

軟弱地盤上大規模盛土の有限要素法による長期挙動評価

磯野 純治* 小島 謙一* 松丸 貴樹*
米澤 豊司** 丸山 修*** 仮屋崎 圭司****

Evaluation of Long-term Behavior by Finite Element Method of Rail Yard Embankment on Soft Ground

Junji ISONO Kenichi KOJIMA Takaki MATSUMARU
Toyochi YONEZAWA Osamu MARUYAMA Keiji KARIYAZAKI

Since Kumamoto railcar depot for Kyushu Shinkansen is under construction on a soft clayey layer, it was necessary to adopt an accelerated consolidation method for its construction. Therefore, considering various aspects i.e. construction schedule, cost factor, and possible adverse effects susceptible to adjacent structures in this area, adoption of pre-loading method and vacuum consolidation method for the construction anticipated. In addition, an experimental embankment applying the accelerated consolidation method was constructed, and effects and adverse effects at the subject environment have been evaluated according to the said method.

In this study, we evaluated parameters as obtained previously and the feasibility of modeling of the vacuum consolidation method by feedback analysis based on substantial data.

キーワード：軟弱地盤，プレロード工法，真空圧密工法，有限要素法

1. はじめに

九州新幹線において建設が進められている熊本総合車両基地は、極めて軟弱な粘性土地盤（有明粘土）上に盛土構造で建設されるため、圧密沈下や側方変位に伴う周辺構造物への影響が懸念されている。また、当該現場は水路をボックスカルバート構造で盛土内に構築することが計画されており、本体の盛土構造物と同様に沈下する恐れがある。これらの構造物の機能を長期にわたり満たすためには、想定される沈下を設計において考慮する必要があり、施工時における即時的な沈下のほか、長期的な残留沈下についても評価する必要がある。

圧密沈下の対策としてはプレロード工法や真空圧密工法などがあるが、これらの適用に際しては効果や影響度を予め評価しておく必要がある。本研究では、事前に実施した室内試験や試験盛土の結果を基にモデル化を行い、2次元の土/水連成弾粘塑性変形解析によるシミュレーション解析を実施した。また、車両基地盛土の建設が進捗したことに伴い得られた実測データを基に解析を実施し、シミュレーション解析で用いたパラメータの評価、モデル化等の妥当性を検証した。

2. 解析対象地盤の概要

当該地は、熊本平野の海拔5m以下の平地であり、車両基地建設予定地は主に水田として利用されていた。当該地の地盤概要を図1に示す。地層構成は、表土層（B, T）の下に25m程度の深さまで厚くて軟弱な沖積粘性土層（Ac1, Am1, Am2, Ac2）が、途中で砂質土層（As1, Av）が介在するものの堆積している。特に、厚い沖積粘性土層であるAc2層は介在するAv層により特性の異なる2層（Ac2（U, L））に分けられる。沖積層の下には比較的良好な洪積層（Dc1, Dg1）が堆積している。盛土による圧密沈下については、極めて軟弱であるAc1, Ac2（U, L）層が大きく影響すると考えられる。また、地下水位も非常に高くG.L.-0.8mの位置にある。

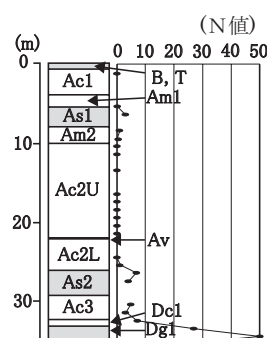


図1 地盤概要

3. 解析モデルの検討

解析を行うにあたり、地盤の構成モデルや圧密促進工法のモデル化の検討を目的として、三軸圧縮試験のシミュレーション解析、試験盛土の施工およびその解析を

* 構造物技術研究部（基礎・土構造）
** 鉄道・運輸機構（鉄道建設本部 設計技術部）
*** 鉄道・運輸機構（鉄道建設本部 九州新幹線建設局）
**** 運輸政策研究機構（運輸政策研究所）

特集：構造物技術

表1 地盤パラメータ (弾塑性, 弾粘塑性材料)

パラメータ	地層	Ac1	Am1	Am2	Ac2U	Ac2L	Ac3
間隙比	e_0	2.535	1.555	1.386	1.758	2.524	1.444
限界状態指数	M	1.313	1.382	1.523	1.191	1.453	1.532
ダイレタンシー係数	D	0.083	0.040	0.037	0.086	0.103	0.111
圧縮指数	λ	0.428	0.163	0.151	0.306	0.567	0.450
非可逆比	Λ	0.906	0.887	0.885	0.919	0.926	0.927
静止土圧係数	K_0	0.559	0.539	0.513	0.589	0.534	0.519
ポアソン比	ν'	0.359	0.350	0.339	0.371	0.348	0.342

表2 地盤パラメータ (弾性材料)

パラメータ	地層	盛土	BT	As1	Av	As2	Dc1
弾性係数	E (MPa)	25.0	7.5	8.2	10.4	12.5	12.7
ポアソン比	ν	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.4

表3 鋼矢板のパラメータ

変形係数 (kPa)	断面積 (m ²)	断面二次モーメント (m ⁴)
2.1×10^8	0.01732	0.000324

実施した。

3.1 三軸圧縮試験のシミュレーション解析

地盤の挙動を有限要素解析で評価するにあたり、土の構成モデルとそのパラメータの設定が非常に重要な要素となる。そこで、各地層に適応した構成モデルなどを決定するために、不攪乱試料 (Ac1およびAc2 (U, L)) による圧縮非排水三軸圧縮試験 (CU 試験) のシミュレーション解析を実施した。解析には2次元の土/水連成有効応力解析コード DACSAR¹⁾ を用いた。解析モデルは関口・太田モデル²⁾ とした。このモデルには時間依存性を考慮しない弾塑性モデルと時間依存性挙動を評価できる弾粘塑性モデルがある。具体的には、弾塑性モデル・弾粘塑性モデルで降伏関数 f が(1)式・(2)式のように表される。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'_m}{p'_{m0}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p \quad (1)$$

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'_m}{p'_{m0}} + D \frac{q}{p'} - \alpha \ln \left[\frac{t_0}{t} \left\{ \exp \left(\frac{\varepsilon_v^p}{\alpha} \right) - 1 \right\} \right] \quad (2)$$

ここで用いた地盤パラメータを表1に示す。これらのパラメータは物理試験や圧密試験をもとに決定している。なお、二次圧密指数 α の決定に際しては、Mesri and Goldewski³⁾ による二次圧密速度 (c_α) と圧密指数 (C_c) の関係 (粘性土: $c_\alpha / C_c = 0.05 \pm 0.02$ で $c_\alpha / C_c = 0.05$ と仮定) に基づき決定している。

実験および解析による応力経路図を図2に示す。実験が実験結果であり、点が解析結果を表している。Ac1層では弾塑性モデルの方が弾粘塑性モデルよりも実験結果に近い傾向を示している。逆に、Ac2 (U, L) 層では弾粘塑性モデルの方が実験結果を精度良く再現することが

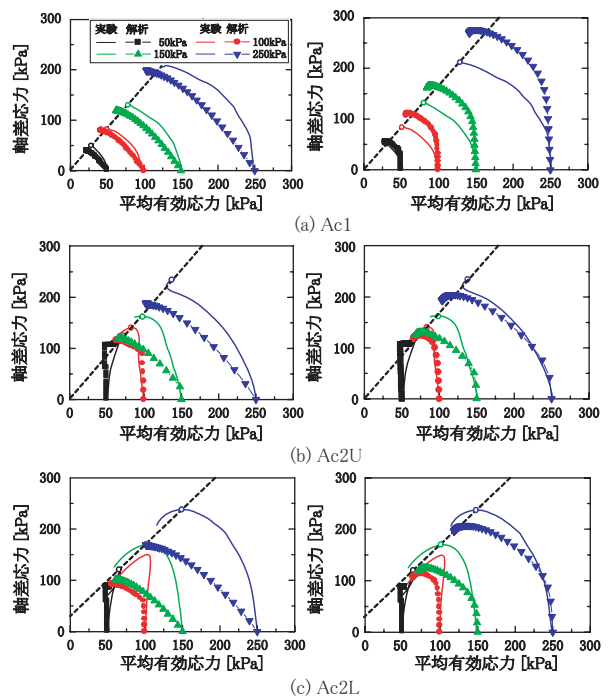


図2 応力経路図

(左：弾塑性モデル, 右：弾粘塑性モデル)

できた。この結果を用いて各層毎に適切な構成モデルおよびパラメータの設定を行った。

3.2 試験盛土による検討⁴⁾

本施工に先立ち、試験盛土を構築し、地盤物性値の評価、施工性や挙動の確認および対策工の評価を行った。試験盛土は、地盤物性を精緻に評価するために無対策で構築した試験盛土 (A)、対策工の1つとして考えられる真空圧密工法の効果を評価するための試験盛土 (B) の2種類を構築し、それぞれの解析を実施することで地盤パラメータや対策工のモデル等の妥当性を確認した。

3.2.1 試験盛土 (A)

試験盛土 (A) の概要を図3に示す。試験盛土は、48.4m × 35.0m, 1:1.5 ののり勾配, 盛土高さは約4.0m (サンドマット: 0.8m) である。本試験盛土の目的は、地盤特性の正確な評価と変位遮断工としての鋼矢板の効果の検討である。長辺方向 (48.4m) ののり尻に対策工として連続的に鋼矢板を打設し、短辺方向 (35.0m) には何も対策工を実施していない。長辺方向 (A-A'断面) の変位等から盛土構築時における地盤そのものの挙動を、短辺方向 (B-B'断面) の計測結果からは鋼矢板による変位の遮断の効果を把握する。適用した鋼矢板は目的が変位の抑制ではなく遮断ということから経済性・施工性や地下水の流動阻害を考慮し、5枚のうち1枚のみ支持層 (Dg: 鋼矢板長は30.0m) まで打設するが、その他の4枚は軟弱層 (鋼矢板長は20.0m) までの長さとした。

計測器についても図3に示す。盛土部は地表沈下板を

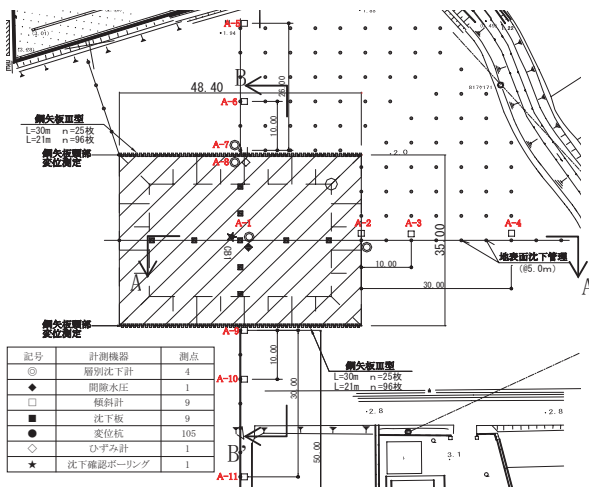


図3 試験盛土 (A) の概要

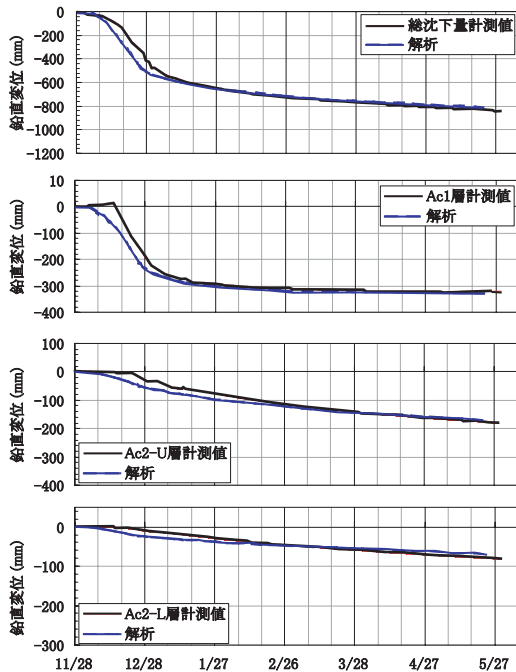


図4 試験盛土の再現解析結果

基礎地盤に9箇所、層別沈下計を盛土中央とのり尻に4箇所、盛土中央に間隙水圧計を1箇所設置し、周辺地盤は傾斜計9箇所、地表面変位杭105箇所を設置した。計測は盛土施工時から盛土完了後2ヶ月間までは1回/1日、その後2ヶ月間は1回/3日で実施した。

解析にあたり、地層のモデル化は前項の三軸圧縮試験のシミュレーション結果を基に、Ac2 (U, L) を弾粘塑性モデル²⁾、Ac1・Am1・Am2およびAc3層を弾塑性モデル、その他の砂や砂礫層および洪積層は線形弾性モデルでモデル化した。各構成モデルで用いた地盤パラメータを表1および表2に示す。地盤パラメータは、試験盛土の計測値と比較検討して検証した⁵⁾。鋼矢板はビーム要素でモデル化し(表3)、地盤と鋼矢板の間には境界要素として薄層要素(剛性が小さく幅の薄い要素)を設け

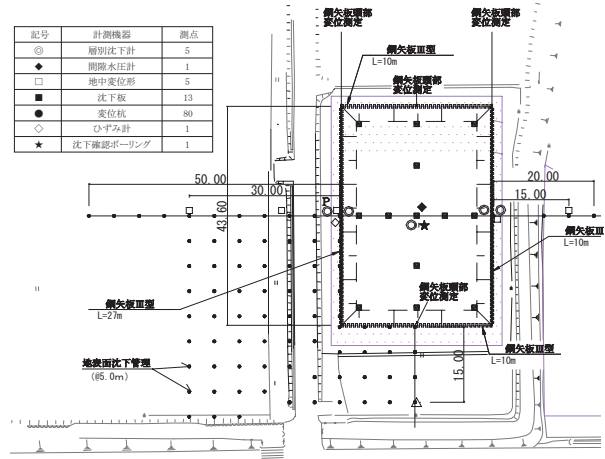


図5 試験盛土 (B) の概要

ることによって、地盤と鋼矢板のすべりを表現できるようにした。

試験盛土の地表面および各層毎の解析結果と計測値を図4に示す。鉛直変位は正側が隆起、負側が沈下を表している。変形初期の挙動が若干異なるものの、いずれの層の挙動においても計測値を再現することができている。この結果から、設定した地盤パラメータや構成モデルの妥当性を確認した。

3.2.2 試験盛土 (B)

試験盛土 (B) の概要を図5に示す。真空圧密施工範囲にはプラスチックボードドレーンを設置している。鉛直ドレーン打設長は22m、ドレーン間隔は1mである。改良範囲の周囲には周辺地盤と縁を切るための鋼矢板と上部砂層からの地下水止水用の鋼矢板を打設した。計測器は、沈下量の確認と収束状況の把握のために地表沈下板13箇所、層別沈下計5箇所、間隙水圧計1箇所を、地中及び地表面変位を把握するために地中変位計5箇所、地表面変位杭80箇所を設置した。

解析に用いた地盤パラメータや構成モデルは試験盛土 (A) と同様である。真空圧密工法は、施工範囲に負の間隙水圧を設定することでモデル化した。真空領域での透水係数 k' についてはプラスチックドレーンによる排水効果を評価し、次式に基づき設定した。

$$k' = \frac{(A_e - A_w)k_s + A_w k_w}{A_e} \quad (3)$$

ここに、 A_e は等価有効円の面積(= $\pi \cdot d_e^2/4$)、 A_w はドレーンの断面積(= $\pi \cdot d_w^2/4$)、 d はドレーンの設置間隔(=1m)、 d_e は等価有効円の直径(=1.13d、正方形配置)、 k_s は地盤の透水係数、 k_w はドレーンの透水係数(= 1.0×10^{-2} cm/s)である。なお、今回の解析対象地盤では地盤の透水係数を層ごとに与えているため、地表面からドレーン下端深度までの層ごとに(3)式で透水係数を求め、As1層の上部および下部で、分割層厚で荷重平均した値

特集：構造物技術

を真空圧密の施工領域の透水係数 ($k'=2.86 \times 10^{-5} \text{cm/s}$) とした。

試験盛土における管理では、負圧を10日ごとに20kPaずつ増加させ、最大80kPaとした。解析は、図6に示す真空載荷領域内で計測された間隙水圧のデータ等をもとに解析では15kPaずつ増加させ、最大60kPaの負圧が作用するものとした。

負圧の载荷ステップと、真空領域中央での地表面における鉛直変位の時刻歴を図7に、各層における鉛直変位の時刻歴を図8に示す。沈下量の絶対値については、解析と試験で概ね同等となっている。しかし、変形の進行過程については異なった挙動を示している。試験では、負圧を15、30、45および60kPaに保っている段階でも沈下は進行しているが、解析では負圧を増加させたときに急激に沈下が生じ、その後一定圧としている時にはさほど沈下が進行していないことがわかる。

間隙水圧の計測結果(図6)を見ると、Am2層より上方では負圧を上昇させる段階で間隙水圧が即時的に減少しており、負圧を一定に保持しているときは間隙水圧の変動はほとんど生じていない。一方、Ac2UおよびAc2L層での間隙水圧の挙動については異なっており、負圧を上昇させた直後の時点での間隙水圧の低下量は十分ではなく、負圧を一定に保持した時にも間隙水圧が低下していることがわかる。このことが一因となってAc2UおよびAc2L層での沈下傾向がうまく再現できなかったものと考えられる。したがって、実際の挙動を評価するにあたって、真空圧密施工中の間隙水圧の動きを適切に与えることが重要であることがわかる。

4. 車両基地施工データによる検討

本施工の進捗に伴い得られた実測データを用いて解析を行い、設定した地盤パラメータ等の評価を行う。ここでは、試験盛土施工箇所へ近接した真空圧密施工領域の実測データを用いた。

4.1 実測データ

実測データは、図9に示すNo.1, No.2, No.3の3地点を対象とした。図10に沈下量および負圧の実測データを示す。実測データは沈下板による沈下量と地表面(G.L), G.L-20mに設置した負圧計のデータである。

負圧は、No.1でG.L, G.L-20mともに約95kPaと深い層までG.Lと同等の圧力を与えることができています。No.2, 3においては、G.L-20mの負圧がG.Lと比較して2割程度低くなっているものの、深い層においても高い負圧が確保されている。また、真空圧密施工領域のプレロード盛土は、総施工高さ1.2m(サンドマット0.5mを除く)であり、0.3m毎に転圧を行なっている。沈下量は深い層

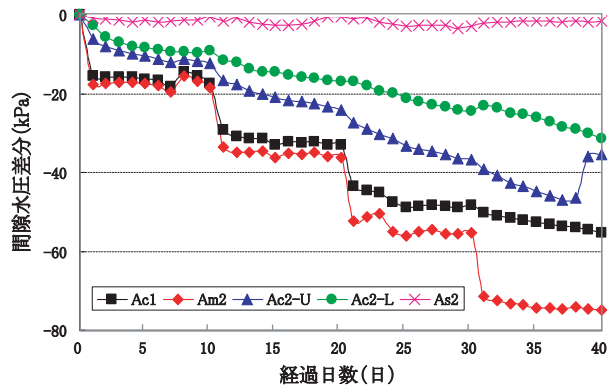


図6 各層の間隙水圧差分

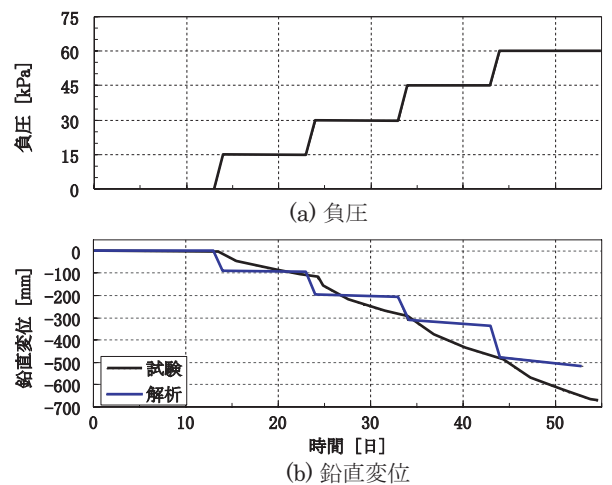


図7 真空圧の载荷と鉛直変位の時刻歴

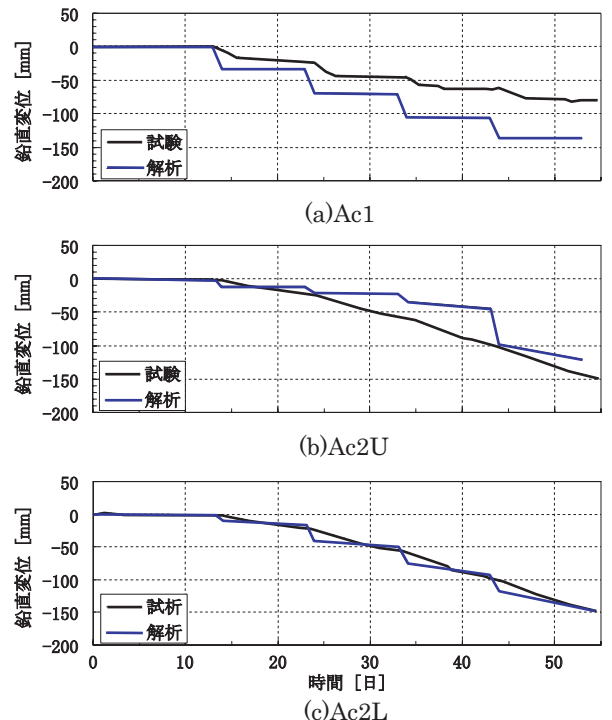


図8 各層の鉛直変位の時刻歴



図9 熊本車両基地の全景

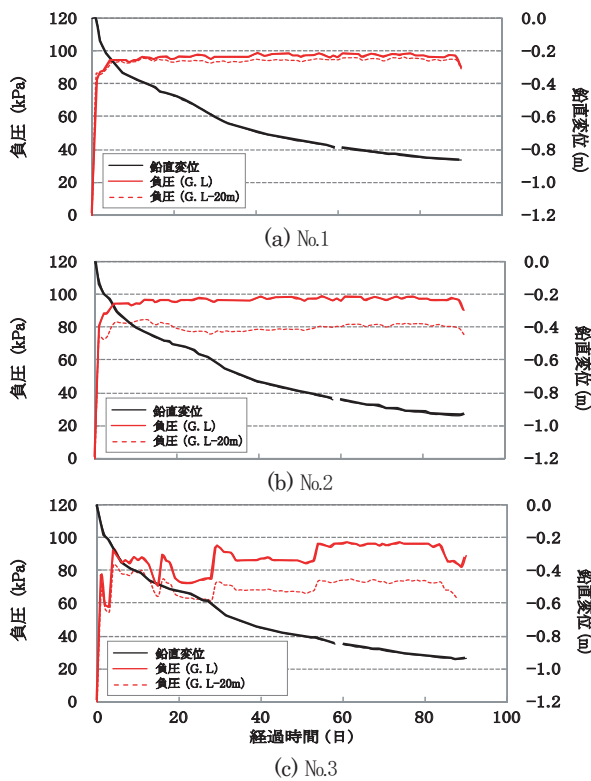
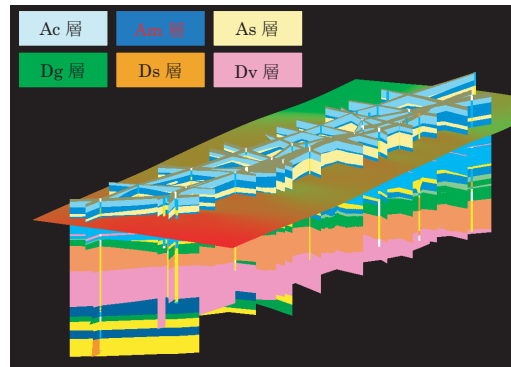
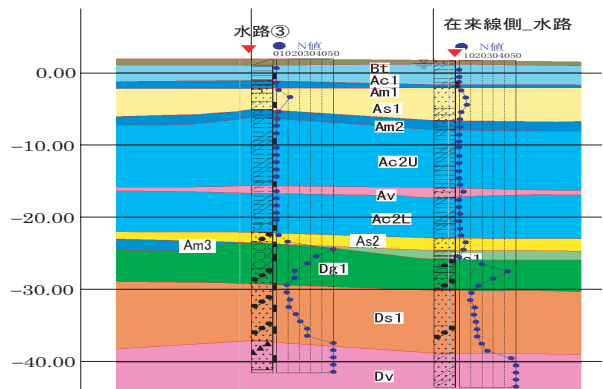


図10 実測データ



(a) 3次元モデル



(b) 2次元モデル

図11 地盤モデル

までその効果が与えられたことから、負圧除荷時において0.85～0.95mと非常に大きい沈下量となっている。

4.2 実測データを用いた解析

実測データを基に、負圧、施工工程および盛土高さを忠実に再現して解析を実施した。

4.2.1 解析条件

解析断面の地盤モデルを図11に示す。地盤モデルは、車両基地で実施したボーリングデータをデータベース化し、コンター処理、ボクセル計算を行い車両基地全体を網羅する3次元地盤モデルを作成した。解析は2次元で行うことから、3次元で作成したモデルから解析断面を2次元の断面で切り出したものである。解析に用いた有限要素モデルを図12に示す。有限要素モデルは、変位境界条件として下端は全節点固定、側方は水平方向固定で

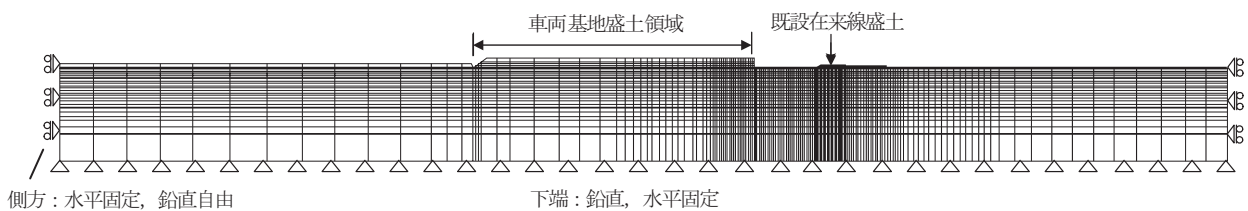


図12 有限要素モデル

特集：構造物技術

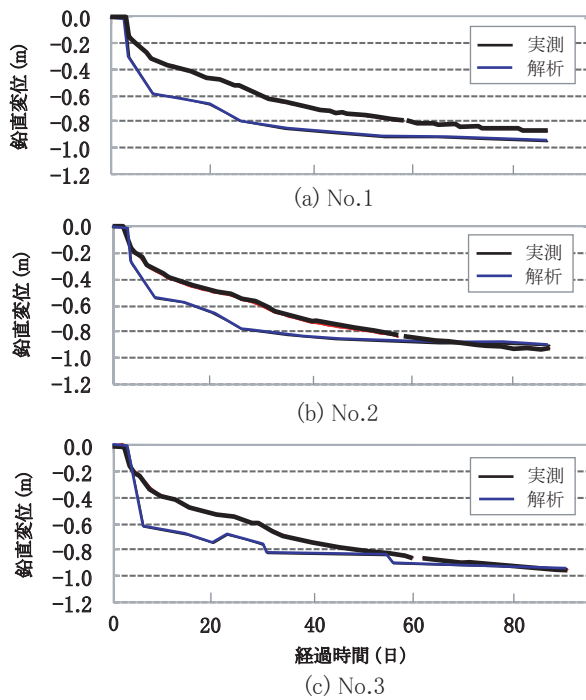


図 13 解析結果

鉛直方向はローラーとしている。また、GL-0.8mが地下水位面であり、この面を排水境界とした。地盤パラメータ、構成モデルは試験盛土の解析と同様とした。盛土の単位重量は、実盛土材の室内試験結果から 20kN/m^3 とし、盛土層厚から換算される等価節点荷重で考慮した。

4.2.2 解析結果

解析結果を図13に示す。No.1では、負圧を除荷した時の実際の沈下量が 0.85m であったのに対し解析結果は 0.95m であった。No.2, No.3では実測値が 0.9m であり、解析結果もほぼ同等の結果が得られた。本結果から、各ケースにおいて解析の結果と実測データの負圧除荷時における沈下量は概ね一致しており、試験盛土の解析において設定した地盤モデル、地盤パラメータの妥当性について確認することができた。しかし、実測データをもとに間隙水圧分布を与えたにも関わらず、試験盛土(B)の解析と同様に負圧を載荷した際の即時的な沈下量が実測データよりも大きくなっているため、ドレーン材を組み込んだ地盤の透水係数等の評価が一因ではないかと考えられる。透水係数はバラツキも大きく、10倍程度異なることも考えられる。また、ドレーンの打設に伴う変化も考えられることから、今後評価を行ううえで十分に留意する必要がある。

5. まとめ

2次元の土/水連成粘弾塑性変形解析を用いて、三軸圧縮試験のシミュレーション解析、試験盛土の解析を実

施し、地盤定数や解析モデルを設定した。その後、本施工の実測データを用いて解析を実施し、土質定数や解析モデルの妥当性を検証した。以下にその結果をまとめる。

- ① 三軸圧縮試験のシミュレーション解析の結果から、個々の粘土層ごとに適切な地盤構成モデルの適用が必要であることがわかった。
- ② 試験盛土で実施した変形の解析を行ったところ、載荷領域中心における変形量については概ね再現することができ、地盤のパラメータ、構成モデルが妥当であることを確認した。しかし、解析において負圧を載荷したステップでの即時沈下が実際の沈下量と比較して大きくなる傾向にあるため、深さ方向の境界条件の設定を実際の間隙水圧データをもとに設定する必要がある。
- ③ 実測データを用いて、実際の負圧、盛土高さ、施工工程を忠実に再現し、解析を実施した。その結果、実際の沈下量と概ね同等の結果が得られ、試験盛土により設定した地盤や負圧のモデル、地盤パラメータなどの妥当性を確認することができた。

真空圧密工法については施工の良し悪しによる効果の違いが大きい。真空圧密工法における地盤の挙動を評価するには、地盤の定数はもちろんのこと負圧のモデル化が非常に重要となってくる。本検討においては、実測データをもとに極力正確にモデル化を行ったが、事前の評価を行うには情報化施工を行いながらの実施が重要であると考えられる。今後は新たに得られる実測データを基に、より精度の高いモデル化の手法を検討していく予定である。

〈参考文献〉

- 1) 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.
- 2) Sekiguchi, H. and Ohta, H.: Induced anisotropy and time dependency in clays, Proc. Specialty 9, 9th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, pp.229-239, 1977.
- 3) Mesri, G. and Godlewski, P.M.: Time and stress-compressibility interrelationship, Proc. ASCE, Vol.103, GT5, pp.417-430.
- 4) 仮屋崎圭司, 米澤豊司, 丸山修, 小島謙一, 松丸貴樹: 軟弱地盤上に施工する大規模盛土施工における圧密促進工法の検討 その1 ~試験盛土における効果検証~, ジオンセンセティックス論文集, 第21巻, 2006
- 5) 小島謙一, 松丸貴樹, 米澤豊司, 青木一二三, 仮屋崎圭司: 試験盛土を用いた軟弱地盤の変形解析における地盤物性の評価, 第42回地盤工学研究発表会, 2007