

新しい鋼管補強高圧噴射フォアパイリング の出来形管理の研究

二宮 正¹・松崎 利宜²

¹正会員 工修 (株)大林組 技術開発企画室 企画課 (〒113-0033 東京都文京区本郷二丁目2-9)

²(株)大林組 土木技術本部 技術第二部 技術課 (〒113-0033 東京都文京区本郷二丁目2-9)

いわゆるアンブレラ工法の一つである新しい鋼管補強高圧噴射フォアパイリングについて、施工中に出来形を求める方法を示し、土粒子と硬化材との置換率を排泥比重から求め、造成体の強度と対比した。

Key Words : forepiling, umbrella method, tunnel, jet grouting

1. はじめに

本研究でとりあげた新しい鋼管補強高圧噴射フォアパイリングはいわゆるアンブレラ工法の一つで、トンネル切羽前方の先受けを高圧噴射改良を伴う二重管削孔により実現するものである。その施工手順は図-1に示してある。

このフォアパイリングの施工システムの確認と施工仕様決定のための手法については、実験的研究の結果として、既に報告されている。

しかしフォアパイルの施工中にその出来形を確認することができないため、当初設計の通りの出来形であるかどうかは、フォアパイリング施工後のトンネル掘削中に確認することとなっている。

その結果、実際の施工前に、現場での試験施工によって事前に確認する方法をとらざるを得なくなっている。

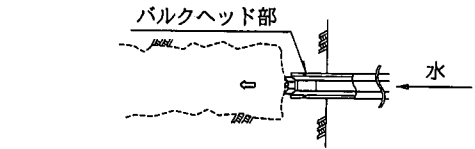
本研究では、物質収支を考慮してフォアパイル造成体の出来形を施工中に確認する方法を求めた。

2. フォアパイル施工中の出来形管理

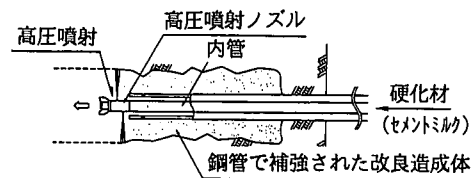
(1)フォアパイル施工中の物質収支

本工法のフォアパイルは高圧噴射によって造成される。

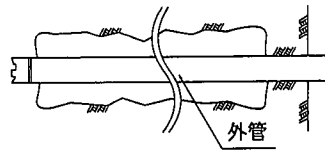
造成外径Dのフォアパイル造成体が造成速度fでt分間造成後につくられた場合、物質収支を考えると以下の式が成立する。ここで V_{air} は造成終了時には土粒子とセメントミルクの混合物によって充填され



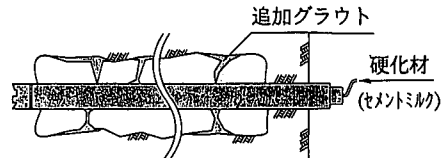
(1)バルクヘッド部削孔



(2)フォアパイル造成



(3)造成終了



(4)追加注入(必要とされる場合)

図-1 施工手順

るものと考えられる。

表-1 舞子トンネル地質工学的物性値

土質分類		細粒分混じり礫
N 値		50
最大粒径		53mm
粒度分布	礫分	55 %
	砂分	35 %
	細粒分	10 %
均等係数		110.0
湿潤密度 (g/cm ³)		2.124

表-2 舞子トンネル現場実証実験条件

No.	1	2	3	4	5	6	7
噴射圧力 (kgf/cm ² (MPa))	200 (19.6)	340 (33.3)	340 (33.3)	340 (33.3)	400 (39.2)	400 (39.2)	100 (9.8)
設定回転数 (r.p.m.)	10	10	10	18	10	10	10

$$Vair = \{(\pi D^2/4) \cdot f \cdot t\} \times n \times (1 - S_r) \quad (1)$$

$$(Q_1 - Q_2) t = Vair \quad (2)$$

$$n = e / (1 + e) \quad (3)$$

ここで、

f : 造成速度, m/min ;

D : 造成体直径, m ;

t : 造成時間, min ;

Q₁ : 硬化材噴射流量, m³/min ;

Q₂ : 排出流量, m³/min ;

Vair : 高圧噴射対象地山中の空気量, m³ ;

e : 間隙比 ;

n : 間隙率 ;

S_r : 飽和度 ;

(2) 舞子トンネル現場実証実験における物質収支

舞子トンネル(南工事)の周辺地山は大阪層群の洪積層で、地質工学的物性値は表-1に示す。実験はトンネル下半切羽で実施し、表-2に示すように噴射圧力、設定回転数および造成速度を変化させて実施した。舞子トンネルでの現場実証実験¹⁾から得られたデータをもとに、理論的なスライム排出流量を計算することができる。

表-3に実証実験のデータを示すが、ここで No. 1 ~ 7 は異なった施工仕様で施工したフォアパイルを示している。

理論的な排出流量 Q₂ は前述の式(1)、式(2)および式(3)から以下のように求めることかできる。

表-3 舞子トンネル現場実証実験データ

No.	1	2	3	4	5	6	7
造成速度: f (m/min)	0.159	0.147	0.109	0.124	0.221	0.128	0.114
造成時間: t (min)	34	34	43	51	29	47	44
平均造成径: D (m)	0.480	0.688	0.650	0.705	0.616	0.654	0.599
硬化材噴射流量: Q ₁ (m ³ /min)	0.085	0.116	0.113	0.118	0.099	0.101	0.089
排出流量(理論): Q ₂ (m ³ /min)	0.083	0.112	0.110	0.115	0.094	0.098	0.087
排出流量(実測): Q ₂ ' (m ³ /min)	0.051	0.063	0.067	0.063	0.061	0.057	0.067
E _D	0.615	0.562	0.607	0.550	0.646	0.582	0.749

$$Q_2 = Q_1 - \frac{\pi D^2}{4} f e \frac{(1 - S_r)}{(1 + e)} \quad (4)$$

このとき、土の乾燥密度 $\gamma_d : 1.901(t/m^3)$
 間隙比 $e : 0.413$
 含水比 $w : 0.117$
 土粒子の比重 $G_s : 2.69$
 飽和度 $S_r : 0.761$

なお、式(4)を用いて算出した排出流量 Q₂ の値、実際に測定した排出流量 Q₂' の値および排泥効率 E_D (= Q₂' / Q₂) の値も表-3に示している。

造成中の排出がもれなく測定される理想的な場合、E_D は 1 となるが、前述の結果では 0.55 ~ 0.75 の値となっている。

E_D の値は、地山の性状による影響や噴射圧力、回転数および造成速度の影響を受けることが推定され、以下のことがいえる。

- 噴射圧力の変化による影響については、No. 1, 3, 6, 7 のデータより、E_D と噴射圧力との間に負の相関がみられる。
- 回転数の変化による影響については、No. 3, 4 のデータより、回転数の大きい方が E_D が低くなっている。
- 造成速度の変化による影響については No. 2, 3 および No. 5, 6 では傾向が逆になっており、このデータだけでは判断できない。

ここで、造成体単位長さ当たりの噴射エネルギーを考える。噴射エネルギー E は式(5)で示される¹⁾

$$E = AC^3 t (2 P^3 g / \rho)^{1/2} \quad (5)$$

ここで、

E : 造成体単位長さ当たり噴射エネルギー, kgf·m/m (9.807 J/m) ;

表-4 造成体単位長さ当たり噴射エネルギー

No.	1	2	3	4	5	6	7
P (kgf/m)	2×10^6	3.4×10^6	3.4×10^6	3.4×10^6	4×10^6	4×10^6	1×10^6
t (sec/m)	377	408	550	484	271	469	526
E (kgf·m)	9.20×10^6	2.21×10^6	2.98×10^6	2.62×10^6	1.87×10^6	3.24×10^6	4.54×10^6

A : 噴射ノズル断面積, m^2 ;
 C : 流速係数 (= 1) ;
 P : 噴射圧力, kgf/m^2 (9.8Pa) ;
 g : 重力加速度 (=9.8) , m/sec^2 ;
 ρ : 硬化材 (セメントミルク) 密度 ; kg/m^3 ;

式 (5) に No. 1~7 のデータと以下の条件を代入して、各々の場合のEを求める。(表-4)

$$A = 7.60 \times 10^{-6} m^2$$

$$C = 1$$

$$g = 9.8 m/sec^2$$

$$\rho = 1520 kg/m^3$$

ここで、 E_D とEの相関関係を求めると

$$E_D = -5 \times 10^{-8} E + 0.7139 \quad (6)$$

ただし R(相関係数)=0.743

となり、N値が 50 の舞子トンネルの地山条件においては、式 (6) で造成体単位長さ当たりの噴射エネルギーから本工法における排泥効率を求めることが可能となる。

(3)土粒子と硬化材の置換率とスライム比重

本工法においては、地山内の土粒子が硬化材によって攪拌置換され、スライムとなって排出される。

このためスライムの比重は、取り込まれる土粒子の量によって変化してくる。

(2) 節に示した本工法の物質収支に関連して、以下の式を得ることができる。

$$V_{ws} = w G_s V_{ss} \quad (7)$$

ここで、

表-5 G, G_m , V_{ss} , V_s およびS

No.	1	2	3	4	5	6	7
G	1.72	1.66	1.73	1.71	1.80	1.69	1.76
G_m	1.52	同左	同左	同左	同左	同左	同左
V_{ss} (m^3)	0.56	0.53	0.99	1.11	0.76	0.82	0.91
V_s (m^3)	0.69	1.30	1.10	1.56	1.35	1.43	1.00
S	0.81	0.41	0.90	0.71	0.56	0.57	0.91

V_{ss} : 置換された土粒子の体積
 V_{ws} : 置換された土中水の体積
 w : 置換された土の含水比
 G_s : 置換された土粒子の比重

$$G = \frac{G_m V_m + G_s V_{ss} + V_{ws}}{V_m + V_{ss} + V_{ws}} \quad (8)$$

ここで、

V_m : 排出スライム中の硬化材量
 G_m : 硬化材の比重
 G : 排出スライムの比重

さらに、スライム排出量 $Q_2 \cdot t$ は以下のように示される。

$$Q_2 \cdot t = V_m + V_{ss} + V_{ws} \quad (9)$$

V_{ss} は式 (7) , 式 (8) および式 (9) より、

$$V_{ss} = \frac{(G - G_m) Q_2 \cdot t}{\{G_s(1+w) - G_m(1+wG_s)\}} \quad (10)$$

として示される。

一方、造成前の計画対象地山の土粒子体積 V_s は、

$$V_s = \pi D^2 / 4 \cdot f \cdot t \cdot 1 / (1+e) \quad (11)$$

で示され、土粒子の置換率を

$$S = V_{ss} / V_s \quad (12)$$

と表現する。

舞子トンネルでの実証実験データから式 (10) を用いて求めた V_{ss} とその時のGおよび G_m の値および式 (11) , 式 (12) より求めた V_s とSの値を表-5に示す。

表-6 実証実験のフォアパイル造成体出来形

No.	平均造成径 (m)	平均一軸圧縮強度 (kgf/cm ² (MPa))	注
1	0.480	137.3 (13.5)	
2	0.688	97.7 (9.6)	
3	0.650	230.0 (22.6)	
4	0.705	170.0 (16.7)	
5	0.616	124.8 (12.2)	追加注入
6	0.654	134.5 (13.2)	
7	0.599	202.3 (19.8)	追加注入

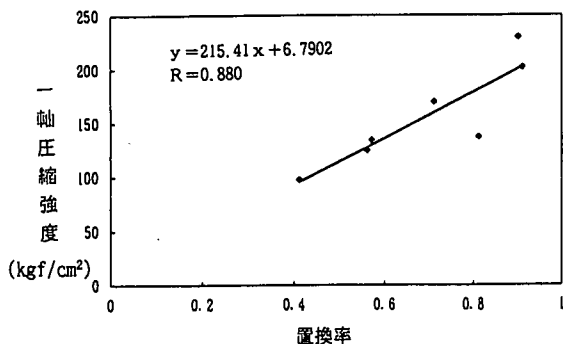


図-2 フォアパイル造成体の一軸圧縮強度と置換率Sの関係

また、フォアパイル造成体の出来形に関する実証実験の結果を表-6に示すが、フォアパイル造成体の造成径と置換率Sとの間には顕著な関係は見い出せない。

しかし、フォアパイル造成体の一軸圧縮強度に関しては、置換率Sが著しく低下すると強度発現がかなり悪くなることがわかる。(図-2)

なお、噴射量に比べて、追加注入量は0.3~0.5m³と少量のものであり、追加注入が出来形に与える影響はないと考えている。

(4)出来形管理のまとめ

本工法の施工仕様については、一定の地山条件下において決定できることは既に二宮等によって報告されている¹⁾。

ここでは、フォアパイル造成径Dが理論的に計算されるスライム排出流量Q₂から求められることを示し、排出効率E_Dが既知であれば、図-3に示す計算フローでQ₂'からDが求められることを示した。

舞子トンネルの地山条件においては、式(6)でE_Dとの相関がある程度認められることから、他の地

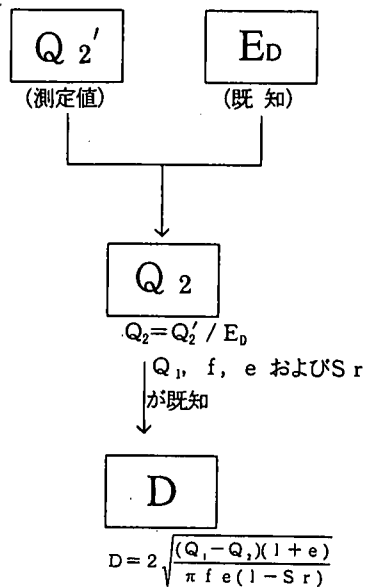


図-3 計算フロー

山条件の適用においては、確認施工でE_DとEの関係を求めることにより、施工時にQ₂'を測定することでフォアパイル造成径の出来形管理が可能になり得るものと考えられる。

さらに、施工中のスライム比重Gを測定することにより土粒子の置換率を求める方法を示し、置換率とフォアパイル造成体の一軸圧縮強度との間に正の相関関係があることがわかった。

3. 結論

本研究において、本フォアパイリングについて以下の事項を明らかにすることができた。

- 造成体の出来形(直径)をスライムの排出量を測定することにより推定する方法を提案し、舞子トンネルの地山において実証実験を行い、造成径の出来形管理方法として適用可能であることを明らかにした。
- 施工中のスライム比重を測定することによって土粒子の置換率を求める方法を提案し、この置換率とフォアパイル造成体の一軸圧縮強度との正の相関関係からスライム比重を測定することにより、フォアパイル造成体の一軸圧縮強度が推定できることを明らかにした。

謝辞:本研究を遂行するにあたり,終始懇切なるご指導を賜ったジェオフロンテ研究会 長友 成樹会長に深甚なる謝意を表します。また,本研究の方向や将来展望について絶えず有益なご助言をいただいた京都大学大学院 花崎 紘一教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1)二宮 正, 守屋 洋一, 中原 徹, 高田 徹:新しい鋼管補強高圧噴射フォアパイリングの実証実験, 土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集, vol. 5, pp.285-290, 1995.

(1997. 7. 8 受付)

A STUDY ON THE DIMENSION CONTROL FOR A NEW JET GROUT FOREPILING

Tadashi NINOMIYA and Toshinobu MATSUZAKI

Concerning a new jet grout forepiling, the authors describe that the dimension of it can be obtained while driving; and assume that the replacing rate of soil particles with hardener obtained by measuring the specific gravity of the discharge slime influence on the strength of the forepile.