

ラテラルドレーン工法による浚渫粘性土減容化工事の施工

松下 弘志* 新舎 博**
 小久保 裕** 西井 博明***
 宝蔵寺 保典*** 向井 珠秀***

要 旨

ラテラルドレーン工法は、浚渫粘性土を埋立処分地に投入することによって形成される超軟弱地盤内に、プラスチックボードドレーンを多段で水平に埋設し、埋設したドレーンの一端から真空ポンプを用いて負圧を作用させ、地盤内に含まれる多量の間隙水を強制的に脱水することにより、比較的短期間で超軟弱地盤の圧密改良を行うものである。

今回、広島県五日市地区港湾整備事業において、建設発生土の受入土量の増大を図るため、バージンローダー船によって投入された軟弱な浚渫粘性土をラテラルドレーン工法により圧密改良するという、大規模な浚渫粘性土の減容化工事を施工した。その結果、初期粘性土層厚4.8mおよび2.4mに対し、平均で約1.0mおよび0.6mの圧密沈下を生じさせ、約160,000m³の減容化を行うことができた。また、現地実験により長大ドレーンのウェルレジスタンスの評価を行った結果、断面の大きなドレーン材を使用した場合、ウェルレジスタンスによる沈下の遅れは比較的小さいことが判った。

1. まえがき

近年、埋立処分地の新規立地が工費的にも場所的にも制約されつつある。また、従来より埋立処分地の盛土材として使用されている山土が不足してきており、省資源化、建設発生土の有効利用などが港湾工事における大きな課題となっている。したがって、埋立処分地の受入土量の増大とそれによる盛土量の低減が、この課題に対する1つの方法と考えられる。

ラテラルドレーン工法は、水平ドレーンと負圧の作用によって超軟弱地盤内の間隙水を強制的に脱水することにより、載荷盛土などを行わずに、比較的短期間のうちに圧密改良することを目的としたものである。本工法は昭和57年に基礎研究に着手し、現場実験等を経て工法として確立された。本報文は、広島県五日市地区港湾整備事業において、ラテラルドレーン工法による大規模な浚渫粘性土の減容化工事を行うに当たり、大規模施工システムを新たに開発し、施工方法および地盤改良効果などで良好な結果を得たので、ここに報告するものである。

2. 工事概要

2.1 施工場所

五日市地区は、広島市佐伯区吉見園地先に位置し(図-1)、国および広島県が流通拠点港湾の整備、港湾環境の整備などを目的として港湾整備事業を推進している地区である。ラテラルドレーン工法による浚

渫粘性土の減容化工事は、図-2に示す計画平面図のうち処理区3において施工した。また、処理区2においても同様の施工を行っている。

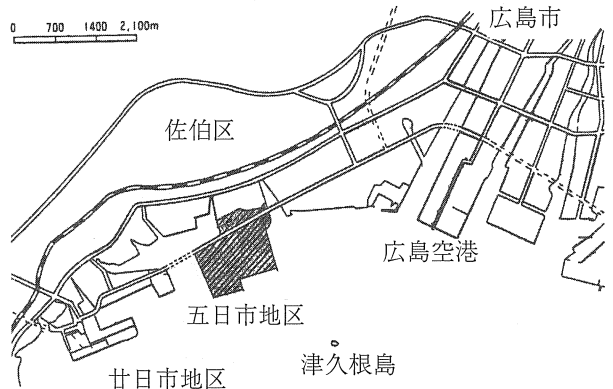


図-1 施工場所

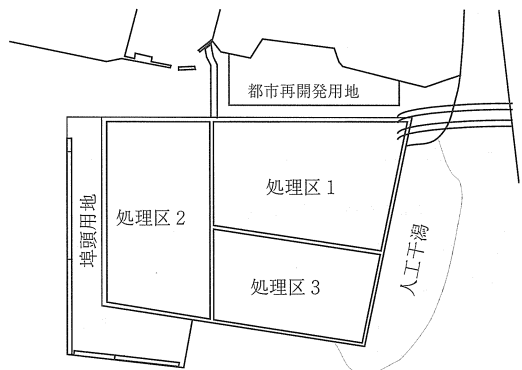


図-2 五日市地区港湾整備事業の計画平面図

*技術研究所 **第一技術部 ***中国支店

2.2 工事の規模

処理区3の改良対象面積は、護岸の裏埋土の内側約200,000m² (570m×350m)である。また、改良深度は海側4.8m、陸側2.4mである。図-3に処理区3の平面図を、図-4にドレーンの埋設縦断面図を示す。また、表-1にドレーンの埋設数量を示す。

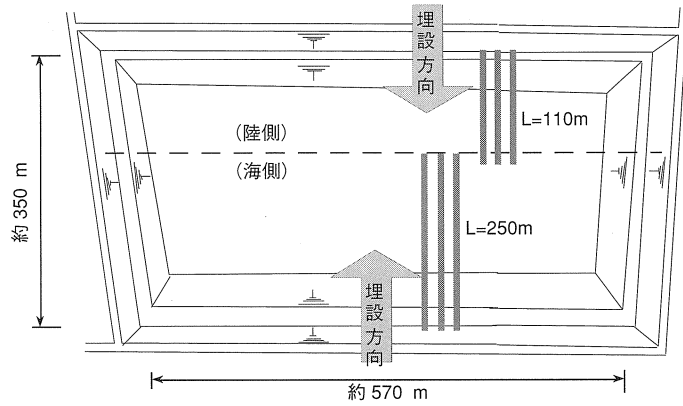


図-3 平面図 (処理区3)

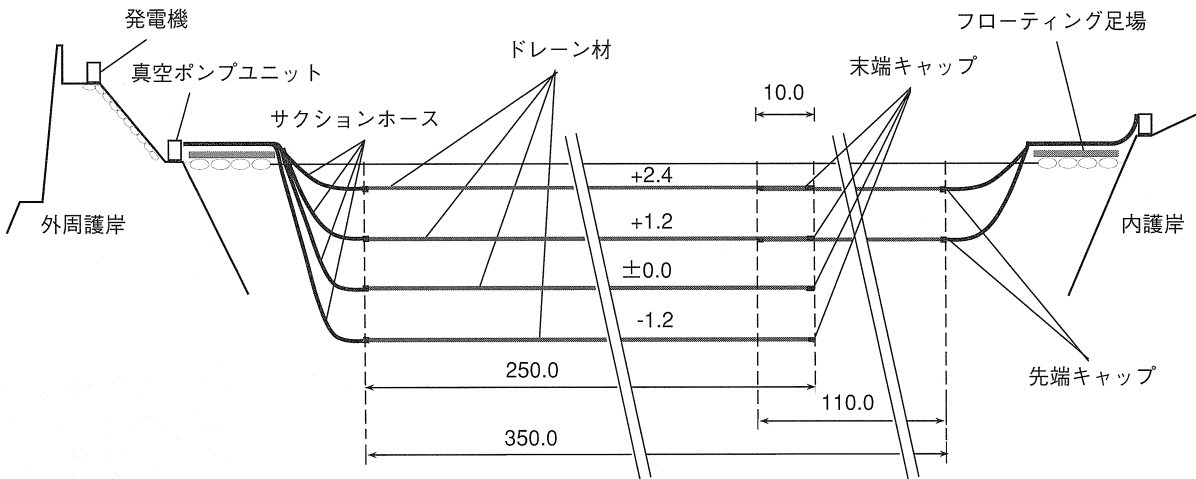


図-4 ドレーンの埋設縦断面図

表-1 ドレーンの埋設数量

施工位置	1本当り長さ (m)	埋設本数 (本)	ドレーン埋設延長 (m)	摘要
海側	250	1,568	392,000	使用ドレーン材 100×10
	125	208	26,000	
	海側計	1,776	418,000	
陸側	140	112	15,680	使用ドレーン材 100×10
	110	752	82,720	
	100	48	4,800	
	80	32	2,560	
	陸側計	944	105,760	

2.3 改良対象土の土質

浚渫粘性土地盤の沈下量および沈下速度の計算に用いる改良対象土の土質条件は、ボーリング調査の結果から設定した(表-2)。また、改良層厚は含水比調査およびコーン貫入試験結果から、含水比100%以上(液性限界約105%)、コーン貫入抵抗qc=1.5kgf/cm²

(=147kPa)以下を目安として設定した。なお、圧密終了後の間隙比は、 $e \sim \log p$ 曲線より圧密圧力 $p = 0.5\text{kgf/cm}^2 (=49\text{kPa})$ に対応する間隙比と設定した。

表-2 土質条件

改良対象層厚 (H)	海側 4.8 m
	陸側 2.4 m
土粒子の比重 (Gs)	2.67
初期含水比 (Wo)	160 %
液性限界 (WL)	105 %
塑性限界 (WP)	35 %
初期間隙比 (e0)	4.27
最終間隙比 (ef)	2.20
圧密係数 (Cv)	28.8cm ² /day
圧縮指数 (Cc)	1.2 ~ 1.5
粒度組成	礫分 0 ~ 1 %
	砂分 0 ~ 11 %
	シルト分 32 ~ 50 %
	粘土分 49 ~ 63 %

2. 4 施工方法

2. 4. 1 施工機械

(1) ハードウェア

①使用機械

表-3 に使用機械の一覧表を示す。主要機械はドレーン埋設台船、台船にドレーン材を積み込むためのクローラクレーン、台船の牽引・引き戻し・軌道保持のためのウインチおよびアンカーブロック、埋設法線にウインチワイヤーおよび台船を移動させるためのブルドーザ、バックホウ、負圧を作用させるためのポンプユニットなどである。

表-3 主要機械一覧表

名称	能力・形状	数量	備考
ドレーン埋設台船	4 段×4 列	1 隻	ウォータージェット付
主巻ウインチ	電動10 t 巻、30KW	2 台	台船牽引用 (埋設時)
ガイドロープウインチ	油圧5 t 巻、22KW	2 台	台船軌道保持用
引き戻し用ウインチ	油圧5 t 巻、22KW	1 台	台船牽引用 (引き戻し時)
バックホウ	0.7m ³	1 台	台船牽引用 (引き戻し時)
ブルドーザ	38 t	1 台	台船牽引用 (埋設時)
クローラクレーン	80 t 吊り	1 台	ドレーン材積み込み用
操船ワイヤー	φ26mm×500m	2 本	鋼芯
引き戻しワイヤー	φ20mm×500m	1 本	IWRC
ガイドロープ	φ50mm×400m	2 本	ナイロンロープ (八編)
アンカーブロック	1.8×1.8×1.2、10 t	7 個	ウインチ、ガイドロープ用
ロードセル	10 t 用	2 個	牽引力測定用
ポンプユニット	真空ポンプ	3.2m ³ /min	54t ⁷ 負圧付加用
	セパレートタンク	0.5m ³	

②ドレーン埋設台船

ドレーン埋設台船は、幅1.5m×長さ13.5m×高さ1.0mの2つのメイン浮力体(鋼製)を4.8m間隔に配置した双胴船とした。ドレーンを地盤内に導くマンドレルはメイン浮力体の間に4連あり、油圧操作によって地盤内への貫入および船上への引き上げを右2本、左2本別々に行うことができるようにした。また、各マンドレルには、局所的に存在する硬い層への埋設時の牽引力を低減するため、ジェットポンプ(5.5KW、

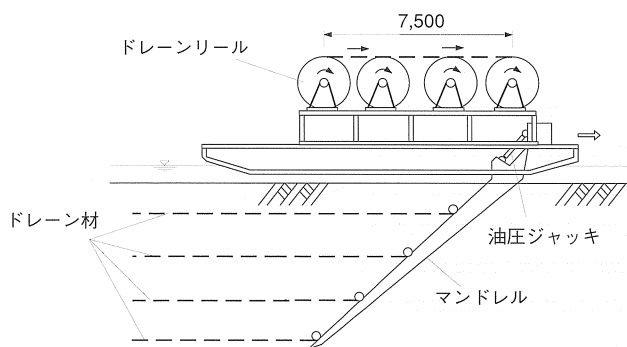


図-5 ドレーン埋設台船の概略図

220ℓ/min) によるウォータージェット(φ7mm、20箇所/本)を取り付けた。マンドレル1本当りのドレーン材は、1.2m間隔(マンドレルの角度45°)で4段とした。今回の工事では4段×4列の同時施工である。

ドレーン埋設台船の概略図を図-5に、また、施工状況を写真-1に示す。



写真-1 ドレーン埋設台船

③主巻ウインチおよびブルドーザ

主巻ウインチはブルドーザの側面に取り付けて一体型とし、次の埋設法線への移動を簡単に行うことができるようにしている。また、ブルドーザは台船の牽引力の反力保持の役目も果たしている。

主巻ウインチおよびブルドーザの概要を写真-2に示す。

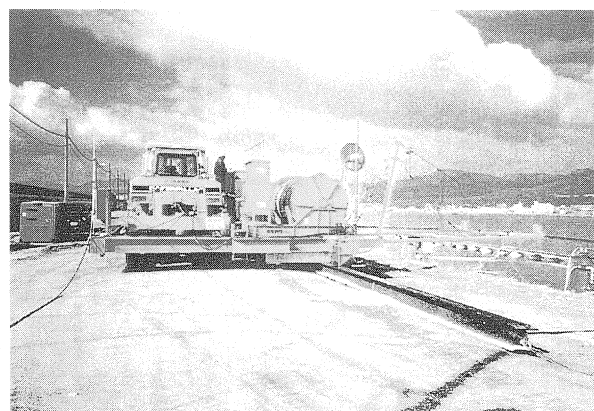
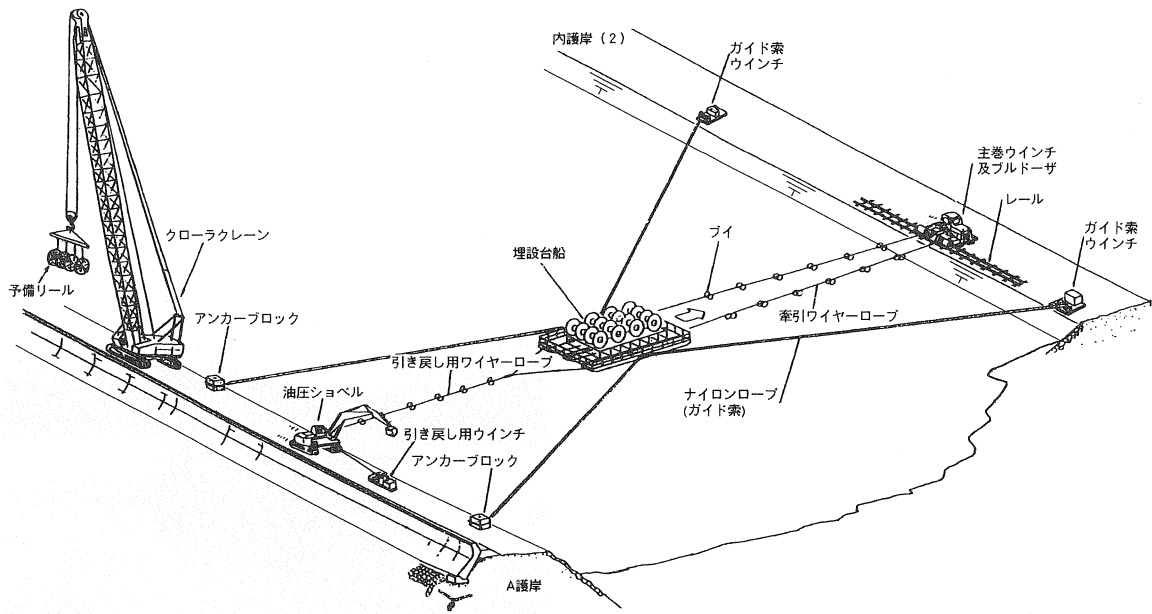


写真-2 主巻ウインチおよびブルドーザ

④機械の配置

ドレーン埋設用機械の全体配置図を図-6に示す。台船の軌道修正・保持は、台船の両側面に通したガイドロープによって行うようにした。また、ガイドロープウインチは、主巻ウインチのオペレータが遠隔操作できるようにした。



図一六 全体配置図

⑤排水システム

排水システムはドレーン材、サクシオンホース、ヘッダーパイプ、ポンプユニットで構成した。ポンプユニットは真空ポンプ、セバレートタンク、排水ポンプ、積算流量計で構成される一体型のものを採用した。セバレートタンク内の液レベルの変動により真空ポンプ、排水ポンプの運転・停止を自動的に行うようにしている。図一七に排水システムの概略図を示す。

(2) ソフトウェア

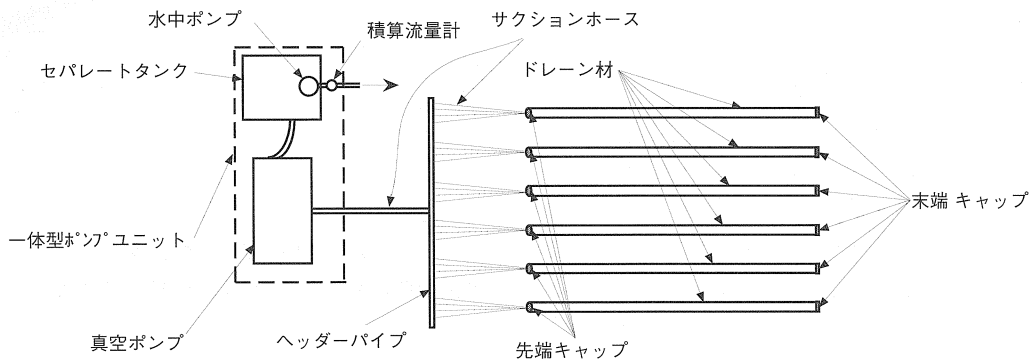
ドレーンの埋設管理は、ドレーンの埋設長、埋設方向、埋設深度について行った。埋設長は台船上に設置したドレーン材繰出量計により管理した。埋設方向については、着工当初は陸上のレーザー発光器および台船上の受光器により操船・管理していたが、以下の問題が生じた。

①レーザー発光器の据付を各埋設法線ごとに行わなければならない。

②据付誤差により、250m先では数十cmの法線とのずれが発生することがある。

③レーザー受光器は水面からの反射や直射日光の影響を受け、測定距離に誤差が生じることがある。

したがって、三次元位置を連続的に測定できる自動追尾型トータルステーション（光波測距・測角儀）およびプリズムリングに変更し、台船の誘導・管理を行った。埋設深度はマンドレル傾斜角度計、船体傾斜角度計および超音波距離計（台船の乾舷計測）を用いて管理した。各計器の計測データを随時台船上のコンピュータに伝送することにより、操船オペレータはモニター画面を見ながら操船を行い、また、計測データはコンピュータに記録した。



図一七 排水システムの概略図

(3) 全体システム

図-8に、施工機械、設備全体のシステム概要図を示す。

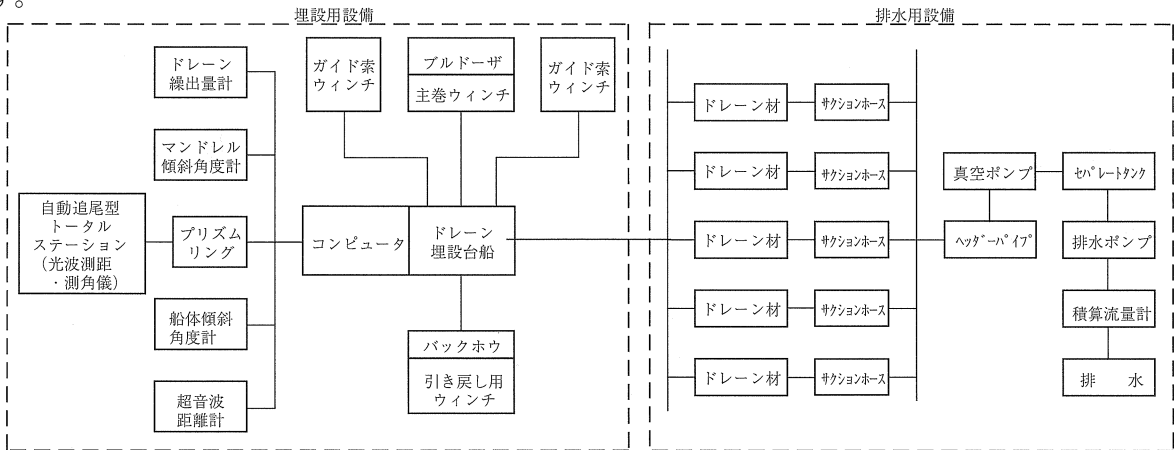


図-8 全体システム

2.4.2 施工手順

図-9に施工フローを示す。

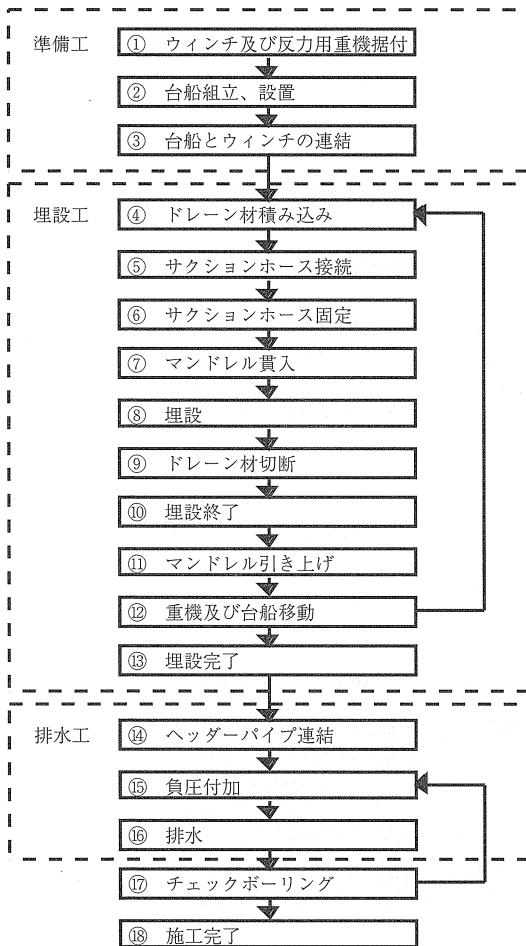


図-9 施工フロー

2.4.3 埋設精度

埋設管理システムによる計測結果の一例を図-10に示す。図中の番号は以下のことを意味している。

- ①ブロック番号 (1ブロック=4段×4列)
- ②施工日における処理区3の内水位
- ③ドレーン繰出量計による計測値
- ④1回当たり施工本数
- ⑤各段の埋設深度
- ⑥埋設法線に対する埋設台船の水平変位量
- ⑦4段目のドレーン材の埋設深度

実測の水平変位は、全ての埋設ブロックにおいて埋設法線に対し±0.25mの範囲内であり、また、埋設深度は、1、2段目のドレーンの深度をスタッフによって測定した結果、-0.2m~+0.1mであり、埋設精度は概ね良好であった。

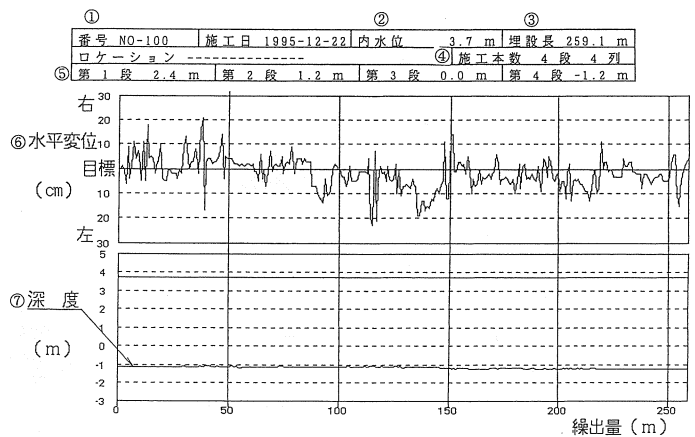


図-10 計測結果の例

3. 改良効果に関する考察

3. 1 現地実験

3. 1. 1 目的

ラテラルドレーン工法の大規模施工においては、次の技術的課題があった。

- ①大規模施工システムの確立
- ②長大埋設長におけるドレーンのウェルレジスタンスの評価
- ③改良効果（強度、含水比）の確認
- ④真空ポンプ容量の設定

したがって、本工事に先立ち、

- ①適切なドレーン材の選定
- ②適切な真空ポンプ容量（能力）の設定

などを目的に現地実験を行った。試験工事では、数種類のドレーン材と真空ポンプ能力を変化させた実験を行い、それぞれの改良効果を調査し、基礎データを得た。本項では、埋設長300mの条件における地盤の沈下挙動、ウェルレジスタンスの評価などについて記述する。

3. 1. 2 実験内容

(1) ドレーン材の埋設

現地実験に用いたドレーン材の種類及び施工規模を表-4に、埋設断面を図-1.1に示す。

表-4 ドレーン材の種類及び施工規模

ドレーン材			埋設長 (m/本)	配列		埋設延長 (m)
幅 (mm)	厚さ (mm)	内空断面積 (cm ²)		段数	列数	
150	10	9	300	3	6	5,400

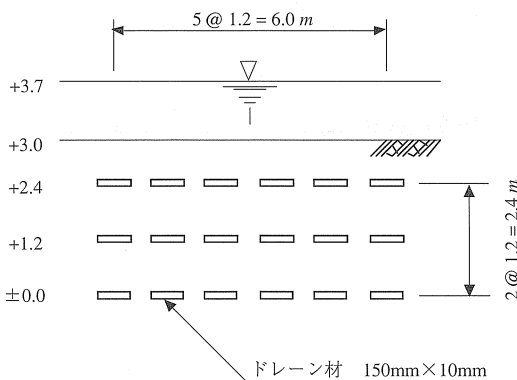


図-1.1 ドレーン材の埋設断面

(2) 負圧の作用方法

負圧は、各々のドレーン材に取り付けたφ32mmのサクシオンホースをφ100mmのヘッダーパイプに連結し、ヘッダーパイプからサクシオンホースおよびドレーン材を通じて超軟弱地盤に作用させた。負圧作用期間は110日（圧密度U=80%）である。また、真空ポンプ容量は4.0m³/minを用い、上層6本（1段目）に対し1台、下層12本（2、3段目）に対し1台用いることにした。

(3) 実験位置および沈下計測位置

図-1.2に実験位置および沈下計測位置を示す。

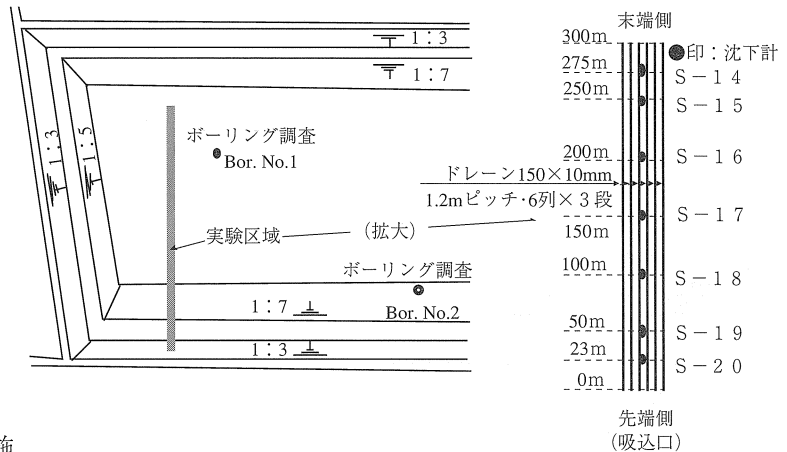


図-1.2 実験位置及び沈下計測位置

3. 1. 3 実験結果

(1) 沈下挙動

図-1.3に実測沈下量を示す。また、実測沈下に門田法と双曲線法をフィッティングして、前者で圧密係数と最終沈下量、後者で最終沈下量を求めると表-5のようになる。また、図-1.4は実測沈下量を門田法による最終沈下量で除した圧密度を示したものである。この図によると、実測を行った110日時点において、平均圧密度は65~80%に達し、各測点ごとの圧密度の差は大きくないことが判る。

表-5 最終沈下量の計算値

測点	実測沈下量 S (m)	門田法		設計
		最終沈下量 S_f (m)	圧密係数 c_v (cm ² /day)	
測点S-20	0.678	1.488	35.4	$S_f = 1.41 m$ $c_v = 28.8$ cm ² /day
測点S-19	0.623	1.697	26.9	
測点S-18	0.655	1.539	31.3	
測点S-17	0.615	1.243	35.9	
測点S-16	0.628	1.391	35.6	
測点S-15	0.739	2.084	26.5	
測点S-14	0.407	0.538	63.5	
平均値	0.621	1.426	36.5	

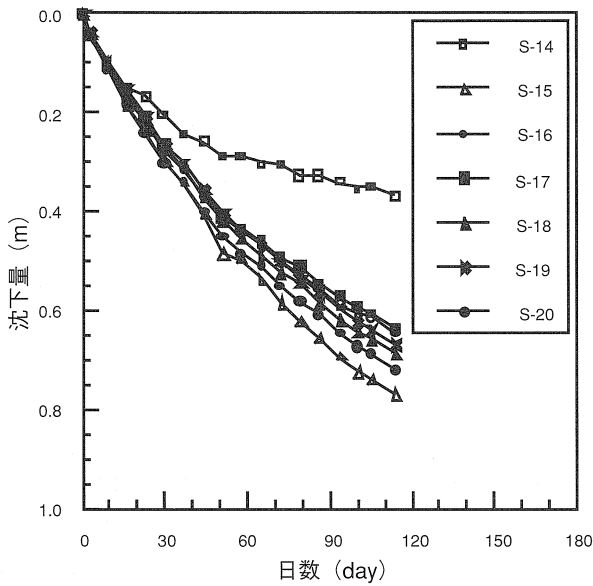


図-1 3 実測沈下量

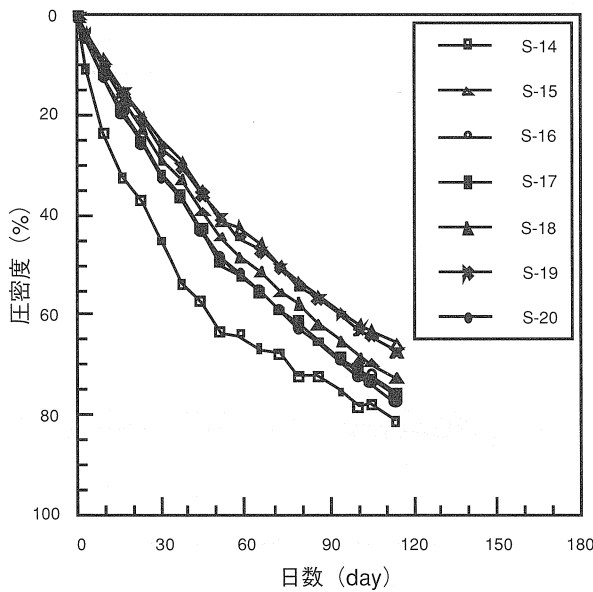


図-1 4 圧密度

(2) ウェルレジスタンスの評価

1) 適用した理論解²⁾

ラテラルドレーン工法の圧密度の算定には、中空円柱の圧密理論を適用する。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

ドレーンの透水性が有限の場合、ドレーン内の水に流れに関する条件式を導入すると、その初期条件と境界条件は次のようになる (図-1 5 参照)。

$$\begin{aligned} t=0, r=r, z=z: & u = u_0 \\ t=t, r=r, z=0: & u = 0 \\ t=t, r=r, z=2H: & u = 0 \\ t=t, r=r_e, z=z: & \frac{\partial u}{\partial r} = 0 \\ t=t, r=r_w, z=z: & \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \Big|_{r=r_w} + 2 \frac{k_c}{k_w} \frac{1}{\gamma_w} \frac{\partial u}{\partial r} \Big|_{r=r_w} = 0 \end{aligned}$$

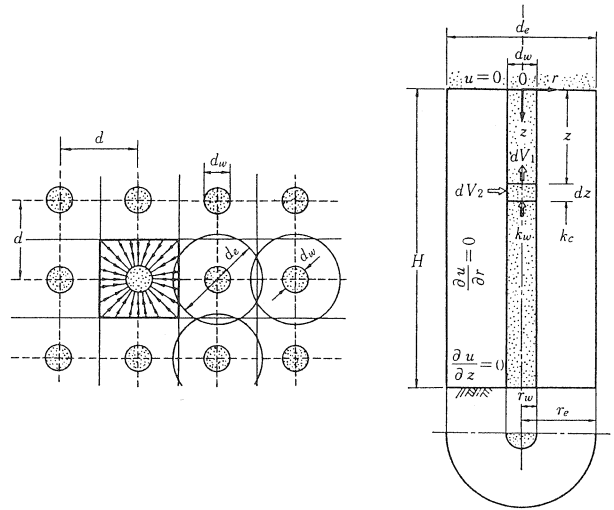


図-1 5 透水性有限の場合の圧密

このような条件での任意位置 (r, z) での解は、次式で与えられる。

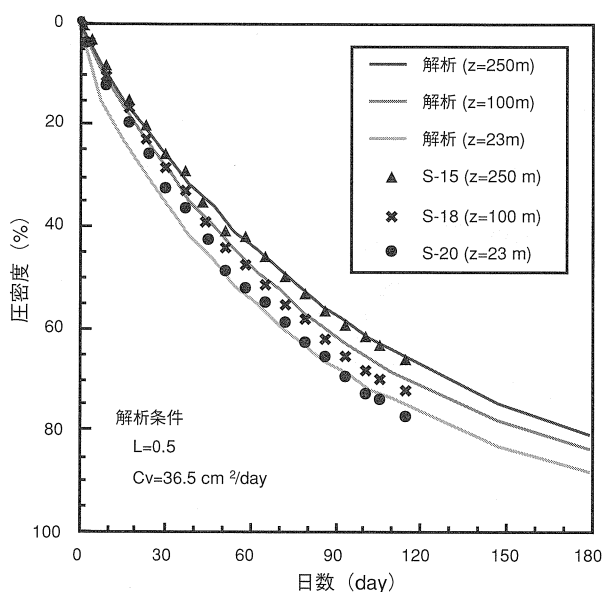
$$u(r, z, T_h) = u_0 \sum_{l=1,3,5,\dots}^{\infty} \sum_{m=1,2,3,\dots}^{\infty} C_{lm} \sin\left(\frac{l\pi}{2H} z\right) D_0(\lambda_{lm} r) \exp[-h_{lm}^2 d_e^2 T_h]$$

ここに、

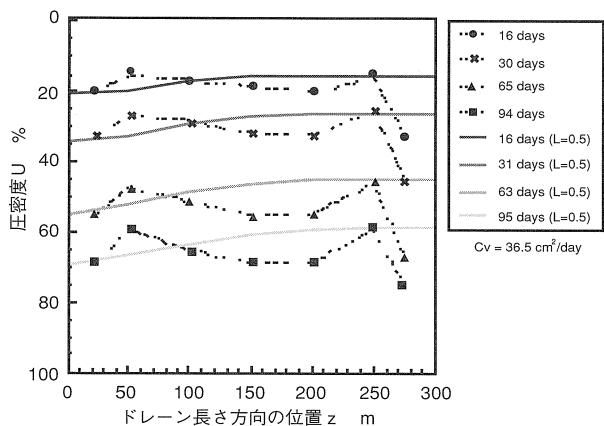
$$C_{lm} = \frac{8l}{\pi L (\lambda_{lm} r_e)^2} \times \frac{D_0(\lambda_{lm} r_w)}{D_0^2(\lambda_{lm} r_e) - \frac{1}{n^2} \left\{ 1 + \left(\frac{l^2}{L \lambda_{lm} r_w} \right)^2 \right\} D_0^2(\lambda_{lm} r_w)}$$

$$h_{lm}^2 = \lambda_{lm}^2 + \left(\frac{l\pi}{2H} \right)^2$$

$$L = \frac{32}{\pi^2} \frac{k_c}{k_w} \left(\frac{H}{d_w} \right)^2$$



図一 18 沈下（時間）に関する圧密度の実測値と解析結果の比較



図一 19 沈下（位置）に関する圧密度の実測値と解析結果の比較

3. 1. 4 実験結果のまとめ

沈下の実測結果によると、ドレーンの根元から2.3 m離れた地点と2.5 m離れた地点との間においては、幅150mm×厚さ10mmのドレーン材を用いると、沈下の遅れは小さいことが明らかとなった。また、実測の沈下曲線に、ウェルレジスタンスを考慮した圧密理論をフィッティングすると、本ケースのウェルレジスタンス係数は $L=0\sim 0.5$ の範囲にあると考えられる。

3. 2 本工事

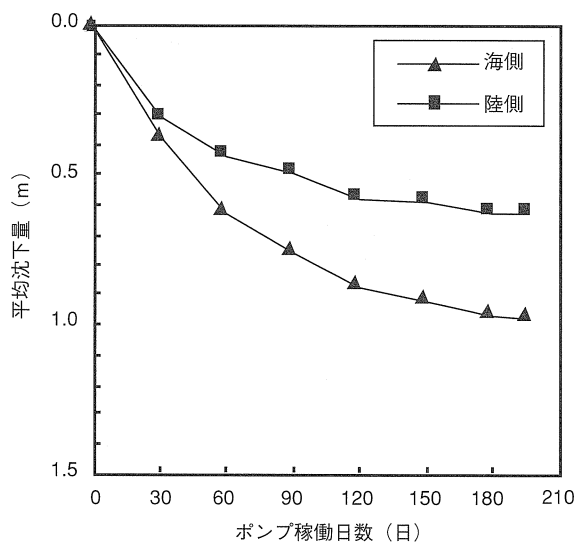
3. 2. 1 沈下量

圧密沈下量は、表層に設置した沈下板により7日毎

に計測した。沈下板の設置数は海側20カ所（改良層厚4.8m）、陸側12カ所（改良層厚2.4m）の計32カ所である。海側、陸側それぞれの平均値を表一6および図一20に示す。なお、圧密度は双曲線法による最終沈下量に対して求めたものである。

表一 6 実測沈下量の平均値

	改良層厚 (m)	実測値 (m)	圧密度 (%)
海側	4.80	0.98	84
陸側	2.40	0.63	87



図一 20 実測平均沈下量の経時変化

実測平均沈下量は海側で0.98mとなり、沈下歪みに換算すると約20%となった。また、陸側は沈下量が0.63mで沈下歪みは約26%となった。海側の方が沈下歪みが小さくなったのは、深度が増加すると、それに伴って初期含水比が小さくなっているためである。

積算流量計によって計測したポンプ1台当たりの平均排水量は、海側で6,630m³であったが、実測沈下量による換算排水量は2,940m³（ $=0.98\text{m} \times 1.2\text{m} \times 10\text{列} \times 250\text{m}$ ）となった。このことより、改良域の周囲から余分な水を多く吸収していることが判る。

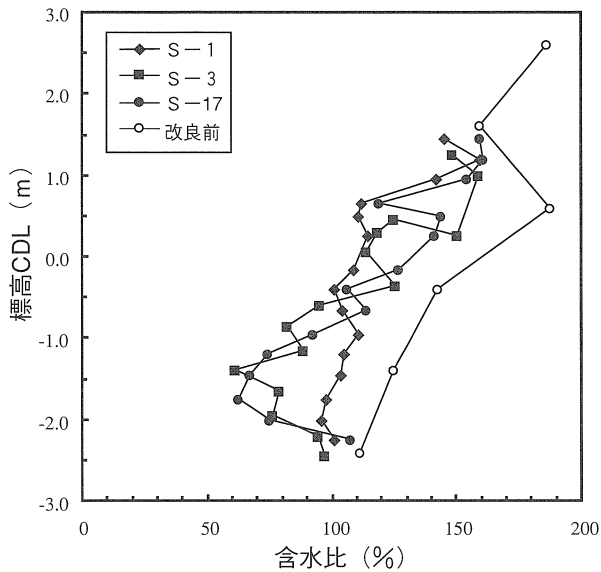
3. 2. 2 含水比

改良前2地点及び改良後3地点の土質調査によるサンプリング試料の含水比の計測結果を図一21に示す。図中、改良前No.1は改良層厚2.4m区域、その他は改良層厚4.8m区域のものである。

改良前No.2と改良後の各調査地点の含水比を比較す

ると、全体的に含水比の低下が見られる。特に下層は改良対象土の液性限界（105%）以下にまで低下しており、改良効果は良好であった。しかし、表層約1mの部分は含水比150%前後で、大きな低下は認められなかった。表層の含水比が低下しなかった原因としては、地表水の流入などが考えられる。

表層までの十分な改良が必要な場合は、遮水シートの敷設などの表面処理が有効である。



図一 2 1 改良後の含水比分布 (例)

3. 2. 3 一軸圧縮強度

改良後3地点のサンプリング試料の一軸圧縮強度を図一 2 2 に示す。

改良前のコーン貫入試験結果によると、改良対象土のほぼ全体で、コーン貫入抵抗

$$q_c = 0 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2 \quad (=0 \sim 49 \text{ kPa}) \text{ 程度}$$

であり、一軸圧縮強度に換算すると、

$$q_u = 0 \sim 0.1 \text{ kgf/cm}^2 \quad (=0 \sim 9.8 \text{ kPa}) \text{ 程度}$$

であったが、改良後は表層の粘性土を除くと

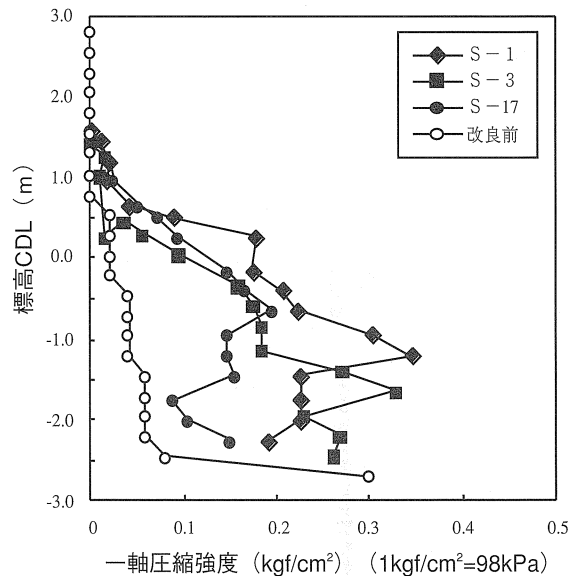
$$q_u = 0.1 \sim 0.4 \text{ kgf/cm}^2 \quad (=0 \sim 39.2 \text{ kPa}) \text{ 程度}$$

まで増加している。

4. まとめ

今回、ラテラルドレーン工法による浚渫粘性土の減容化工事を実施した。現地実験および本工事の主な結果をまとめると、次のようである。

- ①ラテラルドレーン工法は、施工機械の大型化、施工システムの工夫により、大規模施工に十分対応することができる。



図一 2 2 改良後の強度分布 (例)

- ②断面の大きなドレーン材を使用した場合、ウェルレジスタンスによる沈下の遅れは比較的小さい。長さ300m、幅150mm、厚さ10mmのドレーン材の場合、ウェルレジスタンス係数は $L=0 \sim 0.5$ 程度と判断することができる。

謝 辞

本工事の施工、現地実験を行うにあたり、広島県広島港湾振興局の皆様には多大なる御協力を頂きました。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 五日市地区港湾整備事業パンフレット、広島県
- 2) 吉国洋：パーチカルドレーン工法の設計と施工管理、技報堂出版、pp.28~42、1979