

盛土を併用した真空圧密工法の変状対策工に関する解析的検討

木村 誠*・松本江基*・三反畑勇*

真空圧密工法は近年、盛土施工に併用して適用される事例が増えてきている。盛土を併用した場合、従来の真空圧密工法の単独施工時に確認されたような改良域へ向かう地盤変形挙動とは異なり、盛土厚や盛土速度によっては押し出し変形による地表面の隆起等の周辺地盤変位が卓越する場合がある。また、透水性の高い中間層が広く分布している場合には、広範囲で水頭が低下して広域で地盤沈下を誘発する恐れがある。本研究では代表的な軟弱地盤を想定し、それぞれの周辺地盤変位を抑制する代表的な対策を講じた際の効果について解析的に検討した。その結果、せん断変形抑制や遮水効果を期待した矢板工と縁切り効果を期待した変位吸収溝の有意性を確認した。

キーワード：真空圧密工法、周辺地盤変状、変状対策工、FEM解析

1. はじめに

軟弱地盤改良工法の一つである真空圧密工法は、地盤内の間隙水圧を強制的に低下させ、圧密を促進させることを特徴としており、真空圧密工法の単独施工よりも盛土を併用した適用事例が主流になりつつある。これは、全応力一定下での有効応力増加によって、地盤内の応力状態が（限界応力状態から遠い）より安全側へと移行し、盛土の急速施工（15～20cm/日程度）が可能となるためである。加えて、ドレーン材や気水分離システム等の施工システムの改良により、高い真空圧（70～90kPa程度）を安定的に作用できるようになったことも挙げられる¹⁾²⁾。高真空を維持できるようになったことで、より安定的な急速施工が可能となるばかりでなく、盛土放置期間中の間隙水圧の消散速度も高まり、真空運転期間の短縮が期待できるため、今後より一層、盛土を併用した事例が増えていくものと想定される。

単独施工の場合に比べて、盛土を併用した場合には、盛土厚や盛土速度によっては改良域外側への地盤挙動が卓越するため、周辺地盤への影響範囲拡大が懸念される。また、盛土併用に限らず、軟弱地盤内に砂質土等の透水性の高い中間層が介在する場合には、真空圧により広範囲で透水層内の水頭が低下し、広域的な沈下を誘発する可能性があることが従来から指摘されている。

周辺地盤変状によって、周辺構造物などに機能障害を引き起す危険性がある場合には、変状軽減工などの対策が講じられる。本報告は、代表的な変状対策工を解析的に検討し、それらの効果を定性的に把握した結果と、対

策工の有為性について取りまとめたものである。

2. 周辺地盤への影響の実測例

真空圧密工法を単独施工した場合の、周辺地盤の地表面変位の実測例を整理したものを図-1³⁾に示す。これらの図は、横軸に改良域端部からの距離を最大沈下量で割った値をとり、縦軸に地表面の変位量を最大沈下量で割った値をとったものである。真空圧密単独の場合には、周辺地盤への引き込み沈下の現象が生じ、その影響範囲は鉛直ドレーン長の1～1.5倍程度が一般的である²⁾⁴⁾。

一方、真空圧密工法に盛土を併用した場合の盛土完了後の周辺地盤の地表面変位の実測例としては、図-2のようなデータがある。これらの図では、周辺地盤の地表面変位の影響範囲は鉛直ドレーン長の1～2倍程度である⁵⁾。しかし、盛土厚や盛土速度によっては改良域外側への押し出し変形が卓越し、周辺地盤の影響範囲が拡大することが懸念される。軟弱層の層厚に不陸（傾斜）があるような地盤では影響範囲がドレーン長の2.5倍程度まで及んだという報告もあり⁵⁾、地盤の堆積環境によっては著しく影響範囲が拡大する恐れもあるため、注意が必要である。

以上は地表面の変位の実測例であるが、以下に真空盛土載荷方式による周辺地中変位の測定事例（盛土法尻の外側1m付近の挿入式傾斜計の測定データ）を示す。

図-3は北海道当別地区の泥炭性地盤で施工された高規格道路盛土工事の事例³⁾である。真空開始から40日以降に盛土を開始した図-3(1)および図-3(2)では、盛土

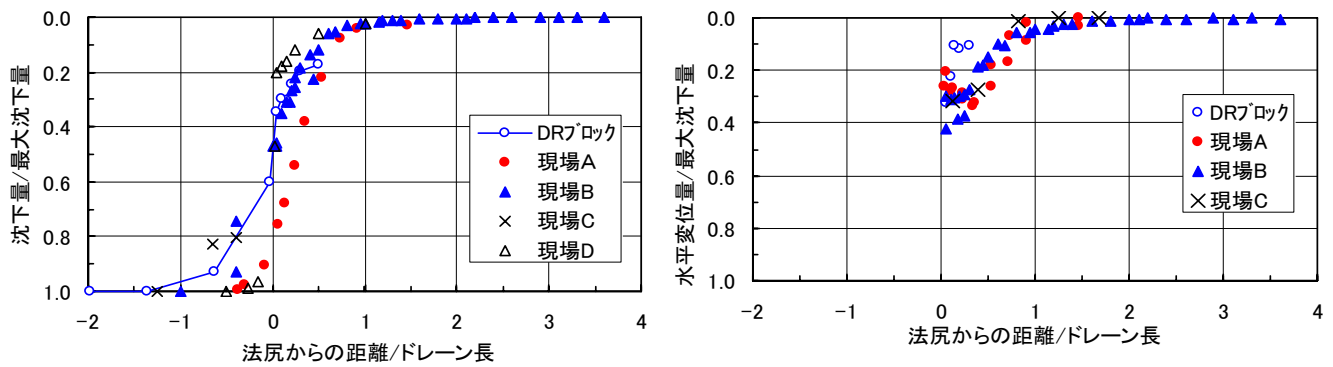


図-1 真空単独載荷方式の周辺地盤への影響³⁾

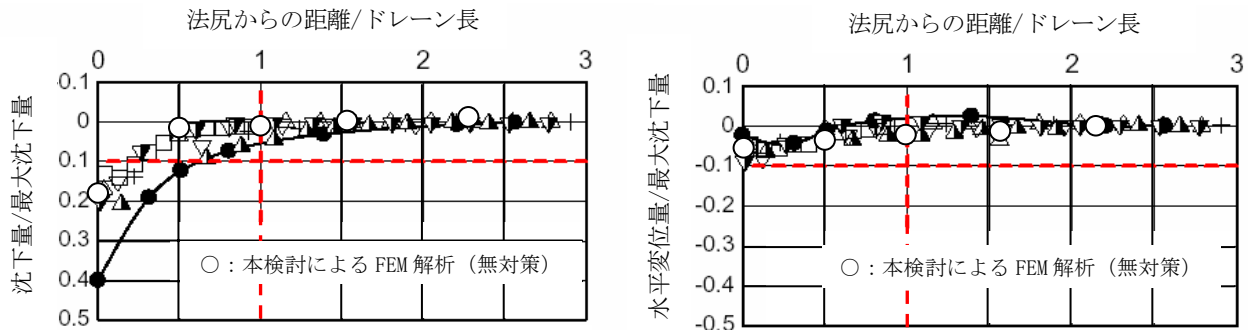
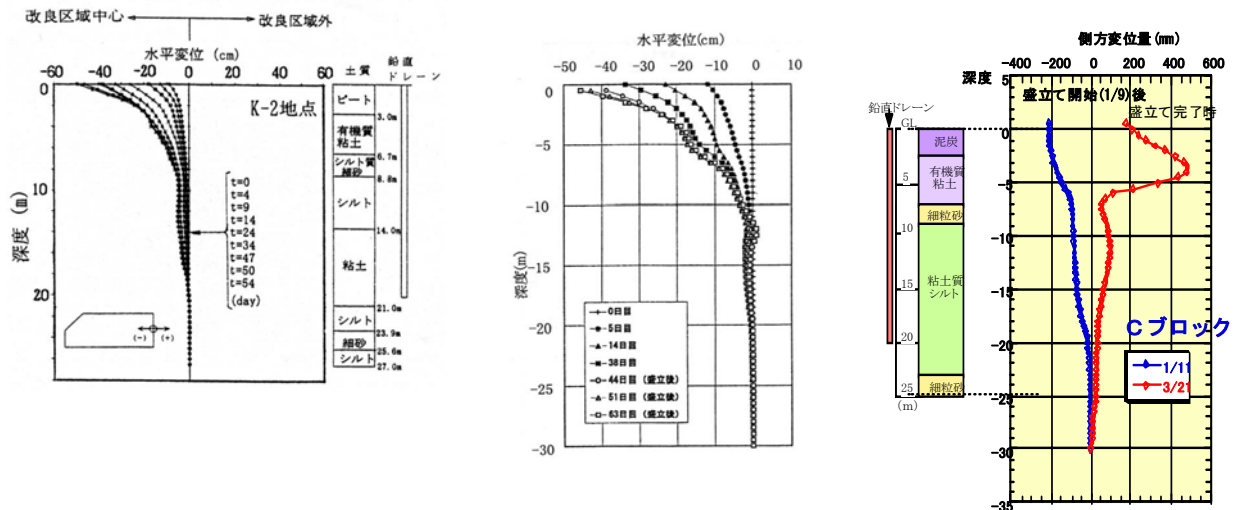


図-2 真空盛土載荷方式の周辺地盤への影響(文献 4, 5)に加筆



(1) 平成 9 年度試験施工 (盛土厚 6m) (2) 平成 10 年度施工 (盛土厚 10.4m) (3) 平成 11 年度施工 (盛土厚 13.1m)

図-3 真空盛土載荷方式の周辺地中変位³⁾

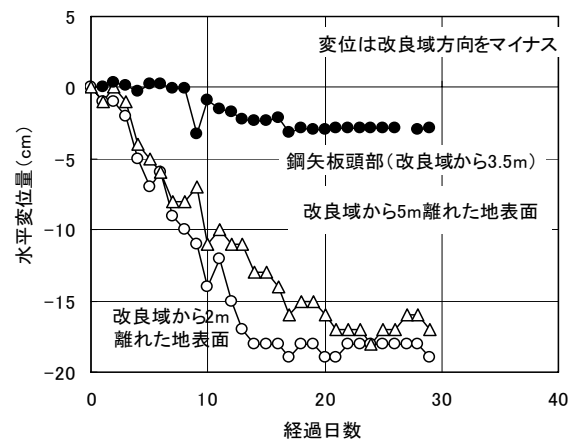
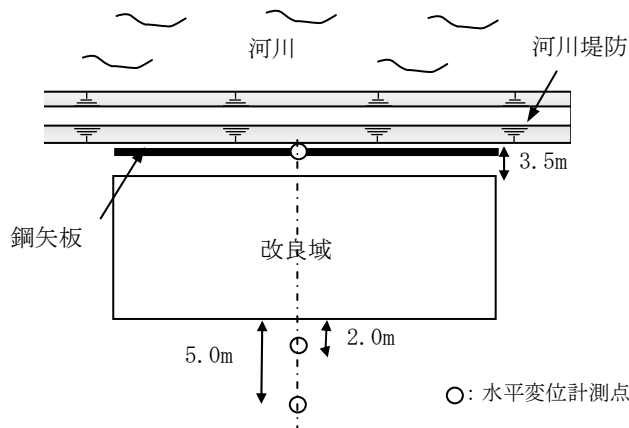


図-4 鋼矢板による周辺地盤の側方変位抑制効果^{2) 6)}

開始後も外向きの変位はほとんど発生していない。それに対し、盛り立て開始までの真空圧密の期間が10日間と短かった図-3(3)の例では急速盛土の施工に伴い地中4m付近(泥炭層)で50cm程度の押し出し変形が生じている。

このように、盛土周辺地盤の変位の発生状況は、地盤条件や盛土の開始時期、盛土速度などによって多様な様相を示しており、事前の変位予測を困難なものにしていることが伺える。

なお、周辺地盤の変位防止対策として、図-4のように改良端部から3.5m離れた地点に鋼矢板を打設した事例では、側方変位量が6分の1に低減され効果的であったことが報告されている⁶⁾。

また、盛土併用に限らず、軟弱地盤内に砂質土等の透水性の高い中間層が存在する場合には、真空圧によって透水層内の水頭が広範囲に低下し、広域的な沈下を誘発する可能性があることも従来から指摘されている。

3. 解析モデル概要

3.1 プログラム概要

解析には、土粒子骨格の変形挙動と間隙水圧挙動を同時に扱う、土/水連成の2次元弾粘塑性圧密解析FEMプログラム(DACSAR)を使用した。

3.2 地盤モデル

本検討では、「中間砂層がない軟弱地盤」と「中間砂層が存在する軟弱地盤」の2種類の地盤を想定した。「中間砂層がない軟弱地盤」は盛土施工に起因する周辺変状への対策工について、「中間砂層が存在する軟弱地盤」は透水層内の水頭低下に起因する周辺変状への対策工について考察した。FEMのメッシュ形状を図-5に示し、2種類の想定モデルの地盤構成を図-6に示す。鉛直ドレーン施工は硬質基盤層や帯水層の1m程度上で打ち止めることが慣例として行なわれていることから、ドレーン長は14mとした。

解析に入力した工程は、図-7に示すように、作用真空圧を70kPaとし、一般的な施工工程に準拠して設定した。

表-1 構成モデルと入力パラメーター一覧

中間砂層がない場合														
地盤構成	構成モデル	層厚 (m)	初期 間隙 e_0	圧縮 指数 C_c	不可 逆比 Λ	限界状態 応力比 M	ダイレイ タンシー D	圧縮 指数 λ	膨張 指数 κ	静止土 圧係数 K_0	ポアソン 比 ν	透水係数 k (cm/sec)		弾性係数 E (kN/m ²)
												改良域内	改良域外	
盛土	弾性	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.33	-	-	17
クラスト	弾性	0.5	-	-	-	-	-	-	-	-	0.33	1.00E-06	7.50E-07	17
ビート	関口・太田	3.5	14.7	6.3	0.8	2.23	0.063	2.734	0.547	0.30	0.231	1.00E-05	7.50E-06	10.5
有機質土	関口・太田	3.0	7.0	3.2	0.9	1.97	0.079	1.389	0.139	0.40	0.286	3.00E-06	2.25E-06	13
粘性土	関口・太田	8.0	2.3	0.9	0.9	1.48	0.072	0.391	0.009	0.50	0.333	5.00E-07	3.75E-07	15

中間砂層がある場合														
地盤構成	構成モデル	層厚 (m)	初期 間隙 e_0	圧縮 指数 C_c	不可 逆比 Λ	限界状態 応力比 M	ダイレイ タンシー D	圧縮 指数 λ	膨張 指数 κ	静止土 圧係数 K_0	ポアソン 比 ν	透水係数 k (cm/sec)		弾性係数 E (kN/m ²)
												改良域内	改良域外	
砂質土	関口・太田	2.0	0.7	1.0	0.97	10.0	0.1	0.026	0.026	0.50	0.30	1.0E-3	7.5E-4	15
粘性土	関口・太田	6.0	2.3	0.9	0.9	1.48	0.072	0.391	0.009	0.50	0.333	5.00E-07	3.75E-07	15

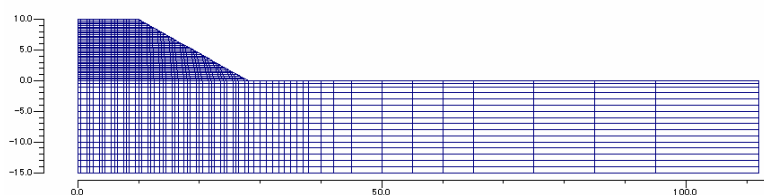


図-5 FEM メッシュ形状

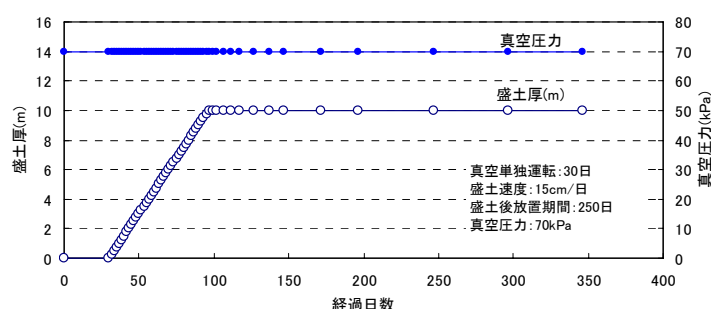


図-7 解析に入力した真空運転期間の工程

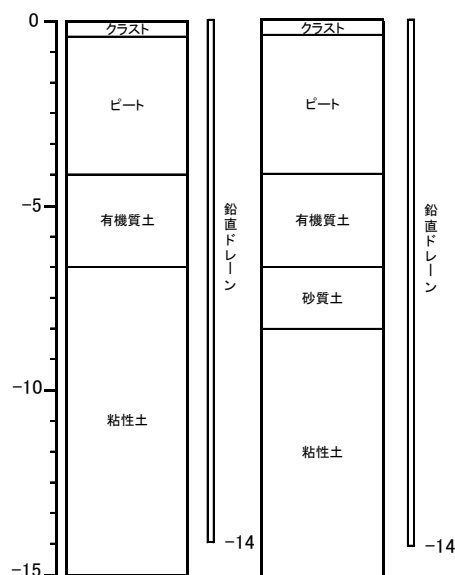


図-6 想定モデルの地盤構成

表－2 主な周辺地盤変状と想定する対策工

中間砂層の有無	周辺変状発生に起因する要素	主な変状	想定対策工	期待する効果	解析検討ケース
なし	盛土速度や盛土高等、盛土の施工条件	法尻部のせん断変形による周辺地盤の隆起	矢板工	高い剛性によるせん断変形抑制	・無対策 ・鋼矢板Ⅲ型 ・鋼矢板Ⅳ型
			変位吸収溝	周辺地盤と改良域の縁切り	・幅5cm 深さ5m ・幅5cm 深さ10m
あり	真空圧の作用による透水層内の水頭低下	地下水引込みによる広域地盤（引込み）沈下	（遮水）矢板工	遮水による地下水の引込み抑制	・無対策 ・透水係数 $k=10^{-3}$ cm/sec ・透水係数 $k=10^{-4}$ cm/sec

使用した構成モデルを表－1 にまとめる。軟弱層であるピート、有機質土、粘性土は関口・太田モデル、地表面の薄いクラスト層と盛土は弾性モデルとした。中間砂層は、関口・太田モデルを使用し、過圧密領域のみで弾性挙動させるものとした。

なお、2 種類の地盤モデルはメッシュ形状、工程はともに同一条件下で解析を行っている。

3.3 想定する対策工

盛土施工に起因する変状対策工について検討する「中間砂層がない軟弱地盤」に対しては、一般的な対策工として、盛土法尻付近への矢板工と縁切り効果を期待する変位吸収溝の2通りについて解析を行なった。また、透水層内の水頭低下に起因する変状対策工について検討する「中間砂層が介在する軟弱地盤」に対しては、遮水効果を期待して鋼矢板を法尻付近に打設した場合について解析を行なった。それぞれの対象地盤に対する想定対策工と期待される効果を表－2にまとめる。

盛土施工に起因する変状への対策工として検討する矢板工には、鋼矢板Ⅲ型、Ⅳ型の2種類を用いることとし、それらの型式の違いによる効果についても考察した。なお、鋼矢板は粘性土下端の GL-15m まで打設することとした。また、変位吸収溝は幅 50cm、奥行き連続として深さ 5m と 10m の2種類のトレンチについて検討した。透水層内の水頭低下に起因する変状対策工として検討する矢板工には、鋼矢板Ⅲ型を使用した。鋼矢板は中間砂層の下方粘性土地盤に 1m 根入れし、完全遮水として検討した。

3.4 入力パラメータ

解析に入力した土質パラメータを表－1 に示す。関口・太田モデルを使用した軟弱層（ピート、有機質土、粘性土）は圧密試験によって得られた結果に基づいて設定した。中間砂層については、B. K. Hough の砂の間隙比-圧力曲線を参考に設定した⁷⁾。さらに、中間砂層については、2 種類の透水係数を設定し、透水性の違いによる影響についても考察する。また、対策工として使用した鋼矢板の材料パラメータを表－3 にまとめる。

表－3 解析に入力した鋼矢板の材料パラメータ

鋼矢板	寸法 (U型)			断面積 A (cm ² /m)	断面二次モーメント I (cm ⁴ /m)	弾性係数 E (kN/m ²)
	有効幅 W (mm)	有効高さ h (mm)	幅 t (mm)			
Ⅲ型(FSP-Ⅲ)	400	125	13.0	191.0	16800	2.10E+08
Ⅳ型(FSP-Ⅳ)	400	170	15.5	242.5	38600	2.10E+08

真空圧密工法の排水挙動は、鉛直ドレーンに向かう水平放射流れであるため、二次元平面ひずみ条件に置き換える際に工夫が必要となる。水平放射流れを Barron 解、水平一次元流れを Terzaghi 解で表現し、鉛直ドレーン周辺放射流れの両者の圧密度が 50%の時点で圧密時間が一致するように等価な透水係数を導く新倉らの方法⁸⁾を適用した。

対策工の検討では、使用する解析モデルで無対策時の盛土法尻の周辺変状を一般的な施工事例の結果と比較した。図－2 に示すように両者は概ね一致し、地盤や入力パラメータが適切に設定されていることを確認した。

4. 解析結果

4.1 盛土施工に起因する周辺変状の抑制

(1) 矢板工による抑制効果

せん断変形による周辺変状の抑制を期待し、鋼矢板を法尻から 1.5m の地点に打設した場合の周辺地盤の水平変位挙動の結果を図－8 に示す。着目点は、盛土法尻から 3.5m の地点とした。

盛土開始前の真空単独運転時の水平変位挙動に対策工の有無であまり大きな違いは見られない。盛土開始後には、無対策では特に有機質土層の側方変形が卓越し、最大で 40cm 程度の押出し変形が確認された。一方、対策工の2ケースについては、鋼矢板の高い剛性により水平変位量は最大で地表面の 13cm 程度に抑制できた。対策効果としては、無対策に対する変位低減率は各深度で 4 ～7 割となった。また、その変位低減効果に対して、矢板の型式の違いによる影響はあまり見られなかった。

(2) 変位吸収溝による抑制効果

改良域と周辺地盤領域との縁切り効果による周辺変状の抑制を期待し、変位吸収溝を法尻から 1.5m の地点に設けた場合の、周辺地盤の水平変位挙動の結果を図－9 に示す。着目点は、盛土法尻から 3.5m の地点とした。

変位吸収溝による縁切り効果は、真空単独運転の盛土前の期間と盛土開始後の両期間ともに明瞭に発揮されている。特に、矢板工の場合にはあまり違いが見られなかった盛土開始前の期間においても、十分な効果が見られる。

水平変位量の最大値で比較すると、盛土開始前では、無対策の-40cm程度に対し、深さ5mの変位吸収溝では-34cm程度、深さ10mの変位吸収溝では-10cm程度であった。盛土開始後では、無対策の40cm程度に対し、深さ5mの変位吸収溝ではほぼ同様の40cm程度であったが、深さ10mの変位吸収溝では25cm程度であった。図-9より水平変位はGL-4～-7mの有機質土層で最も変位が卓

越する傾向にあるため、深さ5mの変位吸収溝では無対策に比べてあまり効果が見られない。ただし、変位吸収溝を設けた深度に関して着目すれば、その効果は大きい。有機質土層に対して十分な深さの10mの変位吸収溝では、無対策に対して2割程度の水平変位量に収まっている。

4.2 透水層内の水頭低下に起因する周辺変状の抑制

(1) 中間砂層の透水性の違いによる抑制効果への影響
透水性の高い中間砂層がある場合の水頭変化の影響範囲を把握することを目的とし、2m厚の砂層（GL-7～

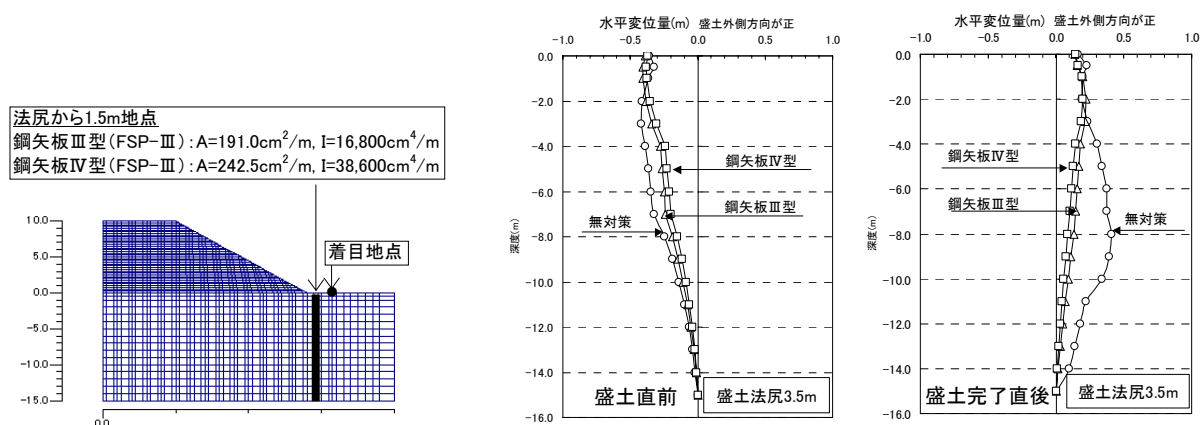


図-8 矢板工の周辺変状抑制効果

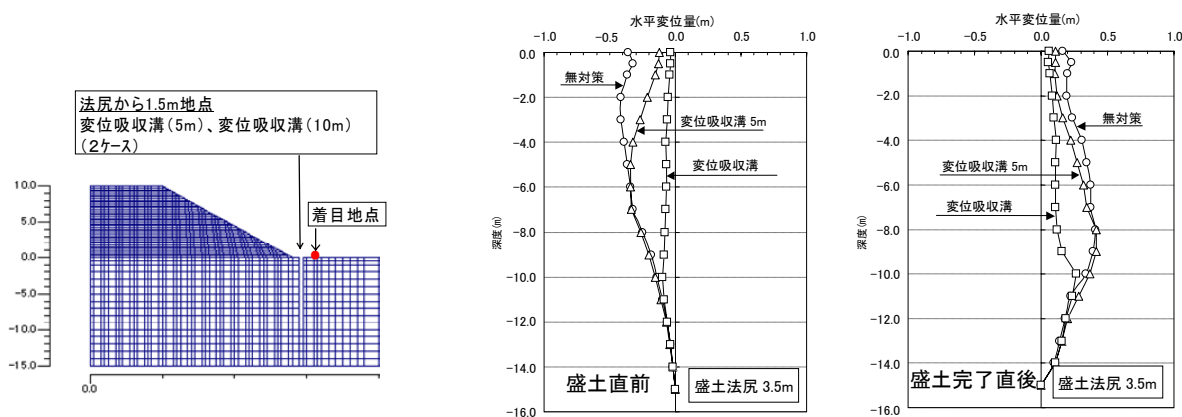


図-9 変位吸収溝の周辺変状抑制効果

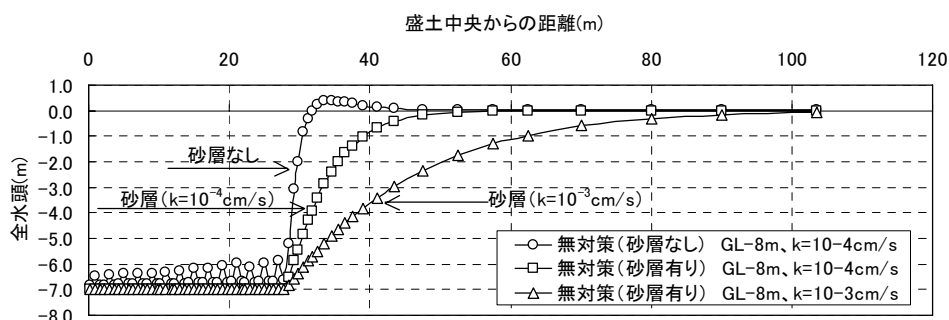


図-10 中間砂層内の水頭低下

9m) について2種類の透水性を与えて検討した。その結果を図-10に示す。中間砂層がないケースは砂層位置では 10^{-7} cm/sec オーダーの粘性土としているため、改良域内部と外部の境界部で水頭分布は大きく異なる。一方、透水性の高い砂層がある場合には、改良域外部の水頭低下の影響範囲が大きくなり、透水係数が 10^{-4} cm オーダーの場合には法尻から20m程度まで、 10^{-3} cm オーダー以上になると法尻から80mを超える範囲まで、水頭の低下が生じる可能性があり、広域での地盤沈下の誘発が懸念される。

(2) 遮水矢板工による抑制効果

広域からの地下水の引込みによる地盤沈下を抑制することを期待して、遮水性の鋼矢板を法尻から1.5mの地点に打設した場合の遮水効果を図-11に示す。遮水性鋼矢板は、透水係数が 10^{-3} cm オーダーの中間砂層を有する地盤に打設した。また、鋼矢板はⅢ型を使用し、中間砂層の下方粘性土地盤に1m根入れするように設定した。図-11より、透水性の低い粘性土層に1m程度貫入して矢板を設けるだけで、周辺地下水に及ぼす真空圧の影響を、ほぼ完全に抑えることが可能であることが分かる。また、それぞれの条件下で発生した地表面の鉛直変位量を図-12に示す。遮水対策をしない場合には、最大1.0m程度の引込み沈下が見られ、影響範囲も50m以上の広範囲に渡る恐れがあることが確認できた。一方、遮水性鋼矢板を打設した場合の地表面沈下量は最大でも20cm程度に収まっている。これは、遮水性鋼矢板下端

の粘性土層内を真空圧が伝播して生じたものであると考えられるが、影響範囲は10m程度であった。

但し、本検討は解析条件として、矢板を完全遮水として設定した場合の結果であり、実際に施工する際には、矢板の継手部分の遮水処理など十分に留意する必要がある。

5. まとめ

本研究では、盛土を併用した真空圧密工法の一般的な適用地盤を想定し、施工時の周辺変状の抑制を期待する代表的な対策工を講じた場合の周辺変状軽減効果についてFEMにより解析的に検討し、それらの効果を定性的に評価した。以下に得られた結果をまとめる。

- (1) 盛土による地盤のせん断変形に起因する周辺変状の抑制を期待し、鋼矢板を法尻付近に設けた場合、盛土完了時の水平変位量は、無対策に比べて4~7割程度であった。また、矢板Ⅲ型とⅣ型の違いによる影響はあまり見られなかった。
- (2) 改良域と周辺地盤領域との縁切り効果による周辺変状の抑制を期待し、法尻付近に変位吸収溝を設けた場合、変位吸収溝が側方変位が卓越する層に対して十分な深さを有していれば、水平変位量は無対策に対して2割程度であった。
- (3) 透水性の高い中間砂層が広く分布している場合、透水係数が 10^{-4} cm オーダーの場合には法尻から20m程度まで、更に 10^{-3} cm オーダー以上になると法尻から

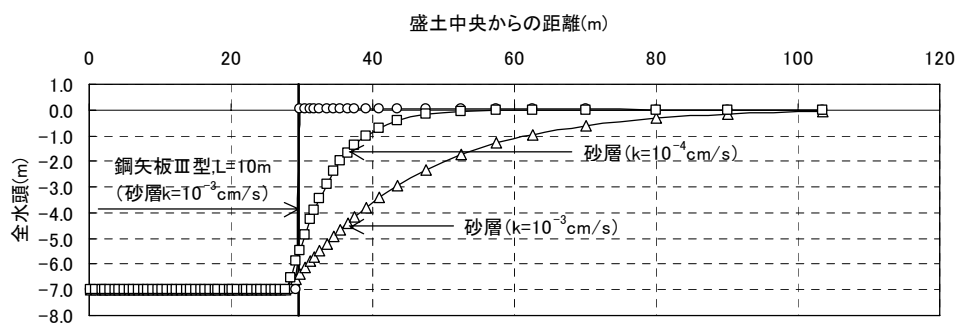


図-11 鋼矢板による中間砂層の遮水効果

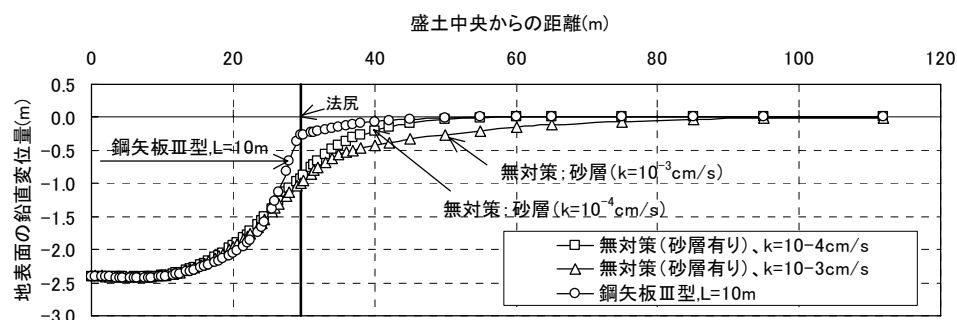


図-12 鋼矢板による引込み沈下の抑制効果

80m を超える範囲まで地下水の引き込みによる地盤沈下を誘発する恐れがある。

- (4) 広域からの地下水の引込みによる地盤沈下を抑制することを期待して、遮水性の鋼矢板を法尻付近に設けた場合には、粘性土への 1m 程度の貫入で周辺地盤の透水低下はほとんど見られず、地表面沈下の影響範囲は 10m 程度であった。

本報告は、平成 16 年に「N&H 強制圧密脱水工法」²⁾の技術資料を改定するにあたり、真空圧密技術協会の活動として実施した研究成果の一部をとりまとめたものである。ご協力いただいた関係各位に、この場を借りて厚く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 三反畑勇, 久保正顕, 市川尋士: 真空圧密工法による軟弱地盤対策—N&H 強制圧密脱水工法の概要と適用例—, 土木技術, Vol. 59, No. 8
- 2) 真空圧密技術協会: 高真空 N&H 工法—改良型 真空圧密工法—, 2004. 12
- 3) 石塚達也, 三反畑勇, 松本江基, 神田勇二, 中熊和義: 軟弱地盤における高盛土への強制圧密脱水工法の適用 (その 2) 地盤の変形挙動, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp. 1367~1368, 2000. 6
- 4) 安部哲生, 福島勇治, 西岡浩一, 新谷泉: 真空圧密工法による地盤改良の周辺地盤への影響について, 土木学会第 57 回年次学術講演会, III-074, 2002. 9
- 5) 三反畑勇, 木村誠, 松本江基, 佐藤善栄, 中熊和義, 市川尋士: 真空圧密を利用した盛土の周辺地盤変位と盛土安定管理に関する考察, 第 39 回地盤工学研究発表会 pp. 951~952, 2004.
- 6) 松本江基, 大野睦雄, 島博保, 中熊和義: 真空圧密工法による軟弱地盤の改良—N&H 強制圧密脱水工法—, 土地改良, No. 217, pp. 42~46, 2000.
- 7) 日本道路協会: 道路土工, 軟弱地盤対策工指針, p62, 1986.
- 8) 新舎博, 原久夫, 安部豊彦, 田中昭人: サンドドレーンによる部分改良地盤の圧密沈下と側方変位, 土と基礎, Vol. 30, No. 5, pp. 7~12, 1982.

FEM Study on Countermeasures against Ground Deformation in Embankment with Vacuum Preloading Method

Makoto KIMURA, Kouki MATSUMOTO and Isamu SANDANBATA

Recently the number of construction of the embankment with vacuum preloading is increasing. Being different from the cases in which only the vacuum preloading is applied and the surrounding ground displaces toward the center of the treated area, the surrounding ground moves outward depending on the construction procedures such as embankment height and speed. Furthermore, a wide distribution of a high-permeable soil layer in the treated area would cause substantial surface settlement due to the lowered water level by vacuum suction.

This paper reports the result of FEM analyses for embankment with the vacuum preloading, which confirms the effectiveness of two countermeasures, the lagging method and the trench method for ground deformation reduction.