

複合地盤の応力・変形特性の解析

名古屋工業大学大学院 ○石崎 仁

名古屋工業大学 中井 照夫

〃 松岡 元

サンドコンパクション工法や深層混合処理工法のように、原地盤と著しく剛性が異なる材料(改良材)を原地盤中に混在させて複合地盤を形成する場合、設計上で最も重要なのは、改良材と原地盤土の応力分担比である。現行の設計法では、応力分担比を経験的に仮定しているが、本質的には、改良土と原地盤土の応力～ひずみ関係から決定されるべきものと考えられる。ここでは、粘土地盤に砂杭を挿入した複合地盤の一次元圧密問題に限定して、砂杭、粘土の応力～ひずみ関係が、変形特性や応力分担比などに及ぼす影響について述べる。

1. 複合地盤の一次元圧密特性(置換率 A_s が変化する場合の影響)

計算は、軸対称FEMにより排水状態で行なっている。砂杭は豊浦砂、粘土は藤の森粘土を想定し、初期応力は砂杭・粘土とも鉛直応力 $\sigma_v = 1 \text{ kgf/cm}^2$ 、水平応力 $\sigma_h = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ としている。応力～ひずみ関係は、砂杭にはSMPモデル¹⁾、粘土には t_{ij} -clayモデル²⁾を用いる。置換率(砂杭体積/全体積) $A_s = 4, 9, 25, 50\%$ とした場合の圧密応力 $\bar{\sigma}_v$ ～砂杭・粘土の応力比 τ_{SMP}/σ_{SMP} 、 $\bar{\sigma}_v$ ～鉛直ひずみ $\bar{e}_v$ ～応力分担比 $n = \sigma_{vs}/\sigma_{vc}$ 関係を、図-1, 2に示す。ここに、 σ_{vs} , σ_{vc} は砂杭、粘土の鉛直応力を意味する。図-1の縦軸 τ_{SMP}/σ_{SMP} は、空間滑動面(SMP)上のせん断・垂直応力比で、摩擦則に従う材料の3次元応力下のせん断時の変形・強度特性を統一的に記述できる応力パラメータである。³⁾ 図-1で、同じ圧密応力 $\bar{\sigma}_v$ では、置換率 A_s が小さいほど砂杭の応力比 τ_{SMP}/σ_{SMP} は高くなっている。これは、置換率が小さい(砂杭が細い)ほど、砂杭の主働変形が著しくなり、砂杭は早く破壊線(f. l)に近づくためである。一方、置換率 A_s が大きいと、粘土は半径方向に多く圧縮され、等方応力に近づこうとするため、粘土の τ_{SMP}/σ_{SMP} は減少するものと考えられる。それらの値は、ほぼ一定で、粘土の破壊線(f. l)よりかなり低いので、粘土の破壊は起こらないと考えてよい。図-2では、置換率 A_s が大きいほど応力分担比 n は大きく、鉛直ひずみ $\bar{e}_v$ は小さくなっている。これは、置換率が大きくなれば、砂杭の分担する荷重が大きくなるためと考えられる。経験的に応力分担比は $n = 3 \sim 7$ と云われているが、図-2の計算結果は良い対応を示している。

2. 粘土の構成式が異なる場合の影響

ここでは、置換率一定($A_s = 25\%$)で、粘土の構成式として t_{ij} -clayモデル, Cam-clayモデル, 修正Cam-clayモデルを用いた場合の計算結果を図-3, 4に示す。両図で、 t_{ij} -clayモデルと修正Cam-clayモデルでは、大差ないが、Cam-clayモデルは他者と比べて鉛直ひずみ $\bar{e}_v$ が小さく、粘土の応力比 $\tau_{SMP}/\sigma_{SMP} \approx 0$ 、すなわち等方応力状態に近くなっている。これは、図-5の応力比～ひずみ増分比関係より次のように説明でき

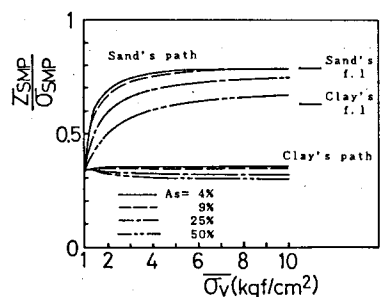


図-1 砂杭・粘土の応力比～圧密応力関係

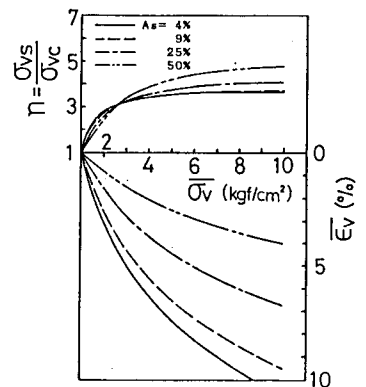


図-2 応力分担比～圧密応力～鉛直ひずみ関係

る。粘土は、鉛直荷重と砂杭の膨張により二方向に圧縮され、その時の塑性ひずみ増分比 $dV^p/d\varepsilon^p$ が、例えば図-5中の一点鎖線で示した大きな負値になるものとする。Cam-clayモデルでは、その応力比～塑性ひずみ増分比関係は図-5中の直線で与えられるが、この条件を満たす応力比 q/p は負値になる。しかし、 q/p は正值しかとれないから、弾性ひずみとのかねあいで、 $q/p \neq 0$ ($\tau_{SMP}/\sigma_{SMP} \neq 0$) の応力状態で変形が進行すると考えられる。一方、 t_{ij} -Clay、修正Cam-clayモデルの場合、圧密のように平均応力が増える応力経路下の応力比～塑性ひずみ増分比関係は、図-5中の上方の曲線のように表わされたため、前述の条件を満たす応力比は負にならず、材料モデル特有の応力比に収束する。また、図-4において、Cam-clayモデルの鉛直ひずみ $\bar{\varepsilon}_v$ が小さいのは、応力状態が等方に近くなるためせん断変形しにくくなるからと考えられる。このように、構成式の応力比～ひずみ増分比関係の特徴は、複合地盤の変形特性にも顕著に反映されるから、構成式の選択には、注意する必要がある。

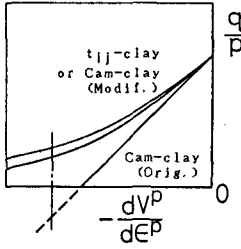


図-5 応力比～ひずみ増分比関係(説明図)

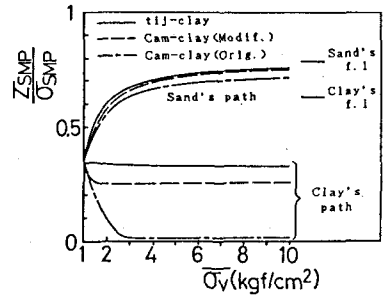


図-3 砂杭・粘土の応力比～圧密応力関係

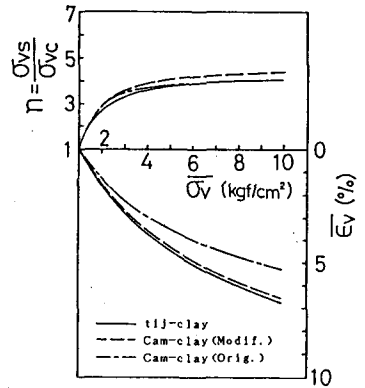


図-4 応力分担比～圧密応力～鉛直ひずみ関係

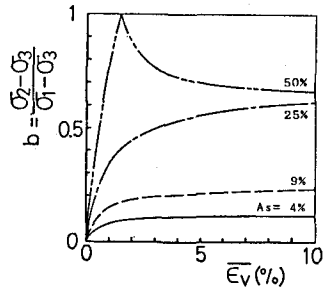


図-6 中間主応力係数～鉛直ひずみ関係 (t_{ij}-clay)

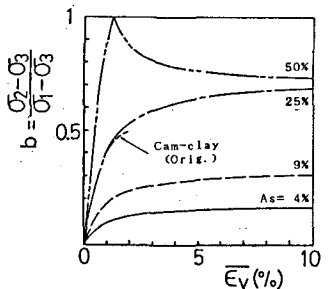


図-7 中間主応力係数～鉛直ひずみ関係 (Modified Cam-clay)

3. 粘土部中心における中間主応力係数の変化

複合地盤の一次元圧密では、砂杭は常に三軸圧縮応力状態にあるが、粘土は砂杭の膨張により、半径方向と円周方向の応力が異なり ($\sigma_r \neq \sigma_\theta$)、相異なる3主応力状態となる。置換率 A_s ～鉛直ひずみ $\bar{\varepsilon}_v$ ～中間主応力係数 $b = (\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ 関係を、図-6 (t_{ij}-clayモデル) および図-7 (修正Cam-clayモデル) に示す。置換率 A_s が大きいほど粘土は半径方向により圧縮されるので、三軸伸張応力状態 ($b=1$) に近づくと考えられるが、図-6,7の結果はそのような特性をよく表わしている。しかし、両図で置換率 $A_s=50\%$ の時、 b 値は一度1に達した後に減少しているが、これは、半径方向応力が軸方向応力よりも大きくなるからである。すなわち、最大主応力方向の90°の回転が生じている。なお、図-7の破線はCam-clayモデルの場合 (置換率 $A_s=25\%$) で、途中までは修正Cam-clayモデルとほぼ同じであるが、 $b=0.5$ 付近で等方応力状態になり、以後 b 値の定義ができない。以上のように、粘土の応力状態は、置換率や変形に伴って変化するので、複合地盤の解析においても3次元応力下での変形特性を妥当に表現できる構成式を用いる必要がある。

謝辞 日頃御援助頂いている本学山内利彦、吉田弥智教授に感謝致します。

4. 参考文献

- 1) 中井・松岡 (1981): 土木学会論文報告集 Vol.306, pp.23-34
- 2) Nakai, T. and Matsuoka, H. (1986): Soils and Foundations, Vol.26, pp.81-98
- 3) Matsuoka, H. and Nakai, T. (1974): Proc., JSCE, No.232, pp.59-70