

真空圧密工法を適用した載荷盛土の FEM 解析と施工管理

舞鶴若狭自動車道若狭工事における事例

平田 昌史・福田 淳・西川 浩二*¹・信田 潤一*¹・山田 耕一*²・川井田 実*³

FEM Analysis and Execution Management on Preloading Embankment using Vacuum Consolidation Method Case with Maizuru-Wakasa Expressway

Masafumi HIRATA, Jun FUKUDA, Kouji NISHIKAWA, Junichi NOBUTA, Kouichi YAMADA, Minoru KAWAIDA



図-1 真空圧密工法を適用した載荷盛土

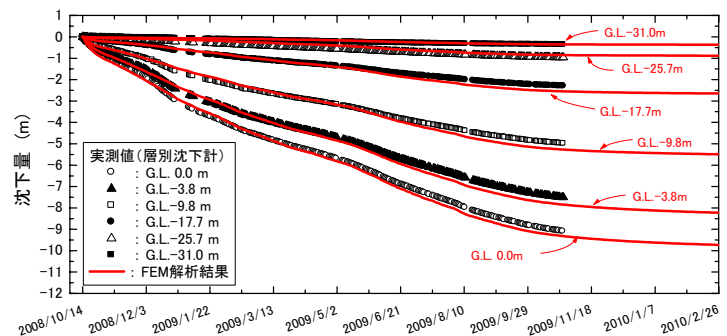


図-2 動態観測結果とFEM 解析結果の比較

研究の目的

舞鶴若狭自動車道若狭工事では、軟弱地盤対策として真空圧密工法が適用されている。真空圧密工法は、対象地盤にパーパードレーンを挿入し、真空ポンプを使って強制的に排水することで、圧密を促進させる工法である。真空圧密工法は本質的にはプレローディング工法であるが、通常のプレローディング工法とは異なり、改良域の側方にも真空圧が作用するため、盛土載荷によって押し出される周辺地盤の側方変形が低減されると同時に、盛土の急速施工も可能となる。しかしながら、このような真空圧密工法特有の効果は、慣用的な設計法で予測・評価することは困難であり、土-水連成 FEM 解析の有用性が指摘されている。本研究では、真空圧密工法を適用した載荷盛土に対して土-水連成 FEM 解析を実施し、その有用性について検討を行った。また、この FEM 解析結果を用いて、応力・変形の将来予測や施工管理等についても検討を行った。

技術の説明

真空圧密工法を考慮した土-水連成 FEM 解析を実施する場合、真空圧密工法をどのようにモデル化し計算に組み込むかが重要となる。従来のモデル化では、改良域にパーパードレーンによる圧密促進効果を考慮した等価透水係数を与える手法（Mass Permeability 法）が多く用いられている。しかしながら、この手法を用いた場合、改良域内部の応力状態を予測・再現することが困難である。本研究では、真空圧密工法のモデル化に、改良域内部の応力状態を精度良く予測・再現することができる“拡張マクロ・エレメント法”を用いている。これにより、真空圧密工法特有の効果を総合的に評価することが可能となる。

主な結論

- ・舞鶴若狭自動車道若狭工事において真空圧密工法を適用した載荷盛土では、周辺地盤の側方変形量や隆起量が低減されるとともに、通常の約 3 倍の急速施工での施工が実現できており、真空圧密工法による改良効果を確認することができた。
- ・真空圧密工法を適用した載荷盛土に対して、“拡張マクロ・エレメント法”を用いた FEM 解析を実施した結果、動態観測による沈下や変形、間隙水圧を精度良く再現できることが確認された。この結果を用いることにより、慣用的な設計法では評価が困難であった真空圧密工法特有の効果を、評価・予測することができた。

*1 関西支店 土木部

*2 中日本高速道路株式会社 名古屋支社敦賀工事事務所 工事長

*3 中日本高速道路株式会社 名古屋支社敦賀工事事務所 所長

真空圧密工法を適用した載荷盛土のFEM解析と施工管理 舞鶴若狭自動車道若狭工事における事例

平 田 昌 史 福 田 淳
西 川 浩 二^{*1} 信 田 潤 一^{*1}
山 田 耕 一^{*2} 川 井 田 実^{*2}

要 旨

真空圧密工法は、対象地盤にプラスチックボードドレーンを挿入し、真空ポンプを使って強制的に排水することで、圧密を促進させる工法である。真空圧密工法は本質的にはプレローディング工法であるが、通常のプレローディング工法とは異なり、改良域の側方にも真空圧が作用するため、盛土載荷によって押し出される周辺地盤の側方変形が低減されると同時に、盛土の急速施工も可能となる。しかしながら、このような真空圧密工法特有の効果は、慣用的な設計法で予測・評価することは困難であり、土-水連成FEM解析の有用性が指摘されている。本研究では、舞鶴若狭自動車道若狭工事で実施した真空圧密工法について、その改良効果を検証するとともに、拡張マクロ・エレメント法を用いた土-水連成FEM解析を実施し、解析の再現性および有用性について検討を行った。FEM解析結果は、沈下や変形だけではなく過剰間隙水圧も精度よく再現できており、拡張マクロ・エレメント法の有用性を示すことができた。

キーワード 真空圧密工法／載荷盛土／軟弱地盤／有限要素法／拡張マクロ・エレメント法

目 次

- | | |
|--------------------|---------------------|
| 1. はじめに | 4. 真空圧密工法適用現場のFEM解析 |
| 2. 舞鶴若狭自動車道若狭工事の概要 | 5. FEM解析結果の活用事例と有用性 |
| 3. 真空圧密工法の施工とその効果 | 6. おわりに |

F.E.M. ANALYSIS AND EXECUTION MANAGEMENT ON PRELOADING EMBANKMENT USING VACUUM CONSOLIDATION METHOD CASE WITH MAIZURU-WAKASA EXPRESSWAY

Masafumi HIRATA
Kouji NISHIKAWA
Kouichi YAMADA

Jun FUKUDA
Junichi NOBUTA
Minoru KAWAIDA

Synopsis:

In the Maizuru-Wakasa Expressway construction, the vacuum consolidation method is applied as a soft ground measures. The vacuum consolidation method is an industrial method to promote consolidation because the plastic board drain is inserted in the soft ground, and it drains it compulsorily with a vacuum pump. As for the vacuum consolidation method, the surrounding soil pushed out by the fill loading side transformation is decreased because it differs from a usual pre-loading industrial method, and the vacuum pressure acts on the improvement region side. However, it is difficult to forecast and to evaluate a peculiar effect to such a vacuum consolidation method by a design method used commonly, and is pointed out the utility of soil-water coupled F.E.M. analysis. In the present study, F.E.M. analysis was executed to the pre-loading embankment of the Wakasa construction that applied the vacuum consolidation method, and the utility was examined.

1. はじめに

真空圧密工法は、地盤にプラスチックボードドレーンを挿入し、真空ポンプを使って強制的に排水することで圧密を促進させる工法であり、気密シートやドレーン材、真空ポンプ等の改良により、近年実用化が急速に進んでいる工法である。真空圧密工法の原理は本質的にプレローディング工法であるが、通常のプレローディング工法とは異なり、改良域の側方にも真空圧が作用するため、周辺地盤の側方変形が改良域側へ引き込まれるのが特徴である。このため盛土施工と併用した場合には、盛土载荷によって押し出される周辺地盤の側方変形を低減させることが可能であり、真空圧载荷時には改良域の安定性も向上するため、盛土の急速施工も可能となる。本研究で取り上げる舞鶴若狭自動車道若狭工事¹⁾では、軟弱地盤対策工法の1つに真空圧密工法が採用されており、周辺地盤の変形抑制や圧密促進、工期短縮に対して非常に効果的であった。しかしながら、このような真空圧密工法特有の効果は、地盤内の複雑な応力状態に依存するため、通常のプレローディング工法に用いる慣用的な設計法では評価が困難であり、土-水連成 FEM 解析の有用性が指摘されている²⁾。

本研究では、舞鶴若狭自動車道若狭工事で実施した真空圧密工法について、その特有の改良効果を動態観測結果等から検証するとともに、拡張マクロ・エレメント法³⁾を用いた土-水連成 FEM 解析を実施し、その再現性や有用性について検討する。

2. 舞鶴若狭自動車道若狭工事の概要

2.1 若狭工事の概要

舞鶴若狭自動車道は、吹田市を起点として中国自動車道吉川 JCT から分岐し、福知山市～舞鶴市～小浜市を経て北陸自動車道敦賀 JCT に至る延長約 162km の高速道路であり、現在、未開通区間である小浜西 IC～敦賀 JCT（延長約 50km）の施工が進められている。ここで取り上げる若狭工事は、図-1 に示した福井県小浜西 IC～敦賀 JCT のほぼ中間点、福井県三方上中郡若狭町内の延長約 10km にわたる範囲に点在する 4 地区（三田地区、向笠地区、鳥浜地区、気山地区）において、ボックスカルバー

ト等の構造物築造場所 9 箇所に、载荷盛土を施工するものである¹⁾。三方五湖に近接する若狭町付近は、2 つの断層（三方断層、熊川断層）に囲まれた三遠三角地であり、これら断層の影響により形成された深く狭長なおぼれ谷埋積平野に、河成堆積物や海成堆積物が厚く堆積した軟弱地盤帯が広く分布している。図-2～図-5 は、当該工事区間である 4 地区の地質想定縦断面図であるが、N 値が 0～1 程度の非常に軟弱な粘性土および腐植土が深さ 40m 以上にわたって厚く堆積していることがわかる。若狭工事では、このような軟弱地盤上に载荷盛土を施工するため、大規模な沈下や変形の発生が予想される。



図-1 舞鶴若狭自動車道若狭工事の施工位置

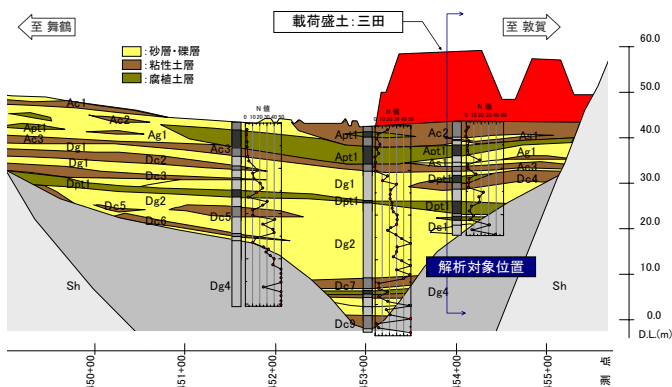


図-2 三田地区における地質想定縦断面図

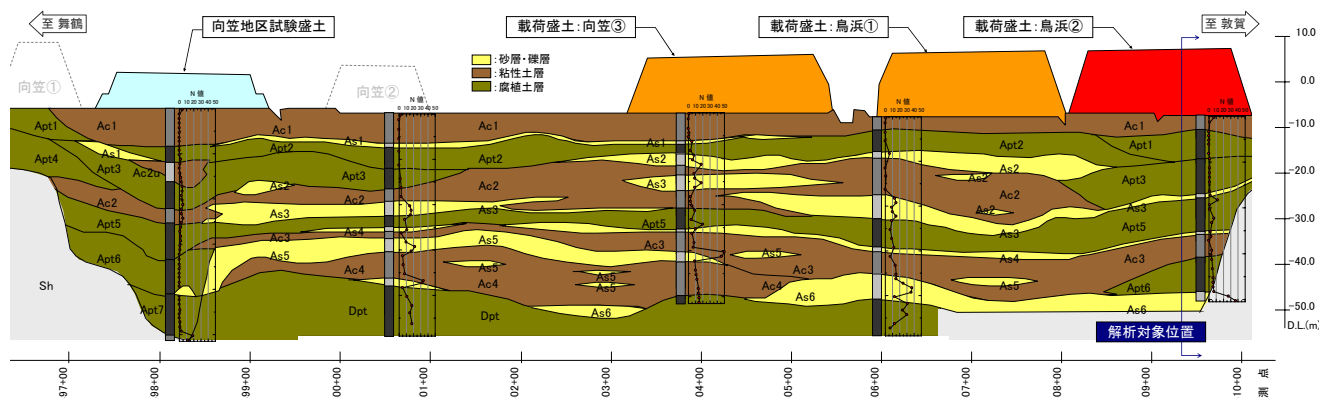


図-3 向笠地区における地質想定縦断面図

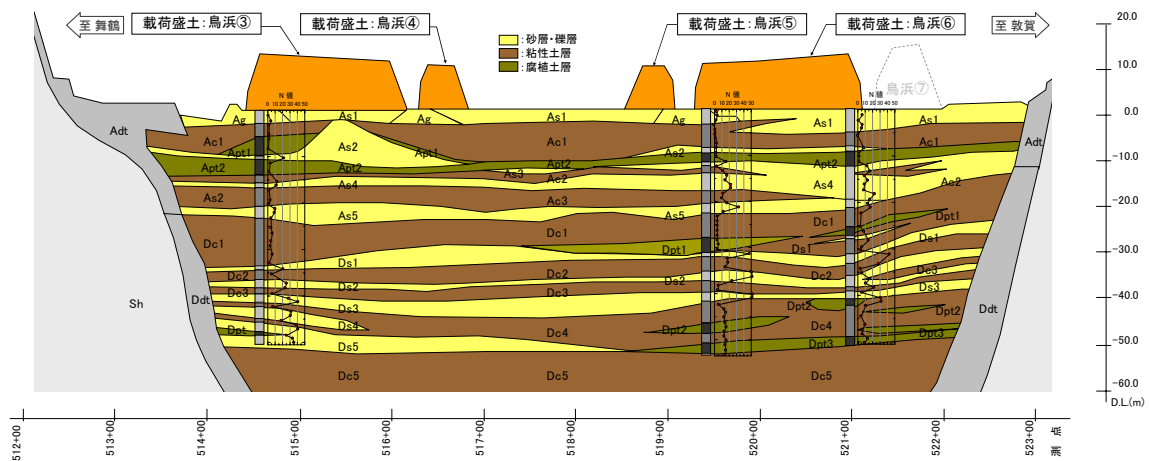


図-4 鳥浜地区における地質想定縦断面図

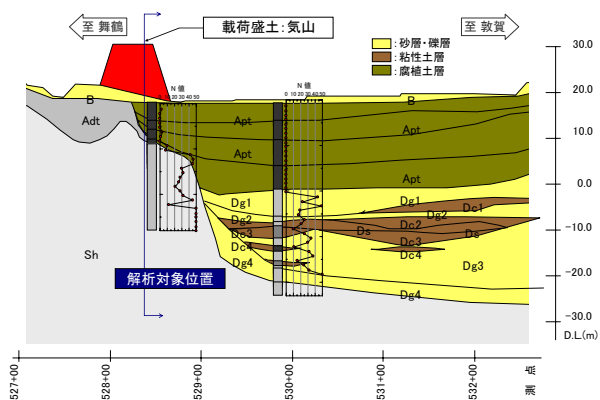


図-5 気山地区における地質想定縦断面図

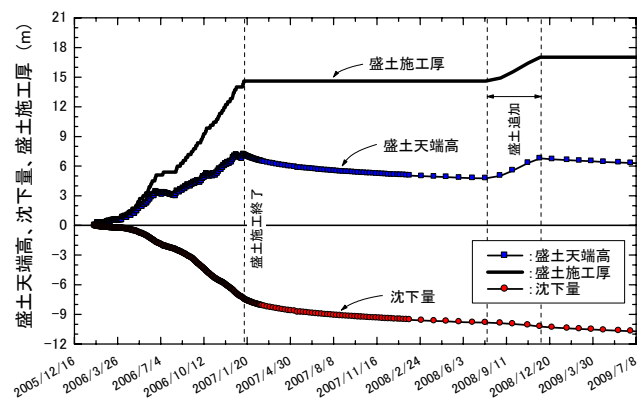


図-6 試験盛土の盛土天端高・盛土施工厚・沈下量

2.2 若狭工事における軟弱地盤対策

若狭工事の施工に先立ち、図-3 に示した向笠地区において軟弱地盤対策工法（バーチカルドレーン工法）の選定を目的とした試験盛土^{4),5)}が実施されている。この試験盛土では、押え盛土工が実施されるとともに、プラスチックボードドレーンが本体盛土下に深さ 20m まで打設されるため、盛土自体のすべり破壊は発生していないが、大規模な沈下・変形が観測された。図-6 に示すように、盛土完了（2007 年 1 月末）時点での計画高約 8m を確保するために、盛土施工厚は約 15m に達しており、現在では最大 10m を超える大規模な沈下が発生している。また、このような大規模な沈下に伴い、周辺地盤では盛土法尻付近が約 1m 外側に押し出されると同時に、最大 1m を超える大きな隆起が発生し（写真-1）、盛土法尻から 100m 以上離れた位置にまで影響を与えた。このため、若狭工事においても試験盛土と同様に、大規模な沈下による影響が広範囲にわたって発生することが予想された。

若狭工事では、大規模な沈下に伴う周辺地盤の変形や長期的な残留沈下を抑制するため、試験盛土で実施した軟弱地盤対策（押え盛土工、プラスチックボードドレーン工）の他に、別途対策工が必要であると判断した。そこで、表-1 に示した (1)盛土の緩速施工、(2)プラスチックボードドレーン打設範囲の拡張、(3)プラスチックボードドレーン打設長の延長、(4)真空圧密工法、の 4 つの対



写真-1 試験盛土法尻付近の変形状況

策工法を追加実施した。これらの対策工法は、地盤構成や周辺環境、補修・維持管理等を含めた費用対効果、後工程への影響といった諸条件を考慮し、各载荷盛土で最適となるように選定しており、本研究で取り上げる真空圧密工法については、4 地区 9 箇所の载荷盛土のうち特に近接構造物や後工程への影響が懸念される 3 箇所の载荷盛土（三田载荷盛土、鳥浜②载荷盛土、気山载荷盛土）に対して採用している。なお、表-1 に示した対策工法は、周辺地盤の変形抑制や地盤の圧密促進に効果的であったが、中でも真空圧密工法による改良効果は非常に大きなものであった。

表-1 若狭工事で実施した対策工法の仕様・効果とその特徴

対 策 案		(1) 盛土の緩速施工	(2) プラスチックボードドレーンの打設範囲拡張	(3) プラスチックボードドレーンの延長	(4) 真空圧密工法
仕様	試験盛土	盛土速度 5～6cm/d	本体盛土範囲	打設長 L=20m	-
	変 更	盛土速度 3cm/d	本体+押え盛土範囲	打設長 L=34m	24,000m ² の追加施工
効果	周辺地盤の変形抑制	○	◎	△	◎
	地盤深部の圧密促進	△	×	◎	×
	工期の短縮	×	×	×	◎
対策工事費		小	中	中	大
対策工法の選定理由		施工中の圧密促進期間が増加するため強度が増加し、周辺地盤への影響を低減することが可能。	押え盛土下にある軟弱層の圧密が促進され、周辺地盤への影響を大幅に抑制可能。	地盤深部にある軟弱層の圧密が促進されることにより、地盤深部の残留沈下や側方流動を抑制可能。	真空圧が作用することにより、周辺地盤への影響を大幅に低減可能であるとともに、盛土の急速施工が可能。

×:効果なし △:若干効果あり ○:効果あり ◎:非常に効果あり

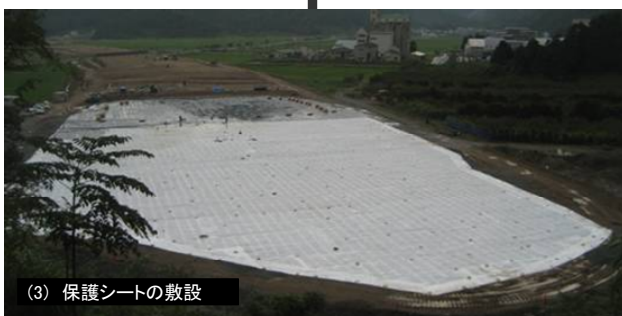


写真-2 鳥浜②载荷盛土における真空圧密工法の施工状況定点写真

3. 真空圧密工法の施工とその効果

3.1 真空圧密工法の施工状況

若狭工事では、気密シート式の真空圧密工法（高真空 N&H 工法⁶⁾）を採用している。写真-2 は、図-3 に示した鳥浜②载荷盛土における施工状況写真である。真空圧密工法の施工手順は、軟弱地盤にプラスチックボードドレーンを打設した後、水平ドレーンおよび集水管を設置し、保護シートおよび気密シートを敷設する。気密シートを施工する際には漏気防止対策を確実に実施し、地盤に真

空圧を十分に载荷させることが重要である。特に気密シートの端部では、地盤を粘性土まで掘削し、気密シートを巻き込むことで十分な漏気防止処理を行う必要がある。その後、真空圧を载荷し漏気の有無を確認し、真空圧を载荷したまま保護砂・载荷盛土を施工していく。なお、鳥浜②载荷盛土位置では、10m を超える大規模な沈下や変形が予想されたため、このような大変形に追随するように、水平ドレーンや集水管の設置には十分な余裕を持たせ施工を行っている。

3.2 真空圧密工法の効果

(1) 三田载荷盛土

三田载荷盛土（写真-3）では、近接する河川や後工程への影響を考慮して、真空圧密工法が採用されている。図-2 に示したように三田地区は、軟弱な粘性土層と腐植土層の間に砂礫層が介在した地盤構成をしており、深さ 8m 付近に堆積する腐植土層が特に軟弱である。このため、真空圧密用のプラスチックボードドレーン（1.2m×1.2m 正方配置）は深さ 10m まで打設している。図-7 は、三田载荷盛土における動態観測結果である。盛土中央位置の地表面沈下量を見ると、真空圧载荷（約 60kPa）および载荷盛土施工（盛土高 13.2m）によって、最大 2.9m の大きな沈下が生じている。しかしながら、真空圧密工法の効果によって盛土法尻付近の変位は盛土外側へ 0.02m の押し出し、0.31m の沈下を示しており、周辺地盤への影響は非常に少ない。また、真空圧密工法を採用することにより最大 10cm/d（平均 7cm/d）と、通常の約 3 倍の急速施工が実施できており、一般的な盛土施工と比較して大幅な工期短縮が実現できている。

(2) 鳥浜②载荷盛土

鳥浜②载荷盛土（写真-4）は、図-3 に示したように粘性土および腐植土が深さ 40m 付近まで厚く堆積した若狭工事の施工区間で最も軟弱な地盤に位置し、試験盛土と同じように 10m を超える大規模な沈下の発生が予想された箇所である。鳥浜②载荷盛土では、地盤深部に堆積する軟弱層の圧密促進のために、通常のプラスチックボードドレーン（1.2m×1.2m の正方配置）を深さ 34m まで延長する対策を実施するとともに、後工程への影響を考慮して真空圧密工法を採用している。真空圧密用のプラスチックボードドレーンは沖積砂層（As3 層）の上部、深さ 16m 付近まで、長さ 34m の通常のプラスチックボードドレーンの間に打設している。図-8 は、鳥浜②载荷盛土における動態観測結果である。盛土中央位置の地表面沈下量を見ると、真空圧载荷（約 80 kPa）および载荷盛土施工（盛土高 13.5m）によって、最大 10.6m に及ぶ大規模な沈下が発生している。深度 30m 位置の間隙水圧計を見ると、50kPa 程度の負圧が確認されるとともに、層別沈下計では深度 17.7m～31.0m の間で 2m 程度の沈下が見られることから、地盤深部においても真空圧が作用し圧密が促進されていると考えられる。また、盛土の施工速度は、真空圧密工法を採用することにより最大 10cm/d（平均 8cm/d）急速施工が実施できており、大幅な工期短縮が実現できている。盛土法尻付近の変形は、真空圧密を载荷した初期には改良域側へ引き込まれ、地表面では引き込みクラックが発生している（写真-5）。その後の盛土施工に伴って、地盤は徐々に盛土外側に押し出され、盛土完了時には盛土法尻付近で約 0.3m の押し出しと約 0.2m の隆起が発生し、その影響範囲は盛土法尻から 10～15m 程度であった。この変形量は、同じように 10m 以上沈下し



写真-3 三田载荷盛土の全景

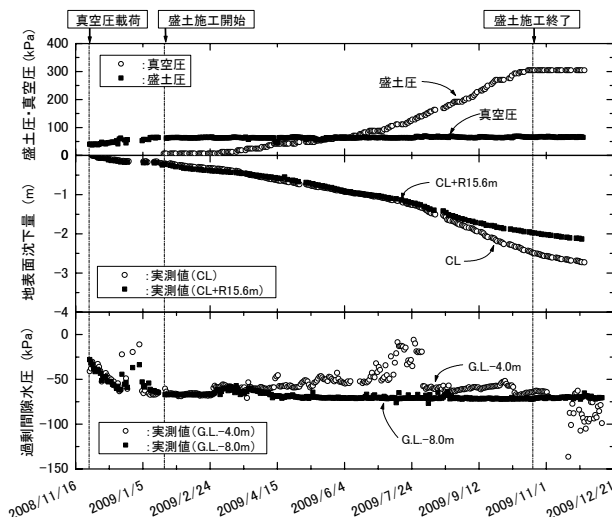


図-7 三田载荷盛土の動態観測結果



写真-4 鳥浜②载荷盛土の全景

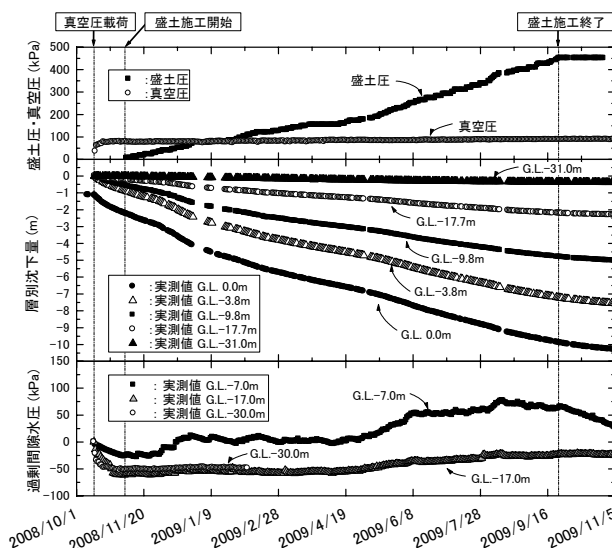


図-8 鳥浜②载荷盛土の動態観測結果

た試験盛土で計測された押出し量（約 1m）の 1/3 以下、隆起量（約 1m）の 1/5 以下であり、真空圧密による高い改良効果が確認できる。

(3) 気山载荷盛土

気山载荷盛土（写真-6）は、既設構造物（NHK 電波塔）との近接施工である。図-5 に示したように、気山载荷盛土位置の地盤は、傾斜した基盤に沿って軟弱な腐植土層が厚く堆積しており、近接する既設構造物（NHK 電波塔）への影響を抑制する目的で、真空圧密工法が採用されている。真空圧密用のプラスチックボードドレーン（0.7m×0.7m 正方配置）は、傾斜した基盤に沿って深さ 4～12m まで階段状に打設している。図-9 は、気山载荷盛土における動態観測結果である。地表面沈下量を見ると、真空圧载荷（約 80kPa）および载荷盛土施工（盛土高 8.5m）により最大 3.5m の大きな沈下が発生している。しかしながら、真空圧密工法の効果によって、盛土法尻付近の地盤変位は盛土内側（改良域側）へ 0.17m の引き込みと 0.35m の沈下を示しており、近接する既設構造物の変位も管理基準値以下に抑制されている。

4. 真空圧密工法適用現場の FEM 解析

4.1 真空圧密工法のモデル化

若狭工事の载荷盛土施工では、周辺地盤の側方変形が低減されると同時に、盛土の急速施工も可能となる真空圧密工法の特徴が顕著に現れている。このような真空圧密工法特有の改良効果を土-水連成 FEM 解析で再現するにあたっては、プラスチックボードドレーンの三次元的な排水効果と、真空圧载荷をどのようにモデル化するかがポイントとなる。真空圧密工法のモデル化としては、改良域の要素境界上を排水面として負圧を与えることで真空圧密を再現した解析事例^{6), 8), 9)}が幾つか報告されており、真空圧密工法特有の引き込み型の側方変形や改良域の沈下量を、比較的精度よく再現できることが示されている。しかしながら、これらの解析事例では、プラスチックボードドレーンは奥行き方向へ壁状に挿入されたモデルとなるため、ドレーンの排水効果は過大に評価され、真空圧を与える境界条件の設定が非常に困難となる。このため、複雑な自然地盤を対象とした場合の適用限界も指摘されている²⁾。そこで本研究では、真空圧密工法のモデル化として著者らが提案する“拡張マクロ・エレメント法”³⁾を用いた。拡張マクロ・エレメント法は、関口ら¹⁰⁾によって提案されたマクロ・エレメント法を、内挿関数の選び方に依存しない一般的な空間離散化式に拡張するとともに、地盤の傾斜、ドレーンの打設配置、ウェルレジスタンスや真空圧密工法を考慮する手法を組み込むことで、より汎用性を高めた手法である。この拡張マクロ・エレメント法を用いることで、三次元的な取扱いが必要となるプラスチックボードドレーンの集水効果を、二次元平面ひずみ条件下においても要素レベルで忠実に考慮



写真-5 地表面クラックの発生（鳥浜②载荷盛土）



写真-6 気山载荷盛土の全景

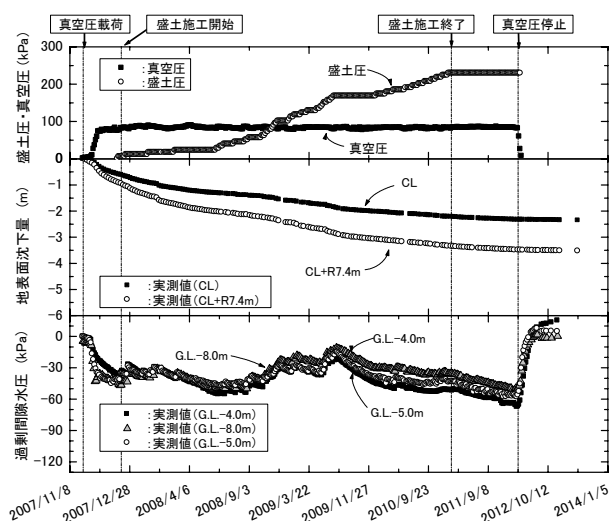


図-9 気山载荷盛土の動態観測結果

できるとともに、プラスチックボードドレーン内部に直接真空圧を作用¹¹⁾できるため、真空圧密工法の圧密促進効果をより自然に表現することが可能である。

4.2 真空圧密工法を適用した载荷盛土の FEM 解析

(1) 三田载荷盛土の FEM 解析

若狭工事で施工した真空圧密工法を用いた 3 箇所の载荷盛土に対して、土-水連成 FEM 解析を実施した。FEM 解析条件は、载荷盛土横断面方向の 2 次元平面ひずみ条件とした。図-10 は、図-2 に示した三田载荷盛土の横断面における FEM 解析メッシュである。地盤部分のメッシ

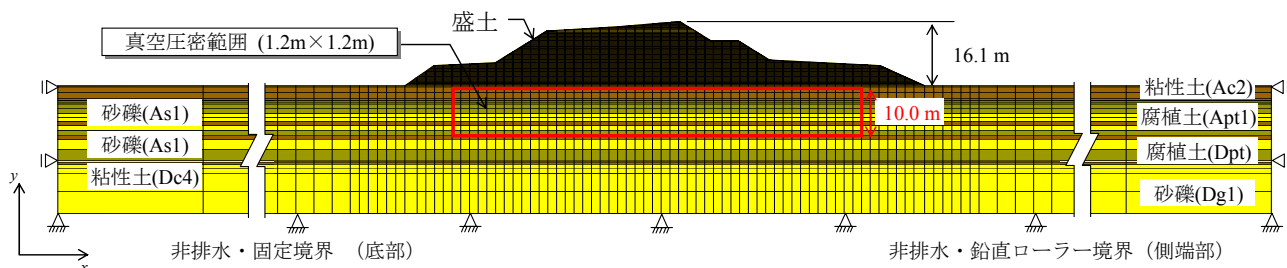


図-10 FEM 解析に用いたメッシュ（三田载荷盛土）

表-2 FEM 解析に用いた材料パラメーター一覧（三田载荷盛土）

土質	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	限界応力比 M	圧縮指数 λ	非可逆比 Λ	ダイレイタンス係数 D	先行圧密圧力 σ_{v0}' (kPa)	静止土圧係数 K_0	間隙比 e_0	ポアソン比 ν'	e-lnkの傾き λ_k	透水係数 k (m/d)
盛土	18.6				弾性係数 E=11800 (kPa)				0.333	-	8.64E+00
沖積粘土層 Ac2	16.4	1.20	0.226	0.712	0.054	50.0	0.500	1.500	0.333	0.226	2.58E-04
沖積砂層 As1	18.3				弾性係数 E=1500 (kPa)				0.333	-	8.64E-02
沖積腐食土層 Apt1	12.3	2.00	1.389	0.836	0.106	70.0	0.250	4.500	0.200	0.477	8.64E-04
沖積礫層 Ag1	19.8				弾性係数 E=14500 (kPa)				0.333	-	8.64E-02
洪積粘土層 Dc1	18.5	1.20	0.130	0.750	0.046	223.0	0.500	0.750	0.333	0.130	2.58E-04
洪積礫層 Dg1	21.7				弾性係数 E=12800 (kPa)				0.333	-	8.64E-01
洪積腐食土層 Dpt1	12.7	2.00	0.434	0.700	0.040	192.0	0.250	2.800	0.200	0.304	5.19E-04
洪積粘土層 Dc4	18.7	1.20	0.156	0.614	0.040	181.0	0.500	1.000	0.333	0.156	2.58E-04
沖積砂層 Dg2	22.1				弾性係数 E=11500 (kPa)				0.333	-	8.64E-01

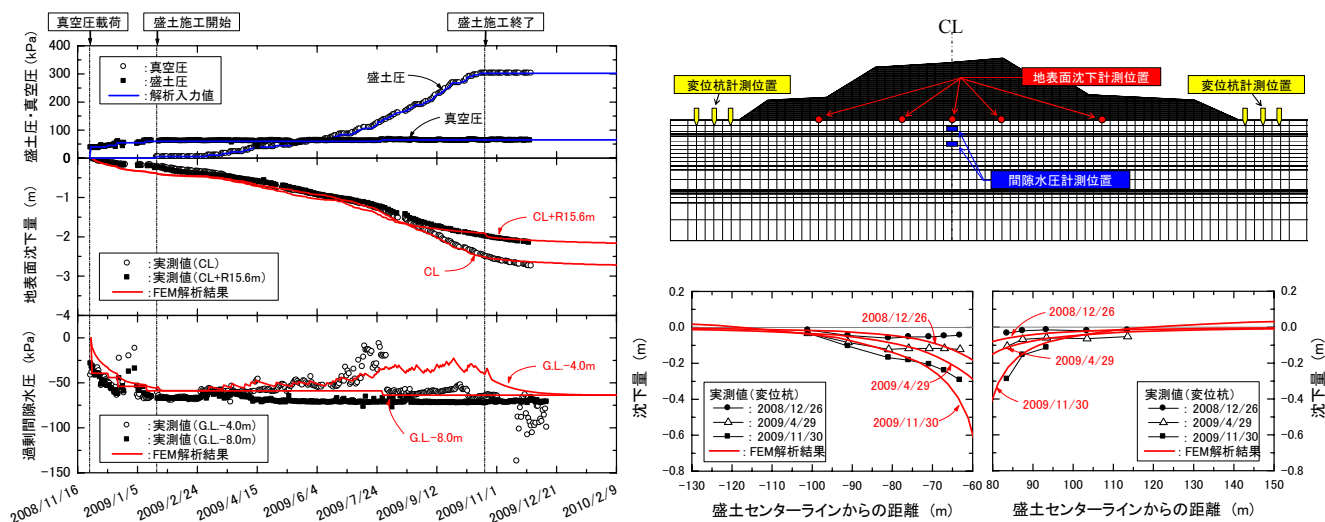


図-11 FEM 解析結果と動態観測結果の比較（三田载荷盛土）

は、事前のボーリング調査結果から設定しており、盛土部分のメッシュは、盛土施工厚まで盛土形状を引き伸ばすことで沈下の影響を考慮した。施工履歴は、1 層 30cm の敷均し・転圧の実施工に合わせて盛土要素を追加することで表現している。表-2 は、FEM 解析に用いた材料パラメータである。材料パラメータは各種室内試験結果を基に設定しており、盛土および砂礫層は線形弾性モデル、粘性土層および腐植土層は特異点¹²⁾の影響を回避するため Expanded 関口・太田モデル¹³⁾を用いている。なお、真空圧密工法の改良域には拡張マクロ・エレメント法を用い、計測された真空圧（約 60kPa）を载荷している。

図-11 は、動態観測結果と FEM 解析結果の比較である。図中のプロットが動態観測による実測値、赤の実線が FEM 解析結果である。これらの図を見ると、地表面沈下量および法尻付近の地盤隆起量は、実測値とよく一致している。また、真空圧密改良域内の過剰間隙水圧の解析

結果も実測値と良く一致しており、拡張マクロ・エレメント法を用いることで、地盤の変形だけではなく、真空圧が载荷された地盤内の複雑な有効応力状態も精度良く再現できていると考えられる。

(2) 鳥浜②载荷盛土の FEM 解析

図-12 は、図-3 に示した鳥浜②载荷盛土の横断面における FEM 解析メッシュである。地盤部分のメッシュは、事前のボーリング調査結果とプラスチックボードドレーン打設時のオシログラフ分析結果から設定¹⁴⁾しており、盛土部分のメッシュは三田载荷盛土と同様に、盛土施工厚まで盛土形状を引き伸ばすことで 10m を超える大規模な沈下の影響を考慮している。表-3 は、FEM 解析に用いた材料パラメータである。向笠地区では、若狭工事施工前に試験盛土に対して FEM 解析を実施⁵⁾しており、材料パラメータも詳細に検討されている¹⁵⁾ため、試験盛土の

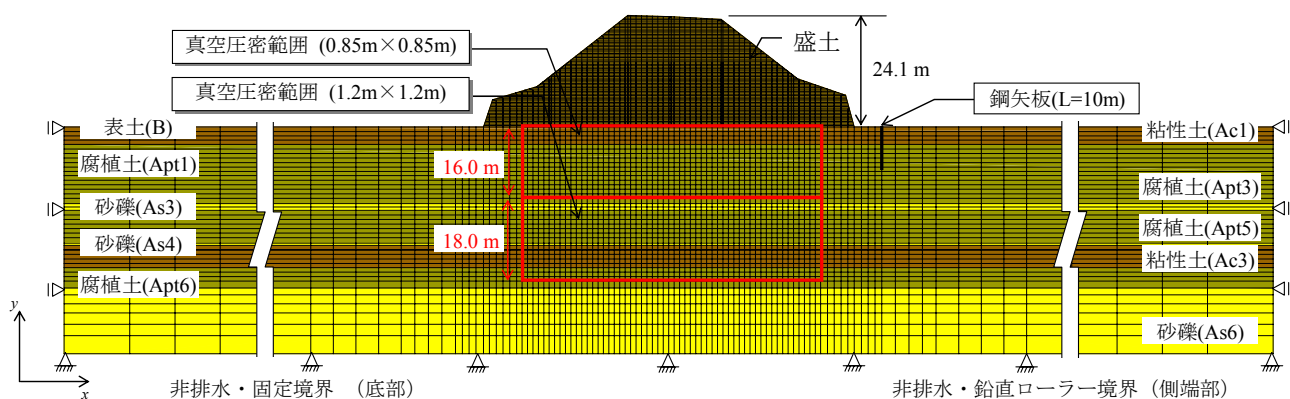


図-12 FEM 解析に用いたメッシュ（鳥浜②载荷盛土）

表-3 FEM 解析に用いた材料パラメーター一覧（鳥浜②载荷盛土）

土質	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	限界応力比 M	圧縮指数 λ	非可逆比 Λ	ダイレイタンス係数 D	先行圧密圧力 σ_{v0}' (kPa)	静止土圧係数 K_0	間隙比 e_0	ポアソン比 ν'	e-lnkの傾き λ_k	透水係数 k (m/d)
盛土	18.6	弾性係数 E=11800 (kPa)							0.333	-	8.64E+00
沖積粘土層 Ac1	13.2	1.20	0.614	0.721	0.092	35.7	0.500	3.000	0.333	0.434	3.46E-04
沖積腐食土層 Apt1	11.0	2.00	0.771	0.793	0.068	41.4	0.250	3.500	0.200	0.434	5.18E-04
沖積粘土層 Apt3	12.6	2.00	0.771	0.793	0.080	109.9	0.500	2.800	0.200	0.304	5.18E-04
沖積砂層 As3	18.6	弾性係数 E=9810 (kPa)							0.333	-	8.64E-01
沖積腐食土層 Apt5	14.0	2.00	0.497	0.739	0.061	200.0	0.250	2.000	0.200	0.304	1.73E-04
沖積砂層 As4	18.6	弾性係数 E=9810 (kPa)							0.333	-	8.64E-01
沖積粘土層 Ac3	18.1	1.20	0.141	0.654	0.035	269.3	0.500	1.200	0.333	0.141	2.59E-04
沖積腐食土層 Apt6	13.8	2.00	0.273	0.782	0.043	122.5	0.250	1.500	0.200	0.217	2.59E-04
沖積砂層 As6	19.6	弾性係数 E=11800 (kPa)							0.333	-	8.64E-01

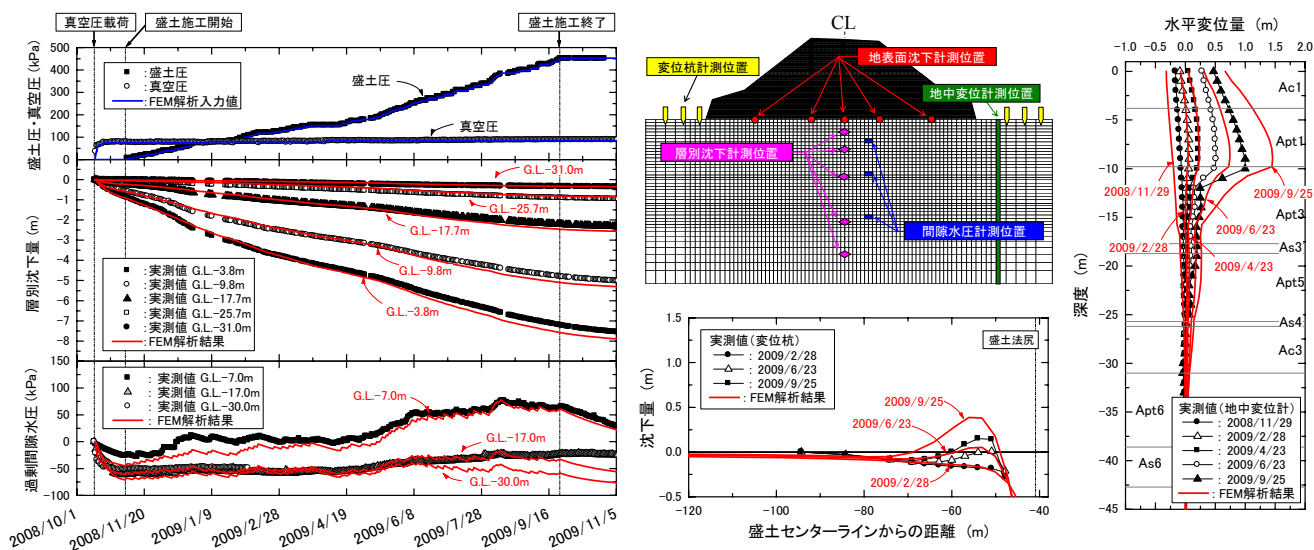


図-13 FEM 解析結果と動態観測結果の比較（鳥浜②载荷盛土）

FEM 解析で使った材料パラメータを用いている。構成モデルは、盛土および砂礫層は線形弾性モデル、粘性土および腐植土は Expanded 関口・太田モデルとした。なお、盛土法尻付近では、側方変形の抑制対策として一部区間で鋼矢板が 10m 打設されており、FEM 解析ではビーム材を用いてモデル化している。また、真空圧密工法による改良領域では、実際の施工に合わせて深さ 16m 付近からプラスチックボードドレーンの打設間隔を変えており、地盤深部のプラスチックボードドレーンに対しても真空圧（約 80kPa）を一律に载荷している。

図-13 は、地表面沈下計、層別沈下計、間隙水圧計および地中変位計による動態観測結果と FEM 解析結果を比較

した図である。図中のプロットが動態観測結果、赤の実線が FEM 解析結果である。これらの図を見ると、沈下量、過剰間隙水圧および水平変位量の解析結果は、動態観測結果と非常によく一致しており、実施した FEM 解析が非常に高い精度で現場を再現できていることがわかる。

(3) 気山载荷盛土の FEM 解析

図-14 は、図-5 に示した気山载荷盛土の横断面における FEM 解析メッシュである。地盤部分のメッシュは、事前のボーリング調査結果から、基盤の傾斜を考慮して設定している。表-4 は、FEM 解析に用いた材料パラメータである。材料パラメータは各種室内試験結果を基に設定

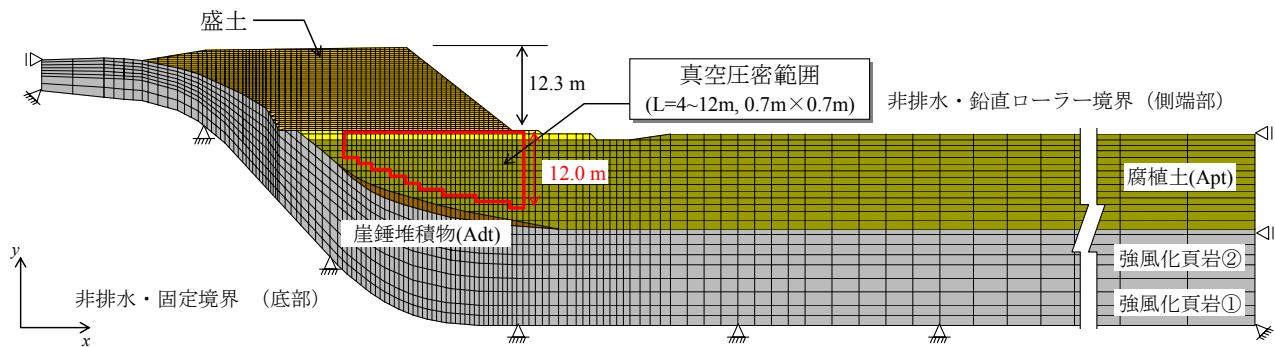


図-14 FEM 解析に用いたメッシュ (気山载荷盛土)

表-4 FEM 解析に用いた材料パラメーター一覧 (気山载荷盛土)

土質	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	限界応力比 M	圧縮指数 λ	非可逆比 Λ	ダイレイタンス係数 D	先行圧密圧力 σ_{v0} (kPa)	静止土圧係数 K_0	間隙比 e_0	ポアソン比 ν'	e-lnkの傾き λ_k	透水係数 k (m/d)
盛土	18.6				弾性係数 E=11800 (kPa)				0.333	-	8.64E+00
沖積腐食土層 Apt	10.8	2.00	1.432	0.818	0.085	27.6	0.250	5.900	0.200	0.781	3.46E-04
崖錐堆積物 Adt	17.7				弾性係数 E=11800 (kPa)				0.333	-	8.64E-04
強風化頁岩①	19.6				弾性係数 E=24000 (kPa)				0.333	-	-
強風化頁岩②	20.6				弾性係数 E=36200 (kPa)				0.333	-	-

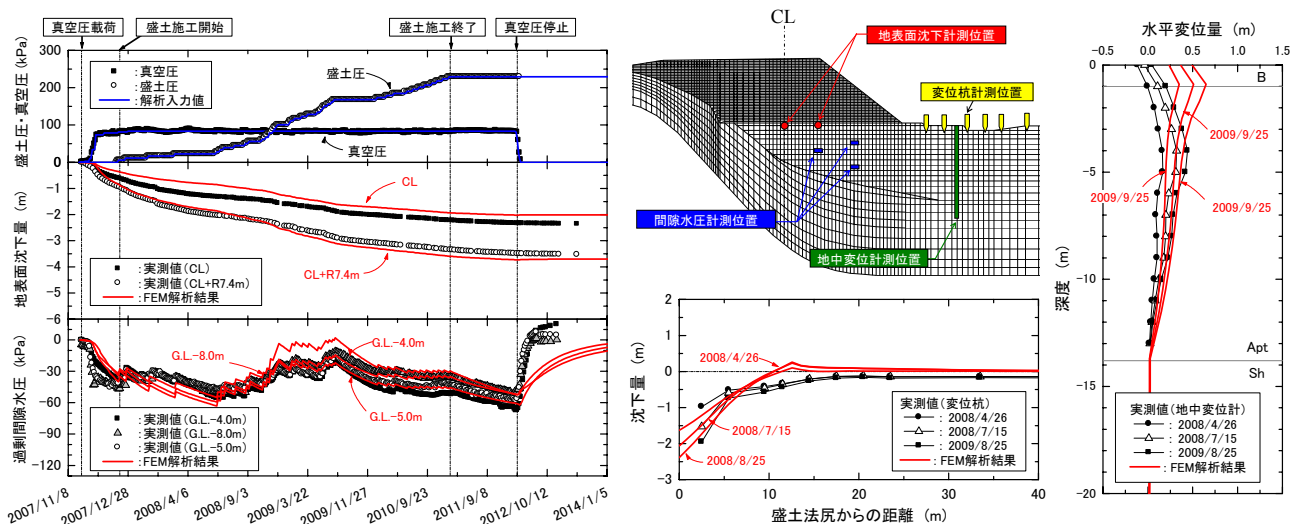


図-15 FEM 解析結果と動態観測結果の比較 (気山载荷盛土)

しており、構成モデルには三田载荷盛土、鳥浜②载荷盛土と同様に、盛土および砂礫層は線形弾性モデル、粘性土層および腐植土層は Expanded 関口・太田モデルを用いている。真空圧密工法の改良域は、プラスチックボードドレーンの打設深度 (4~12m) に合わせて階段状に設定し、計測された真空圧 (約 80kPa) を载荷している。

図-15 は、動態観測結果と FEM 解析結果の比較である。図中のプロットが動態観測による実測値、赤の実線が FEM 解析結果である。これらの図を見ると、地表面沈下量、法尻付近の地盤変位量、地中内水平変位量、過剰間隙水圧は、解析結果と実測値が良く一致しており、実施した FEM 解析が非常に高い精度で現場を再現できていることがわかる。

5. FEM 解析結果の活用方法と有用性

5.1 FEM 解析による沈下・変形予測

先に示したような精度の高い FEM 解析結果を用いるこ

とで、地盤に今後どのような沈下や変形が生じるのかを正確に予測することが出来ると同時に、この予測結果を用いて対策工の検討も可能である¹⁶⁾。図-16 は、気山载荷盛土における法尻付近の側方変位が、真空圧密による引き込みから盛土施工による押し出しに転換した時期に、盛土施工を一時中断して近接構造物 (NHK 電波塔) への影響抑制対策を検討した事例である。この検討結果によると、深層混合処理による対策工が地盤の水平変位抑制に最も効果的であると考えられる。但し、この FEM 解析結果を用いて別途検討した構造物基礎の変形量は、対策工なしのケースにおいても管理基準値を十分満足したため、FEM 解析による予測変位量を参考に、観測施工を行いながら対策工なしで工事を再開した。なお実際の地盤変位量は、FEM 解析による予測値を超えることはなく、近接する構造物の変位も管理基準値以下に抑制され、無事施工は終了している。このように、FEM 解析は対策工検討等に非常に有効な手法であると言える。

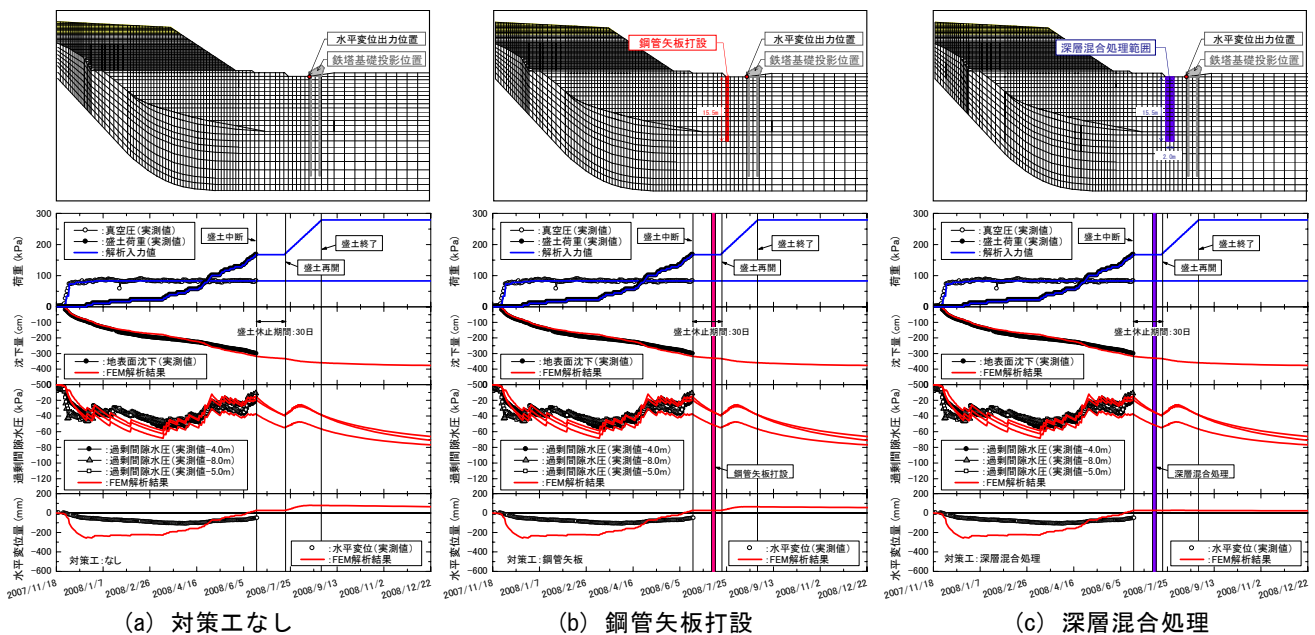


図-16 気山载荷盛土における構造物への影響（水平変位）解析結果

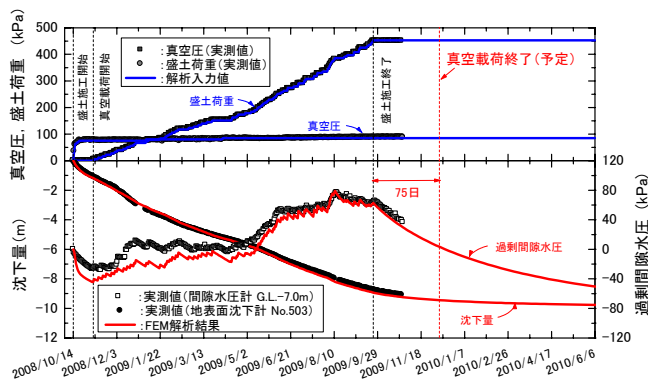


図-17 鳥浜②载荷盛土における真空ポンプ停止時期

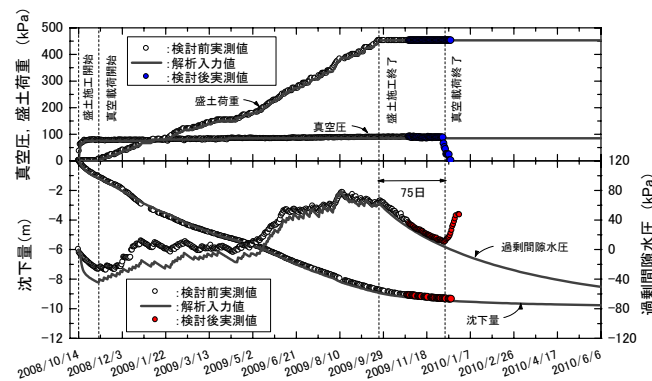


図-18 鳥浜②载荷盛土における検討後の動態観測結果

図-17 は、図-15 に示した鳥浜②载荷盛土の FEM 解析から予測した地盤沈下量と過剰間隙水圧の経時変化である。この FEM 解析による予測結果を用いると、盛土施工後の真空圧载荷期間を 75 日（技術資料⁶⁾による最短载荷期間）とすれば、沈下量は圧密度 95%を満足し、十分に圧密が促進されると判断できる。図-18 は、FEM 解析実施後に計測した動態観測結果を図-17 にオーバープロットしたグラフである。沈下量および過剰間隙水圧の実測値は、FEM 解析による予測結果と良く一致している。このため実際の施工では、FEM 解析による検討通りに、盛土施工終了から 75 日後に真空ポンプを停止した。真空圧密工法の場合、真空ポンプの稼動日数（真空圧の载荷日数）が、改良地盤の品質（圧密度や強度増加）や工程・コストに大きな影響を与えるため、このような検討が実施可能な FEM 解析は非常に有用である。

5.2 FEM 解析による圧密度と強度増加の予測

拡張マクロ・エレメント法を用いた二次元 FEM 解析では、沈下・変形だけでなく過剰間隙水圧も動態観測結果と一致しており、真空圧密による改良域内の有効応力分

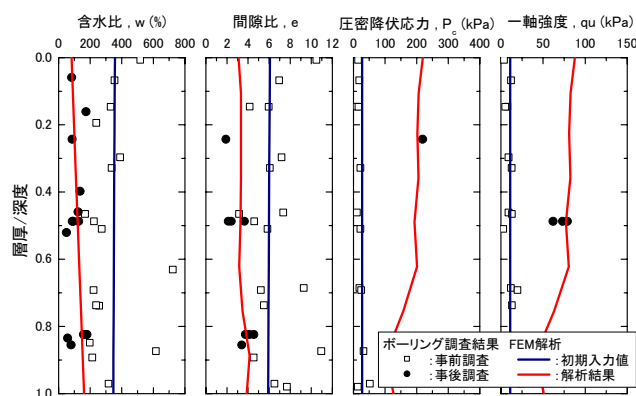


図-19 気山载荷盛土のボーリング結果と解析結果の比較

布を精度よく再現できていると考えられる。図-19 は、気山地区において実施した FEM 解析結果とチェックボーリング結果を比較した図である。チェックボーリングによる試験数が少なく、深度方向の分布傾向までは把握できていないが、FEM 解析によって予測される圧密降伏応力（圧密度）は、チェックボーリングによる試験結果と良

く一致している。また、FEM 解析結果を用いて理論式より算定した一軸圧縮強度も、チェックボーリングによる試験結果を非常に良く再現できていると考えられる。このように、拡張マクロ・エレメント法を用いた高い精度の FEM 解析結果を用いることで、真空圧密改良域内の圧密度や地盤強度を推定することが可能であり、これまで検討が困難であった真空圧密施工中の安定性評価への応用も十分可能であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、舞鶴若狭自動車道若狭工事における載荷盛土で実施した真空圧密工法について、その特徴的な改良効果を示した。また、拡張マクロ・エレメント法を用いた土-水連成 FEM 解析を実施することで、真空圧密工法特有の改良効果を精度良く再現可能であることを示すとともに、これら FEM 解析結果の活用方法やその有用性について検討を行った。

真空圧密工法を適用した若狭工事の載荷盛土施工では、周辺地盤への影響が大幅に抑制されるとともに、急速施工による大幅な工期短縮が実現できている。さらに、盛土施工後の沈下は早い時期から収束しており、真空圧密工法特有の改良効果が顕著に現れていることがわかる。これら若狭工事の載荷盛土に対して実施した土-水連成 FEM 解析では、真空圧密工法のモデル化に拡張マクロ・エレメント法を用いることで、沈下・変形だけでなく域内の過剰間隙水圧（有効応力）も動態観測結果を非常に精度良く再現できている。本手法の有効性が確認された。また、このような精度の高い FEM 解析結果を用いれば、真空圧密による側方変形低減効果や対策工の検討、地盤内の圧密度や強度増加の評価など、これまで検討が困難であった事例についても定量的に評価することが可能である。今後は、真空圧密工法の施工時安定性や施工管理手法等の詳細な検討を実施するとともに、本手法の適用性についてもさらに検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 信田潤一, 平田昌史, 山田耕一, 川井田実: 超軟弱地盤上の載荷盛土における施工対策事例, 地盤工学会中部支部, 第 18 回調査・設計・施工技術報告会概要集, pp.49-54, 2009.
- 2) 今井五郎: 「真空圧密工法」の更なる発展に向けて-真空圧を利用した地盤改良の原理とその適用-, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.1-16, 2005.
- 3) 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.443-452, 2010.

- 4) 川井田実, 信田潤一, 平田昌史, 山田耕一: 深い腐植土地盤における高速道路建設-舞鶴若狭自動車道(小浜~敦賀)の軟弱地盤対策-, 第 54 回地盤工学シンポジウム論文集, 地盤工学会, pp.563-570, 2009.
- 5) 平田昌史, 木藤政則, 山田耕一, 飯塚敦, 荒井克彦: 超軟弱地盤における道路盛土の変形挙動要因とその抑制対策, 土木学会論文集 C, Vol. 66, No.2, pp.356-369, 2010.
- 6) 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, 2004.
- 7) 山添誠隆, 三田地利之: 真空圧密併用盛土下における泥炭地盤の変形挙動解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.1, No.4, pp.143-156, 2006.
- 8) Chai, J.-C., Carter, J.P. and Hayashi, S.: Vacuum Consolidation and its combination with embankment loading, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.43, No.10, pp.985-996, 2006.
- 9) 水野健太, 土田孝, 新舎博: 真空圧密工法で改良された浚渫粘性土埋立地盤の変形挙動とその解析, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.1, pp.95-108, 2008.
- 10) 関口秀雄, 柴田徹, 藤本朗, 山口博久: 局部載荷を受けるバーチカル・ドレーン打設地盤の変形解析, 第 31 回土質工学会シンポジウム発表論文集, pp.111-116, 1986.
- 11) 竹山智英, 青木孝憲, 荒井亜希, 太田英樹: マクロエレメント法の真空圧密工法への適用(その 1), 第 43 回地盤工学研究発表会, pp.887-888, 2008.
- 12) 竹山智英, 太田秀樹, 飯塚敦, Pipatpongsa Thirapong, 大野進太郎: 関口・太田モデルにおける特異点処理法, 第 3 回地盤工学会, 関東支部研究発表会講演集, pp.313-317, 2006.
- 13) 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, 応用力学論文集, Vol.9, pp.407-414, 2006.
- 14) 平田昌史, 福田淳, ドゥバンバオ, 信田潤一, 山田耕一, 川井田実: 腐植土を含む超軟弱地盤における解析パラメータの決定, 第 65 回土木学会年次学術講演会, 第Ⅲ部門, pp.519-520, 2010.
- 15) 久保大輔, 平田昌史, 中山泰起, 福田淳, 山田耕一, 川井田実: オシログラフを利用した軟弱地盤における砂層位置の推定, 第 65 回土木学会年次学術講演会, 第Ⅲ部門, pp.785-786, 2010.
- 16) 福田淳, 平田昌史, 西川浩二, 信田潤一, 山田耕一, 川井田実: 真空圧密工法における FEM 解析結果の活用事例, 第 65 回土木学会年次学術講演会, 第Ⅲ部門, pp.471-472, 2010.