

有限要素法による真空圧密工法の沈下挙動予測とその評価 ～その1：解析編～

清水建設株式会社	正会員	小林 勝
清水建設株式会社	正会員	○河田 雅也
清水建設株式会社	正会員	山田 典弘
株式会社ジオデザイン	正会員	橋爪 秀夫

1. はじめに

真空圧密工法は、ドレーン材と真空ポンプを用いて地盤内を減圧することで、地盤に含まれる水や空気を強制的に排出し、圧密促進・強度増加を図る工法である。真空圧密工法の理論に関しては、現在多くの研究が進められているが、現時点においては十分に解明されていない部分もある。そのため、一次元圧密理論に基づく経験的な手法により設計を行い、動態観測を行いながら品質を確保する手法が一般的に用いられている。

本報告では、真空圧密工法（真空単独方式）の施工に当たり、二次元の土／水連成弾塑性解析を用いて事前解析を実施し、実測データを基にフィードバック解析を行い、事前解析の妥当性の検証を行った事例について紹介する。本稿では、事前解析の方法および結果について解説する。

2. 地盤条件

施工エリアの全体平面を図-1 に、地盤条件を図-2 に示す。当該地盤は、N 値 0 の軟弱な沖積粘性土が 30m 程度の厚さで堆積しており、造成工事後の残留沈下抑制の目的で真空圧密工法が適用されたものである。なお、採用した工法は、跡地利用の観点から、生分解性ドレーンを用いた気密シート式の真空圧密工法（SPD 工法）とした。

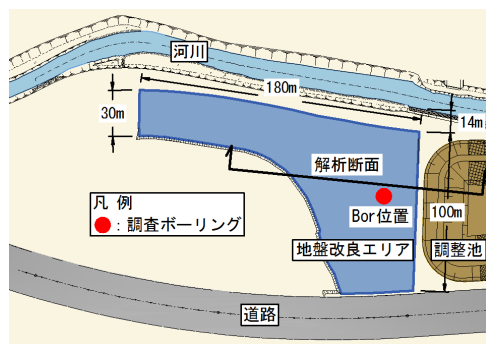


図-1 全体平面

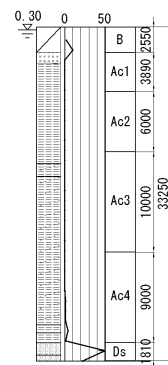


図-2 地盤条件（柱状図）

3. モデル化とパラメータの設定

解析には、旧運輸省港湾技術研究所で開発された地盤解析汎用プログラムGeoFemを用いた。以下に、モデル化の手法およびパラメータの設定方法について詳述する。

(1) 有限要素モデルおよび境界条件

地盤の力学モデルとしては、圧密対象層を弾塑性体（関口・太田モデル）、非圧密層を線形弾性体とした。また、調整池側にセメント改良体および鋼矢板が存在しており、それぞれ線形弾性体、線形梁要素としてモデル化した。解析モデル（メッシュ図）を図-3に示す。

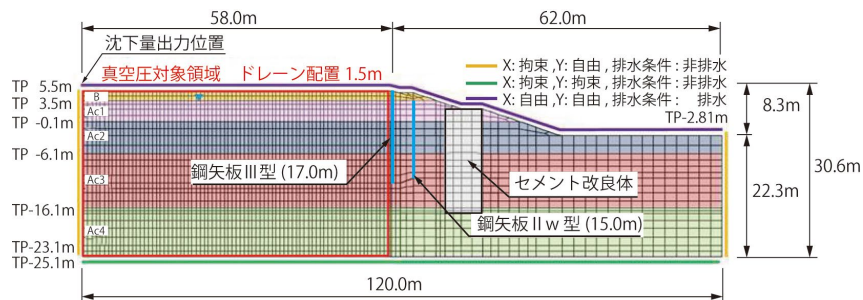


図-3 解析モデル（メッシュ図）

ドレーン打設地盤に作用する真空圧をモデル化する方法は幾つか提案されているが、ここでは、鉛直ドレーンを排水境界として設定し、作用する真空圧に相当する負の水頭を各メッシュ間の境界条件として与えた。ドレーン配置は、一次元圧密計算より、工期内に沈下収束が可能な配置である1.5mピッチの正方形配置とした。また、ドレーンの下端深度は、基盤面から2m上方とした。

キーワード 真空圧密、沈下、有限要素法

連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋2丁目16-1 清水建設(株)土木技術本部基盤技術部 TEL 03-3561-3916

(2) 入力パラメータ

入力パラメータの一覧を表-1および表-2に、沖積粘性土層の圧密特性を図-4に示す。各土層の圧縮指数 C_c は図-4の e - $\log p$ 曲線より算出し、膨張指数 C_s は C_c の1/10とした。圧密係数 C_v は $\log C_v$ - $\log p$ 曲線より、有効土被り圧とそれに真空圧を加えた際の圧力時の各 C_v を求め、その平均値とした。また、透水係数 k は $k=C_v \cdot m_v \cdot \gamma_w$ より算出した。

(3) 透水係数の換算

実地盤では図-3の奥行き方向にドレーンが1.5mピッチで配置されているのに対し、有限要素モデル上ではドレーンが連続的に配置されていることとなるため、改良域における水平方向の透水係数を補正することで、実地盤におけるドレーン配置と等価な透水係数を設定する必要がある(図-5)。

透水係数の補正方法としては、Barron式による各層の圧密度 $U=50\%$ となる時間(式1)が、排水距離をドレーンピッチの1/2としたときのTerzaghi式による圧密度 $U=50\%$ となる時間(式2)と等価となるように水平方向の透水係数を低減させた。なお、軟弱地盤に長尺のドレーン打設する場合や、実断面積が小さい人工材のドレーンは、ウェルレジスタンスの影響を受けやすい。そのため、ウェルレジスタンスを考慮して換算透水係数を算出した(表-3)。

$$\text{Barron 式} : U(50\%) = 1 - \exp(-8 \cdot T_h / (F(n) + 0.8L_w)) \quad t = T_h / C_v \cdot d_e^2 \quad \dots (\text{式 1})$$

$$\text{Terzaghi 式} : t = T_v / C_v \cdot H^2 \quad \dots (\text{式 2})$$

T_h : 水平方向時間係数 $F(n)$: バロン指数 L_w : ウェルレジスタンス係数 t : 圧密時間(day)

C_v : 圧密係数(cm^2/day) d_e : ドレーン有効径(m) T_v : 鉛直方向時間係数 H : 排水距離(m)

表-1 地盤の入力パラメータ

土層名	モデル	変形係数 E kN/m ²	単位体積重量 γ kN/m ³	圧密降伏応力 P_c kN/m ²	圧縮指数 C_c	膨張指数 C_s	圧密係数 C_v cm ² /d	透水係数 k cm/s	初期間隙比 e_0	限界状態 応力比 M	静止土圧係数 K_0	ポアソン比 ν'
B	弾塑性体	5600	15.7					9.939×10^{-7}			0.500	0.333
Ac1	弾塑性体	15.2	65.2	0.99	0.099	249.9	9.939×10^{-7}	2.313	1.54	0.388	0.280	
Ac2	弾塑性体	14.5	94.6	1.28	0.128	351.7	9.336×10^{-7}	2.965	1.33	0.455	0.313	
Ac3	弾塑性体	15.0	133.0	1.23	0.123	552.2	1.066×10^{-6}	2.646	1.33	0.455	0.313	
Ac4	弾塑性体	15.5	182.8	0.83	0.083	366.2	3.918×10^{-7}	2.021	0.97	0.581	0.368	

表-2 セメント改良体・鋼矢板の入力パラメータ

構造物名	モデル	変形係数 E kN/m ²	単位体積重量 γ kN/m ³	ポアソン比 ν'	断面積 A m ² /m	断面二次モーメント I m ⁴ /m
セメント改良体	弾塑性体	2.355×10^4	各土層に同じ	0.333		
鋼矢板Ⅱ型	梁モデル	2.000×10^8			1.312×10^{-2}	1.30×10^{-4}
鋼矢板Ⅲ型	梁モデル	2.000×10^8			1.910×10^{-2}	1.68×10^{-4}

(4) 载荷条件

真空圧の载荷は、引き込みにより周辺地盤に急激な影響が及ぶのを避けるため、 35kN/m^2 ずつを2段階に分けて载荷する計画とした(表-4)。

4. 解析結果

改良域中央部の地表面位置における沈下量の経時変化を図-6に示す。最終沈下量は97.8cmとなり、126日で圧密度90%に達する。

5. まとめ

本稿では、真空圧密工法の沈下挙動について有限要素法を用いて予測を行った。本解析の実測データによる検証は、「有限要素法による真空圧密工法の沈下挙動予測とその評価 ～その2: 検証編～」にて報告する。

参考文献

- 1)SPD 工法研究会: SPD 工法技術資料、平成 23 年 4 月
- 2)小林他: 真空圧密工法における近接構造物の変位抑制対策、土木学会第 70 回年次学術講演会、平成 27 年 9 月

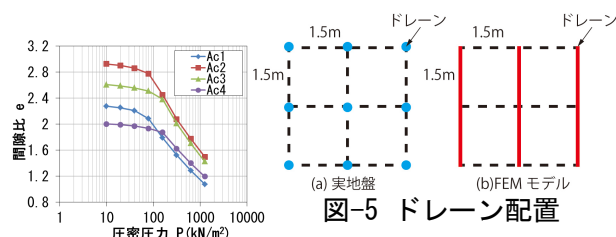


図-5 ドレーン配置

表-3 水平方向透水係数

土層名	透水係数 (cm/sec) (実地盤)	換算透水係数 (cm/sec) (FEM モデル)
B	9.94×10^{-7}	1.65×10^{-7}
Ac1	9.94×10^{-7}	1.29×10^{-7}
Ac2	9.34×10^{-7}	9.08×10^{-8}
Ac3	1.07×10^{-6}	5.23×10^{-8}
Ac4	3.92×10^{-7}	3.91×10^{-8}

表-4 载荷条件

STEP	真空载荷圧	载荷期間
1	35.0	1日～30日
2	70.0	31日～

図-4 圧密特性

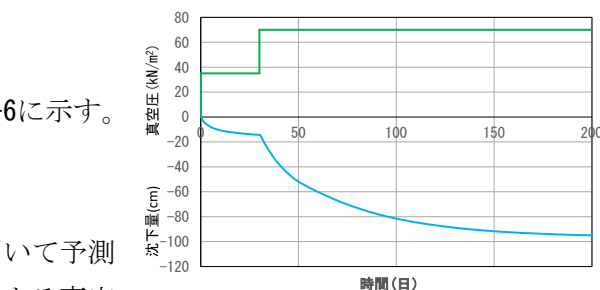


図-6 解析結果(改良域中央部)