

Ⅲ－A 255

地盤の3次元応力～浸透連成解析による矩形盛土解析に関する一考察

清水建設（株）和泉研究室 正会員 ○奥野哲夫
 同上 技術研究所 正会員 荻迫栄治
 同上 土木本部 正会員 河辺 衛

1. はじめに

地盤工学におけるFEM解析の普及の背景には、土木構造物の大型化・複雑化あるいは新開発の構造物の出現により、従来の慣用的設計手法のみでは対応できない問題が増えてきたこと、ならびに都市部における近接施工の増加、現場動態観測の普及とともに、構造物と地盤の相互作用も考慮した挙動の予測・評価が重要になってきたことなどが考えられる。特に、問題が複雑化・多様化するにつれて、従来の2次元的な取り扱いでは評価が困難な場合も増えてきている。本報告では、今後の研究に先駆けた基礎的な検討として、軟弱地盤上に矩形盛土を施工する場合を想定した3次元応力～浸透連成解析を実施し、2次元解析と比較した結果を報告する。

2. 基礎方程式と有限要素法の定式化

地盤材料を多相体として捉えた連成問題は、従来より圧密理論として数多く提案されているが、ここではBiotの3次元圧密の基礎方程式に基づくものとする。すなわち、(1)釣り合い方程式（準静的）、(2)土骨格の構成式（線形弾性）、(3)ひずみの適合条件式（微小変形）、(4)有効応力の原理、(5)間隙水の流動（ダルシー則）、(6)連続条件式、からなる。使用した解析コードでは、構成式として非線形弾性、弾完全塑性、弾塑性、弾粘塑性も取り扱えるが、ここでは上記の線形弾性に基づく基礎的な検討を行う。

有限要素法の定式化には数種類あるが、ここではZienkiewiczらの定式化に従い、釣り合い方程式を仮想仕事原理で、また連続の式はGalerkin法を適用して離散化した。また、時間領域においてもGalerkin法を適用して線形補間した。その結果、各時間ステップの節点変位増分ベクトル $\{\Delta\delta\}$ と節点間隙水圧増分ベクトル $\{\Delta p\}$ を未知数とした以下の代数方程式を得る。なお、定式化の詳細は省略する。

$$\begin{bmatrix} [K]_n & [C] \\ [C]^T & -[S] - \alpha \cdot \Delta t \cdot [\bar{K}]_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta\delta\} \\ \{\Delta p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{R_u\}_{n+1} \\ \{R_p\}_{n+1} \end{Bmatrix}$$

ここで、 $[K]_n$ はnステップの剛性行列、 $[C]$ は間隙水圧増分と体積増分を関係付ける行列、 $[S]$ は水の圧縮性に伴う貯留に関する行列、 $[\bar{K}]_n$ はnステップの透水行列、 α は時間領域での補間のパラメータで $0 \leq \alpha \leq 1$ の値、 Δt は時間増分である。さらに、 $\{R_u\}_{n+1}$ はn+1ステップの見掛けの荷重増分ベクトル、 $\{R_p\}_{n+1}$ はn+1ステップの見掛けの流量増分ベクトルである。

3. 地盤モデルと解析条件

解析に用いた3次元地盤モデルを図-1に示す。解析は対称性から1/4領域モデルを用いて行い、地盤は6層の地層から構成されるものと想定した。表-1には設定した各地層の材料定数を表層のBs1層から深度順に示す。図-1のメッシュ層厚が薄い層がAs1層である。境界条件としては排水面は地表面のみとし、変位に関しては側面（対称面以外）は鉛直方向自由、水平方向固定、対称軸に沿った断面（対称面）は断面法線方向のみ固定とし、底面は完全固定とした。また、これと比較するために用いた2次元地盤モデルを図-2に示す。盛土の盛り立ては図-3に示すように70日で15.4mの盛土を盛り立てるものとし、820日後までの解析を行った。

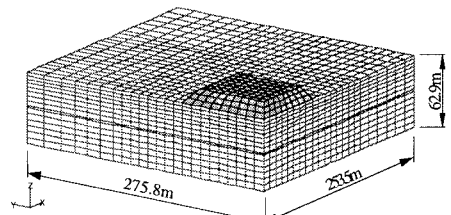


図-1 矩形盛土の3次元解析モデル

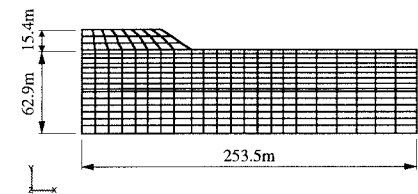


図-2 矩形盛土の2次元解析モデル

表-1 解析に用いた地盤の材料定数

土層	層厚 (m)	単位体積重量 (kN/m ³)	変形係数 (kPa)	ポアソン比	透水係数 (m/day)	間隙率 (%)
盛土	15.4	17.7	3,430	0.333	—	—
Bs1層	9.7	19.1	14,710	0.333	7.8	41
Bs2層	7.2	17.7	4,900	0.333	4.3×10^{-2}	55
Ac1層	12.7	16.2	8,830	0.333	4.3×10^{-4}	63
As1層	1.7	18.1	5,880	0.333	0.26	50
Ac2層	20.5	15.7	12,750	0.333	4.3×10^{-4}	63
Ds1層	11.1	19.1	34,320	0.333	0.60	47

キーワード：連成解析，圧密，3次元，有限要素法

連絡先（住所：東京都千代田区内幸町2-2-2 富国生命ビル，電話：03-3508-8101，Fax：03-3508-2196）

4. 解析結果と考察

解析結果のうち、3次元解析による変形図（820日後）を図-4に、また過剰間隙水圧の経時変化を図-5に示す。盛土の盛り立てに伴う過剰間隙水圧の上昇と、その後の消散が明確に現れている。また、相対的に透水性の高いAs1層において、過剰間隙水圧の消散が速いことが伺われる。

2次元解析との比較として、盛土の盛り立てが完了する70日後の変位を比較して図-6、7に示す。図-6は盛土部地表面の沈下量分布を示している。3次元解析では盛土中心部（実線）と盛土端部（破線）の結果を示しているが、盛土中心部の沈下量は3次元解析の方が2次元解析（一点鎖線）よりも若干大きくなっている。また、盛土端部では2次元解析の沈下量は大きくなっている。これらの違いは、いずれも2次元解析では盛土荷重が奥行き方向に均等に载荷されるのに対して、3次元解析では盛土の矩形形状に合わせた3次元的な効果が適切に評価されていることによる。また、図-7には盛土法尻部における側方変位の深さ方向の分布を示している。図中、2次元解析（一点鎖線）の側方変位が3次元解析（実線）のそれより全般的に大きくなっており、最大値を比較すると約2割程度過大に評価されている。

5. おわりに

地盤の3次元応力～浸透連成解析により、線形弾性体を仮定した3次元圧密解析を行い、その基本的な挙動を2次元解析と比較した。その結果、2次元解析では盛土中心部の沈下量を過小に、また盛土端部の沈下量および法尻部の側方変位を過大に評価する傾向が確認された。これらの結果から、3次元解析の有効性が認められる。

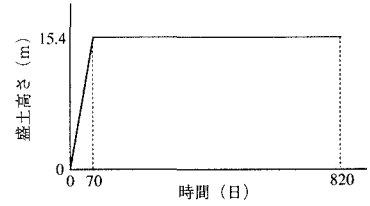


図-3 盛土の盛り立て工程

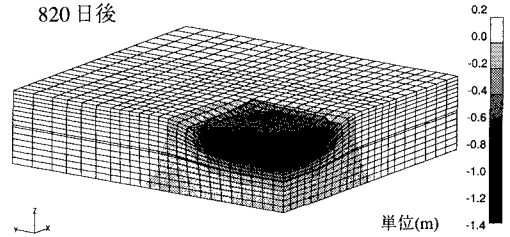


図-4 変形と鉛直変位分布

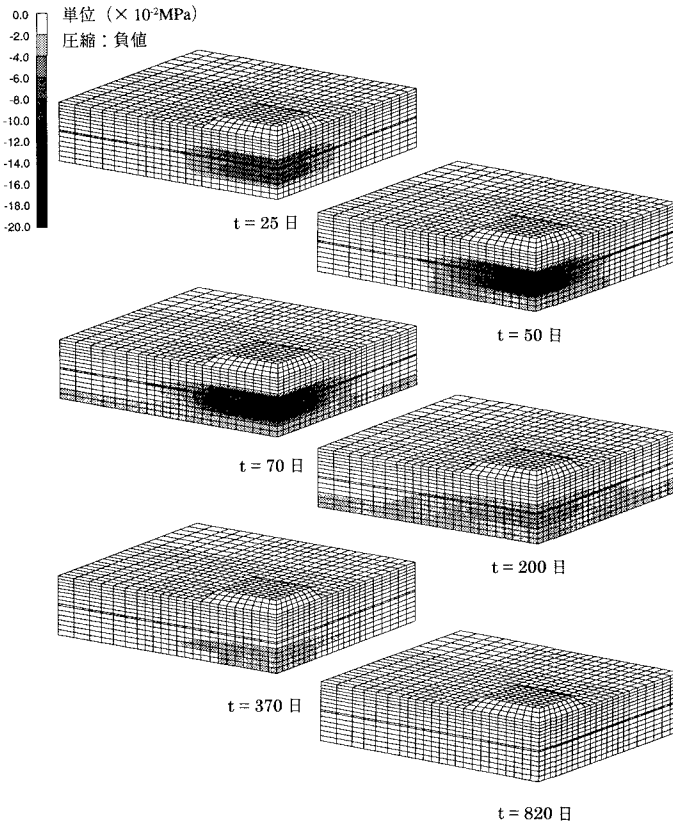


図-5 過剰間隙水圧の経時変化

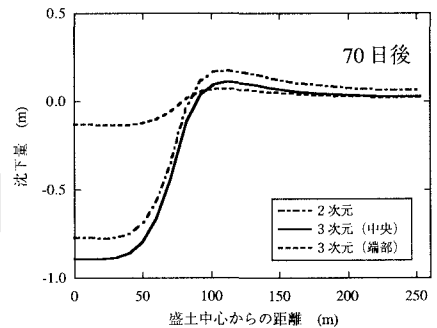


図-6 盛土部地表面沈下量の分布

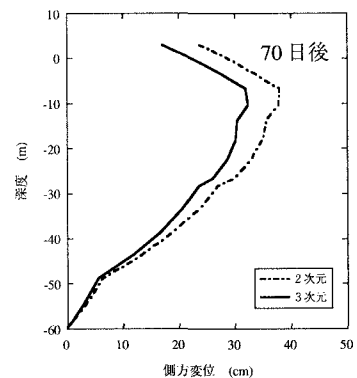


図-7 盛土法尻部の側方変位分布