腐植土地盤での盛土事例の解析と真空圧密併用効果の検証（その１）
―盛土事例の解析シミュレーション―

（株）大林組　技術研究所　正会員　　杉江 茂彦，○鈴木 和明

１．はじめに

腐植土を含む軟弱地盤での盛土は、地盤の安定確保や残留沈下の低減などの課題を有し、従来はゆっくり時間をかけて施工されてきた難しい工事の類である。近年では、腐植土上での難易度の高い盛土においても工期の短縮が求められ、主に道路事業の分野では真空圧密工法[例えば1)]（鉛直ドレーンに負圧をかけて強制排水する工法）の併用が一般的になってきている。本研究では、盛土施工への真空圧密工法の併用効果について、土/水連成 FEM 解析（使用コード GRASP3D[2)]）で検証してみた。検証の手順は、（１）腐植土地盤での盛土施工事例（鉛直ドレーン設置で真空圧密工法は未実施）による解析シミュレーション、（２）同盛土事例に真空圧密工法の併用を想定した解析ケーススタディー[3)]、である。本報告では（１）について述べる。

２．軟弱地盤上での盛土の施工事例と解析モデル

当該工事は農業用貯水池の堤体（延長 92m）を改築するために実施されたものである。堤体盛土の断面形状と軟弱地盤の構成、ならびに地盤の動態観測の計器の設置状況を図-1 に示す。解析シミュレーションに用いた有限要素モデルを図-2 に示す。

（１）地盤のモデル化

当該地盤は地表より 4～5m の厚さで腐植土層が堆積している。その下には 6～8m 厚さの粘土層が分布し、支持層の砂層・洪積粘土層に続いている。腐植土層は含水比 ω=600～800%、単位体積重量 γt=10.1～10.8 kN/m^3、粘着力 C=5 kN/m^2、と高含水で軟弱である。粘土層は ω=100～140%、γt=13～14 kN/m^3、C=5 kN/m^2、と高含水で強度が小さく、腐植土層と軟弱地盤を形成している。圧密試験において両層は高い圧縮性と低透水性を示し、地盤の安定確保や長期沈下の対策が必要とされた。

解析では、腐植土・粘土の圧密・せん断特性の模擬に修正関口・太田モデル[4)]を用いた。圧密試験等から設けた同モデルの地盤定数値を表-1 に示す。砂層・盛土ならびに鉛直ドレーン部については線形弾性体とした。用いた定数値を表-1 に併せて示す。

（２）盛土施工のモデル化

厚さ 7.0m の盛土を３期、３年で施工した。地表に土木安定シートを敷設した後、サンドマット（厚さ 0.8m）と鉛直ドレーン（長さ 11m, @1m 正方形配置）を設け、腐植土層と粘土層の圧密促進を図った。盛土期間が３年であったのは、公共工事の多年度計画によるものでもあるが、盛土幅 30m に対して盛土厚が 7m と厚く、近接する水田への盛土の影響を極力低減させるためにもこの程度の期間が必要であった。盛土にあたっては、地表沈下板・層別沈下計・挿入式傾斜計および間隙水圧計等の実測結果をフィードバックした情報化施工をおこなった。その結果、各期の盛土は 3～4.8cm/日（平均 3.7cm/日）の緩速施工で２ヶ月程を要し、その後に約 10 ヶ月の放置期間を置いた。解析シミュレーションでは盛土の実施工程を詳細にモデル化することとした。

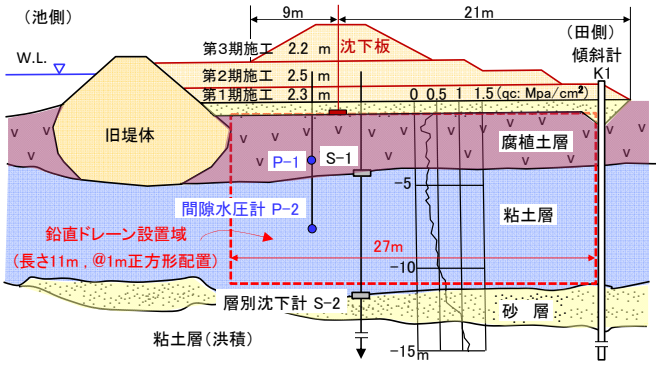

図-1 堤体盛土の断面形状と軟弱地盤の構成

表-1　解析に用いた地盤定数値

	ﾀﾞｲﾚｲﾀﾝｼｰ係数 D	限界状態応力比 M,（φ'度）	ポアソン比 ν'	透水係数 k (cm/sec)	透水係数の非線形性 λk	静止土圧係数（先行圧密時） K0	静止土圧係数（盛土前） Ki	備考
腐植土層	0.136	1.83 (45)	0.21	1.8×10^{-6}	1.60	0.27 Ko=1−sinφ' Jaky(1944)	2.15～5.34 Ki=Ki(Ko,OCR,Li) 林、他(2006)	圧縮指数Cc ：7.37 過圧密比OCR ：14.8～47.6 体積ひずみ非可逆比Λ ：0.9 先行圧密時間隙比eo ：10.6 強熱減量Li ：66%
粘土層	0.105	1.42 (35)	0.42	4.4×10^{-7}	0.15	0.73 Ko=Ko(Ip) Massarsch (1979)	0.95～1.35 Ki=Ki(Ko,OCR,Ip) Alpan(1967)	圧縮指数Cc ：1.43 過圧密比OCR ：2.4～4.1 体積ひずみ非可逆比Λ ：0.9 先行圧密時間隙比eo ：2.7 塑性指数 Ip ：68%

	変形係数 E(kN/m²)	湿潤密度 γt(kN/m³)	ポアソン比 ν'	透水係数 k (cm/sec)
砂層	5000	17.0	0.35	4.4×10^{-3}
盛土	5000	17.0	0.30	4.4×10^{-3}
ｻﾝﾄﾞﾏｯﾄ	10000	17.4	0.30	4.4×10^{-3}

	変形係数 E(kN/m²)	ポアソン比 ν'	透水係数 k (cm/sec) 水平	鉛直
鉛直ドレーン	2800	0.45	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-9}

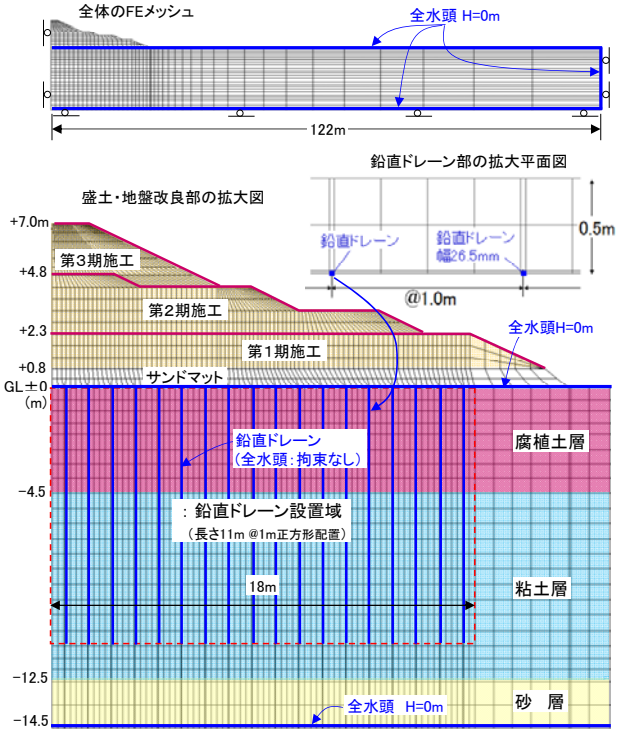

図-2 有限要素メッシュと境界・ドレーン部の排水条件

キーワード　：　腐植土、盛土、真空圧密工法、沈下、安定、有限要素法解析
連絡先：〒204-8558　東京都清瀬市下清戸4-640　㈱大林組技術研究所　地盤技術研究部　TEL ： 042-495-1097

３．地盤の変形挙動と応力状態

圧密試験から得られた圧縮指数 Cc や透水係数 k（表-1 参照）を用いた計算では、各層の沈下や間隙水圧の実測挙動と差異が生じた。フィッティングを試みた結果、腐植土層では Cc×0.9、k×0.2、粘土層では Cc×0.6、k×0.5、の補正を要した。

（１）地盤の変形挙動

地盤各層の上端での沈下時間曲線を図-3 に示す。各期の盛土厚さは 2.2m～2.5m と概ね同程度であるが、実測値（白丸）を見ると第３期では盛土施工時の沈下の発生量が第１期，２期に比べて小さめである。圧密による地盤改良で地盤の強度と剛性が増したためと考えられる。解析では圧密試験の圧縮指数 Cc および透水係数 k を用いた当初の結果（点線）では実測結果との差異が生じている。各層の Cc と k に先述の補正を加え、実測結果とフィットする沈下時間曲線（実線）が得られた。

各期の盛土期間に生じた盛土法尻位置の地中側方変位を図-4 に示す。実測値では、第１期に腐植土層で大きく変位が生じているが粘土層では変位が小さい。第２・３期では腐植土層と粘土層で同程度の変位が生じている。第３期では両層の変位の発生量は小さい。盛土が高位置で載荷幅が狭いこと、圧密による改良効果が発揮されたことによるものと考えられる。解析においてもこれらの挙動が概ね再現できている。

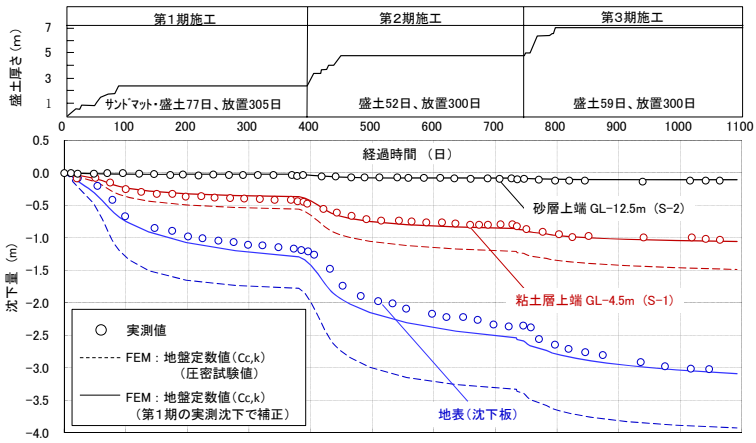

図-3 各深度の沈下～時間関係（盛土中央位置）

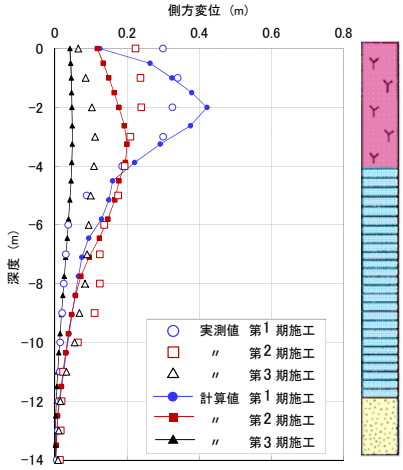

図-4 盛土法尻位置の地中側方変位（各期の盛土期間中の発生量）

（２）地盤の応力状態

腐植土層と粘土層の間隙水圧の動きを図-5に示す。盛土施工時の上昇と放置期での消散が繰り返し生じている。実測値（白丸）へのフィッティングでは、両層ともに圧密試験から得られた圧縮指数Ccと透水係数kの値を減じる補正を要した。

第３期盛土の施工前にチェックボーリング、圧密試験を行った。初期地盤（盛土着手前）での同試験の結果と比べて、地盤改良の進み具合の目安とした。圧密降伏応力の試験値と鉛直有効応力の解析値を図-6に示す。初期には過圧密状態にあった地盤が盛土荷重で有効応力が増し正規圧密状態に入ったことが読みとれる。第３期盛土前の鉛直有効応力の解析値は同時期の圧密降伏応力の試験値と近い値となっている。以上より、本解析では修正関口・太田モデルを用いた３次元の土/水連成FEM解析により、地盤の変形、間隙水圧ならびに有効応力の全般の挙動を再現できたと考える。

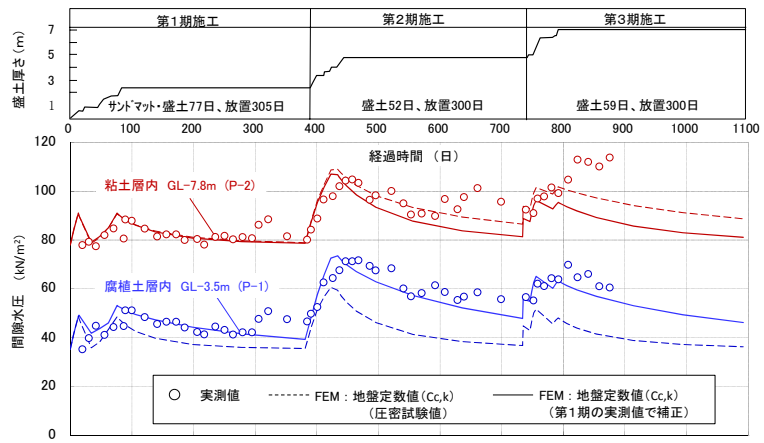

図-5 各深度の間隙水圧～時間関係（盛土中央位置）

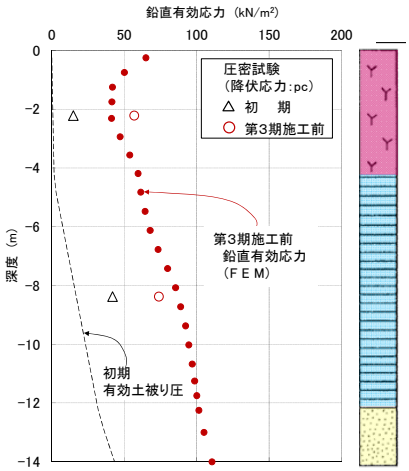

図-6 地盤の鉛直有効応力（盛土中央位置）

「参考文献」

1)真空圧密技術協会：高真空N&H工法技術資料,2013 2)Ohta,H.,Iizuka,A.,Omote,Y.,Sugie,S.:3-D analysis of soil/water coupling problems using elastoviscoplastic constitutive relationships,Proc.7th ICCMAG, pp.1191-1196,Vol.2,1991 3) 杉江,鈴木：腐植土地盤での盛土事例の解析と真空圧密併用効果の検証（その２），土木学会第69回年次,Ⅲ部門,2014 4)大野,飯塚,太田：非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル,応用力学論文集,Vol.9, pp.407-414,2006