

非線形均質化法による複合地盤の変形解析

清水建設（株） 正会員 ○石川 明

1. はじめに 沈下制御を目的として原地盤に剛性の高い杭、改良体を周期的に打設する複合地盤の静的な沈下挙動を検討する場合、等価な剛性を算出する均質化法は1つの有力な方法とみなされている。本研究では、①寺田らの開発した非線形均質化法アルゴリズムに基づき、応力状態に応じた等価剛性を用いて構造物の静的沈下量を算出する解析プログラムを新たに開発した。② これを用いた事例計算を行い、算出した沈下量がマイクロ周期構造のみならず地盤の応力状態に応じた等価剛性に基づいていることを示した。

2. 定式化 均質化法の理論に基づき、地盤の挙動を記述する通常用いる変分方程式（測度 x ）にマイクロ周期構造を表す測度 y を導入し、両スケールの連成挙動を記述した変分方程式を用いる（寺田¹⁾）。

$$\int_Y \nabla_y \eta^1 : \sigma^0(x, y) dy = 0 \quad \int_Y \tau_y^0 : (\nabla_x^{(s)} u^0 + \nabla_y^{(s)} u^1 - \varepsilon^0) dy = 0 \quad \int_Y \gamma^0 : (a^\varepsilon(x, y) : \varepsilon^\varepsilon(x, y) - \sigma^0) dy = 0 \quad (1) \quad \text{マイクロ方程式}$$

$$\forall \eta^1 \in W_{per} \quad \forall \tau^0 \in S^0 \quad \forall \gamma^0 \in S^0$$

$$\int_\Omega \nabla_x^{(s)} \eta^0 : \Sigma(x) dx = \int_\Omega \rho^H b \cdot \eta^0 dx + \int_{\Gamma_e} T \cdot \eta^0 ds \quad \int_\Omega T : \left(\left[\frac{1}{|Y|} \int_Y (\nabla_x^{(s)} u^0(x)) dy - E(x) \right] \right) dx = 0 \quad \int_\Omega \Gamma : \left(\left[\frac{1}{|Y|} \int_Y a^\varepsilon : \varepsilon^\varepsilon dy \right] - \Sigma(x) \right) dx = 0 \quad (2) \quad \text{マクロ方程式}$$

$$\forall \eta^0 \in V \quad \forall T \in S \quad \forall \Gamma \in S$$

ここに、 $u^0, u^1, \sigma^0, \varepsilon^0$ はそれぞれ、マイクロ変位、マイクロ応力、マイクロひずみであり、 ρ^H は平均密度、 $\Sigma(x), E(x)$ はマクロ応力、マクロひずみとして(3)式で表される。

$$\rho^H = \frac{1}{|Y|} \int_Y \rho dy \quad \Sigma(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y \sigma^0(x, y) dy \quad E(x) = \frac{1}{|Y|} \int_Y \varepsilon^0(x, y) dy \quad (3)$$

構成則は以下の非線形弾性構成則²⁾を使用した。

$$a^\varepsilon(\sigma_m') = \lambda I \otimes I + 2G(\sigma_m') I \quad G = \frac{\sigma_{1\max}' - \sigma_{3\min}'}{2\gamma_{13,t}} \quad \gamma_{13,t} = \frac{1}{G_0^*} \left(\frac{2}{\sigma_{1\max}' - \sigma_{3\min}'} - \frac{1}{\sigma_{f,13}'} \right)^{-1} \quad (4)$$

I, I は、 $I = \delta_{ij} e_i \otimes e_j, I = 1/2 [\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}] e_i \otimes e_j \otimes e_k \otimes e_l$ と定義される2階、4階のテンソルである。また、せん断剛性 G は平均主応力 σ_m' の関数とな

っている。 $\sigma_{f,13}'$ はせん断強度、 G_0^* は弾性せん断剛性で(5)式で定義する。

$$\sigma_{f,13}' = \frac{\sigma_{1\max}' + \sigma_{3\min}'}{2} \sin \phi_d \quad G_0^* = G_{0,r}^* \left(\frac{\sigma_m'}{\sigma_{m,r}'} \right)^{0.5} \quad (5)$$

ここに、 σ_m' は平均主応力であり、 $\sigma_{m,r}'$ は基準となるせん断剛性 $G_{0,r}^*$ での平均主応力である。これらの支配方程式、構成式から周期構造をもつ複合地盤の変形挙動が記述できる。図-1に解析フローを示す。このフローでは、マクロスケールのイタレーション毎に、前ステップでつり合ったマイクロ要素の応力から(4)、(5)式により、マイクロ要素のせん断剛性を求めている。このせん断剛性を用いて、Newton-Raphson法によりマイクロ、マクロ各スケールでつり合いが満たされるまでイタレーションを行う。ただし、ここでは、計算の単純化のため、マイクロ接線係数を求める際、(6)式に示す近似をした。

$$\dot{\sigma} = \left(a(\sigma_m') : \varepsilon \right) = a : \dot{\varepsilon} + \dot{a} : \varepsilon \approx a : \dot{\varepsilon} \quad (6)$$

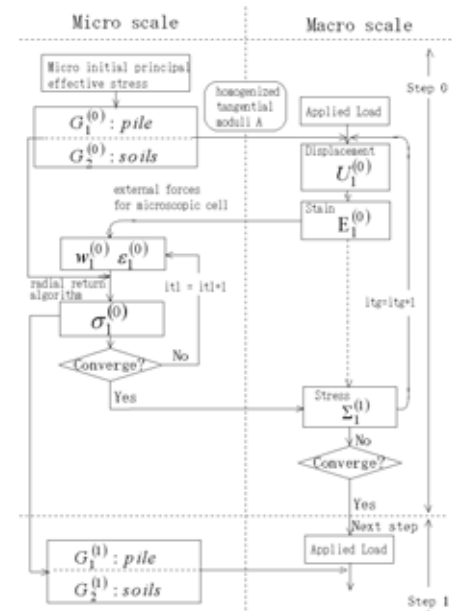


図-1 解析に用いたフロー

キーワード 均質化法, 数値解析, サンドコンパクションパイル, 沈下

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設（株）技術研究所 TEL 03-3820-8267 FAX 03-3820-5959

3. 事例計算

解析条件 事例解析として、サンドコンパクションパイル(SCP)を打設した地盤上に構造物を建設した例を示す。SCPの置換率は $a_s=5\sim 15\%$ として、打設前後の地盤定数は表-1の物性を用いた。図-2に解析に用いたマクロ、ミクロメッシュを示す。マクロメッシュは $1\times 1\times 1\text{m}$ の立方体要素を10個並べた1次元カラム状のメッシュとし、 x, y 変位は拘束した。底面は固定境界として、上面から建物荷重として10kPaの分布荷重を5ステップに分割して载荷した。一方、ミクロメッシュは、砂杭の置換率 a_s にあわせて、原地盤の立方体メッシュ内に砂杭を表す円柱状のメッシュを設定した。図-3に示すように、原地盤の初期せん断剛性は拘束圧依存性を示している。

解析結果 図-4~6に解析結果を示す。荷重载荷ステップに応じて変位が増加するが、 a_s が増えるにつれて地盤全体の剛性が向上するため変位量が小さくなった。また、水平方向の変位を固定しているため、荷重ステップの増加につれて原地盤が拘束されて等価剛性が高くなり、地表面変位の増加率が小さくなった(図-4)。図-5に砂杭のポアソン比を変化させた場合の各荷重ステップにおける変位分布を示す。砂杭部分のポアソン比が0.2~0.4に増加するにつれて、最大で0.6mm程度、地表面変位量が小さくなった。砂杭のポアソン比が大きくなると载荷過程において原地盤からの拘束が大きくなるため、砂杭に応力集中が起きるためである。

図-6に砂杭中心部から同心円状に σ_z 分布を描いた図を示す。砂杭のポアソン比 $\nu=0.4$ では砂杭部に応力が集中するが、原地盤よりポアソン比が小さい $\nu=0.2$ では、剛性が高い砂杭に応力がほとんど集中しなかった。以上の解析結果から、提案するモデルは、①置換率 a_s や砂杭のポアソン比など周期構造の違いが地盤の全体剛性に与える影響を定量的に表現している、②地盤の応力状態を反映した全体剛性により沈下量が計算されている、と言える。

参考文献 1) 寺田賢二郎, 菊池昇(1999): "非均質弾塑性体のマルチスケール解析のための一般化アルゴリズム", 土木学会論文集, No.633/I-49, 217-229

2) Asaka, Y., Tokimatsu, K., Iwasaki, K. and Shamoto, Y.(2003): "A simple Stress-strain relation based on stress-path behavior in strain-path controlled triaxial tests", Soils and Foundations, Vol.43, No.2, 55-68

謝辞 均質化法について東北大学工学研究科土木工学専攻の京谷、寺田助教教授にご指導いただきました。ここに、感謝いたします。

表-1 SCP打設前後の物性

	a_s %	G_{or}^* MPa	σ'_{mr} MPa	e	ρ_t t/m ³	ϕ °	ν
SCP	-	122		0.58	1.8	44	0.2-0.4
原地盤	5	96	0.1	0.74	1.7	40	0.3
	10	106		0.68	1.75	42	0.3
	15	121		0.58	1.8	44	0.3

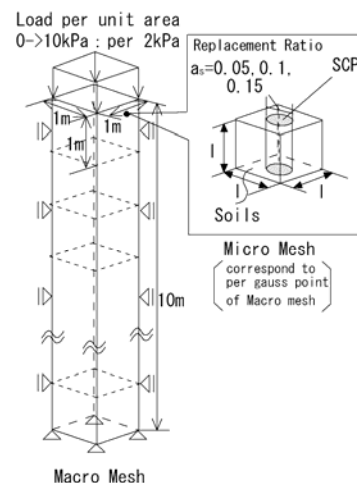


図-2 解析モデル簡略図

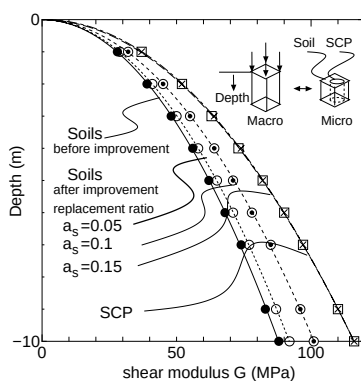


図-3 建物荷重载荷前の初期地盤剛性

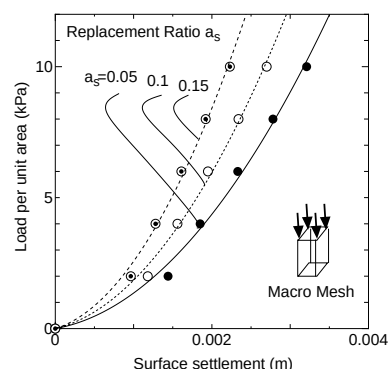


図-4 荷重ステップと地表面沈下量関係

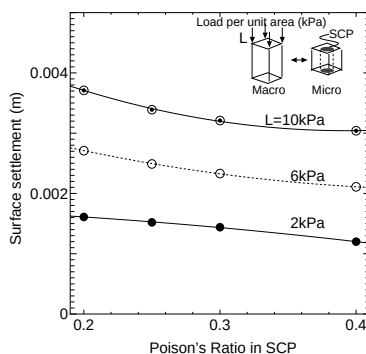


図-5 砂杭のポアソン比と地表面沈下関係

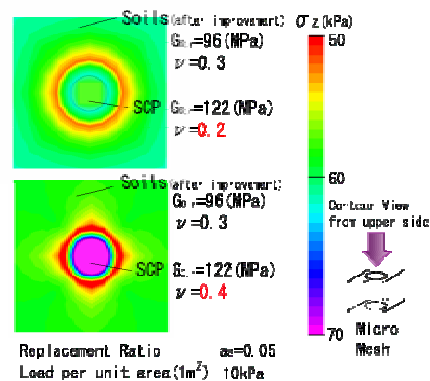


図-6 ミクロメッシュの σ_z 分布