレメント法を適用する。図-5に示すように、ドレーン材に対して、1/4中空円柱が独立の間隙水圧分布(Barronの等ひずみ論)を仮定する。図中の $u_1 \sim u_4$ は各周辺要素の代表間隙水圧である。また、周辺要素同士に対しては、Biotの圧密式を用いる。

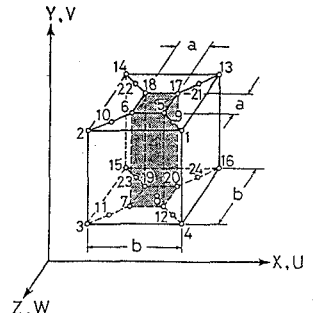


図-1 「複合要素」の概要図

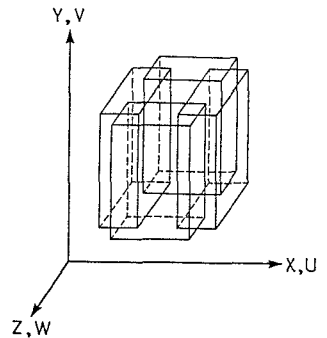


図-2 「Multi-column要素」の概要図

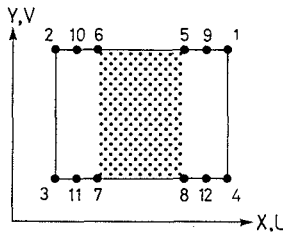


図-3 「Multi-column要素」の節点番号

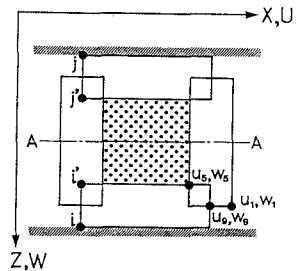


図-4 「Multi-column要素」の平面図

図-6は、砂杭と粘土より成る複合地盤に段階荷重が作用した時の粘土部の鉛直全応力 σ_a/σ_{a0} 、間隙水圧 u/σ_a ～時間関係である（構成式、材料定数、計算条件などは文献1)参照）。「MC要素」による計算値（図中プロット）は、解析値（図中の曲線）と良く一致しており、「MC要素」は、杭状改良地盤の圧密連成解析にも適用できることがわかる。

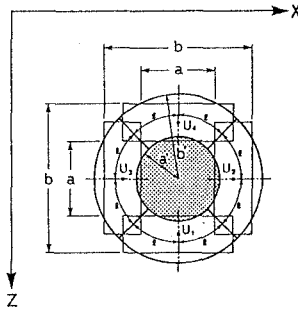


図-5 マクロエレメント法の説明図

表-1 改良領域の諸元

置換率 As(%)	改良杭径 a(m)	影響径 b(m)	杭列数
12.6	0.886	2.5	2
12.6	0.443	1.25	4
28.3	0.886	1.666	3
50.2	0.886	1.25	4

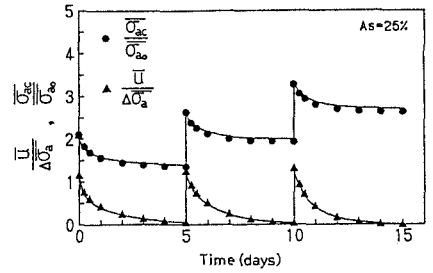


図-6 段階荷重圧密の鉛直応力、間隙水圧～時間関係

3. モデル解析

図-7は、モデル解析の有限要素メッシュである。図中の斜線部が改良領域で、その諸元を表-1に示す。モデル地盤の改良杭は砂杭（密詰め豊浦砂）、原地盤土は粘土（藤の森粘土）とし、構成式は砂にはSMP*モデル²⁾、粘土には t_{ij} -clayモデル³⁾を用いる。初期応力は K_0 正規圧密状態とし、単位体積重量は、砂 1.98t/m^3 、粘土 1.85t/m^3 として計算した。地盤は、すべて地下水位以下で、飽和状態とする。載荷荷重は等分布（たわみ性）とし、粘土部は非排水状態（急速載荷を想定）として計算している。図-8は、改良杭径 $a=0.886\text{m}$ 、置換率 $As=0\%$ （未改良時）、 12.6% 、 28.3% 、 50.2% の場合の荷重 q ～地表面沈下量（CL線上） ρ 関係である。置換率が高いほど沈下量が小さく、降伏荷重が大きいと云う常識的な結果であるが、低置換率 $As=12.6\%$ でもかなりの改良効果があることを示している。図-8は、置換率（ $As=12.6\%$ ）が同じでも、改良杭径が異なる（ $a=0.886\text{m}$ と 0.443m ）場合の荷重～沈下量関係である。図より、改良杭径が小さい（図中の破線）場合の沈下量が若干大きい、降伏荷重はほぼ同じである。このことは、杭状改良地盤の非排水支持力は、改良杭径ではなく、置換率で決まることを意味している。図-9は、置換率 $As=12.6\%$ 、改良杭径 $a=0.443\text{m}$ 、荷重 $q=49\text{kN/m}^2$ （ 5tf/m^2 ）

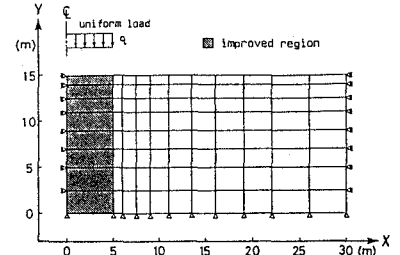


図-7 モデル解析の有限要素メッシュ図

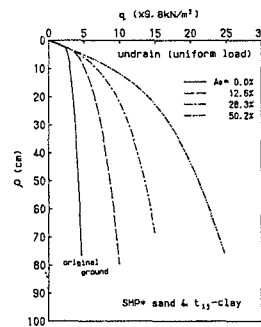


図-8 荷重～沈下関係（ $a=0.886\text{m}$ ）

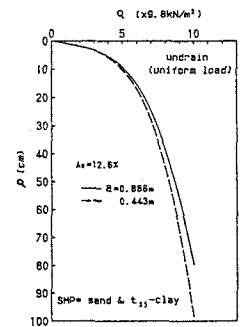
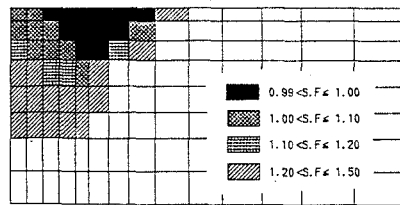
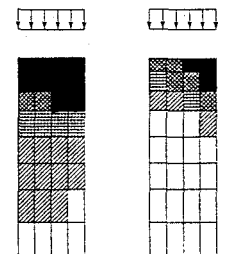


図-9 荷重～沈下関係（ $As=12.6\%$ ）

図-10 要素安全率分布図（ $As=12.6\%$ 、 $a=0.443\text{m}$ ）



(a) 全要素（改良部は砂杭と粘土の体積平均）



(b) 改良部粘土

(c) 改良部砂杭

図-10 要素安全率分布図（ $As=12.6\%$ 、 $a=0.443\text{m}$ ）

ここに、安全率 $S.F.=X/X_r$ で、 X :SMP土の応力比、 X_r :破壊時の応力比 X である。図-9の(b),(c)より、改良部の粘土は、砂杭より多くの要素が破壊（ $S.F.\leq 1$ ）している。このことは、改良部の砂杭と粘土は、同時に破壊していないことを示しており、現行設計法の仮定とは異なる。以上からも、杭状改良地盤の厳密に近い（3次元解析、構成式など）数値解析が重要となる。

参考文献 1)石崎・松岡・中井:土木学会論文集,第400号,pp.113-121,1989 2)Nakai,T and Matsuoka,H:S & F,Vol.26,No.4,pp.87-105,1983 3)Nakai,T and Matsuoka,H:S & F,Vol.26,No.3,pp.81-98,1986