

弾塑性 FEM 解析を用いた大規模埋立工事における沖積粘土層の圧密沈下挙動の再現解析事例

基礎地盤コンサルタンツ株式会社 シンガポール支社 正会員 ○臼木 陽平
基礎地盤コンサルタンツ株式会社 シンガポール支社 正会員 小川 能克

1. はじめに

シンガポールなどの東南アジア諸国では、地下鉄工事などの仮設計において、掘削中の変位を精度よく予測するために、弾塑性 FEM 解析プログラムである PLAXIS が広く用いられている。一方で、大規模埋立工事等の地盤改良を含む沈下解析では、1 次元圧密理論に基づく解析が主流である。本稿は、バングラディッシュ沿岸部で実施された载荷盛土とドレーン材 (PVD) を用いた軟弱地盤改良工事を対象に、PLAXIS を用いた圧密挙動の再現解析を試みたので、その結果について報告する。

2. 軟弱地盤改良工の概要

施工場所はバングラディッシュの沿岸部に位置し、地盤は、表層 2~3m の盛土層の下位に軟弱な沖積粘土層が 5~10m で堆積する。沖積粘土層の下位は、沖積砂層・比較的硬質な沖積粘土層が堆積する。地盤改良工は、軟弱な沖積粘土層の圧密促進を目的とした PVD (1.1m 間隔、正方形配置) と高さ約 10m の载荷盛土で構成される。PVD の打設深さは、沖積砂層に 1m 程度根入れされ、その長さは約 11m である。

3. 二次元弾塑性 FEM 解析におけるモデル化

3.1 解析モデル

解析モデルを図 1 に示す。解析プログラムは PLAXIS 2D 2019 を使い、PVD は Drainage Line Element (DLE) でモデル化した。DLE は、無限の透水性をもつ線要素で、圧密解析ステップでは、DLE 上の各節点における過剰間隙水圧が事前に設定した値 (ここでは、0kPa) となる。

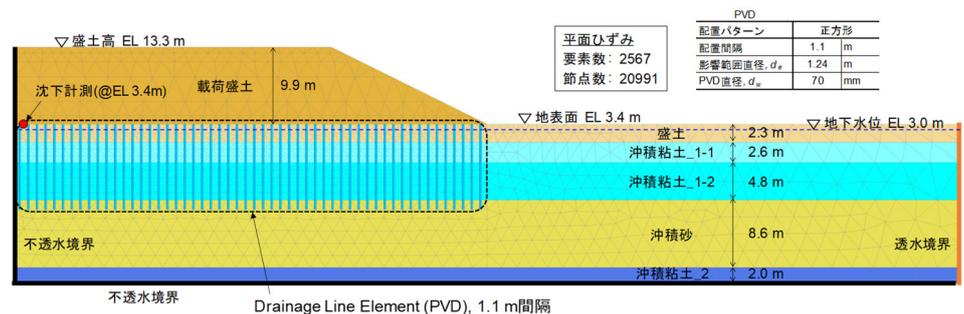


図 1 解析モデルおよび地盤・地下水位等の概要

表 1 地盤定数一覧

	载荷盛土/盛土	沖積砂	沖積粘土_1-1	沖積粘土_1-2	沖積粘土_2	単位
構成則 ⁽¹⁾	MC	MC	SSC	SSC	SSC	-
排水/非排水	排水	排水	非排水	非排水	非排水	-
湿潤単位体積重量, γ_{sat}	18.6	19.0	17.0	18.0	19.0	kN/m ³
飽和単位体積重量, γ_{sat}	20.0	19.0	17.0	18.0	19.0	-
初期間隙比, e_{int}	-	-	1.30	1.05	0.90	-
ヤング係数, E_{50}	10	1.5N	-	-	-	MPa
ポアソン比, ν or ν_{v}	0.3	0.3	0.495	0.495	0.495	-
圧縮指数, C_c	-	-	0.414	0.299	0.190	-
膨張指数, C_e	-	-	0.115	0.066	0.038	-
クリープ指数, C_α	-	-	0.017	0.012	0.008	-
修正圧縮指数, A^*	-	-	0.078	0.063	0.043	-
修正膨張指数, k^*	-	-	0.043	0.028	0.017	-
修正クリープ指数, μ^*	-	-	0.003	0.003	0.002	-
粘着力, c'	0	0	0	0	0	kPa
内部摩擦角, ϕ'	30	33	25	25	28	degree
水平透水係数, k_h	1.0E-07	1.0E-07	5.0E-09	1.0E-09	5.0E-09	m/sec
鉛直透水係数, k_v	1.0E-07	1.0E-07	5.0E-09	1.0E-09	5.0E-09	m/sec
修正水平透水係数, k_{hs} ⁽²⁾	2.8E-08	2.8E-08	1.4E-09	2.8E-10	-	m/sec
透水係数の変化率, c_k	-	-	0.45	0.45	0.15	-
先行土被り圧, POP	-	-	65	85	50	kN/m ²

⁽¹⁾ MC: モール・クーロン、SSC: ソフトソイルクリープ

⁽²⁾ 式(1)より求められる。

3.2 地盤定数

解析に用いた地盤定数の一覧を表 1 に示す。地盤材料の構成則は、砂質土 (载荷盛土、盛土層、沖積砂層) にはモール・クーロン (MC) モデル、沖積粘土層にはソフトソイルクリープ (SSC) モデルを適用した。各土層の各種パラメータは、基本的に室内土質試験で得られた結果に基づき設定されている。ここでは、初期先行圧密応力と PVD をモデル化した際の地盤の透水係数の設定方法について示す。

a) 初期先行圧密応力: PLAXIS では、過圧密比 (OCR) もしくは先行土被り圧 (POP) を使用して初期先行圧密応力

キーワード: 弾塑性 FEM 解析、圧密沈下、再現解析事例、PVD、埋立工事

連絡先: 60, Kallang Pudding Road #02-00 Tan Jin Chwee Ind.Bidg. Singapore 349320, +65-6747-3233

を指定することができる (図 2)。本解析では、図 3 に示すように、室内試験で得た先行圧密応力と初期有効鉛直応力との関係に基づき、POP により初期先行圧密応力を設定した。

b) 平面ひずみ状態における水平透水係数：実際の PVD 周辺の圧密挙動は、PVD を中心に軸対象であるので、2 次元の平面ひずみ状態として PVD をモデル化する場合には、透水係数を低減させる必要がある。本検討では、Indraratna²⁾らにより提案された式 (1) を用いて透水係数を低減した。

$$\frac{k_{h,ps}}{k_{h,ax}} = \frac{0.67 \frac{(n-1)^2}{n^2}}{\left[\ln(n) - \frac{3}{4} \right]}, \text{ where } n = \frac{d_e}{d_w} \quad (1)$$

ここに、 $k_{h,ps}$: 平面ひずみ状態における水平透水係数、 $k_{h,ax}$: 実際 (軸対象) の水平透水係数、 d_e : 影響範囲の直径、 d_w ドレーン材の直径である。

c) 解析時の透水係数変更パラメータ、 c_k : 一般に、粘土は圧密が進むにつれてその透水性は小さくなる。標準圧密試験から得られた透水係数 k を間隙比 e に対してプロットすると、 e - $\log k$ は直線関係を示すことが多い。図 4 は、室内圧密試験で得られた e - $\log k$ 関係を示す。PLAXIS では、間隙比の減少に伴う透水係数の変化率を式 (2) によって設定できる。

$$\log \left(\frac{k}{k_0} \right) = \frac{\Delta e}{c_k}, \text{ where } \Delta e = e - e_0 \quad (2)$$

ここに、 k_0 : 初期透水係数、 e_0 : 初期間隙比である。

4. 解析結果

図 5 は、载荷盛土中央部に設置した沈下板の実測値と解析値を時間-沈下曲線としてまとめた。解析値は、実測値に比べやや大きい沈下量を示すものの 200 日時点までの沈下量と沈下速度は、実測値と解析値でほぼ一致する。さらに、沈下がほぼ収束した 560 日経過後の沈下量は、実測値と解析値で 20 mm 程度の差異であり、解析によって地盤の圧密挙動をよく再現できていると考える。

5. まとめ

本稿では、弾塑性 FEM 解析プログラム PLAXIS を用いて、PVD と载荷盛土による粘土の圧密挙動の再現解析事例を紹介した。適切な地盤定数設定により、FEM 解析で実際の圧密挙動は再現可能である。今後は大規模工事における軟弱地盤解析の 1 つのツールとして、FEM 解析による沈下予測の精度向上に努めたい。

参考文献

- 1) PLAXIS Material Models CONNECT Edition V20.
- 2) Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Sathanathan, I.: Analytical and numerical solutions for single vertical drain including the effects of vacuum preloading. Canadian Geotechnical Journal, No. 42. (2005). pp 994-1014.

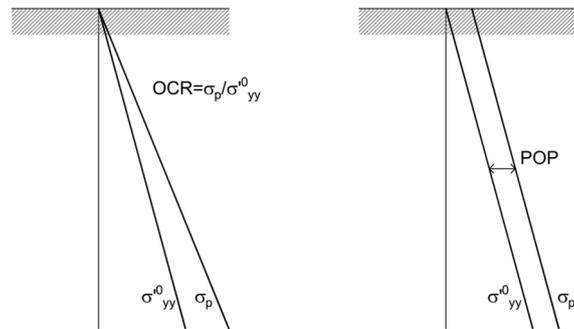


図 2 OCR および POP の概念図

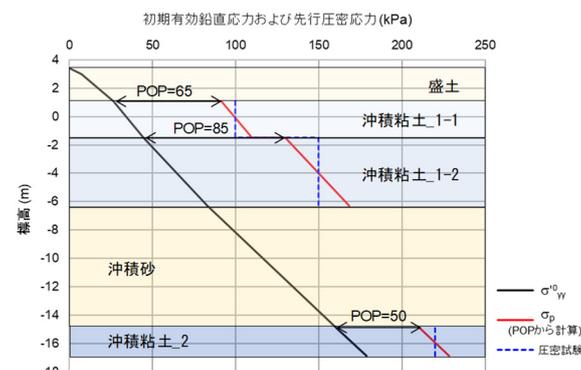


図 3 先行圧密応力

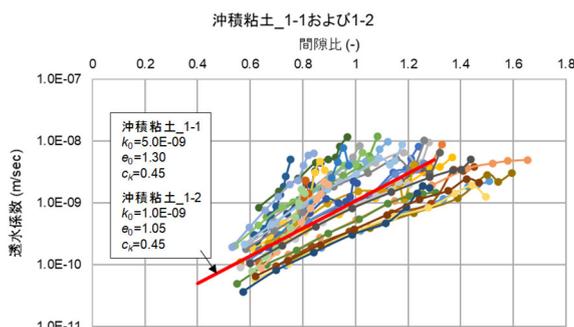


図 4 透水係数の変化

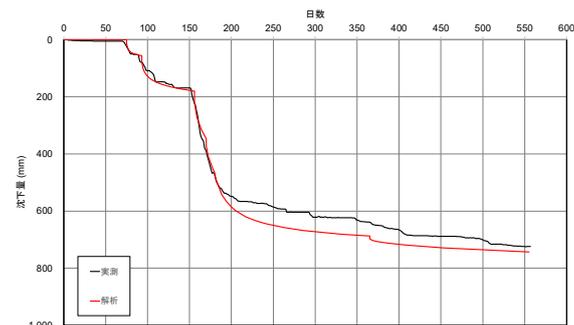


図 5 解析結果