

民地下に道路トンネル分合流部を 構築するための技術的対策

津野 和宏¹・落合 栄司²・川田 成彦³・藤井 剛⁴・高浜 達矢⁵

¹正会員 首都高速道路（株）神奈川建設局設計課（〒221-0013 横浜市神奈川区新子安1-2-4）
E-mail:k.tsuno68@shutoko.jp

²正会員 首都高速道路（株）神奈川建設局設計課（〒221-0013 横浜市神奈川区新子安1-2-4）
E-mail:e.ochiai45@shutoko.jp

³正会員 首都高速道路（株）神奈川建設局設計課（〒221-0013 横浜市神奈川区新子安1-2-4）
E-mail:n.kawada106@shutoko.jp

⁴正会員 大林・奥村・西武 横浜環状北線シールドトンネル特定建設工事共同企業体
（〒223-0059 横浜市港北区北新横浜2-7-3）
E-mail:fujii.tsuyoshi@obayashi.co.jp

⁵正会員 大林・奥村・西武 横浜環状北線シールドトンネル特定建設工事共同企業体
（〒223-0059 横浜市港北区北新横浜2-7-3）
E-mail:takahama.tatsuya@obayashi.co.jp.

都市部のトンネル工事では、地上の建物等の移転の減少や道路規制による渋滞の抑制等を目的として、シールドトンネルや都市NATM等の工法を用いる例が多い。道路トンネルにおける分岐合流部の建設においても非開削による地中からのシールドトンネル切開きが採用される事が増加している。

本稿では、硬質地盤、高水圧という条件下での切開き工事における地盤変状や地下水位低下による地表面への影響を低減させるための施工計画、切開き後のトンネル覆工の耐火性について報告する。

Key Words : *piperoof, sectional excavation, fireproof concrete, polypropylene fibers*

1. 工事概要

現在、首都高速道路株式会社が整備を進めている横浜環状北線（以下、北線）は、横浜市の交通ネットワークの骨格を形成する横浜環状道路の北側区間であり、第三京浜道路「港北インターチェンジ」と首都高速横羽線「生麦ジャンクション」をつなぐ延長約8.2kmの自動車専用道路である（図-1参照）。北線は、家屋の移転を少なくし、周辺環境を保全するために、全体の約7割をトンネル構造としている。

北線のうち、横浜環状北線シールドトンネル工事では、新横浜発進立坑を起点に子安台換気所を終点とする延長約5.5kmの大断面併設トンネルを2台の泥土圧シールド機（外径φ12.49m）によって施工し、シールドトンネル内においては、出入口につながる分合流部を4箇所構築する。

分合流部は、図-2に示すように、港北側と生麦側にそれぞれ出口と入口が1箇所ずつの計4箇所ある。分合流部

の施工は、地上が民地であるため、すべてシールド坑内より非開削で行う。分合流部の土被りは、港北側が32～54m、生麦側が28～43mである。掘削土層は泥岩（Km）、

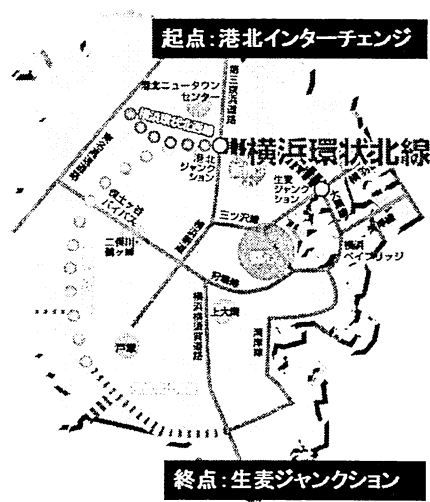


図-1 横浜環状北線の概要

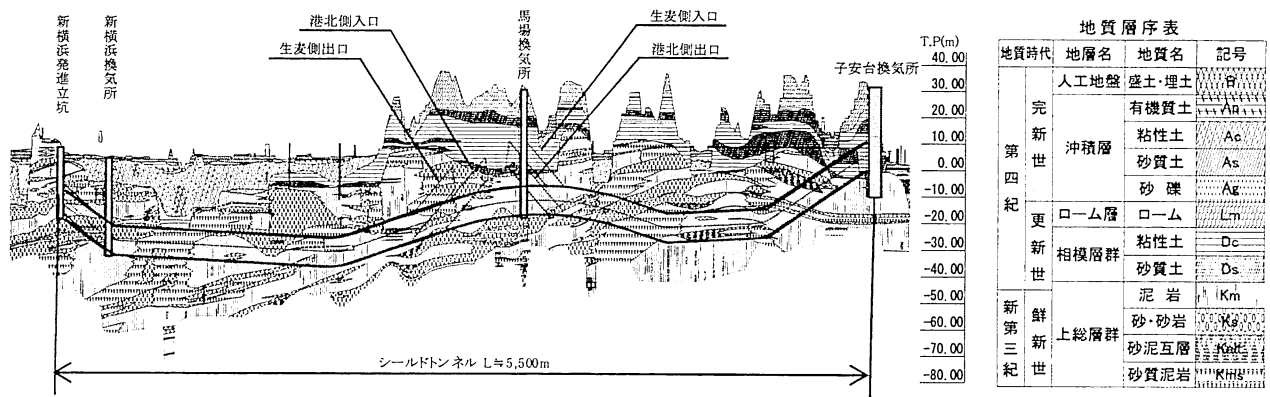


図-2 トンネル地質縦断面

砂質泥岩 (Kms) , 砂, 砂岩 (Ks) の硬質な地盤が主体である。Ks層は最大0.5MPaに被圧されている。

2. 本工事における課題

(1) 非開削工法による分合流部の施工方法

分合流部は、地上が民地であるため、シールド坑内から非開削工法によりトンネルを拡幅して構築する。施工地盤を考慮するとNATMによる拡幅も可能である。しかし、拡幅部に位置するKs層が、近傍の沖積層と水理的につながっている事が懸念され、地下水位が低下した場合、沖積層の圧密沈下が誘発される可能性がある。

本工事では施工時の地盤変状や地下水低下による影響を最小限に抑制することが重要であり、より安全かつ確実な施工方法の計画が課題であった。

(2) 分合流部覆工の耐火性の確保

分合流部は、地中で拡幅掘削した後、現場打ちコンクリートで楕円形上の覆工を構築する。分合流部の覆工は、ウォータータイト構造として、地下水压、土圧を負担させるため、トンネル内で火災が発生してもトンネルの構造性能を保持できるよう耐火性を確保することが必要であった。

耐火性は、耐火吹付けや耐火パネルにより確保する方法も適用可能であるが、コスト縮減、工期短縮および維持管理（点検容易性）に対する配慮から、本線シールドでは、コンクリートに有機繊維を混入し、コンクリート自体に耐火性を有する方法を採用しており、分合流部の覆工についても、同様に耐火性を確保することが課題であった。

分合流部に使用するコンクリートの仕様を図-3に示す。耐火性を確保する範囲は、床版上の道路空間とし、底版付近と側部については締固め作業が可能であることからスランプコンクリートを、天端付近では締固め作業が困

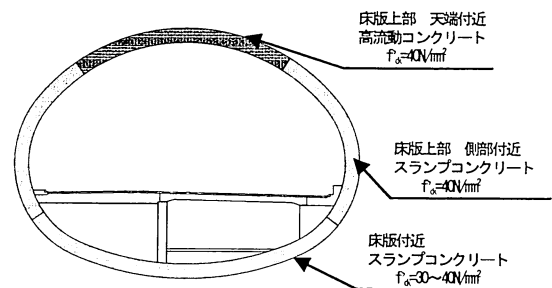


図-3 分合流部覆工構造

難であることから高流動コンクリートを使用することとした。

3. 大口径パイプルーフを用いた非開削工法の立案

(1) 基本方針

a) 地盤変状抑制

地盤変状を抑制するために以下に示す基本方針にもとづき、施工方法を検討した。

- ・地山を支援する部材の剛性を高くして拡幅掘削による地山の変形量を小さくする。
- ・地山を支援するまでの施工過程においても地山の応力解放を少なくする。

b) 施工時の止水性確保

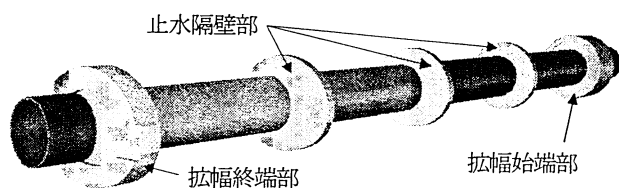
止水性を確保するために以下に示す基本方針にもとづき、施工方法を検討した。

- ・地盤改良による止水効果を確実に得る。
- ・万一の出水に対しても速やかな対応が可能である。

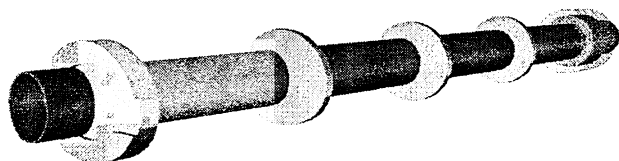
(2) 施工方法の選定

図-4に分合流部の切開き施工手順を示す。分合流部の施工は、トンネル軸方向に大口径パイプルーフ（φ1200）を施工し、パイプルーフ間の地山には、パイプルーフ内から薬液注入を行う。掘削範囲は、本線シールドトンネル、パイプルーフ、薬液注入されたパイプルーフ間の地山からなる遮水ゾーン内となる。パイプルーフか

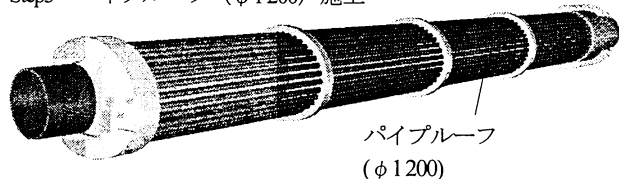
Step1 拡幅始端部、止水隔壁部、拡幅終端部薬液注入工



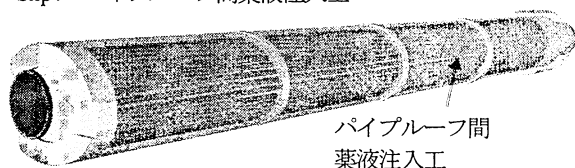
Step2 拡幅始端部パイプルーフ発進基地



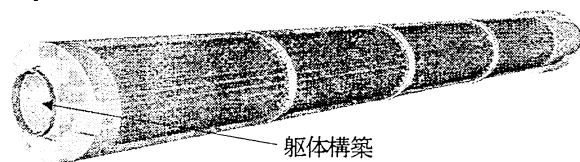
Step3 パイプルーフ (φ1200) 施工



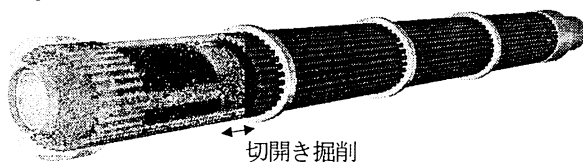
Step4 パイプルーフ間薬液注入工



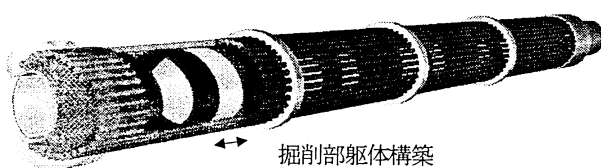
Step5 本線シールト内躯体構築



Step6 切開き掘削 (幅 4.0m)



Step7 切開き掘削部躯体構築,
(次ブロック掘削(3.5m), 掘削部躯体構築)*



※繰り返す

Step8 完成

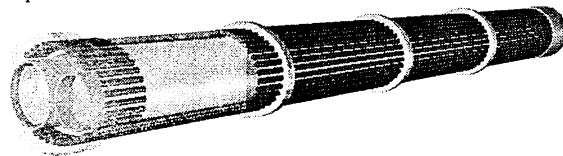
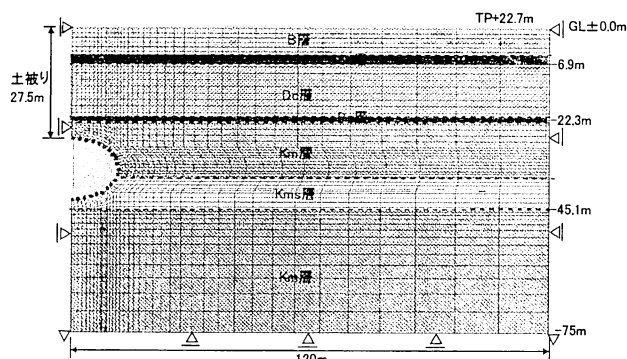
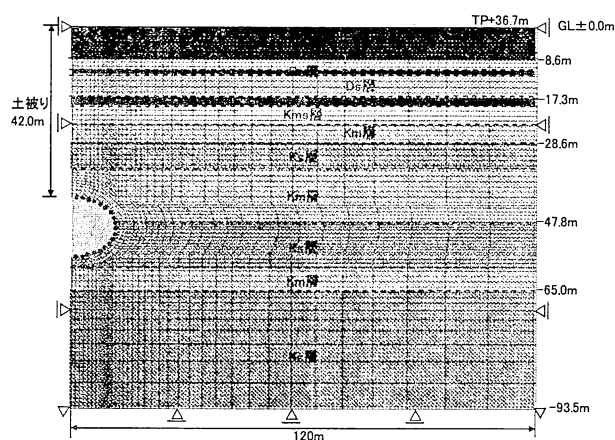


図-4 分合流部施工ステップ図



解析断面A: 土被り最小断面



解析断面B: 土被り最大断面

図-5 3次元FEM解析モデル図

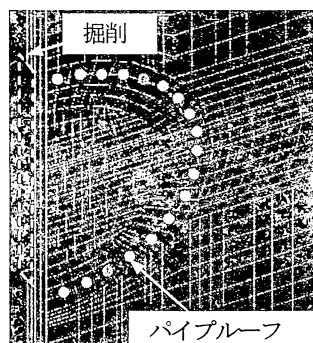
らの薬液注入工を実施することにより、削孔長が短くなり、確実な止水効果が期待できるようにした。また、万が一出水した場合は、パイプルーフ内から追加注入を行う事が可能である。

拡幅掘削は、幅4.0mのスリット状の掘削を行う。この際、掘削部の地山の変形は、掘削両端部の地山により支持された剛性の高いパイプルーフにて支保されるため、変形量を低減できる。拡幅掘削部には、楕円形の覆工を

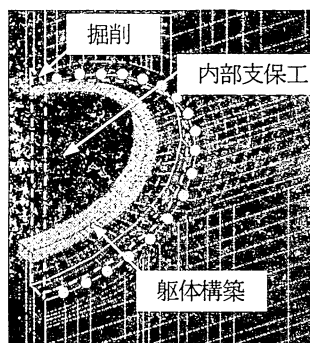
構築し、コンクリート強度発現後に隣接する地山の掘削を行う。隣接する地山の掘削時には、強度発現後の覆工構造と地山により支持されたパイプルーフにて地山は支保されるため、地山の応力解放範囲が低減される。

(3) 地盤に対する影響検討

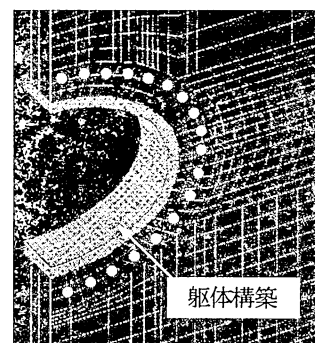
今回、採用した拡幅掘削方法について、3次元FEM解析により地盤に対する影響検討を行った。3次元FEM解



Step1 切開き掘削



Step2 躯体構築, 次ブロック掘削



Step3 次ブロック躯体構築

図-6 3次元解析ステップ図

表-1 地盤条件一覧

	平均 N値	単位体積重量 γ (kN/m ³)	粘着力 C(kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (deg)	変形係数 E(kN/m ²)	ポアソン比 ν	静止土圧 係数 K_0
B	3	14.0	30	0	1 200	0.45	0.82
Lm	5	14.0	160	5	7 000	0.45	0.82
Ac	0	15.5	35	3	3 300	0.45	0.82
Dc	8	15.5	160	5	37 200	0.40	0.67
Ds	36	18.5	60	35	20 000	0.35	0.54
Km	50	18.5	2 020	7	1 720 000	0.35	0.54
Kms	50	19.0	1 840	10	1 968 000	0.35	0.54
Ks	50	19.5	60	42	1 156 000	0.30	0.43

表-2 部材モデル化一覧

	変形 係数 E(kN/m ²)	ポアソン 比 ν	断面積 (m ²)	断面2次 モーメント (m ⁴)
パイプルーフ	2.10×10^8	0.3	0.04479	0.00777
RCセグメント	3.10×10^7	0.2	-	-
内部支保工	2.10×10^8	-	0.01977	-

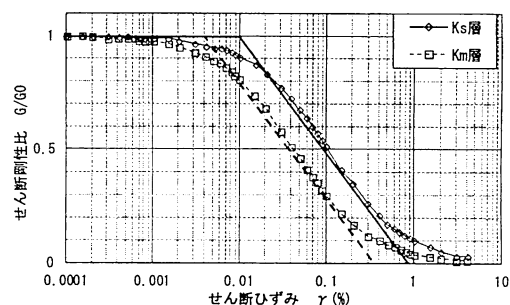


図-7 地盤非線形特性

表-3 3次元FEM解析結果一覧

解析断面	A	B
せん断ひずみ	Dc層: 最大値 3.03×10^{-3} Ds層: 最大値 2.29×10^{-3} Km層: 最大値 2.29×10^{-3} Kms層: 最大値 2.29×10^{-3}	Ks層: 最大値 2.77×10^{-3} Km層: 最大値 2.77×10^{-3} Ks層: 最大値 3.60×10^{-3}
限界せん断ひずみ	Km:0.8%, Kms:1.1%, Ks:1.9%	
地表面沈下量(mm)	8.2	7.8

析モデルおよび解析ステップを図-5, 図-6に示す。

検討に用いた断面は, 全ランプで土被りの最小, 最大の2断面を選定し, 切開き開始時の掘削幅が4.0m, 次ブ

ロック掘削時の掘削幅が3.5mであることから, 切開き開始時の掘削幅の1/2と次ブロック掘削幅をモデル化し, 5.5m幅にて検討を行った。

FEM解析では、地山、パイプルーフ、躯体、内部支保工を表-1、表-2に示す条件にてモデル化を行った。地盤の変形係数は、近傍のボーリングデータより得られたG/G₀-γ曲線を用いて、地山に発生するひずみに応じた剛性低下を考慮した検討を行った。本検討に用いた非線形特性を図-7に示す。

表-3に解析結果の一覧を示す。地山に対する影響は、周辺地山に生じるせん断ひずみが限界せん断ひずみ以下であることから、周辺地山への影響は小さいと判断した。なお、限界せん断ひずみは、弾塑性境界上の最大せん断ひずみと定義したものである¹⁾。また、地表面沈下量は10mm以下であり、地表面傾斜角も1/1 000以下であった。

4. 覆工コンクリートの施工性および耐火性能確認

(1) 基本方針

a) 工程短縮

耐火吹付けや耐火パネルにより耐火性を確保する方法もあるが、工程がかかるという課題がある。当工事では、本線シールドと同様にコンクリートにポリプロピレン短繊維（以下、PP繊維）を混入し、コンクリート自体に耐火性を持たせることとした。

b) 耐火性の確保

首都高では、表-4に示す耐火工の要求性能を規定し、シールドトンネルの耐火設計を行っている²⁾。分合流部においても、シールドトンネルと同様の耐火性を確保することとした。

c) 流動性の確保

近年、耐火性を有するセグメントの施工実績は増えているが、現場打ちで施工する耐火コンクリートは実績が少なく、プラント～坑内運搬およびPP繊維投入によるスランプおよびスランプフローの低下が懸念された。そこで、現場受入、立坑内へのコンクリート運搬、坑内運搬、PP繊維投入、打込みの流れを考慮した配合設計を行った。

(2) 流動性確認

PP繊維の形状は、トラックアジテーター車での攪拌性、繊維投入後のスランプおよびスランプフローの低下量の低減を目的として、セグメントで使用した繊維よりも繊維度を大きくした。セグメントおよび覆工コンクリートに用いた繊維の比較を表-5に示す。

現場施工を想定し、運搬時間、坑内投入運搬、打設直前のPP繊維混入、高速攪拌を模擬し、流動性の確認を行った（図-8参照）。高流動コンクリートの場合のスランプフローの経時変化を図-9に示す。PP繊維混入後の

表-4 耐火工の要求性能

常時	①供用中のトンネル内部環境や走行安全性に影響を及ぼさないこと ②所要の耐久性を有すること ③維持管理が容易なこと
火災時および火災後	④火災によって部材耐力が低下したとしてもトンネルが崩壊に至らないこと ⑤周辺環境に影響を及ぼすような損傷、変形、変状を生じないこと ⑥道路利用者の避難および消火活動に支障を及ぼさないこと ⑦火災後は、火災前と同等の性能を確保できる復旧（補修ならびに補強）が可能であること ⑧人体に有害な物質を発生しないこと

表-5 PP繊維比較一覧

	セグメント	覆工コンクリート
繊維混入量 (vol%)	0.2	0.1
繊維度※ (dtex)	2.2	17
繊維長 (mm)	10	20

※繊維度：繊維の太さの単位 1dtex=1g/10 000m

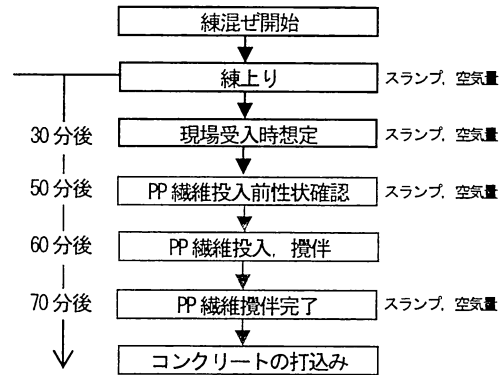


図-8 ワークビリティ確認フロー

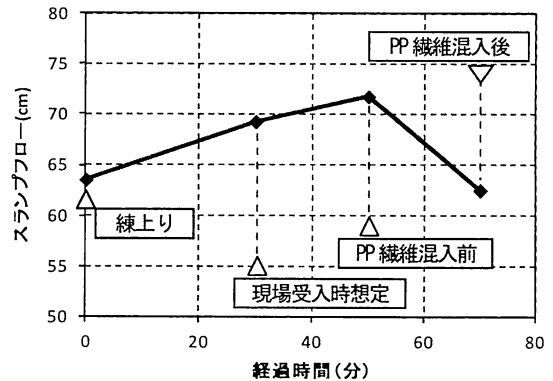


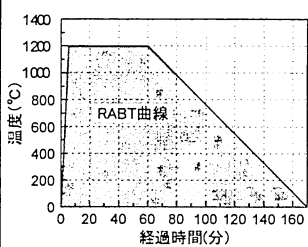
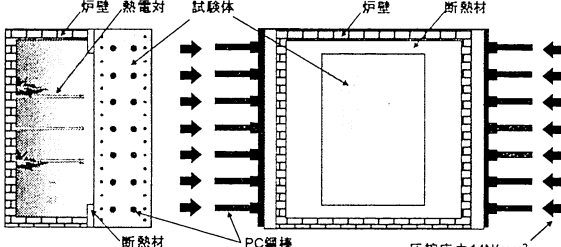
図-9 スランプフローの経時変化

スランプフローは60cm以上であり、十分な流動性を確保することができた。また、ファイバーボールや繊維の分離も認められなかった。

(3) 耐火性確認

火災時のトンネルの安全性に対してはコンクリートの爆裂による断面欠損が及ぼす影響が最も大きいと考えられており、既往の研究からもコンクリートの圧縮応力度

表-6 試験概要

加熱条件	概要図	確認項目
		①加熱によるコンクリート表面の損傷の程度 ・爆裂の有無 (加熱時 CCD カメラによる観察) ・爆裂の深さ ②コンクリートの断面内の温度分布 ③鉄筋の温度(許容温度 300℃以下) ④受熱後の構造物の耐力照査

が大きい程爆裂しやすいことが分かっている。

そこで、耐火試験は、緻密性が高く、耐火に対する条件の厳しい高流動コンクリート（水セメント比 35%）を対象として実施し、設計基準強度 40N/mm^2 に対する許容曲げ圧縮応力度の 14N/mm^2 を全断面に作用させた状態で耐火試験を行った。

さらに、坑内運搬車の重量による繊維混入量管理となるため、コンクリート重量および繊維重量の測定誤差として20%の変動を想定し、その下限値となる混入率0.08%のケースも実施した。

試験体の寸法は、幅 1700mm ×長さ 1900mm ×厚さ 500mm とした。主鉄筋は内面側を D25、外面側を D29 とし、芯かぶりを 130mm とした。また、試験体に圧縮応力を作用させるため、PC鋼棒を14本(7本×2段)配置した。加熱条件は、坑内が 1200°C となる自動車火災を想定した RABT 曲線を用いた。表-6に試験概要を示す。

耐火試験後の試験体の表面状況を写真-1に示す。PP 繊維の混入率が容積比で 0.1% および 0.08% のどちらのケースにおいても、爆裂は発生しなかった。局所的に表層部のはく離が確認されたが、はく離箇所は加熱面の 1.5% 以下であり、平均はく離深さは 1.0mm 以下と極微小の範囲であった。また、加熱時および加熱後に、試験体に崩壊もしくは過大な変形が生じることはなかった。

加熱面からの深さと最高温度の関係を図-10に示す。両ケースとも温度履歴はほぼ一致しており、鉄筋の温度は許容温度(300°C)以下に十分収まることが確認できた。また、断面内の温度分布から、受熱後のコンクリートと鉄筋の残存強度を算出し、設計断面力に対して応力度照査を行った。結果、両ケースともコンクリートのほとんどの領域で応力度が設計強度以下であり、鉄筋の応力度が降伏強度以下であることが確認できた。

(4) 火害を受けた範囲の推定方法の検証

火害を受けたコンクリートの劣化範囲を推定するための簡易な方法として、小型の反発硬度測定器を用いた方法、直接的に圧縮強度分布を測定する方法および

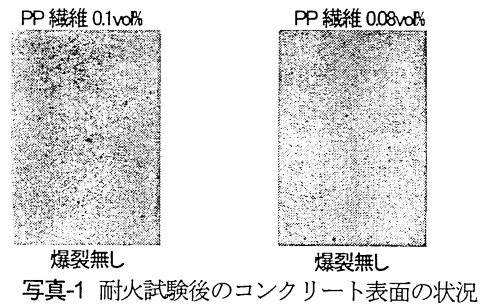


写真-1 耐火試験後のコンクリート表面の状況

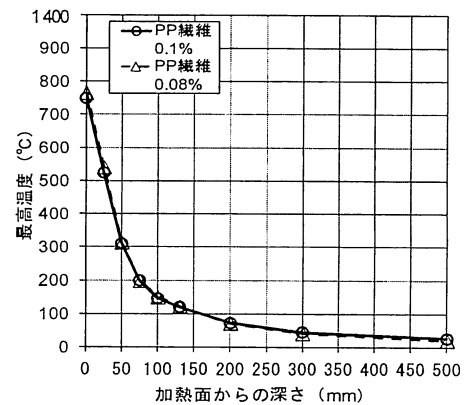


図-10 加熱面からの深さと最高温度の関係

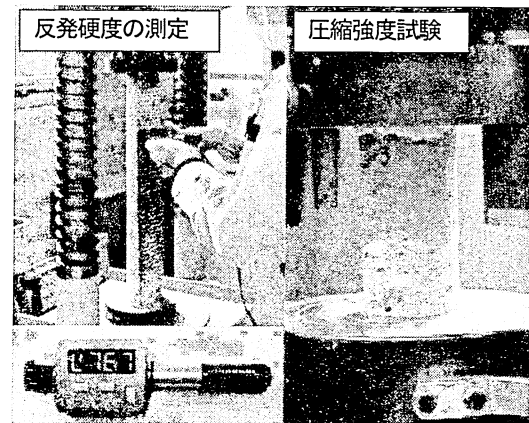


写真-2 反発硬度測定および圧縮試験状況

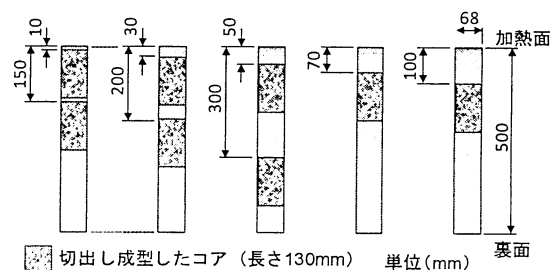


図-11 圧縮強度試験用のコアの採取方法

中性化深さの測定による方法について、実験的に検証を行った。

a) 小型の反発硬度測定器を用いた方法

試験体よりφ100mmのコアを採取し、断面を半分に切断し、表面の反発硬度分布を小型の測定器を用いて測定した（写真-2）。加熱面から200mmまでは1cm間隔で、200mm以深は2cm間隔で測定した。試験は、JSCE-G 504に準拠して行った。打撃点数は20点とし、それぞれの偏差が平均値の±20%以上となる値があれば、その測定値を捨て、これに代わる測定値を補った。

b) 直接的に圧縮強度分布を測定する方法

試験体よりφ68mmのコアを採取し、加熱面から10、30、50、70、100、150、200および300mmの位置から長さ130mmに切り出して圧縮強度試験を行った（図-11、写真-2）。試験は、JIS A 1107に準拠して行った。

加熱によるコンクリートの残存圧縮強度分布を図-10に示す温度分布と既存資料²⁾に示される図-12により推定した（以下、推定値と呼称）。反発硬度と圧縮強度の測定結果から、それぞれの測定値を加熱による影響が小さい150mm以深の測定値の平均値で除して無次元化した値と、推定値との比較を図-13に示す。反発硬度と圧縮強度の分布は、ほぼ一致した。圧縮強度が大幅に低下すると想定される50mmより浅い部分においては、測定値が推定値を上回っており、図-12に示される火災後のコンクリートの残存強度の関係から構造物の照査を行うことは、安全側であると判断した。

中性化深さの測定結果を写真-3に示す。中性化深さは22mmであった。水酸化カルシウムが熱分解する温度が500～580℃とすると³⁾、加熱試験から得られた最高温度分布（図-10）で500～580℃に達する深さは21～30mmであり、中性化深さと一致したことから、劣化範囲の推定が可能であると考ええる。

5. まとめ

シールドトンネル内部からの非開削切開きによる分合流部の施工方法として、トンネル軸方向に剛性の高いパイプルーフを打設し、拡幅掘削をスリット状に行うことで、周辺地山への影響を抑制できることを3次元FEM解析により確認した。シールドトンネル、パイプルーフおよび薬液注入されたパイプルーフ間の地山により構成された遮水ゾーンとすることで、パイプルーフ間の削孔長を短くし、薬液注入工の止水効果を確実にものとした。

分合流部覆工に用いる耐火コンクリートについては、施工時の坑内運搬、PP繊維投入を想定して実機ミキサーおよびアジテータトラックを用いた施工試験を実施し、十分なワーカビリティを確保できることを確認し

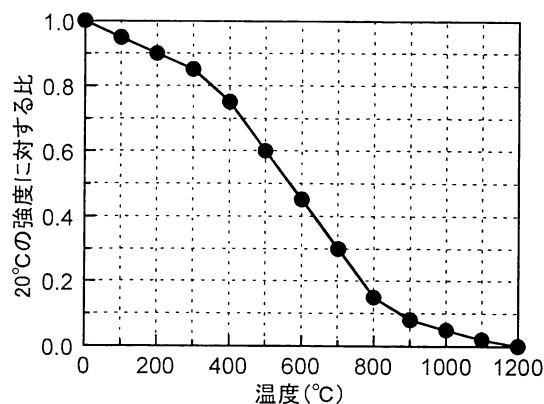


図-12 コンクリートの残存圧縮強度分布²⁾

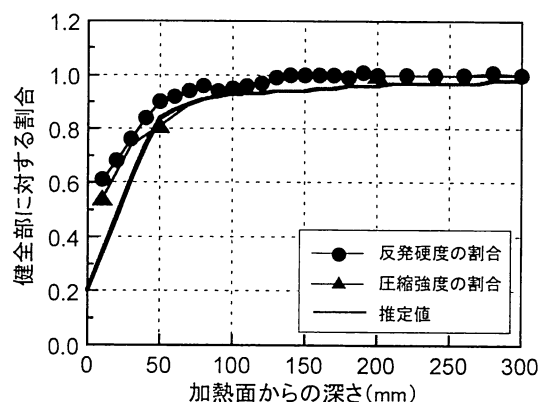


図-13 反発硬度および圧縮強度の推定値との比較

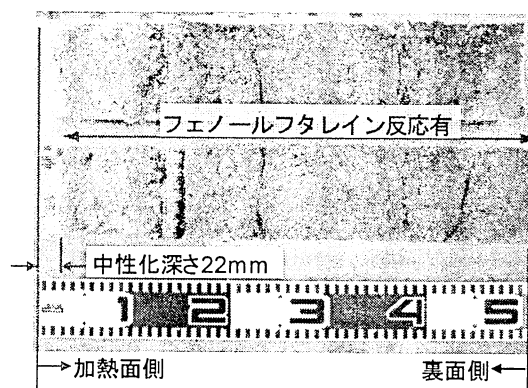


写真-3 中性化深さの測定状況

た。さらにPP繊維を混入した現場打ちコンクリートについて、耐火性の確認を行った。PP繊維混入率0.1%、0.08%（容積比）のいずれのケースにおいても十分な耐火性を確認した。

また、火災後の残存強度分布を反発硬度測定器および圧縮強度試験による測定を実施し、無次元化することで、両者に相関関係が確認できたことから、火災後の劣化範囲の推定に反発硬度測定器が有効であることを確認した。

当工事の進捗は、平成24年8月現在、シールドは馬場換気所付近を掘進中であり、分合流部では、パイプルーフ発進基地の構築の準備を進めている。本計画の施工結果については、別途報告を行う。

本稿が他の同様な工事の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 桜井春輔, 清水則一, 松室圭介: 計測変位に基づく地下空洞周辺地山に発生する塑性領域の推定法, 土木学会論文集, 第 394 号/III-9, pp.89-96, 1988
- 2) 首都高速道路(株): トンネル構造物設計要領(シールド工法編), 第 3 編, 2008
- 3) 土木学会: コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集 コンクリート技術シリーズ 63, p.212, 2004

(2012.9.3 受付)

TECHNICAL COUNTERMEASURES AGAINST THE CONSTRUCTION OF ROAD TUNNEL RAMP UNDER THE RESIDENSIAL DISTRICT

Kazuhiro TSUNO, Eiji OCHIAI, Naruhiko KAWADA,
Tsuyoshi FUJII and Tatsuya TAKAHAMA

In the urbun area, Shield tunneling method and urbun NATM tunnel lining method are generally used to prevent the relocation of inhabitat and the traffic congestion. In case of road tunnel, it become common to construct the ramp from the inside of the shield tunnel without trenching throughout.

This paper reports that the countermeasures against the deformation of soil caused excavation and lowering the ground water level, and the fireproof concrete used tunnel lining.