

真空圧密工法を施工した道路盛土の FEM 長期沈下解析

前田建設工業株式会社	正会員	○平田 昌史
前田建設工業株式会社		吉田 敬司
株式会社ネクスコ・エンジニアリング東北	正会員	澤野 幸輝
株式会社ネクスコ・エンジニアリング東北	正会員	菊池 慎司
東日本高速道路株式会社	正会員	加藤 真司
中央大学 研究開発機構	フェロー	太田 秀樹

1. はじめに

東北中央自動車道南陽高畠 IC～山形上山 IC 間の起点側約 3km の範囲（図-1 参照）は、有機質土を主体とした超軟弱地盤地帯（白竜湖軟弱地盤）である¹⁾。このため、盛土施工時の安定性確保や周辺地盤への影響低減、長期沈下の抑制等を図るべく真空圧密工法による対策を検討し、その改良効果等を確認するための試験盛土^{2),3)}を施工している。本報告では、二次元の土-水連成有限要素解析プログラム“DACSTAR”⁴⁾を用いた長期沈下の予測を実施した^{5),6)}。この真空圧密工法を施工した試験盛土の供用開始 20 年後までの長期沈下予測結果について紹介する。

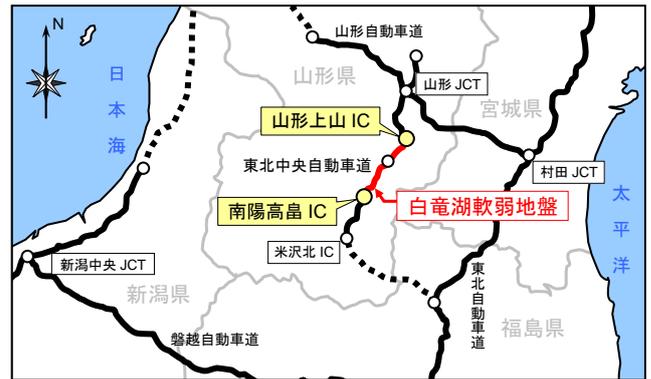


図-1 現場位置図

2. 試験盛土の概要と白竜湖軟弱地盤の特徴

2.1 試験盛土の概要

白竜湖軟弱地盤では、起点である南陽高畠 IC から約 2km の位置において 3 つの試験盛土を施工した。FEM 解析は、これら各試験盛土のセンター位置断面にて実施している。図-2 に、試験盛土区間の平面図と解析対象断面位置を示す。各試験盛土は、延長約 85m、幅約 60m であり、それぞれ異なる真空圧密工法を採用した。エリア 1 の試験盛土では、シート式真空圧密工法⁷⁾を施工しており、この真空圧密の改良域外側には遮水のための鋼矢板 (L=12.0m) を打設している。真空圧密用のプラスチックボードドレーン (PBD) は 1.0m×1.0m の正方配置、改良深度は約 7.5m である。また、盛土センター位置の計画盛土高は約 2.8m であり、2013 年 8 月末時点で約 2.5m の沈下量が発生している。エリア 2 では、キャップ式真空圧密工法⁸⁾を施工しており、真空圧密用の PBD は 1.0m×1.0m の正方配置、改良深度は約 7.0m である。なお、G.L.-5.0m 付近に介在する砂質土層位置では、PBD に遮水のためのシールを施し

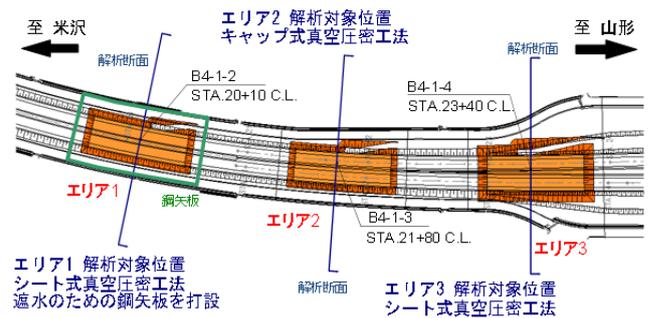


図-2 試験盛土区間の平面図と解析対象位置

ている。盛土センター位置の計画盛土高は約 2.8m であり、2013 年 8 月末時点で約 1.9m の沈下量が発生している。エリア 3 では、エリア 1 と同じシート式真空圧密工法を施工しているが、遮水のための鋼矢板は打設していない。真空圧密用の PBD は 1.0m×1.0m の正方配置、改良深度は約 7.4m である。盛土センター位置の計画盛土高は約 3.0m であり、2013 年 8 月末時点で約 3.7m の沈下量が発生している。

2.2 解析対象断面における地質分布

図-3 は、図-2 に示した 3 つの試験盛土の解析対象位置における地質想定横断面図であり、解析対象断面位置で実施したボーリング結果の他に、三成分コーン貫入試験の結果を使用することで、横断方向の地質分布

キーワード 軟弱地盤, 真空圧密工法, 二次圧密, 有限要素法

連絡先 〒179-8914 東京都練馬区旭町 1-39-16 前田建設工業株式会社 技術研究所 TEL 03-3977-2333

(層厚の分布や傾斜)も考慮している。この図に示す様に表層付近では、自然含水比が200~1000%程度、 N 値がゼロの非常に軟弱な有機質土層が G.L.-5.0m 付近まで堆積しており、大きな沈下・変形が生じることが予想された。真空圧密工法は、この軟弱な有機質土層や有機質粘性土層の圧密促進対策として施工している。また、この有機質土層の下には粘性土層、砂質土層、有機質土層が地盤深部まで複雑に堆積しており、深度100m 付近においても基盤層は確認されていない¹⁾。このため、地盤深部においても長期沈下の発生が懸念された。

3. FEM 解析条件の設定

3.1 FEM 解析に用いた構成モデル

真空圧密工法は、地盤を過圧密化するプレロード工法の一つである。このため、真空圧密工法の改良効果を考慮するためには、FEM 解析では過圧密土の長期沈下(二次圧密)が表現可能な構成モデルを選択する必要がある。そこで本解析では、有機質土層と粘性土層の構成モデルに、以下に示す拡張型の弾・粘塑性構成モデル⁹⁾を用いた。

$$\hat{f} = f - MD \ln R - MD \ln \bar{R} - \varepsilon_v^{vp} = 0 \quad (1)$$

M は限界応力比、 D は柴田¹⁰⁾によるダイレイタンスー係数、 ε_v^{vp} は粘塑性体積ひずみである。 R は下負荷面¹¹⁾の相似比であり、以下のように定義される。

$$\dot{R} = U_R \left\| \dot{\varepsilon}_v^{vp} \right\|, \quad U_R = -\frac{m}{D} \ln R \quad (2)$$

m は過圧密の解消速度を表すフィッティングパラメータ(下負荷面パラメータ)、 \bar{R} は粘性曲面の相似比であり、以下のように定義される。

$$\bar{R} = \left(\frac{\alpha}{\dot{v}_0 t} \Theta \right)^{\frac{\alpha}{MD}}, \quad \Theta = 1 - \exp \left(-\frac{\left\| \dot{\varepsilon}_v^{vp} \right\|}{\alpha} \right) \quad (3)$$

α は体積ひずみ ε_v ~時間 $\ln t$ の関係から求めた二次圧密係数、 \dot{v}_0 は初期体積ひずみ速度である。なお、式(1)中のスカラー関数 f には、大野¹²⁾による Expanded 関口・太田モデル(ECモデル)の降伏関数を採用している。

なお、砂質土層および盛土については、軟弱な有機質土層や粘性土層に比べ硬く、地盤全体の沈下量に対して占める割合も小さいと考え、ここでは線形弾性体としてモデル化した。

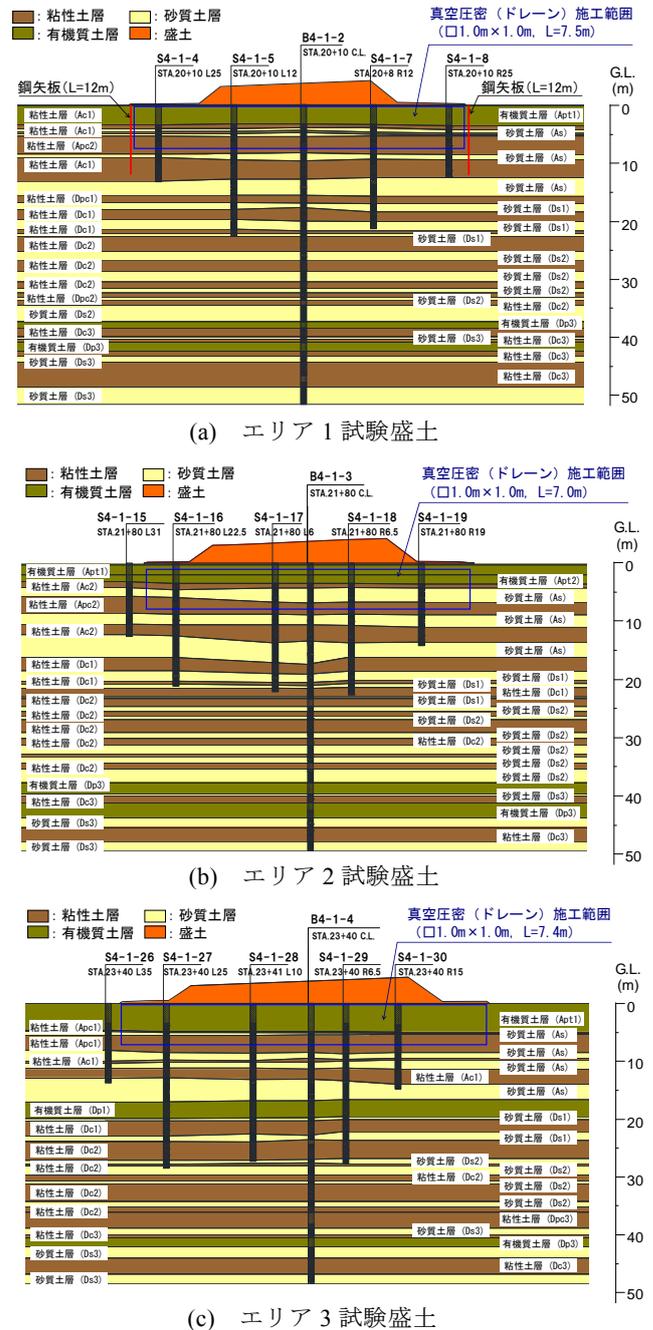


図-3 解析対象位置の地質想定横断面図

3.2 材料パラメータの設定

拡張型の弾・粘塑性構成モデルに必要な材料パラメータは、下負荷面パラメータ m とダイレイタンスーのフィッティングパラメータ n_E が追加される以外は、既往の Sekiguchi and Ohta¹³⁾による弾・粘塑性構成モデルと同じである。ここでは、舞鶴若狭自動車道での事例¹⁴⁾を参考に、白竜湖軟弱地盤の約3km区間で実施した計53箇所の事前ボーリング調査による試験結果を整理することで、以下のように設定した。

(1) 限界応力比

図-4は、圧密非排水($\bar{C}U$)三軸圧縮試験結果(有効応力経路)の一例である。有機質を多く含むため試

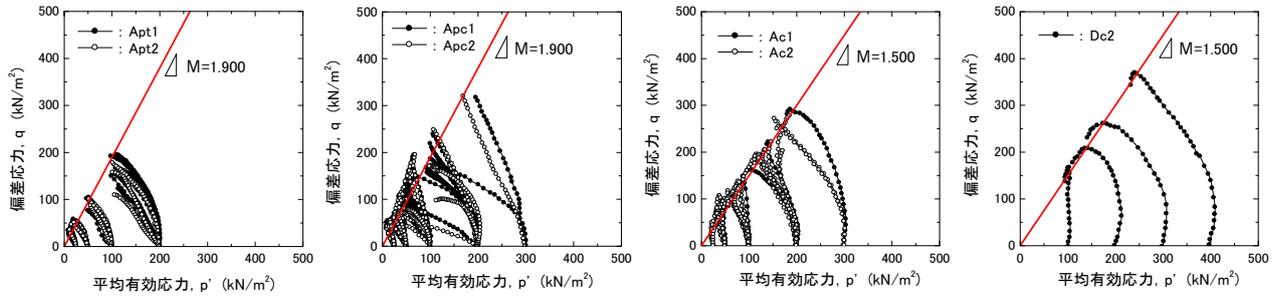


図-4 圧密非排水三軸圧縮試験の結果（有効応力経路）

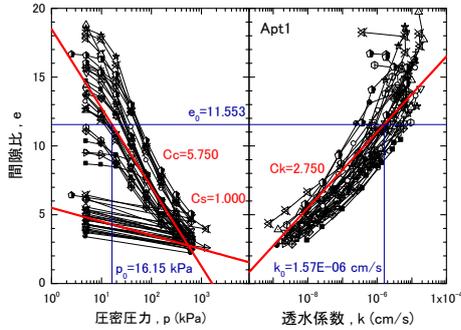


図-5 圧密試験結果

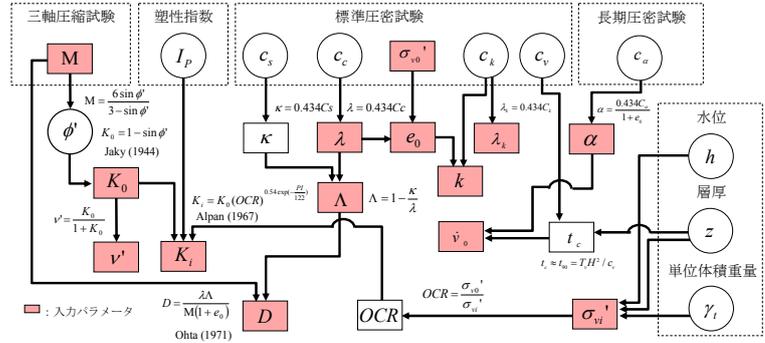


図-6 材料パラメータ決定フロー

表-1 材料パラメーター一覧

地質区分	ダイレイタンシー係数 D	限界応力比 M	圧縮指数 λ	非可逆比 Λ	先行時の 静止土圧係数 K_0	先行圧密 圧力 σ_{vo}' kPa	有効 ポアソン比 ν'	先行時の 間隙比 e_0	$e \sim \ln k$ の傾き λ_k	透水係数 k m/day	二次圧密 係数 α
Apt1	0.0864	1.90	2.496	0.826	0.278	1.646	0.218	11.553	1.194	1.36E-03	9.46E-03
Apt2	0.0759	1.90	1.432	0.818	0.278	1.518	0.218	7.129	0.774	1.10E-03	5.14E-03
Apc1	0.0834	1.90	1.031	0.758	0.278	8.571	0.218	3.929	0.499	4.96E-05	1.05E-02
Apc2	0.0535	1.90	0.575	0.698	0.278	7.174	0.218	2.952	0.376	8.22E-05	1.03E-02
Ac1	0.0454	1.50	0.293	0.648	0.400	12.489	0.286	1.790	0.293	8.71E-05	5.70E-03
Ac2	0.0371	1.50	0.152	0.786	0.400	28.165	0.286	1.146	0.152	8.30E-05	1.14E-03
Dp1	0.0850	1.90	0.868	0.825	0.278	19.599	0.218	3.432	0.286	8.51E-05	7.66E-03
Dpc1	0.0544	1.90	0.401	0.811	0.278	16.736	0.218	2.151	0.318	2.57E-05	5.85E-03
Dc1	0.0417	1.50	0.163	0.800	0.400	28.346	0.286	1.083	0.163	4.18E-05	2.37E-03
Dp2	0.0945	1.90	1.009	0.817	0.278	32.025	0.218	3.594	0.326	6.17E-05	9.75E-03 ^{*)}
Dpc2	0.0647	1.90	0.499	0.804	0.278	24.371	0.218	2.265	0.282	2.60E-05	1.46E-03
Dc2	0.0435	1.50	0.174	0.813	0.400	39.769	0.286	1.164	0.174	3.89E-05	1.73E-03
Dp3	0.0924	1.90	0.868	0.875	0.278	39.448	0.218	3.325	0.318	2.37E-05	8.77E-03 ^{*)}
Dpc3	0.0760	1.90	0.532	0.867	0.278	31.937	0.218	2.192	0.253	3.30E-05	6.77E-03 ^{*)}
Dc3	0.0448	1.50	0.152	0.857	0.400	57.955	0.286	0.936	0.152	2.90E-05	1.17E-03
Dp4	0.0948	1.90	0.868	0.850	0.278	40.833	0.218	3.095	0.362	4.42E-05	9.27E-03 ^{*)}
Dpc4	0.0477	1.90	0.347	0.719	0.278	37.146	0.218	1.751	0.203	2.94E-05	4.61E-03 ^{*)}
Dc4	0.0312	1.50	0.119	0.727	0.400	80.865	0.286	0.853	0.119	5.29E-05	8.80E-04 ^{*)}

験結果には若干バラツキが見られるが、限界応力比 M を有機質土 (Apt, Dpt) で 1.90, 粘性土 (Ac, Dc) で 1.50 と設定した。

(2) 圧縮指数および膨潤指数

図-5 は、段階荷重圧密試験結果 ($e \sim \log p$, $e \sim \log k$ 関係) の一例である。有機質を多く含むため三軸圧縮試験と同様にバラツキが大きい試験結果となっているが、圧縮指数 C_c および膨潤指数 C_s を、図中の赤ラインのように設定した。また、圧密試験結果から得られた圧密降伏応力 p_c の平均値を先行圧密圧力として、先行時の間隙比 e_0 を求めた。 $e \sim \log k$ 関係についても図中赤ラインを代表線 (傾き C_k) とし、先行時の間隙比 e_0 から透水係数 k を求めた。

(3) 二次圧密係数

白竜湖軟弱地盤では盛土施工による長期沈下を懸念し、数多くの長期圧密試験を実施している。これらの長期圧密試験結果を地層毎に整理し、その平均値を二次圧密係数 C_α とした。

(4) その他のパラメータ

その他の材料パラメータについては、図-6 に示すフローに従い設定した。表-1 に設定した材料パラメータの一覧を示す。なお、 m の値には 10.0, n_E の値には 1.20 を採用している。

3.3 室内試験の要素シミュレーション

設定した材料パラメータの妥当性を確認するため、室内試験の要素シミュレーションを実施した。図-7 は

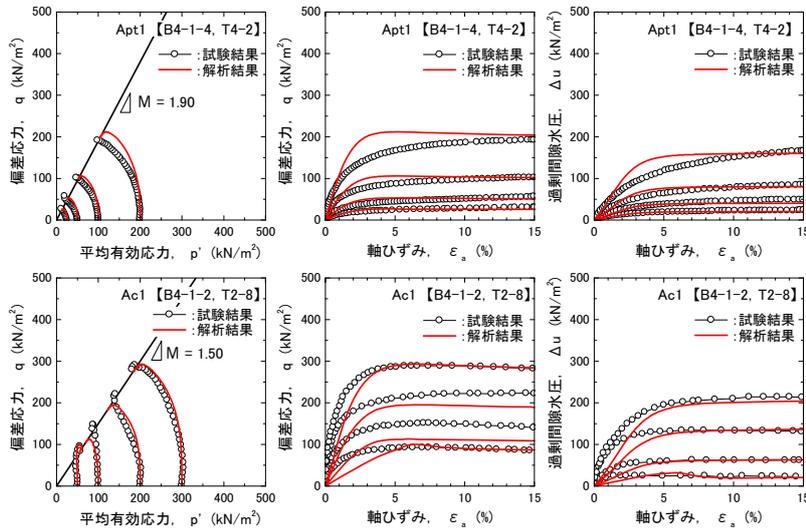


図-7 シミュレーション結果（三軸圧縮試験）

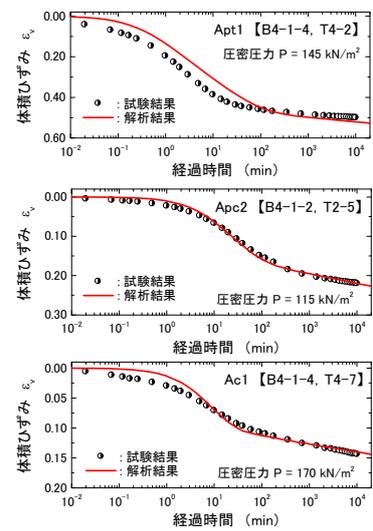


図-8 シミュレーション結果（長期圧密試験）

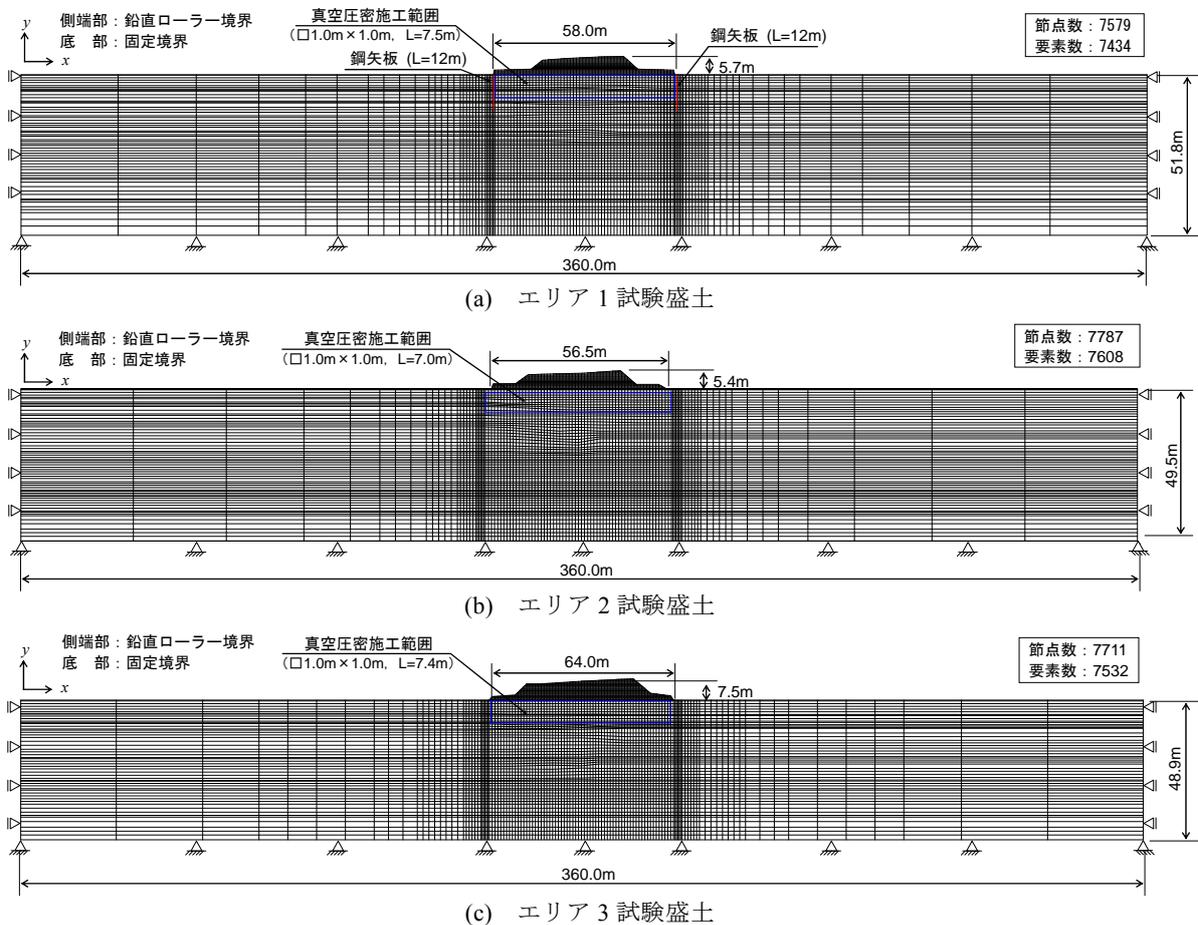


図-9 解析に用いたメッシュ図

圧密非排 (\overline{CU}) 三軸圧縮試験の要素シミュレーション結果, 図-8 は長期圧密試験の要素シミュレーション結果の一例である. 室内試験結果 (図中プロット) が複数の試験結果の中から抜粋した代表データであるため, シミュレーション結果と一致しない箇所も見られるが, 実際のせん断挙動や長期圧密挙動を概ね再現できており, 今回設定した表-1 に示す材料パラメータは, 十分な値であると判断している.

3.4 解析メッシュと解析条件

図-9 は, FEM 解析に用いたメッシュ図である. 地盤部分のメッシュについては, 図-3 に示した地質想定横断面図を基に作成しており, 比較的 N 値が大きい G.L.-50m 付近の砂質土層 (Ds3) までを解析対象とした. 真空圧密工法の改良域 (施工範囲) は, 拡張マクロ・エレメント法¹⁵⁾ を適用し, 直径 0.05m のサンドドレーンと同じ排水効果が期待できる¹⁶⁾ と仮定してい

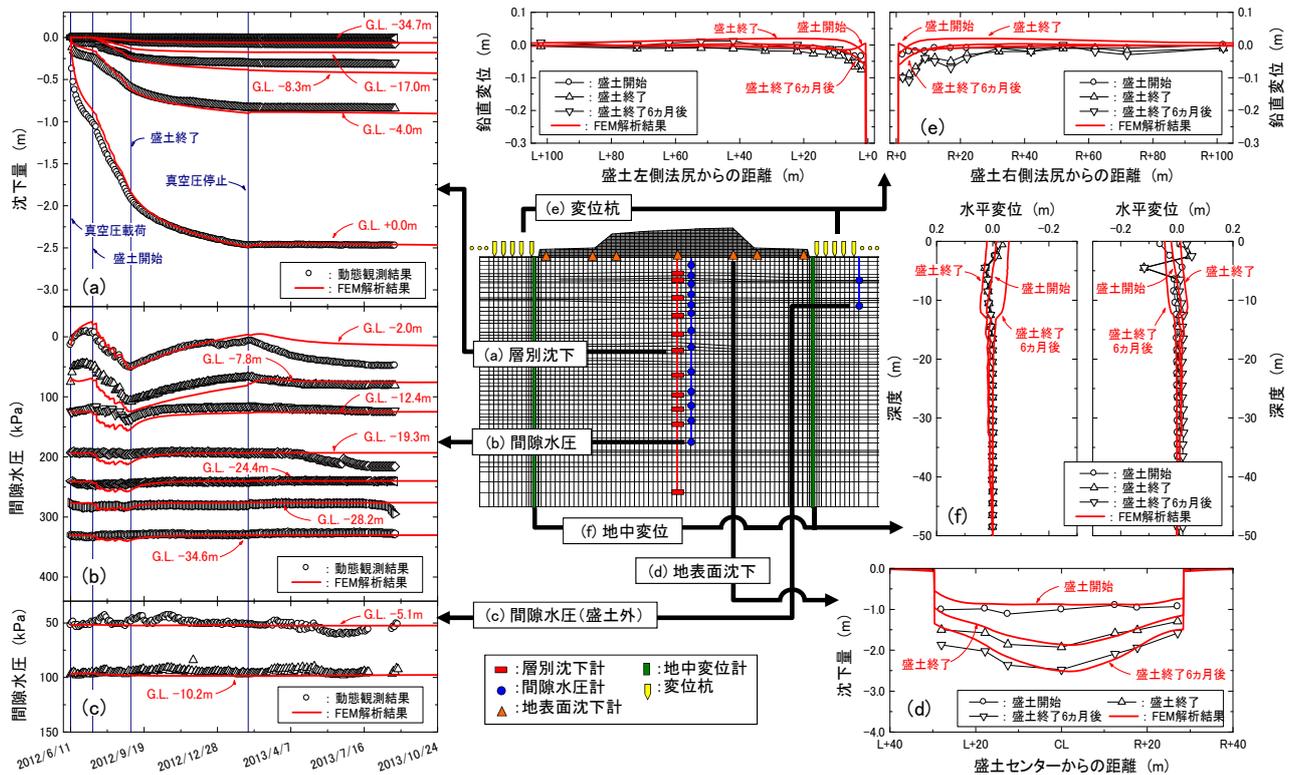


図-10 解析結果と動態観測結果の比較 (エリア1 試験盛土)

る。エリア1およびエリア3では気密シート敷設位置を非排水境界とし、シートの剛性は考慮していない。また、エリア1で打設した鋼矢板については、ビーム要素でモデル化すると同時に、打設位置を非排水境界とした。地下水位は地表面である。盛土部分のメッシュについては、1層あたりの撒き出し・転圧を0.3mとしてモデル化し、実際の施工手順に合わせて盛土要素を追加することで施工を再現した。なお、解析では敷砂やドレーン打設等の施工が終了し、真空圧を载荷する直前を初期状態としている。

4. 現況までの再現解析結果

FEM解析は、白竜湖軟弱地盤で施工した試験盛土の長期沈下量を予測することが目的である。試験盛土では、長期沈下の抑制を目的として真空圧密工法による対策を施しているため、この真空圧密工法や盛土施工を考慮した地盤の変形・応力状態を再現する必要がある。ここでは、FEM解析結果と試験盛土の動態観測結果^{17), 18)}を比較することにより、地盤の沈下・変形挙動等の再現性を検討した。

図-10～図-12は、各試験盛土の動態観測結果とFEM解析結果を比較した図である。図中(a)は、盛土センター位置の層別沈下計による動態観測結果と、FEM解析結果の比較である。エリア3の試験盛土では、真空圧

载荷直後の沈下量を若干過大評価する傾向が見られるが、すべての試験盛土で動態観測結果を十分再現できている。

図中(b)は、盛土センター位置に設置した間隙水圧計の観測結果とFEM解析結果の比較である。この結果を見ると、真空圧停止後の間隙水圧の消散傾向が動態観測結果とあまり一致していない。これは、実際の間隙水圧計は地盤とともに沈下していると考えられるのに対し、FEM解析は微小変形であるため間隙水圧計の沈下が考慮されないことが要因として挙げられる。なお、真空圧の载荷によって負圧が発生した後、盛土施工によって間隙水圧が上昇する動態観測結果の傾向については、FEM解析で概ね再現できている。

図中(c)は、真空圧密の改良域端部右側から10m離れた位置の間隙水圧計による動態観測結果と、FEM解析結果の比較である。この結果を見ると、真空圧や盛土载荷の影響によって変化する間隙水圧の挙動を十分再現できている。なお、エリア1試験盛土では遮水のための鋼矢板を打設しているが、G.L.-5.1m位置の動態観測結果は、真空圧载荷や盛土施工により間隙水圧が変化しており、鋼矢板から真空圧が若干漏れている可能性が高い。

図中(d)は、地表面沈下計(7箇所)の観測結果とFEM解析結果の比較である。エリア1試験盛土では、真空

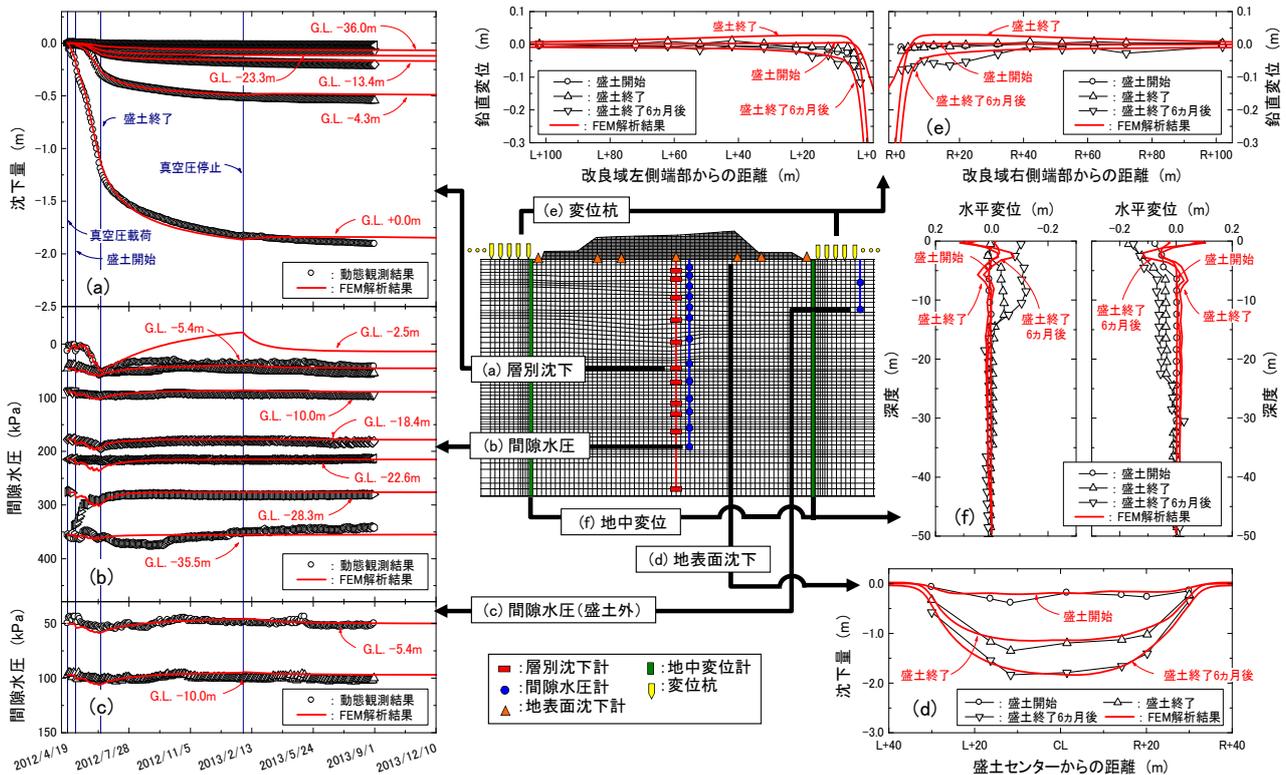


図-11 解析結果と動態観測結果の比較 (エリア2 試験盛土)

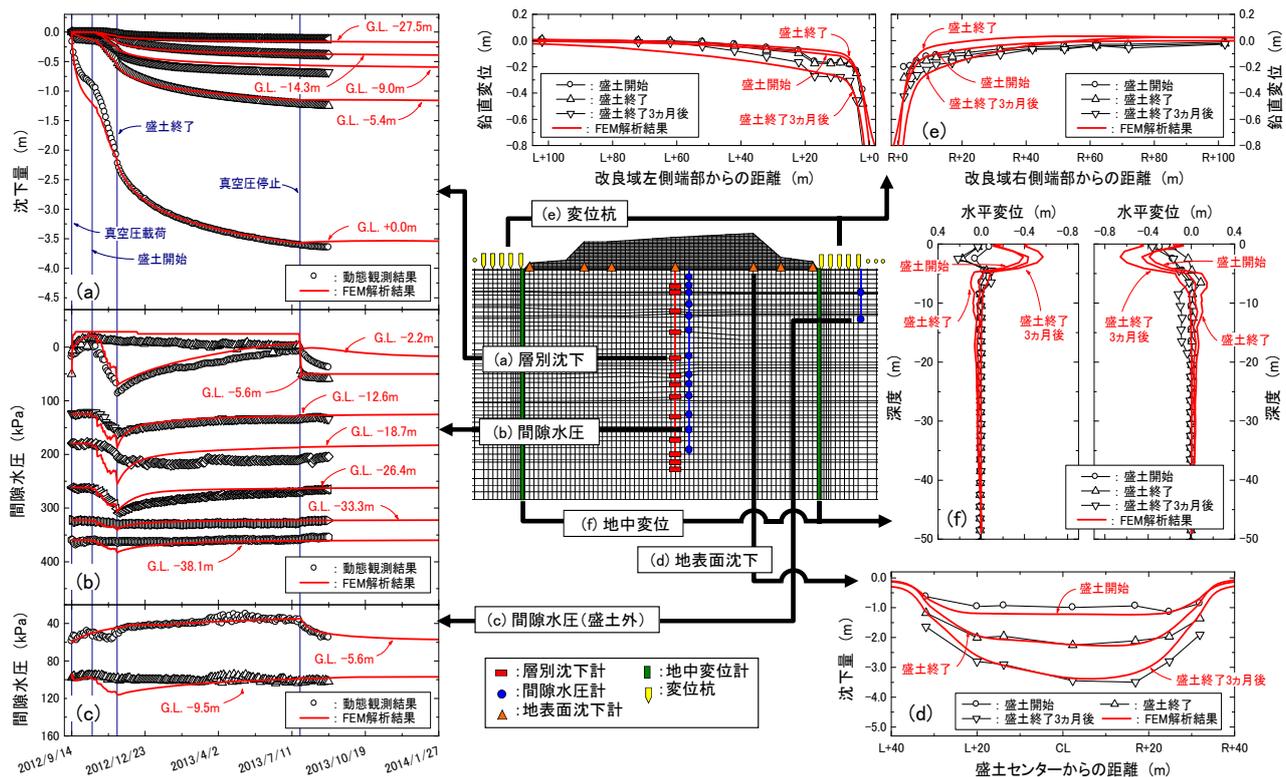


図-12 解析結果と動態観測結果の比較 (エリア3 試験盛土)

圧密の改良域端部付近（盛土法尻付近）で一致していない箇所も見られるが、盛土センター位置付近では FEM 解析結果と動態観測結果は良く一致している。なお、エリア1 試験盛土では、真空圧密の影響により改良域端部の鋼矢板付近で大きなクラックが発生してい

るため、この影響により沈下量が一致しなかったと推測している。

図中(e)は、変位杭による観測結果と FEM 解析結果の比較である。変位杭は、真空圧密の改良域端部から 100m 離れた位置まで、左右 13 箇所を設置している。

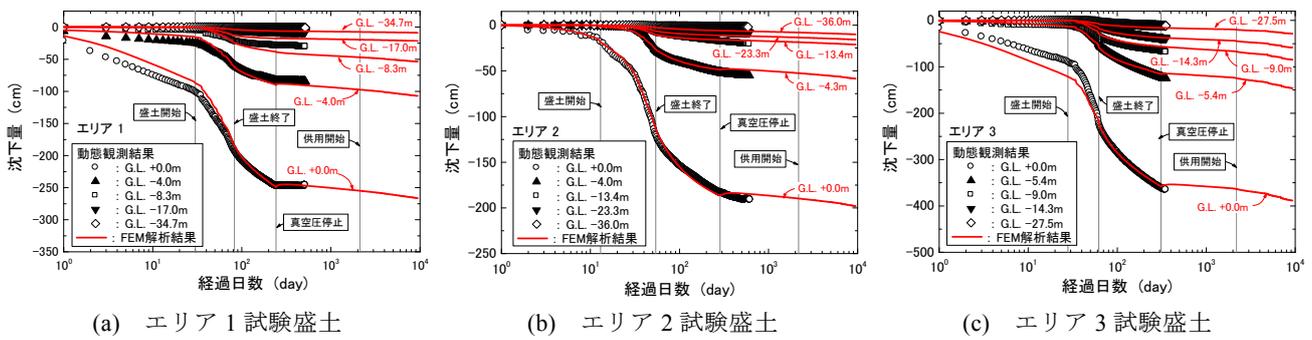


図-13 長期沈下量の予測解析結果（盛土センター位置の層別沈下量）

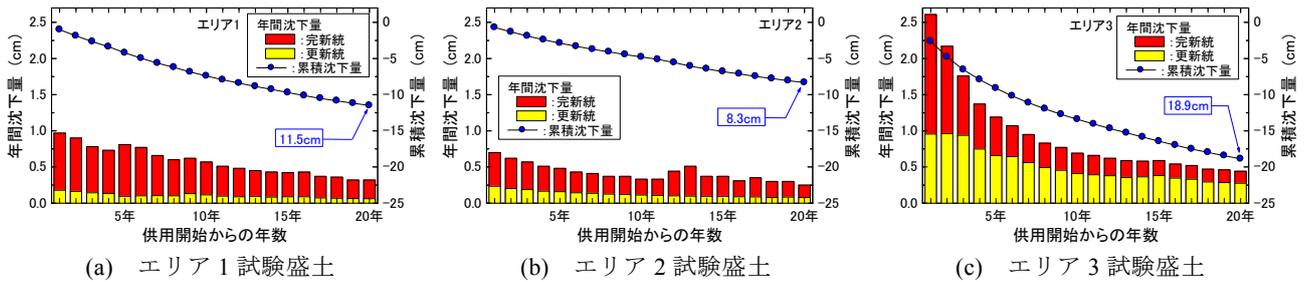


図-14 解析結果による供用開始からの年間沈下量と累積沈下量

真空圧密の改良域端部付近（盛土法尻付近）では、クラックの影響等により一致していない箇所も見られるが、動態観測結果を概ね再現できている。

図中(f)は、真空圧密の改良域端部外側に設置した地中変位計による動態観測結果と FEM 解析結果の比較である。FEM 解析結果は動態観測結果と一致しているとは言い難いが、エリア 3 試験盛土の左側水平変位を除けば、変形の傾向はある程度一致している。なお、エリア 3 試験盛土の左側水平変位については、近接する変位杭とも傾向が一致していないため、地中変位計に異常が生じた可能性も考えられるが、その要因は特定できていない。

5. 長期沈下予測結果

図-10～図-12 に示した解析結果を用いて、供用開始から 20 年後までの長期沈下量の予測を行った。なお、東北中央自動車道 南陽高島 IC～山形上山 IC 間では平成 30 年度（2019 年度）からの供用開始を予定しているため、ここでは供用開始日を 2019 年 4 月 1 日と仮定した。

図-13 は、盛土センター位置における層別沈下量の FEM 解析結果である。解析結果を見ると、真空圧密停止により沈下量が若干リバウンドした後も徐々に沈下が発生し、供用開始後も徐々に沈下が進行している様子がわかる。図-14 は、供用開始時の沈下量を初期状態（ゼロ）として整理した年間沈下量と、供用開始後の

累積沈下量である。年間沈下量は、年数の経過とともに徐々に減少する傾向が見られる。また、供用開始から 20 年後までの各試験盛土の累積沈下量は、エリア 1 で 11.5cm、エリア 2 で 8.3cm、エリア 3 で 18.9cm という結果となった。エリア 3 の試験盛土で最も大きな長期沈下量が発生しているが、この要因は真空圧密の施工法の違いではなく、盛土施工厚（盛土荷重）の影響である。エリア 3 の試験盛土では沈下量が大きいため、盛土センター位置における盛土施工厚は、エリア 1 で約 5.7m、エリア 2 で約 5.1m であるのに対し、エリア 3 では約 7.9m であり、この盛土荷重の違いが地盤深部（更新統）の二次圧密に影響を与えている。なお、真空圧密が施工されている層（完新統）の年間沈下量を見ると、有機質土層の二次圧密係数が非常に大きい値であるにもかかわらず、エリア 1～エリア 3 で大きな沈下量が発生していないことから、真空圧密工法が長期沈下を抑制する解析結果となっている。

6. おわりに

本報告では、白竜湖軟弱地盤で施工した 3 つの試験盛土について、二次元の土-水連成 FEM 解析を用いた供用開始 20 年後までの長期沈下予測結果について紹介した。この FEM 解析では、除荷後の二次圧密挙動も連続的に表現することが可能な拡張型の弾・粘塑性構成モデルを用いることで、真空圧密工法の改良効果を考慮した長期沈下予測を実施した。なお、本報告で

示した長期沈下量の予測結果は、事前調査で実施した長期圧密試験結果を用いたものであるため、層厚（排水距離）が異なる試験盛土の長期沈下量の予測精度については、現時点で評価できていない。本報告では、2013年8月末までの試験盛土の施工状況および動態観測結果を示しているが、動態観測は現在も実施中であり、東北中央自動車道の供用後も主要なものは継続する計画である。予測した長期沈下量の精度等については、今後の動態観測結果によって徐々に明らかになる予定である。

謝辞

本論文で紹介した FEM 解析は、「白竜湖軟弱地盤対策検討委員会」における長期沈下解析 WG の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 平野覚三, 近野和則, 高坂敏明, 太田秀樹 : 東北地方の内陸盆地に分布する軟弱地盤への道路計画, 地盤工学会誌, Vol.58, No.7, pp.14-17, 2010.
- 2) 加藤真司, 遠藤佳紀, 佐々木徹, 後藤雄一, 澤野幸輝, 永井宏 : 真空圧密工法を併用した低盛土の試験施工, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp.909-910, 2013.
- 3) 加藤真司, 佐々木徹 : 東北中央自動車道南陽高畠～山形上山間における軟弱地盤対策試験施工, 地盤工学会誌, Vol.61, No.2, pp.34-35, 2013.
- 4) Iizuka, A. and Ohta, H. : A determination procedure of input parameters in elasto-viscoplastic finite element analysis, *Soils and Foundations*, Vol.27, No.3, pp.71-87, 1987.
- 5) 平田昌史, 吉田敬司, 澤野幸輝, 菊池慎司, 加藤真司, 太田秀樹 : 真空圧密工法を併用した道路盛土の長期沈下予測～その 1 : 材料パラメータの設定～, 第 49 回地盤工学研究発表会, pp.1045-1046, 2014.
- 6) 吉田敬司, 平田昌史, 澤野幸輝, 菊池慎司, 加藤真司, 太田秀樹 : 真空圧密工法を併用した道路盛土の長期沈下予測～その 2 : FEM 解析結果～, 第 49 回地盤工学研究発表会, pp.1047-1048, 2014.
- 7) 真空圧密技術協会: 高真空 N&H 工法－改良型 真空圧密工法－ 技術資料, 2011.
- 8) 真空圧密ドレーン工法研究会 : 真空圧密ドレーン工法－キャップ付ドレーン－技術資料（設計・施工編）, 2011.
- 9) 平田昌史, 飯塚敦, 太田秀樹 : 二次圧密による先行効果を考慮した弾・粘塑性構成モデルの拡張, 土木学会論文集 C（地圏工学）, Vol.69, No.4, pp.404-416, 2013.
- 10) 柴田徹 : 粘土のダイラタンシーについて, 京都大学防災研究年報 6 号, pp.128-134, 1963.
- 11) Hashiguchi, K. : Subloading surface model in unconventional plasticity, *Int. J. Solids Structures*, Vol.25, pp.917-945, 1989.
- 12) 大野進太郎, 飯塚敦, 太田秀樹 : 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, 土木学会, 応用力学論文集, Vol.9, pp.407-414, 2006.
- 13) Sekiguchi, H. and Ohta, H. : Induced anisotropy and time dependency in clays, Constitutive Equation of Soils, Proc. Specialty Session 9, *9th Int. Conf. Soil Mech. & Found. Engrg.*, Tokyo, pp.306-315, 1977.
- 14) 平田昌史, 福田淳, 信田潤一, 西川浩二, 山田耕一, 川井田実 : 載荷盛土を併用した真空圧密工法の改良効果と FEM 解析, 土木学会論文集 C（地圏工学）, Vol.68, No.1, pp.97-116, 2012.
- 15) 平田昌史, 清水英樹, 福田淳, 山田耕一, 川井田実 : 拡張マクロ・エレメント法を用いたバーチカルドレーン打設地盤の FEM 解析, 土木学会, 応用力学論文集, Vol.13, pp.431-442, 2010.
- 16) 網干寿夫, 河本勇, 稲葉晃己 : ペーパードレーン工法について, 土と基礎, Vol.6, pp.3-10, 1965.
- 17) 安部哲生, 藤岡一頼, 加藤真司, 佐々木徹 : 動態観測結果からみる真空圧密工法による地盤改良について, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp.911-912, 2013.
- 18) 加藤真司, 杉江茂彦, 佐々木徹, 太田秀樹 : 泥炭が厚く堆積する地盤での真空圧密併用盛土の荷重伝播について, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp.981-982, 2013.