

海面処分場の延命化対策として適用した真空圧密ドレーン工法について

THE APPLICATION OF THE VACUUM COMPACTION DRAIN METHOD TO PROLONG THE LIFE OF AN OFFSHORE DISPOSAL FIELD

宮越国夫*・竹谷健一*・大槻康雄**

野末康博**・小阪陽克**・熊谷 周***・大和田貴博**・山下 徹****

Kunio MIYAKOSHI, Kenichi TAKEYA, Yasuo OTSUKI

Yasuhiro NOZUE, Harukatsu KOSAKA, Meguru KUMAGAI, Takahiro OOWADA and Toru YAMASHITA

To maintain the function of the port of Tokyo, it is necessary to dredge and dispose of deposited sand and mud transported in from rivers. However, the area available for waste disposal in Tokyo bay is insufficient, and the construction of a new offshore disposal field is impossible. Therefore, there is a strong need to prolong the life of the existing and planned offshore disposal fields. With that, application of the vacuum compaction drain method for increasing disposal capacity of the C block of the new waste disposal Area in Tokyo Bay (Shinkaimen Shobunjo) was decided. A series of studies and test constructions confirmed the construction efficiency in a marine setting, improvement effect of the measure, and validation of prediction analysis. This document summarizes: an outline of Sinkaimen Shobunjo, results of the test construction carried out in 2006-2007, and an outline of the prediction analysis results.

Keywords : Offshore waste disposal field, life-prolonging countermeasure, accelerating consolidation, vacuum compaction drain method, Tokyo Bay

1. はじめに

東京港の機能を維持するためには、河川から流れこんで堆積する浮泥を含む土砂を浚渫し、処分することが必要である。この浚渫土砂と、東京都区部で発生する廃棄物を処分する最終処分場として、新海面処分場の整備(表-1 新海面処分場の概要および図-1 進海面処分場位置図参照)が東京都により段階的に進められている。本処分場では、完成したブロック内への廃棄物の処分は、浚渫土で土地を陸域化し、その上に都区部で発生する廃棄物を投入して埋立地を造成する手順で実施されている。

処分場の延命化策として、これまでも廃棄物の全量焼却による処分量の減量化や、護岸に囲まれた海底地盤の掘り下げと掘削土の有効活用などの処分容量の増大化が図られてきている。しかし新たな海面処分場の建設は用地上不可能な状況にあり、処分場のさらなる延命化が要求された。

本技術はこうした背景を鑑み、東京都の廃棄物処理対策に寄与させるため、減量化が難しい浚渫土の処分容量を増大する技術を開発したものである。本稿ではこの業務の概要、処分場への適用と海上施工が初となる真空圧密ドレーン工法について紹介する。

表-1 新海面処分場の概要

埋立面積	約480ha (うちCブロック69.5ha)
埋立処分量	120,370千m ³
埋立地盤高	A. P. +6.0m ~ A. P. +30.0m (A. P. 0m = T. P. -1.1344m)
護岸延長	約13.9km (外周護岸: 約6.5km、中仕切護岸: 約7.4km)
護岸整備費	約4,500億円

2. 周辺地質と土質性状

(1) 地形地質概要

新海面処分場を含む東京港の主な地盤構成は、下位から、上総層群、江戸川層、東京層、埋没段丘堆積層、および沖積層の七号地層と有楽町層からなり(表-2)、各地層の分布状況は図-2に示す通りである。新海面処分場は、古東京谷と呼ばれる埋没谷に位置していることから沖積層が厚く、軟弱な粘性土を主体とする有楽町層と七号地層の境界はA.P.-40m前後、沖積層と洪積層の境界部はA.P.-70 ~ -80m程度と深い。

* 東京都港湾局 沖合埋立整備課

** コンサルタント国内事業本部 地球環境事業部 地盤環境部

*** コンサルタント国内事業本部 事業推進部 施設設計室

**** 真空圧密ドレーン工法研究会

東京湾の底質は、河口付近では砂からなる三角州前置斜面が発達し、その沖合では泥質堆積物からなる底置層が分布する。新海面処分場は東京湾北部の沈降の中心域にあたり、河川から供給された泥質物質が流速の小さい沿岸流により運搬され、沈降・堆積していることから、上部有楽町

層は主にシルト・粘土からなる。新海面処分場 C ブロック近傍で実施されている既往地質調査結果に基づいて作成した新海面処分場の地盤構成を表－3 に示すとともに、新海面処分場 C ブロックの推定地質縦断面図を図－3 に示す。



図－1 新海面処分場位置図・処分場拡大図

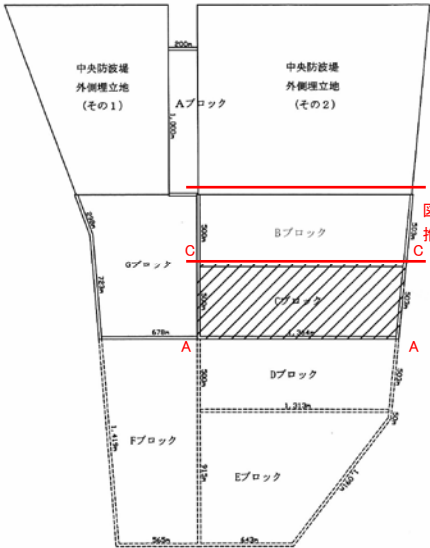
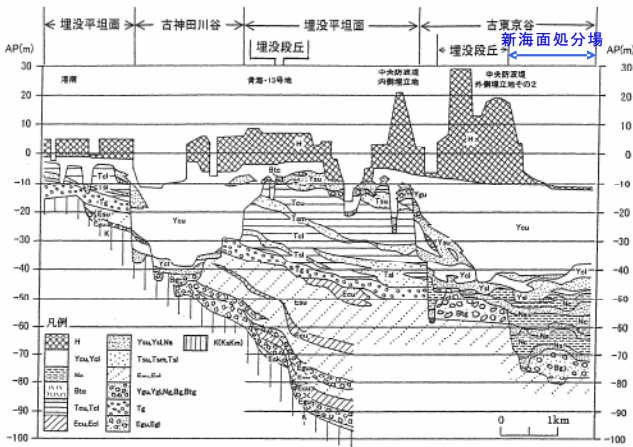


図-3
推定地質縦断面測線



図－2 東京港中央部を北西－南東に横断する模式断面

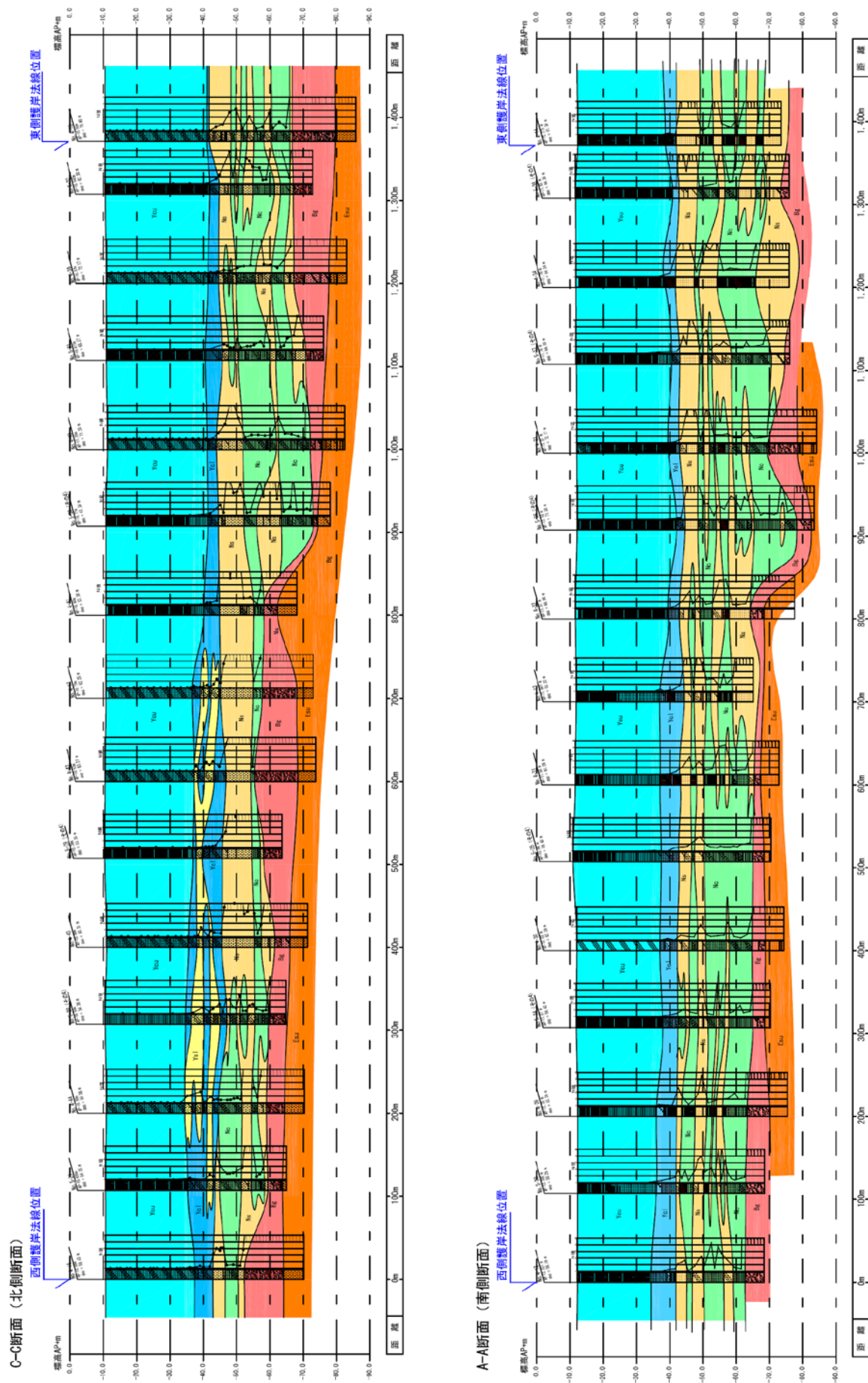
表－2 東京港の主な地盤構成

地質時代	主な地区	地層名	地層記号
現世	理土層	H	H
完新世	有楽町層	Ycu, Ysu(全地域に分布)	Ycu, Ysu
後期	埋没段丘	Ycl, Ysl, Ygl(全地域に分布)	Ycl, Ysl, Ygl
更新世	東京層	Tcu, Tsm, Tsl, Tg	Tcu, Tsm, Tsl, Tg
前期	江戸川層	Eu, Ecu, Egu	Eu, Ecu, Egu
前期	上総層群	Km, Ks(全地域に分布)	Km, Ks

(s: 砂質土, c.m.: 粘性土, g: 砂礫)

表－3 新海面処分場下部の地盤構成

地質年代	地層区分	土質名	土質記号	N値	色調	記事・層相
第四紀	完新世	有楽町層	粘性土	Ycu	0	暗灰
			粘性土	Ycl	0	暗灰
			砂質土	Ysl	0～10	暗灰
	更新世	七号地層	粘性土	Nc	3～20程度	暗灰
			粘性土	Ns	5～50以上	暗灰
			基底砂礫	Bg	50以上	暗灰
第四紀	洪積層	江戸川層	砂質土	Esu	20～50以上	暗灰



図一3 Cブロックの推定土層断面図

(2) 圧密対象層の地盤性状

新海面処分場 C ブロック周囲の既往地質調査結果から、各地層の土質特性を塑性図、および散布図としてまとめ、**図－4**、および**図－5**に示す。

本結果から、圧密促進工の対象層である有楽町層上部粘性土層(Ycu層)の地盤性状の概要を以下に示す。

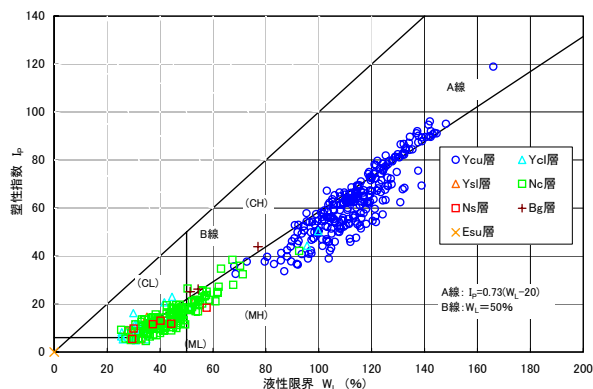
1) 物理特性

自然含水比は、おおむね 100 ～ 150% に分布しており、粘性土の一般的な範囲にある。細粒分含有率は、深度によらずほぼ 100% であり、粒度構成はおおむね粘土分(5 μ m以下)60 ～ 70%、シルト分(5 ～ 75 μ m)30 ～ 40% かなる。

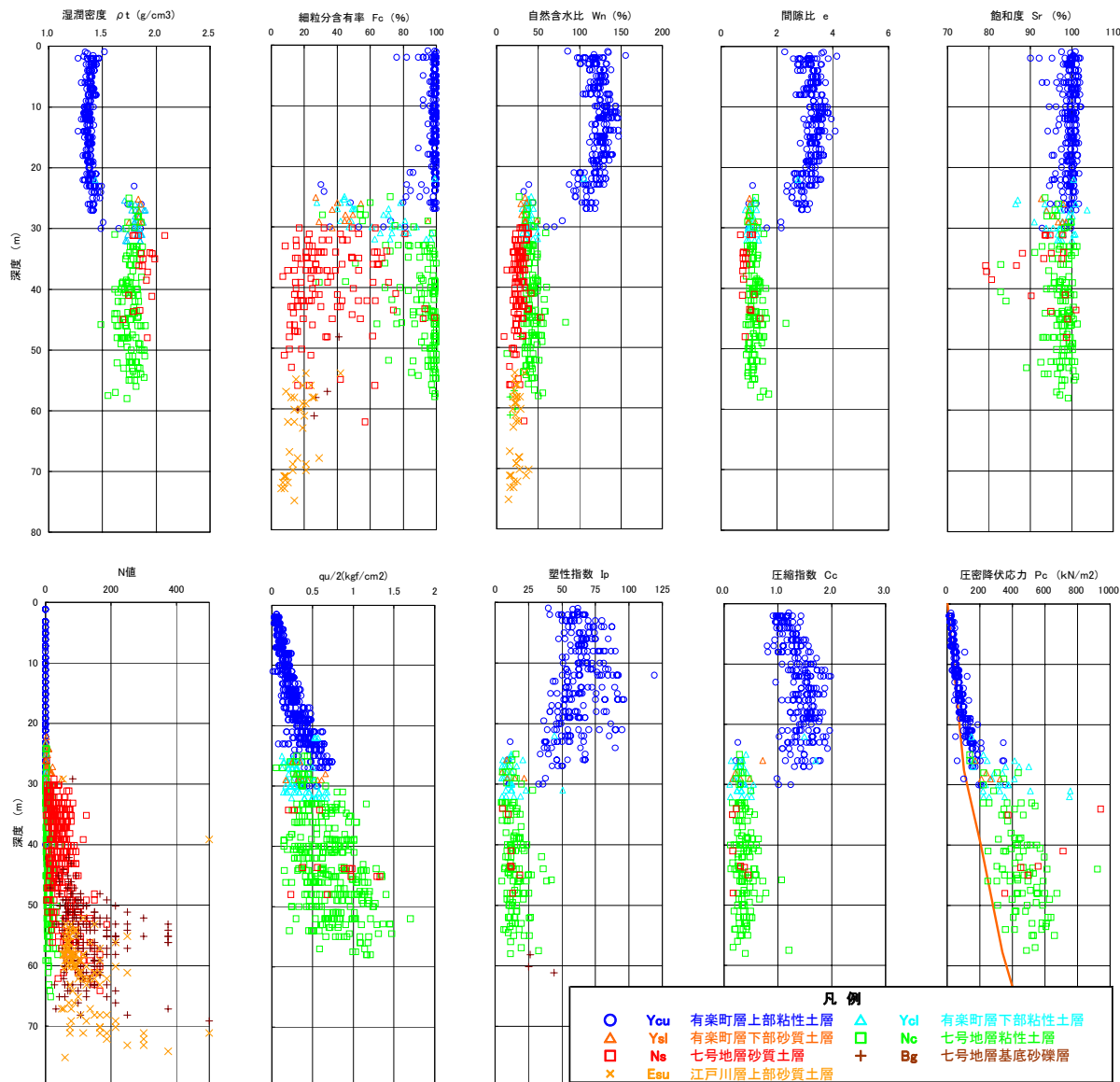
湿潤密度は 1.4g/cm³ 前後で、粘性土の一般的な範囲にある。コンシステンシー特性は、シルト高液性限界(MH)～粘土高液性限界(CH)に分布しており、圧縮性が高い地盤であることが推察される。

2) 圧密特性

圧縮指数 C_c は 1.0 ～ 2.0 に分布しており、粘性土として比較的大きい値を示している。圧密降伏応力 p_c と有効土被り圧 σ_v' を比較すると $p_c \approx \sigma_v'$ となり、Ycu 層は深度によらずおおむね正規圧密状態であると判断される。



図－4 塑性図



図－5 土質特性と深度の関係

3. 対策工法概要

(1) 対策工法の選定経緯

圧密促進工法は、一般的に排水促進工法と載荷重工法が併用して実施される。新海面処分場延命化のための対策工法選定にあたり、これらの工法から適用可能な工法の抽出を行い、主に以下に示す項目に着目して比較検討を行った上で最終案を決定した。

- ① 増容量
- ② 施工性
- ③ 経済性

選定フローと比較結果を概略的にまとめ、図－6 に示した。

検討の結果、上記の観点で真空圧密ドレーン工法が最も有利であると判断し、対策工として決定した。

(2) 真空圧密ドレーン工法の概要

真空圧密ドレーン工法(以下、本工法と記す)は、従来の真空圧密工法に不可欠であった地表面の気密シートを用いずに真空圧密改良を可能にした工法である。

気密キャップを介して排水ホースを取り付けたプラスチックボードドレーン(以下、キャップ付ドレーンと記す)を軟弱地盤中に所定の間隔・深度に打設し、排水ホースに真空ポンプを用いて吸引力(負圧)を作用させると、ドレーン内部は減圧されて外部よりも圧力が小さくなる。この時のドレーンの内と外に生じた圧力差を圧密圧力として利用して軟弱粘性土地盤を改良するのが本工法の原理である。

従来の真空圧密工法は、地表面を気密シートで覆い改良地盤内の気密性を保持している。本工法では気密シートの代わりに、キャップ部を所定の深さ(0.5～1.5m 程度)に

埋め込むことで、改良域上部粘性土層をシール層として用いている(図－7)。

本工法の主な特徴を以下に挙げる。

1) 安定した改良効果

各ドレーンを直接集水管に接続することで密封性が高くなり、真空ポンプによる負圧 50～70kN/m²を地盤に確実に作用させることができる。また、水中地盤の場合、載荷盛土では浮力が働くため非効率となるが、陸上・水中問わずに所定の圧密圧力が作用する。

2) 工期の短縮が可能

負圧(減圧)による載荷のため、盛土・切土等の土工および地盤強度に応じた段階的な載荷が不要ことから、載荷盛土工法に比べて短い工期で改良ができる。

3) 載荷盛土の併用

強度増加を主目的とした改良では載荷盛土との併用ができ、必要に応じ強度を増加することができる。

4) 気密シートが不要

粘性土上部 0.5～1.5m 程度を負圧シール層としているため、気密シートは不要である。このため、表層に厚く透水性(透過性)の高い層が存在する場合や、水底の地盤などシートの敷設が困難な場所でも適用できる。

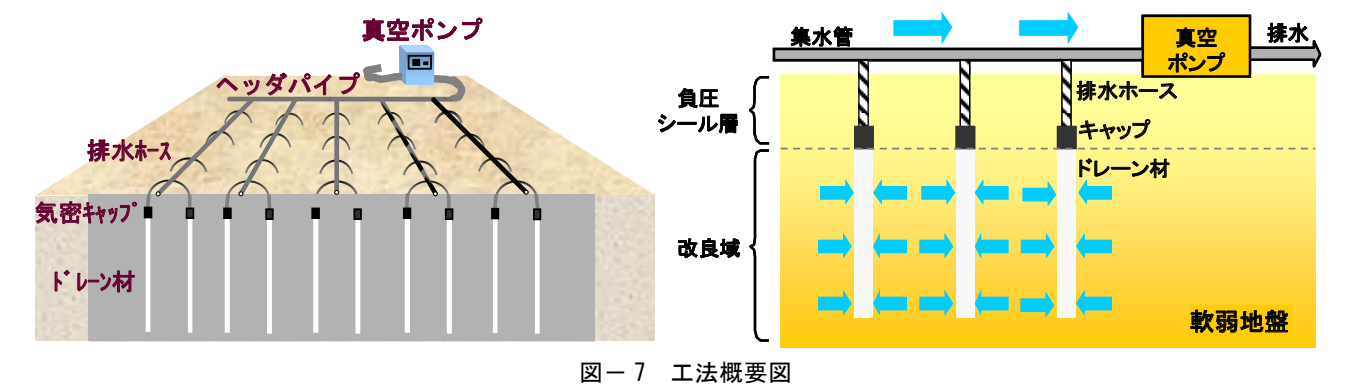
(3) 適用範囲

本工法は、軟弱な粘性土地盤に適用できるが、砂質土層が多く介在する地盤での適用には工夫を要する。適用範囲は以下の通りである。

- ・ 対象土質 : 粘性土地盤
- ・ 打設限界 : N 値 15 以下
- ・ 適用深さ : 陸上——— G.L.-55m 程度
泥上・水上 — W.L.-40m 程度

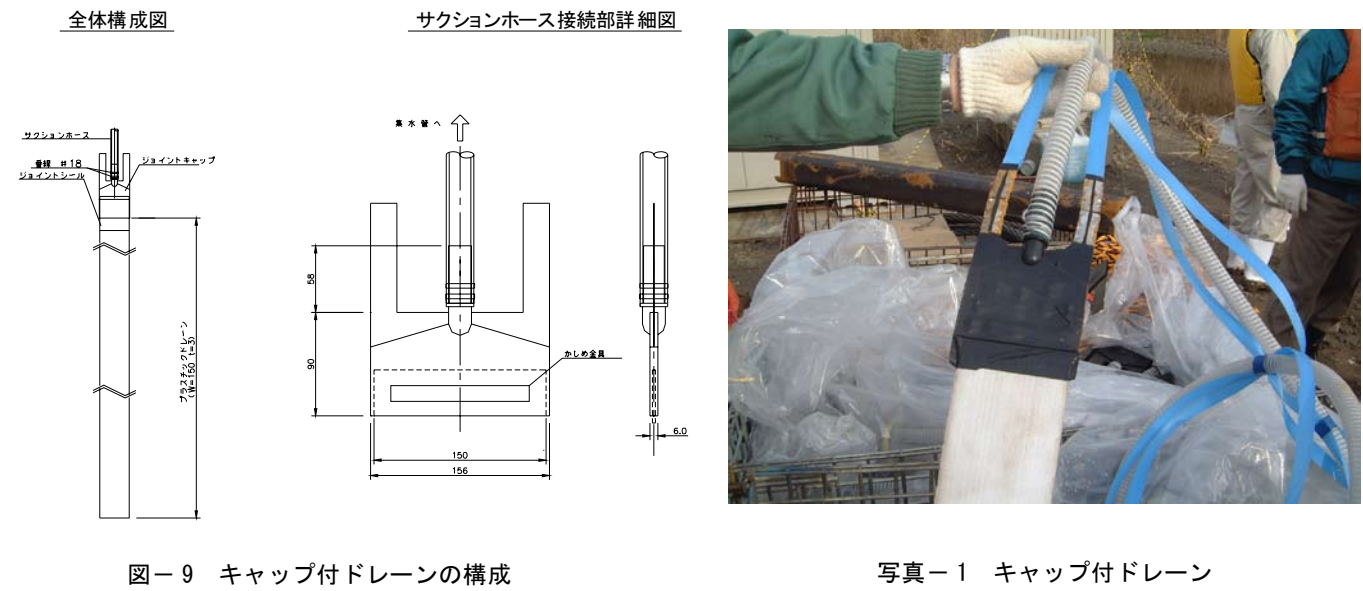
排水促進工法		載荷重工法		工費比較	評価
ドレーン	サンドドレーン	×	約50万m ³ の砂を使用するため、容量増大策としては不適		
	バーチカルドレーン			増容量 86万m ³ 比率 2.0	×
	水平ドレーン	×	改良深度が深いため不適	増容量 230万m ³ 比率 1.5	△
	ペーパーボードドレーン (プラスチックドレーン)			増容量 230万m ³ 比率 1.0	◎
		載荷盛土工法 (ペーパーボードドレーン) (プラスチックドレーン)			
		大気圧工法 (ペーパーボードドレーン) (プラスチックドレーン)	シートによる工法 (ペーパーボードドレーン) (プラスチックドレーン)		
		地下水位低下工法	負圧シールによる工法 (真空圧密ドレーン工法)		
		×	粘性土地盤のため不適		

図－6 選定フローならびに比較結果



・キャップ付ドレーン打込み ・集水管設置	・ヘッダーパイプ、 ・真空ポンプ設置	・真空ポンプ運転	・撤去
・キャップ付ドレーンを所定の深度に打設する。 ・打設と同時に排水ホースと集水管を接続し、随時水没させる。	・集水管とヘッダーパイプを連結し、真空ポンプに接続する。	・真空ポンプによる負圧により、地盤内の隙間水がドレーンを通じて排出され沈下が促進される。	・真空ポンプおよびヘッダーパイプを撤去する。(必要に応じて、集水管も撤去できる)

図-8 施工手順



4. 試験施工結果

(1) 試験施工の概要

1) 目的

真空圧密ドレーン工法の大規模な海上施工実績がなかったこと、ならびに平成16年度の検討で提案した最適なドレーン打設間隔(1.8m)の施工実績がなかったことなどを踏まえ、以下を目的とした試験施工を実施することとした。

- ・ 海上部における施工性の確認
- ・ 本施工における確実な対策効果(沈下)の確認
- ・ 既設護岸への影響度合いの確認
- ・ ドレーン打設間隔検討方法の妥当性の検証と、打設間隔の見直しによる経済性の検討

2) 施工概要

試験目的を踏まえ、試験施工はドレーン打設間隔を変化させた2パターンの仕様で実施した。施工位置は図-10に示す新海面Cブロック東側である。試験施工の諸元を表-4に示す。試験施工における計測項目を表-5に、計測器配置を図-11に示す。

3) 試験位置の土質

試験工事区間の地盤条件を確認する目的でボーリング調査、三成分コーン試験、室内土質試験が実施されている。図-12に各施工ヤード中心部で実施したボーリング調査試料を用いた粒度試験結果を示す。本地点ではすでに浚渫土の埋立てが実施されており、その境界はA.P.-12m付近にある。

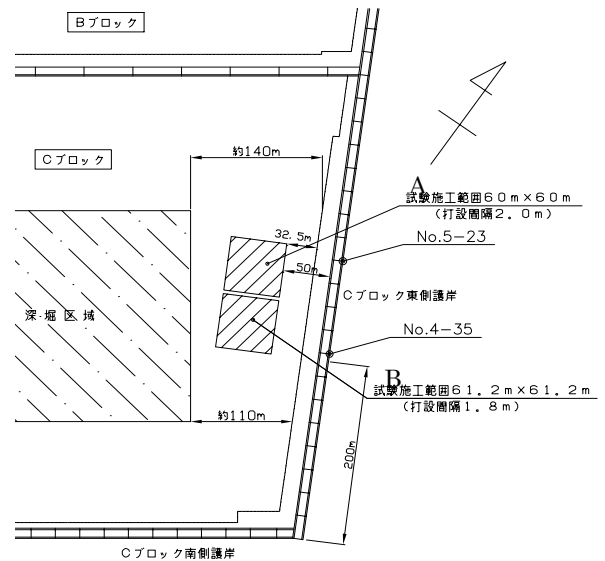


図-10 試験施工位置図

表-4 試験施工諸元

	A工区	B工区
改良範囲	60.0m×60.0m	61.2m×61.2m
ドレーン長 (A. P. ±0.0m～A. P. -29.0m)	29.0m	29.0m
ドレーン打設間隔	2.0m	1.8m
ドレーン材幅	150mm	150mm
打設本数	900本	1156本
n (de/dw)	28.25	25.43

表-5 計測項目

項 目	計測地点数		計測方法
	A工区	B工区	
水圧式沈下計	6	6	自動計測
層別沈下計	1	1	自動計測
間隙水圧計（ドレーン先端）	3	3	自動計測
間隙水圧計（地盤中）	6	6	自動計測
傾斜計	1	1	自動計測
沈下板	11	11	レベル
鋼矢板（水平及び鉛直変移）	15		レベル、トランジット

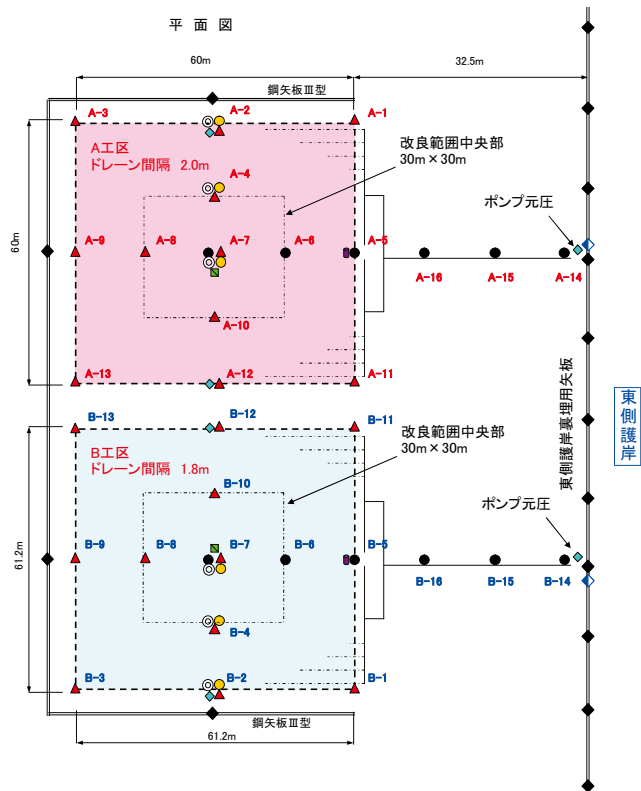
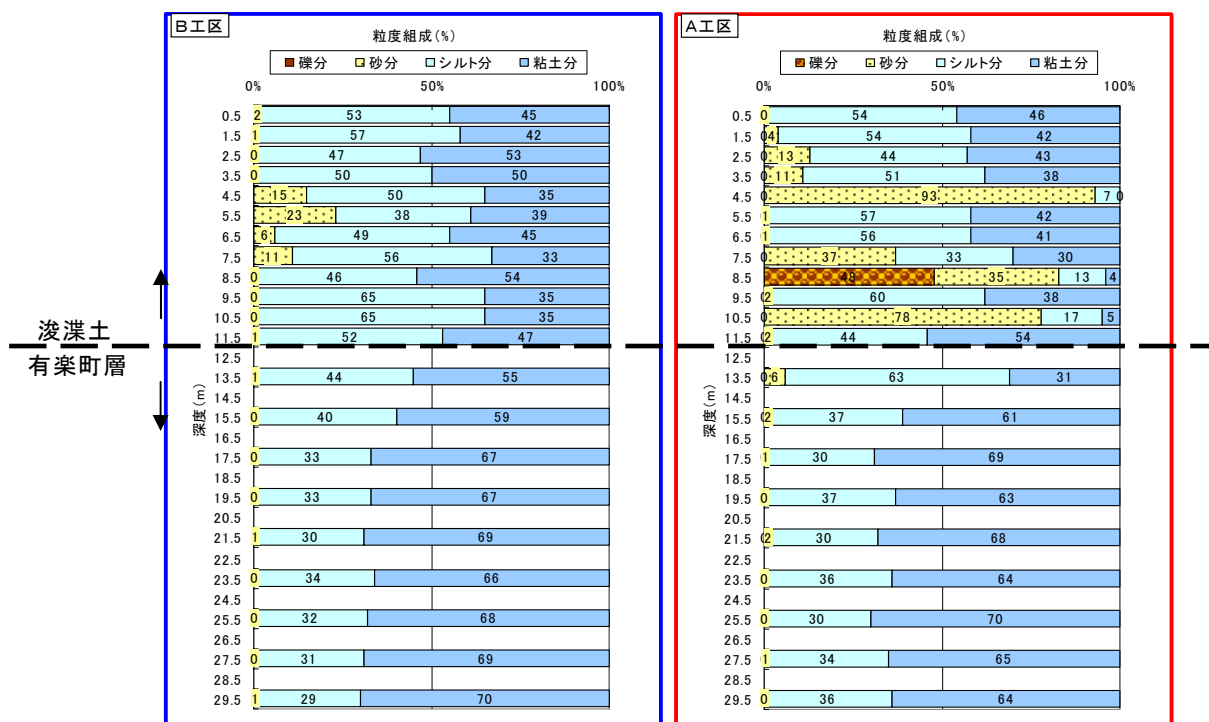


図-11 計測器配置図

1工区当たりの計器数量

- 水圧式沈下計(自動計測) 6点
- ▲ 沈下板(水準測量) 11点
- 孔内傾斜計(自動計測) 1本(15深度)
- 層別沈下計(自動計測) 1点(4深度)
- ◆ 負圧計(自動計測) 2点
- 間隙水圧計(ドレーン先端、自動計測) 3点
- ◎ 間隙水圧計(地盤中、自動計測) 3点(2深度)
- ◆ 矢板の水平・鉛直変位(既設矢板5.5点、新設矢板2点) 7.5点
- ◆ 流量計 1点



図－12 ボーリングコアを用いた粒度試験結果

本結果から各工区とも G.L.-11.6m (A.P.-10.6m) 以浅の浚渫土部で深度方向に粒度のばらつきが大きい、A 工区の浚渫土部は一部礫分を多く含有し砂分含有量も B 工区のそれと比較して多い、各工区とも G.L.-11.6m (A.P.-10.6m) 以深の土層(有楽町層)は粒度のばらつきが少なく細粒分含有率が高い(≒ 100%)などの特徴がある。

(2) 試験施工結果・評価

沈下板の計測結果をもとに、各段階における地盤面の形状を三次元コンターとしてまとめ、図－13 に示した。本結果から、A 工区、B 工区とも中心部付近が沈下のピークとなり、いずれもおわん状に沈下が発生したことがわかる。試験施工期間の沈下計による計測結果、作用負圧、孔内傾斜計による計測結果を時系列にまとめ図－14 に示した。以下に、各計測項目ごとに結果の概要とその評価について述べる。

1) 沈下計測結果

沈下計による計測結果を見ると、計測開始時点からの累積沈下量は浚渫土層(～A.P.12m)が A 工区で 110cm 程度、B 工区で 140cm 程度、有楽町層が A 工区で 170cm 程度、B 工区で 210cm 程度となっている。これらの沈下量は負圧载荷開始時点から急速な沈下傾向を見せており、負圧载荷が沈下促進に有効に機能したと判断できる。

2) 圧力計測結果

ポンプの元圧ならびに集水管の圧力を見ると、元圧は A 工区、B 工区とも有意な差はなく、 $-80 \sim -90(\text{kN/m}^2)$ で安定した出力を示しており、集水管圧は载荷開始直後に

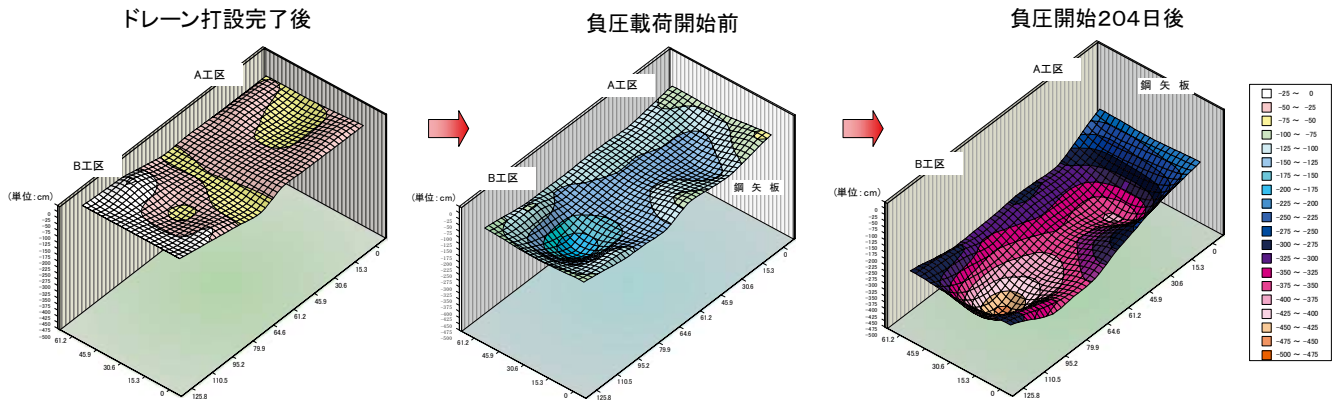
$-50(\text{kN/m}^2)$ 程度を示し経時的に増加し、元圧に漸近していく傾向が見られた。なお、所々元圧が上がっているのは、ポンプの故障、排水管の損傷などによるものである。経時的に作用負圧が漸増していく原因は明確ではないが、浚渫土層内に狭在する砂層部などの間隙が、負圧による圧縮に伴って小さくなることで透水性が低下し負圧損失が減少したこと、シール層や粘性土の圧密に伴い負圧損失や排水量が低下したことなどがその主要因として想定される。作用負圧が高くなった 10 月下旬より、有楽町層の沈下速度が上がる傾向も見られており、作用負圧の増加が沈下促進に寄与していることが伺える。

3) 地中部の水平変位

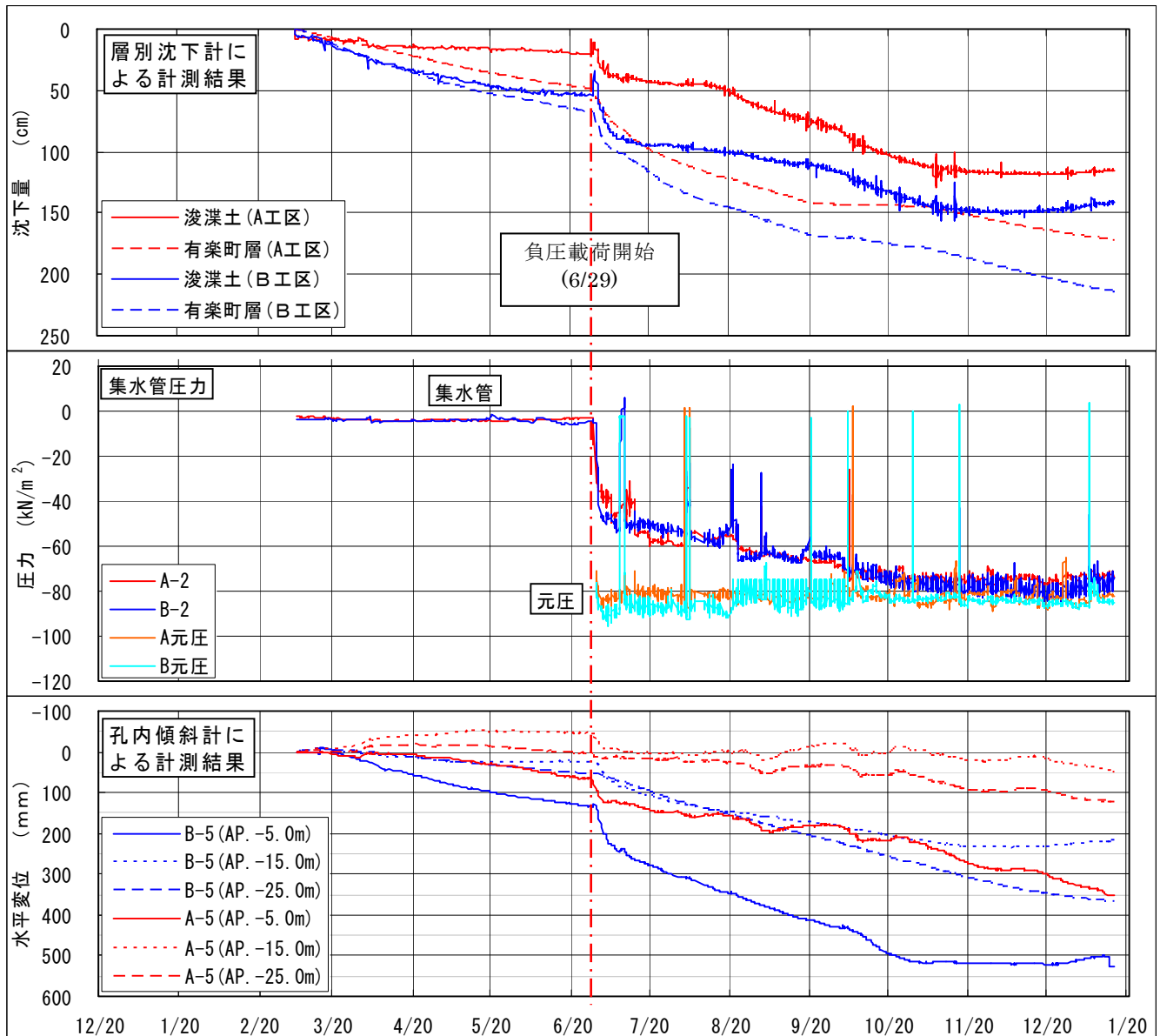
改良域と未改良域の境界部に設置された孔内傾斜計の計測結果を見ると A 工区、B 工区とも浅層部(A.P.-5m)で水平変位が最大となっており、それぞれ、350mm、500mm 程度の変位量が確認されている。水平変位は負圧载荷開始時点から急速に発生しており、経時的に沈下量と同様の傾向を示している。

各工区中心部から東側護岸までの沈下分布をまとめたものが図－15(a)である。同測線上の改良部と未改良部の境界部に設置した孔内傾斜計の計測結果から水平変位の鉛直方向分布をまとめたものが図－15(b)である。

図－15(a)を見ると、試験施工終了時期(1/15)、A 工区の沈下量の最大値は施工範囲の中心部付近で約 300cm、B 工区の沈下量の最大値は施工範囲の中心部付近で約 350cm を示している。境界部から東側護岸方向に沈下量は少なくなっているものの、A 工区で 100 ～ 150cm 程度、B 工区で 200 ～ 250cm 程度の沈下量が発生しており、沈



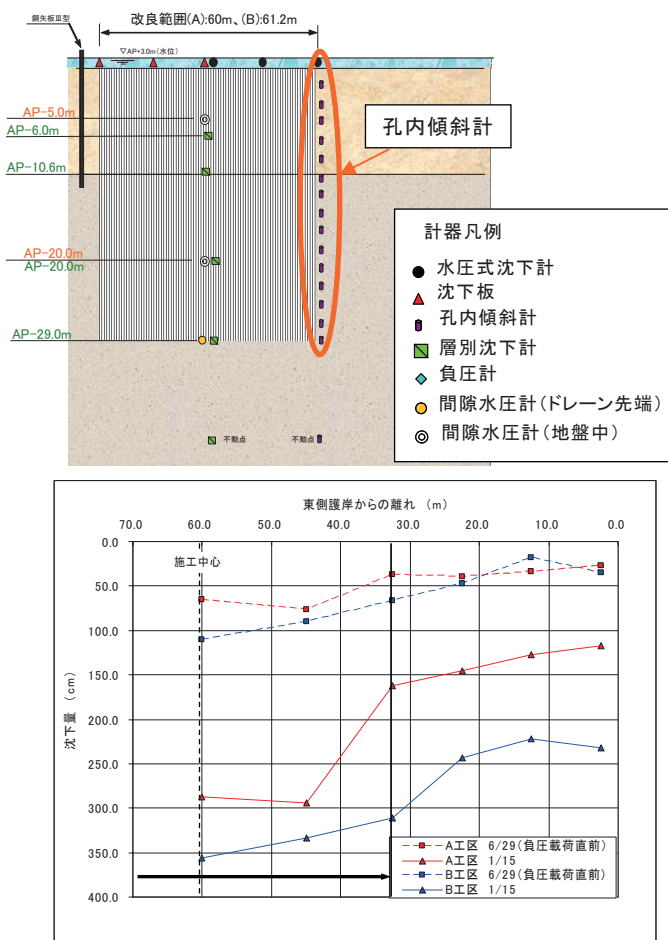
図－13 各段階における地盤面の状況



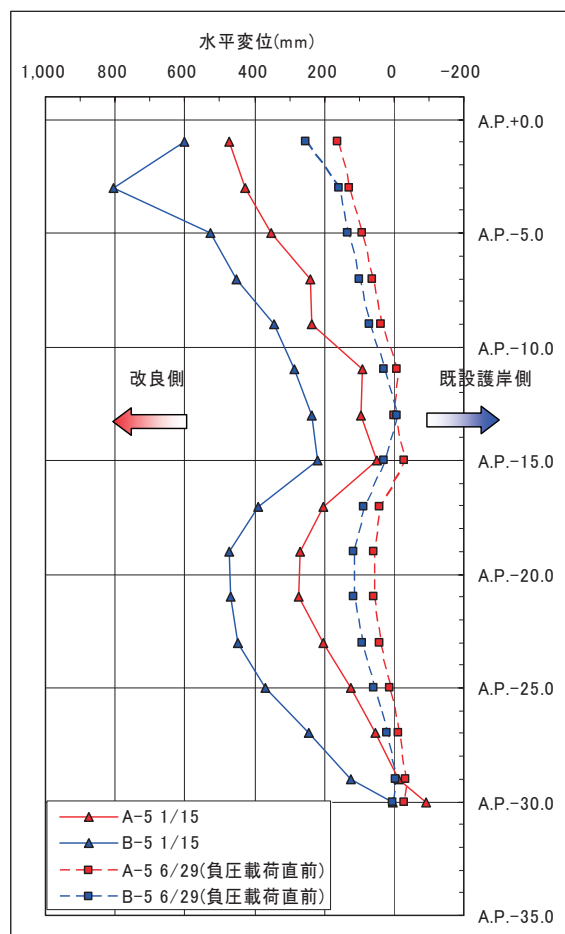
図－14 計測結果（時系列）

下促進対策の効果が広範囲に渡っている。図－15(b)から、同様に試験施工終了時期の水平変位はいずれも改良側に向かって発生しており、浅層部(A.P.0 ～ -1.0m 付近)ならびに有楽町層中央部付近(A.P.-21.0m 付近)で大きな水平変

位が発生している。変位量は A 工区で最大約 500mm、B 工区で最大約 800mm 程度となっている。水平変位が改良部に向かって発生する現象は当初の想定どおりであるが、浚渫土と有楽町層の境界部付近で変位量が少なく節状の変



(a) 地盤面の沈下状況



(b) 水平変位の分布(改良部と未改良部の境界部)

図－15 地盤変形状況

位分布となっている要因としては、浚渫土荷重による有楽町層の圧密の進行が挙げられる。このように地盤の圧密度等変形のし易さに応じて水平変位の発生量が大きく異なることがあるため、水平変位量に着目した検討を行う際には留意が必要である。

(3) 試験施工結果まとめ

上記結果も含め、試験施工にて得られた知見を以下に述べる。

- ① 海上部における真空圧密ドレーン工法の施工性に問題はなく、陸上部で実施した場合とおおむね同等の施工効率(70本/日)となった
- ② 浚渫土層を負圧シール層として施工した本工法により、土中に負圧が有効に作用し、沈下促進効果は明瞭であった。
- ③ 沈下量および水平変位量はいずれもドレーンピッチが小さいB工区(1.8m)の方がA工区(2.0m)と比較して大きい量となった。
- ④ 改良域から32.5mの離隔で設置されている既設護岸(既設鋼矢板)の変位は負圧載荷前後において一

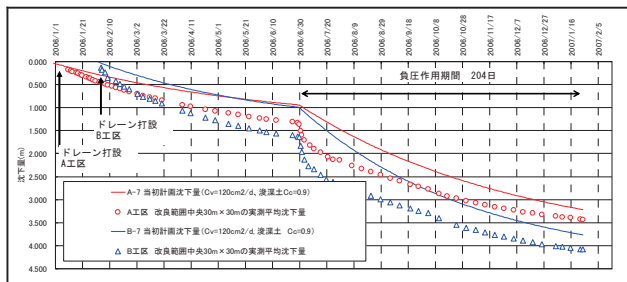
定の傾向がなく10～-10mmの範囲となっており、負圧載荷による影響はほとんど認められなかった。

5. 解析との比較

(1) 一次元圧密沈下解析による検討

設計時に用いた推定手法について検証するため、試験施工における地盤条件、載荷条件を考慮し、一次元圧密沈下理論ならびに井戸の理論(Barronの式)に基づいて沈下量の推定を行った。図－16は既往の調査結果から地盤の圧密特性を設定し、浚渫土重量による有楽町層の沈下ならびに負圧載荷による浚渫土ならびに有楽町層の沈下量を重ね合わせて算出した沈下量の経時変化をとりまとめたものである。本結果から、負圧載荷開始時の沈下量の推定精度が低いものの、とくに作用負圧がおおむね一定となった平成18年10月末～平成19年1月終了時までの期間において、推定曲線の傾きと実測値の傾きとの整合性は良好である。このことから、一次元圧密理論ならびに井戸の理論に基づく沈下量、ならびに沈下速度の推定は、真空圧密ドレーン工法適用時の地盤の推定に有効であると判断できる。負圧載荷開始時の沈下量の推定精度が低い原因として、試験施

工ヤード部の浚渫土の埋立て時期が不明確なため現時点での地盤の状況が不明であり、解析条件の設定が困難であることが挙げられる。

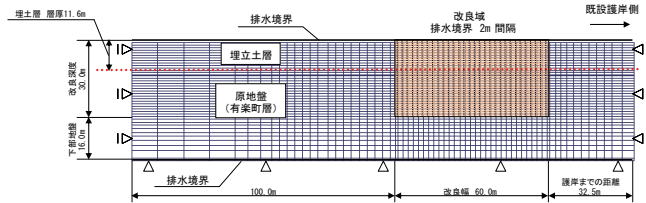


図－16 一次元圧密沈下解析結果と実測値との比較

(2) 2次元 FEM 粘弾塑性解析による検討

実施設計において、既設護岸への影響検討を実施する必要がある、真空圧密ドレーン工法施工時の地盤変形を定量的に把握する必要があることから、地盤の変形、圧密挙動を再現でき、多くの実務で適用されている関口・太田モデルを用いた 2 次元 FEM 弾粘塑性解析を行った。

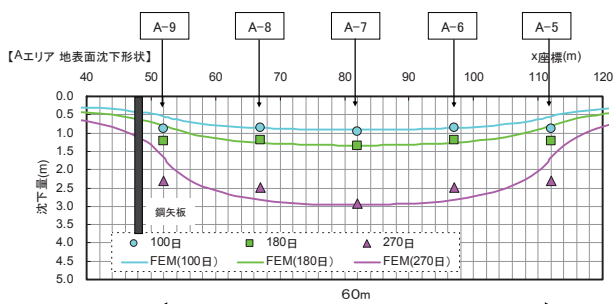
解析モデルは図－17 に示す通りである。



図－17 二次元 FEM 解析モデル

改良域中心部の沈下量の推移を透水係数に着目してフィッティングした結果、試験値から求められた透水係数の 1.5 倍～2.5 倍程度にしたケースで沈下傾向を良く再現できた。

図－18 には、A 工区の水平方向の地表面の沈下量測定値と FEM による推定値を図示した。本結果から地表面沈下形状は、改良中央で実績と解析結果がよく一致しているが、改良域端部(A-9)では解析結果の方が小さくなっている。改良範囲の端部では誤差が大きくなっている要因として、仕切り矢板の影響や浚渫土の地盤特性のばらつきなどが挙げられる。



図－18 二次元 FEM 解析結果と実測値の比較

6. まとめ

一連の検討・試験施工の経緯により得られた知見を以下に示す。

- 真空圧密ドレーン工法の海上における施工性は比較的良好で、大規模施工に適用が可能であると判断される
- キャップ付ドレーンへの負圧载荷により、試験施工部の土中で負圧が有効に作用し、圧密促進効果が認められる
- 解析結果との比較結果から、真空圧密ドレーン工法施工時の沈下量は、井戸の理論(Barron)に基づく一次元圧密沈下解析により推定が可能である

試験施工結果を反映した本工事施工後の予測解析結果に基づき、既設護岸の安全性確保、汚染物質流出防止のための遮水基盤確保、経済性等に着目して対策工の施工範囲、ドレーンピッチ、打設深度を決定し実施設計を行った。一連の設計検討・試験施工の結果から、海上部での真空圧密ドレーン工法の適用性、予測解析手法・モデル化の妥当性が検証できた。本延命化策の適用により C ブロックでは約 200 万 m^3 の処分容量の確保が可能で、約 2 年間分の浚渫土受入れ期間の延長が実現できる見込みである。

全国の一般廃棄物の海面処分比率は平成 10～16 年の間にほぼ倍増しており、海面処分場の計画的な確保は国の港湾整備事業においても重点事項として挙げられている。

以上を踏まえ、海面処分場の建設や、その延命化のための技術のニーズは今後も高まっていくと考えられ、真空圧密工法の水上新工技術の技術開発による適用性の拡大、予測精度の向上による経済的な設計手法の確立、より効果的な延命化策の提案等が望まれていると考えられる。

謝辞：本稿は東京都港湾局発注の「平成 16 年度新海面処分場 C ブロック延命化対策実施設計」、ならびに「平成 18 年度新海面処分場延命化対策(沈下促進)実施設計」業務によって得られた成果の一部をご紹介させていただいたものである。業務の遂行にあたり、平成 18 年度に実施された「新海面処分場延命化対策(沈下促進)技術検討委員会」において東京工業大学太田秀樹教授、首都大学東京大学院小泉明教授、国土交通省関東地方整備局港湾空港技術調査事務所諸星一信所長、(独)港湾空港技術研究所渡部要一土質研究室長から多くのご助言・ご指導をいただいた。また東京都東京港建設事務所の関係各位、真空圧密ドレーン工法研究会の関係各位ならびに社内の多くの方からのご協力をいただいた。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 東京都港湾局：新版東京港地盤図、2005。