

中央環状品川線五反田出入口非開削仮設構造の 施工実績報告

西嶋 宏介¹・石橋 正博²・須田 久美子³・中川 雅由⁴

¹正会員 首都高速道路株式会社 東京建設局品川線工事事務所（〒141-0032 東京都品川区大崎5-4-3）
E-mail:k.nishijima610@shutoko.jp

²首都高速道路株式会社 東京建設局設計課（〒141-0032 東京都品川区大崎1-6-3）

³フェロー 鹿島建設株式会社（〒141-0031 東京都品川区西五反田7-1-9）

⁴正会員 鹿島建設株式会社（〒141-0031 東京都品川区西五反田7-1-9）

中央環状品川線五反田出入口は、品川線全線約9.4kmのほぼ中間に位置するセンターランプ式トンネルである。環状6号線直下に中央環状品川線本線となる併設シールドトンネル2条を構築した後、開削工法および非開削工法を用いてシールドトンネルを切開き、出入口躯体を構築する。非開削工法適用区間においては、直線パイプルーフをアーチ状に配置して構造的に一体化し、アーチ状の構造体のみで上載荷重を受け持つパイプルーフアーチ工法を開発、採用した。本工法では、従来工法で必要であった支持杭、受桁の設置作業を省略して施工合理化をはかることで、工程短縮が可能となる。本稿では、パイプルーフアーチ工法の施工概要および施工実績について報告する。

Key Words : *underpinning, temporary structure, pipe-roof method*

1. はじめに

中央環状品川線五反田出入口は、品川線全線約9.4kmのほぼ中間に位置するセンターランプ式トンネルである。環状6号線直下に中央環状品川線本線となる併設シールドトンネル2条を構築した後、開削工法および非開削工法を用いてシールドトンネルを切開き、出入口躯体を構築する（図-1）。五反田出入口工事の施工範囲約960mには、「かむろ坂下交差点」および「羅漢寺交差点」が存在し、道路形状および地下埋設物等の状況を考慮すると、開削工法を採用した場合、交通への影響が大きいこと、地下埋設物の大規模な移設、防護が必要となることなど工事計画課題があった。そのため、かむろ坂下交差点付近および羅漢寺交差点付近の2箇所立坑を設け、「かむろ坂下」「目黒不動」「大鳥」の3箇所立坑に非開削工法であるパイプルーフ工法を適用し、出入口躯体を構築することとした（図-2）。

本工事では、工程短縮を目的に、直線パイプルーフを断面内にアーチ状に配置して構造的に一体化することにより、従来工法で必要であったパイプルーフ支持杭、受桁を省略する新しい非開削工法「パイプルーフアーチ工法」を開発した。本工法は他に施工事例が存在しないため、事前解析および実証実験を行い技術的課題を検討し

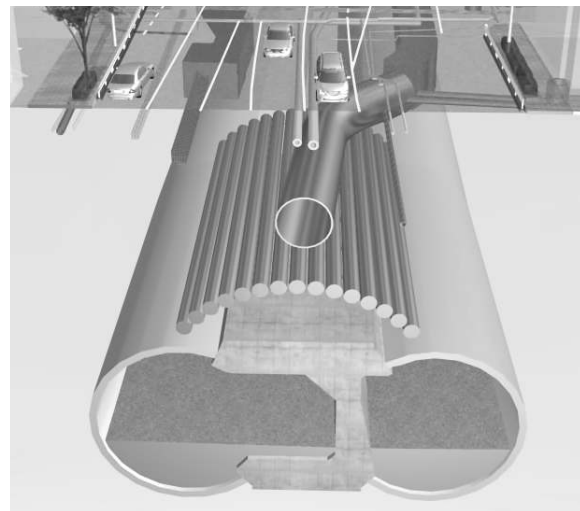


図-1 適用イメージ

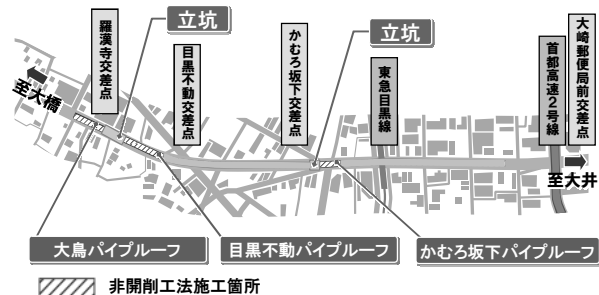


図-2 非開削工法の適用範囲

た後、五反田出入口工事に全面採用することとした。

パイプルーファーチ工法の計画設計概要については平成23年度トンネル工学報告集「中央環状品川線五反田出入口非開削仮設構造の設計施工概要」¹⁾にて報告済みであるため、本稿ではその施工概要および施工実績について報告する。

2. パイプルーファーチ工法の施工概要

本工法では、ルーフ（屋根）を形成するパイプルーフ鋼管をアーチ状に打設し、一定間隔で配置されたパイプルーフ鋼管間をモルタルにより連結してアーチ構造体を形成させ、パイプルーフ上部、側部の荷重をアーチ構造体のみの無支保構造によりアンダーピニングして掘削を行う。アーチ構造構築時の止水については、パイプルーフ鋼管内からの止水注入なども考えられるが、掘削時の安全性および工程短縮を考慮して凍結工法を採用した。パイプルーフ鋼管内に貼り付け凍結管を設置してパイプルーフ上部に止水凍土を造成した後にアーチ構造体を完成させると、本設構造物の構築時に支持杭、受桁等の仮設構造物が支障しない地下空間を確保できる。

パイプルーファーチ工法の施工概要を図-3、図-4および写真-1に示す。施工手順は次のとおりである。

- ①発進立坑より掘進機でパイプルーフ鋼管の打設を行い、打設完了後、鋼管内に中詰めモルタル（設計基準強度 21.0 N/mm^2 ）を充填する。
- ②パイプルーフ打設後は凍結工法により凍土造成を行う。凍土には一般に遮水性と強度が期待できるが、今回はアーチ構造が完成するまでの期間の止水を目的とした。
- ③凍土造成の完了後は、アーチ部掘削を行う。図-4のとおりアーチ部掘削は3mを1スパンとした。
- ④パイプルーフ鋼管間の凍土を超高圧洗浄機で洗浄掘削する。
- ⑤止水兼用の鋼製型枠を設置する。サイクル工程を短縮するため、まずはモルタル注入作業に必要な十分な程度の点溶接とし、止水溶接は次スパン以降に施工が進んだ段階で行う。鋼製型枠の点溶接後、パイプルーフ鋼管間にアーチモルタル（設計基準強度 21.0 N/mm^2 ）を注入すると同時に圧縮強度管理用の供試体採取する。所定の低温養生を行い圧縮強度試験により目標強度以上であることを確認して次スパンの施工に進む。
- ⑥全スパンに③～⑤の施工を繰り返してアーチ構造体が完成する。

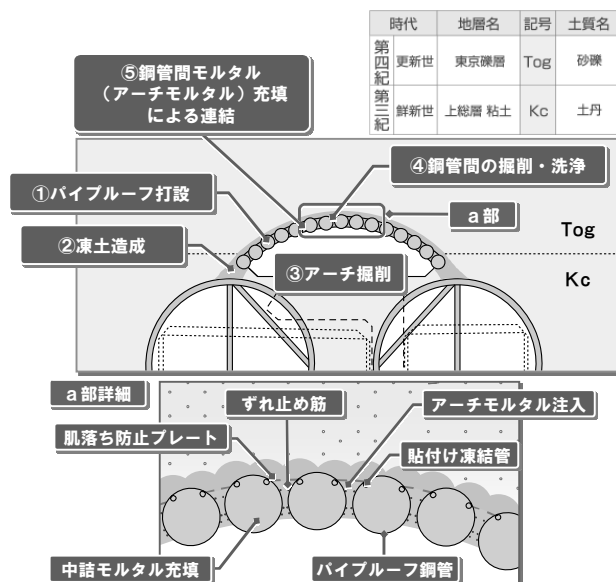


図-3 パイプルーファーチ工法の施工概要

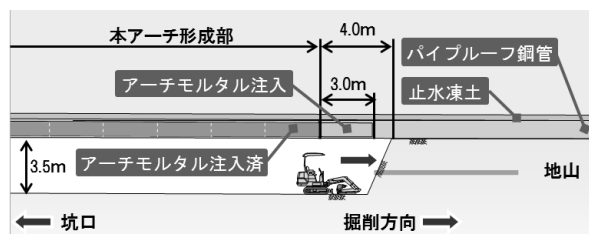


図-4 パイプルーファーチ部掘削

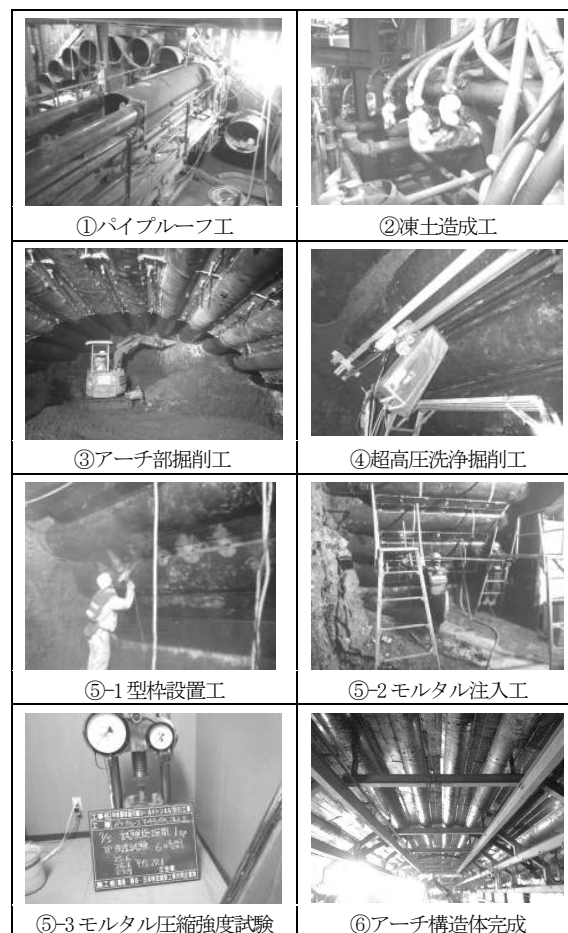


写真-1 パイプルーファーチ工法の施工フロー

表-1 パイプルーフアーチ工法の諸元

非開削部 (延長)	パイプルーフ工			アーチ部掘削工 数量 (m³)
	管径 (mm)	肉厚 (mm)	総延長 (m)	
かむろ坂下 (60.0m)	1016	10	1080	1504
		12	240	
	812	9	120	
目黒不動 (78.5m)	1016	10	1177.5	2813
大鳥 (69.0m)	1016	10	840	2404
		14	195	

表-1に本工事におけるパイプルーフアーチ工法の諸元を示す。

3. パイプルーフアーチ工法の施工実績

(1) パイプルーフ推進工

パイプルーフ鋼管の打設は、泥水式推進機で施工した。パイプルーフアーチ工法の成立条件の一つとして、アーチ構造体の構築精度確保のため、パイプルーフの推進精度を上下左右30mmで管理する必要がある。推進精度確保を目的として計測管理システムの構築を行い、実証実験(写真-2)を行った上で実施工に反映した。実験の結果、全てのパイプルーフ鋼管が許容値±30mm以内の精度で打設できていることを確認した(図-5)。



写真-2 計測管理システム実機試験

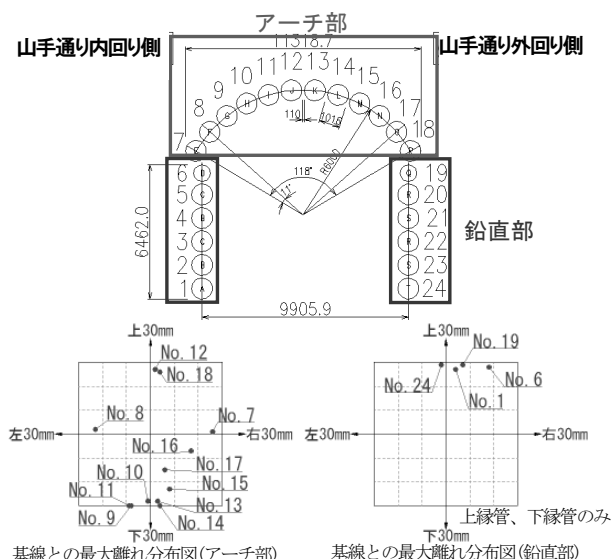


図-5 パイプルーフ鋼管位置計測例(かむろ坂下)

(2) 新型鋼管継手構造

パイプルーフ鋼管の従来の現場接合には溶接接合および接着接合がある。溶接接合は接合作業および非破壊検査に時間を要し工程上のクリティカルとなる。接着接合は、溶接接合に比べて作業時間が短縮できるが、-20～30℃程度の低温下において接着強度が低下するため凍結工法との併用が困難である。そこで、凍結工法との併用が可能で、かつ施工時間を短縮できるという点から、図-6に示す機械式継手(止水機能付きピン継手)を用いて性能確認試験(実物大継手曲げ試験(写真-3)、実物大組立試験、実物大止水試験)を行い、実施工に採用した。その結果、実施工において不具合なく、鋼管接合時間を15～30分程度に短縮できることを確認した。

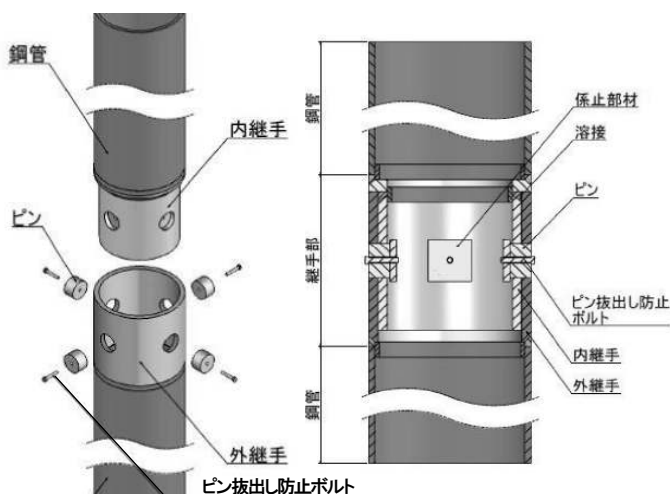


図-6 止水機能付きピン継手

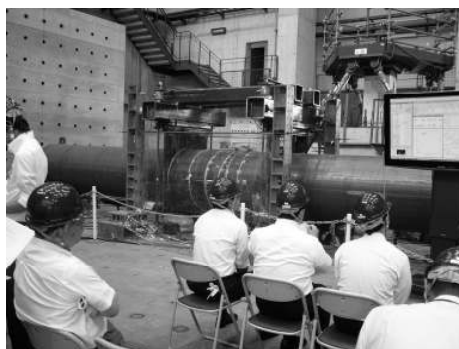


写真-3 実物大継手曲げ試験



写真-4 パイプルーフ鋼管接合状況

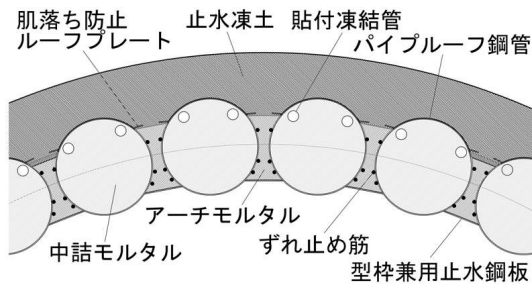


図-7 バイプルーフアーチ構造体の詳細

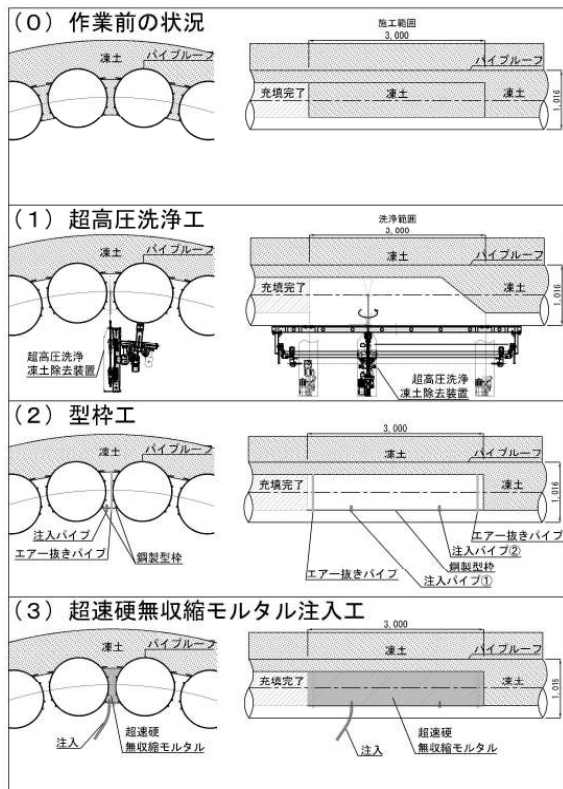


図-8 アーチモルタル工の施工手順

(3) アーチモルタル工

アーチモルタルは図-7に示すとおり、バイプルーフアーチ構造体の一部を構成する強度材料である。バイプルーフ鋼管間に注入されるアーチモルタルは、バイプルーフ鋼管の中に設置された貼付凍結管によりバイプルーフアーチ上部に造成された凍土に接触する。当該スパンのアーチモルタルの圧縮強度が目標強度を満足するのを確認して、次スパンの掘削を開始する。アーチモルタル工の施工手順を図-8に示す。

計画に先立ちアーチモルタル工の成立性を確認するために実物大施工実験(図-9)を実施した。実物大施工実験により、バイプルーフ鋼管間の凍土掘削方法を確立し、アーチモルタルに適した材料選定と品質管理方法、止水凍土の管理方法などを確認した。

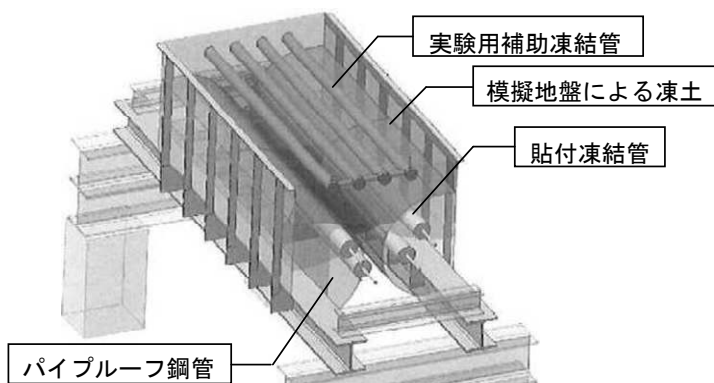


図-9 実物大施工実験の試験体概要

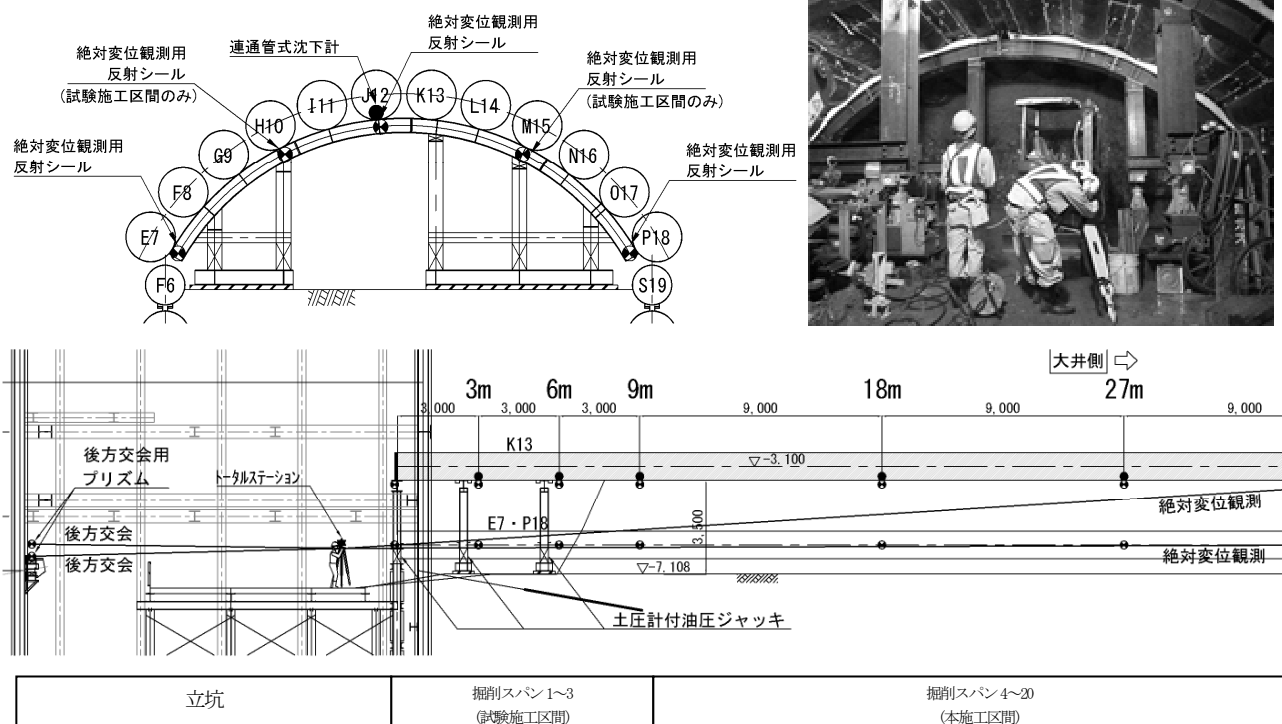


図-10 かむろ坂下における荷重、変位計測の概要(試験施工区間および本施工区間)

表-2 アーチモルタルの品質管理方法

種別	試験項目	試験方法	測定時期	規格値
フレッシュ性状	練上り温度	温度計	練上り直後	10℃ ～30℃
	コンシステンシー	JSCE-F541に準拠、 J_H 漏斗流下値	練上り直後	6 ～10 秒
硬化後の性状	圧縮強度	低温恒温水槽内を5℃に設定する。練り混ぜられたモルタルをφ30×60mmの塩ビ製型枠内に充填し、現場における注入時間を考慮し、練上がりから10分後に低温恒温水槽内に浸漬する。圧縮強度試験を行い、目標強度以上を確認できた材齢で次スパンの掘削を開始する。	材齢6時間以上	設計基準強度 21.0N/mm ² 目標強度 25.1N/mm ²

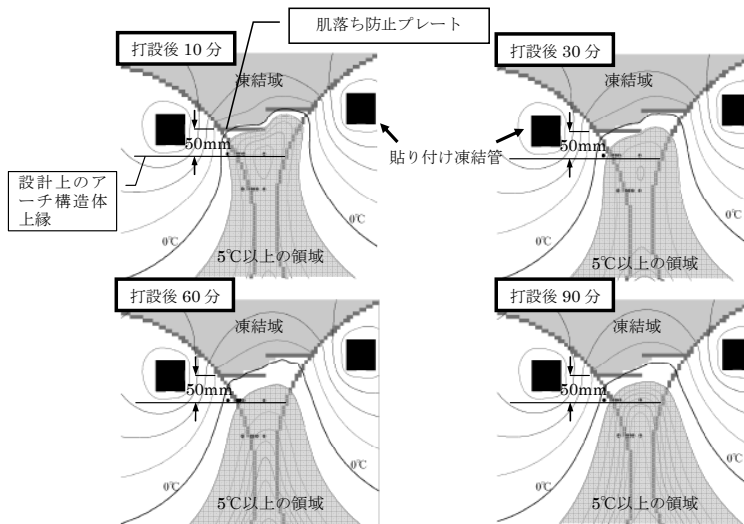
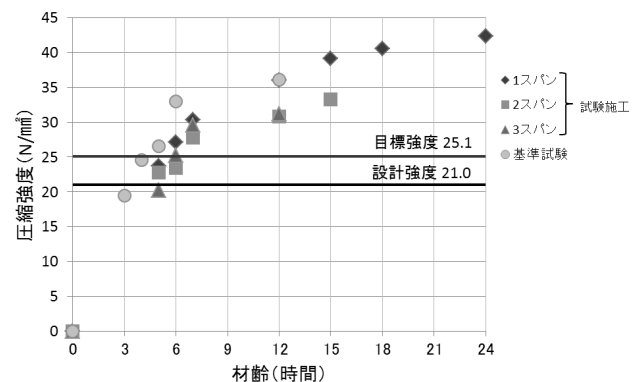


図-11 アーチモルタル注入後の温度分布(実物大施工実験の実測データの逆解析で得られた熱特性による推定値)

さらに、実施工においてはかむろ坂下坑口より3スパン(9m)を試験施工区間として各施工ステップごとの荷重、変位計測を行い、設計および施工管理方法の妥当性を確認した(図-10)。

アーチモルタル材料には、施工性および低温下での強度発現性の観点から、寒冷地仕様超速硬無収縮モルタルを用いた。アーチ構造体を形成する上において安全性確保と工程短縮の観点から、貼り付け凍結管と止水凍土に囲まれた低温条件を考慮したアーチモルタルの圧縮強度を現場で合理的に評価する方法を確立する必要がある。そこで、実物大施工実験の実測データをもとに逆解析を行い、未凍結低温域におけるアーチモルタルの温度に依存した発熱特性を把握し、これを用いたシミュレーション解析によりアーチモルタル注入後の温度分布の経時変化を推定した(図-11)。その結果、肌落ち防止プレートの近傍を除き、アーチモルタル自身の硬化熱により+5℃以上の養生条件が確保されることを確認した。また、解析は打設後300分まで実施し、打設後60～90分で+5℃以上の領域がほぼ安定し、凍結域に大きな変化がないことを確認した。設計上のアーチ構造体上縁は肌落ちプレートから50mm離れた位置であり、アーチ構造体の部分はすべての時間において5℃以上である。よって現場での品質管理として、圧縮強度の品質管理上、安全側となる5℃の低温封蔵養生とし、パイプルーフ鋼管間の最も狭い部分(最少離隔50mm)の温度履歴を想定してφ30mmの円柱供試体を用いた圧縮強度試験を行うこととした(表-2)。目標強度は、アーチモルタルの設計基準強度21.0 N/mm²に対して変動係数10%を考慮し、25.1 N/mm²とした。また、試験施工によりアーチモルタル



注)1スパン、3スパンは材料A、2スパンは材料Bを使用

図-12 アーチモルタルの圧縮強度と材齢の関係

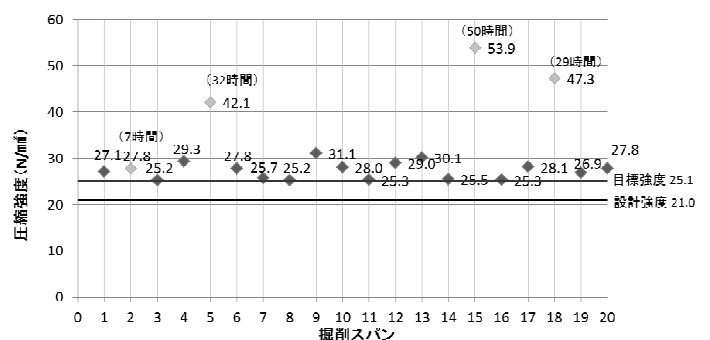


図-13 アーチモルタルの圧縮強度試験結果の例(かむろ坂下)

ルの材齢と圧縮強度の関係を確認し(図-12)、目標強度を満足するための養生時間として材齢6時間以上と設定した。本施工では、設定した材齢でアーチモルタルの圧縮強度が目標強度を満足し(図-13)、計画した施工サイクルを確保して施工を進めることができた。

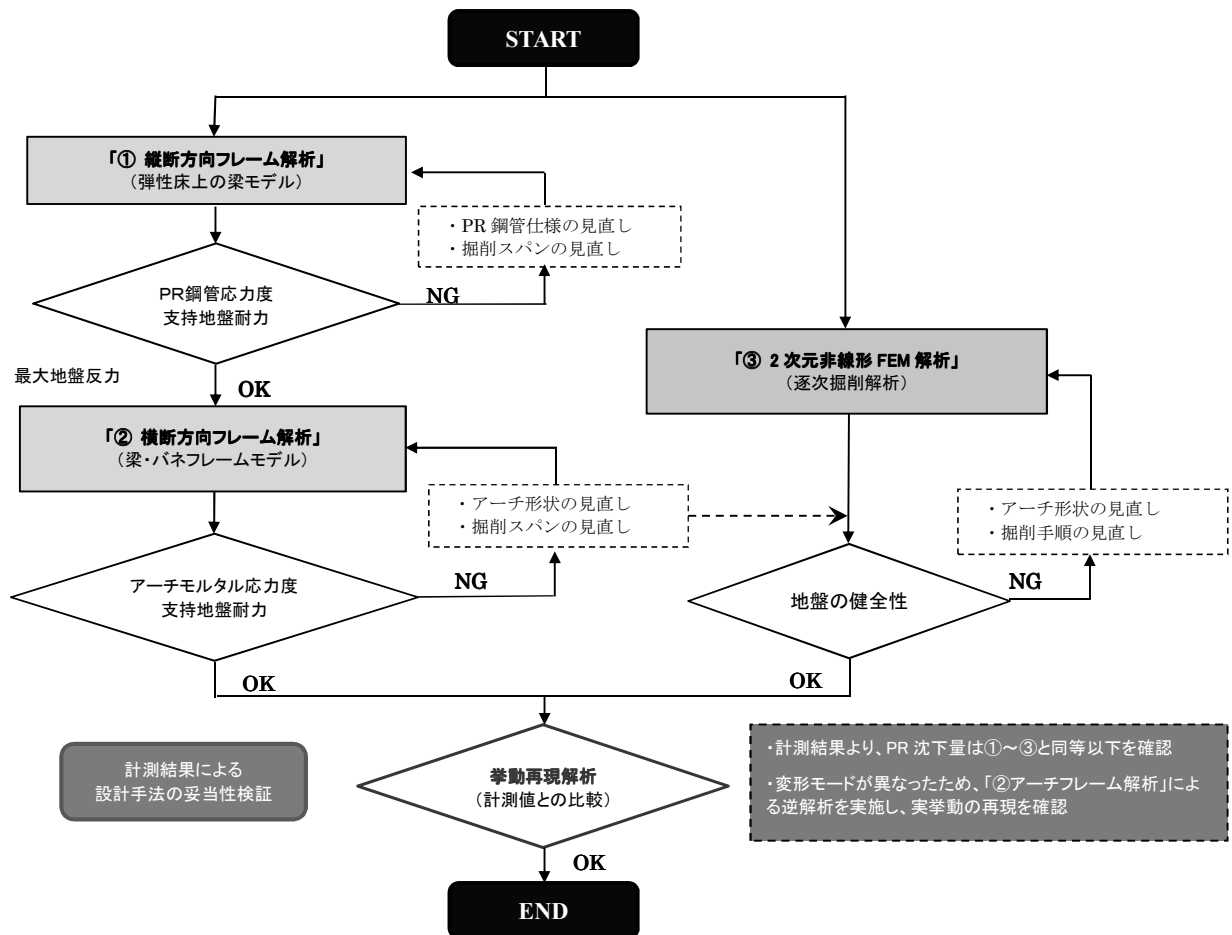


図-14 パイプルーフアーチ工法の設計検証フロー

(4) パイプルーフアーチ部掘削時の挙動

図-14～18にパイプルーフアーチ工法の設計フローと解析モデルの概要を示す。

パイプルーフアーチ構造体は、アーチが形成されるまでの掘削時には「①縦断方向フレーム解析」にてパイプルーフ鋼管の部材設計を実施し、アーチ構造体の形成後を対象とした「②横断方向フレーム解析」にてアーチモルタルを含む構造部材の設計を実施した。「②横断方向フレーム解析」にてアーチ構造体に作用する荷重は、設計上安全側に配慮して「①縦断方向フレーム解析」で得られた最大地盤反力とした。さらに、パイプルーフアーチ構造体を支保工としたアーチ下掘削時の地盤健全性を評価することを目的に「③2次元非線形FEM解析」を実施して、施工時の地盤安定性を確認した。

前節図-10に示す計測の結果、パイプルーフアーチ構造体の絶対沈下量、鉛直相対変位量、水平相対変位量ともに一次管理値（許容応力度から決まる限界値の8割）以内であったが、パイプルーフアーチ構造体が全体的に沈下しながらアーチライズが高くなる変形モード（脚部が横断方向に縮まり、鉛直相対変位は増加）が確認され、事前の「②横断方向フレーム解析」とは異なる挙動を示した（図-19）。

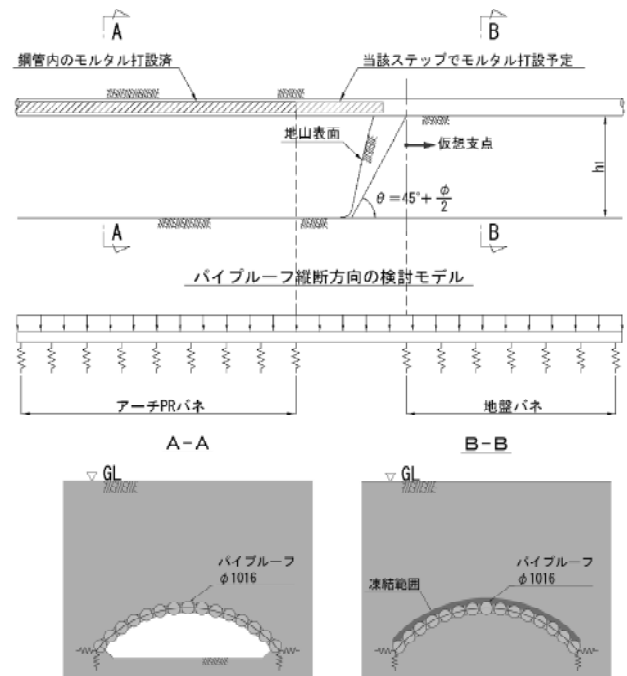


図-15 「①縦断方向フレーム解析」の解析モデル

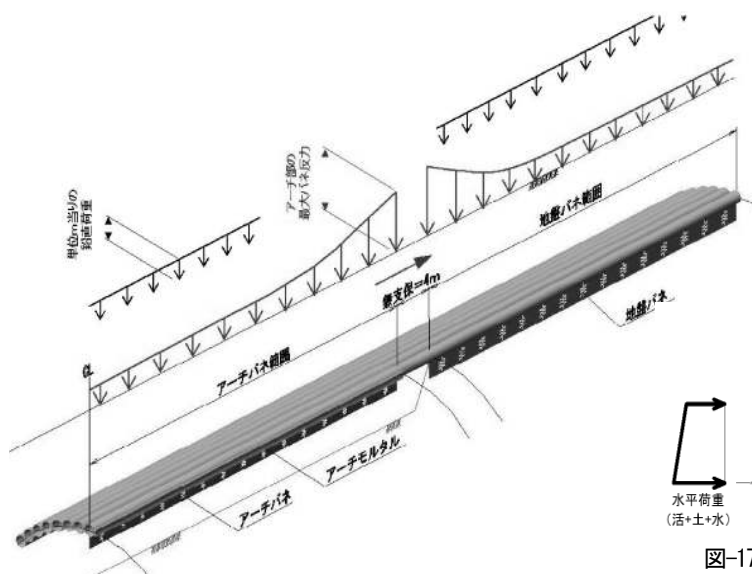


図-16 縦断方向の施工段階を考慮した作用荷重評価

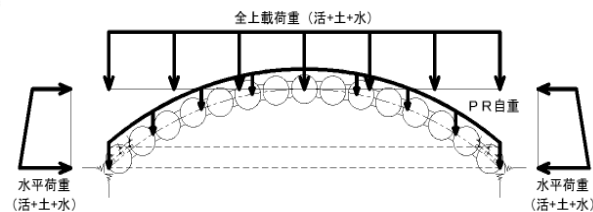


図-17 「②横断方向フレーム解析」の解析モデル

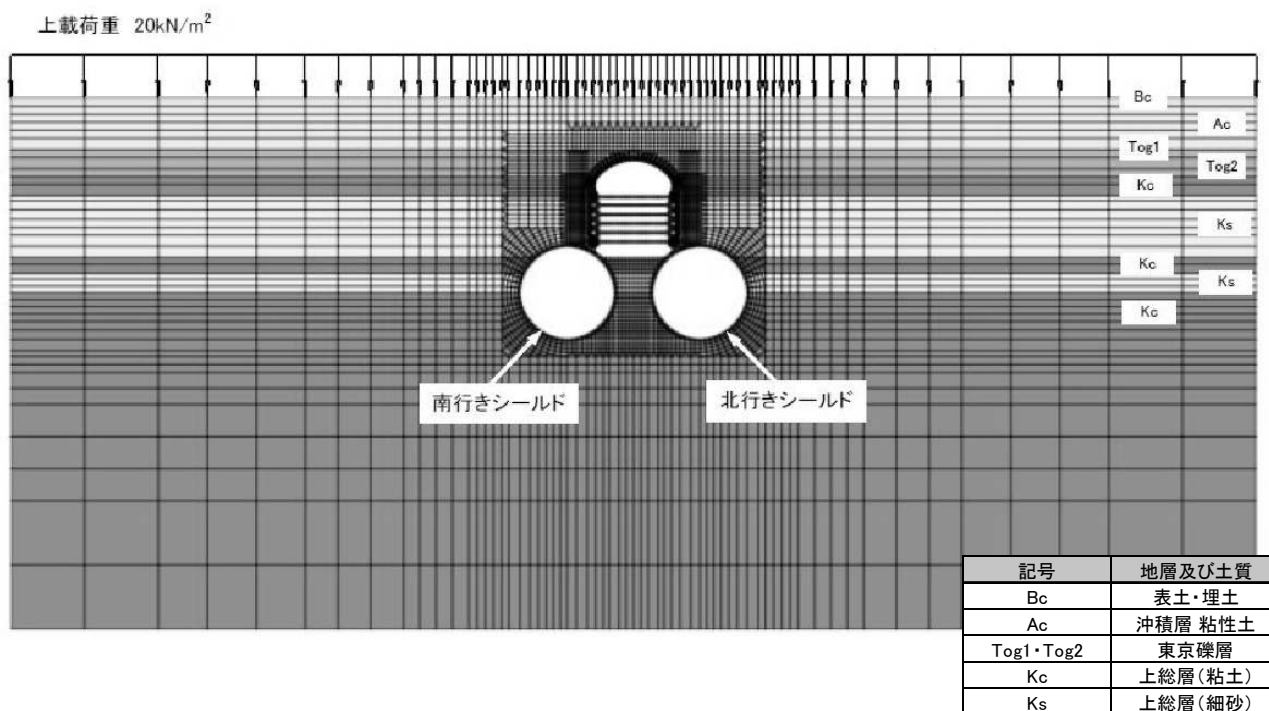


図-18 「③2次元非線形FEM解析(逐次掘削解析)」の解析モデル (かむろ坂下)

パイプルーファーチ部掘削時の挙動について、事前の「②横断方向フレーム解析」では、設計上安全側の配慮として止水凍土の影響は無視し、パイプルーファーチが構造体としてより不安定になると考えられるアーチライズが低くなる変形モードに対して安全性を検討していた。そこで、アーチ脚部に実測した水平変位と同じになる凍結膨張圧に相当する水平力(集中荷重)を作用させてパラメータスタディを行った。アーチ脚部の鉛直方向地盤ばねを「Kc層相当」として解析した場合には、鉛直ばねが大きいため、アーチが潰れる挙動(鉛直方向の相対変位がマイナス)となった。一方、アーチ脚部の鉛直方

向地盤ばねを「Ks層相当」として解析した場合には、鉛直ばねが小さいため、アーチ脚部の沈下量が大きくなり、アーチが鉛直方向に延びる(鉛直相対変位が増加する)挙動が再現でき、実測データとほぼ整合する結果が得られた。アーチ脚部の鉛直地盤ばねについては、図-20のとおりアーチ脚部のKc層に介在砂層があることと、Kc層下部に厚いKs層が存在すること、の影響が支配的であったものと考えられる。

以上の解析的な検討結果により、変形モードの違いは、設計上安全側の配慮として解析に考慮していなかったアーチ脚部に存在するKc層の凍結膨張圧の影響と、Kc層

の介在砂層およびKc層下部の厚いKs層の影響であると判断している。

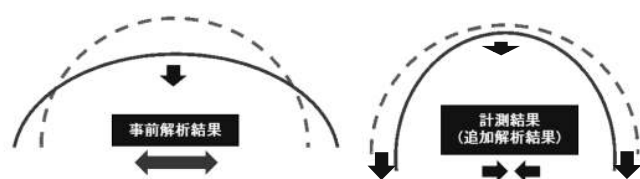


図-19 パイプルーファーチ構造体の変形モード

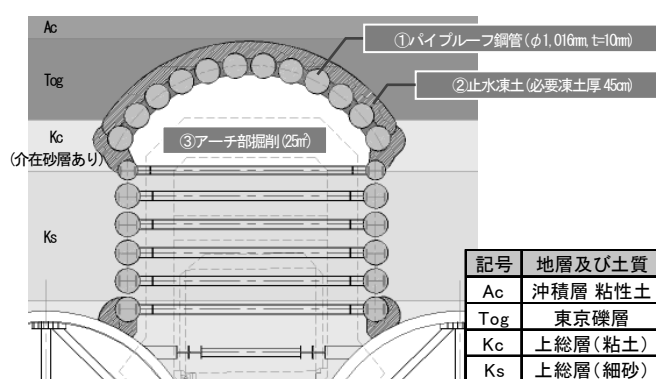


図-20 かむろ坂下非開削部の土質断面図

4. まとめ

中央環状品川線五反田出入口工事においてパイプルーファーチ工法の適用に向けた各種の技術的課題の事前検証結果を実施工に反映させることで、パイプルーファーチ構造を成立させることが出来た。現在は、パイプルーファーチ下掘削が全て完了し、シールドトンネル間の掘削および切開き躯体構築の施工を鋭意進めているところである。パイプルーファーチ工法の採用により非開削部において広い作業空間を確保することが可能になり、工期短縮効果、躯体構築の施工性および品質向上が期待できる。

本報告が、同種工事の参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 平野秀一, 松崎久倫, 須田久美子, 中川雅由: 中央環状品川線五反田出入口非開削仮設構造の設計施工概要, トンネル工学報告集, 第 21 巻, pp.329-333, 2011.11

(2013.9.2 受付)

THE UNDERPINNING TEMPORARY STRUCTURES CONSTRUCTION RECORDS OF GOTANDA ENTRANCE/EXIT IN CENTRAL CIRCULAR SHINAGAWA ROUTE

Kosuke NISHIJIMA, Masahiro ISHIBASHI, Kumiko SUDA,
and Masayoshi NAKAGAWA

The Gotanda on/off ramp structure of the Central Circular Shinagawa Route, Tokyo Metropolitan Expressway Co. Ltd., Tokyo Japan is under construction. Most of the reinforced concrete structure of the Gotanda on/off ramp is constructed by the open cut method from the surface. Due to traffic restrictions, however, open cut methods are not applicable to three major intersections of the surface road. To solve this issue, a newly developed arch-shaped steel pipe roof along with soil freezing method is applied. This paper introduces the construction methods and construction records of Arch-shaped Pipe-roof earth supports including 1016mm dia. Pipe jackings, pipe joints, ground freezing for water stop and excavation.