

三次元弾性均質化法を用いた複合地盤の即時沈下に関する基礎的検討

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緩い砂質地盤や粘性土地盤にサンドコンパクションパイルやセメント系地盤改良を施工する場合、改良体の改良率やピッチ、剛性を予め決定して改良効果を定量的に評価する必要がある。その際、改良体1本1本を忠実にモデル化する方法は検討に多大な労力を必要とする場合も多い。そこで、本研究では、原地盤と改良体で構成される単位周期構造の挙動の集積が複合材料全体の挙動を表すという考えに基づき、弾性範囲内ではあるが、(数学的)均質化法を改良地盤の沈下問題に適用した結果を示す。

2. 均質化法と解析の目的

均質化法では、構造物や地盤全体を表す空間座標(測度) x に対して、(1)式で定義される新たな空間測度 y を導入し微視的周期構造を表現する。

$$y = x/l \quad (1)$$

ここで、 $l = l/L$ 、 l : ユニットセルの代表長、 L : 構造全体の代表長である。変位(ひずみ)、応力に対してオーダーの異なる2つの空間測度 x 、 y を用いて漸近展開することにより、 y 上での単位周期構造(ユニットセル)の挙動と、 x 上での複合材料全体の挙動を2つの連成した支配方程式で表現する。本解析のように材料の線形性を仮定する場合に限り、仮想的に等価な材料物性が求められる。

$\rightarrow 0$ すなわち全体構造に対して周期構造が無限に存在する場合の数学的な厳密解を均質化法は与えるが、周期が少ない場合でもある程度の精度でマクロ挙動を表現できる¹⁾。本解析では、現実に考えられる程度の周期で改良された地盤を想定することにより、周期の回数(ユニットセルの個数)や外部境界の影響について三次元弾性均質化解析を通して考察した。

3. 解析対象

図1、表1に本解析で用いたモデルを示す。 $E_s=10\text{MN/m}^2$ 、 $\nu=0.3$ の地盤(N値=10~15の砂地盤を想定)に対して、 $50 \times 50 \times 2.5\text{m}$ の範囲にわたり地盤改良したケースを想定した。改良体の弾性係数は $E_p=50, 100, 200, 300\text{MN/m}^2$ 、ポアソン比は $\nu=0.1$ とした。地盤改良率を体積比で25%とし、改良ピッチが細かい場合(モデルA: $5 \times 5\text{m}$ の正方形内の $2.5 \times 2.5\text{m}$ が改良されている場合)と粗い場合(モデルB: $10 \times 10\text{m}$ 正方形の $5 \times 5\text{m}$ が改良されている場合)の2種類を設定した。構造物の荷重 $49\text{kN/m}^2 (=5\text{tf/m}^2)$ を床・スラブの剛性を模した厚さ $t=0.5\text{m}$ 、 $E_c=2.0 \times 10^4(\text{MN/m}^2)$ 、 $\nu=0.1$ の平面要素で支える構造とした。構造物による載荷範囲は改良部分全域にわたる $50 \times 50\text{m}$ の分布荷重とした。改良体を厳密にモデル化して三次元FEM弾性解析を行った場合と、均質化法で求めた等価な物性に対して三次元FEM弾性解析を行った場合の2種類を行い、双方を比較することにより均質化法の適用性について検討した。

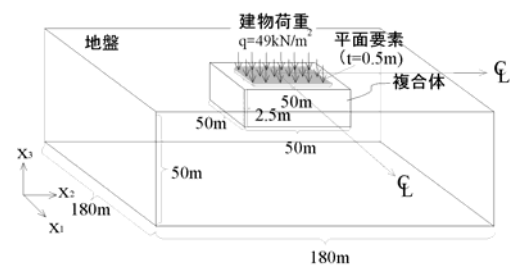


図1 解析モデル

表1 解析に用いた物性

構造物基礎 (平面要素 $t=0.5\text{m}$)	$E_c=2 \times 10^4 \text{MN/m}^2$ $\nu=0.1$
地盤	$E_s=10 \text{MN/m}^2$ $\nu=0.3$
改良体	$E_p=50, 100, 200, 300 \text{MN/m}^2$ $\nu=0.1$

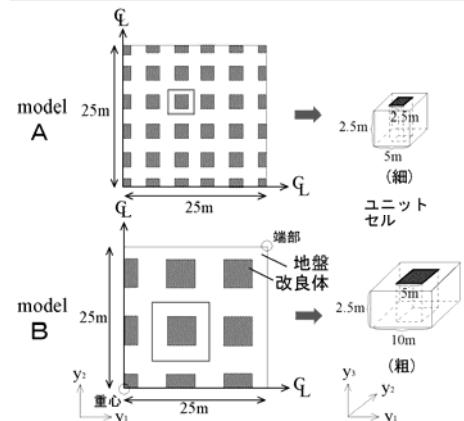


図2 微視的周期構造(ユニットセル)

キーワード 均質化法, 三次元弾性解析, 複合地盤, 即時沈下

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 03-3820-8624

4. 解析結果

(1) 均質化弾性係数

図3に改良体の弾性係数が複合地盤の等価な弾性係数($E_1^H, E_2^H, E_3^H, G_{13}^H, G_{23}^H$)に及ぼす影響を示す。改良体の弾性係数が増加するにつれ、複合地盤の縦方向の弾性係数 E_3^H は線形的に増加する。一方、横方向の弾性係数 E_1^H, E_2^H 、せん断弾性係数 G_{13}^H, G_{23}^H は増加率が低く、異方性が強い地盤として評価できる。

例えば、図3で改良体の弾性係数が $E_p=300\text{MN/m}^2$ の場合、複合地盤の横方向の弾性係数は $E_1^H=E_2^H=18\text{MN/m}^2$ と原地盤の弾性係数 $E_s=10\text{MN/m}^2$ に対して1.8倍の剛性の増加にとどまるのに対し、縦方向の等価な弾性係数は $E_3^H=83\text{MN/m}^2$ と8倍以上となる。一方、せん断弾性係数は原地盤の $G_{s13}=3.8\text{MN/m}^2$ に対して $G_{13}^H=6.5\text{MN/m}^2$ と1.7倍弱増加することがわかった。このように均質化法を用いることにより複合地盤の異方性に関して定量的な評価が可能となる。なお、本解析のように鉛直方向に改良体の形が変化しない場合、縦方向の均質化弾性係数は算術平均により算出した弾性係数の値と完全に一致する。

(2) 構造物中心の沈下量と相対沈下量

改良体の弾性係数が $E_p=300\text{MN/m}^2$ の場合における、複合地盤部分(GL-0~-2.5m)の鉛直ひずみ(ϵ_z)分布を図4に、GL-0, -2.5, -5mの鉛直変位量を図5に示す。モデルA, Bを厳密にモデル化した場合、剛性が大きい改良体部分のひずみは原地盤と比較して小さくなり、原地盤部分とのひずみ差だけ改良体が原地盤に貫入する。改良のピッチが細くなるほどひずみ差は小さくなり、均質化法による解析結果に近づく。このことから、改良体が荷重により原地盤に大きく貫入する場合は、絶対沈下量の算出に解析誤差が生じると考えられる。本解析における貫入量はモデルBでも0.5cm程度と僅かであり、地表面における沈下量は、モデルA(細)では誤差0.25cm以内(境界部は0.37cmの誤差)、B(粗)では0.4cm以内(境界部は0.42cmの誤差)となった。中心部と端部の相対沈下量について両者はほぼ一致し、モデルA, Bともに、実用上十分な精度で沈下量を推定できることがわかった。

5. 結論 均質化法による計算と厳密にモデル化した場合との比較を行った。50×50mの平面に5個程度の少ない周期でも、複合地盤の全般的な沈下性状を0.4cm以内の精度で表したこと、周期の境界部では誤差は0.1cm程度であったこと、などから本ケースのような複合地盤の沈下問題に関して、周期数や境界の影響は工学上許容できることがわかった。今後は、地盤の材料非線形性や拘束圧依存性を考慮したより現実的な検討を進めていく予定である。

謝辞 均質化法について東北大学工学部 京谷孝史, 寺田賢二郎助教授にご指導いただいた。ここに、感謝いたします。

参考文献 1) 寺田賢二郎, 菊池昇: 均質化法入門, 丸善出版社, 2003

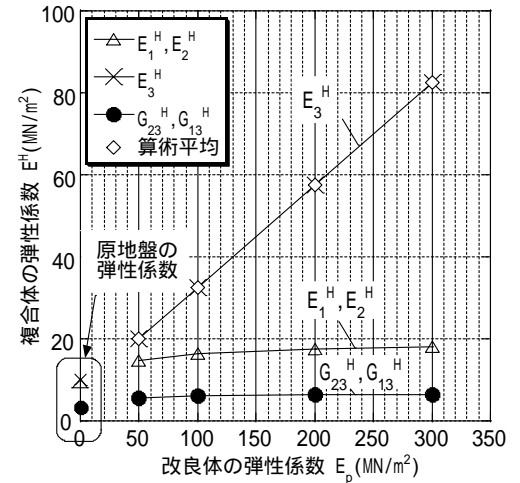


図3 均質化弾性係数

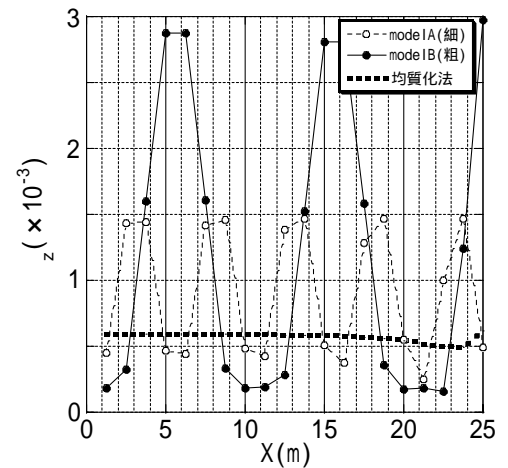


図4 複合地盤の鉛直方向ひずみ

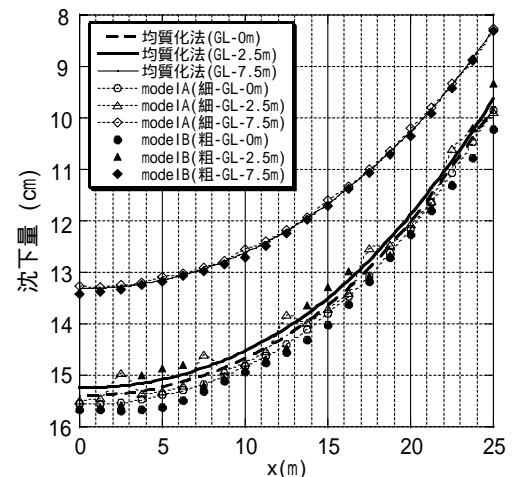


図5 鉛直変位量(GL-0, -2.5, -7.5m)