

新しい鋼管補強高圧噴射フォアパイリングの実証実験 TESTS ON NEW JET GROUT FOREPILING REINFORCED BY STEEL PIPE

二ノ宮 正*・守屋 洋一**・中原 巖***・高田 徹***
Tadashi NINOMIYA, Yoichi MORIYA, Iwao NAKAHARA and Toru TAKADA

Due to the development of preconfinement or presupport, the works of tunnel construction have been executed more safely and more rapidly in Japan.

This new jet grout forepiling reinforced by steel pipe which is one of the umbrella methods make a tunnel pre-supporting shell of the tunnel face. We studied and tested to verify the execution System and applicability at the bank in Chiba and Maiko tunnel South Section in Koube City.

In this papaer, we describe the summary of this method and results of the twice tests.

Keywords: NATM, jet grout, forepiling, umbrella method

1. はじめに

近年急速に発達してきた補助工法によって、NATMはその適用範囲を山岳部の硬岩地山から都市部の土砂地山まで広げてきた。特に、切羽前方地山を効果的に先行支持する「先受け工」の開発、実用化は大断面掘削を可能にするとともに、大型機械導入による急速施工、掘削時の安全性、施工性向上に大きく貢献している。

ここで紹介する新しい先受け工は、イタリアで開発された長尺先受け工（通称アンブレラ工法）の一つで、地山を高圧噴射改良しながら同時に鋼管打設を行うことができる工法である。当工法は海外での実績はあるものの得られる情報は断片的で、実際の施工システムおよび地山への適用性などの不明確な点が多く、実現場への適用にはやや不安があった。

これらの懸念を取り除くため、平成6年7月に千葉県富津市の採砂場の盛土地盤で国内初の実証実験を行ったのに続き、平成7年2月には現在施工中である神戸市垂水区の舞子トンネル南工事内の洪積地盤（大阪層群）においても実証実験を行った。これら性状の異なる地質での実験を経て、全体システムの作動確認および地山への適用性を把握することができた。また実験データを分析することによって、これまで研究実績の少ない改良造成体の出来形と施工仕様の相互関係を明らかにすることができた。

本報文では、当工法の概要・特徴を述べるとともに、実験を通して得られた成果について報告する。

* ㈱大林組 土木技術本部 技術第二部
** 正会員 ㈱大林組 土木技術本部 技術第二部
*** 日本基礎技術㈱ 技術本部 重機部

2. 新工法の概要

当工法は図-1に示す主な先受け工の分類では鋼管補強高圧噴射フォアパイリングに該当する。

当工法の施工手順は図-2に示すように、通常ダブルロータリー削孔方式(図-3)によって、

- ①必要な長さのバルクヘッド部を送水削孔する。
- ②高圧噴射装置から硬化材を高圧噴射しながら、芯材鋼管(外管)と高圧噴射管(内管)を同時に回転圧入し、円柱状の改良体を手前から造成していく。
- ③造成完了後、内管を引抜き、必要に応じて鋼管を利用した二次注入を行う。

以上の作業をトンネル外周部に連続して造成することによって剛性の高いアーチゾーンを形成し、トンネル切羽前方の地山を効果的に先受けする。

当工法の主な特徴は以下の通りである。

①グレードの高い先受け効果

高圧噴射改良と同時に鋼管を打設することができ、この鋼管で強化されたアーチゾーンが優れた先受け効果を発揮する。

②高品質の改良体

高圧で噴射される硬化材で地山を切削し、地山と硬化材を攪拌・置換するので信頼性の高い高強度の改良体が造成される。またセメント系硬化材を使用するため、長期的に安定した硬化体の造成が期待できる。

③二重管施工による排土の容易さ

二重管で施工されるため、改良体の造成中、常に排土流路が確保されており、地山内部の圧力上昇が防止できる。また、ホースを通した排土が可能であり、排土処理が容易である。

④二次注入による空洞充填

噴射改良後、鋼管を利用することによってブリージングなどによって発生する上部の空洞を充填する二次注入が可能である。

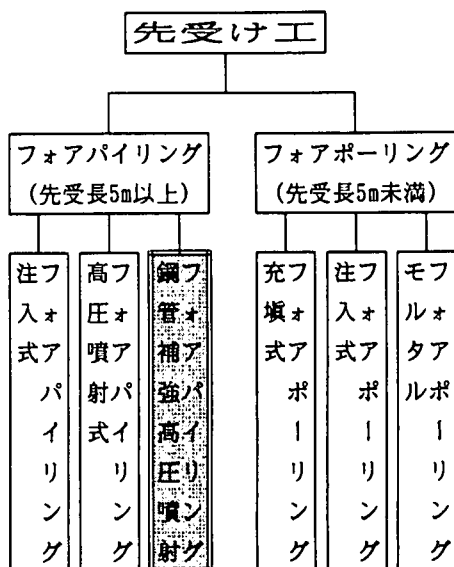


図-1 主な先受け工の分類

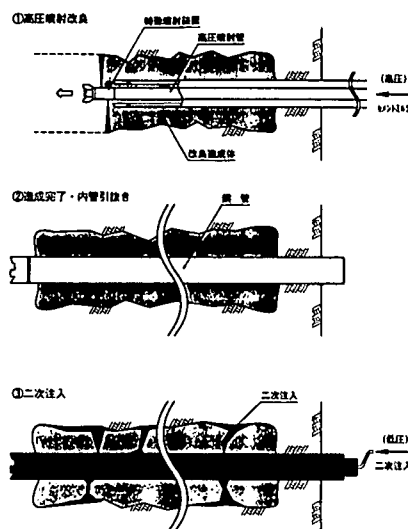


図-2 新工法の施工手順

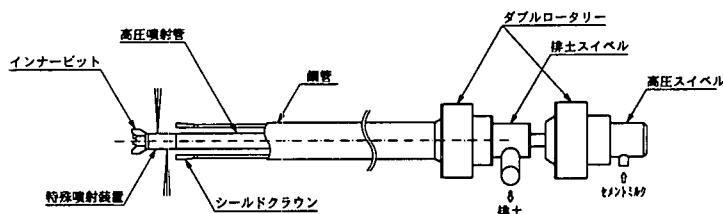


図-3 ダブルロータリー削孔方式

3. 実験

3・1 実験概要

(a) 時期および場所

実験の時期及び場所は以下の通りである。

①平成6年7月～8月：千葉県富津市の採砂場における盛土地盤

②平成7年2月～4月：神戸市垂水区舞子トンネル南工事の下半盤

(b) 土質データ

実験を行った地盤の土質データを表－1に示す。表からも明らかなように二箇所の地質は土砂地山と
いても、ルーズな盛土地盤から洪積層の硬質地盤という性状の大きく異なる土質である。

表－1 土質データ一覧表

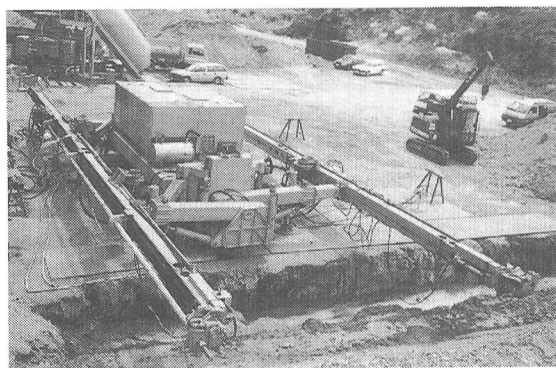
場 所	土質分類名 (記号)	盛土高さ 打設高さ	N 値	最 大 粒 径	粒度分布			均 等 係 数	湿潤密度 (gf/cm^3)
					礫分	砂分	細粒分		
①千葉県富津 盛土地盤	シルト混じり 礫(G-M)	H=6.0m GL+2.5m	2～8	160mm	52%	38%	10%	92.0	1.756
	シルト混じり 砂(S-M)	H=4.6m GL+1.5m	2～3	9.5mm	3%	92%	5%	3.1	—
②舞子トンネル 下半盤	細粒分混じり 礫(G-F)	H=20m GL=20m	50～70 以上	53mm	55%	35%	10%	110.0	2.124

3・2 実験方法

実験は図－4に示すフローチャートの手順に従い、
削孔方式、単位造成時間、噴射圧力、回転数、二次注
入の有無をパラメータとし実施した。

写真－1は、千葉県富津での実験状況である。

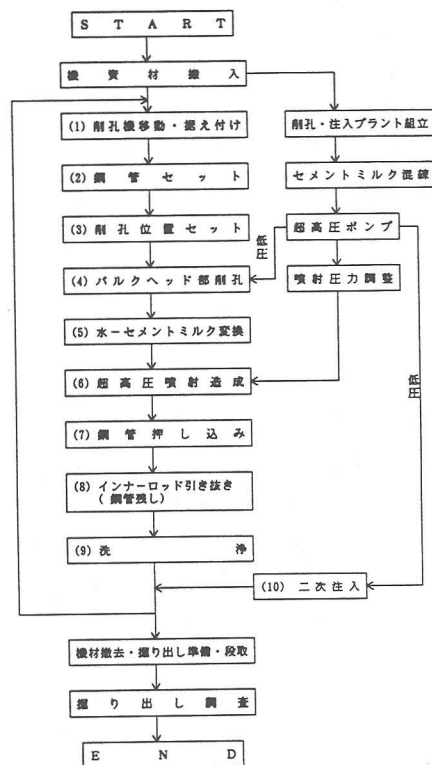
このときのセメントミルクの配合を表－2に示す。



写真－1 実験状況

表－2 セメントミルク配合

1 m^3 当たり				
材 料	セメント	水	混和剤	合計
重 量	754 kg	744 kg	9 kg	1,507 kg



図－4 実験フローチャート

3・3 実験結果

ケース別実験結果を表-3に示す。

表-3 ケース別実験結果

実験 場所	case No.	削孔方式	土 質	回転数 (r. p. m.)	単位造成 時 間 (分/m)	噴射圧力 (kgf/cm ²)	造成体積 V1 (m ³)	総噴射量 V2 (m ³)	有効率 V1/V2	造成長 (m)	造成径 (m)	平均一軸 圧縮強度 (kgf/cm ²)	備 考
千葉 富津	F-0	ダブローリ	礫混り土	18	3	300	5.935	2.890	2.054	8.0	0.86	50.9	
	F-2	"	"	10	6	300	3.177	4.478	0.709	8.0	0.68	30.5	
	F-3	"	"	10	3	300	4.369	2.501	1.747	9.5	0.74	51.9	
	F-4	"	"	18	6	300	6.820	5.201	1.311	8.0	1.00	80.3	
	F-5	"	"	10	6	200	3.955	4.685	0.844	9.0	0.70	79.1	
	F-6	"	砂質土	10	6	300	5.375	5.602	0.959	8.0	0.90	54.6	
	F-7	"	"	10	3	300	3.163	4.359	0.726	8.0	0.70	52.7	
	F-8	"	礫混り土	10	6	300	8.056	4.991	1.614	7.5	1.10	64.3	二次注入
	F-10	トップハンマー	"	10	6	300	3.273	4.294	0.762	8.0	0.70	24.9	
	平 均						4.903	4.333	1.192	8.2	0.82	54.4	
舞子	M-1	ダブローリ	砂礫土	10	6	200	1.01	2.977	0.339	5.4	0.48	137.3	
	M-2	"	"	10	4	340	1.974	2.700	0.731	5.0	0.69	97.7	
	M-3	"	"	10	6	340	1.631	3.234	0.504	4.7	0.65	230.0	
	M-3'	"	"	18	6	340	2.494	4.652	0.536	6.3	0.71	170.0	
	M-4	"	"	10	4	400	1.999	2.294	0.871	6.4	0.62	202.3	二次注入
	M-5	"	"	10	6	400	2.044	3.325	0.615	6.0	0.65	134.5	
	M-6	"	"	10	6	100	1.407	2.765	0.509	5.0	0.60	124.8	二次注入
	平 均						1.794	3.135	0.587	5.543	0.63	156.7	

4. 考察

今回の実験結果より、当工法に関して以下のことが明らかになった。

(1) 適用地質

当工法は、N=2~3またはN=50以上という広範囲な地質に対して適用可能であり、概ね造成径D=60cm以上、平均一軸圧縮強度30kgf/cm²以上を確保できる。ただし、N=50以上の地盤では噴射量を増やしても造成径の増加は少ない。(図-5)

(2) 二次注入の有効性

二次注入は造成体の品質向上に大きく貢献する。二次注入を施工した造成体には、ブリージングによる上部の沈降が見られず安定した造成径が確保できる。

(3) 地質条件に対する有効率と強度

有効率(造成体積の総噴射量に対する割合)は通常1以下になると考えられるが、礫径が大きくポーラスな地山では周辺の礫を取り込み1以上になることもある。ただし有効率が1を超えると一軸圧縮強度が低下する傾向が見られる。(図-6)

また千葉富津(写真-2)と舞子トンネル(写真-3)

の一軸圧縮強度の差が大きい、この原因として坑内外の養生条件の違いの他に、対象地盤の礫径および礫強度が関与していると推定される。これは一般に単位造成時間が充分でない場合、大礫は切削できず造成体の一部として残存するためである。

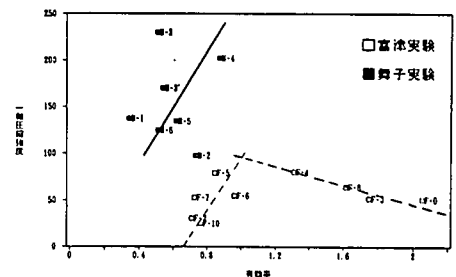


図-5 噴射流量と造成径の関係

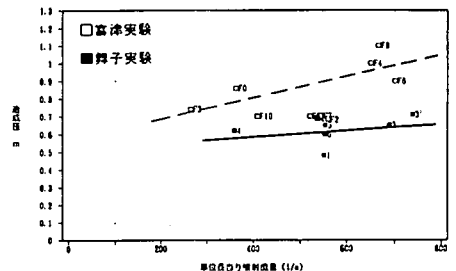


図-6 有効率と一軸圧縮強度の関係



写真-2 造成体出来形（礫混り土地盤：千葉富津）

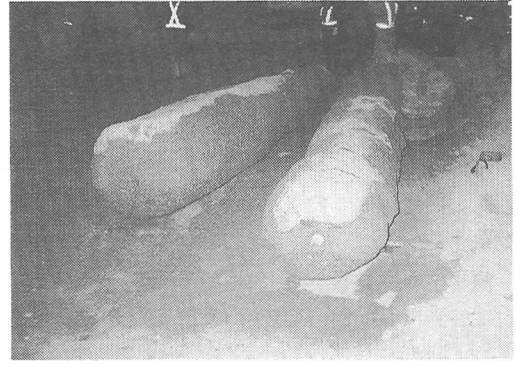


写真-3 造成体出来形（砂礫地盤：舞子T）

(4) 施工仕様と造成径の関係

本実験では噴射圧力、単位造成時間、回転数という施工仕様それぞれによる造成径への明確な相関関係は見い出せなかった。しかし、以下に示すジェット噴射が地山に与えるエネルギーという考え方を導入することによって図-7に示すようなN値の違いによるジェット噴射エネルギーと造成径の高い相関性をもつ関係を把握することができた。

算定式は以下の通りである。

$$E = \rho \cdot Q \cdot (v^2 / 2g) \cdot t \quad \text{-----} \quad \diamond$$

◇式に、

$$\begin{cases} Q = A \cdot v \\ v^2 = C^2 \cdot (2P / \rho) \cdot g \quad (\text{トリチェリの定理}) \end{cases}$$

を代入すると

$$E = A \cdot t \cdot (2P^3 \cdot g / \rho)^{1/2} \quad \text{-----} \quad \diamond$$

ここに、

- E: ジェット噴射エネルギー (kgf・m/m)
- ρ : セメントミルク密度 (kgf/m³)
- Q: 噴射流量 (m³/sec)
- v: 噴射速度 (m/sec)
- g: 重力加速度 (m/sec²) = 9.8
- t: 単位造成時間 (sec/m)
- A: 噴射ノズル断面積 (m²)
- P: 噴射圧力 (kgf/m²)
- C: 流速係数

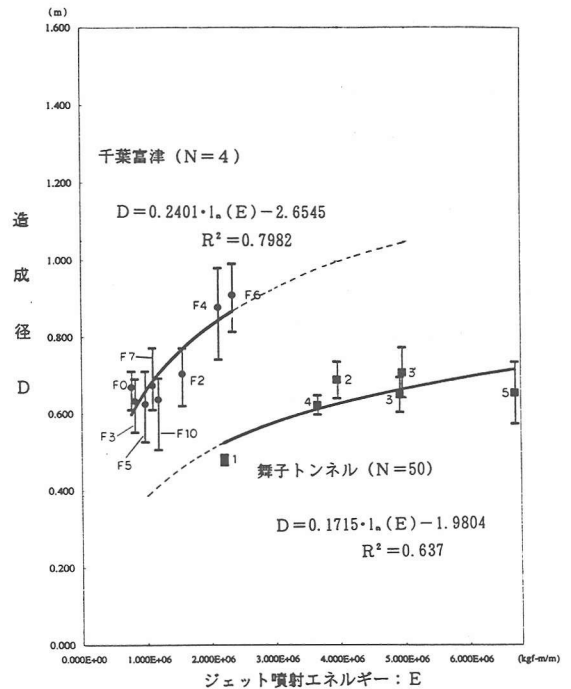


図-7 造成径とジェット噴射エネルギーの関係

式◇より、A（ノズル面積）および ρ （密度）が一定の場合は、E（エネルギー）はP（噴射圧力）およびt（造成時間）に依存していることがわかる。この関係を図-7と合わせて考えてみると、改良体の造成径はE（エネルギー）と相関関係が高いことから、Pまたはtを増加させれば造成径が大きくなると予想される。ただしN値が小さい場合は、Eの増加に対する造成径の増える率は高いが、N値が大きい場合はEの増加に対する造成径の増加は少ない。

図-7中の2つの実験回帰式

$$\begin{cases} N=4 \rightarrow D=0.2401 \cdot I_n(E) - 2.6545 \\ N=50 \rightarrow D=0.1715 \cdot I_n(E) - 1.9804 \end{cases}$$

より $D=D_w$ 、 $E=E_x$ の場合、 N 値に対する造成径の推定式： $D_w = a \cdot I_n(E_x) + b$ を求める。

ここで、傾き a および切片 b は N 値に比例すると仮定する。

傾き： $a = pN + q$ とし、

$(N, a) = (4, 0.2401), (50, 0.1715)$ を代入すると

$$p = \frac{0.1715 - 0.2401}{50 - 4} = -0.001491, \quad q = 0.2461$$

よって、 $a = -0.001491N + 0.2461$ ----- ◆

切片： $b = sN + t$ とし、

$(N, b) = (4, -2.6545), (50, -1.9804)$ を代入すると

$$s = \frac{-1.9804 + 2.6545}{50 - 4} = 0.01465, \quad t = -2.7131$$

よって、 $b = 0.01465N - 2.7131$ ----- ◆

ゆえに式◆、◆より、造成径 D_w の一般式は、

$$D_w = (-0.001491N + 0.2461) I_n(E_x) + (0.01465N - 2.7131) \text{ ----- } \text{◆}$$

で表される。◆式における、 $N=5, 10, 20, 30, 40, 50$ のグラフを図-8に示す。

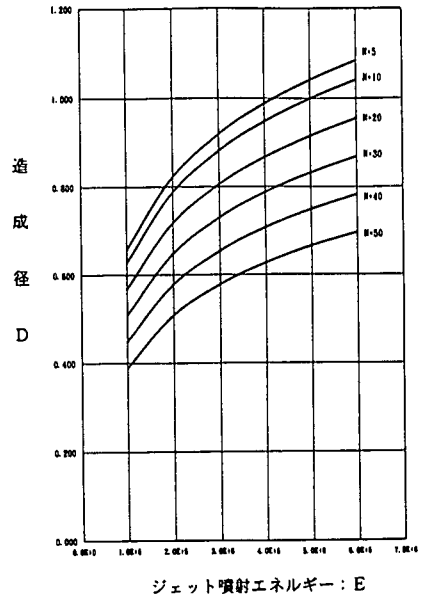


図-8 造成径の推定曲線

5. おわりに

ここに紹介した二回の実験を経て、当工法の実証および全体施工システムの確認ができた。またこれまで実績と経験および試験施工に頼ってきた土質条件に対する造成径の推定に関する一考察を明らかにすることができた。

なお、本年10月に神戸市内の某トンネル坑口部で本施工を行う予定である。今後これらの施工実績を積み重ねることによって、地山に応じた適切な打設ピッチ、噴射圧力、噴射流量、単位造成時間、回転数、二次注入などのデータを取り込み、より合理的、経済的な施工仕様を決定していきたいと考える。将来的には、これからますます重視される環境問題に配慮するため、排泥の完全処理化、再利用化を含めた全体システムの構築を目指していきたいと考えている。

最後に、本実験のご指導を頂いたジェオフロンテ研究会 長友成樹会長、実験場所をご提供頂いた本州四国連絡橋公団・第一建設局舞子工事事務所および松浦企業㈱にお礼申し上げます。

6. 参考文献

- 1) 八尋暉夫・吉田宏・西謙治：ウォータージェットを利用した地下工法，鹿島出版会，1983.
- 2) ジェオフロンテ研究会：トレビ工法技術資料，1994.12