

(別紙 2)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 課題番号 第 7 号

2. 研究課題名

「周辺地盤影響の少ない地中拡翼型地盤改良工法のモニタリング・制御方法の開発」

3. 研究期間 平成 23 年度～平成 24 年度

4. 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	(代表者氏名)	(所属機関・職名)
研究代表者	石井 裕泰	大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 地盤岩盤研究室 主任研究員
共同研究者	堀越 研一	大成建設株式会社 技術センター 技術企画部 企画室 室長
	青木 智幸	大成建設株式会社 技術センター 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室 室長
	藤原 斉郁	同 主任研究員
	松井 秀岳	同 主任
	小林 真貴子	同 研究員

5. 補助金交付総額 17,550 千円

6. 研究・技術開発の目的

「地中拡翼型の地盤攪拌改良工法」の開発に関して、実用に耐えうる効率的な施工および品質確保に不可欠な、施工制御システムを開発する。本システムを活用しながら、従来型の機械攪拌系改良地盤改良工法と同水準以上の改良品質を実現する施工方法を確立する。

7. 研究・技術開発の内容と成果

7.1 研究開発の概要

(1) 地中拡翼型の地盤攪拌改良工法

本「モニタリング・制御システム」の開発にあたっては、新たな原位置機械攪拌改良である地中拡翼型の地盤攪拌改良工法（図 1、図 2）への適用を前提に検討にあたる。本工法は、表 1 に比較するとおり地中で開閉が可能な攪拌翼を用いることが特徴の新たな工法に位置づけられ、

- ・ 斜め、水平方向の改良が容易に行える。自在ボーリングと組み合わせて、既存構造物直下での改良にも用いられる。（図 3）
- ・ 小型機械により、狭隘部での施工にも適している。
- ・ 障害物を避けて攪拌翼を地中に挿入し、その下部で通常の改良杭が造成できる。

ことが特徴となっている。施工効率を重視した新設向け工法とは異なり、東日本大震災を受けた既存構造物の耐震補強や、今後の維持・補修に対応可能な工法に位置づけられる。

本工法は、小型で機動性に優れる反面、機械が小型で攪拌作業中の機械の動きが地盤抵抗の影響を受けやすい面がある。その結果、対象地盤の攪拌度合やセメントミルクの添加量、さらには固結改良体の品質にばらつきが生じやすい。人的誤差や作業負担の低減等に対して、「モニタリング・制御システム」による導入効果が、特にこのような地盤改良工法では高いと考えられる。

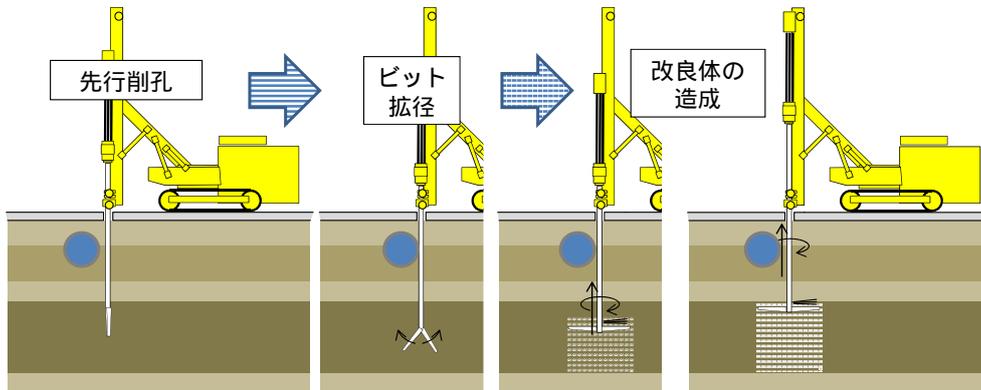


図 1 地中拡翼型の地盤攪拌改良工法の施工手順

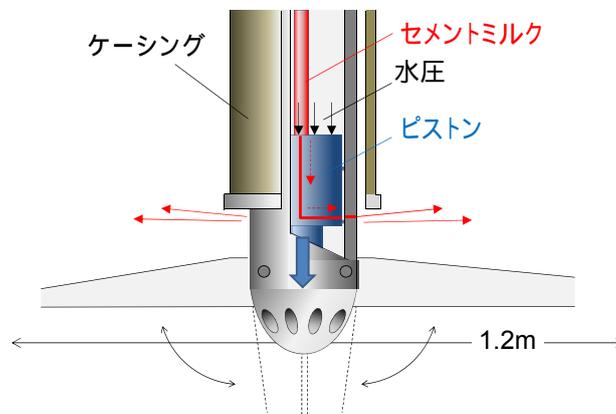


図 2 攪拌装置の概要

表 1 機械攪拌方式での分類・比較

回転軸方向	攪拌方式	攪拌位置・機構	代表的な工法
鉛直	機械攪拌	回転ロッド先端の攪拌翼	CDM 工法
鉛直	機械/噴射攪拌の併用	回転ロッド先端の攪拌翼	SWING 工法
鉛直	オーガー	回転ロッドに沿ったオーガー	SMW 工法
水平	カッターミキサ	カッターミキサ部	CSM 工法
—	チェーンソー・トレンチャー	攪拌部全体	パワーブレンダー工法
鉛直・水平・斜め	機械攪拌	回転ロッド先端の攪拌翼（地中拡翼型）	本開発工法

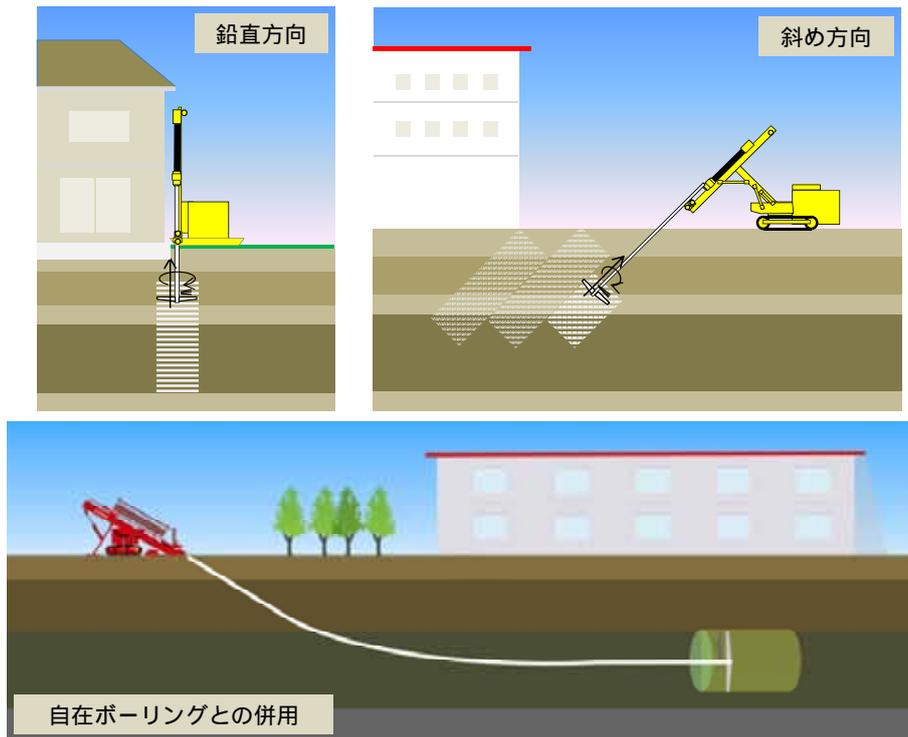


図 3 地中拡翼型の地盤攪拌改良工法の実施イメージ

(2) モニタリング・制御システム

図 4 にモニタリング・制御システムの概要図を、以下にシステムの機能を示す。

① 攪拌翼の回転速度の測定

油圧で制御された攪拌翼の回転は、実際には地盤の硬さに応じてその回転速度が変動する。回転計により、常時、回転速度を測定する。

② フィード速度の制御

攪拌翼を改良体延長方向の前後に動かすフィードの油圧を自動調整し、攪拌翼の回転速度に応じたフィード速度を保持する。すなわち、硬めの地盤に遭遇し攪拌翼の回転速度が低下すればフィード速度を抑え、逆に軟らかめの地盤に遭遇し攪拌翼の回転速度が上昇すれば、フィード速度を上げる。

③ セメントミルクの吐出量の制御

セメントミルクを供給するポンプの押し出し速度を自動調整し、攪拌翼の回転速度、フィード速度に応じたセメントミルクの吐出量を保持する。すなわち、硬めの地盤に遭遇し攪拌翼の回転速度、フィード速度が低下した場合、セメントミルクの吐出量も低下させ、逆に軟らかめの地盤に遭遇し攪拌翼の回転速度、フィード速度が上昇した場合、セメントミルクの吐出量を増大させる。

以上の制御により、改良体の単位延長あたりの攪拌回数、セメントミルクの吐出量が一定値に収まるよう自動調節される。この結果として、

- ・ 強度、品質のばらつきを低減できる、
- ・ 不要なセメントミルクの消費を低減できる、
- ・ セメントミルクの過添加による地盤の隆起を抑制できる、
- ・ オペレータの負担を軽減できる、

といった効果が得られる。

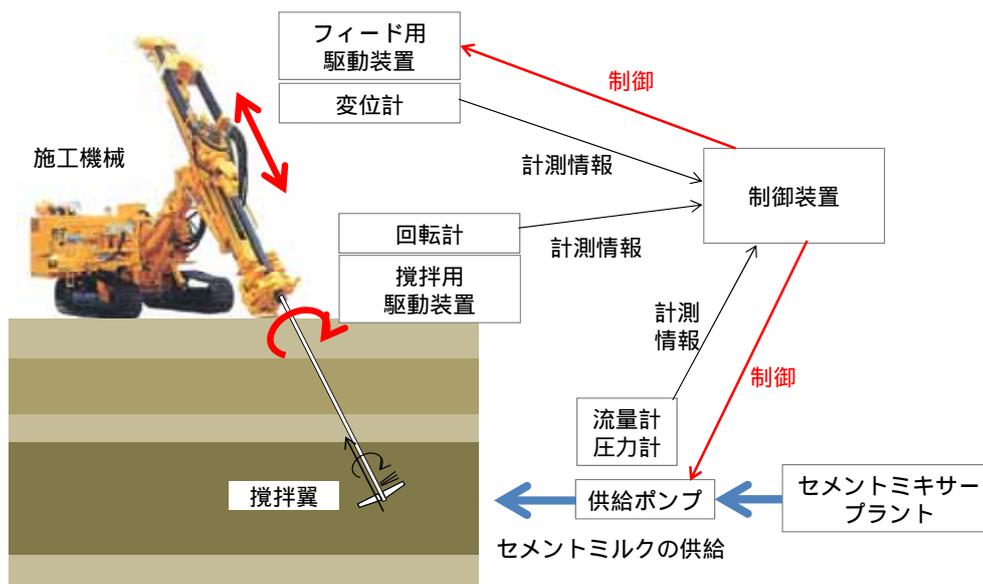


図 4 モニタリング・制御システムの概要

7.2 施工状況のリアルタイムモニタリングシステムを利用した制御システムの開発

(1) 目的

- ・ 地中での攪拌翼の状況，回転速度，フィード速度，トルク等を計測の上，リアルタイムで表示するシステムを構築する．
- ・ 地盤抵抗に応じて変動する実際の回転速度・フィード速度に対して，一定の改良仕様を確保するためにフィード速度，セメントミルク吐出量を自動制御するシステムを開発する．

(2) システムの構築

システムの構築にあたっては，前述の概要を図 5 のシステム図に具体化した．フィード制御に関しては，回転計からの受信信号をアナログ変換し，比例設定した信号により制御弁を調整する．また，セメントミルク供給に関しては，同様の信号に対して，実際の吐出力をフィードバックさせた PID 制御（比例設定に加えて，吐出量の時間積分・差分でも調整をかける手法）を作用させた．

動作確認試験を行うため，写真 1 のように回転計，変位計をロータリー式ボーリング機械に取り付けるとともに，制御装置・送水ポンプを併設した．回転速度のみを意図的に変化させ，移動速度，ポンプの動きを確認したところ，表示版（写真 2）と計測結果の PC 表示（図 6）にて，それぞれの動作が連動しながら自動調整できることを確認できた．

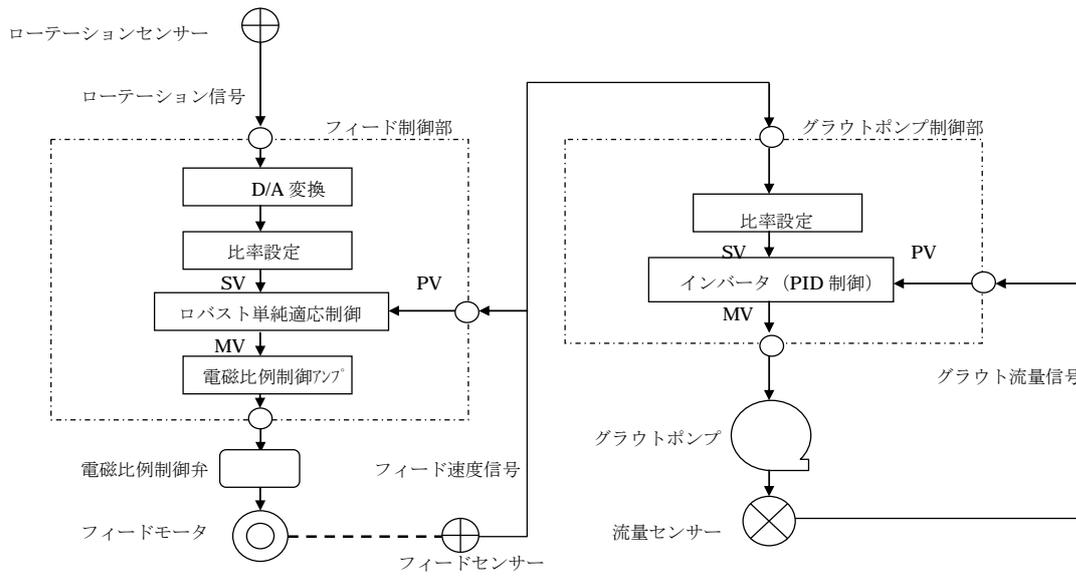


図 5 システム図



写真 1 計測・制御装置



写真 2 表示装置

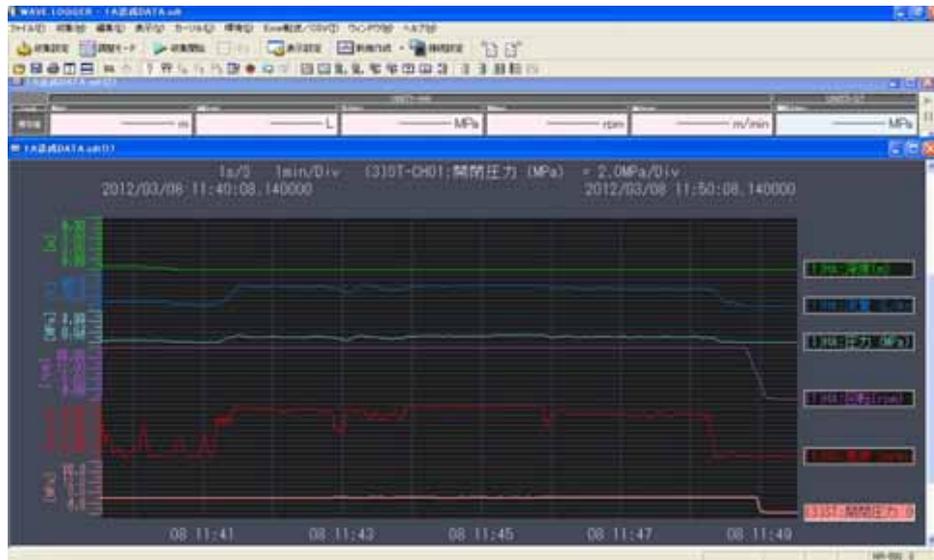


図 6 計測状況(上から 2 段目=流量, 同 4 番目=回転速度, 同 5 番目=フィード速度)

(3) 試験運用

a) 施工試験の概要

上記システムは、以下の施工実験で試験運用にあたった。

実施時期：2012 年 3 月

実施場所：日特建設株式会社猿島総合センター（茨城県坂東市）

実施内容：鉛直方向の改良体 7 体の施工

（モニタリング・制御システムを試験的に運用）

図 7 に改良体配置を示す。改良対象地盤は以下のように人工的に構築した。まず、敷地を深さ 2.5m ほどの掘削し、シートを敷き詰めた上で、山砂をバックホウで軽く突き固めながら投入し、N 値 5 程度の地盤（事後のスーデン式サウンディングで確認）を作成した。地表面高さには、埋設障害物として直径 160mm の鋼管を一本設置した上で、掘り起こした

土を高さ 2m に盛り立てた。その後、ピット内には水を供給し、あらかじめ設置した水位確認孔で、現地盤の地表面付近の水位を確認した。改良体は、20cm のラップを設けた 7 か所 (2-B に位置する箇所では、機器の不調により造成を省略) で、以下の手順で順次造成した (写真 3)。

- ① 埋設管を避け、直径 165mm のケーシングで改良範囲下端まで先行削孔を行う、
- ② ケーシングを通して閉じた状態の攪拌翼を地中に挿入する、
- ③ ケーシングを改良範囲上面まで引き上げる、
- ④ 攪拌装置内のピストン背面圧を加え、攪拌翼を広げる、
- ⑤ 改良範囲下端より引上げ方向、押し下げ方向、引上げ方向の順に造成を行う、
- ⑥ ピストン背面圧を抜き、ケーシングを通して攪拌装置を引き上げる。
- ⑦ ケーシングを回収する。

なお、

- ・ セメントミルクは 4-A、4-B については W/C=0.6 の配合を、その他では W/C=1.0 を用いた。
- ・ 3-A においては、⑤ののち、上部の盛土内で再度攪拌翼を広げ、高さ 50cm の改良体を造成した。

写真 4、写真 5 は、3 日程度の養生後、掘り起こして改良体を確認した状況である。壁状に配置された改良体、埋設管をはさみ上下に造成された様子を確認した。

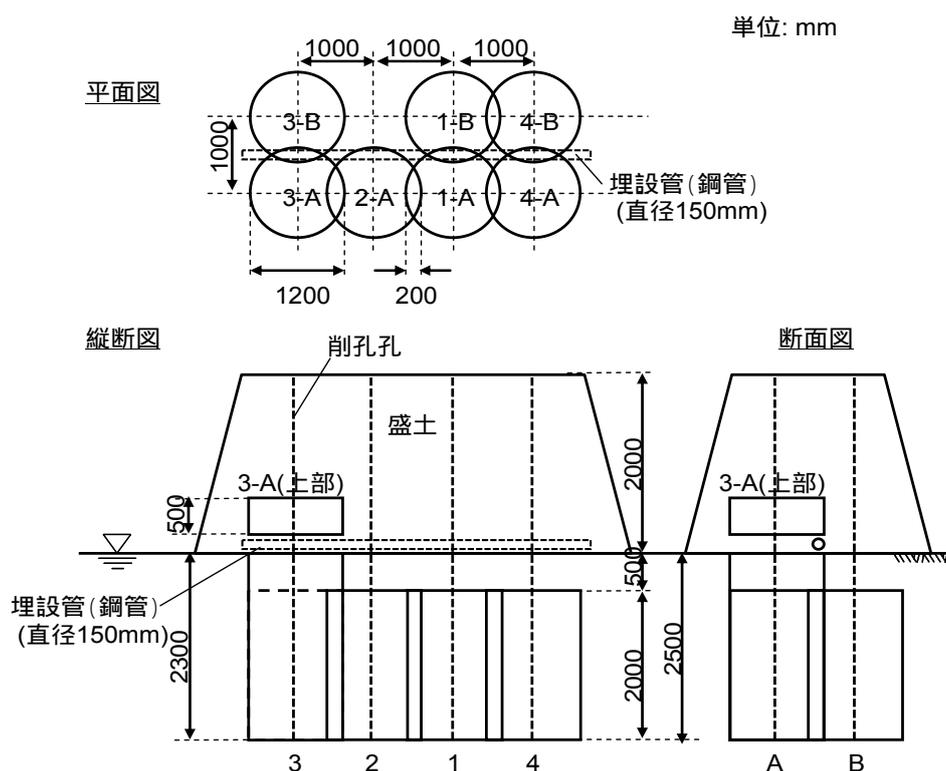


図 7 試験運用を行った施工実験の概要



写真 3 施工実験の実施状況



写真 4 掘り出した改良体の状況（壁状に配置した改良体）



写真 5 掘り出した改良体の状況（地中埋設管の上下で改良を行った結果）

b)モニタリング・制御結果

図 8, 図 9 に, 計測結果の例を示す. ここで, フィード速度は, 引上げ方向, 押し下げ方向, 引上げ方向の 3 パス分を示しており, いずれも速度の絶対値で表示している. 本計測結果より,

- ・ 回転速度は一回目の引き上げ時に一時的な低下が見られたものの, それ以降の押し下げ時, 二回目の引き上げ時とも安定した.
- ・ フィード速度は, 一回目の引き上げ時に変動が見られる一方, 押し下げ時は安定した動きとなっている.
- ・ フィード速度とセメントミルクの吐出量は良好に連動している.

また, 図 10 は, 本計測結果に基づき, 経過時間とセメントミルクの積算流量の関係にまとめたものである. 図中には, 実測結果加えて, 制御を加えずに 40L/min で供給を続けた場合の想定値も示している. 施工時間が 20%程度余計に要したのに対して, セメントミルクの供給量は 4%程度に抑えることができた.

以上のような計測結果をすべてについて取りまとめたのが, 表 2 となる. 本表では, 各改良体高さも計測結果より特定している. 一番右の欄に示した「40L/min で固定した場合の吐出量」は, 上記のように制御システムを導入しなかった場合を想定したもので, 施工時間との積で算出している. 本結果によれば, 施工時間は最大 20%程度の変動が生じ, これに相応したセメントミルクの余剰添加が発生するところ, 制御システムの導入により 3%以内に抑制することができた.

なお, 図 11 は, 事後調査において改良体から採取したサンプルを用いて調べた一軸圧縮強さの頻度分布である. 得られた変動係数は 40.1, 27.7%であり, 地盤改良指針に示された水準 (40%程度以下) に収めることができています.

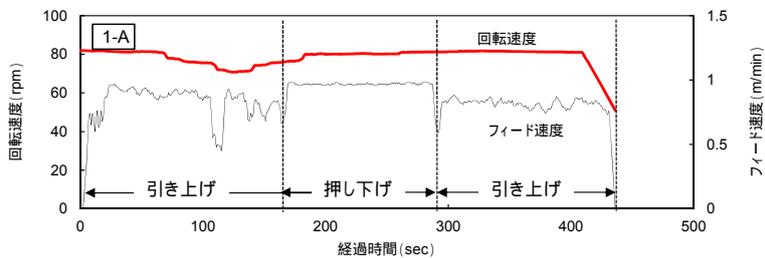


図 8 計測結果の例(1-A:フィード速度, セメントミルク吐出量)

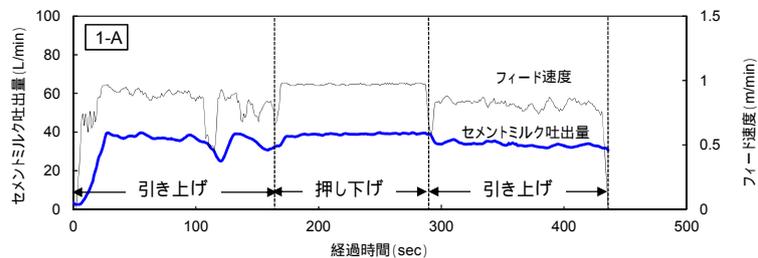


図 9 計測結果の例(1-A:フィード速度, セメントミルク吐出量)

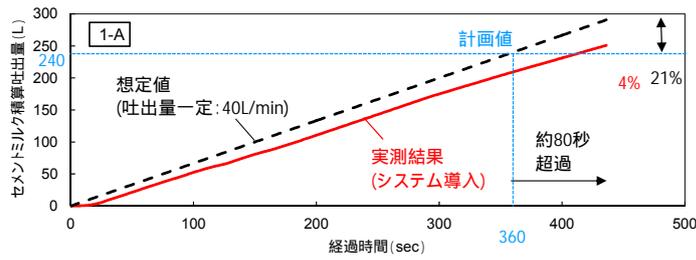


図 10 施工時間とセメントミルクの積算供給量の関係

表 2 改良結果の一覧

	時間 (分/m)		造成長さ (L)		吐出量 (L/m ³)		セメント量 (kg/m ³)		羽根切り回数 (回/m)		[参考] 40L/minで固定した場合の吐出量 (L/m ³)	
	3	増減 (%)	2	増減 (%)	106.1	増減 (%)	80.5	増減 (%)	240	増減 (%)	106.1	増減 (%)
計画 W/C=1.0	3		2		106.1		80.5		240		106.1	
1-A	3.63	21	2.04	2	108.9	3	82.7	3	280.8	17	128.5	21
1-B	3.29	10	1.90	▲ 5	109.0	3	82.7	3	275.8	15	116.5	10
2-A	3.33	11	1.92	▲ 4	108.6	2	82.5	2	274.4	14	117.9	11
3-A	3.50	17	2.01	0	104.1	▲ 2	79.0	▲ 2	205.0	▲ 15	123.9	17
3-B	3.29	10	1.93	▲ 4	109.6	3	83.2	3	233.1	▲ 3	116.5	10
計画 W/C=0.6	3		2		106.1		115.7		240		106.1	
4-A	3.69	23	2.04	2	108.2	2	118.0	2	242.4	1	130.6	23
4-B	2.85	▲ 5	1.75	▲ 13	107.0	1	116.7	1	107.9	▲ 55	100.9	▲ 5

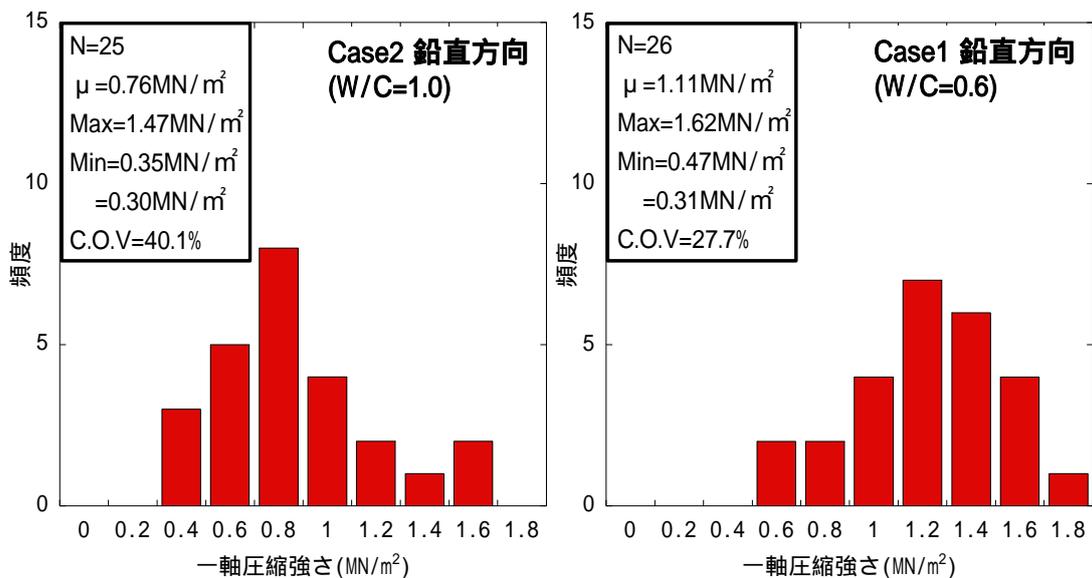


図 11 一軸圧縮強さの頻度分布

(4) まとめ

- ・ 攪拌翼の回転速度、フィード速度、セメントミルクの吐出量を制御する施工システムを構築した。
- ・ 動作確認試験を通じて、回転速度に連動したフィードの動き、ポンプの吐出を確認した。
- ・ 自社での施工実験において試験的に運用した結果、システムを利用しない場合に想定された 20%程度のセメントミルクの余剰添加量を 3%未満に収めることができた。

7.3 モニタリング・自動制御システムを含む地盤改良工法としての一体化技術の確立

(1) 目的・目標性能

実施工を想定した規模の施工実験を行い、工法全体の有効性、個別技術の動作性、達成品質を確認する。特に、今回、後述するように実際に液状化が生じた東京湾沿岸部の浚渫地盤で施工実験を行うこととなった。前述の人工地盤での検証に加えて、浚渫地盤における監視・モニタリングシステムの適用性も検討する。

(2) 実施計画

施工実験は、「浦安市が管理する施設を利用した液状化対策工法の実証実験」事業の一環として、浦安市運動公園内敷地の陸上競技場建設予定地にて実施した。(図 12, 写真 6)

図 13 に、施工実験に先立ち確認した地盤の柱状図を、図 14 に各層の粒度分布を示す。Fs1, Fs2 の砂質土層は細粒分含有率が 30%以上で、液状化の恐れはあるが浸透性が悪く薬液注入系の改良が適用困難な地盤であった。

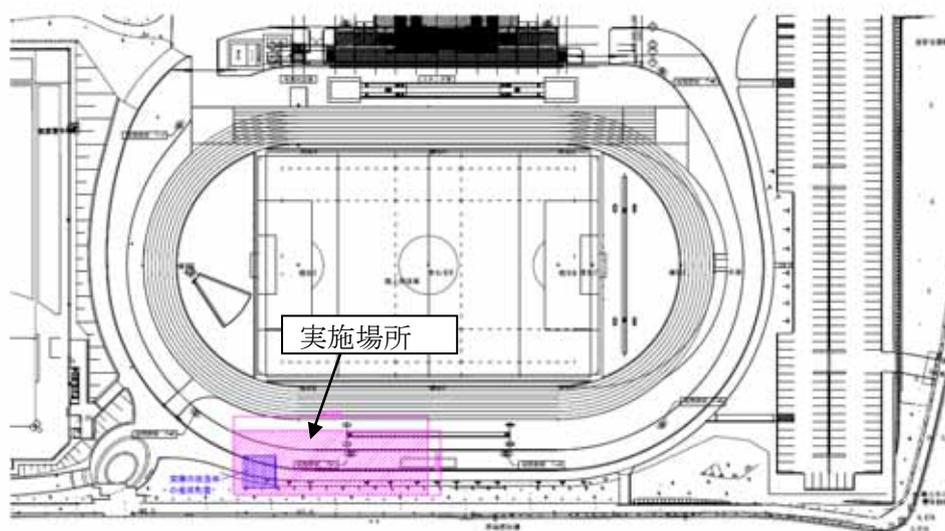


図 12 実施場所(浦安市運動公園内の陸上競技場建設予定地)



写真 6 実施場所の状況

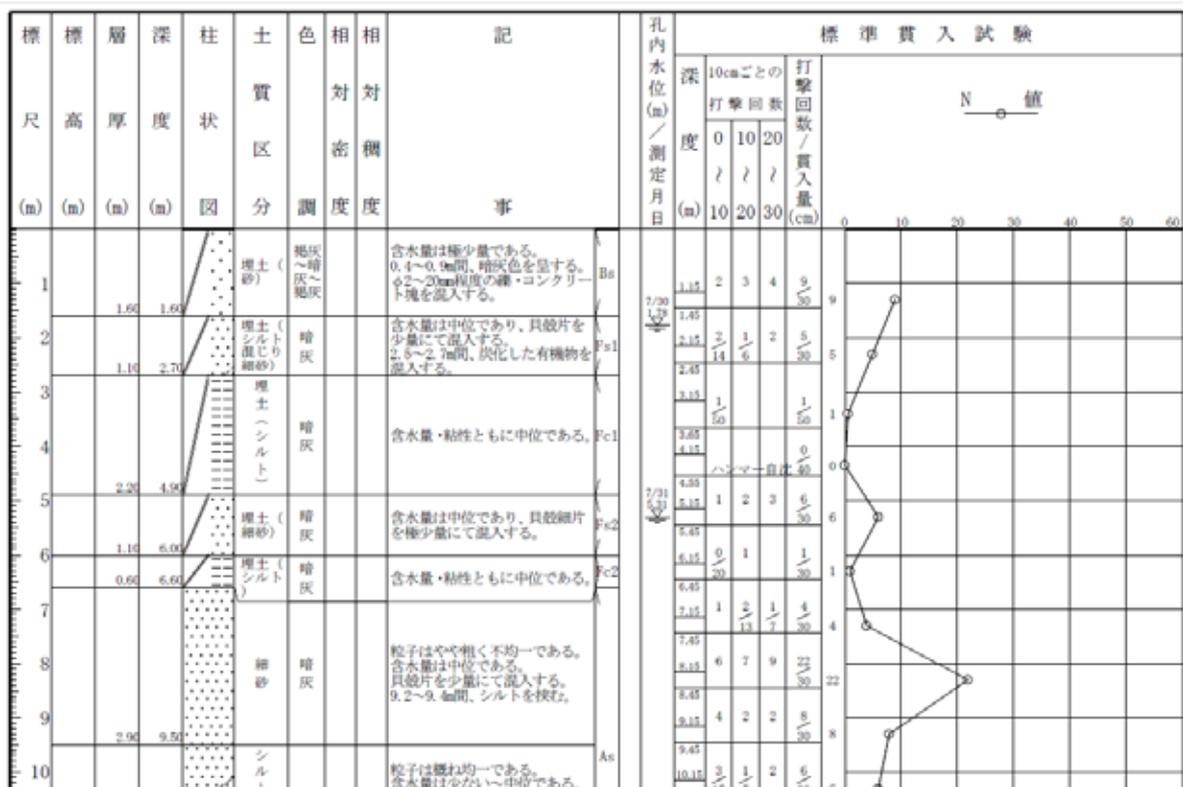


図 13 施工試験箇所地盤柱状図

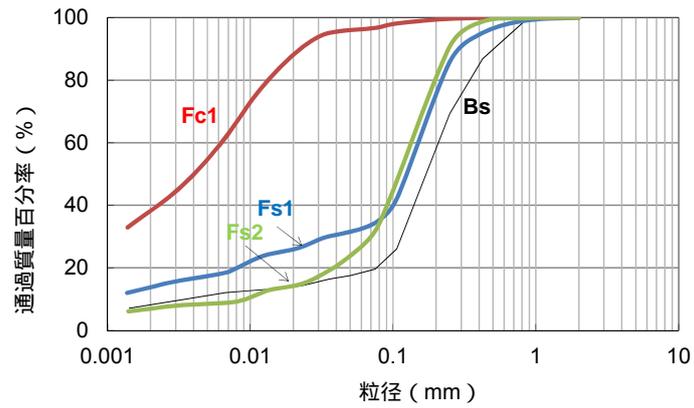
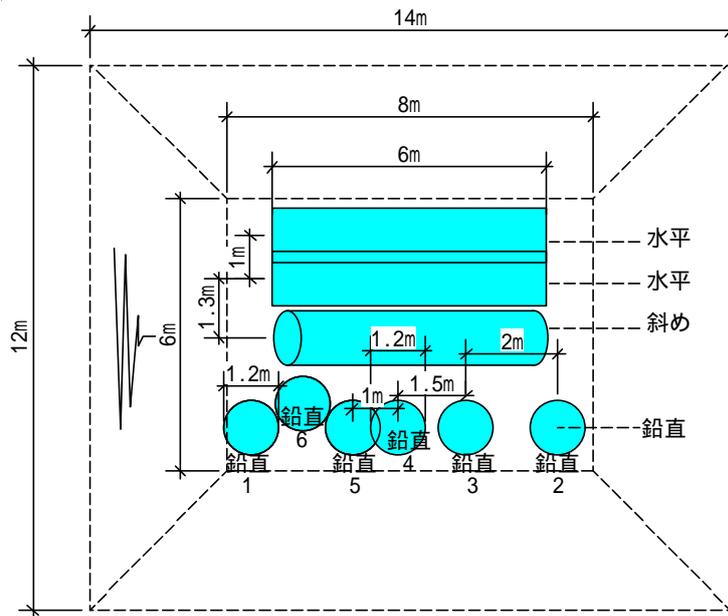


図 14 粒度分布

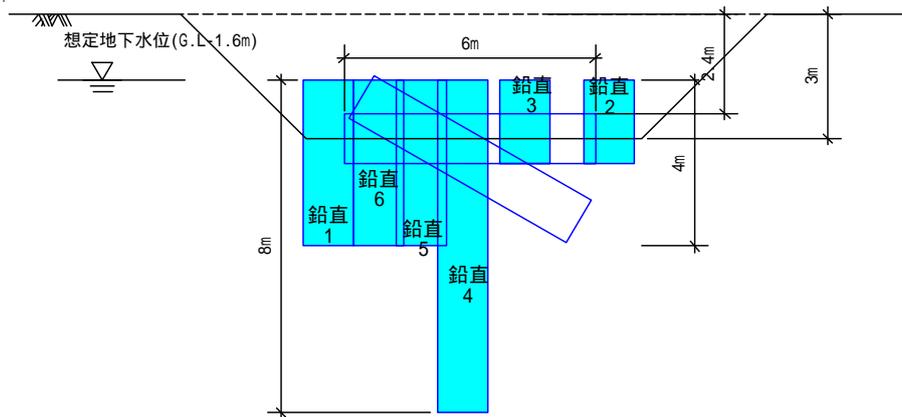
図 15 に改良体の配置計画を，表 3 に各改良体の造成計画を，表 4 に施工仕様を示す．地中拡翼型の地盤改良工法の特徴を活かした①鉛直施工，②斜め施工，③水平施工，を盛り込み，

- ・ 斜め，水平施工時の地表面変状計測
- ・ 掘削した上で，改良体上部の目視確認
- ・ コア観察・改良強度の調査
- ・ モニタリング・制御の検証

にあたった．



(a) 平面図



(b) 断面図

図 15 改良体の配置計画

表 3 造成計画

改良体	長さ(m)	施工仕様	備考
鉛直 1 (V1)	4	1 パス	小型機械
鉛直 2 (V2)	2	標準	
鉛直 3 (V3)	2	1 パス	
鉛直 4 (V4)	8	標準	
鉛直 5 (V5)	4	段階攪拌	
鉛直 6 (V6)	4	段階攪拌	
斜め (I)	6	標準	
水平 1 (H1)	6	水平用	
水平 2 (H2)	6	水平用	

表 4 施工仕様

分類	標準	段階攪拌	1パス	水平
固化材吐出量 (L/m)	240	240	120	120
セメント量 (kg/m)	132	132	66	66
(kg/m ³)	117	117	58	58
固化材吐出速度 (L/分)	40	20/40	60	10/20
回転速度 (回転/分)	40	20/40	40	20/40
通過回数 (pass/m)	3	3	1	3
施工時間 (分/m)	6	8	2	8
フィード速度 (分/m・pass)	2	4/2	2	4/2
羽根切回数 (回/m)	480	480	160	480

- ・表記の説明：20/40 1パス目 20，2・3パス目は 40
- ・1パス施工：造成に先立って無水で先行攪拌を行った。

(3) 施工状況

写真 7，写真 8 に施工実験で用いた地中拵翼型の地盤攪拌装置を，写真 9～写真 13 に施工状況を示す。また，写真 14 は実際に造成している際の操作状況である。マニュアル操作の際には，オペレータが各レバーを操作し，回転速度，フィード速度を調整しながら施工を進める必要があり，セメントミルクの吐出は一定値が確保されることとなっていた。これに対して，モニタリング・制御システムの導入により，オペレータは操作盤のセメントミルクの供給圧力や速度，フィード速度等の数値を監視し，トラブル発生時にのみ停止ボタンを押す形態となった。



写真 7 地中拡翼型の攪拌装置



写真 8 施工機械に搭載しての動作確認状況



写真 9 実施状況(鉛直施工)



写真 10 実施状況(鉛直施工:小型機械)



写真 11 実施状況(斜め施工)



写真 12 実施状況(水平施工:自在ボーリング)



写真 13 実施状況(水平施工:改良体の造成)



写真 14 施工中の状況

(4) 施工中の地表面変状

a)測定方法

造成作業中の地表面変状は，造成箇所の上部地表面に 2m 間隔で設置したターゲットを，造成の進捗に合わせて 3 次元測量することで記録した．写真 15 に測定状況を，写真 16 に設置したターゲットを示す．



写真 15 地表面変状の計測状況



写真 16 地表面変状の計測に用いたターゲット

b)斜め施工

地表面変状ターゲットの配置を図 16 に，実施状況を写真 17 に示す．施工中，目視の範囲では目立った変状は見られなかったが，終了時には写真 18 に示すような口元での隆起が発生した．施工中は，原地盤になじまずにセメントミルクがケーシング内やケーシング外周の緩み領域から上がってくる傾向が見られたが，施工の最終段階でこれらの排出経路が閉塞

したことが原因と考えられる。特に、斜め方向では鉛直方向に比べて、ケーシング外周部の孔壁安定性が劣り、閉塞を助長しやすいことが考えられる。

地表面変状の推移を図 17 に、分布を図 18、図 19 に示す。いずれの計測地点でも、2 リフト 4m の施工を終えた時点では変状はほとんど生じていないが、残りの 1 リフト 2m の施工で 15mm ほどの隆起が生じた。横断方向の分布では、改良体位置を対象に左右対称に隆起が生じる一方、縦断方向には口元に向けて隆起が大きくなっている。施工の進行とともにセメントミルクの滞留、閉塞が進む見やすいこと、また縦断方向に土被り厚が変化していることが隆起量の分布に影響することを示している。

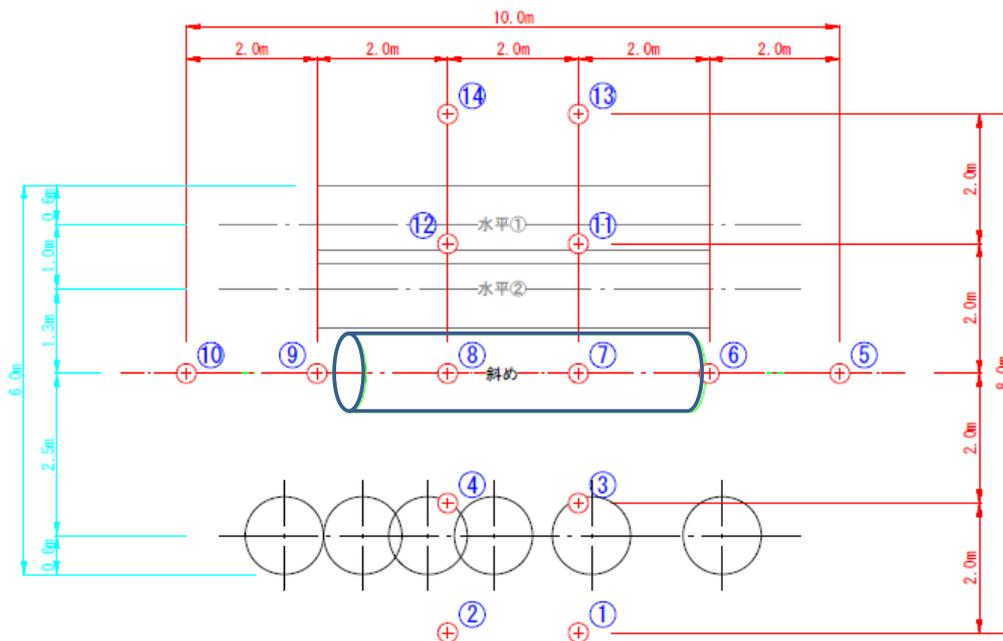


図 16 地表面変状の計測点(斜め施工)



写真 17 地表面変状(斜め施工)



写真 18 地表面変状(斜め施工:終了直前に生じた口元の隆起)

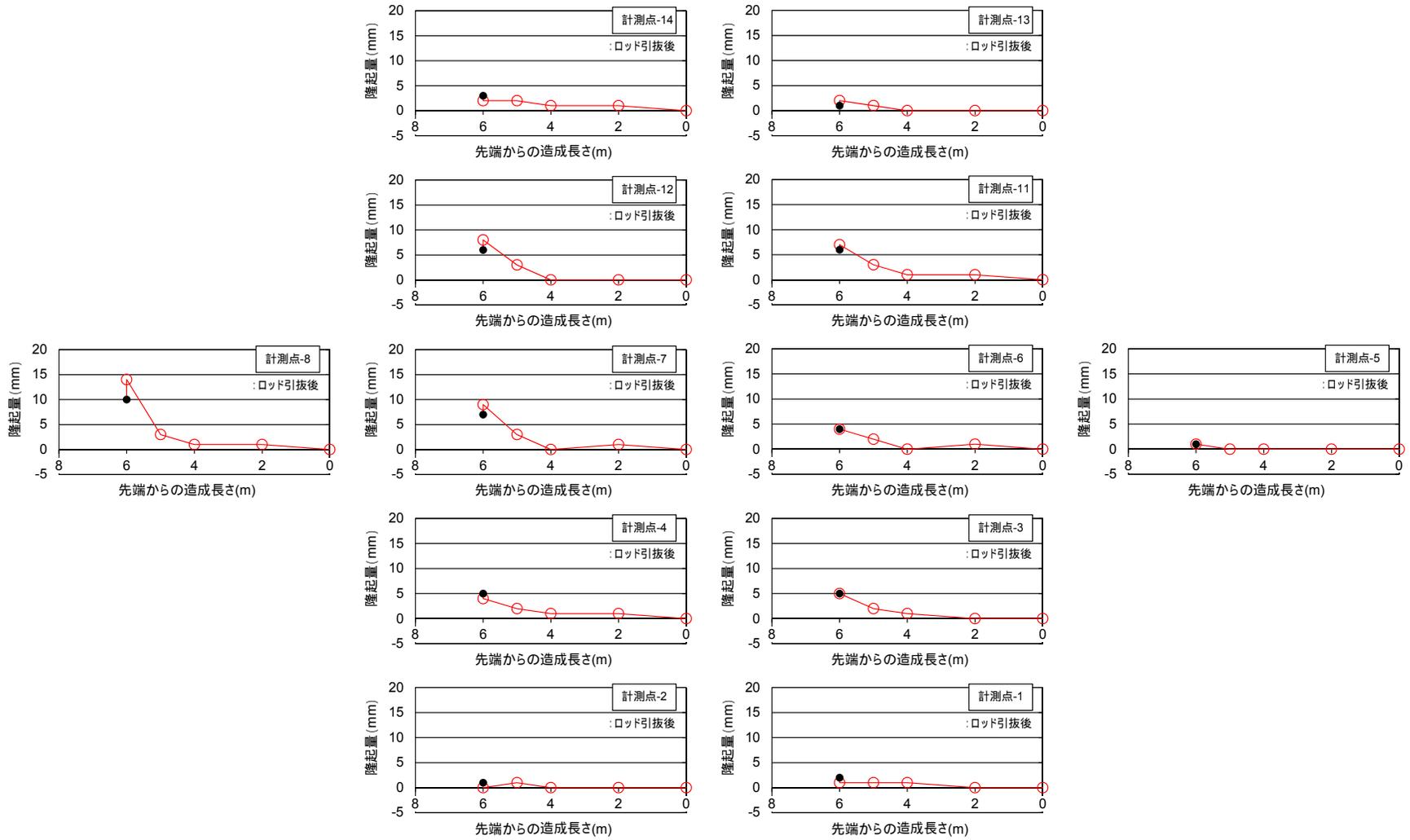


図 17 地表面変状の変化(斜め施工)

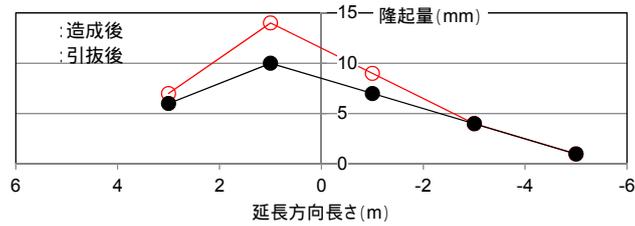


図 18 隆起量分布(斜め施工 | 延長方向)

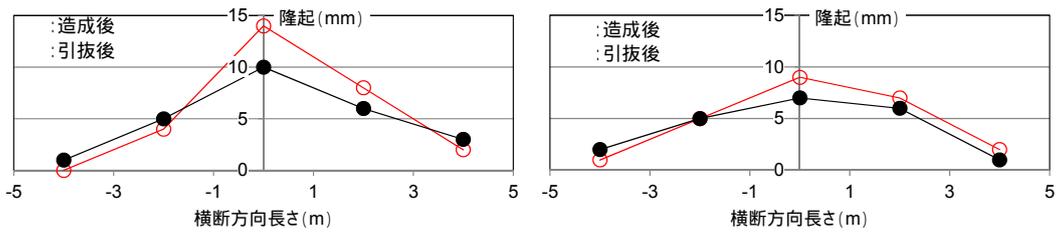


図 19 隆起量分布(斜め施工 | 横断方向)

c) 水平施工 1

地表面変状ターゲットの配置を図 20 に, 実施状況を写真 19 に示す. 斜め施工と同様に, 目視の範囲では施工中目立った変状は見られなかった.

図 21 に地表面変状の推移を, 図 22, 図 23 に縦断, 横断の変状分布を示す. 本結果より,

- ・ 1 リフト 2m 施工時点では, いずれの測定点でも隆起は発生していない.
- ・ 4m 施工時点で, その直上に近い測定点 (3, 7, 11) で明らかな変状が発生する.
- ・ その後, 6m 施工時点で, その直上に近い測定点 (4, 8, 12) で変状が目立ってくる.
- ・ 縦断方向, 横断方向とも, 改良体中心に対して対称に隆起が分布する.

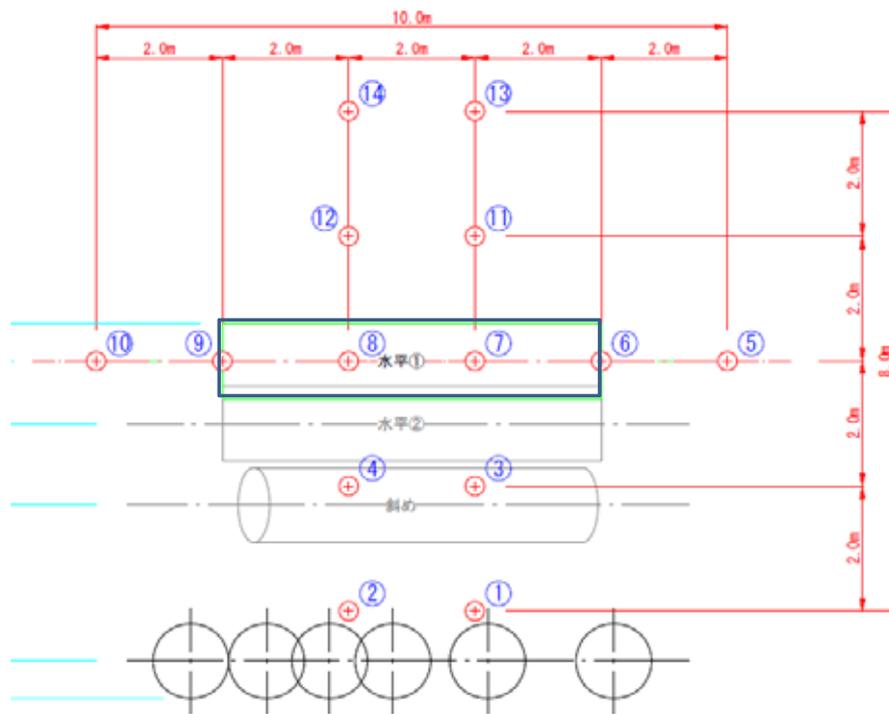


図 20 地表面変状の計測点(水平施工 1)



写真 19 地表面変状(水平施工 1)

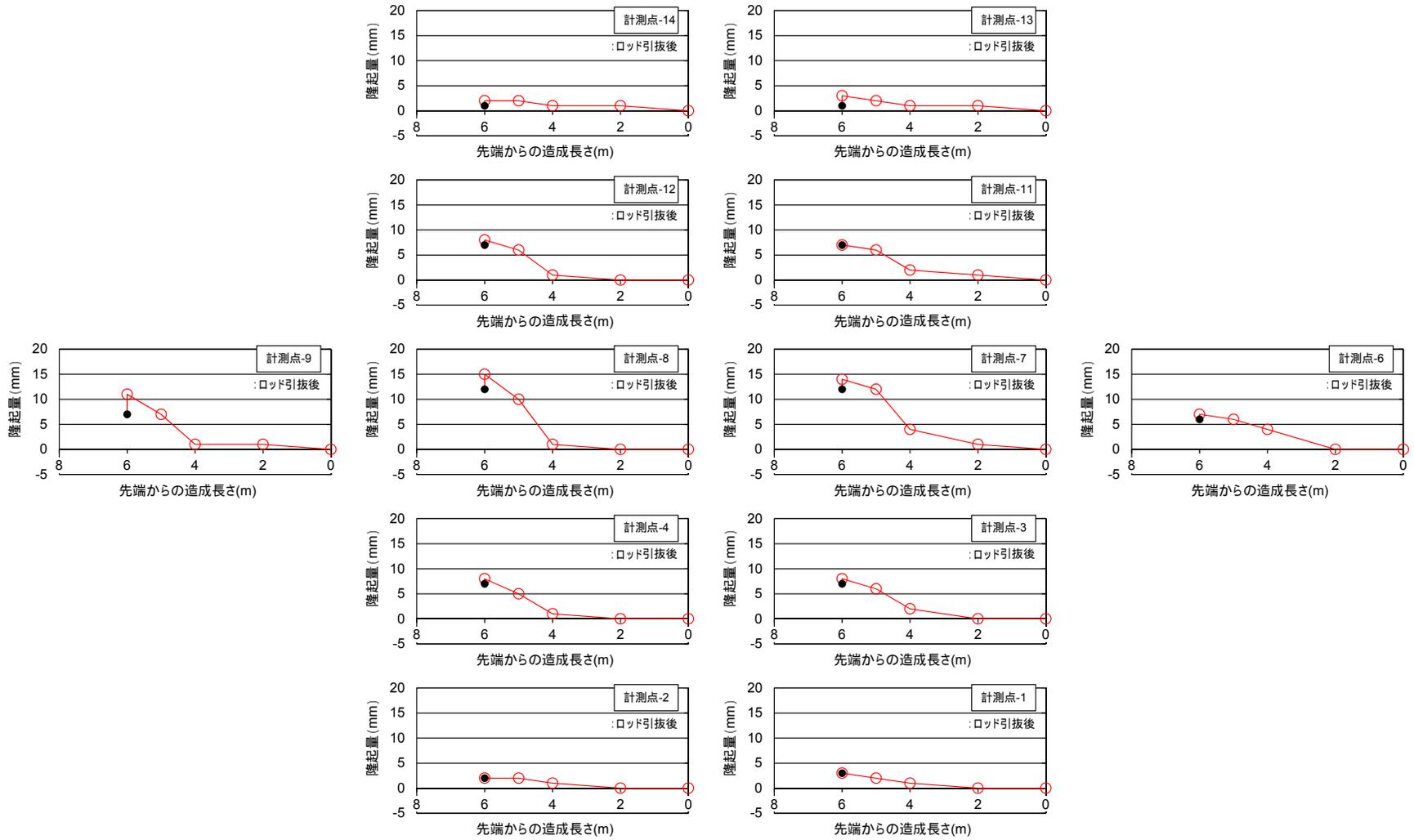


図 21 地表面変状の推移(水平施工 1)

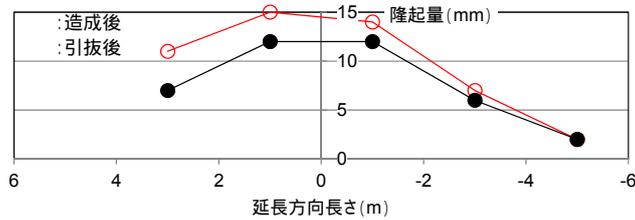


図 22 隆起量分布(水平施工-1 | 延長方向)

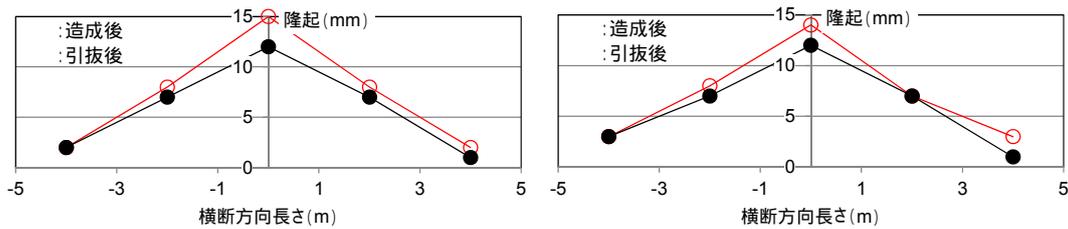


図 23 隆起量分布(水平施工-1 | 横断方向)

d)水平施工 2

地表面変状ターゲットの配置を図 24 に、実施状況を写真 20 に示す。施工中、地表面にはクラックが発生し、セメントミルクが数か所から流れ出た。

地表面変状の推移を図 25 に、縦断、横断の変状分布を図 26、図 27 に示す。本結果では、

- ・ 1 リフト 2m を施工した時点で、この直上部分で 10mm 程度の隆起が発生している。
- ・ 施工の進展に伴い、最大 40mm ほどの隆起が生じた。前述の斜め施工、水平施工-1 に比べて 2 倍以上の変状となった。
- ・ 縦断方向の変状は、改良体中心位置で対称に近い分布となっている。これに対して、横断は、1m ほどずれた位置に対称軸が移動しているように見受けられる。

このような横断方向の変状分布は、後述のように水平施工 2 が水平施工 1 に乗り上げるような位置にあったことと対応している。横断方向の変状中心位置のずれは施工当初からのもので、セメントミルクが先行改良された部分に供給されたことにより原地盤とはなじみにくく、このことが影響して隆起を引き起こしたと推察される。

乗り上げるような位置にずれを生じた理由は定かでないが、ケーシングが軟弱な粘性土層に位置し、攪拌により受ける抵抗力に対する反力を十分に得られなかったことが要因として考えられる。実務での適用にあたっては、そうした観点での適用性を確認するとともに、施工順序を工夫するなどの対応が必要と思われる。

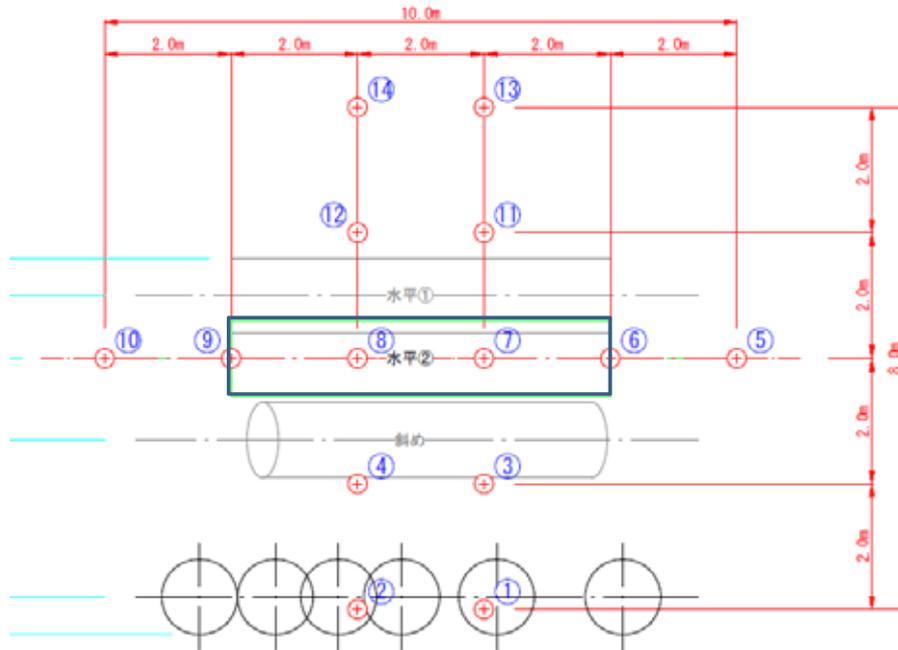


図 24 地表面変状の計測点(水平施工 2)



写真 20 地表面変状(水平施工 2)

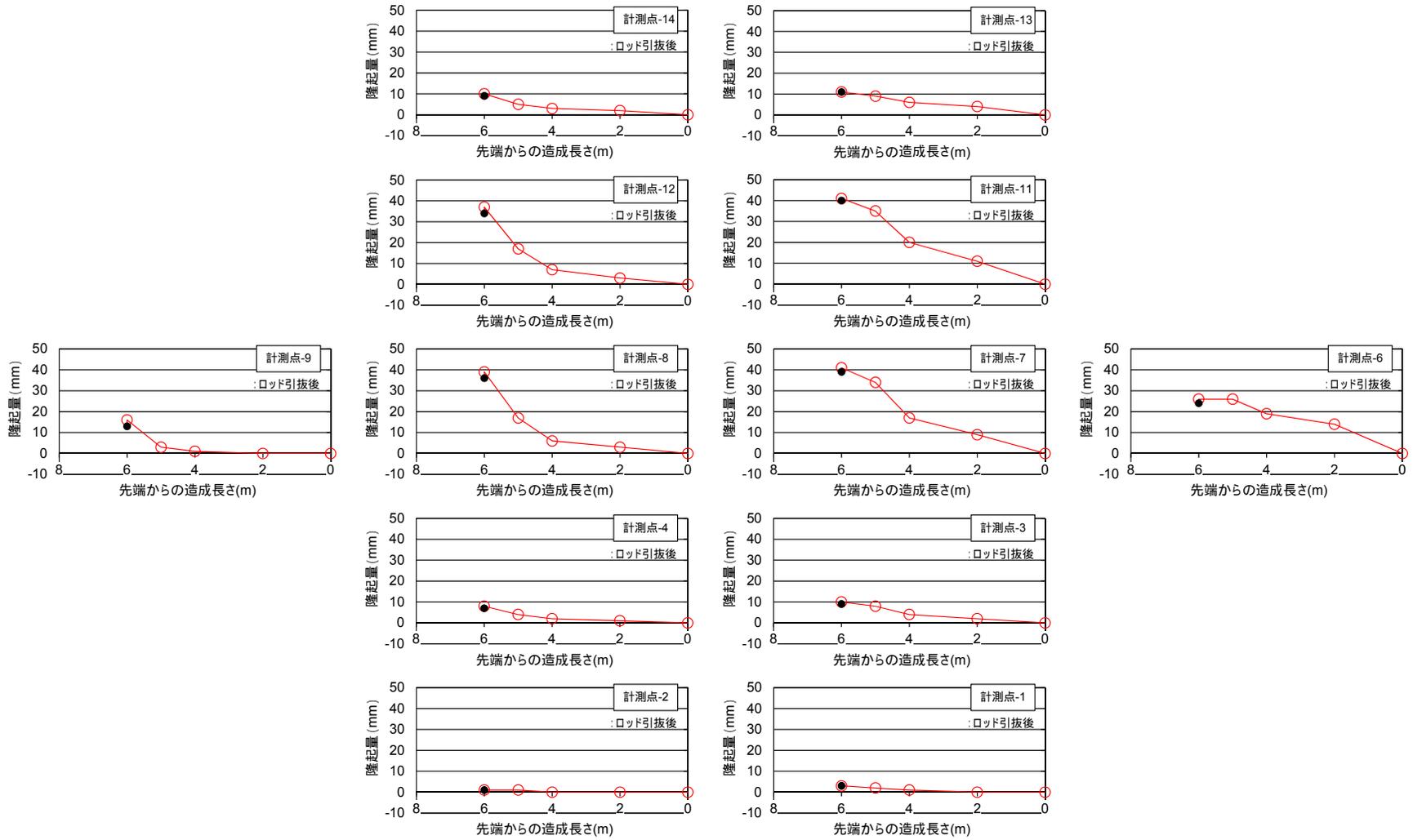


図 25 地表面変状の推移(水平施工 2)

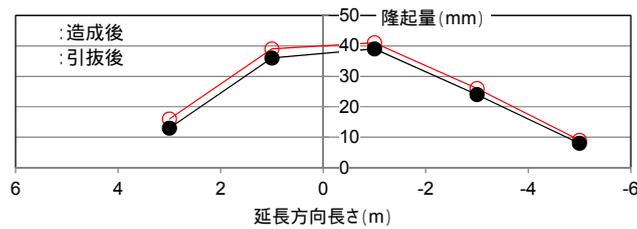


図 26 隆起量分布(水平施工-2 | 延長方向)

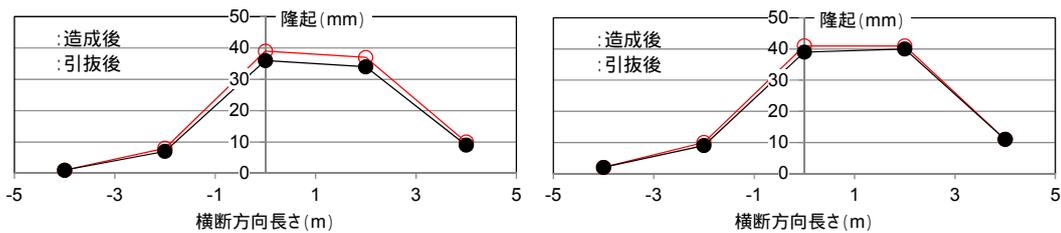


図 27 隆起量分布(水平施工-2 | 横断方向)

(5)改良体の目視確認

写真 21 に施工後に造成体箇所を掘削した状況を、写真 22～写真 28 に各改良体の状況、採取コアの例を示す。

各改良体の上部に限られるが、固結した状況を確認した中で、

- ・ 木片、漁業用の網と見られる異物の混入が直接確認された。
- ・ 鉛直-1, 5, 6 では改良体の上端から 80cm ほどの範囲に多量の植生跡が認められた。この結果、改良形状も他に比べて不明瞭であった。
- ・ 鉛直施工、斜め施工は、図 28 に示すとおりほぼ計画通りの位置で造成が行われた。一方、水平施工-2 は、水平施工-1 側に 80cm 程度ずれて、先行改良された部分に乗り上げるような位置となった。
- ・ 斜め施工、水平施工改良部分では、掘削時に、浚渫後の造成作業で用いた仮設資材と見受けられる砕石が層状に存在していた。

以上の観察結果をまとめると、写真 29 のようになる。

なお、

- ・ 斜め施工に関しては、図 29 のような形でボーリング 4 本を通して計画通りの全体形状を確認した。
- ・ 本事後調査に際しては、大学、企業、一般の方に対して、2012 年 11 月 27 日に見学会を開催しており、その際の様子を合わせて写真 30～写真 32 に示す。



写真 21 施工後の観察のために掘削した状況



写真 22 改良状況(V-2)

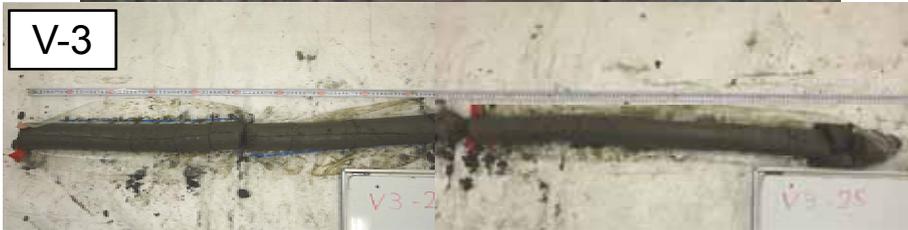


写真 23 改良状況(V-3)



写真 24 改良状況(V-4)



写真 25 改良状況(V-5)



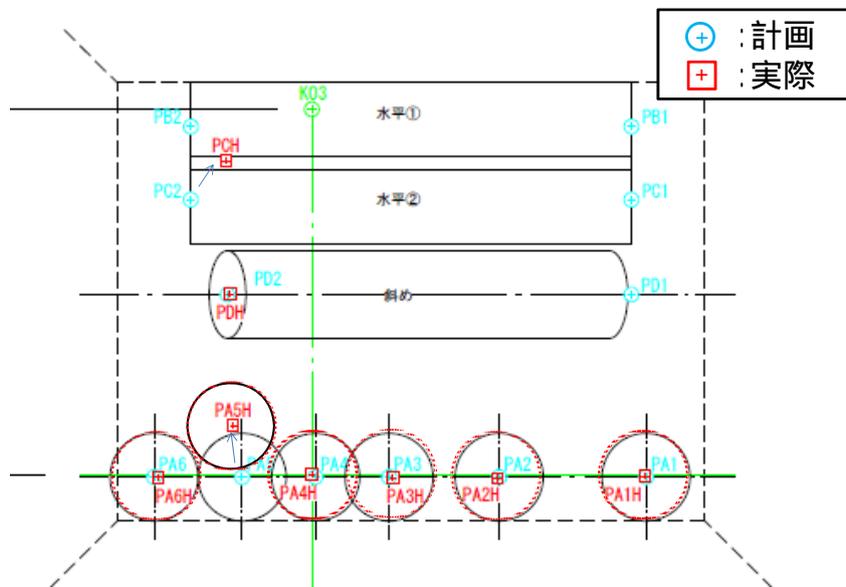
写真 26 改良状況(V-1,6)



写真 27 改良状況(V-1,6)



写真 28 改良状況(水平施工の掘りおこし状況)



注：鉛直施工の左から二番目のものは、計測機器不調により3日以上日にちをずらして施工した。その結果、右隣の改良体とのラップ施工が困難となったため、水平方向に移動して施工した。

図 28 改良体位置の確認

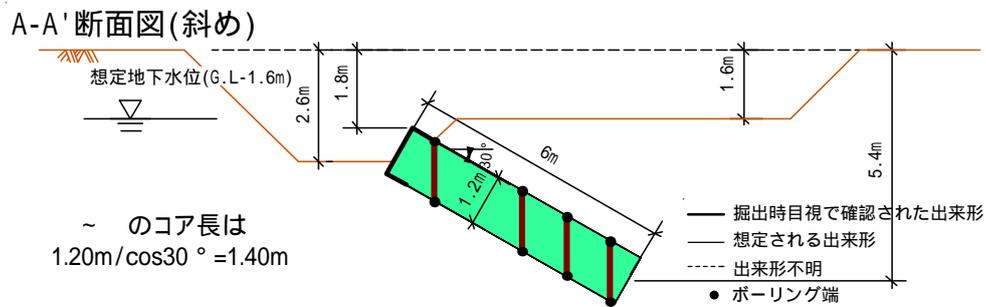


図 29 斜め施工の出来形確認



写真 29 改良状況の全体傾向



写真 30 外部向け見学会の様子(技術説明)



写真 31 外部向けに見学会の様子(改良状況の見学)



写真 32 外部向けに開催した見学会(施工機械の見学)

(6)コア観察・改良強度の調査

原位置で 1 週間ほどの養生期間を設けた上で、各改良体からコアを採取し、改良状況の観察と材齢 28 日での一軸圧縮強さの調査にあたった。(写真 33, 写真 34)

表 5～表 7 に改良状況の観察結果を示す。ここで、2 つの評価値は以下による。

コア採取率：目視観察、感触により判断し、コア断面で 50%以上が固結した部分の長さの割合。「建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針（(財)日本建築センター）」によれば、90%を良否の目安とする。

RQD： 長さ 10cm 以上のコアの割合

コア採取率は 80～90%以上のものが多く含まれる一方、極端に小さなものも散見され、これに対応して RQD 値もばらつきが見られる。今回、粘土層が介在し、細粒分が 30%と高めの地盤を対象とした結果、攪拌度合については十分とは言えない結果となった。地中拡翼型の攪拌装置は、共回り防止機構を持たないシンプルな構造となっていることを考慮し、対象地盤の性状に応じた攪拌回数、施工時間の見極めが重要であることを示唆した結果と言える。

一軸圧縮強さについては、鉛直 2 (標準施工)、鉛直 3 (1 パス施工) について、As1 層、Ac1 層を対象に、中心から半径 4 方向に 15cm 間隔でコア採取し (写真 35)、供試体高さ 10cm を確保できるものについて、その他については採取コアより断片的に供試体を取り出し測定にあたった。鉛直 2 (標準施工)、鉛直 3 (1 パス施工) で得られた一軸圧縮強さを深度方向分布で図 30 に示す。両者ではセメント添加量には 2 倍の差があるにも関わらず、鉛直 2、鉛直 3 での強度の差はそれほど明瞭に表れていない。施工中は供給したセメント量が必ずしも効率的に原地盤と混合されておらず、ケーシングの内外を伝ってセメントミルクが排出されている。今回の浚渫土のように、細粒分、粘性に富むような地盤に対してはこのようなセメントミルクの跳ね返りが多く生じると考えられ、原地盤とよくなじむように吐出量を落とす、濃いめのセメントミルクを用いて供給体積自体を低減するなどが、改善策に挙げられる。

図 31 には、鉛直 4 (改良長 8m) で得られた一軸圧縮強さの深度方向分布を示す。本結果では、

- ・ 浚渫土層下の自然堆積地盤 As 層では、2MN/m² 近くの高い強度が得られている。
- ・ As 層、Fs1、Fc1 層の強度は、全体的には顕著な差が見られなかった。

本施工実験を通して、比較的均一な自然堆積地盤とばらつき・異物が顕著な人工的な浚渫地盤で、ばらつきの見極めと施工管理への反映の重要性を示したものと言える。



写真 33 コア採取状況

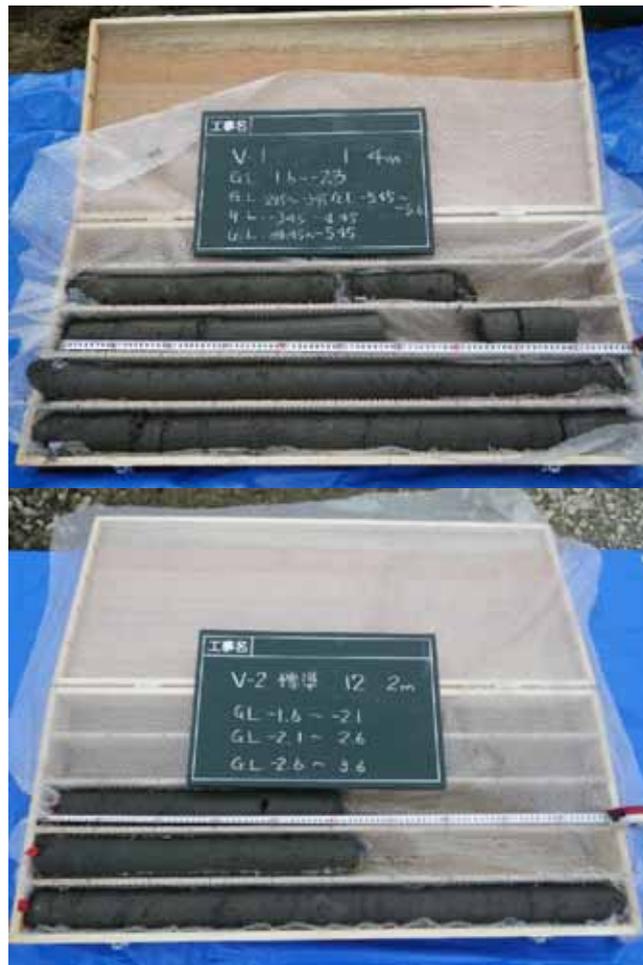


写真 34 採取されたコア



写真 35 コア採取跡

表 5 コアの観察結果(鉛直施工 V1~3)

改良体	コア No.	調査日	全長	10cm 以上のコア	固結コア	コア採取率	RQD		
			cm	cm	cm	%	%		
V1	1	2012/11/6	416	55	218	52.40	13.22		
V1	2	2012/11/6	397	33	178	44.84	8.31		
V1	2'	2012/11/6	398	38	177	44.47	9.55		
V2	3	2012/11/6	207	93	169	81.64	44.93		
V2	4	2012/11/2	202	122	170	84.16	60.40		
V2	5	2012/11/2	208	112	140	67.31	53.85		
V2	6	2012/11/2	212	99	138	65.09	46.70		
V2	7	2012/11/2	196	126	172	87.76	64.29		
V2	8	2012/11/2	196	99	189	96.43	50.51		
V2	9	2012/11/7	目視観察のみ						
V2	10	2012/11/6	192	60	164	85.42	31.25		
V2	11	2012/11/6	202	114	166	82.18	56.44		
V2	12	2012/11/6	196	44	122	62.24	22.45		
V2	13	2012/11/7	目視観察のみ						
V2	14	2012/11/7	目視観察のみ						
V2	15	2012/11/7	目視観察のみ						
V3	16	2012/11/2	200	48	99	49.50	24.00		
V3	17	2012/11/7	目視観察のみ						
V3	18	2012/11/7	目視観察のみ						
V3	19	2012/11/7	目視観察のみ						
V3	20	2012/11/2	195	22	123	63.08	11.28		
V3	21	2012/11/2	199	117	176	88.44	58.79		
V3	22	2012/11/2	199	97	192	96.48	48.74		
V3	23	2012/11/7	目視観察のみ						
V3	24	2012/11/7	目視観察のみ						
V3	25	2012/11/7	目視観察のみ						
V3	26	2012/11/2	178	88	149	83.71	49.44		
V3	27	2012/11/2	181	82	103	56.91	45.30		
V3	28	2012/11/2	187	63	178	95.19	33.69		

表 6 コアの観察結果(鉛直施工 V4～6)

改良体	コア No.	調査日	全長	10cm 以上 のコア	固結コア	コア採取率	RQD		
			cm	cm	cm	%	%		
V4	29	2012/11/6	789	475	699	88.59	60.20		
V5	30	2012/11/7	196	112	168	85.71	57.14		
V5	31	2012/11/7	目視観察のみ						
V5	32	2012/11/7	398	143	351	88.19	35.93		
V5	33	2012/11/7	目視観察のみ						
V5	34	2012/11/2	197	103	186	94.42	52.28		
V5	35	2012/11/2	202	85	169	83.66	42.08		
V5	36	2012/11/7	196	75	168	85.71	38.27		
V5	37	2012/11/7	目視観察のみ						
V5	38	2012/11/7	目視観察のみ						
V5	39	2012/11/7	目視観察のみ						
V5	40	2012/11/7	195	30	161	82.56	15.38		
V5	41	2012/11/7	200	26	179	89.50	13.00		
V5	42	2012/11/7	199	71	177	88.94	35.68		
V6	43	2012/11/7	393	249	374	95.17	63.36		

表 7 コアの観察結果(斜め・水平施工)

改良体	コア No.	調査日	全長	10cm 以上 のコア	固結コア	コア採取率	RQD
			cm	cm	cm	%	%
H2	47	2012/11/7	128	59	107	83.59	46.09
H2	48	2012/11/7	194	140	163	84.02	72.16
H1	49	2012/11/7	50	0	6	12.00	0.00
H1	50	2012/11/7	59	19	34	57.63	32.20
I1	51	2012/11/7	130	33	53	40.77	25.38
I1	52	2012/11/7	139	21	48	34.53	15.11
I1	53	2012/11/7	149	13	50	33.56	8.72
I1	54	2012/11/7	139	15	118	84.89	10.79

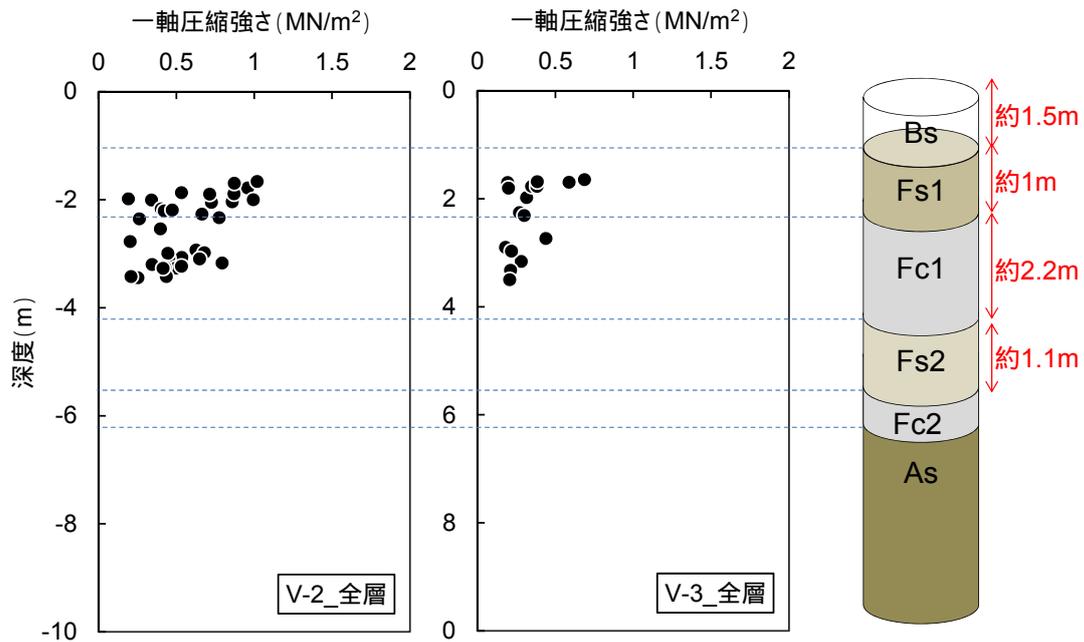


図 30 一軸圧縮強さの深度方向分布(鉛直-2,3)

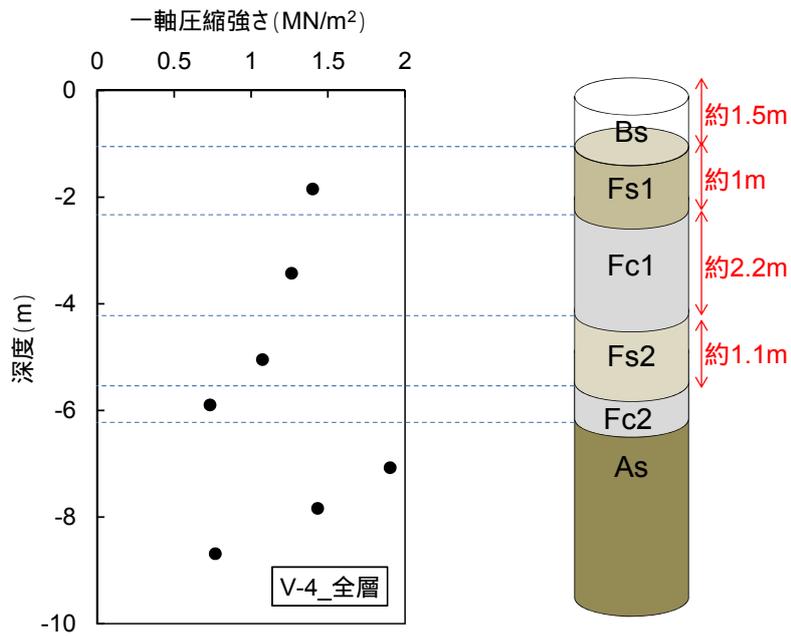


図 31 一軸圧縮強さの深度方向分布(鉛直-4)

(7)モニタリング・制御の検証

a)鉛直施工

各改良体，リフトごとのモニタリング結果を図 32～図 37 に示す．ここで，鉛直 1 については小型機械を用いたことから，鉛直-5, 6 については計器の損傷によりデータ計測を行っていない．

まず，鉛直-4, 1 リフト目 (図 34) を見ると， $2 \text{ 分/m} \cdot \text{パス} \times 2\text{m} \times 3 \text{ パス} = 12 \text{ 分} = 720 \text{ 秒}$ の計画通りとなり，回転速度，フィード速度，セメントミルク吐出量が終始安定した状態に保たれた．本リフトは自然堆積の As 層に位置し，粘性や異物の影響が少なく比較的均一な部分が改良対象であったためと考えられる．次に鉛直 3, 1 リフト目 (1 パス施工) (図 33) について見ると，一時停止の期間を含むものの，上記と同様に施工動作は安定している．これは，改良に先立つ先行攪拌で原地盤を緩めたことが理由と考えられる．以上のモニタリング結果，施工動作は，緩い砂層における図 8, 図 9 の状態と共通している．

その他の結果については以下の傾向が見られる．

- ・ 1 パス目の引き上げ時に動作がぶれ，計画引上げ時間 $2 \text{ 分/m} \cdot \text{パス} \times 2\text{m} \times 1 \text{ パス} = 4 \text{ 分} = 240 \text{ 秒}$ に対して，実際の施工時間が大幅に超過した．
- ・ 2 パス目の押し下げ，3 パス目の引上げ時は，1 パス目に比べると動作は安定するものの，前述の鉛直 4 の 1 リフト目，鉛直 3(1 パス施工)に比べると変動が目立つ．

これらについては，掘削をして直接観察にあたった際認められた，木片，植生跡，アスファルト塊等に接触したことが理由と考えられる．

モニタリング・制御システムの効果を確認するために，セメントミルクの吐出量を表 8 にまとめた．各改良体，リフトに分けて比べると，動作が安定していた鉛直 4_1 リフト，鉛直-3 では，計画のセメント添加量に対する超過が 8, 7%となっているのに対して，動作が不安定だった他のケースでは 20%以上の差が見られている．要因を分析するために，図 38 に示すように計測結果に基づく積算改良長 (フィード速度を時間で積分することにより算定した改良長) を算出した．これによれば，動作が安定した鉛直-4_1 リフトでは，積算改良長が $2\text{m} \times 3 \text{ パス} = 6\text{m}$ の計画長さにはほぼ一致するのに対して，動作が安定しなかったケースではこれが 8m 程度となっており，モニタリングシステム上で改良長を長めに認識していたことを意味する．そこで，積算改良長を改良長さともみなした上でのセメント超過量を，表 8 には追記し，図 39 に棒グラフにまとめた．鉛直-4_4 リフトでは依然差が大きいですが，本比較ではセメント供給量の誤差は 7%以内に収まることになる．

以上に関する対応策としては，実施に先立ち積算改良長について検証・調整にあたり，場合によっては，

- ・ 動作に応じて緩みと引っ張りが生じかねないワイヤー式の変位計を固定式のものに置き換える．
- ・ システムの比例設定を変更し，回転速度，フィード速度に対するセメントミルク吐出量の感度を変更する．

ことが有効であると思われる．

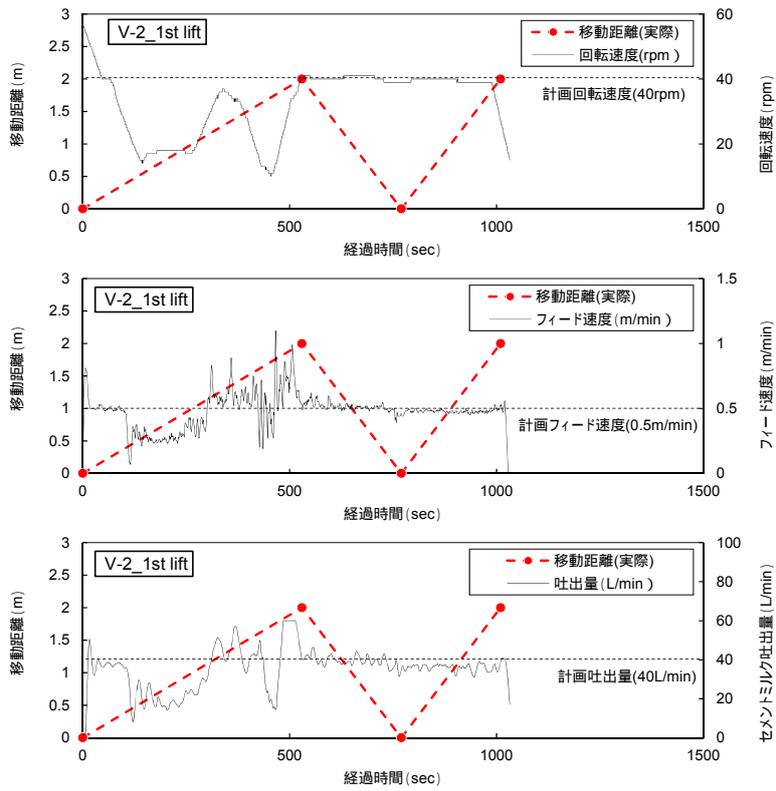


図 32 モニタリング・制御結果(V-2_1リフト目)

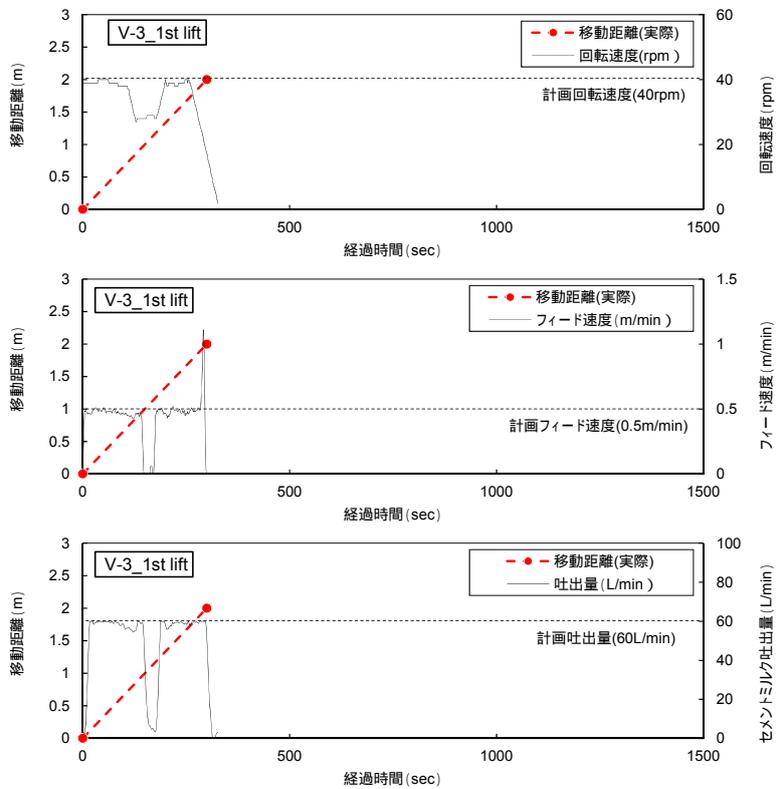


図 33 モニタリング・制御結果(V-3_1リフト目)

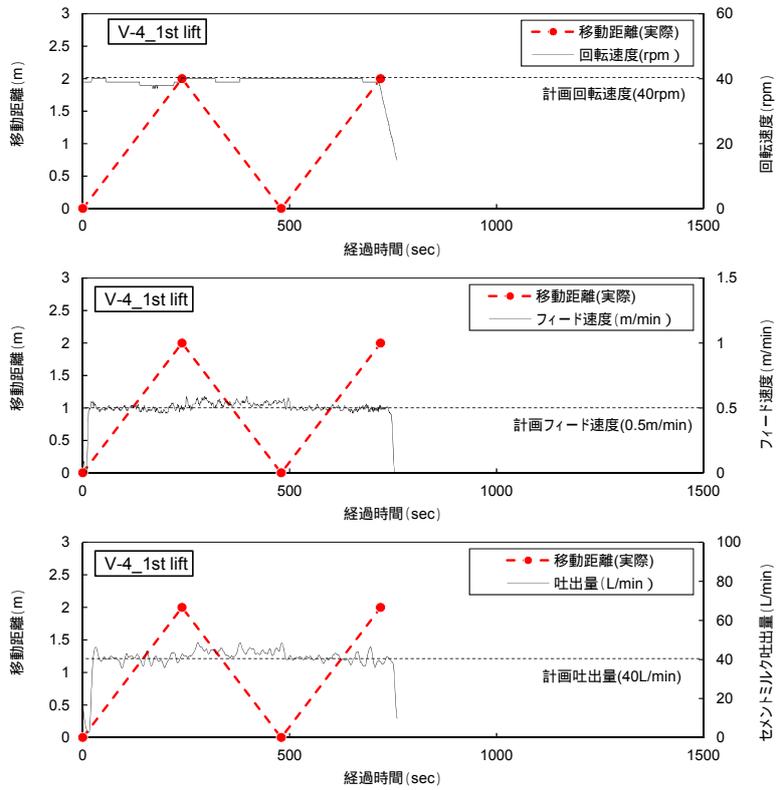


図 34 モニタリング・制御結果(V-4_1リフト目)

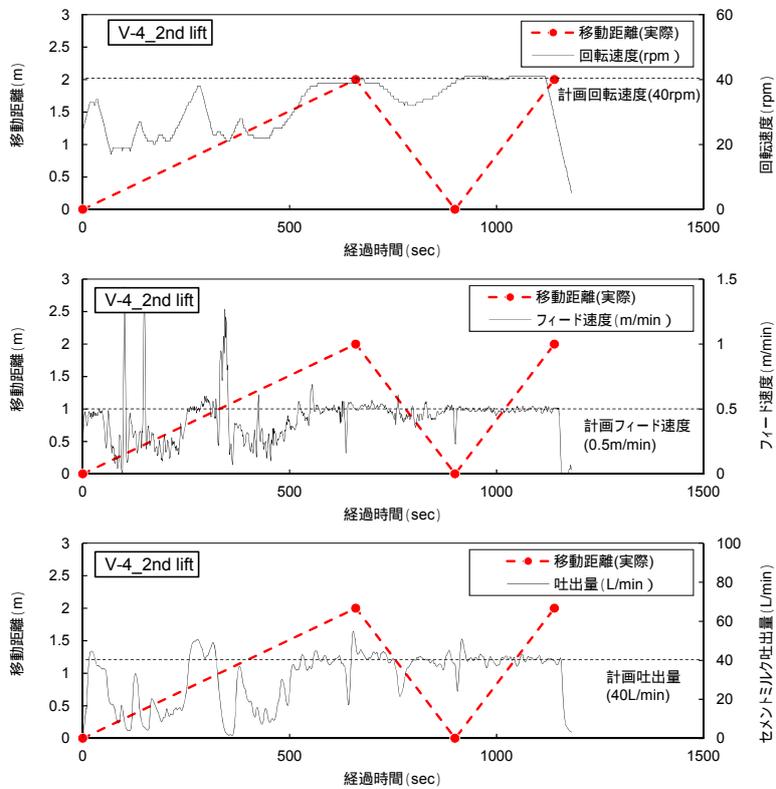


図 35 モニタリング・制御結果(V-4_2リフト目)

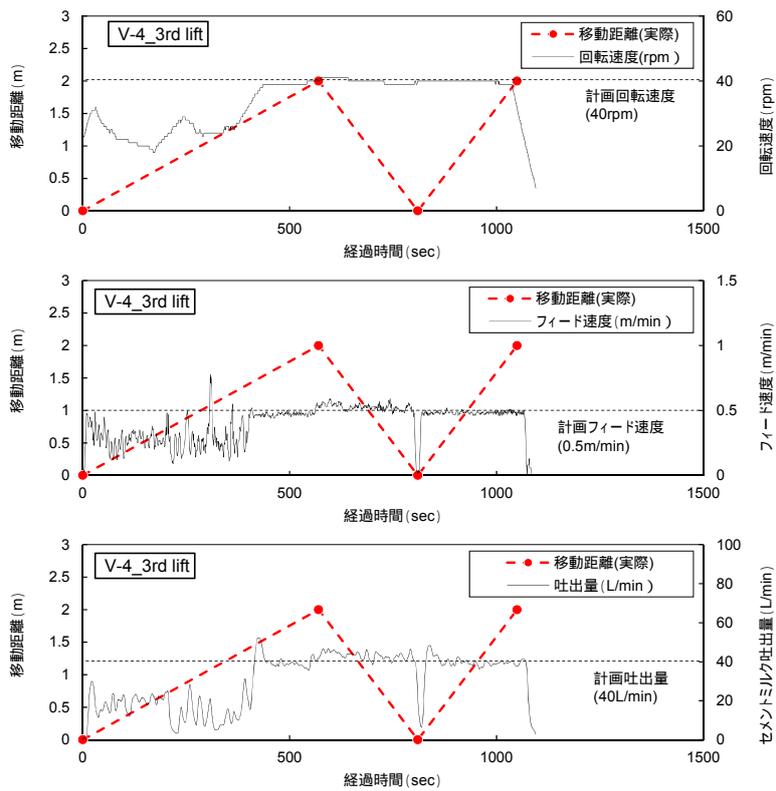


図 36 モニタリング・制御結果(V-4_3リフト目)

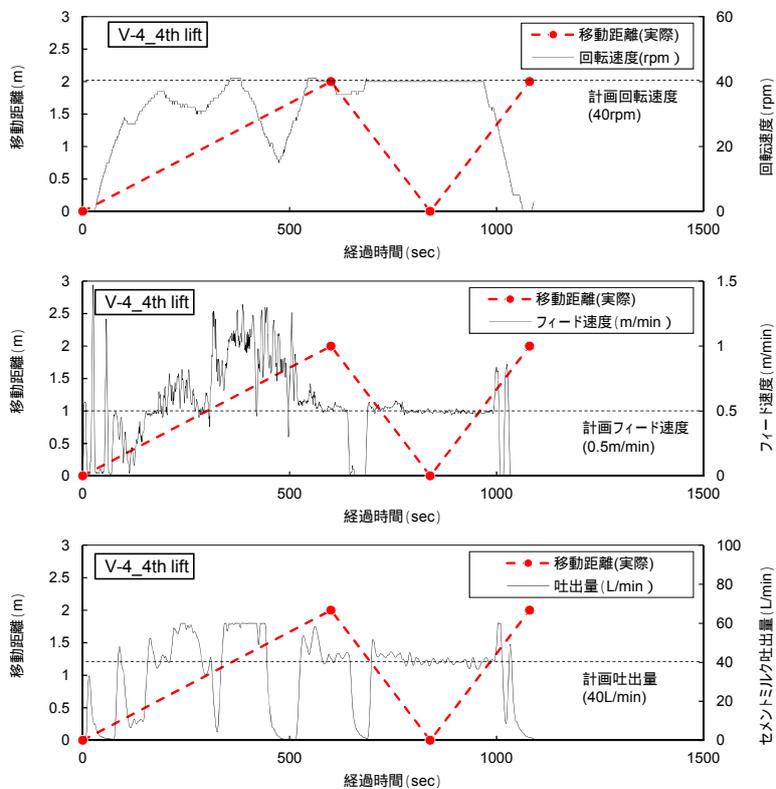


図 37 モニタリング・制御結果(V-4_4リフト目)

表 8 セメントミルクの吐出量の整理

	積算セメント量(L)			改良延長		換算値による比較	
	計画量(L)	実測量(L)	絶対相違率	積算改良延長(m)	計画延長に対する比	換算供給量(L)	換算値による相違率
V-2_1 lift	480	608.6	1.27	8.2	1.37	445.3	0.93
V-3_1 lift	240	260.0	1.08	2.2	1.10	236.4	0.98
V-4_1 lift	480	512.8	1.07	6.2	1.03	496.3	1.03
V-4_2 lift	480	615.9	1.28	8.2	1.37	450.7	0.94
V-4_3 lift	480	560.4	1.17	7.2	1.20	467.0	0.97
V-4_4 lift	480	617.5	1.29	9.5	1.58	390.0	0.81

積算改良延長：フィード速度の実測値を積分して算出した改良延長

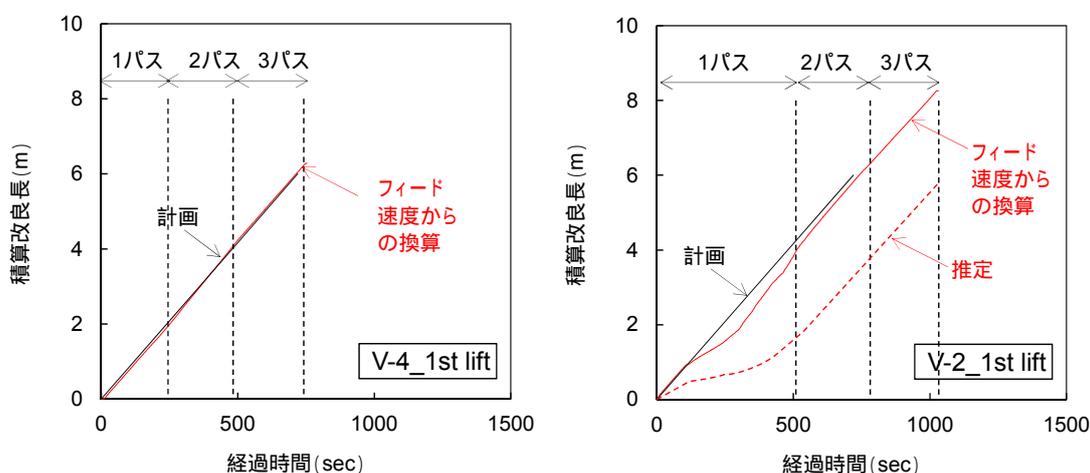


図 38 積算改良長の推移(左:自然堆積地盤,右:浚渫地盤)

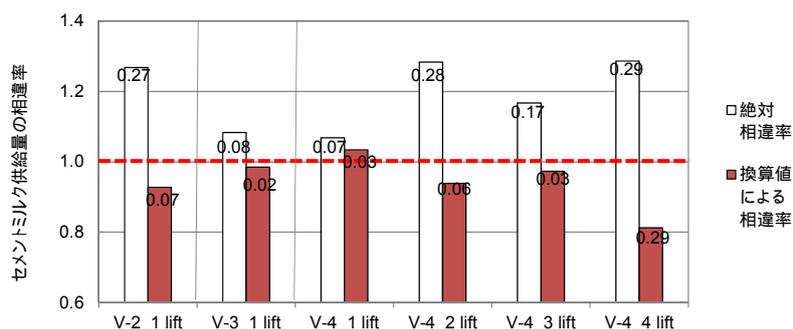


図 39 セメントミルクの供給量の相違率

b) 斜め・水平施工

まず、図 40～図 42 に斜め方向施工でのモニタリング結果を、各リフトに分けて示す。ここで、施工時に回転計を損傷させてしまったため、回転速度の計測結果は欠落している。これらの結果では、

- 1リフト目, 3リフト目ではほぼ計画通りの時間で施工が行えた.
- 2リフト目のみ, 1回目の引上げ時に時間を要したが, 押し下げ時, 2回目の引き上げ時は計画通りに施工が行えた.
- フィード速度の乱れは, 1リフト目の施工で目立って生じた.

次に, 図 43~図 48 に水平方向施工でのモニタリング結果を, 各リフトに分けて示す. ここで, 水平施工 1 の 1リフト目のみ, 標準施工 (すべてのパスで回転速度 40rpm, フィード速度 0.5m/min, セメントミルク吐出量 20L/min で施工) にて行っている. これらの結果では,

- 水平施工 1, 2とも, 1リフト目では, 各挙動も安定し計画通りの施工ができています.
- 一方, 2リフト, 3リフト目では, フィード速度が大きく変動し, 1回目の引き上げ時に多くの時間を要している.

以上の結果によれば, 鉛直施工で見られた地盤状況の深度方向変化と並び, 平面方向にもばらつきがあると推察される.

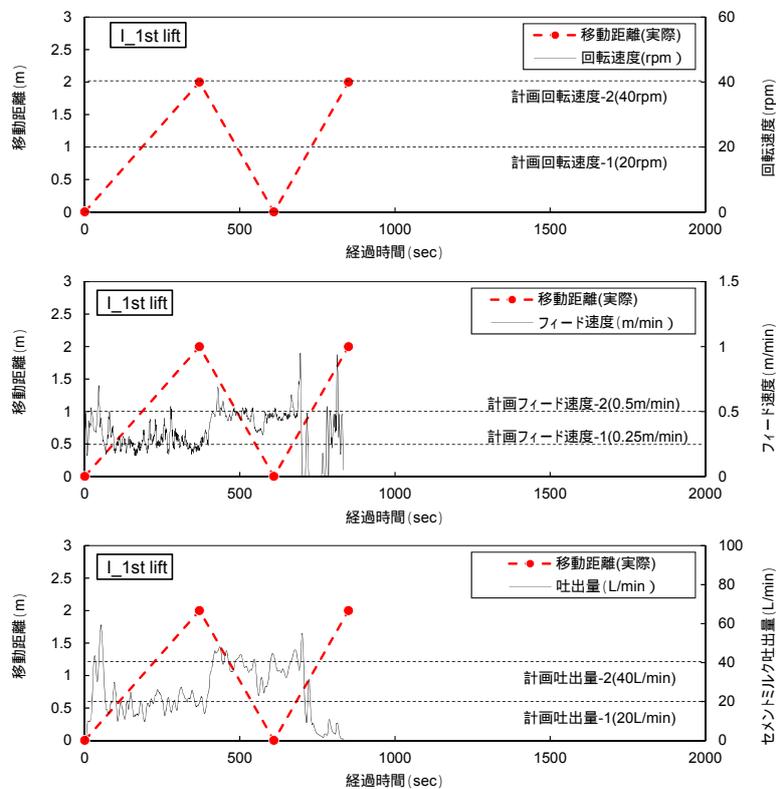


図 40 モニタリング・制御結果(I_1リフト目)

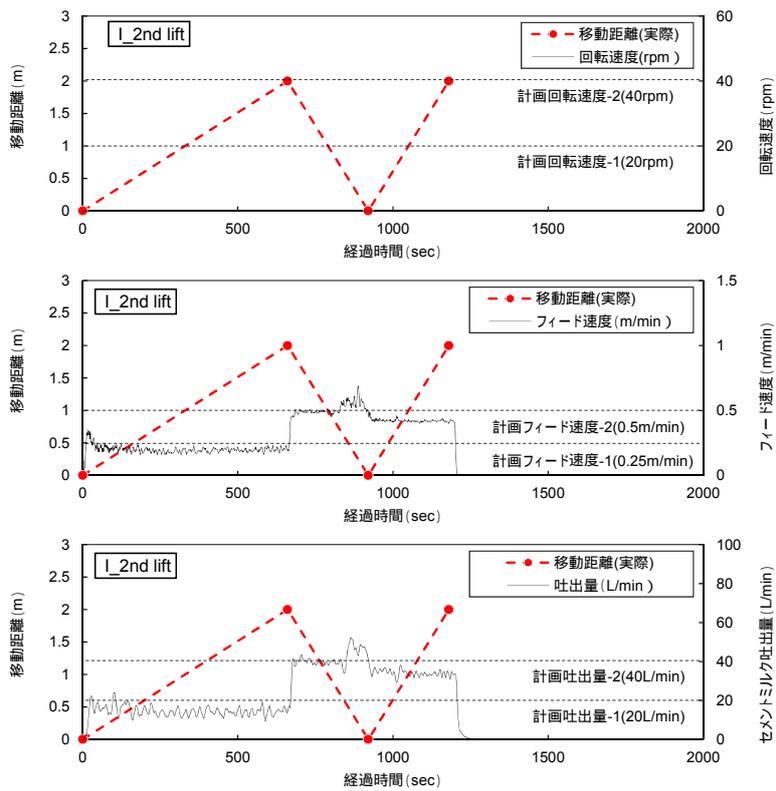


図 41 モニタリング・制御結果(I_2 リフト目)

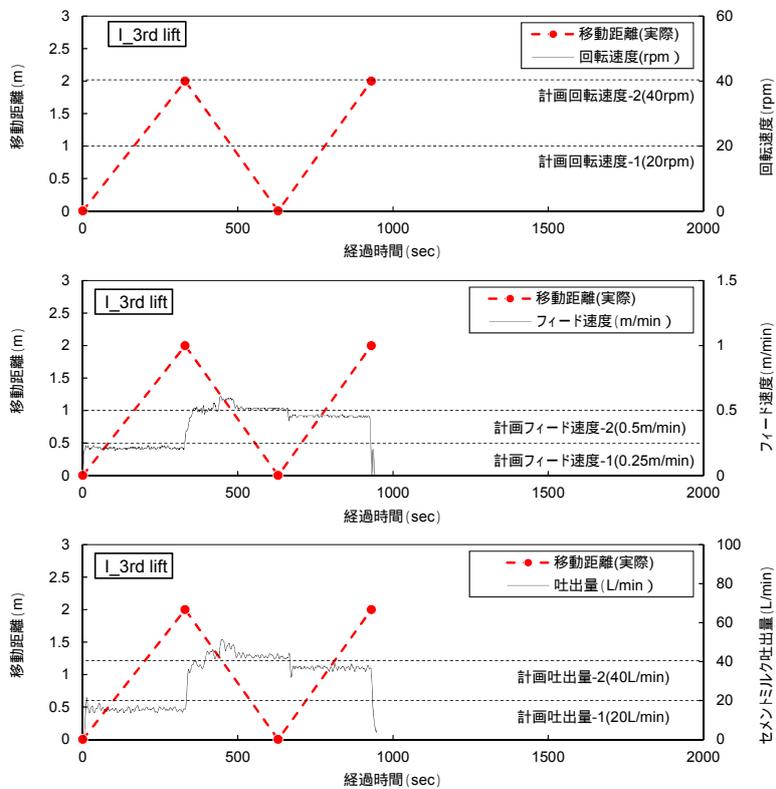


図 42 モニタリング・制御結果(I_3 リフト目)

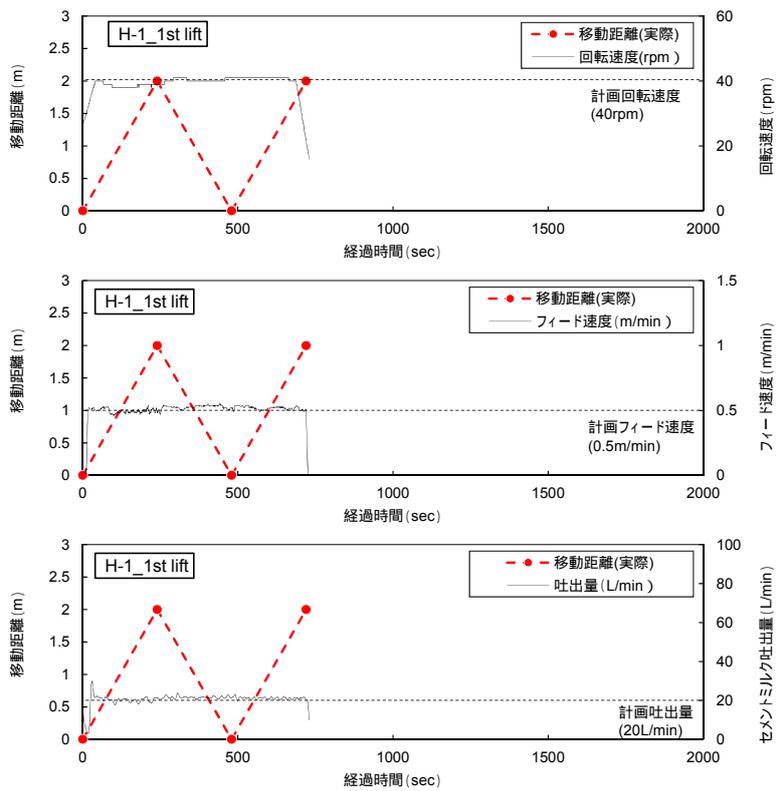


図 43 モニタリング・制御結果(H-1_1リフト目)

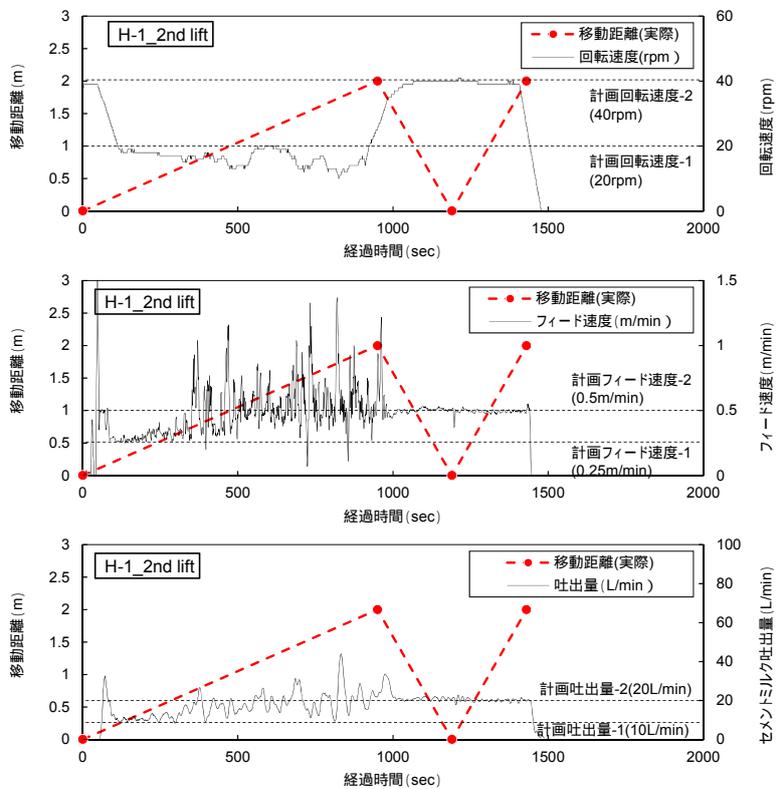


図 44 モニタリング・制御結果(H-1_2リフト目)

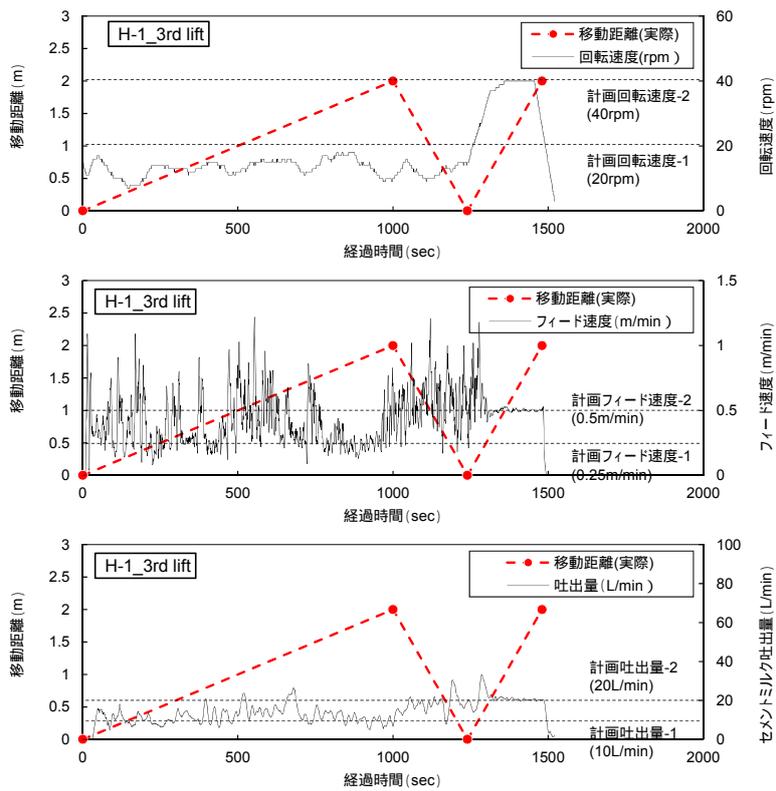


図 45 モニタリング・制御結果(H-1_3リフト目)

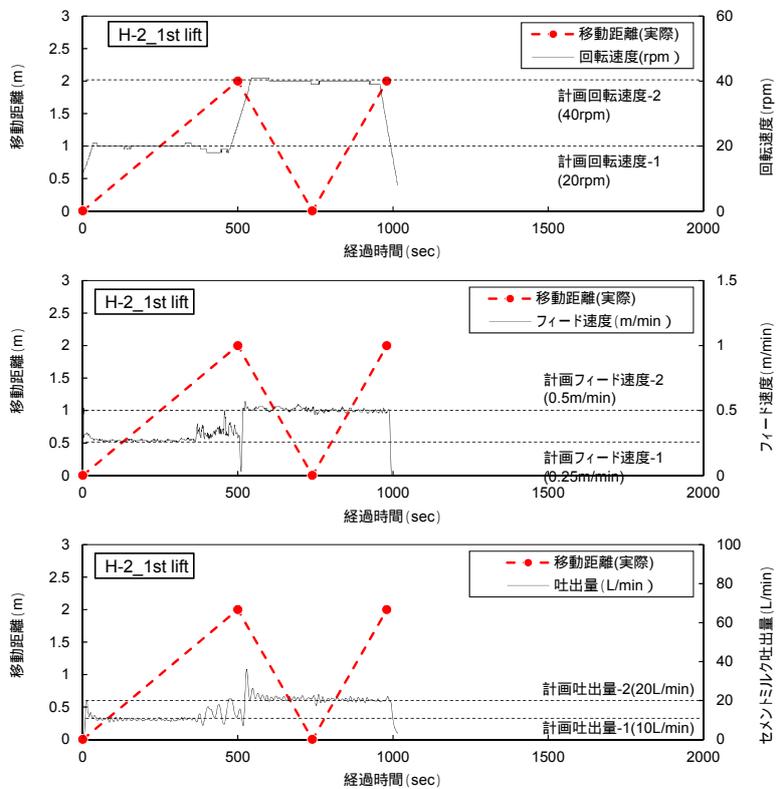


図 46 モニタリング・制御結果(H-2_1リフト目)

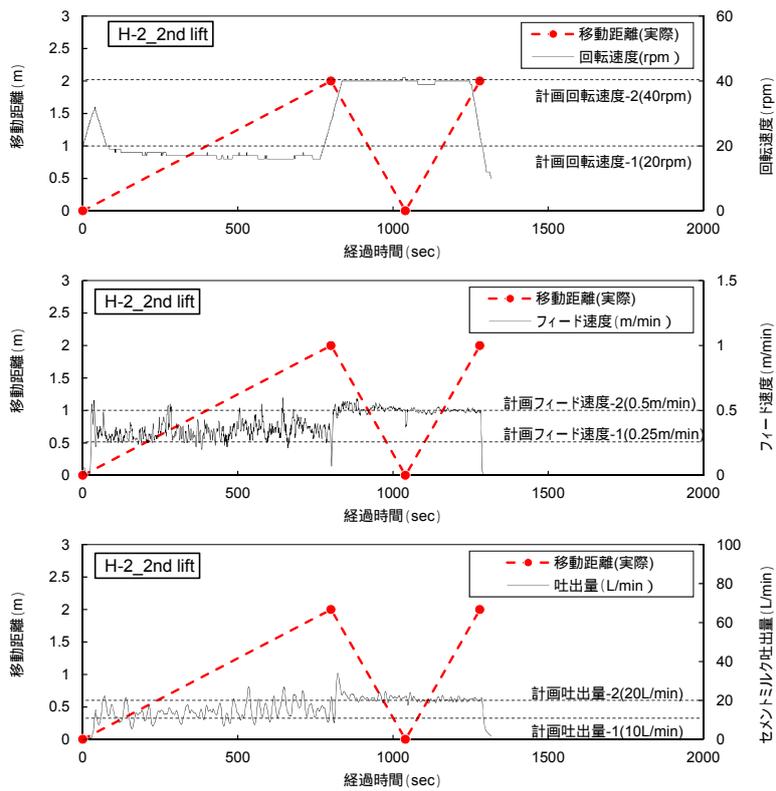


図 47 モニタリング・制御結果(H-2_2リフト目)

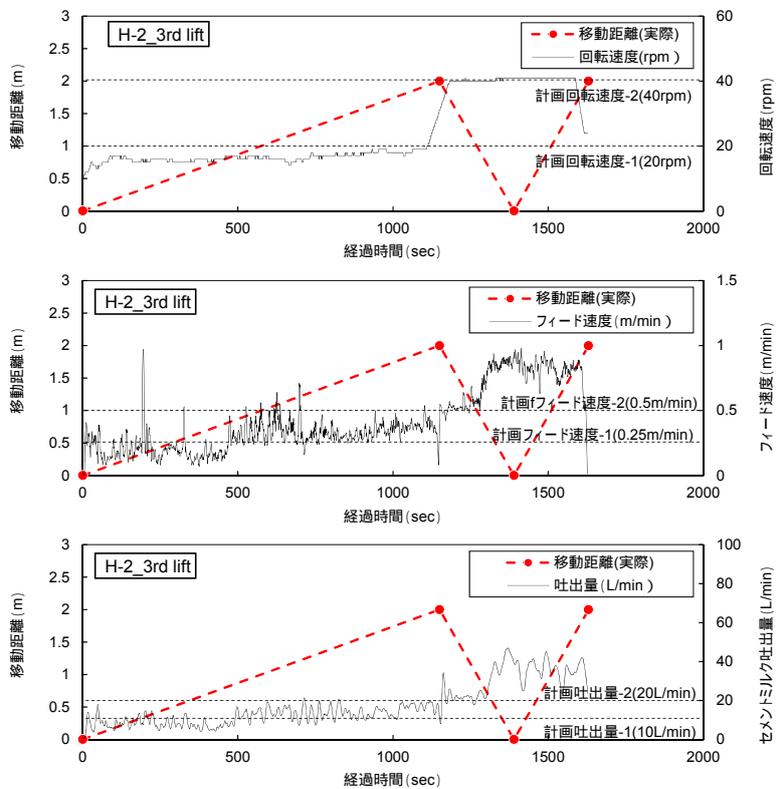


図 48 モニタリング・制御結果(H-2_3リフト目)

(8) まとめ

- ・ 実際に液状化被害が生じた浚渫土地盤において、地中拡翼型の地盤攪拌改良工法による改良体が造成できた。
- ・ 鉛直方向、斜め方向に、計画通りの改良体が造成できた。一方、自在ボーリングを併用した水平方向施工では、計画から **80cm** 程度、改良位置がずれた。施工順序の変更や適用可能地盤の見極めなど、さらなる検討の必要性が明らかになった。
- ・ モニタリング・制御システムに関して、浚渫地盤下部の自然堆積砂地盤においては、試験運用と同様に制御が有効に機能した。
- ・ 一方、浚渫地盤においては、地盤の粘性や礫、木片、植生跡により改良装置の動きが不規則に変動した。その結果、セメントミルク供給の抑制は、試験運用に比べて精度が劣った。
- ・ 改善策としては、実施に先立ち積算改良長の検証・調整にあたること、場合によっては変位計の計測方式の変更、システムの比例設定の調整にあたることが考えられる。

7.4 成果

以上の 2 項目にわたる研究・技術開発を通して、新たな原位置地盤攪拌改良工法である地中拡翼型の地盤攪拌改良工法を適用対象とし、セメントミルク供給の最適化を図るモニタリング・制御システムの開発・実用化を果たした。砂主体の均一性の高い地盤での施工を通しては、セメントミルクの過添加を防ぎオペレータの負担を低減しながら、改良強度のばらつきを一定水準に抑える施工が可能であることを実証した。一方で、浚渫地盤での施工実験を通しては、不純物や粘性の影響により施工時の動作に不規則な変動を起こし、制御の精度低下を招く一面も確認された。地盤条件に由来する変動要因も調査、分析した結果、今後の実務展開に向けた改善策の方向性について見通しを得た。

8. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
<p>【学協会等】</p> <p>“Development of in-situ soil improvement method using collapsible mixing blades”, <i>Proceedings of the International Conference on Ground Improvement and Ground Control, 2012</i></p>	2012年10月30日	—	石井 裕泰, 藤原 斉郁, 小林 真貴子, 青木 智幸, 松井 秀岳, 立石 洋二, 菅 浩一, 三上 登, 佐藤 潤
<p>“地中拡翼型の地盤攪拌改良工法”, 基礎工 特集:地盤の液状化対策 工法紹介</p>	2013年4月1日 (掲載予定)	(株)総合土木研究所	
<p>“地中拡翼型の地盤攪拌改良工法における施工管理システムの開発と効果”, 第48回地盤工学研究発表会</p>	2013年7月23日 (投稿中)	公益社団法人地盤工学会	小林 真貴子, 藤原 斉郁, 石井 裕泰, 立石 洋二, 菅 浩一, 三上 登, 佐藤 潤
<p>“地中拡翼型の地盤攪拌改良工法斜め方向の改良体の造成”, 第68回土木学会年次学術講演会</p>	2013年9月4日 投稿予定	公益社団法人土木学会	小林 真貴子, 藤原 斉郁, 石井 裕泰, 立石 洋二, 菅 浩一, 三上 登, 佐藤 潤
<p>“地中拡翼型の地盤攪拌改良工法浚渫土層・沖積砂層での造成”, 第68回土木学会年次学術講演会</p>	2013年9月4日 投稿予定	公益社団法人土木学会	小林 真貴子, 藤原 斉郁, 石井 裕泰, 立石 洋二, 菅 浩一, 三上 登, 佐藤 潤
<p>“地中拡翼型の攪拌装置を用いた地山判定”, 第68回土木学会年次学術講演会</p>	2013年9月4日 投稿予定	公益社団法人土木学会	小林 真貴子, 藤原 斉郁, 石井 裕泰, 立石 洋二, 菅 浩一, 三上 登, 佐藤 潤
<p>【新聞発表】</p> <p>「円柱改良体で地中壁 宅地向け液状化対策 大成建設が工法公開」</p>	2012年11月30日	日刊工業新聞	
<p>「地盤改良杭施工のためのモニタリング・制御システムを開発」</p>	2013年3月27日	日刊建設工業新聞	

9. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
「改良体造成システム」	特願 2013-014281	2013年1月29日	—	藤原 斉郁, 石井 裕泰, 小林 真貴子, 青木 智幸, 菅 浩一, 三上 登, 松浦 薫

10. 成果の実用化の見通し

深層混合処理で用いられる機械攪拌工法は、一般的には新設対応の大規模施工用に開発・実用化され、これまで比較的大きな施工機械による工法が主流であった。この場合、攪拌のための大きな回転トルクの確保が容易であり施工速度も速いことから、仮に所定の攪拌回数不足が認められた場合には、追加攪拌で対応することが比較的容易であった。このため、攪拌回数や推進速度などモニタリングするシステムは存在していたが、セメント添加量を含めこれらを連動させたシステムは開発・実用化されてこなかった。

一方、先の東日本大震災では、東京湾岸をはじめとする地域において、個々の産業施設、戸建て住宅など小規模構造物に対する液状化被害も数多く発生した。このため、狭隘部での施工性など小型機械による施工のニーズが増加しており、施工機械の小型化により施工動作の安定性の観点で克服すべき課題が浮き彫りとなってきている。さらに、地中埋設物の回避、周辺地盤の変形抑制、排土量の抑制など、地盤改良工法の高度化・効率化に伴い、本制御システムを必要とする場面は多くなるものと予想される。

このような技術動向の中、本研究開発で扱った「地中拡翼型の地盤攪拌改良工法」など、新たな機械攪拌系の原位置改良工法で、本モニタリング・制御システムが活用されていくことが期待される。本研究・開発の成果を活かしながら、技術の活用の機会を模索していきたい。

11. その他

特になし