

海外での真空圧密工法によるテストコースの施工事例

(株)大林組 正会員 ○川本 卓人
佐々木 徹

1. まえがき

本テストコース計画地は、タイ国の首都バンコク近傍の工業団地に位置している。

テストコース計画地の基礎地盤には、盛土工事による沈下や安定性が懸念される細粒分含有率が高く、透水性が小さい、また、せん断強度の小さな粘性土層が15～17m程度の厚さで分布している。

本工事は、このような軟弱地盤上に1.5m程度の盛土を行ってテストコースを造成する工事であるが、盛土による沈下が長期にわたり継続し、将来、舗装面のクラックや不等沈下などが発生し、テストコースの機能低下が懸念された。通常、沈下を促進する工法としてはプラスチックボードドレーン工法+載荷盛土といった工法が適用されるが、盛土材料の調達、撤去材料の搬出、工事ヤード内での他工事との調整等も考えると、ダンプロックの運搬台数が限定された。

そこで、当地においては、真空圧で将来の盛土荷重相当以上の荷重を事前に載荷し（過圧密状態とし）、沈下を促進させ、将来沈下の低減を図り、テストコースの機能を維持するシート式真空圧密工法を採用した。

本文では、タイ国特有の真空圧密工法の設計の考え方、日本との施工方法や真空設備の配置等の相違、真空設備運転中・運転停止後の動態観測経過等について報告する

2. 工事概要

表-1 に地盤改良工（真空

表-1 地盤改良工の工事概要

圧密工法：シート式）の工事概要を示す。真空圧密工法は図-1 に示すように、改良面積は約58,000m²で、6ゾーンに工区分けし、各改良ゾーンを3～4ブロックに分け、ブロックごとにサブタンクを設置し、2台の真空ポンプで地盤内に真空圧を作用させた。

改良対象面積	Zone-1～Zone-6(6ブロック)	58,000m ²
真空圧密工概要	改良ゾーン	6ゾーンに工区分け
	プラスチックボードドレーン (0.9m×0.9m:正三角形配置)	83,620本
	水平排水材	1,337,920m
	気密シート	77,200m
	真空ポンプ	59,400m ²
動態観測機器	サブタンク(気水分離タンク)	2台
	地表面沈下板	23箇所
	間隙水圧計	32箇所
	真空ゲージ	2深度/Zone×6Zone 23箇所

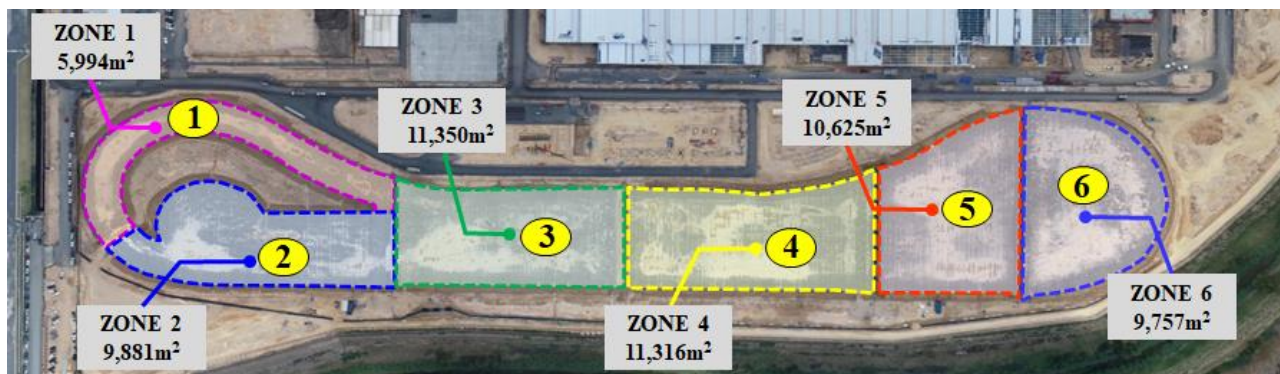


図-1 真空圧密工法施工範囲のゾーン分け図

キーワード 海外工事，テストコース，軟弱地盤，真空圧密工法，動態観測

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株) 大林組生産技術本部 TEL 03-5769-1302

3. 当地の土質概要

図-2 に土質調査位置図および土層断面図を示す。

地表面には、一次造成された覆土が 2～3m 程度の厚さで分布しており、その下位には 15～17m の厚さで軟弱な粘性土が分布している。この下位には N 値が 15 を超える硬いシルト質粘土が 6～8m の厚さで分布し、地表面から 27m 付近から N 値が 40 を超える砂層が出現している。

真空圧密工法で改良する軟弱な粘性土は、湿潤密度は 1.3 ～1.5g/cm³、自然含水比は 80 ～150%を示し、液性限界とはほぼ同等の値を示している、細粒分含有率は 90%を超え、粘着力は 10～15kN/m² と小さな値を示している。圧密降伏応力は有効土被り圧とほぼ同等の値を示し、正規圧密状態にある。地盤の透水性を示す圧密

係数は 10⁰ オーダー cm²/day と日本の沖積粘性土に比べると、2 オーダー小さな値を示している。

4. 真空圧密工法の設計の考え方

真空圧密工法による沈下量は、以下に示すように基本的に圧密試験より得られる $e \sim \log P$ 曲線を用いて過圧密、正規圧密の領域ごとに沈下計算を行う（図-3 参照）。

$$\rho_c = \rho_{c1} + \rho_{c2} = \frac{C_R H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \right) + \frac{C_c H}{1 + e_0} \log \left(\frac{\sigma'_0 + \Delta \sigma_v}{\sigma'_c} \right)$$

ここに、 ρ_c ：圧密沈下量

ρ_{c1} ：過圧密領域の沈下量

ρ_{c2} ：正規圧密領域の沈下量

σ'_0 ：初期有効土被り圧

σ'_c ：圧密降伏応力、 $\Delta \sigma_v$ ：载荷荷重（真空圧）、 C_R ：再圧縮指数、 C_c ：圧縮指数

H ：圧密沈下対象層厚、 e_0 ：初期間隙比

ここで、再圧縮指数 C_R 、圧縮指数 C_c は圧密試験結果より求めており、設計真空圧は 80kN/m²（日本では 70kN/m² または 60kN/m² を採用）として、沈下計算を行っている。

真空圧密工法による最終沈下量は、これまでのバンコクでの実績より、一次元で求めた沈下量の 80%程度に相当する。20%は水平方向の変位となるため、一次元で求めた沈下量は過大評価となる。

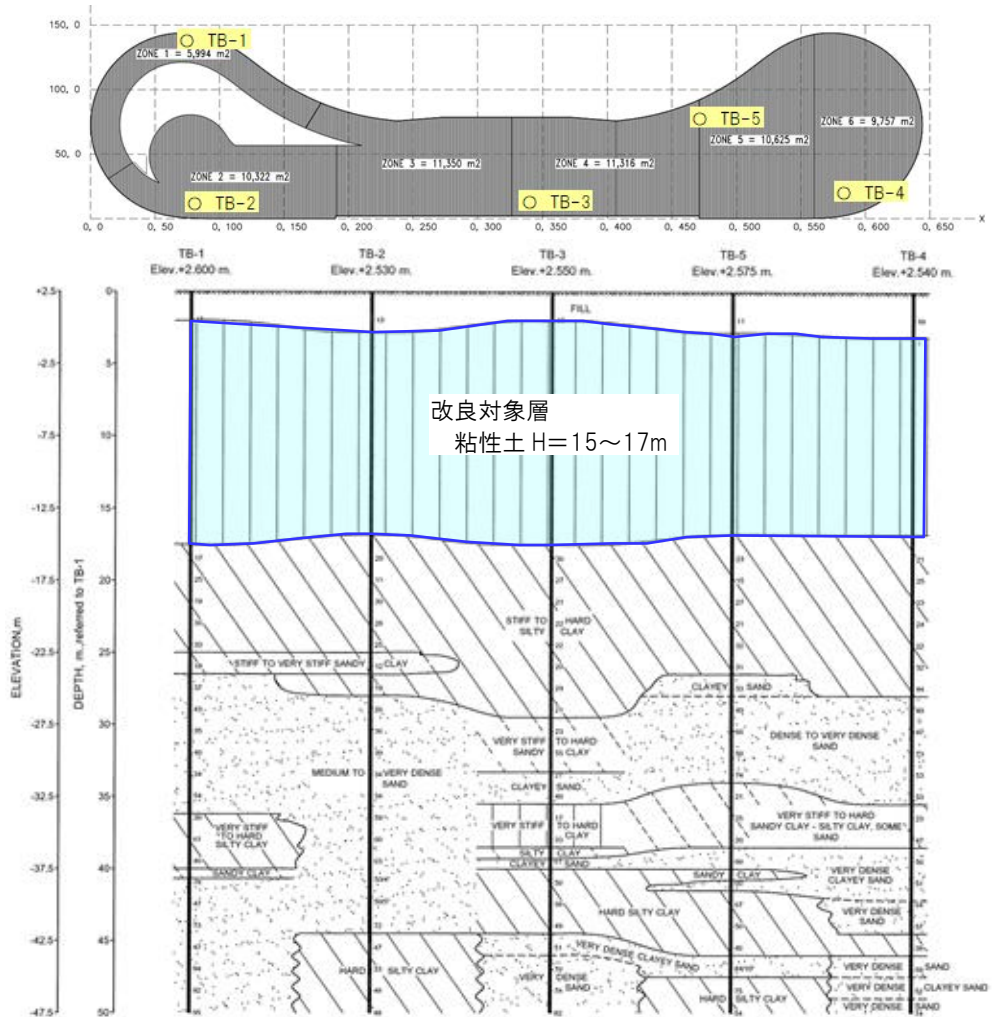


図-2 土質調査位置および断面図

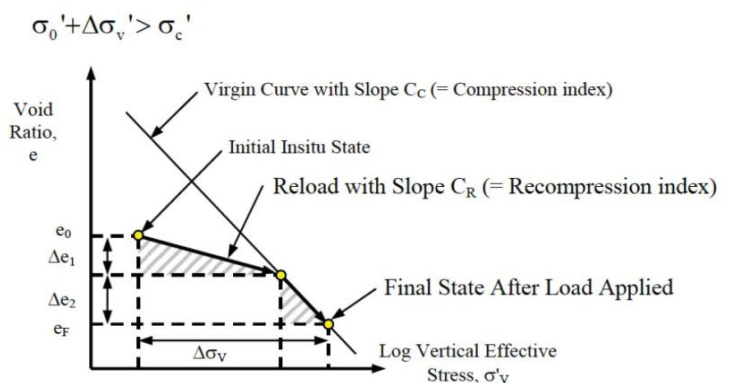


図-3 過圧密、正規圧密領域の沈下の考え方

バンコクの粘土に対する実績から OCR（過圧密比）と μ （沈下低減率）の関係を求めている。当地の OCR は 1.5 程度であることから、沈下低減率は 80% 程度となり、一次元で求めた沈下量に対して 0.8 倍とする。

鉛直ドレーンの打設間隔は、真空設備運転開始から 180 日で圧密度が 85% になるように Barron (バロン) の圧密理論を用いて求めたが、日本では珍しい $d=0.9\text{m} \times 0.9\text{m}$ （正三角形配置）とした。

5. 施工方法

真空圧密工法の標準的な施工断面図を **図-4** に示すが、日本のシート式真空圧密工法と同じような施工方法である。当地で使用した真空圧密工法の材料と日本で用いられている一般的な材料の比較表を **表-2** に示す。

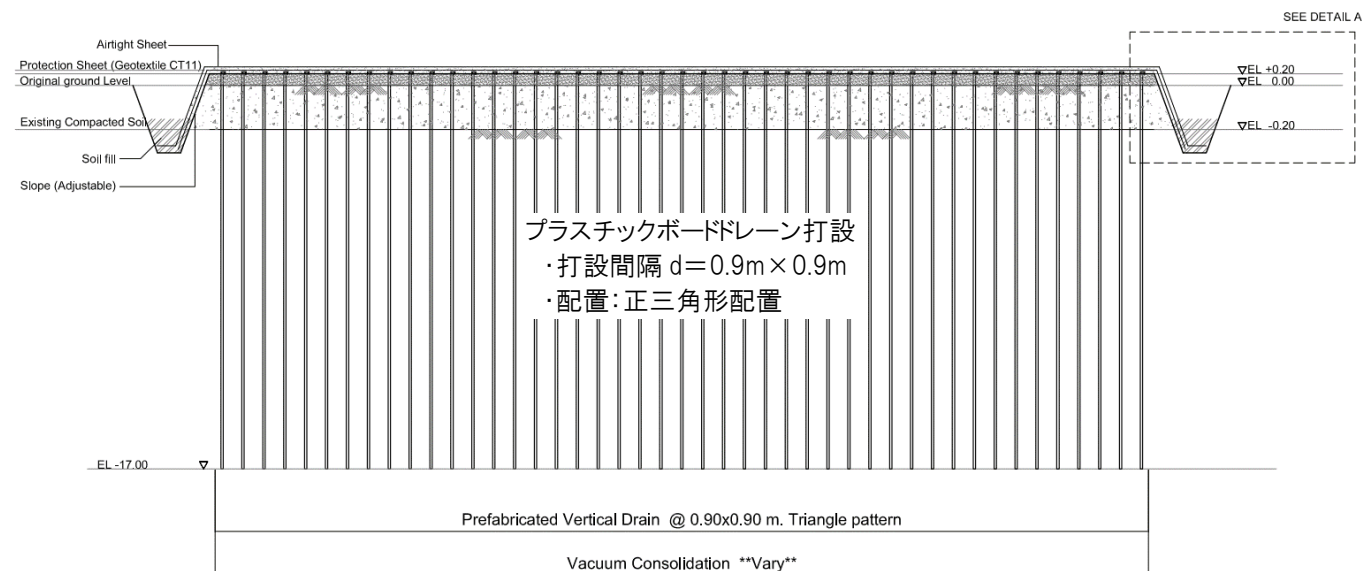


図-4 真空圧密工法標準断面図

①サンドマットの敷設（既に一次覆土が施工されているため、20cmの厚さで施工）

②鉛直ドレーンの打設（油圧ドレーン打設機で $0.9\text{m} \times 0.9\text{m}$ の正三角形配置で打設）

③水平排水材の敷設（0.9m 間隔で水平排水材と打設した鉛直ドレーンを接続）

④有孔集水管の敷設（不織布で被覆した $\phi 75\text{mm}$ の有孔排水管を 5m 間隔で敷設）

⑤サブタンクの設置（気水分離タンクを各ブロックに設置）

⑥保護シートの敷設（気密シートの損傷を防止するため、不織布を全面に敷設）

⑦気密シートの敷設（改良範囲全域に気密シートを敷設）

⑧端部処理（深さ 2.5m、底部幅 0.5m、のり勾配 1:1.0 のトレンチ内に気密シート端部を埋込み）

⑨真空設備への配管（各ブロックのサブタンクからの排管を真空設備を設置したコンテナに接続）

⑩真空設備の運転開始（3 ゾーンに対して 1 台の割合で設置、稼働）

表-2 使用材料の比較

		当地で採用した真空圧密工法	一般的なシート式真空圧密工法
鉛直ドレーン	材質	フィルター: ポリエステル不織布 芯材: ポリプロピレン	プラスチック透水芯入り 不織布
	幅	100 $\pm$ 5.0mm	100 $\pm$ 10mm
	厚さ	4.0mm	7mm $\pm$ 0.7mm
	引張強度	600N/10cm(不織布)	1,960N/10cm
	透水係数	1.0 $\times 10^{-4}$ m/s	1.0 $\times 10^{-4}$ m/s
水平ドレーン	材質	フィルター: ポリエステル不織布 芯材: 高密度ポリエチレン	プラスチックネット入り 不織布
	幅	100mm	300mm
	厚さ	20mm	6mm
	引張強度	450N/10cm(不織布)	2,750N/10cm
有孔集水管	透水性係数	1.5 $\times 10^{-4}$ m/s	5.0 $\times 10^{-4}$ m/s
	口径	$\phi 75\text{mm}$	$\phi 65\text{mm}$
保護シート	材質	ポリプロピレン不織布	プラスチック不織布
	厚さ	1.25mm	1.0mm
	引張強度	550N/5cm	150N/5cm
気密シート	材質	低密度ポリエチレン(LLDPE)	ポリ塩化ビニール
	質量	0.939g/cm ³ (密度)	600g/m ²
	厚さ	1mm	0.5mm
	引張強度	27N/mm	1,800N/cm ²
	引張伸度	800%	340%

写真-1 に真空圧密工法の一連の施工の流れを示すが、日本のシート式真空圧密工法と大きく異なる箇所は、以下に示すように気密シートの端部処理方法と真空設備の配置である。

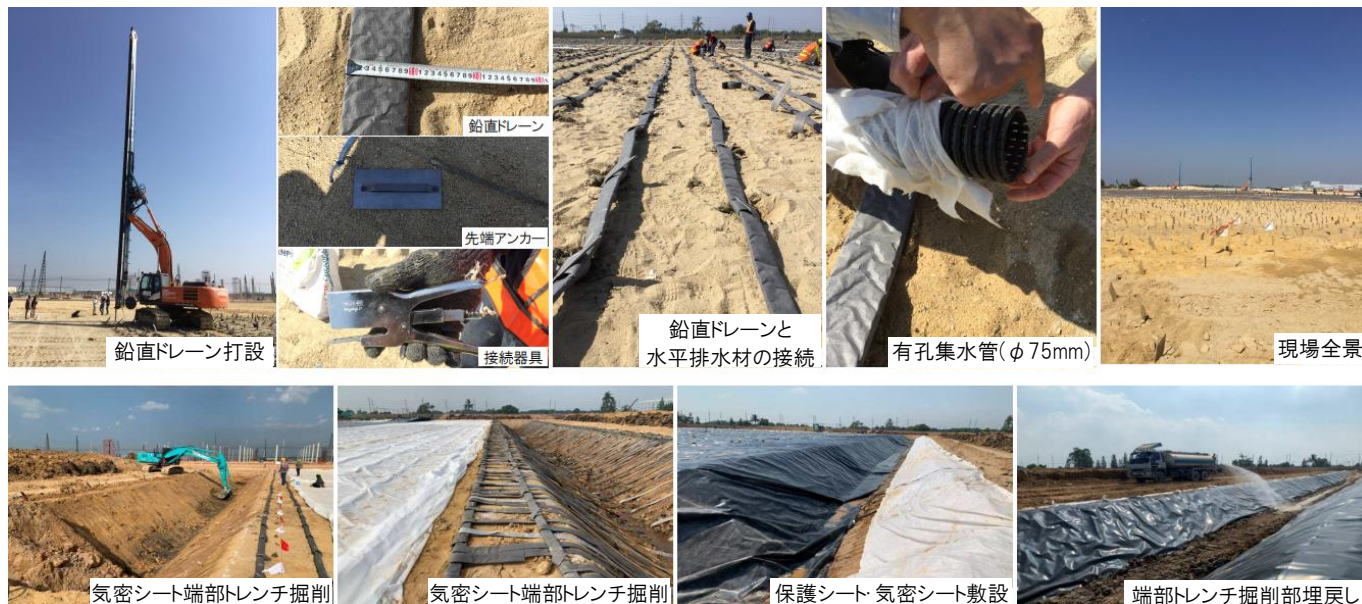


写真-1 真空圧密工法の施工の流れ

①気密シート端部処理

日本では、**写真-2**に示すように極力のり面勾配を急にして、掘削土量が少なくなるようにトレンチを掘削し、掘削土で埋め戻している。当地においてはのり面勾配が1:1.0と緩く、外周排水路のような規模の大きなトレンチを設置し、埋戻し時に埋戻し土の乾燥防止のため散水したり、埋戻し土の透水性を低下させるため、小型のローラで転圧し、密度管理も行いながら埋戻しを行っている（**写真-3**参照）。

②真空設備の配置について

日本では**写真-4**に示すように各改良ブロックに近接した箇所に真空設備を設置して真空圧等を管理しているが、当地においては各ブロックのサブタンクから真空設備を配置したコンテナヤードまで配管し、コンテナ内に設置した集中管理室で真空設備の一括管理を行っている（**写真-4**参照）。

真空圧密工法施工時には所定の設計真空圧まで低下しなかった改良ゾーンにおいては、気密シート端部処理した個所を再度掘削し、気密シートの気密性を確認するとともに、散水するなどして表面の乾燥によるクラックの発生防止に努めた（**写真-5**参照）。

6. 動態観測計画

真空圧密工法の施工に伴う真空ポンプの元圧、気密シート下の真空圧、地盤内の間隙水圧および改良地盤の沈下量を把握するため、**図-5**に示すように各改良ゾーンのブロックごとに真空ゲージ、間隙水圧計および地表面沈下計を設置した。**写真-6**に各ゾーン内に設置した動態観測機器を示す。

基本的に各種観測機器の測定は1回/日の頻度で、真空ポンプの元圧以外は人力で対応した。



写真-2 気密シート端部処理事例（日本）



写真-3 気密シート端部処理（当地）



写真-4 真空設備の配置（左：日本、右：当地）



写真-5 端部処理部水張り状況

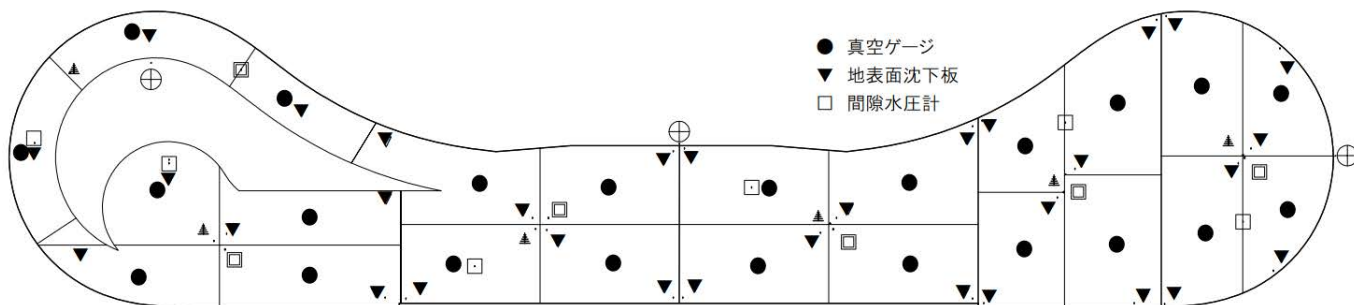


図-5 動態観測機器設置平面図

7. 真空設備の運転停止基準

真空設備運転中は、地盤内に作用している真空圧や沈下、地盤内の間隙水圧を測定し、各種の測定結果より、真空設備の運転停止時期を判断した。

真空設備の運転停止は、各改良ゾーンに設置している観測地点において、以下に示す3つの条件を満足する時点とした。

- ・ 検討時点の実測沈下量が浅岡法により推定した最終沈下量の85%以上到達していること
- ・ 5日間の平均沈下量が5mm以下であること

- ・ 供用後10年間の長期沈下が10cm以下となっていること（図-6に示す過圧密比OCRと二次圧密係数比Rの関係から二次圧密係数比を求め¹⁾、下式より10年後の長期沈下を推定）

図-7に動態観測の一例としてゾーン5の真空圧、沈下量および日あたりの沈下量の経時変化を示す。

この経時変化より、浅岡法により将来沈下、検討時点の圧密度を推定した結果の一例を図-8に示すが、85%以上の圧密に到達している。

また、5日間の平均沈下量も5mm以下であることが確認できる。

供用後10年後の長期沈下についても上式より推定すると、10cm以下となり、検討条件をすべて満たしたことから真空設備の運転を停止した。

このような方法で真空設備の運転停止時期の判定を行ったが、一部実測沈下が理論沈下量を上回る地点があり、0.5箇月程度

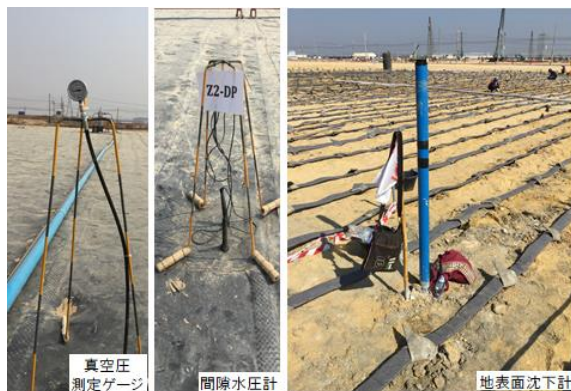


写真-6 各種動態観測機器

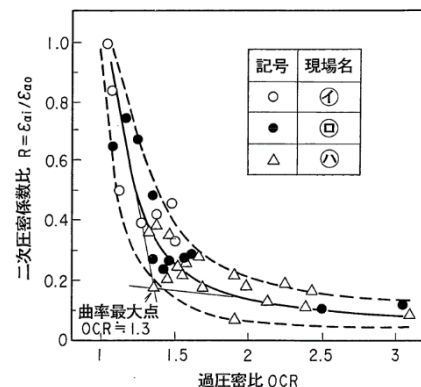


図-6 OCRとRとの関係¹⁾

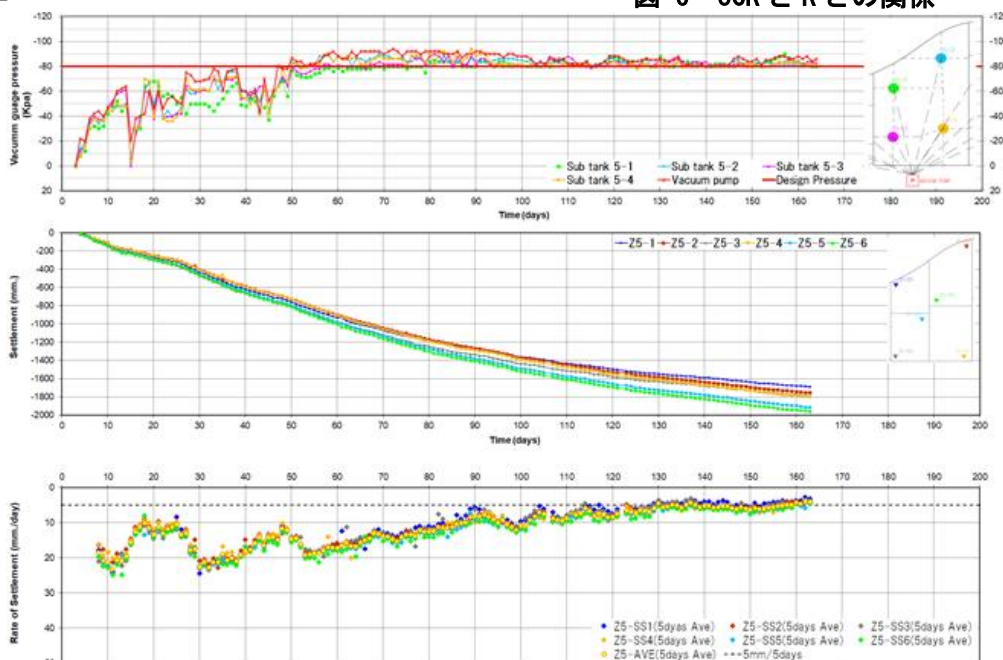


図-7 動態観測経過の一例（ゾーン5）

真空設備の運転を継続した改良ゾーンもあったが、ほぼ所定の工期内で真空設備の運転を停止することができ、次工程への遅延はなかった。

8. 真空設備運転停止後の沈下特性

真空設備の運転停止基準を満足した時点で真空設備の運転を停止し、約2週間経過した後、舗装工事による路体・路床工事を開始した。舗装工事による盛土厚さは約1.2mである。

真空設備の運転停止(除荷)⇒舗装工事(再載荷)による沈下特性を確認するため、6改良ゾーンのうち、ゾーン5の1地点で沈下計測を継続した。

図-9に真空設備運転停止、舗装工事による盛土高さおよび沈下の経時変化を示す。

真空設備の運転を停止し、舗装工事の開始までの2週間で5.1cmのリバウンドが発生し、その後18日間で1.2mの盛土を施工し、施工完了後10日間経過しているが、3.0cmの沈下が発生しており、真空設備運転停止時の沈下量には至っていない状況である。

図-10に過圧密比OCRと膨潤ひずみとの関係を示しているが、当地の過圧密比は1.3程度であることから、図-10より膨潤ひずみは0.3%程度で、4.5cm程度のリバウンド量が想定されるが²⁾、実測値と近似した値が得られている。

9. あとがき

2019年10月中旬から鉛直ドレーンの打設を開始し、2020年1月には順次真空設備の運転を開始し、運転開始約6箇月後には真空設備の運転を停止し、舗装工事を開始した。鉛直ドレーン打設から17箇月後の2021年3月末に当初計画とおり竣工を迎えた。

竣工後約5箇月経過しているが、不等沈下による舗装面にクラックや段差等の不具合が発生しておらず、真空圧密工法の有効性が確認できた。

今後も定期的に沈下計測を継続する計画であり、機会を見て長期沈下について報告できればと思っている。

参考文献

1), 2) 深沢栄三, 山田清臣, 栗原宏武: プレローディング工法で改良した高有機質土地盤の長期沈下挙動, 土木学会論文集 No. 493/III-27, pp59~pp68, 1994.6

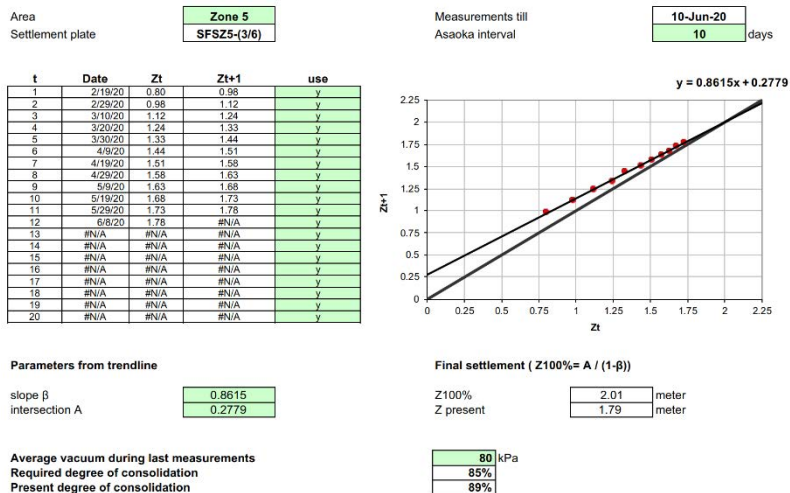


図-8 浅岡法による解析例(ゾーン5: Z5)

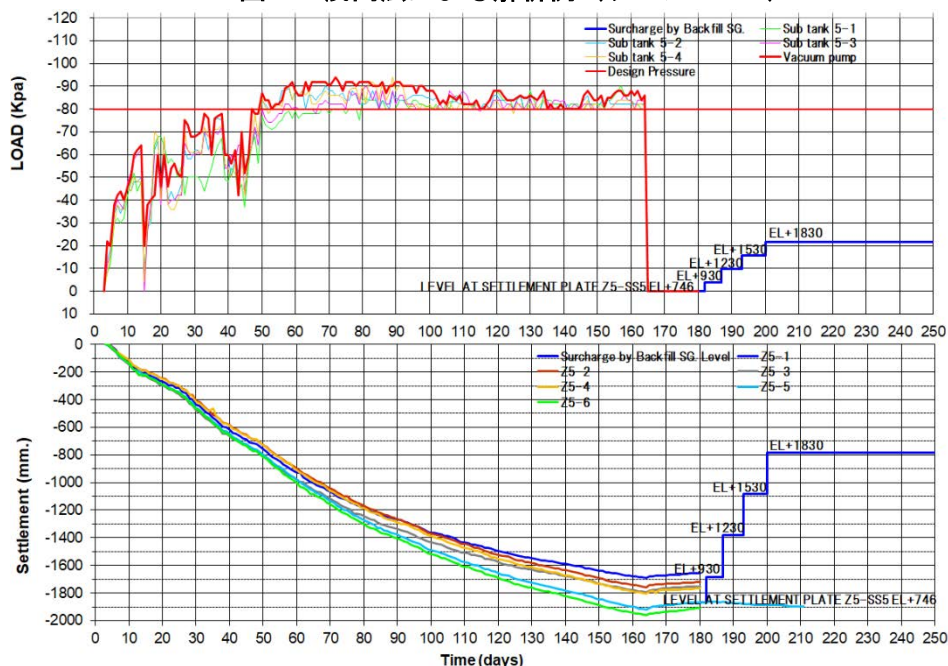


図-9 真空設備運転停止後の沈下挙動(ゾーン5: Z5)

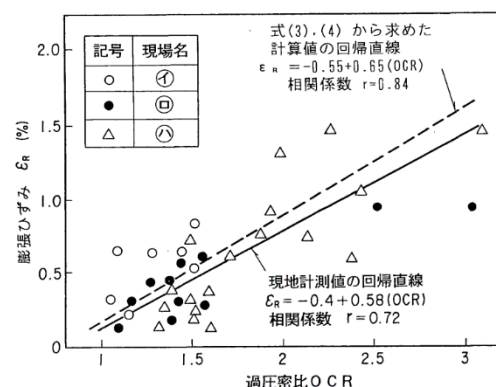


図-10 OCRと膨潤ひずみの関係²⁾