

高圧噴射攪拌工法の試験施工に関する報告

安井 利彰・森田 浩二^{*1}・手塚 広明^{*1}・細川 雅則^{*2}・小川 朗二^{*3}

Report on Test Construction of High Pressure Injection Mixing Method

Toshiaki YASUI, Kouji MORITA, Hiroaki TEDUKA, Masanori HOSOKAWA, Rouji OGAWA

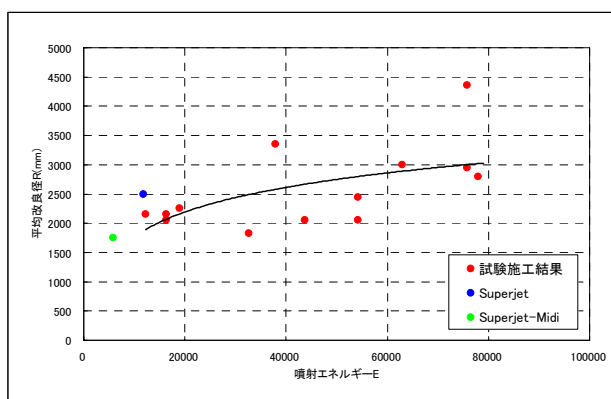


図-1 噴射エネルギーと改良径の関係



図-2 改良径確認状況(半径 R=4.5m)

研究の目的

高圧噴射攪拌工法は、開削工事での底盤改良、既設構造物の耐震補強、液状化対策等において広く適用されている。工法の種類は多岐にわたっており、さまざまな特長を有している。このような中でコスト縮減・工期短縮の面からの改良径の増大、また、施工目的により格子状や壁状など任意形状の改良技術が要求されている。

今回、このようなニーズに対応するために開発された高圧噴射攪拌工法の施工品質および施工性の確認のため試験施工を実施し、①噴射エネルギーと改良径との関係、②改良体の品質、③削孔精度、④近接構造物へ与える影響を確認した。

技術の説明

本工法は、基本的には一般的な高圧噴射攪拌工法と同様であるが、下記に示す特長を有する。

- ・ ロッドを回転でなく揺動しながら引き上げることで、任意形状の改良体(扇形等)や壁状の改良体の構築が可能
- ・ 噴射効率を高めることにより、大口径 R=3.0m 程度の改良体を構築できる
- ・ 目的に応じた改良域を効率よく造成できるため、低コスト・短工期化が図れる
- ・ 多孔管ロッドを採用することで、複数のノズルを設置でき、多方向を同時に改良できる

主な結論

今回の試験施工により、下記の内容が確認できた。

- ・ 改良径は、各仕様にもよるが概ね R=2.5m～4.5m 程度の施工が確認できた。
- ・ 改良体の形状は、設定どおり扇形(15°、30°)の施工が可能であることが確認できた。
- ・ 近接構造物近傍での施工は、構造物に直噴しない限り離隔距離 20cm 程度でも影響は小さいと考えられる。
- ・ 改良体の品質は、砂層で、一軸圧縮強度 $q_u=3,000$ (kN/m²) 程度、透水係数 $k=1.0 \times 10^{-7}$ (cm/sec) オーダーを満足する。

*1 本店 土木技術部

*2 本店 技術部

*3 ミヤマ工業

高圧噴射攪拌工法の試験施工に関する報告

安井 利彰 森田 浩二^{※1}
 手塚 広明^{※1} 細川 雅則^{※2}
 小川 朗二^{※3}

要 旨

高圧噴射攪拌工法は、開削工事での底盤改良、シールド発進到達部の地盤改良、既設構造物の耐震補強、液状化対策等において広く適用されている。高圧噴射攪拌工法の種類は多岐にわたっており、噴射メカニズム等の違いによりさまざまな特長を有している。

このような中で、コスト低減・工期短縮等の面から改良径の増大に対する要求は大きく、現在直径約5.0mが最大と言われている。また、改良体の形状についても円柱状が主流であるが、施工目的によっては、格子状、壁状などの改良技術も要求されてきている。

今回報告する高圧噴射攪拌工法は、改良径の増大、任意形状の改良を目的として開発された工法である。今回の試験施工では、①噴射エネルギーと改良径との関係、②改良体の品質(形状、強度、透水性)、③削孔精度、④近接構造物へ与える影響を確認した。

キーワード 高圧噴射攪拌工法／地盤改良／揺動／改良径／噴射エネルギー／削孔精度／近接構造物

目 次

- | | |
|------------|------------|
| 1. はじめに | 5. 試験施工結果 |
| 2. 試験施工の目的 | 6. 試験結果の考察 |
| 3. 工法の概要 | 7. 今後の課題 |
| 4. 試験施工の内容 | |

REPORT ON TEST CONSTRUCTION OF HIGH PRESSURE INJECTION MIXING METHOD

Toshiaki YASUI	Kouji MORITA
Hiroaki TEDUKA	Masanori HOSOKAWA
Rouji OGAWA	

Synopsis:

High pressure injection mixing methods are extensively used for open cut, seismic reinforcement, prevention of liquefaction and so on. There are many kind of this method. Each method has the original merits to make system better. But the maximum diameter size of improvement is about 5 meters and almost of these methods can construct only columnar improvement.

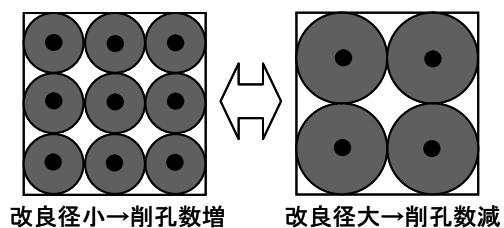
At present increase of the size is needed to lower the cost. Moreover, there are the demands to enable to construct latticed shape and wall. Therefore, we developed new method to achieve these requests.

In this paper, we report the findings on test construction.

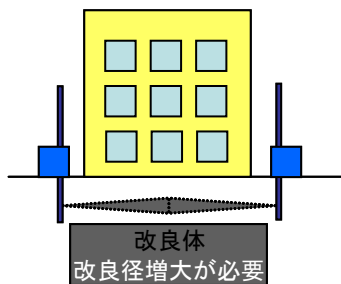
1.はじめに

高圧噴射攪拌工法は、地盤改良工法として開削工事における底盤改良・土留め壁補強、既設構造物の支持力増強、耐震補強、液状化対策等に幅広く適用されている。改良体の形状としては、一部任意形状(扇形等)施工が可能な工法があるものの、円柱形が一般的である。改良径は半径 $R=5.0\text{m}$ 程度が最大であるというのが現状である。

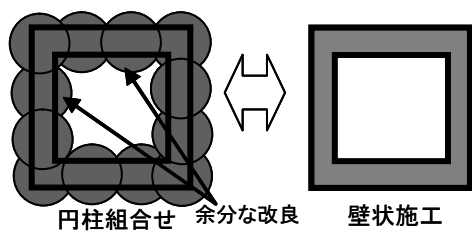
このような現状において、工程短縮(削孔ピッチの延長→削孔数低減)、既設構造物直下の改良(例えば、構造物の両端から噴射して、構造物直下で接合させるような場合)という点から、改良径の増大が期待されている。また、改良体形状についても、壁状や格子状の改良を要求される場合、円柱形を組み合わせた改良体では、不経済になる場合もある(必要以上に壁厚が大きくなる)。



a)改良ピッチの延長



b)既設構造物直下の改良



c)改良体形状

図-1 高圧噴射攪拌処理工法に対するニーズ

今回、上記のようなニーズに対応すべく開発された高圧噴射攪拌工法による試験施工を実施した。本報は、その内容について報告するものである。

2.試験施工の目的

今回の試験施工における目的は、下記に示す項目を確認することである。

- ・ 噴射エネルギーと改良径の関係の把握
- ・ 改良体の品質(形状、強度、透水性)
- ・ 削孔精度
- ・ 近接構造物へ与える影響

3.工法の概要

3.1 工法概要・特長

本工法は、基本的には一般的な高圧噴射攪拌工法と同様に、所定の深度まで削孔後、ロッド先端部の造成モニターに設置されている噴射ノズルから硬化材を噴射し、地盤切削・改良体造成を行う工法であるが、下記に示すような特長を有する。

- ・ 造成ロッドを回転でなく揺動しながら引き上げることで任意形状の改良体(扇形等)や壁状の改良体が構築できる
- ・ 噴射効率を高めることにより、半径約 $R=3.0\text{m}$ ($\phi 6.0\text{m}$ 相当)の改良体を構築できる
- ・ 目的に応じた改良域を効率よく造成できるため、低コスト・短工期化が図れること
- ・ 多孔管ロッドを採用することで、複数のノズルを設置でき、多方向を同時に改良できる

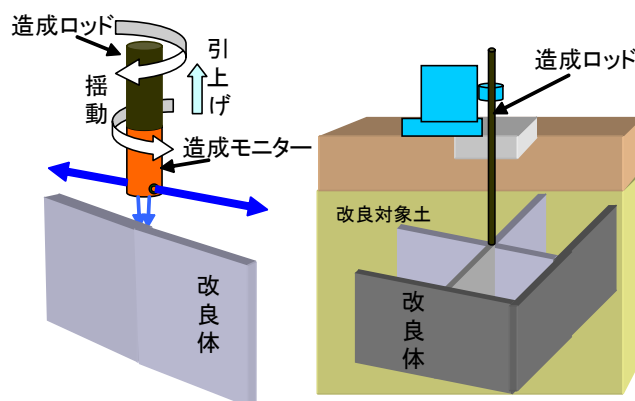


図-2 揺動による任意形状の改良体構築

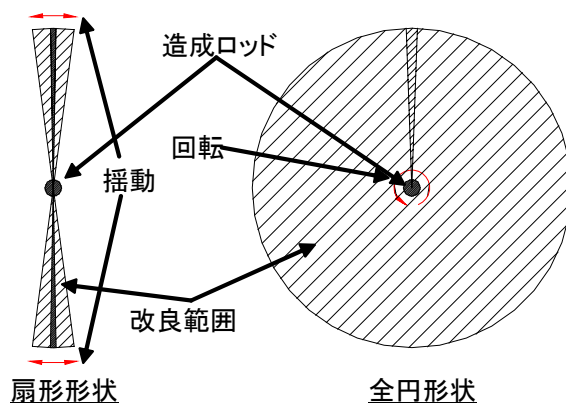


図-3 揺動と回転の違い



図-4 造成マシン



図-5 造成ロッド(φ140mm 多孔管)

また、本工法では造成モニター先端部に削孔ビットと削孔用噴射ノズルが設置されており、鉛直下向きのジェット噴射(1000 /分)による削孔が可能である。これより、施工条件、地盤条件にもよるが、造成ロッドおよび造成モニターで削孔から造成まで一貫して施工できる。ただ、孔壁が崩壊しやすい地盤条件では、ケーシングを併用する場合もある。

これより、削孔完了後にケーシングを引抜き、ロッド建込み完了後造成開始するという一般的なプロセスに比べると工程の短縮が期待できる。



図-7 ジェット削孔状況(先端部)

図-8 に、施工の流れを示す。削孔をジェット削孔で行う場合とケーシング削孔で行う場合の2ケースを示す。

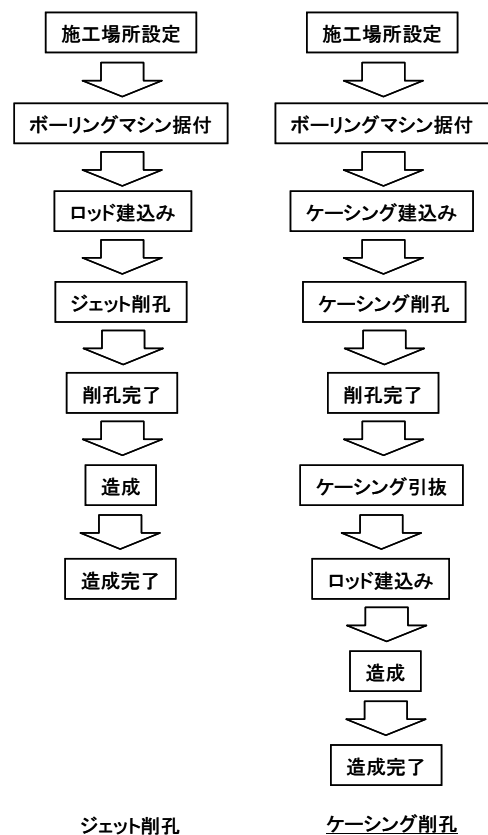


図-8 施工フロー



図-6 プラント全景

4. 試験施工の内容

4.1 試験概要

(1) 試験施工場所

試験施工は、茨城県取手市の当社研修所敷地内のグラウンドで実施した。試験ケースの詳細は後述するが、各試験ケースの配置、プラント設置位置、調査ボーリング等の配置図を図-9 に示す。

現地の土質性状を調査するために、本試験 1 の施工場所近傍で深度 60m(B1 孔)、30m(B2 孔)の 2 本のボーリング調査を実施した。

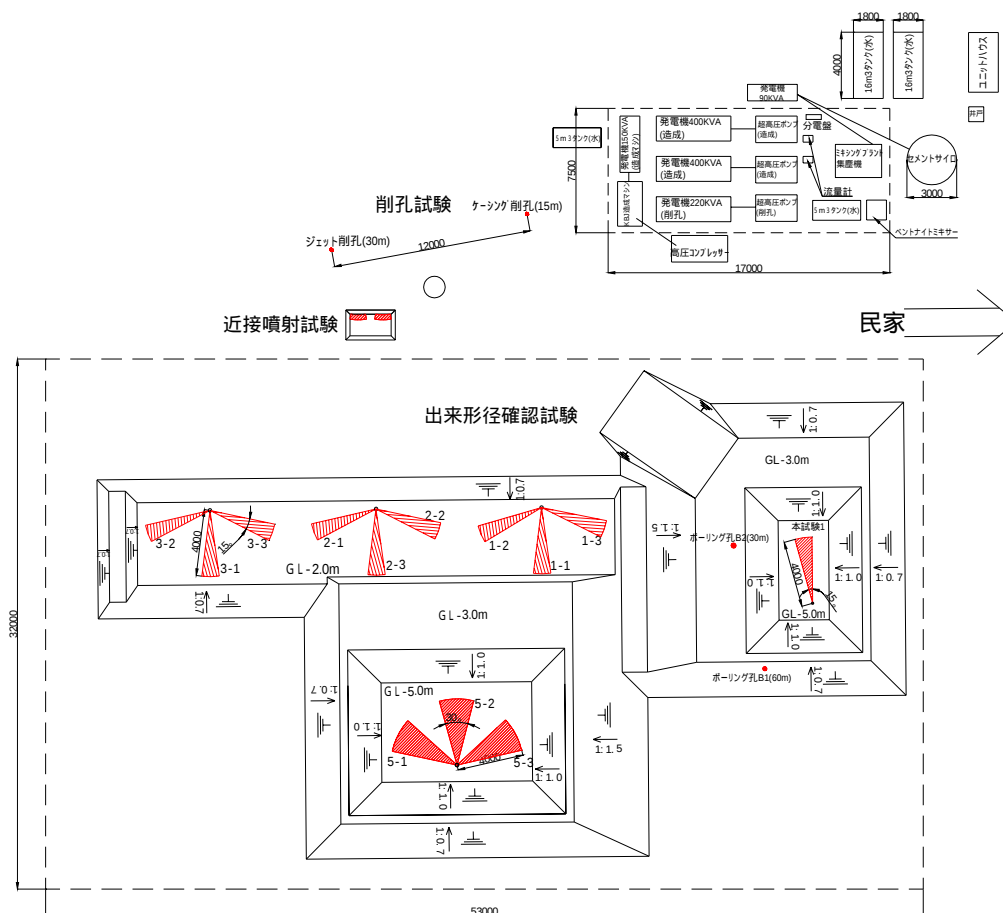


図-9 試験施工配置平面図

(2) 土質条件

試験施工場所における GL-24.0m 付近までのボーリング柱状図(B1 孔)を図-10 に示す。約 GL-3.5m まではローム層、約 GL-3.5～5.0m までは火山灰質粘性土層で N 値が 3 ～7 程度である。特に、火山灰質粘性土は粘着力が大きく、

全体的に硬質であった。それ以深からは砂質土となり、所々に粘性土を挟んでいる。なお、自然地下水位は GL-12.1m にある(今回の試験施工における造成深度は GL-20.0m が最深であり、造成範囲(地表面～GL-20m)での N 値の最大値は、N=34 である)。

表-1 試験施工ヤード各種土質試験結果

採取箇所	試料番号	採取深度	分類	細粒分含有率	含水比	コンシステンシー特性			一軸圧縮強度	三軸圧縮試験		
		(m)		F _c (%)	w(%)	液性限界 W _L (%)	塑性限界 W _p (%)	塑性指数 I _p	q _u (kN/m ²)	c(kN/m ²)	φ(°)	備考
ボーリング(B1孔)	B-1-1	-29.50～-30.40	砂まじり粘土	86.6	38.3	66.4	27.4	39.0	-	315	0.00	UU試験
	B-1-2	-41.00～-41.60	砂まじりシルト	90.9	35.7	51.8	28.8	23.0	-	192	0.00	UU試験
	D-6	-6.15～-6.48	砂質細粒土	63.4	37.0	-	-	-	-	-	-	
	D-9	-9.15～-9.45	砂粒分質砂	21.9	21.9	-	-	-	-	-	-	
	D-12	-12.15～-12.45	砂粒分質砂	29.5	38.8	-	-	-	-	-	-	
	D-19	-19.15～-19.45	砂粒分質砂	20.1	26.4	-	-	-	-	-	-	
	D-23	-23.15～-23.45	細粒分まじり砂	12.5	25.3	-	-	-	-	-	-	
	D-28	-28.05～-28.30	砂質細粒土	65.8	38.5	-	-	-	-	-	-	
	D-34	-34.10～-34.30	細粒分まじり砂	11.8	19.9	-	-	-	-	-	-	
	D-39	-39.15～-39.31	礫まじり細粒分質砂	35.5	30.5	-	-	-	-	-	-	
ボーリング(B2孔)	B-2-1A	-2.40～-3.60(上)	砂質火山灰質粘性土Ⅱ型	79.5	89.7	122.0	69.1	52.9	94.3	-	-	
	B-2-1B	-2.40～-3.60(下)	砂質火山灰質粘性土Ⅰ型	75.1	43.3	76.7	27.2	49.5	-	78.1	0.00	UU試験
出来形径掘削確認時	O-1	-3.20	砂質火山灰質粘性土Ⅰ型	-	38.1	-	-	-	-	107	0.00	UU試験
	O-2	-3.50	砂質火山灰質粘性土Ⅰ型	-	38.0	-	-	-	-	114	0.00	UU試験
	O-3	-5.30	砂質細粒土	-	36.1	-	-	-	-	18.4	29.19	CD試験

ボーリング調査時および掘削による改良径確認時に試料採取して土質試験を実施した。試料採取位置は、先述の図-9 に、表-1 に各種土質試験結果を示す。なお、図-11 には、土の粒度試験結果を示す(表-1 中の改良径掘削確認時とは、ケース 5-1～5-3 の改良径確認時にサンプリングしたものである)。

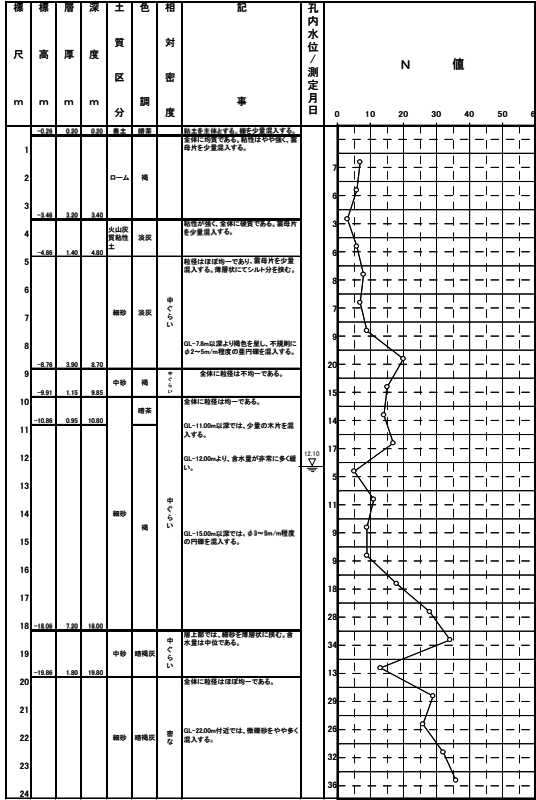


図-10 ボーリング調査結果(B1 孔 地表面～GL-24.0m)

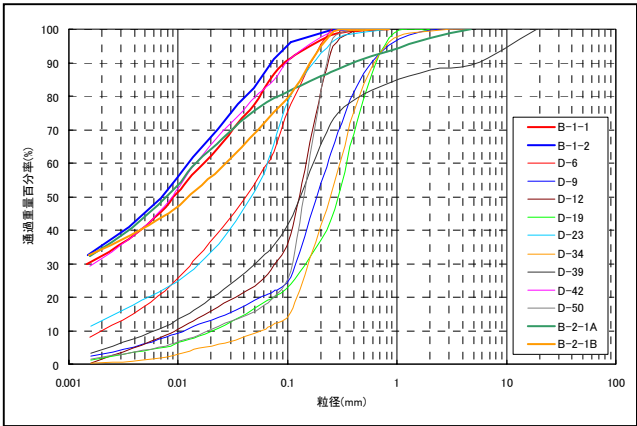


図-11 粒度試験結果

表-2 試験施工ヤードの透水性

測定箇所	測定深度	分類	平衡水位	透水係数k(cm/sec)	
				注入法	回復法
B1孔	GL-17.5 ～18.0m	細砂～中砂	GL-12.1m	1.30E-04	1.91E-03
	GL-36.5 ～37.0m	細砂～中砂		1.84E-05	2.32E-04

4.2 使用材料および使用機械

使用した固化材 1m³あたりの配合を表-3 に示す
また、使用した機械関係を表-4 に示す。これは、削孔および造成を1台のマシンで施工した場合である。

表-3 固化材標準配合

(1m ³ あたり)	
セメント	760kg
混和剤	12kg
水	750ℓ

表-4 使用機械一覧

名 称	仕 様	数 量	名 称	仕 様	数 量
造成用マシン		1	集塵機		1
発電機	150KVA	1	高圧コンプレッサー	1.03MPa, 15.3m ³ /min	1
ケーシングパイプ	200A, L=3m	11	風量計		1
ケーシング削孔用ポンプ	3.0MPa, 150ℓ/min	1	発電機	90KVA	1
発電機	220KVA	1	サンドポンプ	2時, 1.5KW, 揚程10m	2
モルタルミキサー	0.5m ³ , 横型2連	1	水中ポンプ	2時, 1.5KW, 揚程10m	6
高圧ポンプ	90ℓ/分	19	横型サンドポンプ	4時, 11KW, 揚程15m	2
造成用ロッド	多孔管, φ140, L=3m	3	高圧洗浄機		2
造成用ロッド	多孔管, φ140, L=1.5m	2	水槽	16m ³	2
発電機	400KVA	2	水槽	18m ³	1
超高圧ポンプ	40MPa, 150ℓ/min	3	水槽	5m ³	1
流量計		1	水槽	4.5m ³	1
セメントサイロ	30t	1	クローラークレーン	吊荷重50t	1
ミキシングプラント	24m ³ /h				

4.3 試験ケース

(1) 改良径確認試験

表-5 に示すように、仕様を変えて改良径を確認した。
吐出圧力はすべて 40MPa である。揺動角度は 15° を基本とした。噴射ノズル数は、噴射 1 方向あたりで 1 ノズルおよび 2 ノズルの 2 パターンとした。

なお、1STEP 間隔とは、ロッドを引上げるピッチで、5.0cm の場合は 5.0cm ずつ引上げるという意味である。
1STEP 切削回数とは、1STEP での同一箇所を切削する回数である。例えば 1 往復であれば、切削回数 2 回となる。

各試験ケースの計画平面・断面図を図-12 に示す。

表-5 改良径確認試験ケース一覧

試験 ケース	揺動 角度	造成深度	回転数	1STEP 切削回数	深度1mあたり 造成時間	噴射量	深度1mあたり 噴射量
	(度)	(m)	(rpm)	(回)	(分/m)	(ℓ/分)	(ℓ/m)
1-1	15	GL-2.0～-3.5	0.6	4.0	5.5	125×2	256
1-2			1.0	4.0	3.3	125×2	833
1-3			2.0	4.0	1.7	125×2	417
2-1	15		0.6	4.0	5.5	145×2	1605
2-2			1.0	4.0	3.3	145×2	967
2-3			0.6	4.8	6.7	145×2	1933
3-1	15		2.0	4.0	1.7	145×2	483
3-2			0.6	2.0	5.5	250×1	1383
3-3			1.5	4.0	4.5	250×1	1117
5-1	30		1.3	2.0	2.5	125×2	625
5-2			1.0	2.0	3.3	125×2	833
5-3			0.6	4.9	13.7	145×2	3983
本試験1	15	GL-5.0～-20.0	0.6	4.8	6.7	145×2	1933

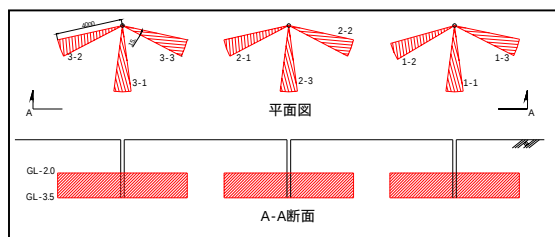


図-12(a) ケース 1-1～3-3 の試験計画図

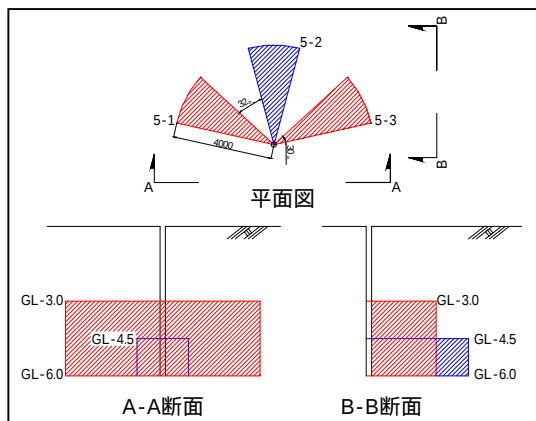


図-12(b) ケース 5-1～5-3 の試験計画図

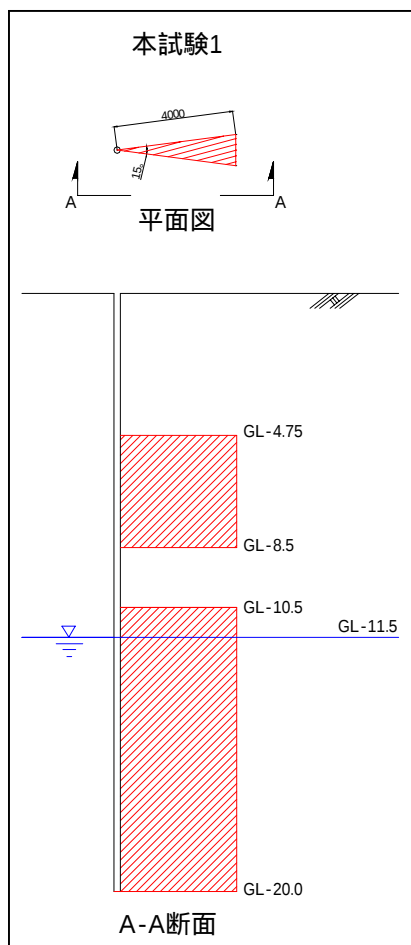


図-12(c) 本試験 1 の試験計画図

ケース 1～3 は GL-2.0～-3.5m のローム層での施工である。半径 $R=4.0\text{m}$ 相当を目標とした。1STEP あたりの切削回数は 4 回を基本とし、回転速度(rpm)、噴射量($\ell/\text{分}$)および噴射ノズル数(個)をパラメータとして変化させた。これらの要素のうち、改良径に及ぼす影響が大きいものを把握することを目的とした。

ケース 5 は、砂層での施工である。ケース 5-1, 2 は経済性を考慮し、半径 $R=2.5\text{m}$ 程度の改良体を Superjet 工法と同等あるいはそれ以下の噴射量($\ell/\text{分}$) (深度 1m あたり)で施工可能かを確認することを目的とした。Superjet 工法の標準仕様を表-6 に示す。ケース 5-3 は、半径 $R=4.0\text{m}$ 程度の改良径を目標とし、Superjet 工法以上の噴射量($\ell/\text{分}$)とした。また、排泥経路が狭いことによる排泥閉塞等の影響を確認するため、揺動角度を 30° に設定した。

本試験 1 では、実施工への適用性の確認も踏まえて、GL-5.0～-20.0m までの改良を行った。半径 $R=4.0\text{m}$ の改良径を目的とし、ケース 5-3 相当の仕様とした。

表-6 Superjet 工法の施工仕様(360°改良)

噴射圧力 (MPa)	噴射量 ($\ell/\text{分}$)	深度1mあたり 造成時間(分/m)	深度1mあたり 噴射量(ℓ/m)
30	600	16	9600 (800)

※深度 1m あたり噴射量($\ell/\text{分}$)の()内は 30° での噴射量

(2) 削孔試験

造成深度が深くなると、削孔精度の影響が大きくなる。今回の試験施工では、削孔精度の目標値を $1/250$ と設定した。ケーシング削孔では地盤条件にもよるが、過去の施工事例より $1/250$ 程度での施工は可能である。一方、ジェット削孔においても施工実績が少ないが、ケーシング削孔と同程度の精度が必要である。

そこで、削孔精度を確認することを目的に、ケーシング削孔($\phi 216\text{mm}$)およびジェット削孔($\phi 140\text{mm}$)を実施した。試験ケースと試験概要図を表-7、図-13 に示す。また、本試験 1 でもケーシング削孔($\phi 216\text{mm}$)を実施したので、造成開始前に削孔精度を測定した。なお、ケーシング削孔はジャイロ、ジェット削孔はデジタルオンライン(磁気方位センサー)で測定した。

表-7 削孔精度確認試験ケース一覧

試験ケース	削孔仕様	削孔長(m)	削孔精度確認方法
削孔試験1	ケーシング削孔($\phi 216\text{mm}$)	15	ジャイロ
削孔試験2	ジェット削孔($\phi 140\text{mm}$)	30	デジタルオンライン
本試験1	ケーシング削孔($\phi 216\text{mm}$)	20	ジャイロ

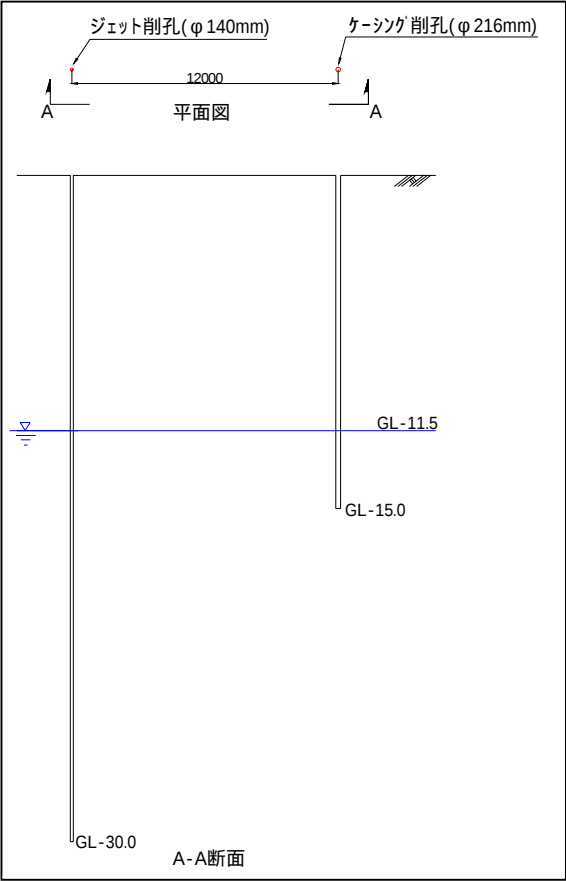


図-13 削孔精度確認試験概要図
(本試験は、図-12(c)と同様である)

(3) 近接噴射試験

既設構造物および埋設物の周辺で、造成する際は、既設構造物への影響を把握しておく必要がある。当試験では、シールド工法のセグメント(設計基準強度 45N/mm²)に、向けて硬化材を噴射して、その損傷程度を確認した。

セグメントは、図-14 に示すように2つ並べて、30cm程度頭が出るように地中に設置した。その後、ロッドを地中に挿入し、セグメントに向けて噴射した。

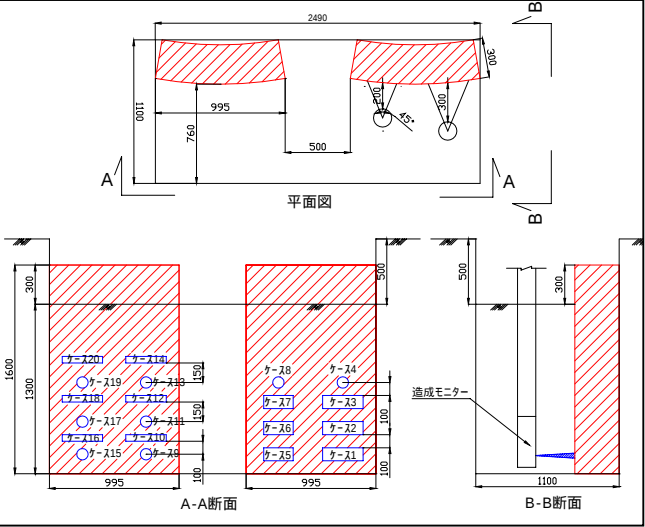


図-14 近接噴射試験概要図

試験ケースの一覧を表-8 に示す。直噴は揺動せずに 3 分間同一箇所へ噴射し続けた場合である。

表-8 近接噴射試験ケース一覧

揺動角度		45度	
1STEP引上高さ		5cm	
回転数		1.0rpm	
ノズル径		φ 4.0mm	
ケース	噴射圧力 (MPa)	離隔距離 (cm)	切削回数 (回)
1	40	30	4
2			3
3			2
4			直噴3分
5		20	4
6			3
7			2
8			直噴3分
9		100	直噴3分
10			2
11		70	直噴3分
12			2
13		50	直噴3分
14			2
15	20	50	直噴3分
16			2
17		30	直噴3分
18			2
19		20	直噴3分
20			2

4.4 試験施工における管理項目

試験施工中に管理する項目を表-9 に示す。

表-9 施工管理項目一覧

作業内容	施工管理項目	管理方法	管理目標値	備考
施工場所設定	位置出し	測量		事前にマーキング
マシン据付	位置、高さ、水平	測量、水平器		ジャッキで調節
削孔	鉛直性	トランシット		
	削孔深度確認	残尺による確認		
	削孔精度確認	削孔完了後、デジタルオンラインあるいはジャイロで確認	1/250	
造成	造成開始深度確認	残尺による確認		スライム等により、削孔直後と底盤の状況が異なることが予想されるため、再度確認する。
	吐出圧	ポンプモニターで管理	40MPa	
	吐出量	流量計で管理		
	回転速度	モニターおよび時計管理	各仕様における設定値	
	引上げ時間	モニターおよび時計管理		
	揺動角度	モニター管理および目視	15度、30度	
	排泥比重	マドバラスで計測 (65分程度)		
	造成深度確認(上端)	残尺による確認		造成完了時

5. 試験施工結果

5.1 改良径

各ケースの改良径の確認方法を表-10 に示す。ケース 1-1～3-3 においては、GL-2.0m まで掘削して改良体天端を確認した。結果を表-11、図-15, 16, 17 に示す。中心直径とは、削孔位置での改良体の幅である。ケース 1-1 と 2-1, 1-2 と 2-2, 1-3 と 3-1 の比較より、回転速度一定であれば噴射量(ℓ /分)が多いほど改良径が大きくなること が分かる。噴射 1 方向あたりのノズル個数は、ケース 1-1 と 3-2 との比較より、噴射量(ℓ /分)が同じでも 2 箇所設置の方が改良径は大きい。また、9 ケースの中で造成深

度 1m あたり噴射量(ℓ /m)が最も大きいケース 2-3 の改良径が最大とはならなかった。

ケース 5-1～5-3 は、GL-3.0m まで掘削して改良体天端の改良径を確認したのち、深度方向に 50cm ずつ掘削および電動チッパーによる改良体のはつりを繰り返しながら、GL-5.0m まで各深度での改良径を確認した。試験結果を表-12、図-18 に示す。

GL-5.0m の砂層に着目すると、5-1, 5-2 とも半径 $R=2.5m$ 相当の改良径が確認できた。また、ケース 2-3 と 5-3 の結果を比較すると揺動角度の違いによる排泥への影響は特にみられなかった。

表-10 改良径確認方法一覧

ケース	造成深度	改良径確認方法
1-1	GL-2.0m～-3.5m	掘削によりGL-2.0mで確認
1-2		
1-3		
2-1		
2-2		
2-3		
3-1	GL-3.0m～-6.0m	掘削および改良体はつり (深度方向50cmピッチ)
3-2		
3-3		
5-1	GL-3.0m～-6.0m	掘削および改良体はつり (深度方向50cmピッチ)
5-2	GL-4.5m～-6.0m	
5-3	GL-3.0m～-6.0m	
本試験1	GL-4.75m～-20.0m (-8.5m～-10.0mは未造成)	・ GL-4.75m～-8.0mまでは掘削 ・ GL-10.5m～-20.0mまでは、 チェックボーリング

表-11 改良径確認結果(ケース 1-1～3-3)

試験ケース	深度(m)	出来形(mm)		
		最大改良径	最小改良径	中心直径
1-1	GL-2.0	2580	2300	240
1-2		1850	1800	
1-3		2150	1950	
2-1		3400	2600	310
2-2		3450	3250	
2-3		3000	2900	
3-1		2400	2100	200
3-2		2200	1900	
3-3		2400	1700	



図-15 ケース 1-1～1-3 改良径確認



図-16 ケース 2-1～2-3 改良径確認



図-17 ケース 2-1～2-3 改良径確認

表-12 改良径確認結果(ケース 5-1～5-3)

試験ケース	深度(m)	出来形(mm)		
		最大改良径	最小改良径	中心直径
5-1	GL-3.0	2780	2010	250
	GL-3.5	2100	1830	500
	GL-4.0	1800	1500	210
	GL-4.5	2240	1900	230
	GL-5.0	2900	2500	200
5-2	GL-3.0	-	-	-
	GL-3.5	-	-	-
	GL-4.0	-	-	-
	GL-4.5	2030	1950	230
	GL-5.0	2550	2100	200
5-3	GL-3.0	3210	2870	250
	GL-3.5	2630	2260	500
	GL-4.0	2900	2400	210
	GL-4.5	3110	2800	230
	GL-5.0	3150	2670	200



図-18 ケース 5-1～5-3 改良径確認

本試験 1 については、GL-5.0m まで掘削し、改良体天端の改良径を確認した。表-13、図-19 に結果を示す。改良体先端部については、約 GL-8.0m まで溝掘して出来形を確認した。図-20 に結果を示す。改良体先端部に凹凸があったが、各深度における最大改良径を測定した。

これより、GL-8.0 付近までの改良径は、概ね半径 $R=4.0\text{m}$ 程度を満足していることが確認できた。

それ以深 GL-10.5～20.0m は、改良体中心から半径 $R=3.0\text{m}$ 、 3.5m の位置でチェックボーリングによる改良体コア採取によって確認した。

改良体の形状については、全ケースとも概ね設定どおりの扇形 (15° 、 30°) で改良されており、扇形の組合せによる任意形状 (格子状、壁状) の施工が可能であることが確認できた。

表-13 改良径確認結果 (本試験 1)

試験ケース	深度(m)	出来形(mm)		
		最大改良径	最小改良径	中心直径
本試験1	GL-4.75	4550	4170	230



図-19 本試験 1 改良径確認

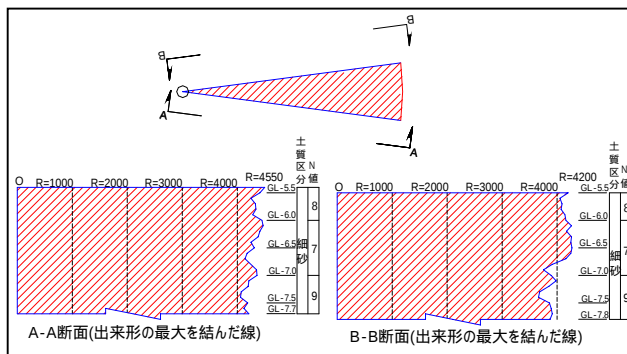


図-20 改良径確認 (本試験 1 先端部)

5.2 削孔精度

削孔精度確認試験の結果を表-14 に示す。削孔試験 1, 2 は、目標の削孔精度 ($1/250$) が確保できなかった。一方、本試験 1 は、 $1/650$ という精度を確保できた。この精度の違いの原因として考えられるのは、削孔試験 1, 2 はロッドの鉛直性を最初のロッド建込み時に確認するのみであったのに対し、本試験 1 は削孔中継続的にロッドの鉛直性を確認しながら施工したためと考えられる。

これより、ジェット削孔については今回施工管理が不十分で、目標の削孔精度を満足できなかったが、本試験 1 と同様の施工管理を実施することで、 $1/250$ の削孔精度での施工は可能と思われる。

表-14 削孔精度確認試験結果

試験ケース	削孔仕様	削孔長(m)	削孔精度確認結果		
			確認方法	最大偏心量(m)	削孔精度
削孔試験1	ケーシング削孔 (φ216mm)	15	ジャイロ	0.170	$1/88$
削孔試験2	ジェット削孔 (φ140mm)	30	デジタルオンライン (GL-15mまでの測定)	0.158	$1/95$
本試験1	ケーシング削孔 (φ216mm)	20	ジャイロ	0.032	$1/625$

5.3 近接構造物への影響

近接噴射試験結果を表-15 に、セグメントの損傷状態を図-21 に示す。



図-21 セグメント損傷状況 (ケース 1～8)

表-15 近接噴射試験結果

ケース	圧力 (MPa)	離隔距離 (cm)	切削回数 (回)	損傷深さ (mm)
1	40	30	4	0.30
2			3	0.30
3			2	0.00
4			直噴3分	4.91
5		20	4	0.78
6			3	0.46
7			2	0.41
8			直噴3分	11.00
9		100	直噴3分	3.03
10			2	損傷無し
11		70	直噴3分	0.57
12			2	損傷無し
13		50	直噴3分	1.72
14			2	損傷無し
15	20	50	直噴3分	0.97
16			2	損傷無し
17		30	直噴3分	2.44
18			2	損傷無し
19		20	直噴3分	4.60
20			2	0.25

損傷深さの測定については、1/100mm のダイヤルゲージを使用し、損傷部分と非損傷部分の差から計算した。図-22 に示すように、損傷状況は揺動では表面を目荒らししたような感じであったが、直噴 3 分では離隔距離=20cm 程度だと、粗骨材の露頭が見られた。



図-22 セグメント損傷状況(拡大)

これより、既設構造物に直噴することがない限り、切削による影響は小さいと考えられる。

5.4 改良体の強度および透水性

ケース 5 の改良体から、ブロックサンプリングして、一軸圧縮強度試験および透水試験を実施した。試験結果を表-16 に示す。

一軸圧縮強度は、概ね $q_u=3,000$ (kN/m²) 程度である。透水係数は $k=1.0 \times 10^{-7}$ (cm/sec) オーダーを満足しており、十分な遮水機能を有することが確認できた。

表-16 改良体の一軸圧縮強度および透水係数

ケース	改良体 天端(m)	分類	一軸圧縮強度(平均)	透水係数(平均)
			q_u (kN/m ²)	k(cm/sec)
5-2	GL-4.8	細砂	3,543	8.29E-08
5-3	GL-4.8	細砂	3,116	-

5.5 施工管理項目測定結果

施工管理項目においては、測量および各モニター画面にて逐次確認し、設定した数値を逸脱しないように管理した。これにより、各仕様とも概ね設定どおりの施工ができた。

排泥の比重測定結果を表-17 に示す。プラントでの練混ぜ時の比重は $\rho=1.50$ であった。ケース 1, 2, 3, 5 は概ね、比重 $\rho=1.5$ 前後であるが、本試験 1 は $\rho=1.6 \sim 1.7$ と高い比重であった。一般的に排泥比重が大きいほど、地盤が確実に切削されていると言われるが、今回はケース 1, 2, 3, 5 が粘土層、本試験 1 が砂層ということからも排泥比重と改良径を直接的に結びつけて良いか分からない。ただ、結果的に本試験 1 の排泥比重が大きかった。

表-17 排泥比重測定結果

ケース	採取持 造成深度(m)	排泥比重	ケース	採取持 造成深度(m)	排泥比重
プラント	-	1.50	5-3	GL-0.5	1.59
1-1	-	-		GL-1.0	1.59
1-2	-	-		GL-1.2	1.59
1-3	GL-1.0	1.57		GL-2.5	1.58
2-3	GL-0.5	1.52		GL-3.0	1.58
2-1	GL-1.5	1.50	本試験1	GL-19.5	1.63
	GL-1.0	1.56		GL-17.5	1.61
2-2	GL-1.5	1.49		GL-16.5	1.52
	GL-0.5	1.53		GL-15.5	1.63
3-1	GL-1.5	1.50		GL-14.5	1.68
	GL-0.5	1.49		GL-13.0	1.71
3-2	GL-0.25	1.54		GL-11.5	1.71
	GL-1.25	1.46		GL-10.5	1.71
3-3	GL-0.25	1.49		GL-8.0	1.63
5-2	GL-1.0	1.55		GL-6.5	1.68
5-1	GL-1.5	1.47		GL-5.0	1.63

6. 試験結果の考察

単位時間あたり噴射エネルギー E_0 を

$$E_0 \approx 0.999 \times \text{噴射量}(\ell/\text{分}) \times \text{噴射圧力(MPa)}$$

造成深度 1m あたりの噴射エネルギー E を

$$E \approx \text{噴射時間(分/m)} \times E_0$$

として、これと改良径との関係を図-22 に整理した。噴射時間は、揺動角度 15° における時間としているので、ケース 5-1~5-3 については揺動角度 15° に換算した。ばらつきはあるものの、概ね噴射エネルギーと改良径は相関があると思われる。参考までに、Superjet 工法と Superjet-Midi 工法の関係も併記した。Superjet 工法は、噴射量(ℓ/m)はケース 5-2 と同等であるが、噴射圧力が 30 (MPa) であるため、噴射エネルギーは小さくなる。

噴射エネルギーには 3 つのパラメータがあり、施工性、経済性を考慮して、最適な組み合わせを見つけることが

重要となる。ただ、噴射圧力はポンプの最大能力に設定する人が多い(今回は 40MPa)。

従って、噴射量と噴射時間を制御することによって、改良径を管理することになる。また、同じ噴射エネルギーでも噴射量を多くして、噴射時間を短くする方が造成時間の短縮になり、全体の工期短縮が図れる。

目標とする改良径によって仕様の考え方も異なる。半径 $R=2.5\text{m}$ 程度までは、Superjet 工法相当あるいはそれ以下での仕様で改良できることが要求される。一方、半径 $R=4.0\text{m}$ 程度の改良径は、現時点では従来工法で施工不可能な領域であることから、経済性はもとより、確実に施工できる仕様を確立することが要求される。

いずれにしても、そのためにはデータの蓄積が不可欠となる。本工法は、まだ施工実績が少ないので、今後、施工中にさまざまなデータ管理を実施する必要がある。

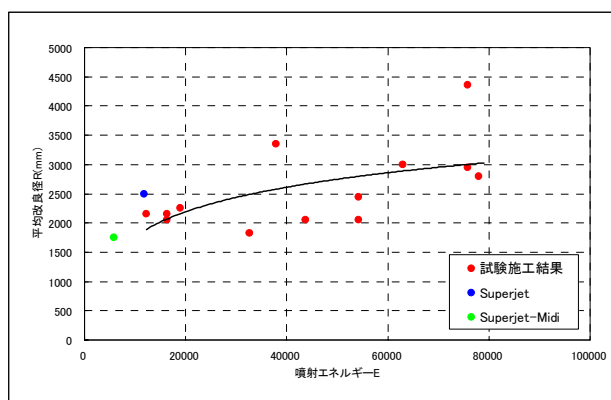


図-22 噴射エネルギーと平均改良径との関係
(揺動角度 15°における)

7. 今後の課題

今回の試験施工において、本工法の改良径、改良体品質、施工性を確認した。噴射エネルギーと改良径の関係については概ね把握できたが、まだデータ数が絶対的に少なく信頼性という面では懸念が残る。また、今回確認することができなかった項目もいくつか残った。このような点を踏まえ、今後の課題を下記に示す。

- ・ 噴射エネルギーと改良径との関係を把握するためのデータ蓄積
- ・ 品質確認(改良径、ラップ部分)方法の確立
- ・ 大深度(30m以上)での、改良形および施工性の確認
- ・ 多方向噴射での施工品質、施工性の確認

参考文献

- 1) 八尋揮夫・吉田宏・西謙治:わかりやすい建築技術 ウォータージェットを利用した地下工法、鹿島出版会