

## 第4章 軟弱地盤対策試験工事

ここまで、白竜湖軟弱地盤の成り立ちや土層の堆積状況、土質性状などを見てきた。白竜湖軟弱地盤は、水田の下に厚く泥炭や黒泥などの高有機質土が粘性土や砂質土と共に堆積している。その下層は粘性土と砂質土の互層に有機質土が層状に混じり、その状態が深度100 mを超えて続く。これまでの高速道路建設では、このような深い軟弱地盤に遭遇したことがなかった。本章では、この白竜湖軟弱地盤に高速道路盛土をどのように構築すべきなのか、その設計に先立ち実施した試験工事の結果を整理して示すこととする。

試験工事を計画するに当たり、軟弱地盤対策工は泥炭地盤での施工実績の豊富な真空圧密工法<sup>1)</sup>を採用し、試験盛土を構築するものとした。そのうえで、シート式真空圧密工法とキャップ式真空圧密工法を同時期に施工し、両者を比較した。また、シート式真空圧密工法は2箇所施工したうえで、一方の改良対象範囲の周囲に矢板を打設し、その効果を比較・評価した。試験盛土の挙動は、沈下板の測定による地表面（現地盤面）沈下量のほか、深層型沈下計や間隙水圧計などの挙動や周辺の水田に設置した変位杭の測量結果などを整理して評価した。施工完了後には、試験盛土上からボーリング調査を行い、試料を採取して土質試験に供し、真空圧密工法による地盤改良効果を確認した。

過去の高速道路建設では、高々30 m程度の厚さの軟弱地盤で、供用後に1 m近くもの残留沈下が生じて悩まされてきた。これに対し、白竜湖軟弱地盤は100 mを超える厚さで堆積している。これまで経験したことのない厚さの軟弱地盤に対して、対策を施したうえで盛土を構築することになるが、盛土とその下の対策を施した地盤が、さらに下層の軟弱地盤上に浮いているような状態となるはずである。結局、どれだけ対策を施しても、「その下の土層が動き始めるのではないか」という懸念を払拭しきれない。このような挙動が生じた場合は、残留沈下として表面化するはずで、高速道路の管理上問題となる可能性が高い。一方、軟弱地盤上に構築した盛土の長期沈下量を精度良く予測する方法は複数あるものの、技術的に確立されている言える状況にはない。このため、今回施工した試験盛土の将来の挙動を複数の解析手法で予測し、供用開始から20年後の沈下量を求めて、従来の設計手法と比較したうえで高速道路の本体盛土の設計方針を検討するものとした。

本章では、以上の結果を整理したうえで、最終的に決定した白竜湖軟弱地盤における高速道路の本体盛土構造の設計方針を概説する。

なお、本章で用いた施工状況等の写真については、自ら撮影したもの他、施工を担当した株式会社大林組、施工管理を担当した八千代エンジニアリング株式会社より提供を受けたものである。

4-1 計画

東北中央自動車道は、部分的に供用が進んでいるが、本稿で研究の対象とした白竜湖軟弱地盤は、建設中の南陽高畠 IC～山形上山 IC 間 24.4 km の起点となる南陽高畠 IC から約 3.2 km の範囲にあたる (図 2-2)。東北中央自動車は、白竜湖軟弱地盤を通過すると丘陵地帯となり、トンネルが連続する区間となる。最初のトンネルの起点側坑口から南に約 600 m の範囲は凝灰岩層を支持層として利用できる [2]、[3] ため、延長 552 m の橋梁を計画した。

図 4-1 は、図 3-2 4 に示した有効土被り圧と圧密降伏応力の関係について、図 3-3 に示した土層の構成比率の変化点 (STA.21+80) を参考に、白竜湖軟弱地盤の範囲を 3 つに区分して整理したものである。この区分は、図 3-2 にも示した。(a) → (b) → (c) と正規圧密状態に近づいていくことがわかる。橋梁を計画した範囲は、図中 (c) に相当し、白竜湖軟弱地盤の中でも土構造物を構築するにあたっては最も条件の厳しい範囲である。

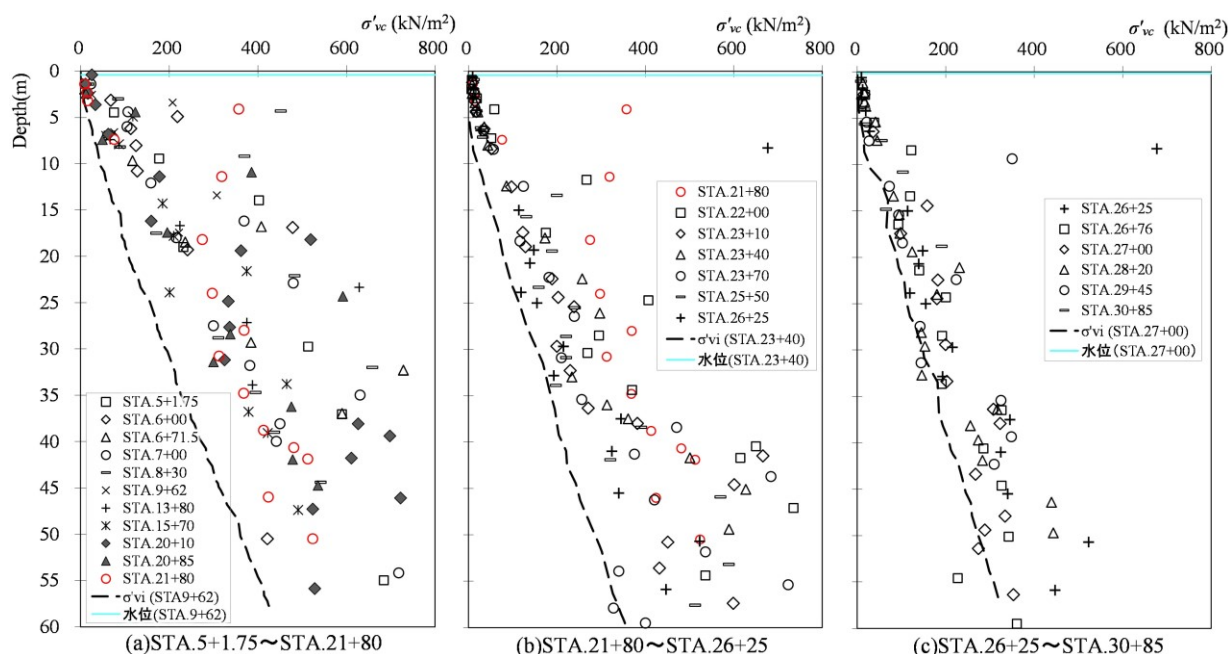


図 4-1 有効土被り圧と圧密降伏応力の関係

一方、南陽高畠 IC からこの橋梁までの間は凝灰岩層が 100 m を超える深さとなり、ボーリング調査でもその深さを特定できていない。このため、南陽高畠 IC から約 2 km の範囲は軟弱地盤対策を施したうえで、低盛土構造 (STA.7+00～STA.26+20 の平均盛土高 4.4 m, 最低盛土高 2.2 m) で通過する計画とし、試験盛土を先行施工して軟弱地盤対策の効果を確認することとした [4] (起点側で国道 13 号と 113 号の交差点を横過する必要があるため、STA.3+70 付近から約 300 m は高架構造となる。)

第 3 章で述べてきたとおり、白竜湖軟弱地盤は最上部に高有機質土が堆積し、その下は粘性土と砂質土が互層を形成しており、その間に有機質土が入り込んでいる。このような層序が、確認した範囲でどこまでも深く続いている。ただし、第 3 章で比較した限りにおいて、

高有機質土は国内各地の泥炭と、粘性土は同様に海成粘土と土質性状的に大きな違いがない。これまで各地の高速道路建設が経験してきた軟弱地盤との違いは、「どこまでも深く続いている」という点だけである。では、対策を施す範囲はどのように考えるべきなのか。

図4-2は、間隙比 ( $e$ )、圧縮指数 ( $C_c$ )、体積圧縮係数 ( $m_v$ ) の深度分布について、土層区分ごとに整理したものである。なお、 $m_v$  については、圧密降伏応力に相当する圧密圧力載荷時の値を求めたものである。

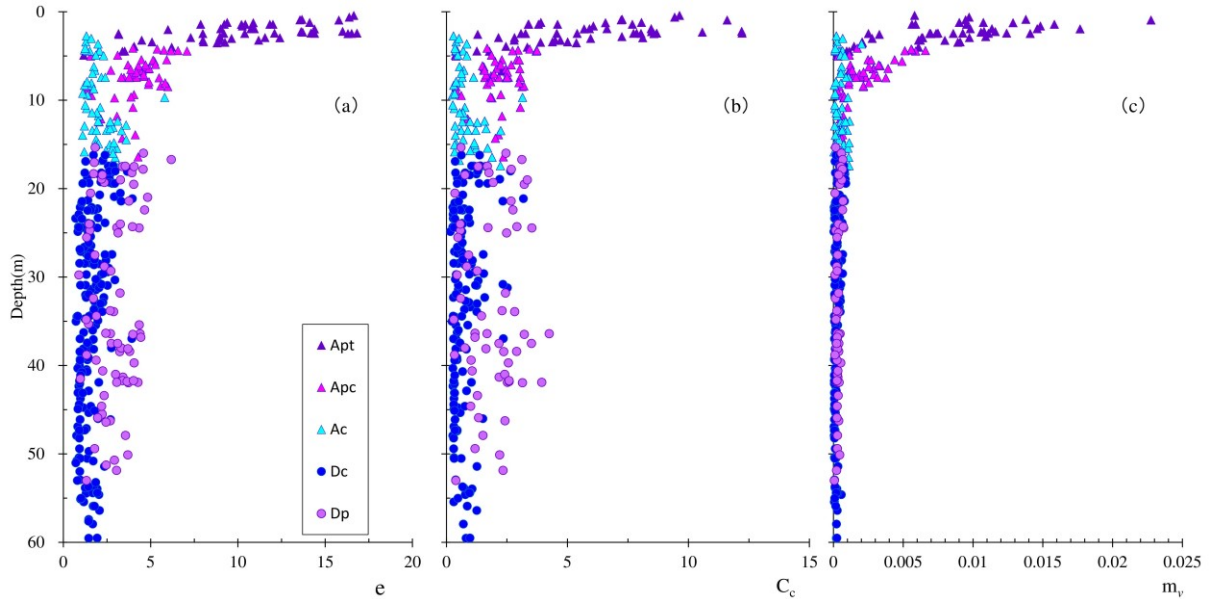


図 4-2 間隙比, 圧縮指数, 体積圧縮係数の深度分布

層厚 ( $h_0$ )、初期間隙比 ( $e_0$ )、初期圧力 ( $p_0$ ) の土層が圧力 ( $p_1$ ) で圧縮されて間隙比 ( $e_1$ ) になったとすると、沈下量 ( $S$ ) は、次式で表せる。

$$S = \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} h_0 \tag{4-1}$$

圧縮指数 ( $C_c$ ) は、

$$C_c = \frac{e_0 - e_1}{\log(p_1/p_0)} \tag{4-2}$$

であるから、沈下量 ( $S$ ) は、式 (4-3) のとおりとなる。

$$S = \frac{C_c}{1 + e_0} h_0 \log(p_1/p_0) \tag{4-3}$$

また、圧力変化 ( $\Delta p$ ) により、垂直ひずみ ( $\varepsilon_v$ ) を生じた場合の体積圧縮係数 ( $m_v$ ) は、

$$m_v = \frac{\varepsilon_v}{\Delta p} = \frac{1}{1+e_0} \frac{e_0 - e_1}{p_1 - p_0} \quad (4-4)$$

であるので、式 (4-1) より、式 (4-5) を得る。

$$S = m_v (p_1 - p_0) h_0 \quad (4-5)$$

式 (4-3) は、正規圧密状態で圧密されるとき成り立つ。また、式 (4-5) は  $m_v$  が一定であることを仮定しているが、実際には、 $m_v$  は圧密圧力に応じて変動する。さらに、両式とも一次元圧密の場合を想定したもので、白竜湖軟弱地盤のような載荷幅より圧縮層の厚さが上回るような地盤では適さない。このため、両式とも沈下量を正確に求めることはできないが、 $C_c$  や  $m_v$  は沈下のしやすさを表していることに変わりはない。

図 4-2 を見ると、最上部の Apt の  $C_c$  と  $m_v$  の大きさが卓越している。また、Apc は  $C_c$  については、その下層の Dp との差異がないものの、 $m_v$  については明らかに Apt に次いで大きい。Apt と Apc はどちらも高有機質土で、Apt は植物の繊維が未分解の泥炭、Apc は分解の進んだ黒泥に相当する。試験施工においては、この2種類の高有機質土の処理をまず主眼に置くこととした。

先に述べたとおり、白竜湖軟弱地盤は極めて厚い軟弱地盤である。完新統有機質土をすべて改良して硬化させたり良質材で置き換えたりしたとしても、その下の軟弱層が上層の荷重を受けることになり、長期的には不安要素を残すことになる。一方で、泥炭の改良については、真空圧密工法<sup>[5]</sup> <sup>[6]</sup>の適用性の高さが既に確認されている<sup>[7]</sup>。真空圧密工法は、真空ポンプで改良対象範囲を全体的に減圧すると同時に間隙水を排出して短期間で地盤を圧密する工法である。北海道での採用事例が多いため、類似した白竜湖軟弱地盤の泥炭でも適用性が高いものと考えた。また、高速道路での採用事例も報告<sup>[8]</sup> <sup>[9]</sup> <sup>[10]</sup>されており、対策工法として妥当であるものと判断した。

図 4-3 に試験盛土の平面的な位置関係を示す。試験盛土は、第3章に示した地盤状況の変化点の STA.20 付近から終点側に3工区に分けて計画した。図 3-2 に示したとおり、Area1 は図 4-1 の (a) の終点側、Area2 は (a) と (b) の境界部、Area3 は (b) の範囲に相当する。つまり、3つの工区で地盤の状況がそれぞれ異なる。最も終点側に位置する Area3 の地盤状況は試験盛土を構築する上で土質性状的に最も厳しい。また、工事用道路は終点側の赤湯トンネルの坑口直下の市道から、事業用地内を延伸してくる方法しか採れなかった。このため、盛土の構築が始まるまでの間は、中心よりやや右寄りの位置に工事用道路を設けて準

備工を進めるものとした。この工事用道路は、試験盛土の沈下挙動に少なからず影響する可能性がある。

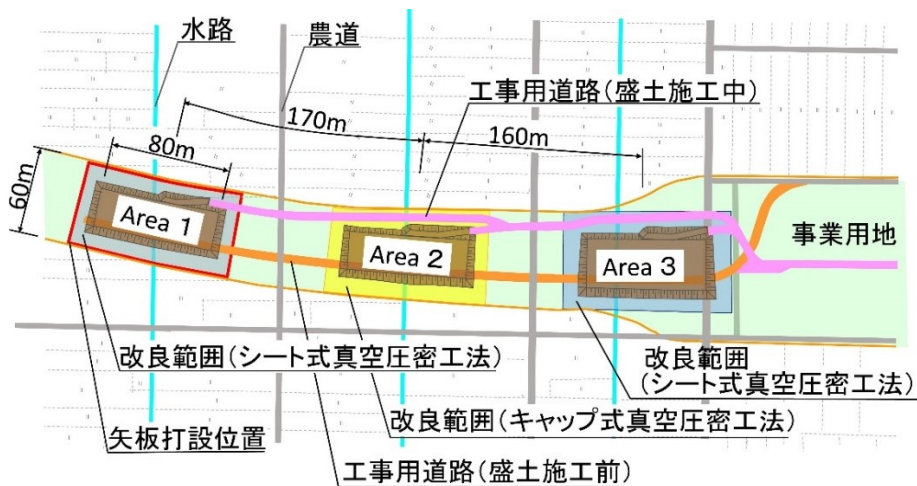


図 4-3 試験盛土の配置

図 4-4 は、それぞれのエリアで採用した工法の概要を道路横断面図に示したものである。各エリアとも改良対象層を上部の高有機質土 (Apt) と有機質粘性土 (Apc) として真空圧密工法を採用した。計画盛土高は約 3 m としている。また、改良幅は基本的に将来の側道的位置を含み、事業用地全幅員を対象範囲とした。Area1 と Area3 についてはシート式真空圧密工法<sup>[11]</sup>、Area2 についてはキャップ式真空圧密工法<sup>[12]</sup>を採用するものとし、工区間に約 70 m の離隔を確保した。鉛直ドレーンの打設深度は、供用後の沈下量を 10 年間で 0.2 m 程度に抑えることを目標に、何れの工区も沈下量が卓越する高有機質土層 (Apt) と有機質粘性土層 (Apc) を改良対象層とし、打設間隔は道路縦横断方向とも 1.0 m とした。鉛直ドレーンはいずれもプラスチックボードドレーンであるが、Area1、Area3 は複合構造遊離型で透水係数は 0.1 m/s 以上、Area2 は複合構造一体型で透水係数は 0.01 m/s 以上のものを使用している。各エリアとも改良対象層内に砂層 (As) を挟んでいる (中間砂層) ため、シート式真空圧密工法を採用した Area1 では、改良範囲の周囲に深度 10 m 付近の粘性土層 (Ac) まで矢板を打設して遮水効果を得るものとした。Area2 のキャップ式真空圧密工法では、中間砂層およびその上下 1.0 m の範囲に遮水シールを施している。このため、鉛直ドレーンの全長の約半分は遮水していることになる。なお、キャップ式真空圧密工法は、地表面付近に厚さ約 1.0 m の気密性の高い層 (負圧シール層) を必要とする。今回の試験盛土では繊維分が多く透水性が高い高有機質土層を負圧シール層として利用することになるが、当該地盤は地下水位が地表面付近にあるため気密性を確保できる可能性があるものと考えた。また、盛土の載荷重で高有機質土層が圧密されれば透水性が低下する可能性もあるため、同工法の適用性を併せて確認するものとした。

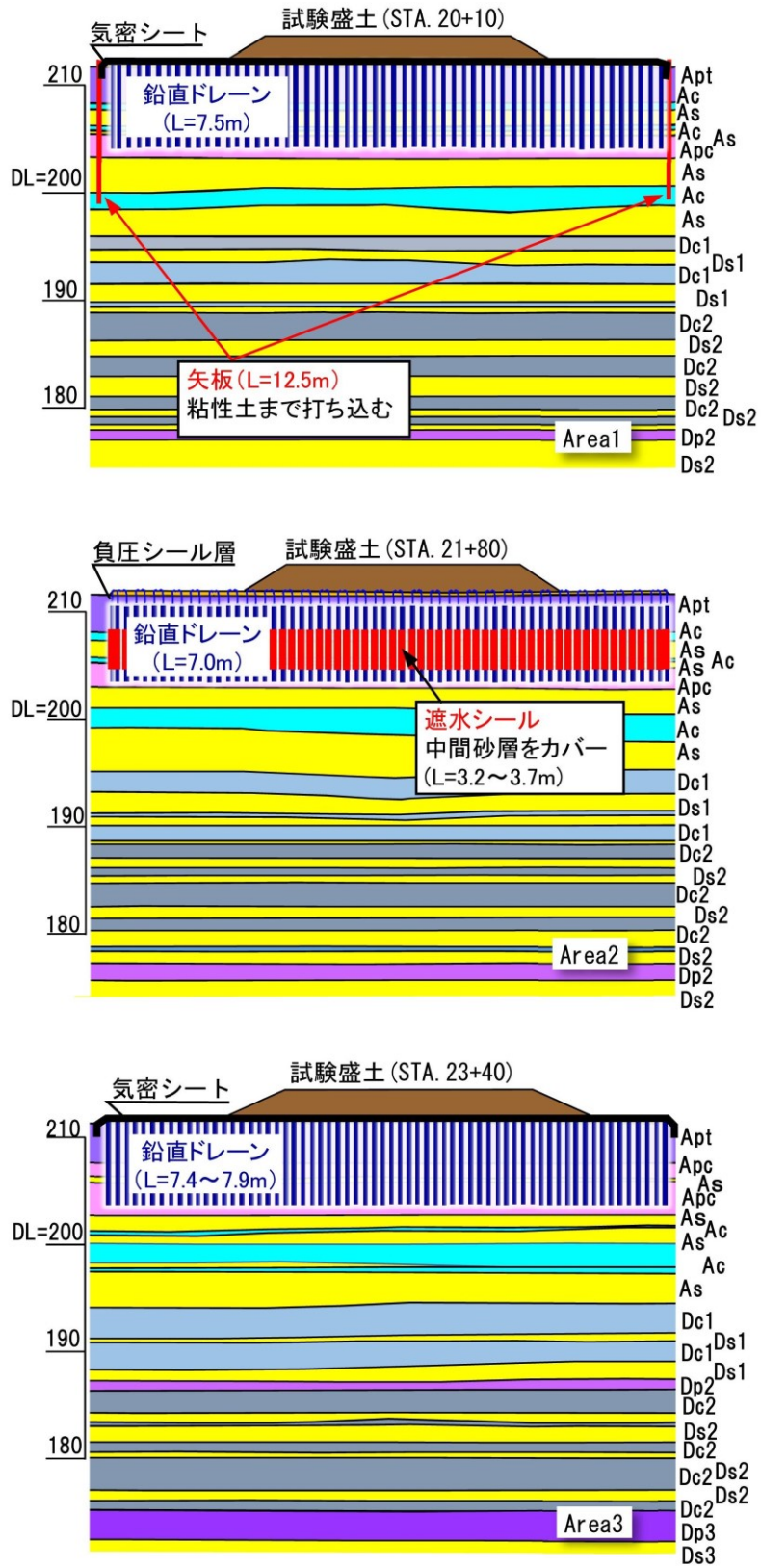


図 4-4 各工区で採用した工法の概要

## 4-2 確認すべき課題

表 4-1 に、本試験盛土の施工で確認すべき事項を整理した。真空圧密工法については、その原理を今井が分かり易く解説<sup>[5]</sup>している。これまでに多数の施工事例も報告されており、高速道路盛土への適用事例も 2000 年頃から散見<sup>[8]・[9]</sup>される。最近では舞鶴若狭自動車道での事例<sup>[9]</sup>などがあるが、実際に東北中央自動車道の当該区間で真空圧密工法を採用すると 2 km 以上の延長で採用区間が連続した状態となる。高速道路盛土における真空圧密工法の施工としてはこれまで前例がない規模である。

白竜湖軟弱地盤は、前述のとおり有機質土と粘性土が砂質土を挟みながら互層状に堆積した地盤であるため、図 4-4 に見るとおり改良対象深度内に中間砂層が存在している。その厚さは、Area1 で約 2 m、Area2 で約 2.5 m、Area3 で約 0.4 m（何れも試験盛土中央付近）と、各工区で異なっている。中間砂層の影響については、これまでも報告事例が複数ある<sup>[13]・[14]</sup>が、当該地盤の軟弱層は極めて厚く、改良対象深度の 10 倍以上の厚さの軟弱層が、さらにその下方に堆積している状況である。国内ではこのような状況の軟弱地盤を対象にした真空圧密工法の採用事例の報告が見当たらないため、沈下挙動や周辺地盤への影響を確認したうえで高速道路の本体盛土の設計方針に反映するものとした。

また、Area1 では補助工法として矢板を改良範囲外周に打設するため、その効果を主に第 Area3 と比較したうえで、引き抜き時の影響についても確認する。Area2 では負圧シール層や遮水シールの効果を他工区と比較しながら確認する。さらに、Area3 では通常は 1 日当たり 0.15 m とされている盛土速度<sup>[11]・[12]</sup>を向上させる可能性についても確認するものとした。

表 4-1 試験盛土による確認事項

工区 区間	工 法	確 認 事 項
1 (a)	シート式 真空圧密 工 法 (矢板打設)	①改良(圧密促進)効果と沈下挙動 ②矢板の効果(中間砂層の影響低減効果) ③矢板撤去の影響(周辺地盤変状の可能性) ④周辺地盤への影響
2 (a)~(b)	キャップ式 真空圧密 工 法	①改良(圧密促進)効果と沈下挙動 ②遮水シールの効果(中間砂層の影響低減効果) ③周辺地盤への影響 ④負圧シール層の効果(気密性が不十分な可能性)
3 (b)	シート式 真空圧密 工 法	①改良(圧密促進)効果と沈下挙動 ②中間砂層※の影響(負圧低下の可能性) ③周辺地盤への影響(他工区より大きくなる可能性) ④盛土速度向上の可能性確認

※:他工区より薄層(1工区:2m, 2工区:2.5m, 3工区:0.4m)

真空圧密工法は、真空ポンプで改良対象範囲全体に負圧 ( $\Delta p$ ) を作用させ、全応力 ( $\sigma$ ) が一定の状態での初期の間隙水圧 ( $u_0$ ) を低下させてポンプ稼働中の間隙水圧 ( $u$ ) を  $u = u_0 - \Delta p$  とすることで、有効応力 ( $\sigma' = \sigma - u$ ) を増加させ、圧密を促進する工法である<sup>[6]</sup>。本章ではシート式真空圧密工法とキャップ式真空圧密工法をほぼ同時に近接した工区で比較するが、このような比較はこれまで報告事例<sup>[15]</sup>が少ない。なお、今回の比較は、図4-4に示したとおり、各工区の地盤の状況が主にその構成の面で少しずつ異なっていることを念頭におく必要がある。また、シート式は気密シート下面全体を減圧するのに対し（図4-5）、キャップ式は鉛直ドレーンに真空ポンプを直接接続して負圧を掛けており（図4-6）、負圧機構に大きな違いがある<sup>[6]</sup>が、今回の試験盛土は、当該地盤における両者の適用性を把握することに主眼を置いたものであるため、負圧機構の違いについては比較の対象としないものとする。

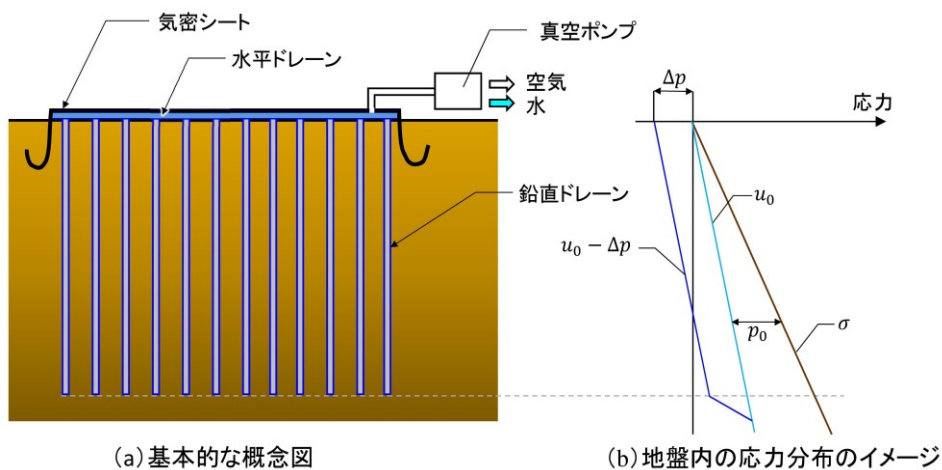


図 4-5 シート式真空圧密工法の概念図 \*1

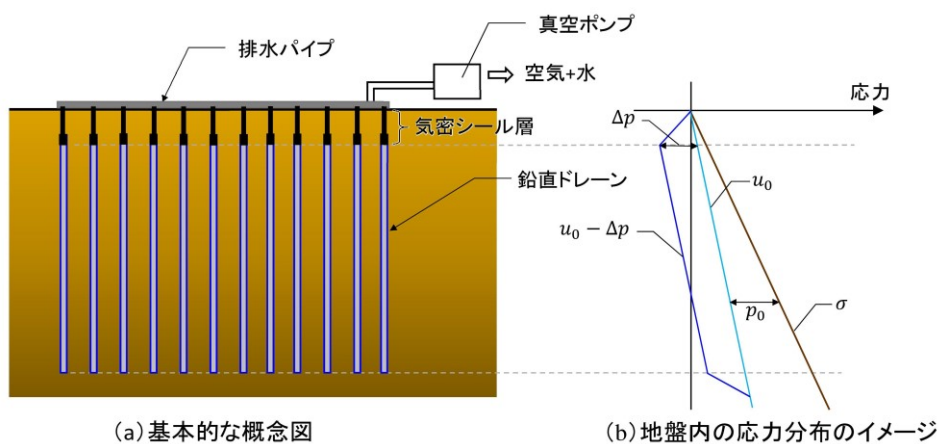


図 4-6 キャップ式真空圧密工法の概念図

\*1 実際には、気水分離タンクを気密シート下に設置して効率を向上させているが、複雑になるため、図4-5では省略して基本的な機構の概念を示した。



4-3 施工状況

表 4-2 に、負圧载荷開始日以降の各施工段階の発生日を示す。施工順序は、Area2, Area1, Area3 の順で、鉛直ドレーンの打設は、負圧载荷に先立ち 2011 年の秋から順次実施している。図 4-7 にシート式、図 4-8 にキャップ式真空圧密工法の施工状況を示す。鉛直ドレーンの打設に際し、敷網（ジオシンセティックス、引張強さ 40×40 kN/m）と敷砂（厚さ 0.3 m）により作業基盤を設けている。この作業基盤は表層排水層の機能を兼ねており、Area1 および Area3 のシート式真空圧密工法は、作業基盤の上に気密シートを敷設する。Area2 のキャップ式真空圧密工法は、作業基盤の下方さらに 1.0 m の深度に上端が位置するように鉛直ドレーンを打設するが、シート式真空圧密工法は、上端が作業基盤の上面に達するように鉛直ドレーンを打設する（図 4-5 図 4-6）。

図 4-9 は、盛土の施工状況である。盛土材料は、公共工事の残土（細粒分質礫質砂）を利用したものであるが、振動ローラ（起振力 130 kN 級）により転圧したところオーバーコンパクションが発生したため、ブルドーザ（湿地用 20 t 級）による転圧が必要となった。

図 4-10 は、各工区の盛土完了後の状況である。盛土完了後、負圧を载荷した状態で放置期間に入る。負圧停止時期は、盛土の挙動を観測しながら判断した。盛土完了から負圧载荷停止までの期間は、Area1 で 159 日、Area2 で 234 日、Area3 で 249 日であった。なお、Area1 については、負圧载荷停止後に改良範囲の端部に打設した矢板を引き抜いている。

表 4-2 各施工段階の発生日

	Area1 シート式+矢板		Area2 キャップ式		Area3 シート式	
	発生日	経過 日数	発生日	経過 日数	発生日	経過 日数
負圧载荷開始	2012. 6.11	0	2012. 4.19	0	2012.9.14	0
目標負圧到達日	2012. 6.13	2	2012. 5.24	35	2012.9.15	1
盛土開始	2012. 7.11	30	2012. 5. 2	13	2012.10.12	28
盛土完了	2012. 9. 2	83	2012. 6.12	54	2012.11.15	62
負圧载荷停止	2013. 2. 8	242	2013. 1.30	286	2013. 7.22	311
矢板撤去(開始)	2013. 4. 6	299				
矢板撤去(完了)	2013. 4.13	306				
負圧载荷開始から 600日後	2014. 2. 1	600	2013.12.10	600	2014. 5. 7	662

経過日数: 負圧载荷開始日からの日数  
 目標負圧: シート式 70kN/m<sup>2</sup>, キャップ式 60kN/m<sup>2</sup>



図 4-7 シート式真空圧密工法の施工状況  
 (①敷網工, ②Area1 矢板打設, ③ドレーン打設, ④鉛直ドレーン, ⑤水平ドレーン, ⑥気密シート,  
 ⑦初期載荷 開始 30 分後, ⑧表層排水工, ⑨盛土)

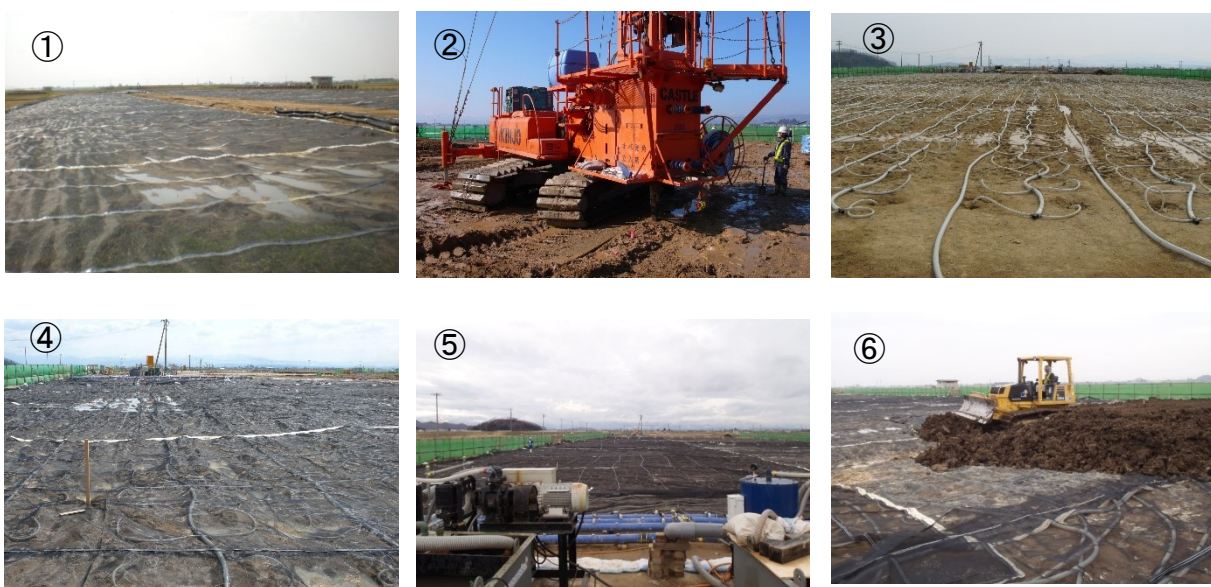


図 4-8 キャップ式真空圧密工法の施工状況  
 (①敷網工, ②ドレーン打設, ③配管, ④保護ネット, ⑤初期載荷, ⑥盛土開始)



図 4-9 ブルドーザ転圧の状況



図 4-10 盛土完了後の状況(上から Area1, Area2, Area3)