

真空圧密工法と載荷盛土を併用した テストコースの造成

佐々木徹¹・徳田稔夫²

¹正会員 株式会社大林組 生産技術本部基盤技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティ)

²正会員 株式会社大林組 海外支店アジア統括事務所 (〒108-8502 東京都港区三港南2-15-2 品川インターシティ)

一般にテストコースは、沈下や安定が問題とならない良質な地盤上に造成される。本テストコースは軟弱地盤上で、しかも広域地盤沈下地域に盛土を行って造成するものであるが、盛土工事に伴う残留沈下が理論上ゼロとなるような対策工が求められた。そこで、改良効果、現地条件、工期などを踏まえて沈下対策工について種々検討を行った結果、真空圧をサーチャージ荷重として載荷する真空圧密工法に載荷盛土工法を加える方法を選定し、実施した。改良範囲を31ブロックに分け、施工していったが、真空圧は各改良ブロックに均等に作用し、真空圧密工法のサーチャージ効果が顕著に認められ、将来荷重に対する残留沈下量が理論上ゼロとなるような地盤に改良することができた。

キーワード:海外工事, 真空圧密工法, 載荷盛土, 動態観測, 真空圧の管理

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から東方に約60km離れた地点に位置している。当地の基礎地盤には、盛土工事による安定性や沈下に対する問題が懸念される細粒分含有率が多く、透水係数やせん断強度が小さなタイ国特有の軟弱な粘性土地盤が15m程度の厚さで堆積している。また、当地は広域地盤沈下地域で年間最大5cm程度沈下が発生しており、近接している高速道路では毎年オーバーレイ工事を実施している。

本テストコース造成工事は、このような軟弱地盤上に1.5~2.5mの盛土を行ってテストコースを造成する工事であるが、盛土工事に伴う供用後の残留沈下量が理論上ゼロとなるような沈下対策工が求められた。

供用後の残留沈下量を理論上ゼロとするような沈下対策工としては、杭基礎形式による橋梁案が考えられたが、工期およびコスト面から採用は難しいと判断した。また、軟弱地盤の沈下対策として頻繁に用いられているプラスチックボードドレーン工法+載荷盛土工の組み合わせも考えられたが、盛土材料の調達、載荷盛土施工時の安定確保、テストコースオープンまでの工期を考えた場合、この工法も適用は難しいと判断した。

そこで、急速施工が可能で、多量の盛土材の運搬も必要なく、工期が厳守でき、理論上残留沈下もゼ

ロとすることができる真空圧をサーチャージ荷重として載荷する真空圧密工法に載荷盛土工法を組み合わせさせた工法を採用した。

本文では、沈下対策工の採用の経緯、設計の考え方、計画時・施工時の課題と解決策および動態観測結果について報告する。

2. 工事概要

本テストコース造成工事は、フェーズ1（地盤改良工事）、フェーズ2（舗装・建築工事）に分けられたが、地盤改良工事の工事概要を表-1に示す。

3. 当地の土質概要

図-1に土質調査位置図を、図-2に土層断面図を示す。地表面には一様に表土（耕土）が分布しており、その下位には10~15mの厚さでN値0~3の軟弱なシルト質粘土が堆積しており、N値3~5の中位なシルト質粘土が3~4m、N値10~20の硬いシルト質粘土や砂質粘土が10m程度の厚さで堆積している。地下水位はほぼ現地盤上に位置している。

上部に堆積しているシルト質粘土に対して室内土質試験を実施したが、自然含水比は50~100%で液性限界よりも10~25%程度低い値を示しており、

表-1 工事概要

工事内容	真空圧密工法+載荷盛土工法を併用したテストコース造成工事
主要工事・数量	真空圧密工法 改良対象面積：A=64,200m ² 改良ブロック：改良対象面積を31ブロックに工区分けして改良 プラスチックボードドレーン：打設長880,000m(12.8m/本) 気密シート：93,000m ² (HDPEシート、厚さt=1mm) 表層排水工：水平ドレーン34,000m(200mm×8mm) 有孔管10,000m (塩ビ管φ75mm) 載荷盛土工事 土量150,000m ³ (搬入土) 動態観測工 地表面沈下板 165箇所 (5~6箇所/改良ブロック) 間隙水圧計 31箇所 (1箇所/改良ブロック) 真空ゲージ 31箇所 (1箇所/改良ブロック)

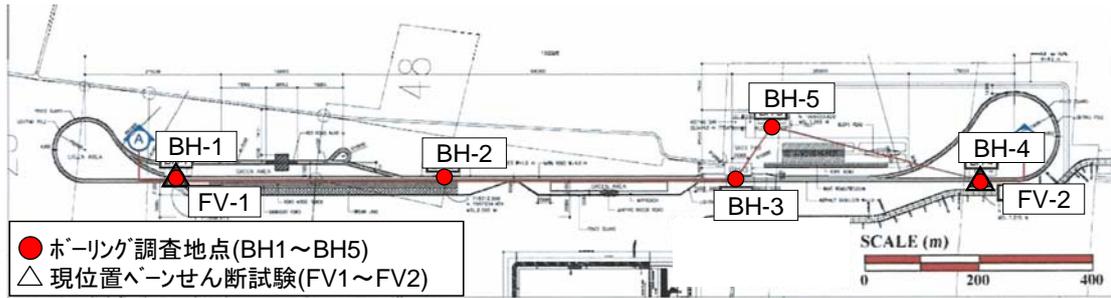


図-1 土質調査位置図

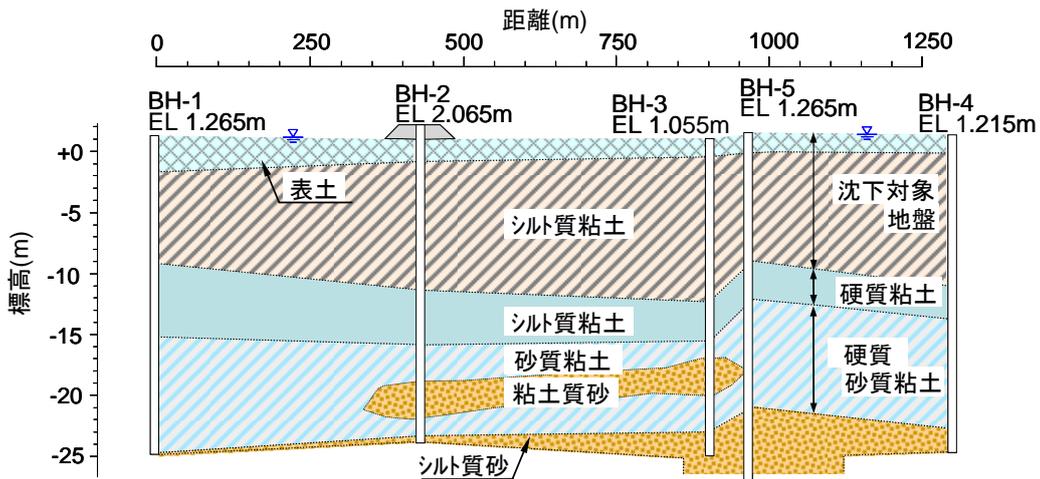


図-2 土質断面図

液性指数が0.8以下で、土工上問題となるような土ではなかった。

地盤の透水性を示す圧密係数は $10^0 \text{cm}^2/\text{d}$ オーダーと日本の沖積粘性土に比べると2オーダー小さい。また、粘着力も $10 \text{kN}/\text{m}^2$ と小さいことから、圧密沈下が長期にわたって継続し、盛土施工時の安定に対して問題となるような土質である。

4. 沈下対策工の選定経緯

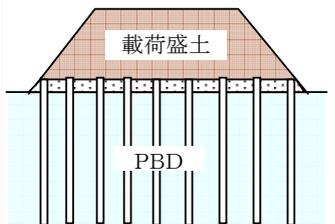
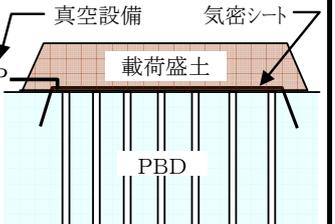
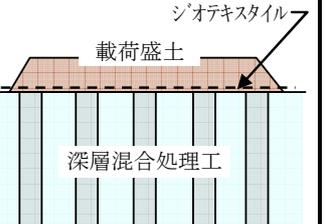
本テストコース計画用地には、透水性やせん断強度が小さな軟弱なシルト質粘土が15m程度の厚さで堆積しており、しかも年間最大5cm程度沈下が進行している広域地盤沈下地域である。

このような地盤で残留沈下をゼロとするためには杭基礎による橋梁方式とするのが一般的であるが、工期・経済性の観点から不利となり、造成工事による残留沈下量を理論上ゼロとなるような条件で対策工を検討するに至った。

造成工事による供用後の残留沈下量を理論上ゼロとするような軟弱地盤対策工としては、将来荷重以上の荷重を事前に載荷し、地盤を過圧密状態にすることで沈下を抑制する工法や沈下自体を抑制する工法がある。

表-2に考えられる対策工の比較表を示すが、当地においては以下の理由から真空圧密工法と載荷盛土を組み合わせた沈下促進工法を適用した。

表-2 沈下対策工比較表

工法	プラスチックボードドレン工法+ 載荷盛土工法	真空圧密工法+載荷盛土工法	低改良率深層混合処理工+ 載荷盛土工法
工法の概要図			
工法の特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・沈下促進対策としては一般的な工法である。 ・盛土であるため、荷重は確実に作用する。 ・載荷盛土の搬入および搬出作業が必要となる。 ・緩速施工が必要となるため、工期が長くなる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・北海道の泥炭地盤の道路工事などで適用されている。 ・真空圧密の方法は異なるが、バンコク国際空港でも採用している。 ・真空圧密によりせん断強度が増加するため、急速施工が可能である。 ・真空圧密荷重をサーチャージとして適用するため、盛土量が低減できる。また、搬出も必要ない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・沈下抑制工法として、近年日本でも使用実績が増えている。 ・全面固化処理すれば沈下は抑制できるが、杭状改良の場合、改良率に応じて沈下が残る。 ・施工機械を日本から調達する必要がある。 ・盛土量は少なくて済む。
当地への適用性	盛土の運搬・搬出が必要であること、工期が長くなることから、与えられた条件は満足できない。 <div style="text-align: right;">×</div>	真空圧密荷重がサーチャージ荷重として作用し、急速施工も可能であり、諸条件を満足できる。 <div style="text-align: right;">○</div>	低改良率とした場合、残留沈下が残るため、与えられた諸条件が満足できない。 <div style="text-align: right;">×</div>

- ①真空圧を利用して地盤のせん断強度の増加が期待できるため、急速施工が可能である。
- ②真空圧をサーチャージ荷重として載荷するため、多量の盛土材料の搬入および搬出が不要となる。
- ③テストコース計画用地は稼働中の工場内に位置しているため、ダンプトラックの運搬台数が制限される。
- ④残留沈下量を理論上ゼロとすることができる。
- ⑤真空圧を地盤内に効率よく作用させることにより、工期が確実に厳守できる。

- ②テストコースのオープン時期から逆算して、地盤改良期間は8ヶ月と設定した。
- ③載荷盛土撤去時期（真空駆動装置の運転停止時期）における圧密度は80%以上確保でき、その時点の沈下量が将来荷重に対する沈下量を上回っている。
- ④載荷荷重と将来荷重の比率（過圧密比）が1.5以上確保できている。

これらの条件を満足する載荷盛土厚さは1.5m（サンドマット厚さ $t=0.5m$ を含む）となり、真空圧と組み合わせると90kN/m²の荷重をサーチャージ荷重として載荷する計画とした。

5. 設計の考え方

有機質粘土や腐植土などの軟弱地盤上での道路盛土工事においては、図-3に示すように過圧密比が1.5程度になると長期沈下はほぼ抑制できるという結果が得られている¹⁾。そこで、当地においてもこの値を確保する設計を行った。

設計条件として、計画地盤高さ(FH)は現地盤から+1.0m、将来載荷荷重（舗装+交通荷重）は10kN/m²という条件が与えられた。

図-4に載荷盛土の設計の考え方を示すが、載荷盛土厚さは以下の条件を満足するように設定した。

- ①真空圧密工法の真空圧は60kN/m²と設定した。また、盛土の単位体積重量は20.0kN/m³と設定した。

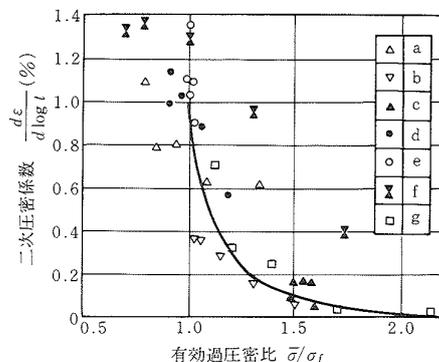


図-3 過圧密比OCRの考え方¹⁾

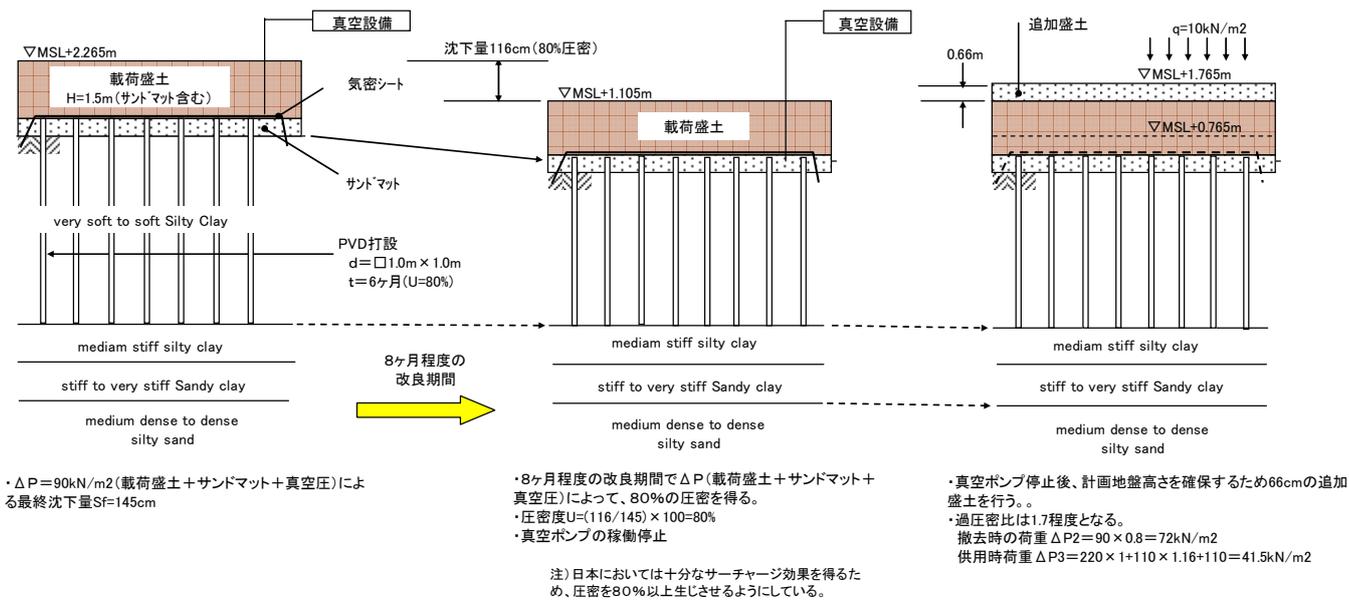


図-4 载荷盛土の考え方

7. 技術的な課題と解決策

本テストコース造成工事は、改良面積 $64,000\text{m}^2$ 、しかも $1,600\text{m} \times 40\text{m}$ というテストコース特有の非常に細長くて両側にコーナー部を有する範囲を改良し、残留沈下量をゼロにするという非常に厳しい施工条件下での地盤改良工事である。

このため、計画や施工を進めていくにあたり、種々の技術的な課題が発生し、その都度解決策を導いていったが、以下に技術的な課題と解決策について述べる。

(1) 計画時

a) 改良範囲の設定

テストコース走行路は幅8.5mの道路であるが、こ

の範囲に真空圧や载荷盛土荷重が100%载荷されなければ、载荷荷重不足により将来沈下が継続することが考えられる。

このため、テストコース走行路のり肩部にも100%の载荷荷重が作用するように、図-5に示すように走行路から4mの張り出し幅を設けてプラスチックボードドレーンを打設し、载荷盛土を施工する計画とした。

b) 改良範囲のブロック分け

真空圧密工法による改良面積は、真空ポンプの能力上、真空ポンプ1セットあたり $2,000 \sim 2,500\text{m}^2$ といわれており、改良範囲が矩形となるようにブロック分けしている。

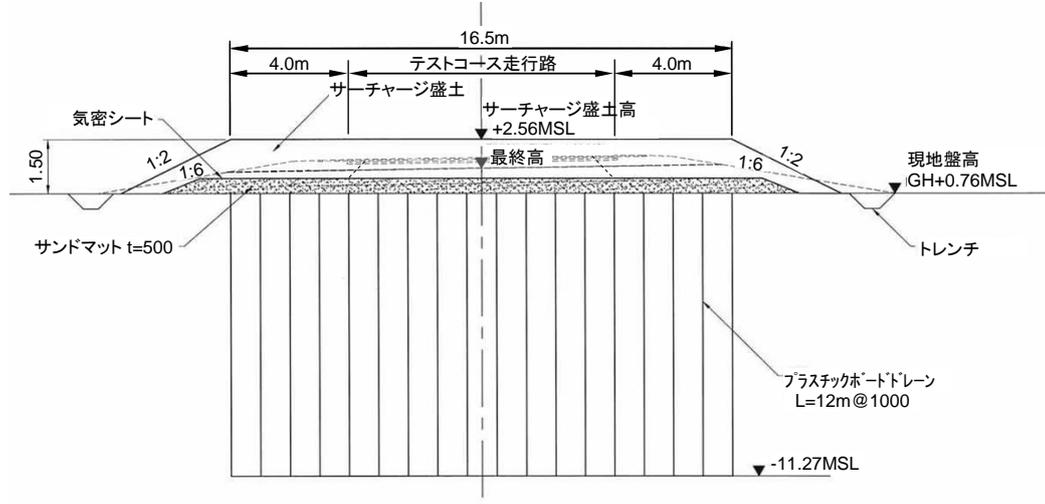


図-5 载荷盛土の形状

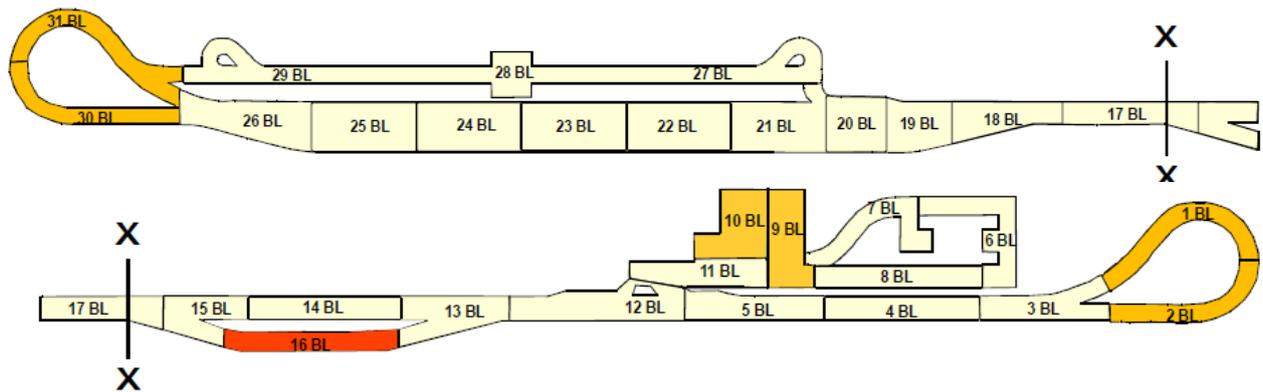


図-6 改良範囲のブロック分け

テストコースは細長く、両側にはコーナー部も有しているなどテストコース特有のレイアウトがあることから、これまでの施工実績のように矩形にブロック分けすることができない。

このため、図-6に示すように改良はさまざまな形状となったが、改良面積が $2,500\text{m}^2$ 以下となるように、 $64,000\text{m}^2$ の改良面積を31ブロックに分けた。

真空ポンプは、隣接している改良ブロックの気密シートの敷設、端部埋戻し処理が完了した時点から順次稼働させていった。

c) 改良ブロック間の処理

改良ブロックの形状は、過去の施工実績のように矩形ではなく、細長かったり、曲線状であったり、形状が不均一なため、真空圧が改良端部まで作用し、理論どおり沈下が進行するかどうか懸念された。

特に、改良ブロック接続箇所においては、埋戻し部が存在するため、不等沈下による段差が発生しやすい。

このため、改良ブロック端部においても地表面沈下板を設置し、改良ブロック全体に真空圧が均等に作用しているかどうかを確認できるようにした。

また、改良ブロック接続部については、一般部よりも载荷盛土を50cm程度高くし、载荷荷重が均等に作用するように計画した。

d) 真空ポンプの運転停止時期の判定

真空圧密工法は、真空ポンプの運転停止時期の設定を誤ると不等沈下の要因となり、将来荷重に対して残留沈下ゼロを確保することができなくなる。

従来真空圧密工法は、所定の圧密度、あるいは所定の沈下量が得られた時点で真空ポンプの運転を停止していたが、テストコースでは隣接する改良ブロックの沈下特性が異なれば不等沈下の要因となる。

このため、以下に示す条件をすべて満足した改良

ブロックのみ真空ポンプの運転を停止する計画とした。

- ①改良ブロック内に設置している地表面沈下板設置地点での圧密度が必要圧密度以上である。
- ②検討する改良ブロックだけでなく、隣接する改良ブロックにおいても必要圧密度以上である。
- ③設計载荷荷重に達して2ヶ月以上経過している。
- ④1.5以上の過圧密比が得られる。

なお、設計载荷荷重に達し、2ヶ月以上放置しても所定の圧密度が得られない場合には、追加载荷盛土を行って、沈下を促進させることもリスク管理として計画した。

(2) 施工時

a) 気密シートの漏気対策

真空圧密工法が理論どおりに改良効果を得ることができるかどうかは気密シートの溶着および端部処理がキーポイントとなる。

気密シートの溶着部については、真空吸引試験を全箇所で行い、気密性が確保されていることを確認した。しかし、真空ポンプの運転に伴い、観測計器の計測コードを保護する管や集水管との接続部といった複雑な箇所の溶着部や気密シートの埋込み部で溶着不良と思われる漏気が頻繁に見られた。

また、気密シート端部は、改良範囲の外周に深さ1mのトレンチ掘削を行い、その中にシート端部を埋込み、掘削土を埋め戻して処理するが、バンコク特有の天候の影響で水が蒸発し、表層部にクラックが発生し、外気との遮断が困難な状況となった。

このため、観測計器の保護管や集水管との接続箇所については、写真-1に示すようにコーキング材を塗布することで気密性を確保することとした。また、外周埋戻し部については表層が乾燥しないように、写真-2に示すように常時散水を行い、湿潤状態を確保した。



写真-1 コーキング材塗布状況



写真-3 集水管孔部目詰まり状況



写真-2 端部埋戻し部散水状況



写真-4 気密シート漏気チェック状況

b) 真空圧管理

気密シート敷設時には、溶着箇所すべて真空吸引検査を行って漏気がないことを確認しているが、真空ポンプの運転を開始すると、当初予想しえなかった真空圧が低下しているのに沈下が進行しない、真空圧が全く作用しないといった現象が見られた。

真空圧が作用しているのに沈下が進行しない理由としては、有孔集水管の目詰まりが原因と考え、気密シートを切り取って集水管の状態を確認した。その結果、写真-3に示すように、集水管の孔部が砂粒子で閉塞していたことが確認でき、孔の径を大きくすることで砂粒子の閉塞を防止することとした。

また、真空圧が作用しない理由としては、気密シート溶着部等の漏気が考えられた。

漏気箇所は目で確認できないため、写真-4に示すように、常に気密シート溶着箇所を散水し、漏気音を確認し、不具合があった場合には再溶着することで気密性を確保した。

8. 動態観測結果について

図-6に示した各改良ブロックにおいて、真空圧密工法や載荷盛土の施工に伴う地盤の挙動や施工時の不具合等を確認するため、地表面沈下板や間隙水圧計、真空ポンプには真空ゲージを取り付けて動態観測を行った。

図-7には真空圧が改良ブロック端部まで作用しにくいと思われた曲線部の改良ブロック31の動態観測結果を示している。

図-7に示す動態観測結果より以下のことが伺え、曲線部の改良ブロックにおいては、均等な載荷荷重が作用していることが確認できた。

- ①気密シート端部方向から載荷盛土を進めていくことで、外部との遮断効果が向上し、地盤内の真空圧が低下する傾向を示している。
- ②改良ブロックの位置に関係なく1~1.2m程度の沈下が発生しており、曲線区間にもかかわらず均等な沈下傾向を示している。すなわち、改良ブロック全体に均等に載荷荷重が作用している。
- ③真空ポンプの真空圧は 85kN/m^2 作用し、地盤内の真空圧は 65kN/m^2 と25%程度のロスがあるものの目標真空圧 60kN/m^2 は十分に確保できている。

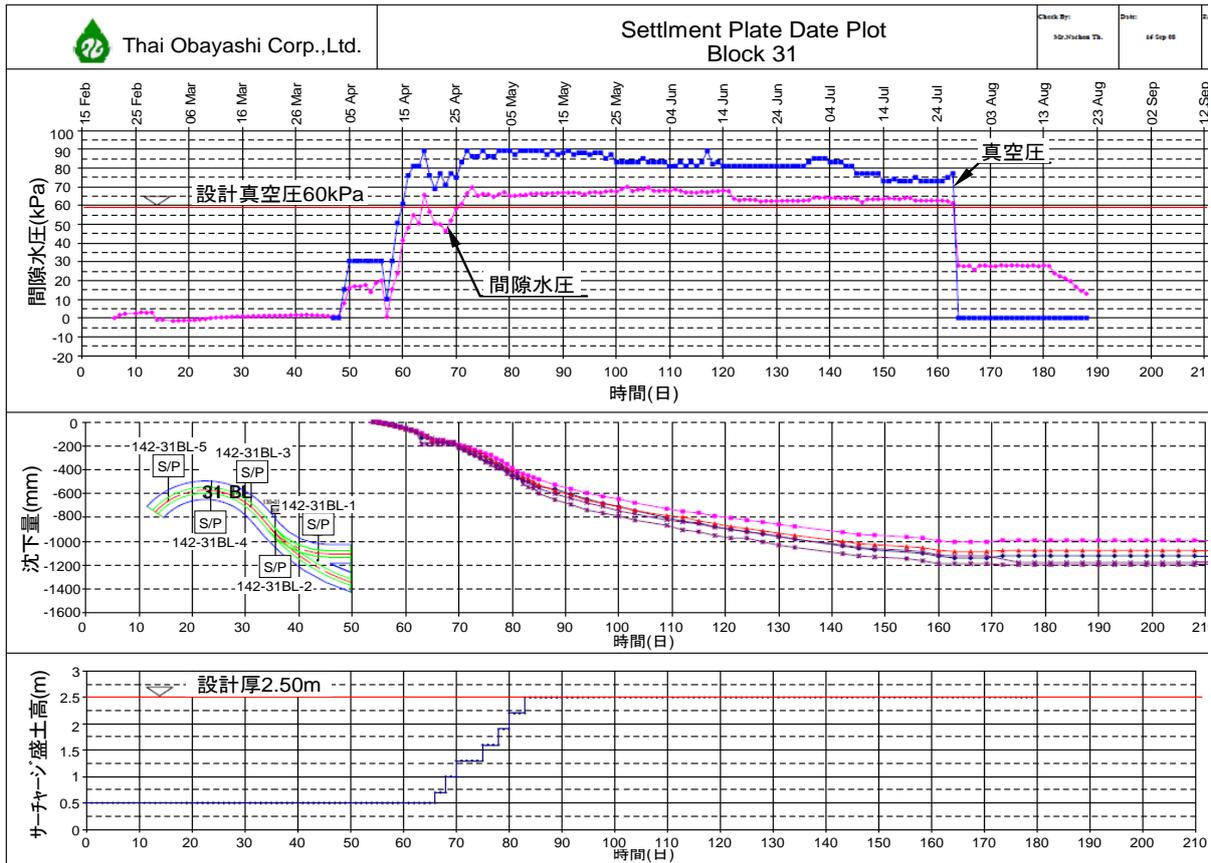


図-7 動態観測結果(改良ブロック 31)

他の改良ブロックにおいても同様な動態観測を実施しているが、均等に载荷荷重が作用していることを確認している。

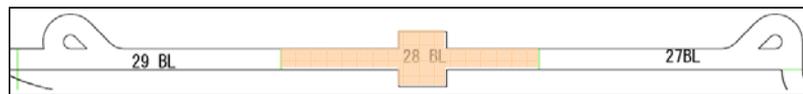
9. 真空ポンプの運転停止時期の判定について

真空ポンプの運転停止時期の判定は、前述したように4つの条件が満たされていることが必要となる。そこで、検討対象となる改良ブロック28と隣接する改良ブロック27, 29に対して、真空ポンプの運転

停止の判定を行なった結果を示す。

- ①実測沈下データを用いて浅岡法により沈下解析を行い、圧密度を求めたが、表-3に示すようにいずれの地表面沈下板設置地点においても必要圧密度が確保できている。
- ②現状の载荷荷重と真空ポンプ停止後の将来荷重に対する荷重の比率を求めたが、過圧密比は1.5以上の値が得られている。
- ③現時点での実測沈下量が将来荷重に対する沈下量を上回っている。
- ④設計载荷荷重に達して2ヶ月以上経過している。

表-3 浅岡法による沈下解析結果



沈下板No.	最終予想	3-Jul-08	3-Jul-08	沈下板No.	最終予想	3-Jul-08	3-Jul-08	沈下板No.	最終予想	3-Jul-08	3-Jul-08
	沈下量	実測沈下量	圧密度		沈下量	実測沈下量	圧密度		沈下量	実測沈下量	圧密度
	(m)	(m)	(%)		(m)	(m)	(%)		(m)	(m)	(%)
BL-27-1	-1.065	-0.907	85.2	BL-28-1	-1.143	-0.982	85.9	BL-29-1	-1.154	-0.994	86.1
BL-27-2	-1.245	-1.02	81.9	BL-28-2	-1.344	-1.149	85.5	BL-29-2	-1.237	-1.02	82.5
BL-27-3	-1.080	-0.954	88.3	BL-28-3	-1.247	-1.072	86.0	BL-29-3	-1.252	-1.009	80.6
BL-27-4	-1.230	-0.995	80.9	BL-28-4	-1.219	-1.050	86.1	BL-29-4	-1.209	-0.995	82.3
BL-27-5	-1.145	-0.951	83.1	BL-28-5	-1.195	-0.994	83.2	BL-29-5	-1.235	-1.002	81.1
BL-27-6	-1.093	-0.938	85.8	Average	-1.230	-1.049	85.3	BL-29-6	-1.101	-0.918	83.4
BL-27-7	-1.213	-0.996	82.1					BL-29-7	-1.236	-1.007	81.5
BL-27-8	-1.205	-1.001	83.1					BL-29-8	-1.213	-1.001	82.5
Average	-1.160	-0.970	83.8					Average	-1.205	-0.993	82.5

以上の検討結果より、4つの条件をすべて満足していることから、検討対象改良ブロック28の真空ポンプの運転を停止した。

各改良ブロックとも同じような方法で沈下解析を行い、条件を満足した時点で真空ポンプの運転を停止した。

10. あとがき

本工事では、改良面積64,000m²の軟弱地盤対策として、真空圧をサーチャージ荷重として設計し、将来荷重（舗装+交通荷重）に対して過圧密比が1.5以上となるように載荷荷重を求め、残留沈下量が理論上ゼロとなるような沈下対策工を適用した。

各改良ブロックから得られる動態観測結果より、真空圧密工法のサーチャージ効果が顕著に認められ、将来荷重に対する残留沈下量が理論上ゼロとなるような地盤に改良することができた。

地盤改良完了後、舗装工事に着手し、発注者への引渡し前にテストドライバーによるテスト走行が行われたが、舗装の仕上がりや平坦性については全く問題なく、テストドライバーから絶賛の声をいただいた。

現在、供用後1年以上経過しているが、舗装面には不等沈下によるクラックや段差等の不具合は発生していないことを確認しており、選定した沈下対策工の効果を認識した。

参考文献

- 1) 奥村樹郎委員長：軟弱地盤対策工法－調査・設計から施工まで－，土質工学会，1988