

S F R Cセグメントの耐火性について THE APPLICATION OF FIREPROOF SFRC SEGMENTS

森 健太郎¹・松原 健太²・林 成卓³・屋代 勉⁴
Kentaro MORI・Kenta MATSUBARA・Masataka HAYASHI・Tsutomu YASHIRO

Metropolitan Expressway Company is currently constructing the Metropolitan Expressway Yokohama Circular Northern Route (Northern Route below) In the Northern Route shield tunneling project, parallel tunnels are constructed for a length of 5.5 km . Steel fiber reinforced high fluidity concrete (SFRC below) segments were applied to this project. SFRC segments are made by mixing high fluidity concrete with steel fibers and polypropylene fibers. This paper mainly describes the result of full scale performance test for fireproof.

Key Words :fireproof,concrete segment,polypropylene fibers,shield tunnel

1. はじめに

首都高速道路株式会社は，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にあたる横浜環状北線の整備を進めており，そのうち横浜環状北線シールドトンネル工事は，延長約5.5kmの併設トンネルをシールド工法により構築するものである．

シールドトンネルは二次覆工を省略しており，セグメントには高い耐久性と耐火性が要求されるため，本工事では鋼繊維補強高流動コンクリート（S F R C）セグメントを適用することとした．S F R Cセグメントは，高流動コンクリートに鋼繊維とポリプロピレン繊維を混入して製作するセグメントで，鋼繊維の効果により耐久性を向上させ，ポリプロピレン繊維の効果により火災時の爆裂を防止するものである．セグメントの適用にあたっては，設計で期待している曲げ剛性，曲げ耐力を有しているかを構造性能試験により確認し，耐火性を評価するために設計断面力を導入した実大規模の耐火試験を実施した．

本稿では，S F R Cセグメントの概要と，適用にあたって実施した試験のうち，主に耐火試験の詳細について述べる．

2. 工事概要

本工事は，新横浜発進立坑から子安台換気所までの約5.5kmの併設トンネルを2台のシールドを用いて構築するものである．各トンネルには，それぞれ出口と入口が1箇所ずつ，合計4箇所の分合流拡幅工事がある．セグメントは，外径φ12.3m，桁高400mm，幅2000mmで二次覆工は施工しない．表-1に工事概要を，図-1に地質縦断面図を示す．

表-1 工事概要

◆シールド工事	
泥土圧シールド（気泡）	シールド外径φ12,490mm×掘削延長 約5.5km×2本
覆 工	耐火型SFRCセグメント（鋼繊維補強高流動コンクリート） 外径φ12,300mm 桁高400mm 幅2,000mm 9分割 継手構造 セグメント間：先付け水平コッター リング間：部分ほぞ+ブッシュ+リブ
床 版	プレキャストPC床版 長さ8,150mm 幅2,000mm 厚さ330mm
◆馬場出入口分合流拡幅部工事	
分合流拡幅部	出入口4箇所
◆新横浜発進立坑躯体構築工事	
躯体構築	I式

キーワード：耐火，セグメント，ポリプロピレン繊維，シールド

¹正会員 首都高速道路株式会社 課長代理

²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 監理技術者

³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 工事長

⁴正会員 株式会社大林組 主任

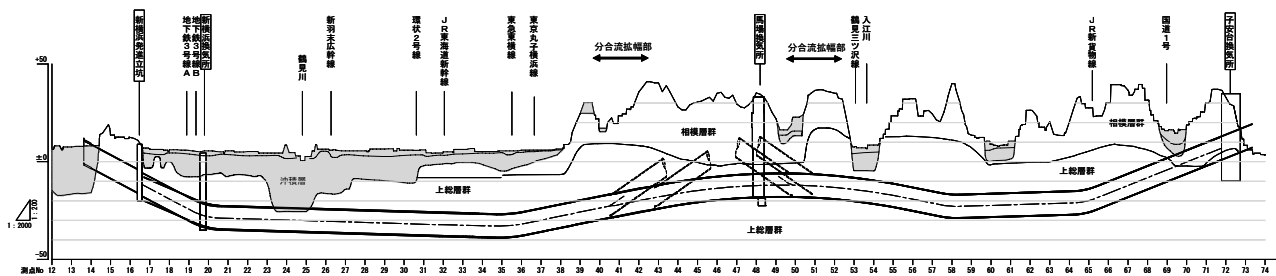


図-1 地質縦断面図

シールドトンネルの土被りは11m～56mで、主に硬質な上総層群を掘削するが、最大0.5MPaに被圧された地下水圧が作用しているため、覆工には高い耐久性を確保する必要がある。さらに道路トンネルであるため、自動車火災に対して必要な耐火性を確保していなければならない。

3. SFRCセグメントの概要

本工事で適用するSFRCセグメントは、鋼繊維とポリプロピレン繊維を混入した高流動コンクリートを用いて製作するセグメントである。SFRCセグメントと従来型RCセグメントの構造概念を図-2に、SFRCセグメントの特徴を表-2に示す。

SFRCセグメントは、鋼繊維の効果により覆工品質や耐久性が向上し、さらに主鉄筋量の低減や配力筋・フープ筋の省略を行うことが可能である¹⁾。また、ポリプロピレン繊維の効果により耐火性が確保できるため耐火被覆材の設置を省略することができる。

なお、本工事のSFRCセグメントについては、配力筋は省略しているが、供用時のセグメントの応力状態が軸圧縮力卓越であるため、設計時に鋼繊維補強によるコンクリートの引張応力を考慮せず主鉄筋量の低減は行わなかった。

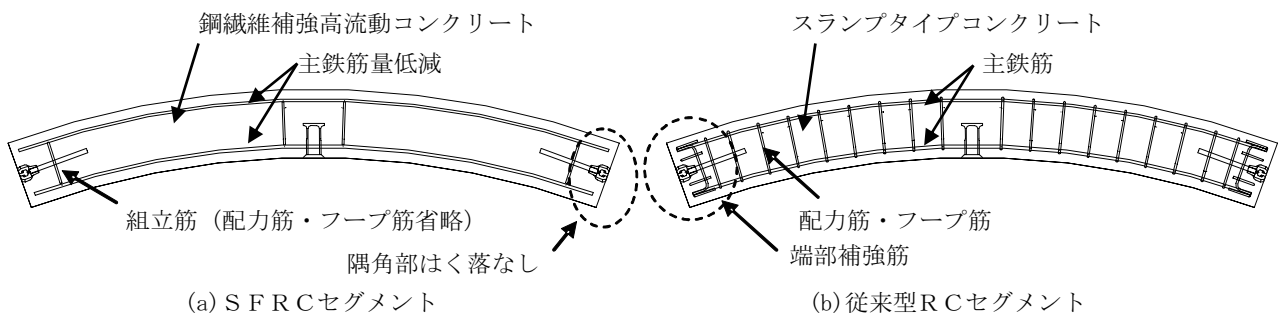


図-2 セグメントの構造概念

表-2 SFRCセグメントの特徴

1. 覆工品質・耐久性が向上	- 鋼繊維により、ひび割れが分散し、ひび割れ幅が低減 - 鋼繊維により、コンクリート内部の鉄筋を防食
2. 構造性能が向上	- 鋼繊維の混入により、じん性やせん断強度が増加 - 鋼繊維の混入による応力分散性能により配力筋・フープ筋の省略が可能 - 鋼繊維の混入による引張強度を期待することで主鉄筋の低減が可能
3. 耐火性の確保	- ポリプロピレン繊維の混入により、セグメントの耐力に影響を及ぼす爆裂を防止 - 耐火被覆材でセグメント表面を覆わないためメンテナンス性に優れる (セグメントの目視点検が可能・耐火被覆材の落下の心配がない)

4. 構造性能試験

1) 概要

本工事への適用にあたり、SFRCSegメントが設計で期待している強度を有していることを確認するため、構造性能試験を実施した。ここでは、Segメント主断面に対しての「単体曲げ試験」について記述するが、別途、「継手曲げ試験」「推力試験」も実施しており、所要の強度を有していることを確認している。

2) 単体曲げ試験の試験結果

単体曲げ試験の試験体としては、本工事に適用するSegメント（9分割）のA型Segメントを使用した。コンクリート設計基準強度は 42N/mm^2 、鋼繊維の混入率は $0.6\text{vol}\%$ で、配力筋を省略している。

図-3に単体曲げ試験における荷重－変位関係を示す。

ひび割れ発生までの荷重－変位関係は計算値と同等であり、本Segメントは設計で考慮している曲げ剛性を有していることが分かる。ひび割れは、計算値 147kN に対して 300kN で発生し、最大荷重は、計算値 436kN に対して 798kN であった。その後は、荷重を保持した状態を保ちながら変位が進行しており、Segメントが十分な変形性能を有していることが分かる。

本試験では、実測値が計算値を大きく上回った。その要因としては、図-3、表-2に示すように、コンクリートや鉄筋の実強度が設計値よりも大きいことに加えて、今回の設計では考慮していない鋼繊維の補強効果が考えられる。

単体曲げ試験の結果から、SFRCSegメントは設計で期待している強度を十分満足していること、また、鋼繊維の補強効果により構造性能が向上し、より安全な構造であることを確認した。

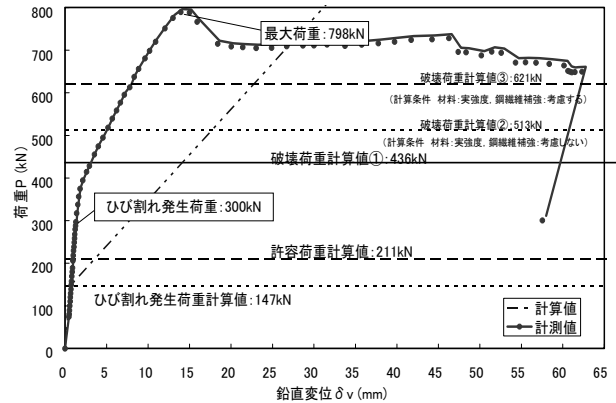


図-3 単体曲げ試験の荷重－変位関係

表-2 材料実強度と鋼繊維補強によるコンクリート引張応力を考慮した破壊荷重計算値と実測値の比較

	計算条件		破壊荷重 計算値	実測値
	材料強度	鋼繊維補強 によるコンクリート の引張応力		
①	設計強度	考慮しない	436kN	798kN
②	実強度※	考慮しない	513kN	
③	実強度※	考慮する	621kN	

※コンクリート圧縮強度： 56.6N/mm^2 （一軸圧縮試験より）
鉄筋降伏強度： 392.8N/mm^2 （鋼材検査証明書より）

5. 耐火試験の概要

1) 要求性能

首都高速道路では、表-3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。「常時」に関する項目は、供用中のトンネル内部環境や走行安全性ならびに、耐久性・維持管理性を確保するために定めたものである。また、「火災時および火災後」に関する項目は、避難環境ならびに消火

表-3 耐火要求性能

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 火災後 および	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

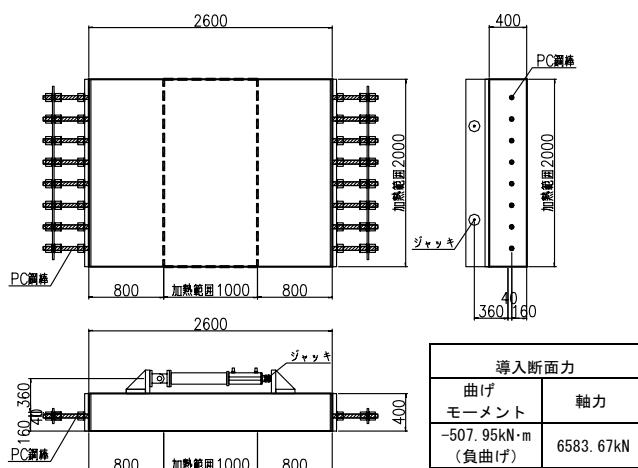


図-4 ケース1試験体（セグメント本体部）

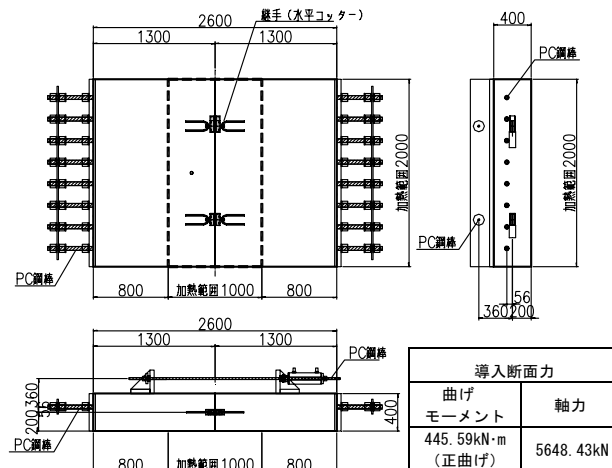


図-5 ケース2試験体（セグメント継手部）

活動環境の確保、火災時ならびに火災鎮火後も含めたトンネルの過度な変形・崩壊の防止、また、それらによる地表面の沈下や陥没、周辺構造物の変状等の二次災害防止のために定めたものである。

SFRCセグメントは、セグメント自体に耐火機能を付与しており耐火被覆材は設置しないため、「常時」の要求性能については満足しており、「火災時および火災後」の要求性能に対して照査することとした。

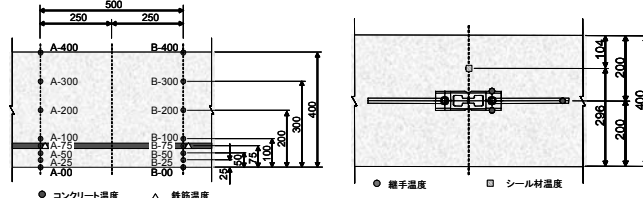


図-6 熱伝対設置位置

2) 耐火試験方法

a) 概要

火災による損傷の程度、部材内温度分布、爆裂現象等は、覆工の規模、コンクリートの配合、継手の有無および応力状態の違い等で異なる。そこで、試験体は、実大規模、同一配合で、継手の有無を再現し、設計断面力を導入して耐火試験を行うことで、要求性能を照査することとした。

b) 試験体概要

試験体の概要を図-4、図-5に示す。試験体は、実際のセグメントを模擬して幅2000mm×長2600mm×厚400mm（加熱面：幅2000mm×長1000mm）の平板型とし、セグメント本体部を模擬した試験体（ケース1）とセグメント継手部を模擬した試験体（ケース2）の2種類とした。

各試験体断面内にはPC鋼棒を偏心させて配置するとともに、試験体外部（非加熱面側）からジャッキもしくはPC鋼棒により荷重を作用させることで断面力を導入した。ケース1に導入する断面力は、爆裂に対して厳しい条件を想定して、セグメント内面の圧縮応力度が最も大きくなる負曲げの設計断面力とした。また、ケース2に導入する断面力は、シール材および継手金物に対して厳しい条件を想定して、継手部の目開きが助長される正曲げ最大モーメントの設計断面力とした。

各試験体には図-6の位置に熱伝対を配置し、コンクリート断面内の温度分布や各部位の温度を測定した。

c) 加熱方法

加熱方法の概略を図-7に示す。汎用耐火炉上部に試験体を設置しRABT曲線（図-9、図-10参照）にて加熱した。その際、熱が支承やPC定着部に伝わらないように、支承を載せるH鋼材周辺部は断熱材で被覆した。また、試験期間中は、試験体に導入する曲げモーメントが所定の値を下回らないように、試験体外部の荷重を制御した。なお、試験体の表面状態は、加熱中もCCDカメラを用いることで、汎用耐火炉側面の小窓より観察した。

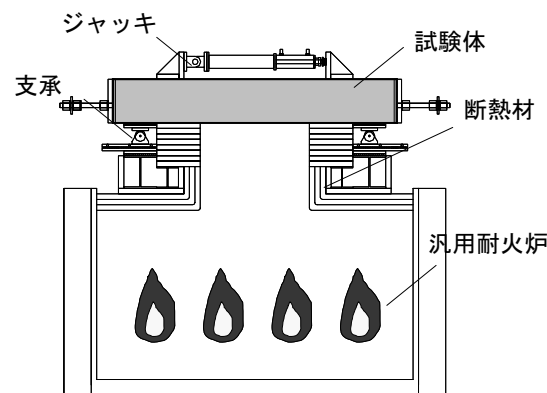


図-7 加熱方法の概要

d) 確認項目

表-3に示した「火災時および火災後」の要求性能に対して、今回の耐火試験で確認した項目と判定基準を表-4示す。

火災時の要求性能に対しては、爆裂の状況や試験体の外観を観察して、加熱時および加熱後にも所定の設計断面力を保持し、崩壊や過大な変形が生じないか確認した。また、セグメント内部の受熱温度分布を測定し、鉄筋については許容温度を300℃、継手金物については許容温度を350℃と定め、許容値以下であるか確認した。コンクリートについては、受熱温度に応じて低下するコンクリート強度を算定して応力度照査を行い、安全性を評価した。

火災後の要求性能に対しては、補修が困難である地山側シール材に着目し、シール材の受熱温度が著しい劣化を生じない温度（100℃）以下であるか確認した。

なお、表-3に示した有害物質の発生に関する要求性能⑧については、別途、発熱性試験を行うことで要求性能を満足していることを確認した。

表-4 耐火試験における確認項目と判定基準

照査する 要求性能 ^{注)}	耐火試験における確認項目	判定基準
④⑤⑦	加熱時および加熱後の試験体の外観	加熱時および加熱後に崩壊もしくは過大な変形を生じないこと
④⑤⑥⑦	爆裂の状況	耐力に影響を及ぼすような爆裂等を生じないこと
④⑤⑦	構造部材の受熱温度 (コンクリートおよび鉄筋、継手の受熱温度)	鉄筋：300℃以下 継手金物：350℃以下 継手アンカー筋：300℃以下 コンクリートの受熱による強度低下を考慮した応力度照査により安全性が確認できること
⑦	地山側シール材位置の受熱温度	100℃以下

注) 記載の数字 (①～⑦) は表-3 の「火災時および火災後」における要求性能を示す。

6. 耐火試験結果

1) 試験体の外観と爆裂の状況

いずれのケースでも、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く、設計断面力を保持することができた。加熱した部位を、50mm間隔で測定した結果を図-8に示す。コンクリート表面に、わずかな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程度と小さかった。

2) 構造部材および地山側シール材の受熱温度

コンクリートおよび鉄筋の温度履歴を図-9、図-10に、ケース2の継手部および地山側シール材位置の温度履歴を図-11に示す。コンクリートの温度分布は、加熱面から離れるほど低く、いずれのケースとも同様の温度履歴の傾向を示している。

鉄筋、継手および継手アンカー筋の最高温度は、加熱面から同距離にあるコンクリートと同程度であり、いずれも許容温度以下であった。コンクリートについては受熱温度に応じて低下したコンクリート強度を算出し、設計断面力に対する応力度照査を行った結果、安全性を確認することができた。

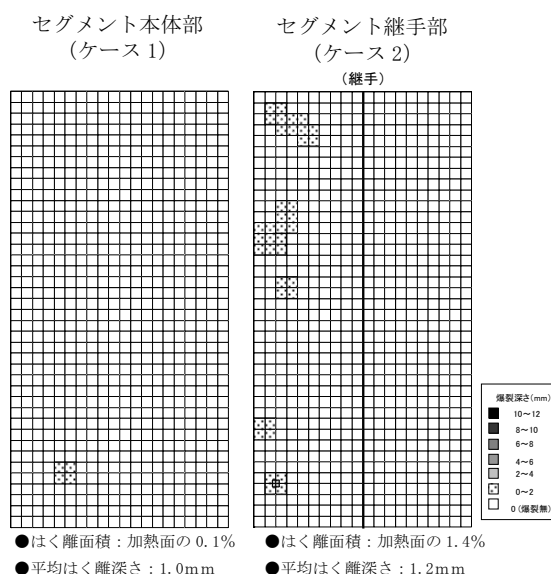


図-8 はく離深さ測定結果

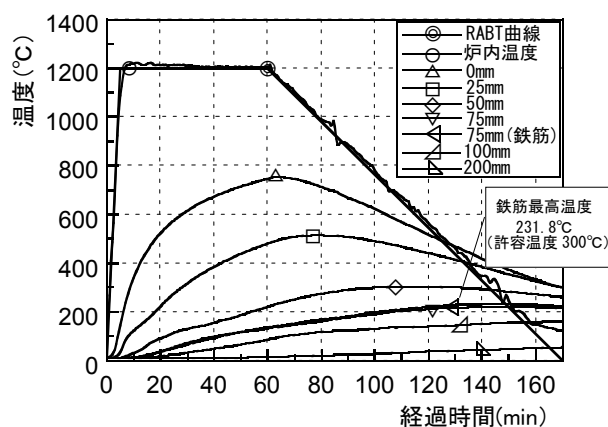


図-9 ケース 1 コンクリート・鉄筋の温度履歴

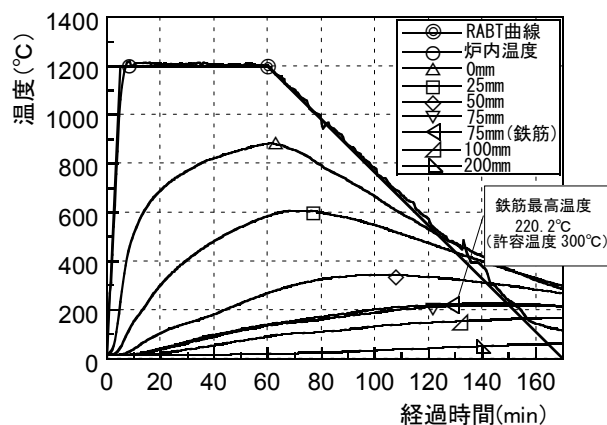


図-10 ケース 2 コンクリート・鉄筋の温度履歴

また、地山側シール材位置については、最高温度が64.6℃で許容温度の100℃以下であることが確認できた。

3) 耐火試験結果のまとめ

耐火試験結果を表-5にまとめる。いずれも判定基準を満足するものであることから、本工事で適用するSFRCSegメントは、表-3に示した「火災時および火災後」における要求性能を確保していると判断した。

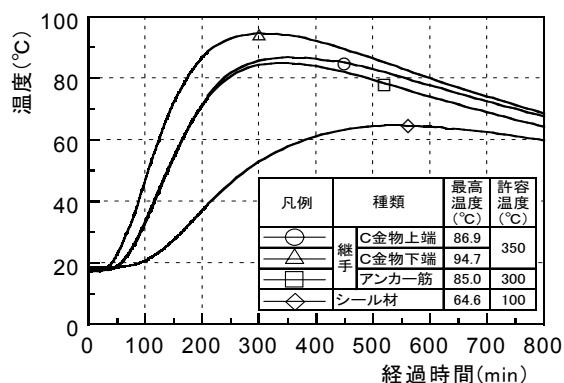


図-11 ケース 2 継手部・シール材位置の温度履歴

表-5 耐火試験結果のまとめ

確認項目	判定基準	試験結果	
		ケース 1 (セグメント本体部)	ケース 2 (セグメント継手部)
加熱時および加熱後の試験体の外観	加熱時および加熱後に崩壊もしくは過大な変形を生じないこと	崩壊・過大な変形なし	崩壊・過大な変形なし
爆裂の状況	耐力に影響を及ぼすような爆裂等を生じないこと	表面の一部がはく離 はく離面積：加熱面の 0.1% 平均はく離深さ：1.0mm	表面の一部がはく離 はく離面積：加熱面の 1.4% 平均はく離深さ：1.2mm
部材最高温度	鉄筋：300℃以下	231.8℃	220.2℃
	継手金物：350℃以下	—	上端：86.9℃ 下端：94.7℃
	継手アンカー筋：300℃以下	—	85.0℃
	地山側シール材：100℃以下	—	64.6℃
	コンクリートの強度低下を考慮した応力度照査により安全性が確認できること	安全	安全

7. おわりに

構造性能試験および耐火試験により、SFRCSegメントは、二次覆工省略の道路シールドトンネルのセグメントとしての要求性能を満足していることを確認した。本稿が、耐火性が要求されるシールドトンネル計画の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 土橋ほか：鋼繊維補強コンクリートのシールドセグメントへの適用，構造工学論文集 Vol.52A，土木学会，2006.3