

III-PS 7

杭状改良地盤における2次元解析と3次元解析の相違

住友セメント(株) 正会員 石崎 仁

軟弱地盤の代表的な地盤改良工法である深層混合処理工法やサンドコンパクションパイル工法は、杭状改良で行われるケースが多いが、杭状改良地盤では、いかなる荷重下においても3次元応力～変形状態にある。したがって、杭状改良地盤を解析するには、3次元解析を行う必要があるが、実際には2次元解析による近似がよく行われている。本文では、有限要素解析する場合の2次元解析と3次元解析の相違について述べる。

1. 「2次元複合要素」

ここでは、2次元近似解析法として、改良杭径 a 、影響径 b の杭状改良単位を平面ひずみ要素によるサンドイッチ構造で表す場合(図-1参照)を考える。改良杭を板とみなし、この板の体積が改良杭体積と等しいとすると、板厚 t は次式で表される。

$$t = b/n^2 \quad \dots\dots (1) \quad \text{ここで、} n = b/a$$

さらに、改良杭の置換率 $As = 1/n^2$ となる。本文では、図-1の要素を「2次元複合要素」と呼ぶことにする。なお、以下の解析では、両側の原地盤土要素を各々2分割して計算している。ここで、両解析法とも Z 方向の側面に、平面ひずみ条件が課せられることに注意しよう。

一方、「2次元複合要素」と対比する3次元解析法として、「マルチック・エレメント」¹⁾(図-2)を取り上げる。「マルチック・エレメント」は、杭状改良単位を5個の3次元要素で表し、節点変位を縮約することによって、8節点20自由度で杭状改良単位の3次元応力・変形特性を解析できる特殊要素である。この「マルチック・エレメント」は、間隙水圧との連成および改良杭のドレーン排水効果²⁾も考慮されている。

解析においては、原地盤土は正規圧密粘土、改良杭は密詰め砂を想定し、構成式として砂にSMP*モデル³⁾を、粘土に t_c -clayモデル⁴⁾を用いた。両モデルは、土材料特有の摩擦則、ダイラテンシー特性および中間主応力の影響などを良く表現できる弾塑性構成式である。材料パラメータは、文献3)、4)と同じ値を用いた。

2. 杭状改良単位要素試験

ここでは、杭状改良単位の平面ひずみ圧縮試験を解析し、「マルチック・エレメント」と「2次元複合要素」の精度について調べる。なお、比較解は、図-3に示すように細分割された3次元要素による1/4モデル(深さ方向は1層)の解析結果とする。解析は、側圧(σ_r)一定、原地盤土と改良杭は等軸ひずみ変形とし、改良杭の置換率 $As = 25\%$ に対して行った。初期応力は、 $\sigma = 1 \text{ kgf/cm}^2 (= 98 \text{ kN/m}^2)$ の等方応力状態とした。

(1) 排水試験

改良杭部および原地盤土とも排水状態(間隙水圧を考慮しない)で計算する。図-4は、正規化軸差応力 $(\sigma_a - \sigma_r) / \sigma_{r0}$ ~ 軸ひずみ ϵ_a 関係である。ここに、 σ_{r0} は改良杭部と原地盤土部の平均軸応力である。「マルチック・エレメント」の結果(図中の破線)と「2次元複合要素」の結果(図中の一点鎖線)は、3次元解析結果(図中の実線)とほとんど同じである。

(2) 非排水試験

原地盤土部は非排水状態、改良杭部は排水状態として計算する。図-5は、正規化軸差応力~軸ひずみ関係である。図より、「マルチック・エレメント」の計算結果(図中の破線)は、3次元解析結果(図中の実線)と良

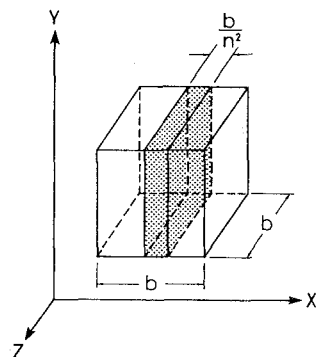


図-1 「2次元複合要素」の概要図

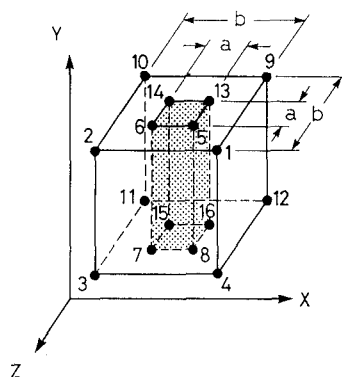


図-2 「マルチック・エレメント」の概要図

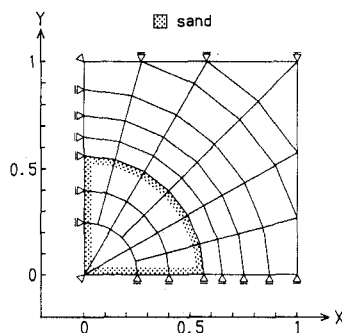


図-3 3次元解析の要素分割平面図

く一致しているが、「2次元複合要素」(図中の一点鎖線)は、強度を過大評価することがわかる。「2次元複合要素」では、改良杭および原地盤土は平面ひずみ変形するが、用いた構成式は、中間主応力の影響より平面ひずみ状態付近で最大強度を発揮する(ただし、排水状態の場合)。この場合、改良杭部は排水状態であるから、「2次元複合要素」の強度は、他の解析法より大きい強度を示すのである。

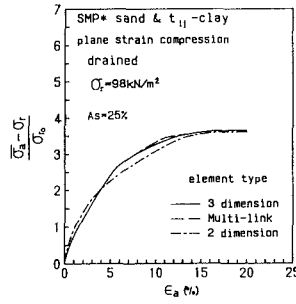


図-4 平面ひずみ圧縮排水試験結果

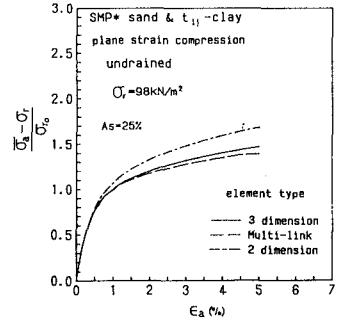


図-5 平面ひずみ圧縮非排水試験結果

表-1 改良領域の諸元

置換率 As(%)	改良杭径 a(m)	改良板厚 b/n²(m)	影響径 b(m)	杭列数
12.6	0.886	0.315	2.5	2
28.3	0.886	0.471	1.666	3
50.2	0.886	0.628	1.25	4

3. モデル解析

図-6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。初期応力などは文献(1)と同じである。載荷荷重は等分布(たわみ性)とし、粘土部は非排水状態として計算している。図-7は、改良領域に「2次元複合要素」を用いた場合の荷重q~地表面沈下量(CL線上)ρ関係である。図-8は、改良領域に「マルチリンク・エレメント」を用いた場合の同関係である。両図とも、置換率Asが大きくなるにつれて降伏荷重が増加しているが、その荷重値は「マルチリンク・エレメント」を用いた(図-8)ほうが、「2次元複合要素」を用いた場合(図-7)より、かなり大きい。すなわち、「2次元複合要素」を用いた場合、置換率Asが増加しても降伏荷重はあまり増加しないことがわかる。これは、「2次元複合要素」がXY面内で容易にせん断変形できるため、せん断応力τ_{xy}の増加により早く破壊応力に達するからと考えられる。これに対して、「マルチリンク・エレメント」では、図-2に示すようにZ方向の両側面にも原地盤要素があるために、XY面内でのせん断変形は抑制される。図-9,10は、置換率As=28.3%の場合の両解析法による変形図である。「2次元複合要素」による結果(図-9)では、原地盤土と改良杭の変形差が、「マルチリンク・エレメント」(図-10)に比べて大きくなっており、上記の考察を裏付けている。以上から、2次元近似解析法は注意して用いる必要がある。

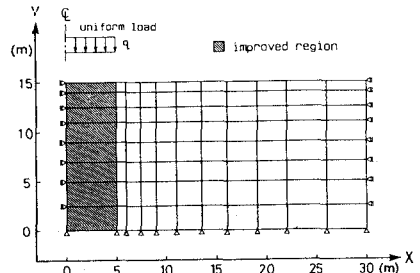


図-6 モデル解析の有限要素メッシュ図

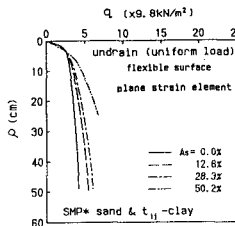


図-7 荷重~沈下関係
(「2次元複合要素」)

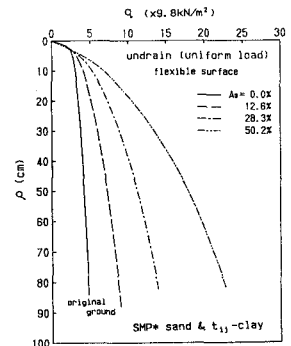


図-8 荷重~沈下関係
(「マルチリンク・エレメント」)

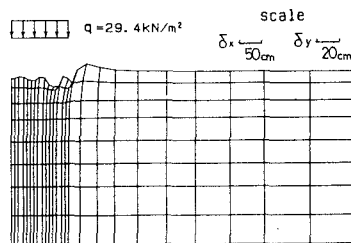


図-9 要素変位図(「2次元複合要素」)

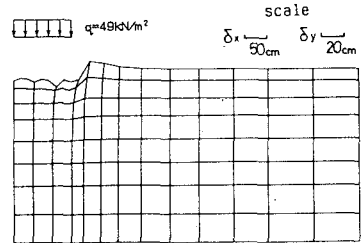


図-10 要素変位図(「マルチリンク・エレメント」)

参考文献 1)石崎:第35回土質工学シンポジウム,pp.31-38,1990 2)関口・柴田・藤本・山口:第31回土質工学シンポジウム,pp.111-116,1986 3)Nakai,T and Matsuoka,H: Soils & Foundations,Vol.23,No.4,pp.87-105,1983 4)Nakai,T and Matsuoka,H: Soils & Foundations,Vol.26,No.3,pp.81-98,1986