

7. プラスチックボードドレーンで改良された軟弱地盤における

盛土築造に伴う地盤の変形解析

Deformation Analysis of Soft Ground Improved by Plastic Board Drain method

高稲 敏浩*¹ 山下 勝司*¹

要 旨

軟弱地盤上で計画された高さ約 1.2m の盛土造成にともなう周辺地盤への影響を 2 次元水～土連成弾塑性有限要素解析（ソースコード：GEOASIA）によって検討した。解析は、圧密試験、一軸圧縮試験の挙動を構成式レベルで再現することで地盤の初期値および材料定数を決定し、盛土の施工過程を再現するように実施した。

当初の設計（弾性 1 次元計算）では約 100cm の沈下が予測されていたが、本解析の結果 56cm の沈下となり、計測値とも良い一致を示した。また、プラスチックボードドレーン工法を採用することで、圧密沈下の促進はもちろん周辺地盤への影響も少なくなることが分かった。

キーワード：軟弱地盤／水～土連成／有限要素法／プラスチックボードドレーン

1. はじめに

低層の建築構造物の建設に伴い高さ約 1.2m の造成盛土が計画された（図-1、2 参照）。高さ 1.2m の盛土であるが、建設予定場所は図-3 の柱状図に示すように深さ 8m 付近まで N 値 0 が続く軟弱地盤である。当初設計（弾性 1 次元計算）では約 60cm～100cm の沈下が予測されており、周辺地盤（水田、畑）の隆起などの影響が懸念され

た。また、弾性計算では沈下量を過大算定する場合¹⁾もあり、より効率的な施工を行うために 2 次元水～土連成弾塑性有限要素解析を用いて、盛土地盤ならびに周辺地盤の変形挙動を検討した。また、圧密沈下促進のためプラスチックボードドレーン工法（以下 PBD とよぶ）が採用されていて、その効果についても検証を行った。

計算には、地盤の変形～破壊までの一連の挙動を解析できる GEOASIA^{2) 3)}を用いた。GEOASIA は、土骨格の弾塑性構成式に土の骨格構造（構造、過圧密、異方性）の記述できる SYS カムクレイモデル⁴⁾を用い、刻々の幾何形状変化が考慮できる有限変形解析が可能である。

2. 計算条件および計算方法

2.1 地層構成

図-1 に示す Bor.No.7 での設計沈下量が最も大きく 98cm であった。そこで、検討断面を A-A'断面とした。

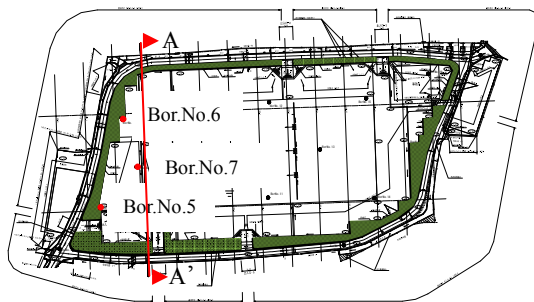


図-1 平面図

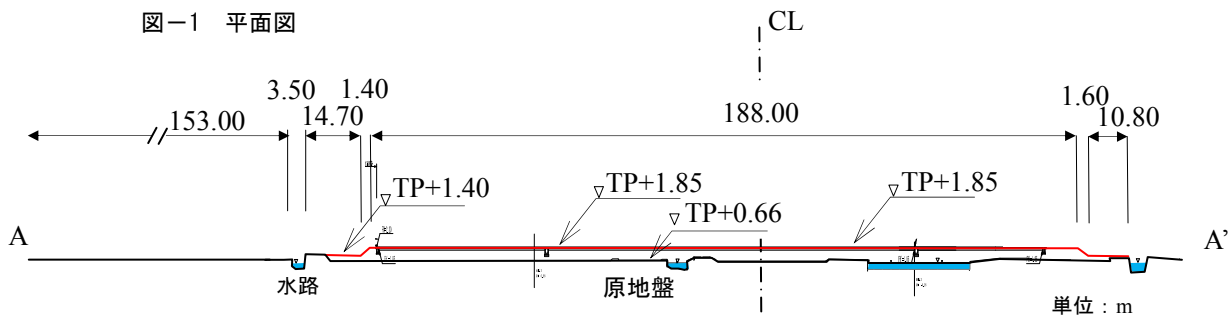


図-2 横断面図 (A-A' 断面)

*¹ 技術研究所構造研究グループ

A-A'断面付近の柱状図を図-3に示す。地層構成は、地表面から沖積上部粘土層（Ac1層）、沖積中部粘土層（Ac2層）、沖積上部砂層（As1層）、沖積下部粘土層（Ac3層）、沖積下部砂層（As2層）の順に堆積している。各層での物理試験の結果を図-3に併せて示すが、砂層（As1層）については、物理試験および力学試験は実施されていない。

2.2 計算条件

計算に用いた有限要素メッシュを図-4に示す。図-3を参考に地層構成はほぼ水平であるとして、下層から順にAc3層3.9m、As1層3.0m、Ac2層1.7m、Ac1層7.7mの層厚とした。また、解析対象断面はほぼ対称であることから、A-A'断面の左半分をモデル化し、水路から153mを解析領域とした。構造の程度、比体積は各層で均一と

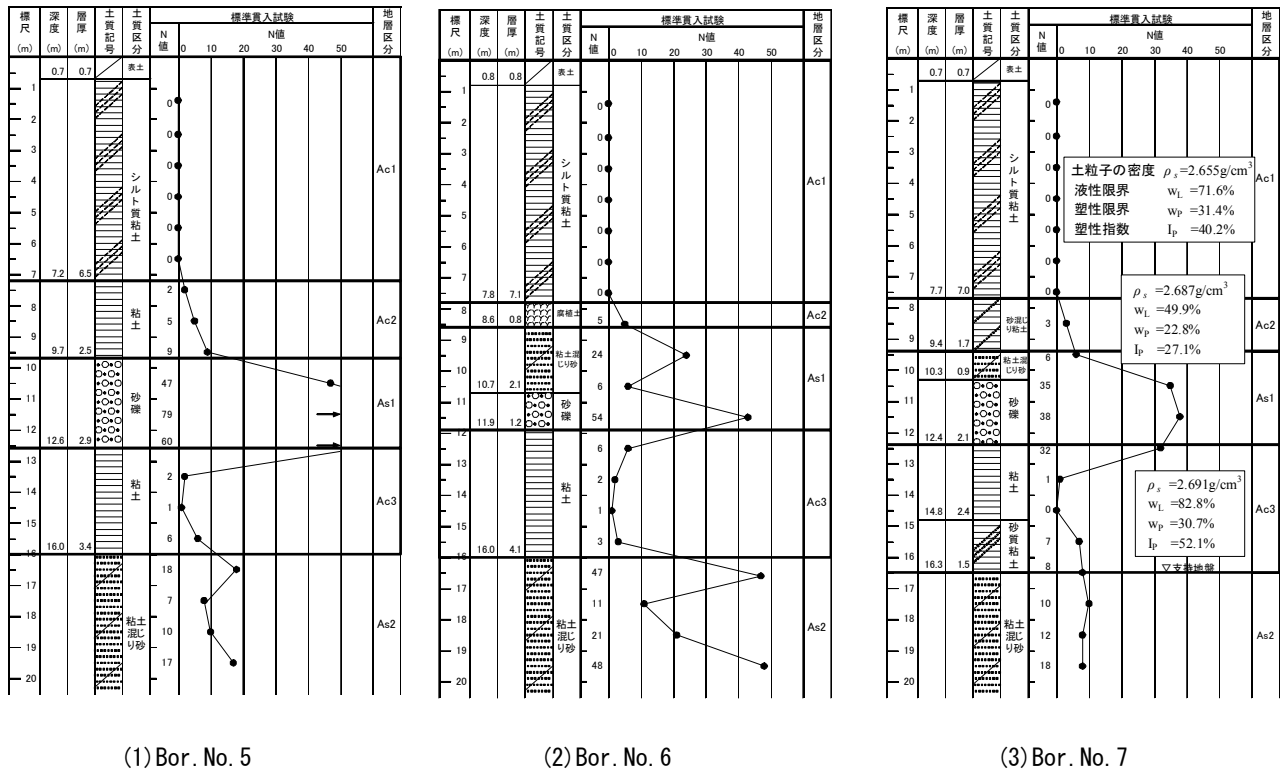


図-3 柱状図

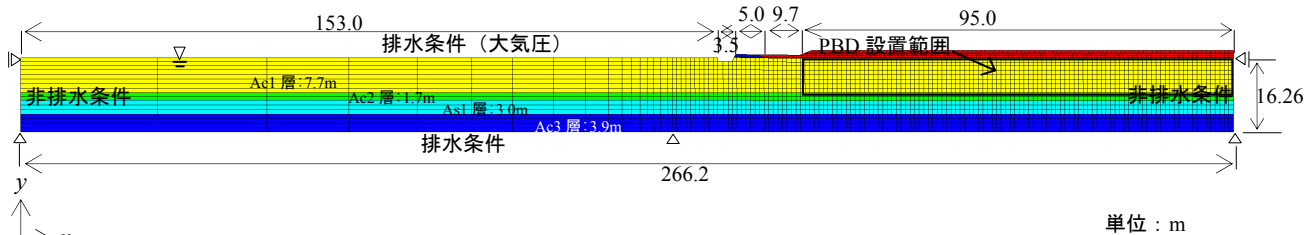


図-4 計算に用いた有限要素メッシュ（盛土終了時）および境界条件

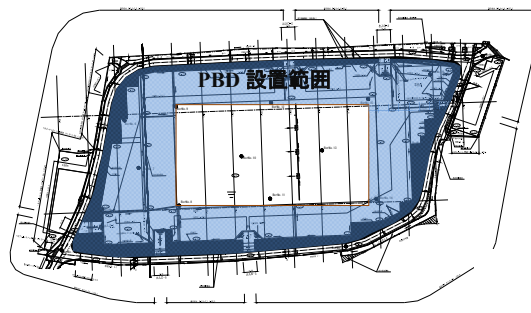


図-5 PBD 設置範囲

して、土かぶり圧に応じて過圧密比を鉛直方向に分布させた。

また、PBD は、図-5 に示す青色で示した範囲（盛土部直下）に、深さ 7.7m まで(Ac1 層)打設されている。

2.3 計算に用いた材料定数の決定

(1) Ac1～Ac3 層の材料定数と初期値

計算で用いた材料定数および初期値は、SYS カムクレイモデルを用いて、土試料の力学挙動を再現することで決定した。

地盤内初期応力状態は、 K_0 状態 ($K_0=0.6$) にあるとし初期異方性はないと仮定した。初期応力状態は土かぶり圧を考慮して決定した。計算は上記を初期条件として、標準圧密試験、一軸圧縮試験を同じ材料定数と初期値を用いてサンプリング、供試体作製過程、力学試験までを一貫して再現した。力学試験を再現すると同時に、不攪乱試料に対しては地盤内の初期状態を推定することが可能である。以下に具体的な計算手順を述べる。

1) 圧密試験 (図-6(1)参照)

i) 地盤は完全飽和状態にあると仮定し、初期応力状態は土かぶりを考慮して決定する。地盤内 K_0 状態から、サンプリングによる乱れはないとして、軸差応力 $q=0$ まで非排水除荷を行う。

ii) 土試料をサンプラーからの試料抜き出し後、すぐに圧密リングにセットするとして、 $\sigma_v=4.9$ kPa もしくは 19.6kPa (1 段階目の荷重) まで一次元除荷を行う。

iii) 引き続き一次元圧縮を行う。

2) 一軸圧縮試験 (図-6(2)参照)

i) 地盤内 K_0 状態から、サンプリングによる乱れはないとして、軸差応力 $q=0$ kPa まで非排水除荷を行う。

ii) 引き続き非排水せん断を行う。

なお、圧縮指数 λ は Skempton の式 (式-(1)、(2)) から決定した。また、膨潤指数 κ は標準圧密試験の低応力下

での圧縮線の勾配とし、N.C.L.の切片 N は標準圧密試験の最終プロットを通るように決定した。また、各層とも細粒分の多い粘土のため、異方性の発展は限りなくゼロと仮定し、回転硬化指数 $br=0.001$ 、回転硬化限界面 $m_b=1.0$ とした。Ac 各層の再現結果を図-7～9 に示す。その再現結果から得られた Ac 各層の材料定数と初期値を表-1 に示す。透水係数については標準圧密試験結果から算出した。

$$C_c' = 0.007(w_L - 10\%) \quad (1)$$

$$C_c' = 2.303\lambda \quad (2)$$

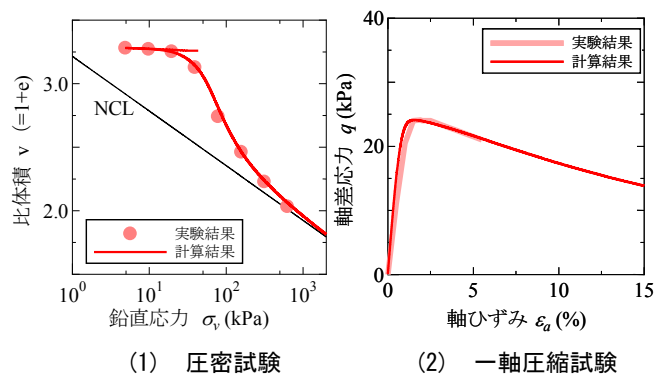


図-7 Ac1 層の再現結果

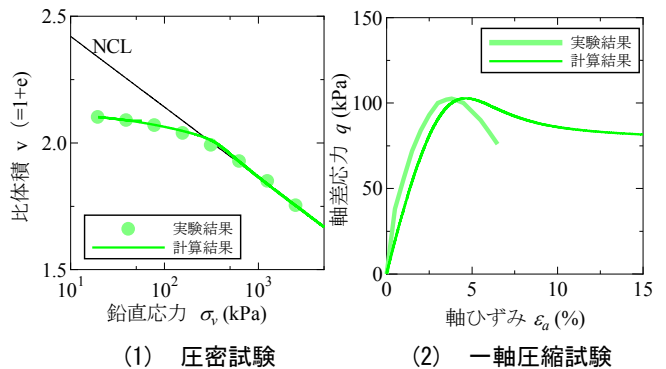


図-8 Ac2 層の再現結果

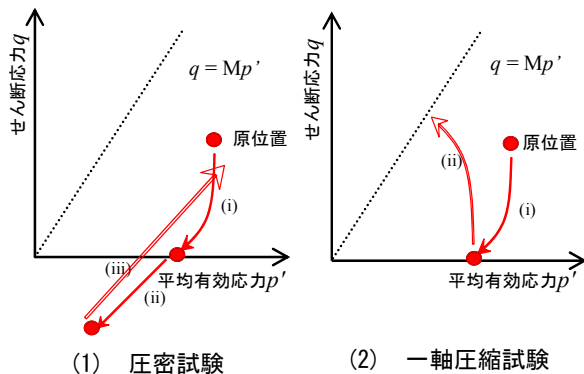


図-6 室内力学試験の再現

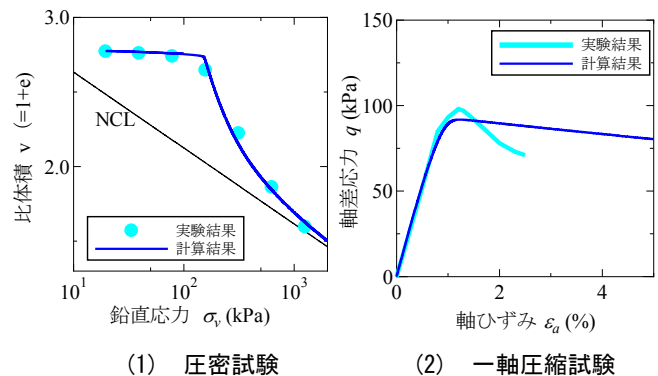


図-9 Ac3 層の再現結果

(2) 他の材料定数と初期値

As1 層（砂層）、サンドマット、RC および盛土の材料定数と初期値については、力学試験の結果がないため、密な砂を想定し、表-2 に示す材料定数と初期値を使用した。初期比体積については、単位体積重量から設定した。

2.4 計算方法

解析は、現地盤の状態を再現するために水平地盤を原地盤として、図-10 に示すように、用水路掘削、既設道路の盛土を実施し完全に圧密が終了した時点を経済的地盤とした。その後厚さ 0.2m のサンドマット敷設、厚さ 0.5m の排水層（RC 材）設置、PBD 設置、盛土の載荷、圧密終了まで放置の手順で実施した。盛土高さと時間の関係を図-11 に示す。盛土は、有限要素メッシュを追加することで再現した⁵⁾。また、PBD 設置地盤の設定、沈下による盛土高の不足分を調整する盛土（以下調整盛土とよぶ）の厚さは、一次元条件の解析を実施し決定した。

2.5 PBD 設置地盤と調整盛土厚の設定

PBD 工法は、地盤全体の透水性（マスパーミアビリティ）のみが改善されるものとした。そこで、図-12 に示す有限要素メッシュを用いた解析を実施して、PBD 設計で設定されている盛土完了から 255 日後の圧密度 92.6% が再現できる透水係数を試行錯誤により決定した。その結果、PBD 設置地盤は、原地盤の透水係数の 6.5 倍に相当することを得た。また、調整盛土厚についても試行錯誤により 0.56m と決定した。時間～沈下量関係を図-13 に示す。

3. 計算結果

図-15 に盛土部の原地盤面（H1 面、図-14 参照）での沈下の様子を示す。最終沈下量は盛土肩部を除けば概ね 0.568m 沈下して調整盛土厚 0.56m 分が沈下してほぼ所定の高さの盛土が造成されたことが確認できる。また、点 a（図-14 参照）の沈下～時間関係を図-16 に示

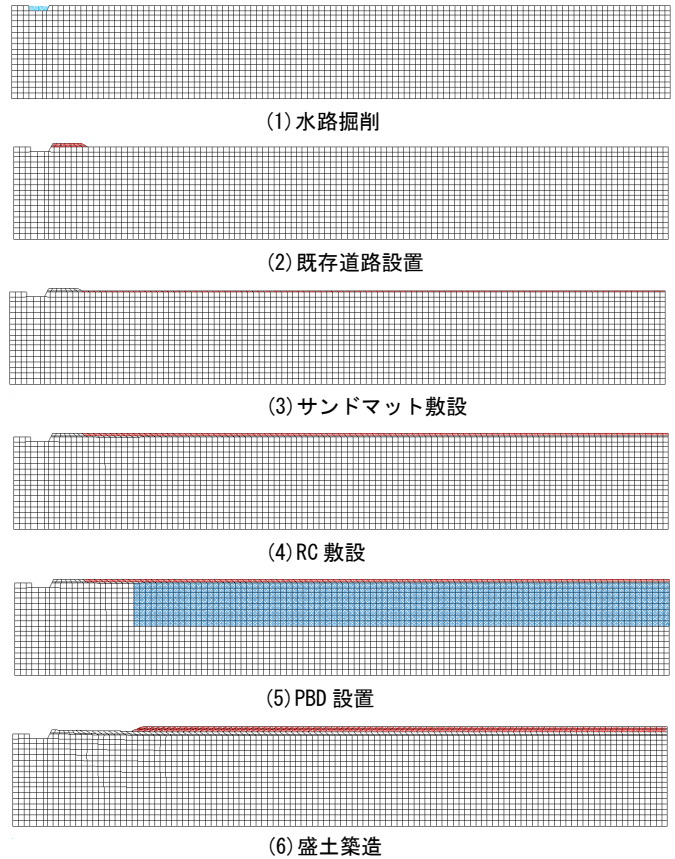


図-10 解析手順

表-1 材料定数および初期値 (Ac1～Ac3)

層	弾塑性パラメーター					発展則パラメーター							初期値				土の密度 ρ_s	透水係数 k
	圧縮指数	膨潤指数	限界状態定数	NCLの切片	ポアソン比	構造低位化指数				正規圧密土化指数	回転硬化指数	回転硬化限界定数	応力比	構造の程度	異方性の程度	比体積		
	λ	κ	M	N	ν	a	b	c	C_s	m	b_r	m_b	K_0	$1/R^*_{\theta}$	K_{β}	v_0	(t/m^3)	(cm/sec)
Ac1	0.187	0.020	1.50	2.32	0.40	0.6	1.0	1.0	0.3	0.8	0.001	1.0	0.6	88.9	1.0	3.26	2.655	8.65×10^{-7}
Ac2	0.121	0.040	0.90	2.13	0.25	2.0	1.0	1.0	0.4	5.0	0.001	1.0	0.6	1.39	1.0	2.09	2.687	1.68×10^{-7}
Ac3	0.221	0.025	1.50	2.08	0.30	0.6	1.0	1.0	0.3	50	0.001	1.0	0.6	39.1	1.0	2.76	2.691	2.70×10^{-7}

($N_p=98kN/m^2$ における繰返し土の等方正規圧密線上の比体積)

表-2 材料定数および初期値

層	弾塑性パラメーター					発展則パラメーター							初期値				土の密度 ρ_s	透水係数 k
	圧縮指数	膨潤指数	限界状態定数	NCLの切片	ポアソン比	構造低位化指数				正規圧密土化指数	回転硬化指数	回転硬化限界定数	応力比	構造の程度	異方性の程度	比体積		
	λ	κ	M	N	ν	a	b	c	C_s	m	b_r	m_b	K_0	$1/R^*_{\theta}$	K_{β}	v_0	(t/m^3)	(cm/sec)
As1	0.050	0.012	1.00	1.98	0.30	2.2	1.0	1.0	0.3	0.1	3.5	0.7	0.6	1.3	1.0	1.780	2.650	1.0×10^{-3}
サンドマット																1.614	2.662	2.0×10^{-3}
RC																1.982	2.685	1.0×10^{-3}
盛土																1.636	2.685	1.0×10^{-3}

($N_p=98kN/m^2$ における繰返し土の等方正規圧密線上の比体積)

す。最終沈下量は0.568mとなり、盛土終了後255日における沈下量は0.530mとなっていて圧密度は93.3%で、解析におけるPBDが所定の性能が設定されていることが分かる。なお、図-16には現場における計測結果も示しているが、解析結果は実測を良く再現していることが分かる。当初設計計算に比べ約1/2の沈下量となっている。

図-17には、水路左側の地表面（H2面、図-14参照）

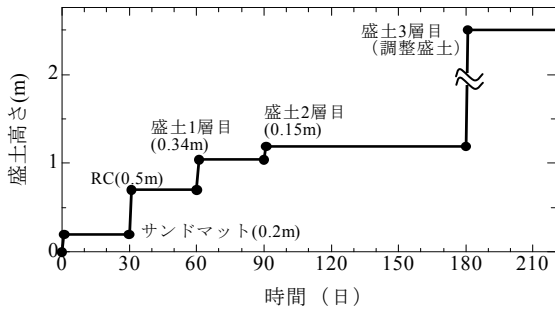


図-11 盛土高さ～時間関係

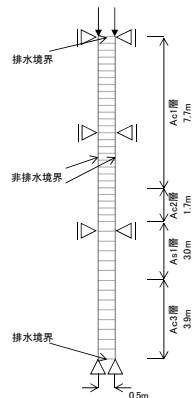


図-12 PBD 設置地盤の設定に用いた有限要素メッシュ

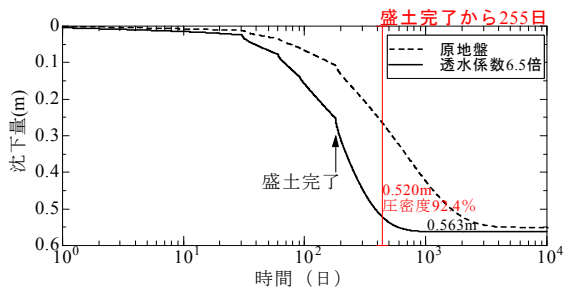


図-13 沈下～時間関係
(PBD 設置地盤設定のための事前解析)

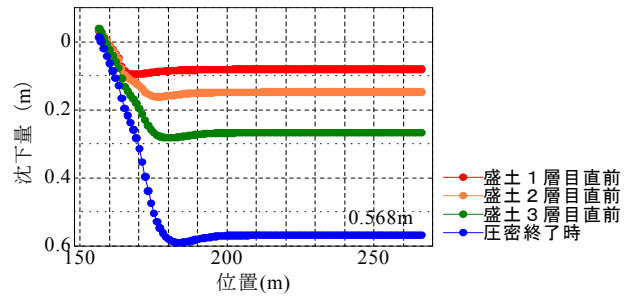
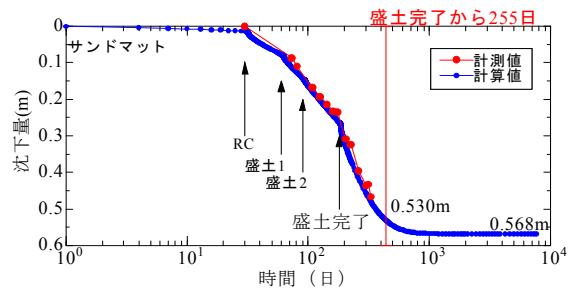
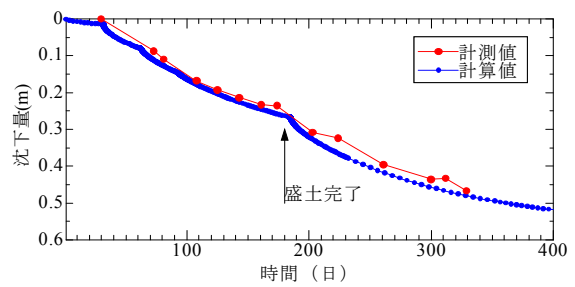


図-15 盛土部地表面沈下量
H1 地表面



点 a における沈下～時間関係



拡大図(0～400日)

図-16 沈下～時間関係

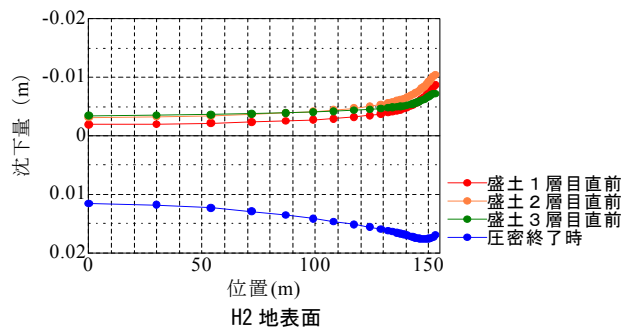


図-17 周辺地盤部地表面沈下量
H2 地表面

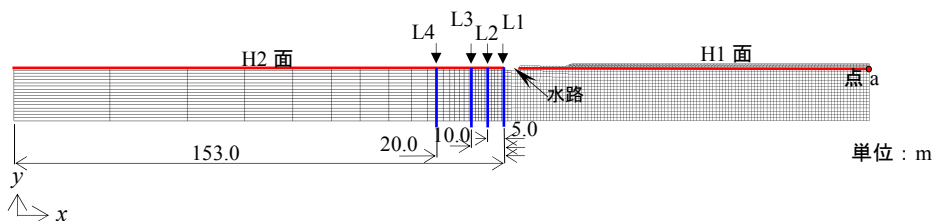


図-14 計測（計算）位置図

の沈下の様子を示している。地表面は、盛土中に最大 1cm 程度隆起し、盛土の圧密終了時には 1.0cm～1.8cm 沈下となる。また、 x 方向の変位の様子を図-18 に示す。RC 層を載荷時に最大 2.1cm- x 方向へ変位している。盛土部では、50cm 程度の沈下をするが周辺地盤では大きな変位は観

測されない。図-19, 20 にせん断ひずみ分布および過剰間隙水圧分布の様子を示す。これらの図からも盛土は、1 次元的に沈下しており、周辺地盤への影響は大きくないことが分かる。

PBD 設置の効果を検証するため、PBD を設置しない場

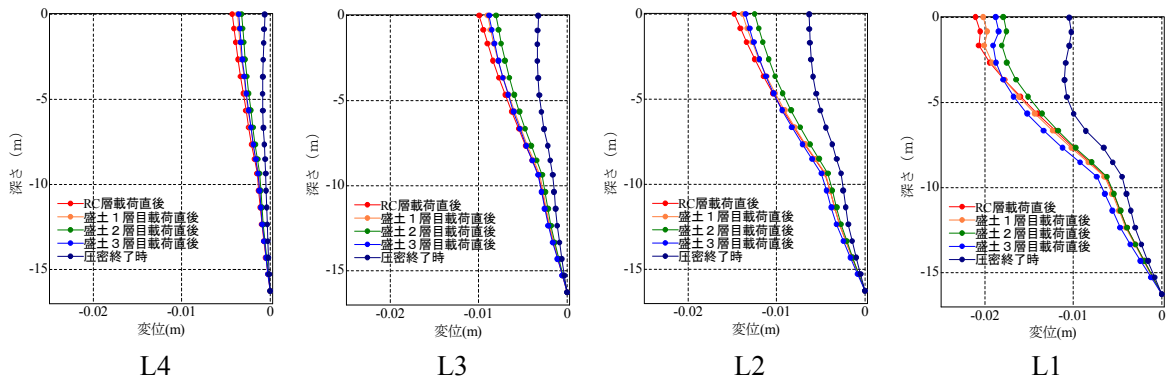


図-18 周辺地盤部側方変位

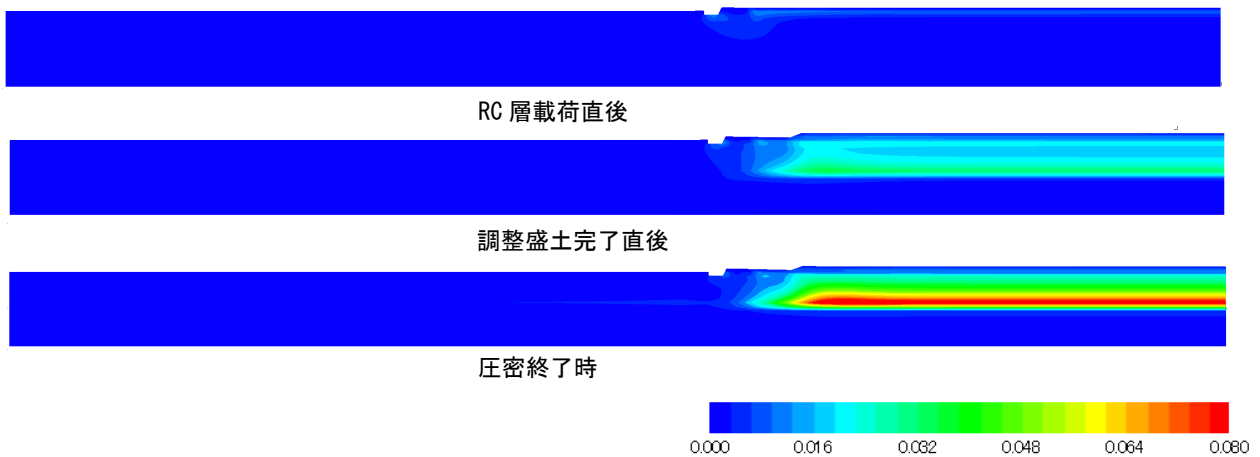


図-19 せん断ひずみ分布

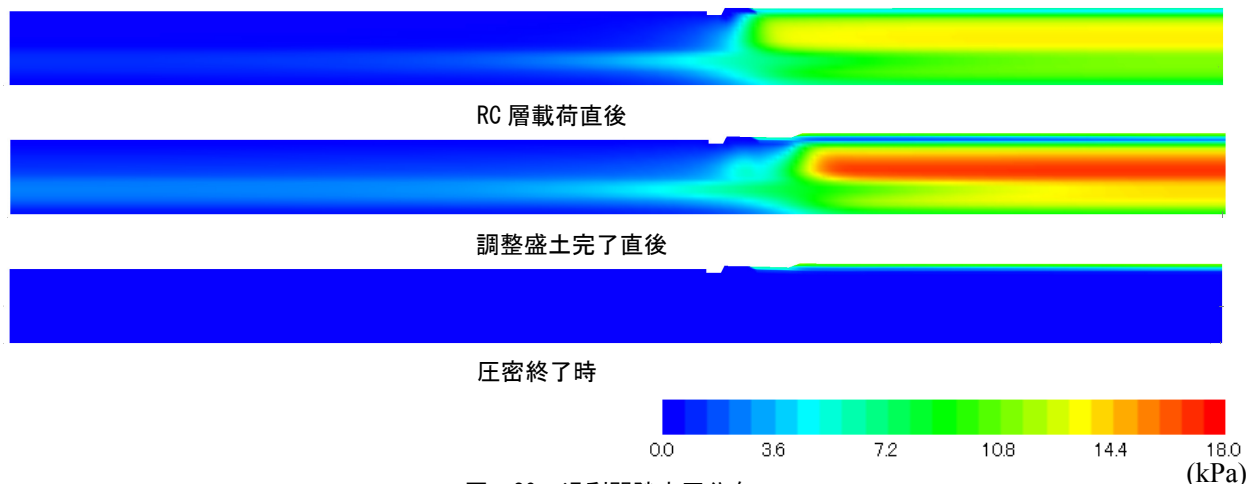


図-20 過剰間隙水圧分布

合について前節と同様の計算を実施した。図-21 に点 a (図-14 参照) における沈下～時間関係を示す。PBD 設置の場合に盛土完了後 255 日で圧密度 93.3%に達したが、PBD がない場合は同様の圧密度に達するのに 1360 日を要する結果となった。図-22 には、水路左側の地表面 (H2 面) の沈下の様子を示している。盛土の圧密終了時には PBD 有りに比べて 1.7mm 程度ではあるが沈下が大きくなっている。また、x 方向の変位の様子を図-23 に示

す。この場合は、3 層目の盛土载荷時に最も大きく変位している。PBD 設置地盤では、PBD 設置前の RC 層盛土時に側方変位が最も大きくなって、PBD 設置の効果を確認することができる。図-24, 25 にせん断ひずみ分布および過剰間隙水圧分布の様子を示す。PBD 設置地盤に比べると盛土直下での過剰間隙水圧が大きくなっているが、Ac3 層でも過剰間隙水圧が多くなっていて周辺地盤への影響が大きくなっていることが分かる。

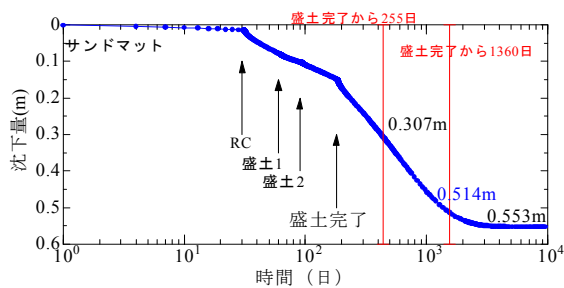


図-21 点 a における沈下～時間関係 (PBD なし)

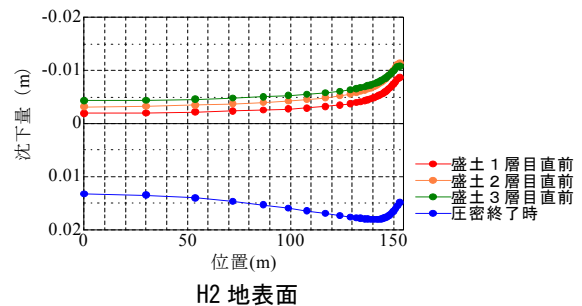


図-22 周辺地盤部地表面沈下量 (PBD なし)

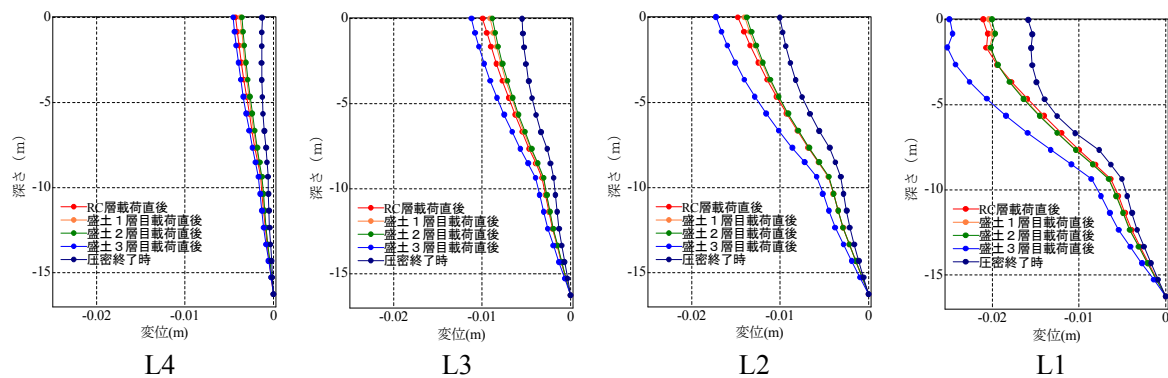


図-23 周辺地盤部側方変位 (PBD なし)

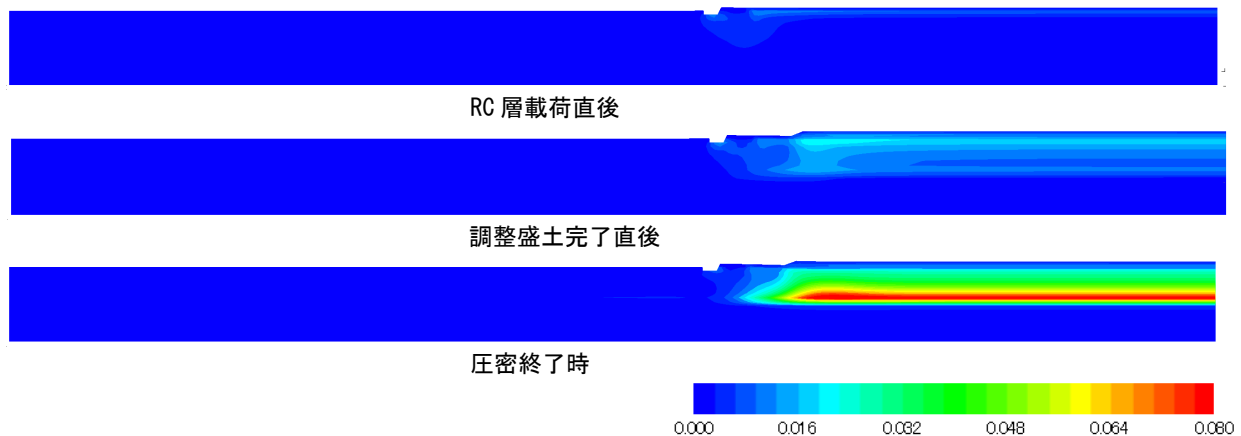


図-24 せん断ひずみ分布 (PBD なし)

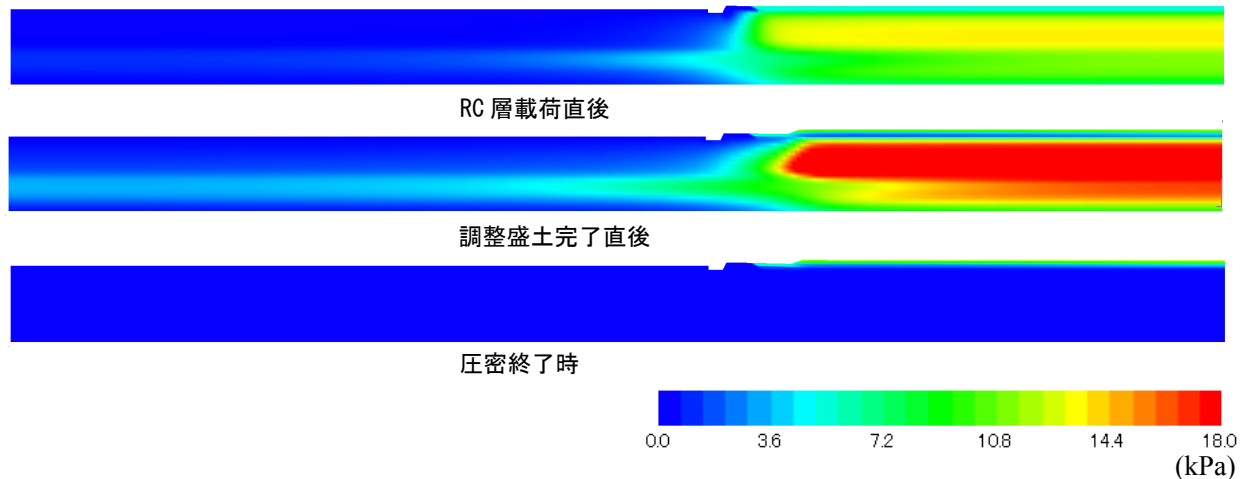


図-25 過剰間隙水圧分布 (PBD なし)

4. まとめ

軟弱地盤における約1.2mの盛土造成にともなう周辺地盤への影響を2次元水～土連成弾塑性有限要素解析（ソースコード：GEOASIA）によって検討した。その結果、本解析の結果最終56cmの沈下となり、弾性1次元計算に比べて約1/2となった。解析結果の沈下量は、計測値と良い一致を示し、軟弱地盤でのGEOASIAの適用性の高さを示している。また、プラスチックボードドレーン工法を採用することで、圧密沈下の促進はもちろん周辺地盤への影響も少なくなることが分かった。

〔謝 辞〕

解析にあたって御指導いただいた名古屋大学野田利弘教授に感謝の意を表します。また、計測データを提供頂いた（株）浅沼組大阪本店土木部太田寛氏ならびに高口治実氏に謝意を表します。

〔参考文献〕

- 1) (社)地盤工学会：入門シリーズ地盤工学入門、pp.103-115、2000.
- 2) Asaoka, A. and Noda, T.: All soils all states all round geo-analysis integration, International Workshop on Constitutive Modeling - Development, Implementation, Evaluation, and Application, Hong Kong, China, pp.11-27, 2007.
- 3) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, Vol.48, No.6, pp.771-790,2008.

- 4) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K., Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, Soils and Foundations, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 5) Takaine, T., Tashiro, M., Shiina, T., Noda, T. and Asaoka, A.: Predictive simulation of deformation and failure of peat-calcareous soil layered ground due to multistage test embankment loading, Soils and Foundations, Vol. 50, No.2, pp.245-260, 2010.