

キャップ付鉛直ドレーンを利用した真空圧密工法に関する研究

米谷 宏史* 新舎 博*
椎名 貴彦*

要 旨

キャップ付鉛直ドレーンを利用した真空圧密工法は、粘性土地盤の上部数メートルを気密保持層（シール層）として利用し、下部粘性土地盤を真空圧密によって改良する工法である。従来の真空圧密工法では、改良中の気密確保のため地盤表面を気密シートで覆う必要があるが、本工法では粘土層の気密性を利用することにより、密封シートが不要になるという特徴がある。

本論文は室内模型実験の結果および施工事例を紹介し、本工法の有効性について述べたものである。室内実験の結果、本工法の特長の一つであるシール層内の圧密挙動を把握し、設計上の課題であったシール層厚の決定方法を提案する。また載荷盛土を併用した施工事例では、施工における目的であった不同沈下対策として、効果的な改良を行うことができた。

1. はじめに

従来、浚渫に伴って発生する土砂は、埋立地などに投入・処分されてきたが、近年では新たな土砂処分場の確保が難しくなっている。限られた土砂処分場の容量を有効に活用するためには、処分場内の浚渫土を適切な方法によって圧密し、減容化を図る必要が生じている。

その中で、粘性土の圧密を促進させる有効な工法の一つに真空圧密工法が挙げられる。一般的な真空圧密工法では粘性土に作用する負圧の維持方法に気密シートを用いることが多いが、シート継手部の現位置における溶着処理や水面下などのシート端部の埋込みが困難な場所での施工性に課題がある。本工法は、これらの解決策の一つとして、ドレーン材の一端に気密キャップと排水ホースを取り付けて真空ポンプと直結し、気密キャップ部分までを粘性土層内の所定の深度に埋め込むことで、上部の粘性土層を気密保持層（以下、シール層と示す）として利用する方法^{1,2)}である。（図 - 1、2）

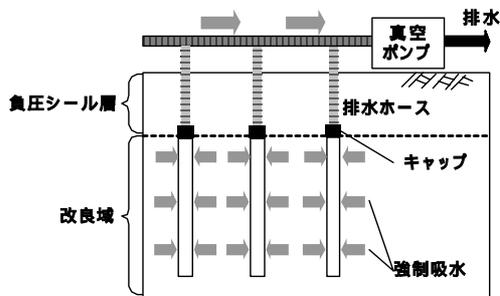


図 - 1 工法概要図

本工法の特徴として、以下の点が挙げられる。

粘性土上部をシール層として利用するため気密シートを必要としない。したがって、表層に透水性（透過性）の高い層が厚く存在する場合や水中など、気密シートの敷設・端部埋込みが困難な場合に特に有効である。各ドレーン材が直接集水管に接続されるため密封性が高く、真空ポンプによる負圧 50kN/m^2 程度を確実に作用させることができる。圧密荷重が不足する場合は載荷盛土との併用により補うことも可能である。載荷盛土などに比べ、負圧は等方的に作用するため、円弧滑りなどのせん断破壊を起こす恐れがなく、確実な改良が可能である。

その他にも、事前のボーリング調査で中間に透水性土層が見つかった場合には、あらかじめドレーンの該当部に遮水シールを取り付けることで対応できるなどの特徴がある。

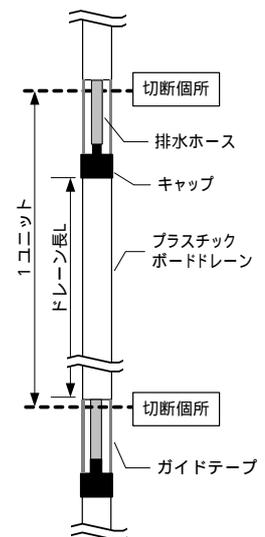


図 - 2 キャップ付ドレーン

*技術研究所

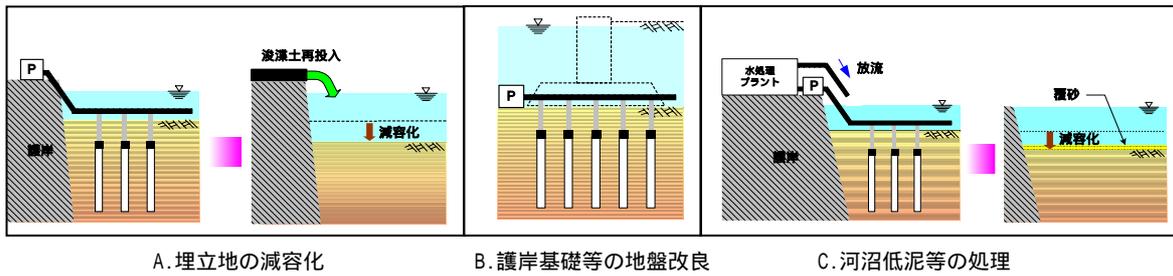


図 - 3 利用用途例

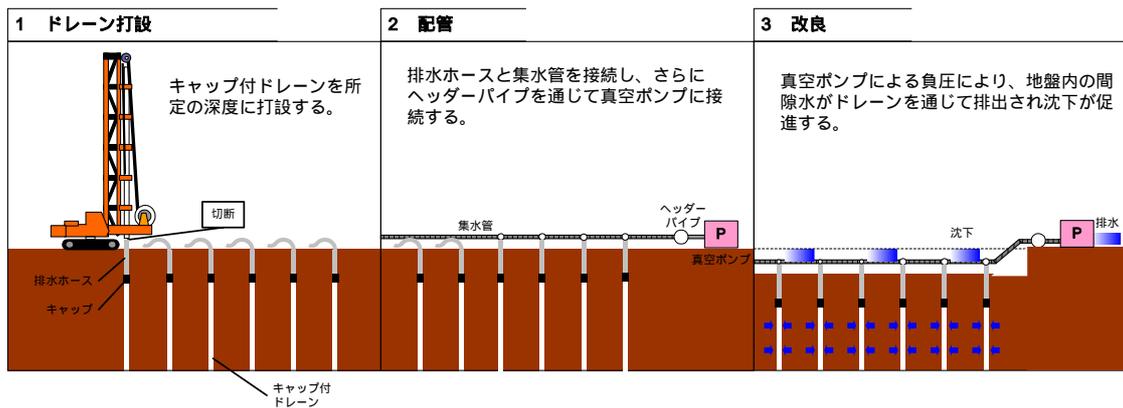


図 - 4 施工フロー

本工法は、軟弱な粘性土全般に対して用いることができ、陸上・水中を問わず施工が可能である。利用用途の一例を図 - 3 に示す。本工法は従来の真空圧密工法の利用用途に適用できることはもちろん、気密シートが不要になるなどの特徴により、従来困難であった場所や新しい用途に利用できる。本工法の施工フローを図 - 4 に示す。

2. 室内模型実験

2.1 概要

本工法の特徴であるシール層について、層内の圧密挙動を把握することを目的として、室内模型実験を行った。実験装置の概要を図 - 5 に、用いた粘性土の物理特性を表 - 1 に示す。300mm × H3m の円柱土槽に初期含水比を $w=80\%$ に調整した粘土地盤を 3 体作成し、幅 100mm × 長さ 1.0m のプラスチックボードドレーン材に気密キャップと排水ホースを取り付けて、シール層がそれぞれ 0.5、1.0、1.5m となる深度にセットした。これらの模型地盤を水位を常に一定に保ちながら、真空ポンプによりドレーン内部に負圧 (50kN/m^2 に調整) を作用させて圧密挙動を計測した。

負圧作用時の計測項目は地表面の沈下量、排水量、作用負圧、地盤内の間隙水圧である。

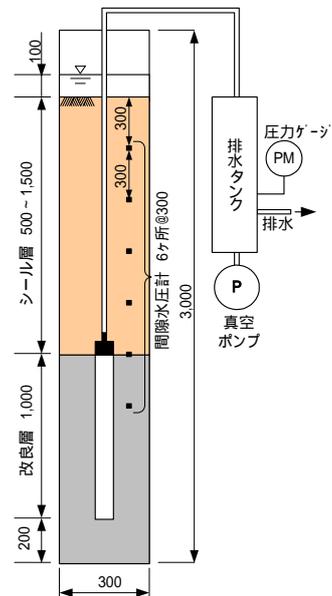


図 - 5 実験装置概要図

表 - 1 物理特性

土粒子密度 s		g/cm^3	2.65
初期含水比 w_0		%	80
コン シス テン シー	液性限界 w_L	%	65.4
	塑性限界 w_P	%	33.0
	塑性指数 I_P	-	32.4
粒度 組成	砂	%	6
	シルト	%	69
	粘土	%	25
圧密 特性	圧縮指数 c_c	-	0.424
	圧密係数 c_v	cm^2/day	100

2.2 実験結果

2.2.1 間隙水圧の挙動

シール層厚 1.5m のケースにおいて間隙水圧計を地盤中の表 - 2 に示す位置に 6 箇所設置して計測を行った。過剰間隙水圧の経時変化を図 - 6 に示す。ドレーンに近いシール層の下部（深さ 150cm）では、荷重開始直後から負圧が作用し、約 5 日後には $43kN/m^2$ に達した。また、地表面に近づくにつれ負圧が作用する時間が遅くなり、深さ 30cm に設置した間隙水圧計の圧力が減少し始めたのは荷重から 23 日経過した時点であった。今回の実験では間隙水圧計を沈下に追従するように取り付けたため、上部の間隙水圧は初め沈下に伴い一旦増加し、その後負圧により減少するという挙動を示している。最終的に作用した負圧はシール層の上部ほど小さくなっている。

シール層における圧密現象は粘性土層の上部の水圧が一定で下部の水圧が低下した場合に相当する。今回の実験において、実際にシール層に作用した負圧の等時曲線を図 - 7 に、Terzaghi の一次元圧密方程式を解いて得られる等時曲線を図 - 8 に示す。縦軸はシール層の深度、横軸は作用した過剰間隙水圧をそれぞれ無次元化したものである。実験ではシール層下部全面が完全な排水条件とならないために実測値と理論値の間に差が出ているが、両者の挙動は非常に類似している。図 - 8 によると、理論上で地表面近くに負圧が作用し始めるのは時間係数 $T_v=0.1 \sim 0.2$ である。シール層厚 1.5m の実験では、開始から 23 日目で地表面近くの負圧が減少し始めているが、このときの時間係数は $T_v=0.1$ であり、理論とほぼ一致している。

表 - 2 間隙水圧計の設置位置

No.	深さ	備考
	30cm	シール層
	60cm	
	90cm	
	120cm	
	150cm	
	180cm	改良域

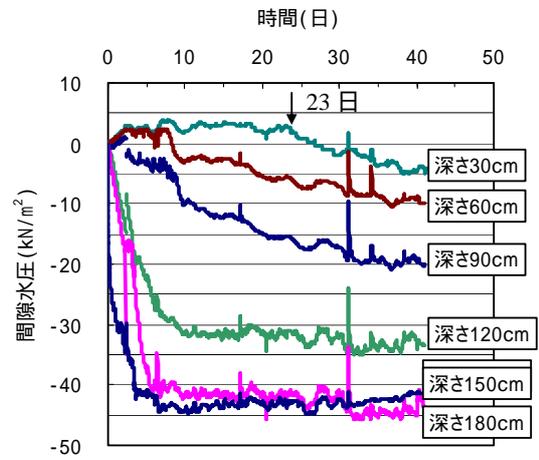


図 - 6 過剰間隙水圧の経時変化

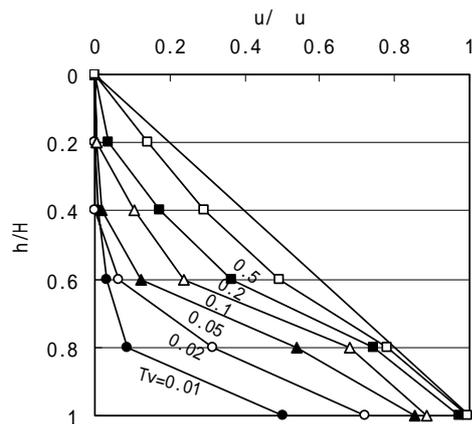


図 - 7 等時曲線（実測値）

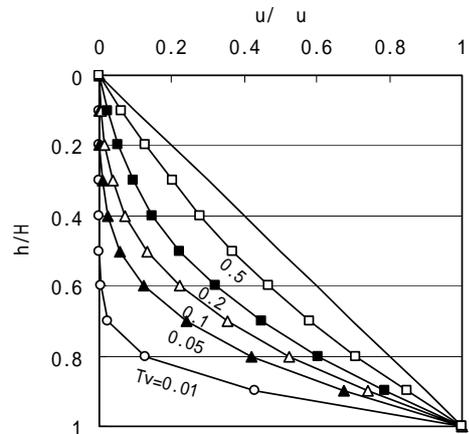


図 - 8 等時曲線（理論値）

2.2.2 時間～沈下量の関係

実測データを基に双曲線法によって推定した最終沈下量と、図-9のように応力状態を仮定し、Cc法により算定した沈下量とを比較した結果を表-3に示す。理論値と比較すると実測値の方がやや小さい傾向にある。

また、 t_{80} および時間～沈下曲線について、実測値と理論値を比較したものを表-4および図-10に示す。理論曲線は、前記のCc法による沈下量をもとに、シール層は図-8に示した三角形応力分布の時間～圧密度関係を、改良域はBarronの理論によりそれぞれ求めて重ね合わせたものである。両者の挙動は比較的良く一致しているが、圧密度が80%に達する日数は、実測値の方が理論値よりやや遅れる傾向がある。

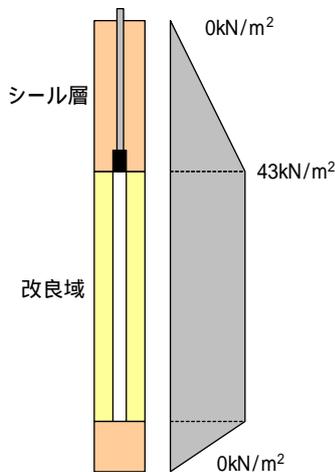


図-9 負圧の理論分布

表-3 最終沈下量の比較

実験ケース	シール層厚	最終沈下量	
		実測値	理論値
	0.5m	0.26m	0.27m
	1.0m	0.30m	0.32m
	1.5m	0.37m	0.39m

双曲線法により算出

表-4 圧密度80%に達した日数 t_{80} の比較

実験ケース	シール層厚	圧密度80%に達した日数 t_{80}	
		(改良域+シール層)	
		実測値	理論値
	0.5m	4.5日	4.0日
	1.0m	8.2日	7.3日
	1.5m	12.0日	11.0日

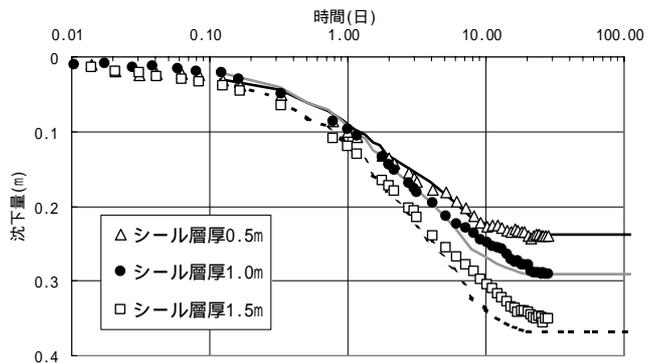


図-10 時間沈下曲線

2.2.3 排水量と沈下量の関係

沈下量と排水量について測定した結果を図-11～13に示す。累計排水量は流量を土槽断面面積で割って高さに換算したものである。始め排水量と沈下量とは一致しているが、ある時間から排水量が沈下量を上回り、沈下がほぼ終了した後も一定の流量で排水が継続した。これは地表面からの浸透流が生じたためである。

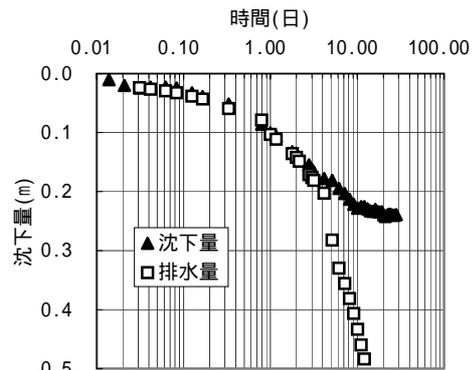


図-11 シール層厚0.5m

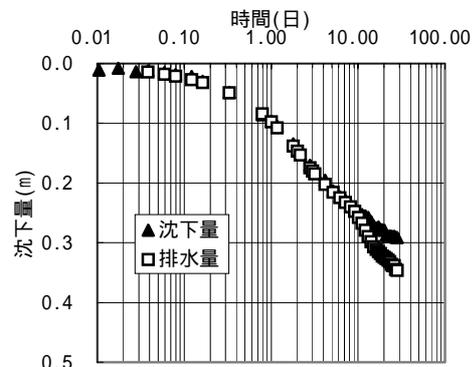


図-12 シール層厚1.0m

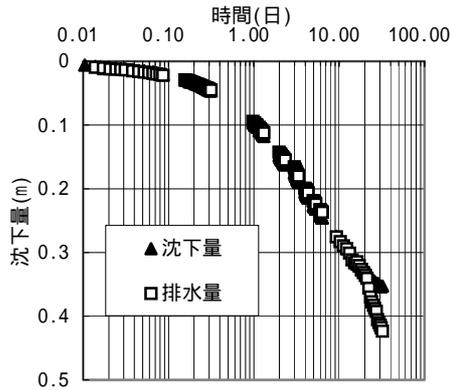


図 - 1 3 シール層厚 1.5m

浸透流が発生した時点でのシール層の時間係数と透水係数についてまとめたものを表 - 5 に示す。いずれのケースでも浸透流が発生した時点でのシール層の時間係数は $T_v=0.1$ 程度であり、負圧の伝播がシール層上部まで達した時点と一致することが分かる。また、この時の実験での透水係数と事前の変水位透水試験で求めた透水係数とを比較すると、前者は後者の 2~4 倍程度大きくなっているという結果が得られた。

表 - 5 浸透流の発生と時間係数、透水係数の相関

実験ケース	シール層厚	浸透流が生じた時間	時間係数 T_v	実験時の透水係数 ¹ (cm/sec)	透水試験による透水係数 ² (cm/sec)
	0.5m	3日	0.12	3.1×10^{-6}	7.0×10^{-7}
	1.0m	12日	0.12	1.7×10^{-6}	
	1.5m	23日	0.1	2.0×10^{-6}	

1: 水頭差を負圧、浸透距離をシール層厚として算出
2: 試料土を含水比80%に調整し、変水位透水試験を実施

2.3 まとめ

真空圧密工法における粘性土の気密保持効果を把握するために模型実験を行った。その結果、以下の結論を得た。

シール層内での負圧は、ドレーン近傍から徐々に大きくなり、最終的には三角形分布となった。

最終沈下量、時間~沈下曲線については、土中の間隙水圧の低下分を圧密圧力として算出した理論値とほぼ一致した。

排水量は最初沈下量と等しいが、 $T_v > 0.1$ を超えた辺りから排水量が沈下量を上回るようになる。これは負圧が地表面に到達し、その後、浸透流が発生するためと考えられる。

変水位透水試験で求められた透水係数よりも、本模型実験における透水係数はその 2~4 倍程度大きくなった。

3 シール層厚の算定方法

前章の模型実験の結果より、シール層内の圧密挙動をおおいた把握することができた。この結果を踏まえ、シール層厚の決定方法を示す。

3.1 算定手順

シール層は、改良域が目的とした圧密度に達した時点で、シール層も同等かそれ以上の圧密度に達するように層厚を決定する必要がある。シール層内の圧密挙動は、応力が三角形に分布する場合の圧密方程式の解とほぼ一致することが実験より明らかとなっており、以下の手順により層厚を算定する。

(1) 改良日数の算定

改良域の圧密期間は、Barron の理論を用いて求める。

Barron の解
$$U = 1 - \exp\left\{-\frac{8T_h}{F(n)}\right\}$$

ただし、

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot \log_e n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$$n = \frac{d_e}{d_w}$$

ここに、 d_w : ドレーンの換算直径
 d_e : 等価有効円の直径
 T_h : 改良域の時間係数

改良日数

$$t = \frac{d_e^2}{C_v} T_h$$

ここに、 C_v : 圧密係数

(2) シール層の圧密度

応力が三角形分布の場合の圧密方程式を解くと、シール層の圧密度と時間係数は表 - 6 の様に表される。

表 - 6 シール層の時間係数と圧密度

T	0.2	0.3	0.4	0.5
圧密度	67.4%	74.7%	80.0%	84.5%

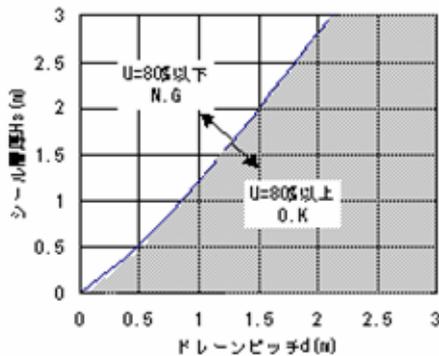
例えば、目標とする改良域の圧密度が 80% の場合、シール層の圧密度が 80% に達する時間係数は 0.4 となり、次式より必要なシール層厚 H_s が計算される。

$$\text{シール層厚 } H_s = \sqrt{\frac{t \cdot C_v}{T}}$$

ここに、 T : シール層の時間係数
($U=80\%$ の場合 $T=0.4$)

シール層厚がこれより小さければ、改良域が圧密度80%に達した際にシール層の圧密度も80%以上に達することになる。

上式を用いて計算した一例を図-14に示す。圧密係数 $C_v=100$ (cm^2/day) の場合、ドレーンの打設間隔が1.0m に対してシール層厚が1.3m 未満であれば、改良日数内にシール層の圧密度も80%に達することになる。



計算条件

ドレーン断面形状	幅 B	10	(cm)
	厚 t	0.3	(cm)
圧密係数 C_v		100	(cm^2/day)
圧密度		80	(%)

図-14 シール層厚の計算例

以上の方法により、シール層として確保できる最大の層厚を算定することができる。その層厚よりも薄くなるほどシール層の圧密は速く進行し、改良後により高い圧密度に達する。

(3) 排水量と排水ポンプの容量

シール層が極端に薄くなると地表面からの浸透流が多くなり、改良域に十分な負圧が作用するのに時間がかかる、または、作用する負圧が減少するといった現象が生じることが懸念される。したがって、排水ポンプの容量に応じた、最低限必要なシール層厚を以下の手順により算定する。

改良により地盤から排出される総排水量は、圧密による排水量と、浸透流による排水量の和で表される。圧密による排水量 Q_1 は C_c 法および Barron の理論から、また浸透流による排水量 Q_2 は次式により求めることができる。

$$Q_2 = k' \times \frac{h}{H_{s2}} \times A$$

ここに、 k' : 現場透水係数

h : 水頭差

H_{s2} : シール層厚

A : 改良面積

実験結果によると、浸透流が生じるのはシール層の圧

密度が時間係数 $T_v=0.1$ 前後に達した時点であり、これから時間-排水量関係を求めることができる(図-15)。シール層が厚い場合、浸透流が発生する時間は遅く、また浸透流量も少ない。逆にシール層が薄い場合は圧密の早い段階で大きな浸透流が生じ、総排水量が多くなる。排水ポンプの容量に対し、総排水量が小さくなるようにシール層厚を決定する必要があり、今後の課題と考えている。

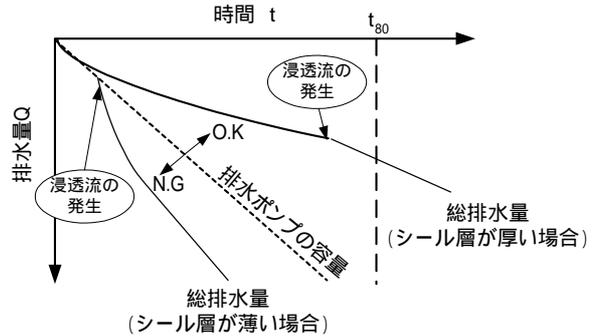


図-15 排水量とポンプの容量

4 施工事例

4.1 概要

ニューマチックケーソン築造時の不同沈下対策として本工法を適用した施工結果を以下に紹介する。工事は、真空圧密と載荷盛土を併用して行われた。概要図を図-16に、地盤条件を表-7示す。圧密改良の対象となるのは腐植土層(Apt)であり、改良区域内に2.0m~5.8mの範囲で分布している。腐植土層は含水比400%程度で、繊維質を多く含んでいる。周囲を矢板で仕切られた改良域(面積約600 m^2)に、キャップ付ドレーンを1m間隔の正方形配置で打設した。ドレーン打設・配管後、真空ポンプの稼動を開始し、2日間の試運転後、盛土を0.9m/日の盛立速度で高さ3.2mまで施工した。工事中は、改良域の地表面の沈下量、排水タンクにおける排水量、載荷負圧および改良地盤内の間隙水圧の測定を行った。図-17に計測位置を示す。

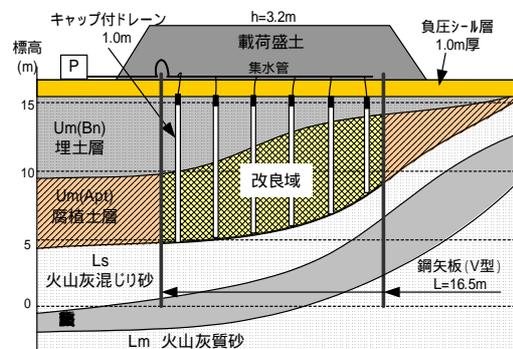


図-16 対象地盤の概要図

表 - 7 地盤条件

土層	深度(層厚)	N値	含水比(%)	Cu(kN/m ²)
Bn(埋土)	~ 1.9m(1.9m)	3~4	-	-
Apt(腐植土)	~ 6.9m(5.0m)	2~4	400	19.1
Vm(火山灰質砂)	~ 8.8m(1.9m)	8~11	46	17.4
Ls(火山灰混じり砂)	~ 14.0m(5.2m)	7~17	81	7.1

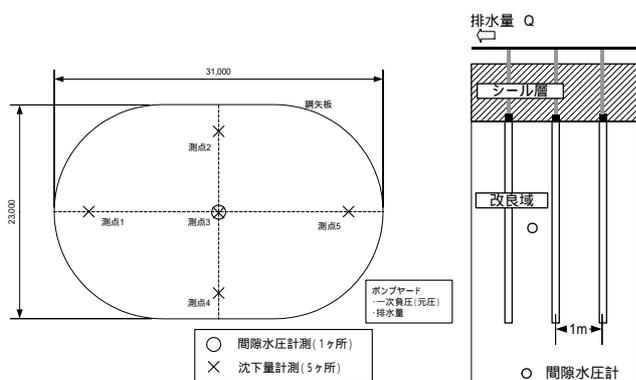


図 - 17 計測位置

4.2 改良結果

4.2.1 負圧

真空ポンプ近傍での負圧の経時変化を図 - 18 に示す。今回の施工において真空ポンプは 2 台用いられており（改良面積 300m²/台）それぞれにゲージをとりつけて計測を行っている。载荷開始直後は約 60 kN/m² で一定となったが、15 日以降から徐々に上がり、最終的には約 70 kN/m² となった。10 日前後までは改良域内の帯水層からの排水量が非常に多かったため、負圧が十分に作用しなかったものと思われる。ドレーン先端での間隙水圧の挙動を見ると、負圧载荷直後からほぼ 50kN/m² 以上の負圧が常時作用していた。盛土撤去後、集水管を観察したところ、排水ホースが破損している所が数箇所見つけたが、改良期間中負圧は維持された。盛土による密封効果により改良中の負圧が保たれたものと思われる。

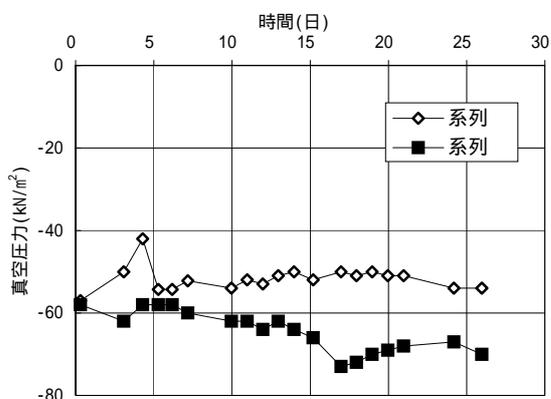


図 - 18 载荷負圧の推移

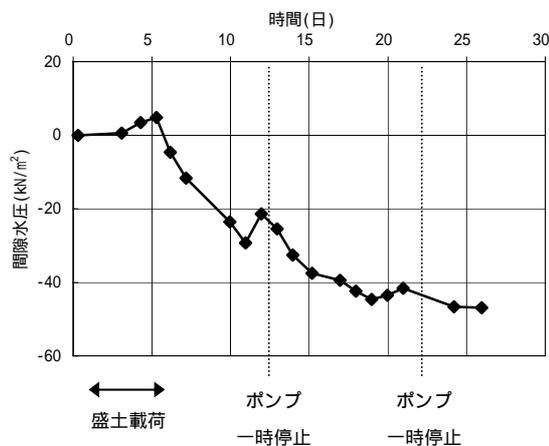


図 - 19 間隙水圧の挙動

4.2.2 間隙水圧

改良域における間隙水圧の挙動について図 - 19 に示す。本工事は負圧 + 载荷盛土による改良であり、初めは盛土による間隙水圧の増加が見られるが、その後間隙水圧が消散していき、最終的には負圧が作用することにより 50kN/m² まで低下している。

4.2.3 沈下挙動と排水量

実測された沈下の挙動と改良面積あたりの排水量（以下、排水量と示す）を図 - 20 に示す。30 日経過時点での平均沈下量は約 50cm であった。施工中の圧密度は双曲線法によって推定する方法を用いたが、盛土载荷後約 30 日で圧密度は各側点とも 90% に達しており、各測点における残留沈下量の差の最大値も 2cm 程度に収まると判断されたため、負圧载荷を止めて改良を終了した。

排水量については、通常、改良初期段階では沈下量 = 排水量の関係がほぼ成り立ち、载荷負圧が滞水層又は地表面に達した時点から定常浸透流が発生して排水量が沈下量を上回る様になる。今回の施工では、かなり早い段階から排水量が沈下量を上回っており、打設したドレーンが改良域下部の砂層に非常に近接してしまったため地下水を吸水したものと思われる。今回の施工ではポンプの容量に余裕があったため载荷負圧が目的の値を下回るまでには到らなかったが、今後は事前の調査を綿密に行い、精度良く滞水層の位置を特定し、打設下端を定めることが望ましいと思われる。

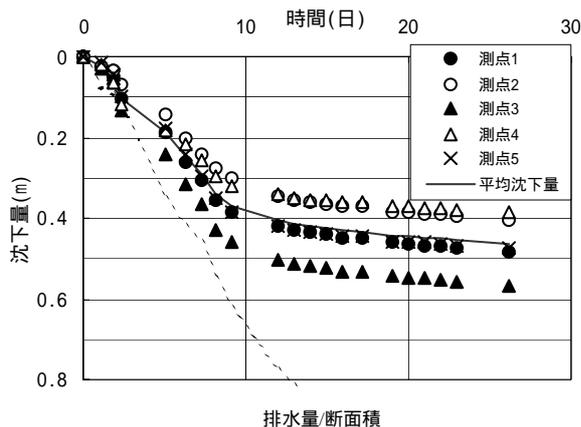


図 - 2 0 沈下挙動と排水量

4.2.4 改良による強度増加

改良前後の腐食土層の含水比と排水せん断強度 (cu) をまとめたものを表 - 8 に示す。今回の工事で載荷した圧力 (p) は盛土 + 負圧で 116kN/m² であり、圧密改良による強度増加率 m (= cu / p) を求めると約 0.3 となり一般的な値を示している。含水比については、およそ 400% から 340% に低下しており改良効果が認められる。

表 - 8 改良効果のまとめ

物性	改良前	改良後
w(%)	396.2	339.2
Cu(kN/m ²)	19.1	57.1

4.3 沈下量の比較

各測点における Cc 法、Barron の理論による予測と、実測値との比較を表 - 9 および図 - 2.1 に示す。先に述べたように、シール層の負圧は三角形分布として沈下曲線を求めた。双曲線法によると改良終了時の圧密度は各測点とも約 90% であったため、Cc 法による沈下量の 90% と比較した。その結果、各測点とも沈下量の差は 1 割程度であり、現地ではほぼ理論通りの沈下が生じていると思われる。

表 - 9 沈下量の比較

測点	実測値 S	Cc 法による S ₉₀ (S _f)
1	0.49m	0.49m(0.55m)
2	0.41m	0.44m(0.49m)
3	0.57m	0.58m(0.65m)
4	0.39m	0.44m(0.49m)
5	0.48m	0.54m(0.60m)
平均	0.47m	0.50m(0.55m)

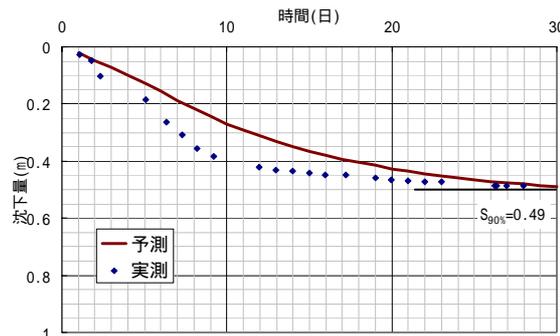


図 - 2.1 沈下挙動の比較 (測点 1)

4.4 まとめ

ニューマチックケーソン築造時の不同沈下対策に、載荷盛土併用型の真空圧密工法による地盤改良を行った。その結果、以下の結果が得られた。

載荷負圧は常にほぼ 50kN/m² 以上を保ち、間隙水圧も初期値 (盛土前の静水圧) を 0 とすると、最終的に載荷負圧の 50kN/m² まで消散しており、所定の圧力 (盛土 + 負圧) が対象地盤に作用していたと判断される。施工時は双曲線法による圧密度の管理を行って、圧密度 90% 以上が得られた時点で改良を終了した。改良域の平均沈下量は約 50cm 程度であり、改良日数は約 30 日程度であった。(ドレーンピッチ 1m の正方形配置) 載荷圧力 116kN/m² を載荷した結果、改良による強度 (粘着力 Cu) の増加は 38kN/m²、強度増加率 m = 0.3 の改良効果が得られた。

Cc 法、Barron の理論により、十分な精度で沈下を予測することができた。しかし今回は周辺が矢板で仕切られており、一次元状態に近いケースである。周辺部の連れ込み沈下が起こるような場合は、別途沈下量を検討する必要があると思われる。

5 結論

室内実験を通じてシール層内の圧密挙動を把握することができ、シール層厚の決定方法を提案した。また施工の結果からも十分な改良効果が得られており、本工法の有効性が示された。今後は大規模施工に向けた更なる技術開発を行っていききたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 渡 義治、新舎 博、林 健太郎 「プラスチックドレーン材を利用した真空圧密工法に関する実験」地盤と建設、vol.2、No.1、pp33-40、1984
- 2) 高野 泰、新舎 博、渡 義治、佐藤 秀輝、「キャップ付き鉛直ドレーンによる真空圧密工法実験」、第 23 回土質工学研究発表概要集、pp2133-2134、1988