

営業活線下を横断する下水管渠築造における パイプルーフ併用工法の設計と施工

Design and Construction of a Sewerage Tunnel under
the Railways using Pipe Roof Method

下田 秋雄*
Akio Shimoda

河原 忠**
Tadashi Kawahara

大西 徳治***
Noriharu Onishi

後藤 裕明****
Hiroaki Goto

要 約

横浜市下水道局委託 JR 東日本旅客鉄道株式会社発注の栄第 2 下水処理場内管渠築造工事のうち、JR 活線下横断部工事における施工法を検討した。

管渠築造工法の検討にあたり、掘進地盤の高含水腐植土層を含む軟弱地盤を対象に試験注入を行い、薬液注入の効果の把握と軌道への影響の把握を行った。

試験注入結果から、薬液注入の改良範囲を限定することにより、改良強度を確保するとともに、軌道隆起の低減を図る対策工の必要性が明らかとなり、管渠築造の施工法に、パイプルーフ併用の薬液注入を補助工法とする山岳トンネル工法を選定した。

本報文で、この検討経過とパイプルーフ工の実績について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 概要
- § 3. 施工法の検討
- § 4. 設計
- § 5. パイプルーフ工
- § 6. あとがき

§ 1. はじめに

当該工事は、JR 営業活線下に仕上り内径 $\phi 3000$ mm の下水管渠を築造するもので、原計画の施工法は、「薬液注入による門型断面改良 (改良強度 $C_u = 5 \text{ tf/m}^2$ (49 kN/m²)) 併用の泥土圧推進工法」であった。

しかし、当該地盤は高含水比の腐植土を含む軟弱地盤であり、原計画での薬液注入工法による地盤改良では改良強度不足と地盤の変状が懸念された。そこで、試験注入を実施し、その結果を踏まえて原計画を見直すとともに、最適工法の検討を行った。以下、工法検討の経過とパイプルーフ工の施工実績を述べる。

§ 2. 概要

2-1 工事概要

工事名 戸塚・大船間 43K030M 付近下水管理設工事
発注者 JR 東日本旅客鉄道株式会社
工 期 自 平成 2 年 3 月 28 日
至 平成 4 年 2 月 29 日

工事内容 主要工事数量を Table 1 に示す。

平面図および縦断図を Fig. 1 に示し、管渠断面図を Fig. 2 に示す。

*横浜(支)JR 戸塚(出)副所長

**横浜(支)JR 戸塚(出)

***土木設計部設計課

****土木設計部設計課副課長

Table 1 主要工事数量一覧

工種	仕様	単位	数量
パイプルーフ工	鋼管推進工	アースパイロット工法	m L=1,488.0
	鋼管	φ355.6mm L=4.5m L=6.0m	本 32.0 本 224.0
	壊充モルタル	発泡モルタル	m ³ 132.5
	地盤改良工	薬液注入 (水平) 溶液20% 懸濁10%	kg 159.0
掘削・覆工	掘削工	掘削断面 A=11.8m ²	m L=45.1
	機械掘削	支保工 H-150×150×6×8	基 51.0
	二次覆工	巻厚 t=433mm	m L=45.7
	地盤改良工	鉄筋工 ソレタンス注入 (水平)	t 21.2 kg 138.5
付帯工	列車防護工	列車停止装置	式 1.0
		列車接近装置	式 1.0
		沈下計	箇所 12.0
		傾斜計	箇所 4.0

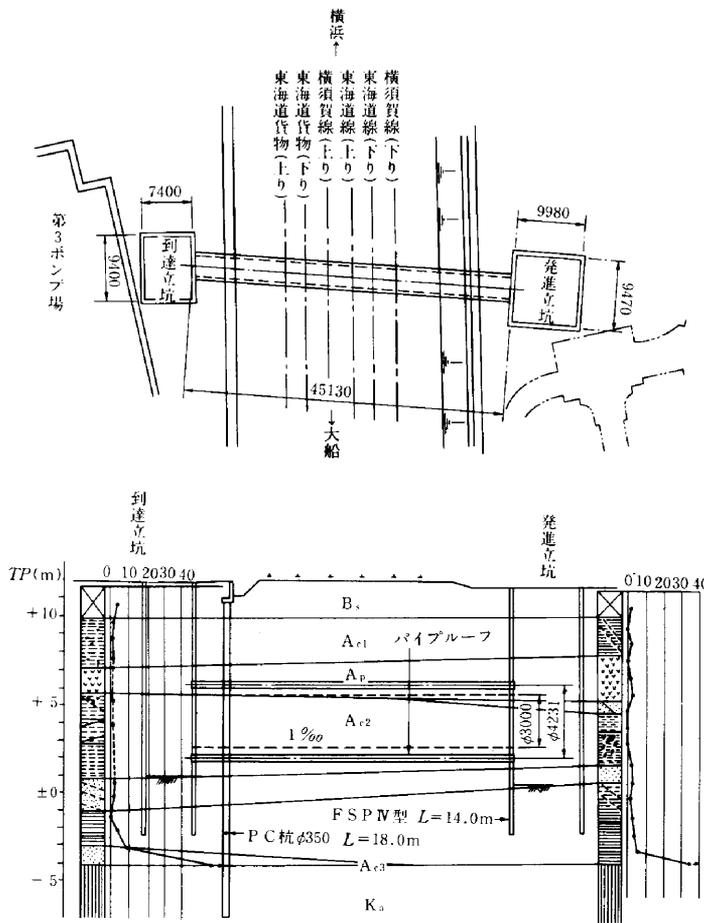


Fig.1 平面図, 縦断面図

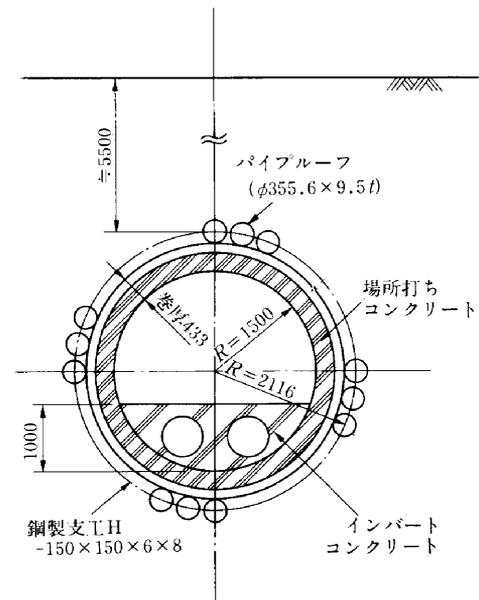


Fig.2 管渠断面図

2-2 土質概要

管渠横断面部の地層は、埋土層(B_s)、沖積第1粘性土層(A_{c1})、腐植土層(A_p)、沖積第2粘性土層(A_{c2})から成る (Fig. 1)。埋土層は層厚1.5~2.0mで、ローム、礫、ガラおよびシルト岩片の混入する粘土であり、沖積第1粘性土層は層厚1.2~2.2mで、木片、細砂および腐植物の混入の富む砂質粘土および砂混り粘土である。また、腐植土層は層厚1.5~1.9mで、含水比が200~400%以上の未分解の植物繊維を多く含み、部分的に粘土化あるいは、砂分の含有量が多く透水性が良い極めて軟弱な腐植土である。さらに、沖積第2粘性土層は層厚1.5m程度で、シルト質粘土から成り、上部は腐植物が混入する腐植土質粘土である。

掘削対象となる地質の土質試験の結果を Table 2 に示す。

§ 3. 施工法の検討

3-1 薬液注入工の適用について

(1) 試験注入工

1) 目的および試験方法

当該高含水比の腐植土と下部粘性土を対象に、注入材と注入率の違いによる改良強度ならびに地盤変状との相関関係を把握することを目的として、発進立坑位置で試験注入を実施した。試験位置と改良範囲および、注入時のレベル測定点を Fig. 3 に示す。

2) 試験結果

① 強度増加

効果確認のため注入後に土質試験を行った。試験結果を Table 3 に示す。

改良強度は、腐植土ではCASE-4（溶液・複合：注入率30%）が最も高くなったが、その値は $C_u = 4 \text{ tf/m}^2$ (39 kN/m²) と原計画の必要改良強度 $C_u = 5 \text{ tf/m}^2$ (49 kN/m²) を満足できないこととなった。

Table 2 土質試験結果

			腐植土	沖積粘性土
粒度組成	砂分	%	2~37	1~50
	シルト分	%	28~48	27~59
	粘土分	%	31~54	22~48
特性 システ ンシー	液性限界 (LL)	%	216~349	69~100
	塑性限界 (PL)	%	136~221	32~60
	塑性指数 (IP)	%	72~140	26~44
自然状態	含水比 (W)	%	226~430	70~111
	湿潤単位体積 重量 (γ_t)	tf/m ³	1.06~1.2	1.31~1.58
透水係数 (k)		cm/s	(1.08~1.09) $\times 10^{-5}$	—
粘着力 ($C_u = \frac{1}{2} q_u$)		tf/m ²	1.2~2.1	1.2~2.4

粘性土では試料の成形やサンプリングが出来ず、改良強度の把握ができなかった。これは、粘性土ということで注入材を懸濁・瞬結としたが、今回のボーリング試料をみると、貝殻片を多く含んでおり、十分に浸透しなかったためと考えられ、実施にあたっては浸透性の高い溶液型の複合注入が好ましいと判断した。

② 地盤変状測定結果

注入による地盤変状は、注入中に継続的に地盤隆起が発生するが、中断することによりその数10%が元に戻るという現象がみられた。この現象に着目し、注入による絶対隆起量（隆起量の総計）と注入完了後の純隆起量（隆

Table 3 注入後土質試験結果

対象土	CASE	注入材		注入率	透水係数 $k(\text{cm/s})$	含水比 (%)	湿潤単位 体積重量 (tf/m^3)	粘着力 (tf/m^2)
		種別	タイプ					
腐植土 (A _p)	1	溶液	瞬結	30	1.87×10^{-5}	258	1.11	3.3
	2	懸濁	瞬結	20	1.42×10^{-5}	316	1.09	2.9
	3	懸濁	瞬結	30	1.44×10^{-5}	—	—	—
	4	溶液	複合	30	1.40×10^{-5}	311	1.10	4.0
	5	溶液	複合	20	1.31×10^{-5}	281	1.07	3.5
	6	溶液	瞬結	20	1.38×10^{-5}	299	1.08	3.2
下部粘性土 (A _{c2})	7	懸濁	瞬結	20	—	57.3	1.54	—
	8	懸濁	瞬結	30	—	—	—	—

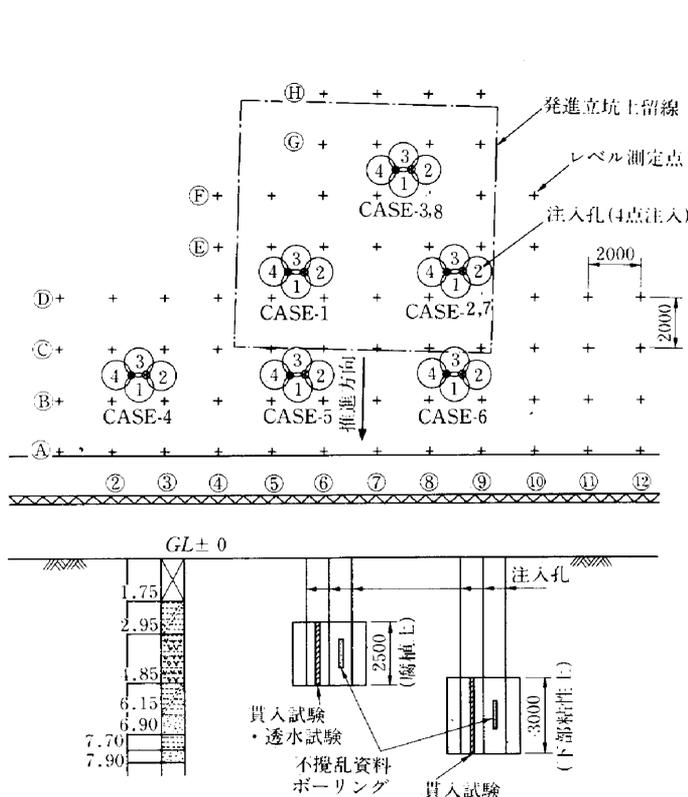


Fig.3 注入試験位置図およびレベル測定点

試験注入ケース

CASE	注入材		注入率 (%)	対象土
	種別	タイプ		
1	溶液	瞬結	30	腐植土 (A _p)
2	懸濁	瞬結	20	
3	懸濁	瞬結	30	
4	溶液	複合	30	
5	溶液	複合	20	
6	溶液	瞬結	20	
7	懸濁	瞬結	20	下部粘性土 (A _{c2})
8	懸濁	瞬結	30	

試験実施日

試験日	CASE
1	2,7,5
2	6, 8
3	3
4	1
5	4

- ：貫入試験・透水試験（上部腐植土）
- ：不攪乱資料ボーリング

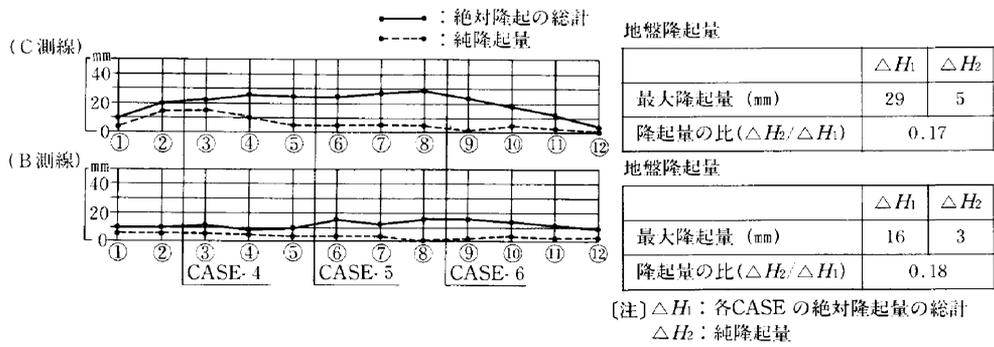


Fig.4 地盤隆起変状 (溶液型の複合法が主体の箇所)

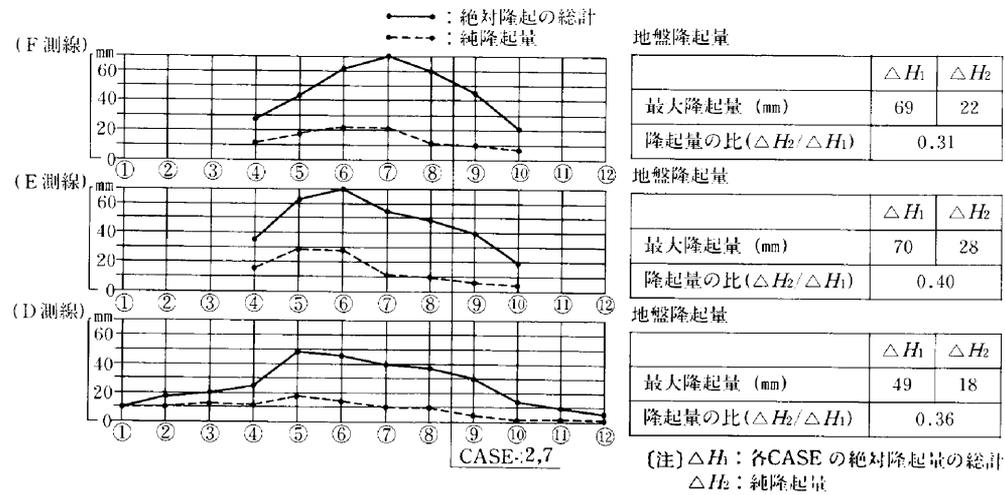


Fig.5 地盤隆起変状 (懸濁型の瞬結工法が主体の箇所)

起量の総計-戻り量の総計) の関係をまとめ、Fig. 4, 5に示す。また、注入材の種別および注入タイプと地盤変状の影響範囲との関係を、Fig. 6に示す。

これらより、以下のことが明らかとなった。

- ① Fig. 4, 5より、溶液型複合法と懸濁型瞬結工法の隆起量の残留率 (純隆起量の絶対隆起量に対する割合) を比べると、前者で約20%、後者で約40%となり、前者の方が地盤に与える影響が少ない。
- ② Fig. 6より、純隆起量が最も小さいのは、溶液型複合法である。なお、各工法とも地表面での、最大隆起はほぼ注入部の直上で発生し、影響範囲もほぼ仰角30°~40°である。

(2) 最適工法の選定

試験注入結果から、当該地盤に対して薬液注入工法のみでは、目的である地盤強化を満足できない。また、試験注入は鉛直注入であり、実施工の水平注入と地盤変状の関係に単純に当てはめられないが、注入工法による軌道への影響は大きいと推定できる。

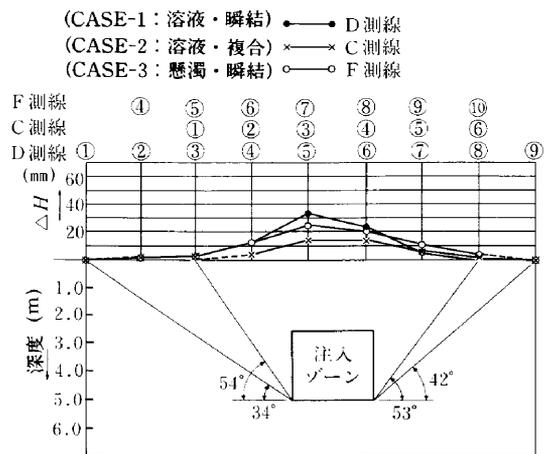


Fig.6 注入による影響範囲

以上より、トンネル築造を行うにあたって、改良強度および地盤変状の防止対策として薬液注入だけでは対処できないことから、パイプルーフを併用することとした。補助工法としてパイプルーフを併用することにより、原

設計の泥土圧推進を見直し、パイプルーフの形状と掘削方法の組合せについて3工法の比較検討を行った。検討の結果、軌道への影響を最小限とすることを考え、パイプルーフ併用(円形)山岳トンネル工法を最適工法として選定した。比較検討の内容をTable 4に示す。

3-2 パイプルーフ推進工法の選定

パイプルーフ施工法の選定に当たって、①パイプルーフの閉合および本体の二次ライニング巻厚を得るための高い推進精度の確保、②限られたスペースの立坑内での施工、の2点に留意し、小口径推進工法を採用することとした。

推進工法を比較検討した結果、埋れ木等の障害物に対する施工と方向修正が可能なおガー工法の中のアースパイロット工法を選定した。なお、推進精度を100mm以内として鋼管打設位置を決定した。

§4. 設計

4-1 パイプルーフ鋼管の設計

パイプルーフ鋼管部材の設計は、掘削～支保工設置を繰り返す施工状況を反映した逐次解析プログラムを用いた。第n次掘削時の解析モデルをFig. 7に示す。

なお、リング支保工は、部材をH-150×150×6×8(SS400)、ピッチを90cmに配置する。この時、鉛直荷重は列車荷重を含む全土被り荷重とし、水平荷重は側圧係数を $K_a=0.7$ とした。

鋼管は、径を大きくし、本数を減じた方が経済的であるが、薬液注入による止水が完全でない場合を考え、推進時の鋼管切羽からの湧水を極力小さくし、軌道への影響を防止するため、鋼管径は応力から決まる最小径である $\phi 355.6 \times 9.5t$ (SKK490)とした。また、トンネル

Table 4 工法比較表

	パイプルーフ併用(箱型)推進工法	パイプルーフ併用(円形)トンネル工法	パイプルーフ併用(門型)推進工法
概念図			
特徴	施工性	●パイプルーフの閉合が難しく、パイプルーフのジョイントに工夫が必要となる。 ●施工精度を向上させるための工夫及び閉合させる工夫が必要となる。	●パイプルーフの本数も少なく、形状も門型であり閉合の必要がないため、施工性に優れている。
	止水性	●完全閉合であるため地盤の均一な注入が可能、止水性に優れている。	●上半部の薬液注入効果はある程度期待できるが、下半部の注入については拘束ができないため信頼性に欠ける。
	軌道への影響	●裏込め注入が推進完了後となるため、軌道への影響把握が難しい。 ●緊急時の対応が困難である。	●リング支保工によりパイプルーフを直接支持することで、軌道への影響把握ができる。 ●緊急時の対応が容易である。
概算工費	高	安	中
概算工期	450日	430日	380日
総合評価	△	○	×
備考	●3mクラスの土圧式推進機は市場性に乏しい		●3mクラスの土圧式推進機は市場性に乏しい

掘削時のパイプルーフ間からの湧水を防止するため、継手付鋼管を採用した。継手の形状は、止水性・強度並びに経済性の面からダブルアングル方式とした (Fig. 8)。

4-2 地盤改良の設計

(1) パイプルーフ推進時の地盤改良

推進時の鋼管切羽面からの湧水防止と、切羽地山の安定確保を目的とした地盤改良の設計を行った。掘削に伴う切羽の安定検討には村山の式²⁾を用いた。試験注入結果から、注入工法は複合注入 (注入率30%) で、改良強度は粘着力 $C_u = 3 \text{ tf/m}^2$ (29 kN/m^2) として計算した結果、改良範囲は鋼管芯から50cm必要となった。なお、注入時は、地盤変状計測を行い、変状が大きい場合には無理な注入を行わないこととした。

(2) トンネル掘削時の地盤改良

トンネル掘削時のパイプルーフに囲まれた切羽の安定を円弧すべりモデルで検討した結果、安全率 $F_s = 1.0$ を得るには改良強度 $C_u = 6 \text{ tf/m}^2$ (59 kN/m^2) が必要となった。したがって、注入工法は高い改良強度が期待でき、地盤変状を極力おさえるための繰り返し注入が可能な2重管ダブルパッカー工法によるものとした。

地盤改良断面図を Fig. 9 に示す。

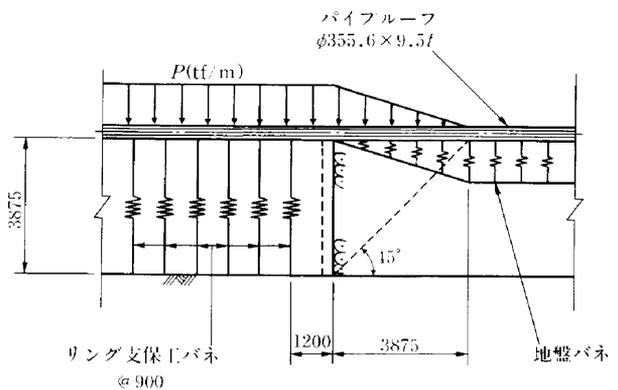


Fig.7 第n次掘削時の解析モデル図

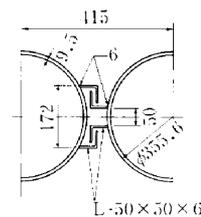


Fig.8 パイプルーフ継手詳細図

§ 5 . パイプルーフ工

5-1 障害物撤去

到達立坑側に JR 軌道盛土の土留め擁壁があり、その基礎 (PC 杭) が推進に支障となることから撤去を事前に行った。PC 杭が継杭のため、引抜きにより継手部で外れる恐れがあることから、地上より大口径ボーリングマシン (BG-7) により破碎した。

5-2 薬液注入の施工

鋼管推進前に薬液注入を、発進・到達両立坑から水平に施工した。ただし、施工は夜間の軌道管理が非常に危険を伴うことから、昼間のみとした。

注入による軌道への影響を監視するため、Fig. 10 に示すように、自動沈下計測器による路盤計測と電子レベルによるレール計測を行った。管理基準として、軌道の変状が4mmになった時点で軌道管理者による点検を行い、7mmで注入作業を中止し軌道管理者の指示のもとで軌道補修を行い、安全を確認した後注入作業を再開することとした。なお、測定の初期値は軌道補修後の測定値とした。

軌道の変状は注入によって隆起し、夜間休止の間に4~7mm程度沈下する傾向があり、隆起は純隆起量で最大43mm発生した。

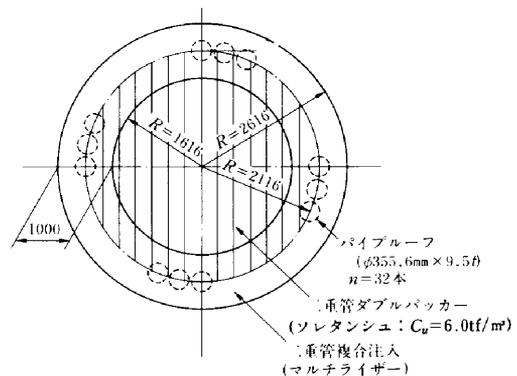


Fig.9 地盤改良断面図

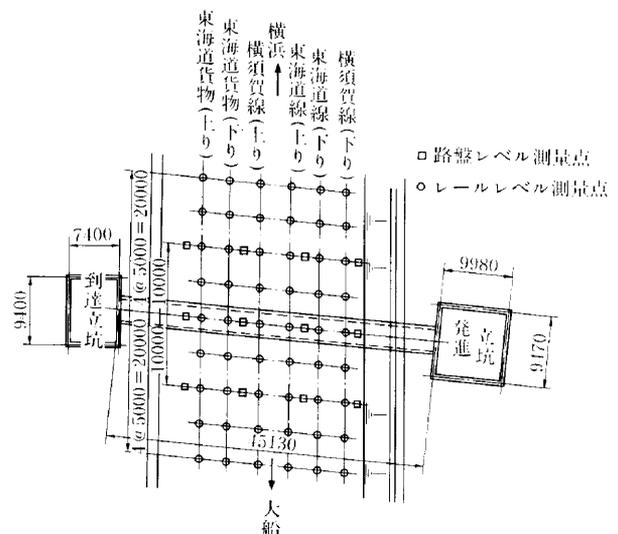


Fig.10 レベル計測平面図

5-3 パイプルーフ推進工

(1) 発進架台および推進機据付け

パイプルーフ設置形状が円形であることから、推進機が縦横に移動可能な吊り構造の昇降架台を設置した。

昇降架台に H 鋼 (H-300×300) を推進勾配に合わせて敷き、その上に推進架台をセットし、推進機を H 鋼に固定した (Photo 1)。

(2) 発進・到達坑口コア抜き

発進・到達両坑口部は、高圧噴射注入工法 (JSG, CJG) で坑口防護が施工しており、改良強度が高く推進機による削孔が困難であるため、推進前に鋼管位置に合わせてコアボーリング (径 $\phi 400$ mm) を実施した。

(3) 鋼管の推進

推進中の推進機位置の確認は、カッター軸芯に装備した二重ターゲットを、後方よりトランシットで常時計測し、遠隔操作により適宜掘進方向を修正した。

鋼管は、6 m 管 7 本と 4.5 m 管 1 本の構成とし、先頭管に 6 m と 4.5 m の管を交互に使うことにより隣の管との接続位置が千鳥位置となるようにした。

接続は交流アーク溶接による突き合せ溶接で、2 層仕上げとした。溶接部の検査は、カラーチェック方式で実施した。

(4) 基準管の推進

継手付鋼管を使用することから、施工精度は基準管で決定される。このため、Fig. 11 に示す上部と左右部の 3 箇所の基準管を一般鋼管に先立ち推進し、全体の閉合誤差の低減を図ることとした。

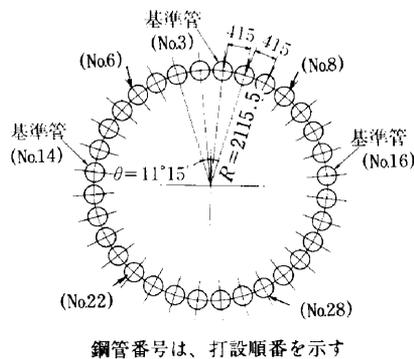
(5) 掘進中の支障物対策

上半部鋼管推進時に埋れ木、松杭等の障害物が隣の管とカッターヘッドの管に挟まり、継手が外れる現象が発生したため、カッターヘッドの引抜きが可能のように、鋼管径よりも小さい径の特殊カッターヘッドを製作し用いた (Photo 2)。

鋼管 No. 8 を推進中に障害物により回転不能となったため、到達立坑より探査ボーリングを行った結果、RC 杭 2 本を新たに確認した。このため、推進に支障となる上下 2 ヶ所に到達立坑から、パイプルーフの止水注入に加え補足注入を施した上で、刃口推進 (鋼管 $\phi 900$ mm) を行い、RC 杭をピックで壊して撤去した。鋼管は急結モルタルを充填しながら引抜いた。

(6) 推進施工実績

パイプルーフ一箇所当りの施工は、埋れ木、松杭および RC 杭等による障害もあったが、平均すると全長 46.5 m を 3 日で推進した。施工精度については、Fig. 12 に示すように、全て許容誤差 (100 mm) 以内に入り、アース



鋼管番号は、打設順番を示す
Fig. 11 パイプルーフ打設断面図

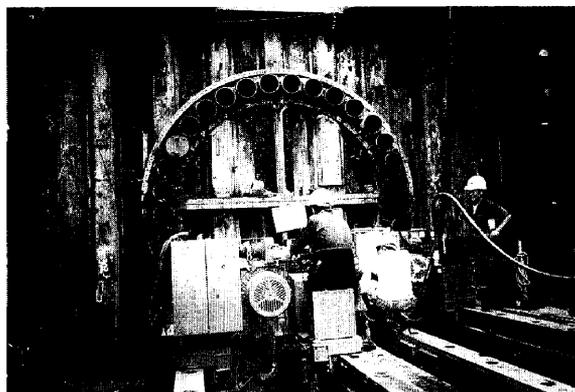


Photo 1 コンクリート打設状況



Photo 2 完成全景

パイロット工法を選定した目的を満足するものであった。

また、推進にあたり、推力軽減のため鋼管の外面に $\phi 16$ mm のパイプを配置し、滑材を切羽部に注入したが、

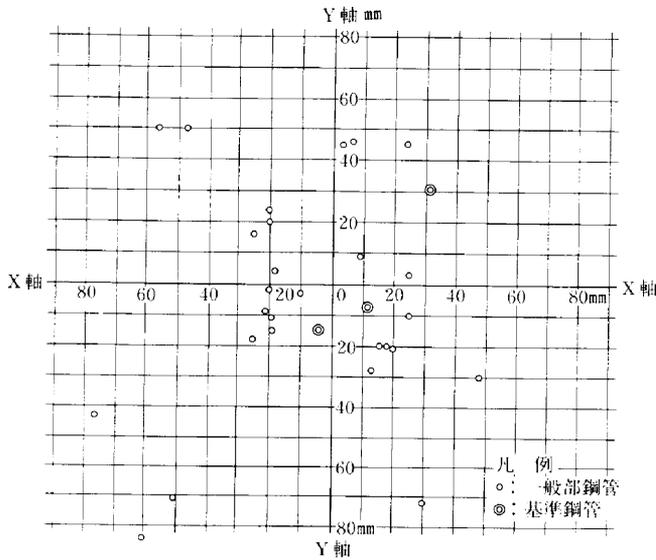


Fig.12 パイプルーフ施工精度
(到達部における施工誤差)

腐植土層においては、鋼管接続時（推進停止中）の鋼管周辺部での圧密、および土中の繊維質等による抵抗は予想以上に大きく、鋼管接続直後の推力は、設計推力60tf (588kN) に対して最大120~150tf (118~1471kN) の推力を要した (Fig. 13)。

§6. あとがき

当該工事は平成4年2月現在、トンネル内掘削が完了した段階である。これまで薬液注入に伴う軌道の変状は発生したものの、列車徐行運転を行うことがない程度で施工できたことは、パイプルーフ併用工法を選定した目的を十分に達成できたといえる。

今後、腐植土および極めて軟弱な粘性土などを対象に、薬液注入を適用する場合、今回のような試験注入を踏ま

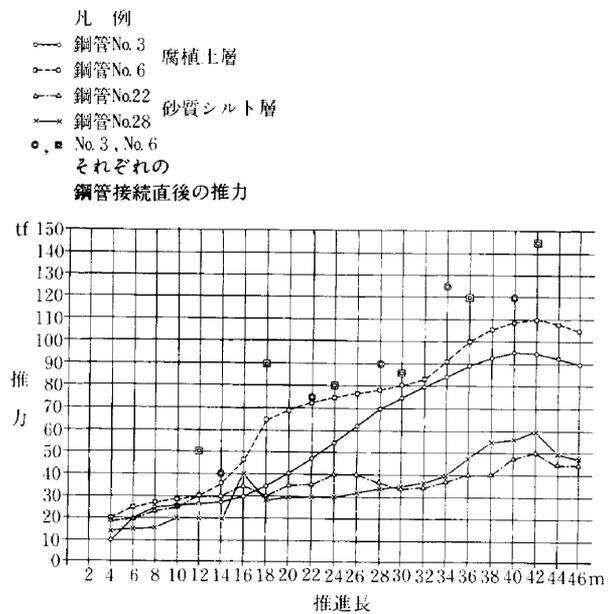


Fig.13 推進長と推力の関係

え十分な検討が必要であるといえる。

また、パイプルーフの円形施工では、鋼管の数が多くなるに従い完全な閉合が難しくなるため、継手構造や目的に応じた施工誤差の設定に留意する必要がある。

最後に、本工事の施工にあたり、御指導を頂いた委託者の横浜市下水道局、発注者のJR東日本旅客鉄道株式会社関係者各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 例えば、福田秀夫ほか：現場技術者のための都市土木、鹿島出版会、pp.151~153、1972。
- 2) 中本至：最新の推進工法のすべて、理工図書、1986。