

幹線国道直下における国内最長150m 門型パイプルーフ工による道路立体交差化

島田哲博¹・山本鉄二¹・山田淳一²・田中啓之²

¹国土交通省近畿地方整備局京都国道事務所南丹国道出張所
(〒601-8304 京都市南区吉祥院前河原町32)

²正会員 鹿島・鴻池特定建設工事共同企業体 (〒615-8085 京都市西京区桂千代原町65)

国道9号の立体交差事業として進められている9号京都西立体千代原トンネル本体工事において、交通渋滞が激しい交差点部では地上の道路交通へ影響を与えないことが施工条件として求められ、パイプルーフを用いた非開削工法を採用している。本工事における非開削施工によるトンネル延長は150mであり、パイプルーフ工法としては国内最長のものである。本稿では、幹線国道直下・長距離・低土被り・玉石砂礫地盤・地下埋設物近接・地中障害物残置という厳しい条件下におけるパイプルーフ工の概要、施工計画上の工夫点、施工実績等について報告する。

キーワード： 地下道路トンネル，交差点立体交差化，非開削工法，
パイプルーフ工，長距離，地中障害物，エアモルタル

1. はじめに

国道9号は京都市内中心部から京都府北西部へと続く道路として重要な役割を担うものである。しかし、近年の交通量の増大により渋滞が発生するなど、幹線道路としての機能低下が生じている。この交通渋滞の緩和と沿道環境の改善等を図るため、「9号京都西立体交差事業」が進められている(図-1)。

本工事は、延長1.0kmの立体交差化工事のうち千代原口交差点を中心とした延長370mの区間に地下構造の道路トンネルを構築するものである。特に交通渋滞が激しい千代原口交差点付近では、地上の道路交通へ影響を与えないことが施工条件として求められた。このような条件を満足するために、パイプルーフによる非開削工法が採用されている。本工事におけるパイプルーフ工法は延長150mであり、国内最長となる。^{1), 2)}



図-1 完成イメージ

2. 工事概要

(1)全体工事概要

工事名：9号京都西立体千代原トンネル本体工事
発注者：国土交通省近畿地方整備局
施工者：鹿島・鴻池特定建設工事共同企業体
工事場所：京都市西京区上桂三ノ宮町
～御陵塚ノ越町地先
工期：平成18年3月15日～平成21年2月28日
工事内容：

ボックスカルバート工 L=370m
非開削部(パイプルーフ工法) L=150m
開削部(全面路面覆工) L=220m

表-1 主要工種数量

工種	仕様	概算数量
パイプルーフ工	φ812.8mm L=150m	27スパン
	φ1,016mm L=150m	9スパン
パイプルーフ支保工		2,400t
掘削工	開削部	35,000m ³
	非開削部	23,000m ³
コンクリート工		21,000m ³
千代原川付替工	プレキャストボックス	55m
路面覆工		4,000m ²
地下水低下工	ディープウェル工	9本
底版改良工	薬液注入工	一式

(2) 開削部

土留め壁（SMW工）造成後、道路面に覆工板を設置し、土留め支保工を架設しながら、掘削を行った後、道路構造物を構築する（図-2）。工事に伴って地上部に建設用機械や資材を配置する必要があるため、道路上に作業帯（夜間は作業帯を拡幅）を設ける。

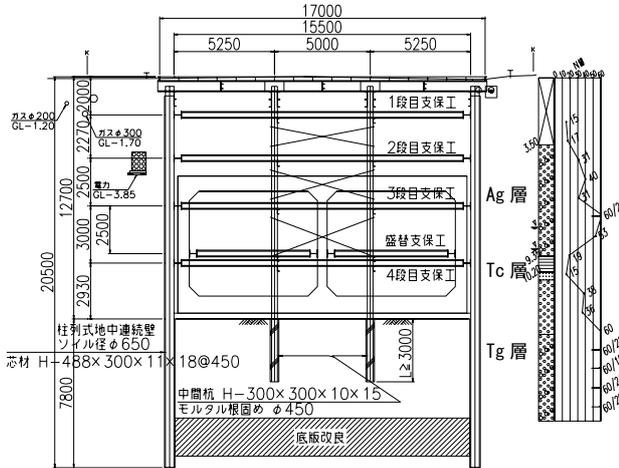


図-2 開削部断面図

(3) 非開削部

発進立坑と到達立坑の間にパイプルーフ工（水平部・垂直部 計 36 本）を施工し、トンネル支保工を架設しながら掘削した後、道路構造物を構築する（図-3）。非開削工法では、原則的に地上の道路規制が必要ないため、一般の道路交通へ影響を与えない施工が可能となる。

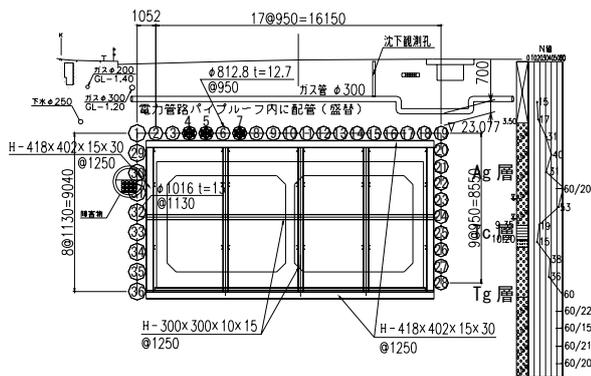


図-3 非開削部断面図

3. 施工条件と課題

(1) 地上交通条件

国道9号の平均交通量は約6万台/日であり、慢性的な道路混雑を生じている状況下において工事を施工するため、通行車両並びに歩行者の安全確保が最優先課題となる。

(2) 長距離パイプルーフ工

これまでに実績のない150mのパイプルーフ工を安全にかつ高い精度で施工を行う必要がある。そのため、本工事の施工条件に合致した施工計画の策定と掘進管理及び線形管理の手法を確立しなければならない。

(3) 低土被り・玉石砂礫地盤

工事場所の地盤は、最大約30~40cm程度の玉石を含み、地下水位は地表面より約7mであり、水平部パイプルーフが掘進する地山は透水係数の高い無水砂礫となる。さらに、地表面から水平部パイプルーフの土被りは3.5mと小さい。

そのため、地表面に影響を与えやすい地盤条件下でパイプルーフ工を施工するにあたり、慎重な施工管理が要求される。

(4) 地下埋設物との近接施工

国道下には様々な地下埋設管（ガス・上下水道・電力・通信）が存在している。それら埋設管との最小離隔は約70cmであり、近接条件下でパイプルーフ掘進工を施工するため、地下埋設物への影響防止対策の検討が必要となる。

(5) 地中障害物

パイプルーフ施工箇所には電力縦断管路および仮設用鋼矢板等が残置していることが判明していた。パイプルーフ工では、それらの地中障害物を撤去しながら施工を行う必要がある。

(6) 周辺環境への配慮

施工場所は市街地人口集中地区（DID）であり、夜間作業時の騒音や振動の発生を最小限に抑えなければならない。

4. 土質条件

当該地区の地質は、沖積砂礫層（Ag）・段丘粘土層（Tc）・段丘砂礫層（Tg）から構成される。Ag層はGL-10m前後まで分布し、径100~150mm程度の玉石を多く含み、細粒分が少なく（礫率75%）透水性が高い（ $k=2 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ ）。また、Tg層は風化礫が混入し（礫率52~86%、最大礫径30~40cm）、シルト混じり~シルト質であるため透水性は比較的低い（ $k=2 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ ）。その両者の間に段丘粘土層（Tc）が挟在している（図-2、図-3）。

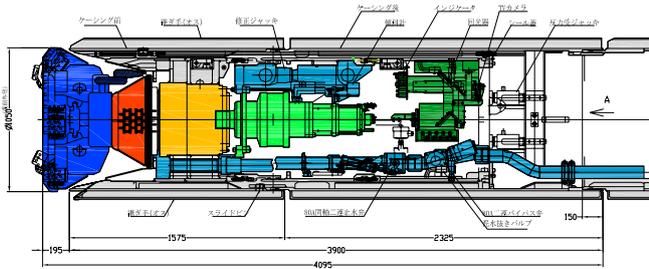


図-7 φ1016mm 拡張式掘進機構造

b) 障害物撤去方法

地中障害物手前まで泥水式掘進を行ったのち、掘進機本体を引戻し回収を行う。掘進機回収後、管内にて人力作業により障害物撤去を行う。撤去完了後、掘進機を再投入し再掘進を行う（図-8）。

カッターヘッドは、中空駆動軸中のスライドロッドにより拡張ビットを縮めながら掘進機を回収する構造である。掘進機再投入時は、縮径時と逆動作を行い拡張する。

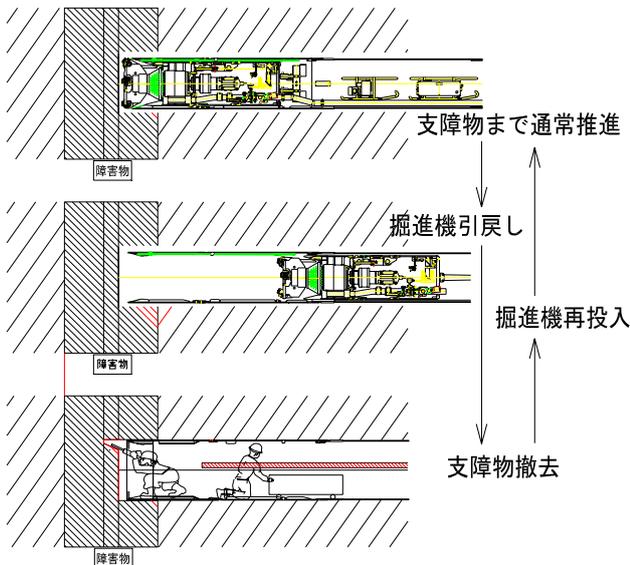


図-8 障害物撤去手順

c) 薬液注入機構

拡張式掘進機は、掘進機先端部に薬液注入孔を設けてあるので、障害物や構造物との近接施工時の地山の緩み抑止対応が可能となっている。

薬液注入機構は、掘進機後方の薬液注入孔（外部ホース接続孔）より2本1系統の注入ホースで、掘進機先端部の薬液吐出孔（上部2カ所）に接続されている。薬液剤は、薬液吐出孔内でミキシングし、加圧充てんされる。

(4) 垂直部パイプルーフエ (No. 1, No. 29~31)

a) 縦二連刃口推進工

電力縦断管路が地中障害物であるスパンでは、下記の理由により拡張式掘進機よりもパイプルーフ鋼管2本を同時に掘進する縦二連刃口推進工が有利と判断した（写真-3、図-9）。

- ① 刃口金物内では広い作業スペースが確保できる。（施工性・安全性の向上）
- ② 予期せぬ地中障害物遭遇等への対応が容易であり、工程への影響が比較的小さい。
- ③ 機械関係トラブルの発生頻度が比較的少ない。

なお、刃口推進時の地山崩壊を防止するため溶液型薬液注入工による地盤改良工を施工した。



写真-3 縦二連刃口金物

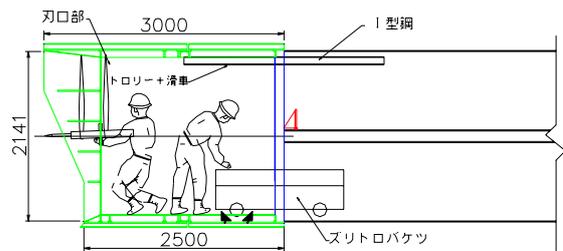


図-9 縦二連刃口推進作業概要

b) 刃口金物構造

刃口金物はスキンプレート厚さ 22mm のリブ構造とすることで地山の側圧等に対抗できるものとした。地山の崩壊から作業員の安全性を確保するためフード形状とし、緊急時、休日の地山保持を確実にかつ簡単に行なえるよう角落し構造を採用した。刃口金物は前胴、後胴2分割構造とし、それらの間に挿入した4本のジャッキで姿勢を制御する。また、ローリング対策として前胴部左右に格納式のスタビライザを装備した（図-10）。

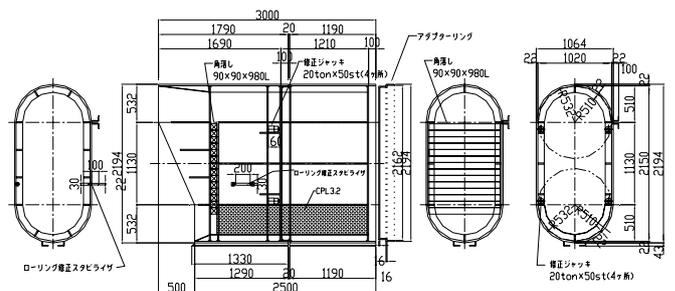


図-10 縦二連刃口金物構造

c) 二連鋼管

縦二連刃口推進工に用いる鋼管は2本の鋼管を縦に配置し、その側面に鋼板を取り付け、一体化構造とした(図-11)。元押し設備として、計画推力7,600kNに対し、総推力8,820kN(1,470kN/本×6本)の元押しジャッキ設備を設置した。

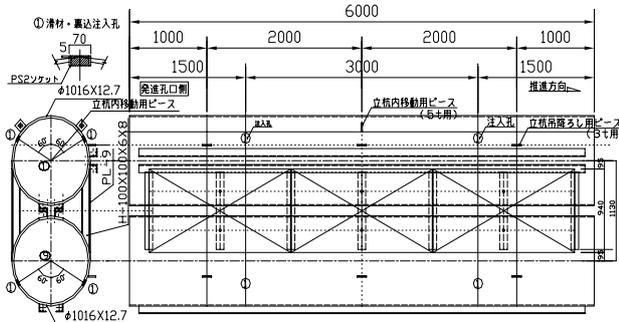


図-11 縦二連刃口推進用鋼管

6. パイプルーフ施工管理

(1) 掘進管理システム

シールド工事において多くの実績を持つシールド掘進管理システム(KSCS)をパイプルーフ推進工事用にアレンジした(写真-4)。掘進施工状況をリアルタイムに一元管理することにより、安全かつ確実な施工を行うことができる。土量管理では、送排泥流量と密度を計測し、乾砂量積算値を主な管理指標とした。

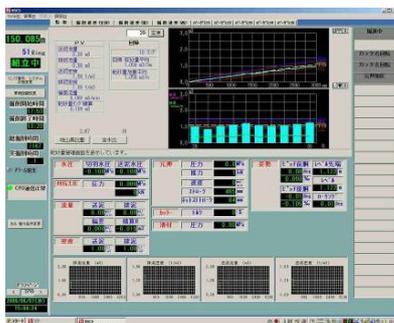


写真-4 掘進管理システム

(2) 線形管理システム

ジャンクション付きパイプルーフ工法において、線形精度不良は、推力上昇や掘進機破損等の掘進不能の要因となるため、高い線形管理が要求される。

本工法では、掘進機を方向を制御するために反射型方向誘導装置を装備しており、高精度な線形管理が可能となる。反射型方向誘導装置とは、発進立坑側から掘進方向へレーザー光線を照射し、掘進機先端位置と計画線との離隔がリアルタイムに計測でき、

即時に方向修正することが可能なシステムである。

(3) 切羽水圧・作泥材

透水性の高い砂礫地盤において、作泥材の逸泥が生じることにより、切羽の状態が不安定になることや、排泥管の閉塞による流体輸送不能が懸念された。さらに、土被りが小さいため、作泥材が地上や近接構造物へリークすることも考えられた。

切羽水圧として、泥水式工法において一般的に設定される「自然水圧(無水では0)+20~30kPa」を適用した場合、安定した掘進は難しいと考えられ、下記のように設定した。

- ①切羽水圧：50kPa
- ②作泥材性状：
 - ・Ag層：比重1.15~1.20 粘性60秒以上
 - ・Tg層：比重1.05~1.10 粘性40秒以上
 - ・Tc層：比重1.05程度 粘性20秒程度

(4) 線形精度

鋼管の出来形は、鉛直及び水平とも計画線に対し±100mmの誤差範囲内であった(図-12, 13)。既設パイプルーフのジャンクションによって新設の鋼管がある程度拘束されているため、隣接鋼管の線形精度が施工鋼管の精度へ影響を与えたと言える。

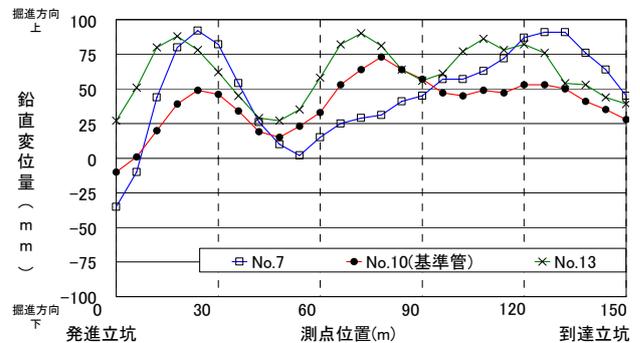


図-12 出来形線形(鉛直変位量)

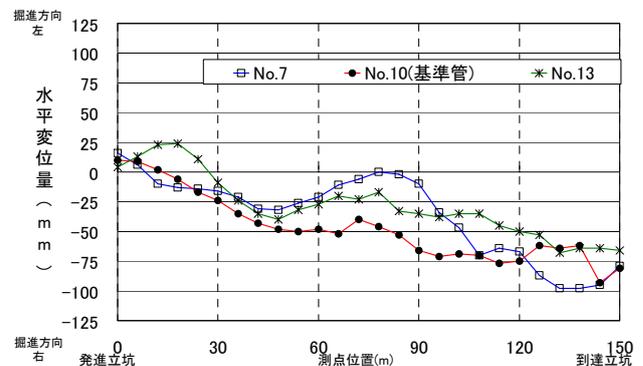


図-13 出来形線形(水平変位量)

(5) 推力

計画値の約 50～100%程度の推力であり、ジャンクションのせり等による推力上昇は見られなかった(図-14)。推力は隣接鋼管との相対位置に大きく関係するため線形管理を精度良く行う必要がある。

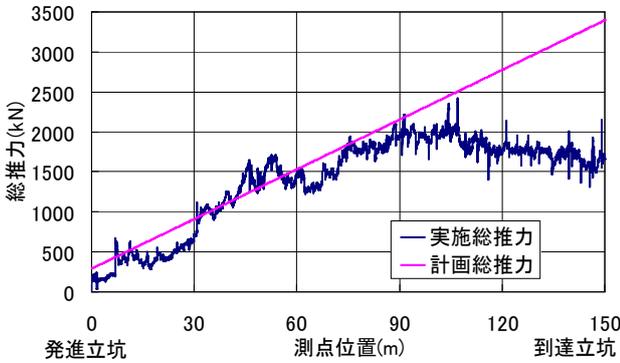


図-14 推力変化図 (φ812.8mm)

7. 沈下抑止充てん型推進用滑材

(1) 沈下抑止特殊充てん材³⁾

推進工法では、掘進到達後に裏込め注入工を行うことが一般的であるため、掘進に伴う余掘り部等の空隙が地山の緩みや地表面沈下へつながる恐れがある。パイプルーフ工は地下埋設物に近接(ガス管との離隔約 70cm)するため、地下埋設物への影響が懸念された。その対策として、数多く実績を有する沈下抑止特殊充てん材(ボイドキーパー)を推進工法用滑材へ初めて適用した。沈下抑止特殊充てん材は、珪酸塩鉱物を主成分とし、材料の安定性を図るためのポリマーとせん断抵抗力の向上を目的として繊維(太さ2デニール、長さ2～6mm)を混合した材料である。

(2) 実証実験の概要と結果

当工事への適用にあたり、以下の実証実験を実施し、その有効性を確認した。実験はボイドキーパーの他、比較のために二液タイプ固結型滑材についても同様に実施した。

a) 摩擦低減性能の確認

① 実験概要

土槽部に地山を模擬した礫層を設置し、その礫層にパイプルーフを想定した鉄板を敷設する。鉄板の両端は土槽の外側に出ており、その片端が引抜きジャッキに固定され、鉄板を引き抜く。土槽の上部は載荷板になっており、その上に錘を載せて模擬地盤に荷重を与えた(図-15)。

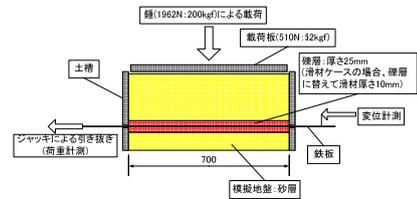


図-15 実験模式図 (摩擦低減性能)

② 実験結果 (表-2)

滑材の摩擦低減性能の評価として、滑材を使用しないときの引張荷重(荷重がピークを迎えて低下し、ほぼ安定した時の引張距離約 10mm 区間の平均値)を 100%とした場合の各滑材の値を比較した。その結果、両滑材とも 7～8%の値となり、滑材の効果としてほぼ同等な性能を持つことがわかった。

表-2 実験結果 (摩擦低減性能)

	写真	測定結果	引張荷重
滑材なし			950N (100%)
ボイドキーパー			63N (7%)
二液タイプ固結型滑材			73N (8%)

b) 地山保持性能の確認

① 実験概要

両滑材の地山保持性能を確認するために、加圧実験を実施した。載荷荷重は、現場の土被り 3.5m、および地山の湿潤密度を 18 kN/m³として 63 kPa とした。載荷ピストンの沈下量により材料の地山保持性能を確認した(図-16)。

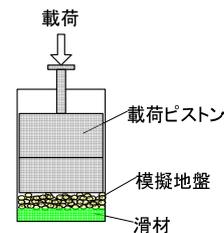


図-16 実験模式図 (地山保持性能)

②実験結果 (表-3, 表-4)

ボイドキーパーは、地山の礫にある程度浸透するが、礫自身が落ち込んでくることはなく、その状態で地山を保持している。本材料は充てん直後から材料本来の性状を発揮し、地山の落込みを最小限にして保持することができると言える。一方、二液タイプ固結型滑材では、ゲル化した状態のものは地山の礫に浸透することはないが、短時間のうちに圧密脱水して圧縮される。ゲル化する以前の状態(ゲルタイム 20~30 秒程度)では、粘性が低い状態であるので不飽和状態の礫地盤に対しては逸散量が多くなり、地山保持性能を期待できないと考えられる。

表-3 実験結果 (地山保持性能)

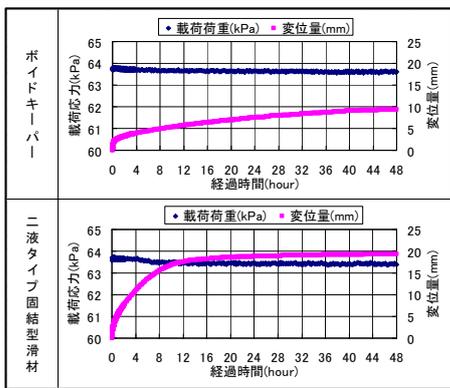
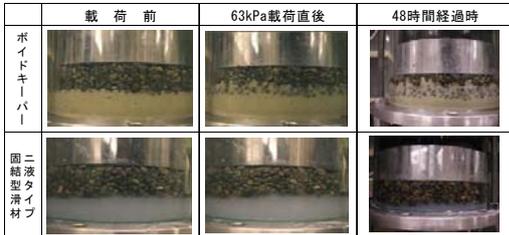


表-4 実験結果 (地山保持性能)



(3) 地下埋設管路への影響

近接する地下埋設物(ガス管)に設置した沈下観測孔のレベル測定結果を図-17に示す。無対策の場合に想定された沈下量 20mm に対して 8mm 程度の沈下に抑えることができ、ボイドキーパーの地山保持効果を確認することができた。

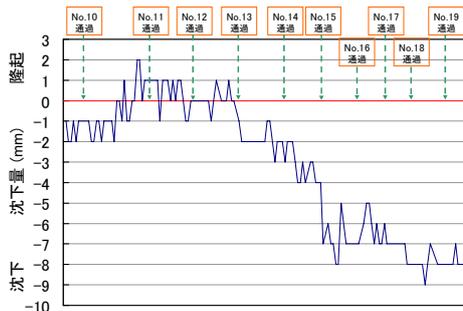


図-17 地下埋設物レベル測定結果

8. パイプルーフ鋼管中詰工

(1) 工法概要

従来は、パイプルーフ鋼管の中詰め材としてエアモルタルやセメントベントナイトが用いられてきた。しかし、長距離圧送となる場合、エアモルタルに含まれる空気泡の消失に伴う材料分離やセメントベントナイトのブリージングの発生など、品質面における不具合も懸念される。

本工法は、前記問題点を解決し、多岐に渡る要求性能を満足できる工法として開発されたものである。また、エアモルタル注入装置は自動制御システム化されたものであり、高品質で安定した材料の供給が可能である。

(2) 室内配合試験

中詰め材料の選定において長距離圧送性・密度安定性(気泡安定性)の観点から、エアモルタル製造法のうち、起泡剤と希釈水を発泡装置に通して作製した気泡を圧送後のベースモルタルに所定量混合する「プレフォーム・アフターミキシング工法」を採用した。空気量・単位水量および水結合比等を水準とした種々の室内配合試験を実施した。起泡剤には特殊起泡剤を用いている。

表-5に室内配合試験から得られた配合を示す。

表-5 配合表

一軸圧縮強度 (N/mm ²)	エアモルタル 理論湿潤密度 (g/cm ³)	空気量 (%)	気泡量 (%/m ³)	ベースモルタル				
				単位量(kg/m ³)			AD (C×%)	ベース モルタル量 (%/m ³)
				W1	C	P		
1.0	0.556	68.0	710	175	299	53	0~0.6	290

W1:ベースモルタルの練混ぜ水 C:セメント P:骨材 AD:AE減水剤

(3) 充てん性確認実験

パイプルーフ鋼管を模擬したφ300mm(L=75m)塩ビ管へエアモルタルを打設する装置を作製した。

(図-18)

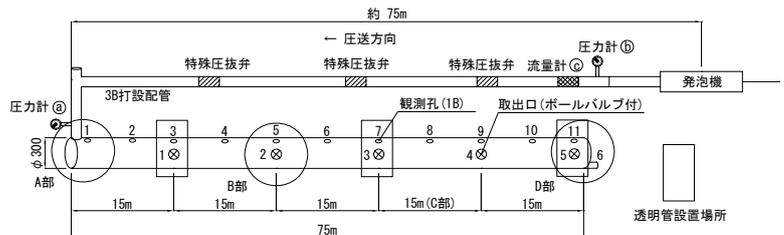


図-18 エアモルタル充てん実験概要図

エアモルタルを3インチ塩ビ管(L=75m)に流量2000 /分で圧送し、φ300mmの塩ビ管端部より打設した。エアモルタルの充てん状況を観測孔および透明管により確認した。また、充てん完了後のフレッシュ性状および硬化後の充てん状況を確認した。

実験の結果、目視での流動性・充てん性は良好であり、エアモルタル流動先端が先流れをすることなく充てんしていくことが確認できた。充てん完了後、取出口から採取したエアモルタルの湿潤密度およびフローのばらつきは小さかった(写真-5, 表-6, 写真-6)。

今回の実証実験結果により、実工事への適用性を確認できたと判断した。



写真-5 エアモルタルの流動状況 (透明管通過時)

表-6 充てん完了後のフレッシュ試験結果

採取地点	エアモルタル 湿潤密度 (g/cm ³)	フロー (mm)
取出口1 (15m)	0.581	180×178
取出口2 (30m)	0.567	174×173
取出口3 (45m)	0.563	179×178
取出口4 (60m)	0.588	181×178
取出口5 (75m)	0.559	178×178
取出口6 (先端部)	0.552	185×182



写真-6 充てん状況 (75m 地点)

(4) 実施工結果

実施工において、本工法によりパイプルーフ鋼管の中詰めを行った。以下、その結果である。

①自動注入設備による施工管理を行い、安定した品質のエアモルタルを打設できた。打設圧力も0.25MPa~0.30 MPaと安定していた。

②充てん完了時にエア抜きから採取したエアモルタルの性状を確認したところ、湿潤密度・フロー値ともに安定しており、打設による材料の変化は見られなかった。

9. おわりに

当工事のパイプルーフ工に関連して、地中障害物を含む特殊な地盤条件に合理的に対応可能なパイプルーフ施工法の選定に始まり、今回採用した掘進及び線形管理システム、さらに地下埋設物近接条件に対応した特殊滑材の開発やパイプルーフ鋼管中詰め施工新技術などにより、国内最長となる長距離パイプルーフ工が可能となったと考えている。

今後、都心部を中心として増加すると予想される交通渋滞緩和を目的とした工事に対して、道路交通へ影響を与えずに施工可能な非開削工法のニーズは高いと考えられる。

本稿が同種工事における設計ならびに施工計画上の参考になれば幸いである。

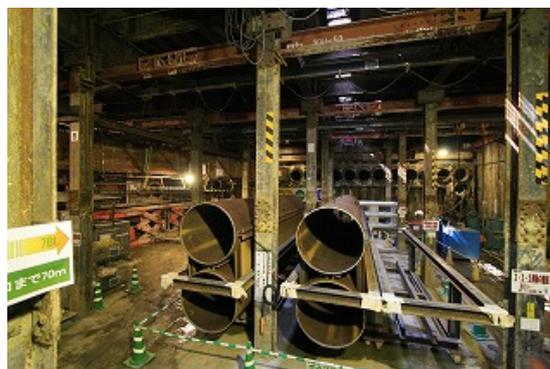


写真-7 発進立坑内状況

参考文献

- 1) 栗林正明, 瀬戸清, 田中啓之: 建設の施工企画 (p. 18~25), (社)日本建設機械化協会, 2007. 2
- 2) 瀬戸清, 田中啓之, 圓岡誉富: 月刊推進技術 (p. 11~16), (社)日本下水道管渠推進技術協会, 2007. 2
- 3) 栗林正明, 瀬戸清, 田中啓之, 吉迫和生: 沈下抑止特殊充填材のパイプルーフ推進工法用滑材への適用実績, 土木学会第62回年次学術講演会, 2007. 9