

首都高速横浜環状北線への 耐火型SFRCセグメントの適用

津野 和宏¹・足立 義彦²・松原 健太³・近藤 由也⁴

¹正会員 博(工) 首都高速道路(株)神奈川建設局設計グループ (〒221-0013 神奈川県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)神奈川建設局設計グループ (〒221-0013 神奈川県横浜市神奈川区新子安1-2-4)

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
(〒223-0059 神奈川県横浜市港北区北新横浜2-7-13)

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 神奈川県横浜市港北区北新横浜2-7-13)

道路トンネルの覆工は、耐久性に加えて、トンネル内で火災が発生してもトンネルの構造性能を確保できるよう耐火性を確保していることが必要である。横浜環状北線のシールドトンネルは、二次覆工を省略するため、高流動コンクリートに有機短繊維と鋼繊維を混入して製作した耐火型SFRCセグメントを適用することとした。

本工事への適用にあたって、耐火性に関しては、有機短繊維と混和材をパラメータとした鋼繊維補強高流動コンクリートの要素耐火試験と設計断面力を導入した実大規模の耐火試験を実施し、また、曲げ剛性および曲げ耐力に関しては、各種構造性能試験を実施し、それぞれ要求性能を満足することを確認した。

本稿では、耐火型SFRCセグメントの適用にあたって実施した耐火試験と構造性能試験の詳細について述べる。

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

1. 工事概要

現在、首都高速道路株式会社（以下、首都高）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」と首都高速道路横浜羽田空港線「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、2 参照）。北線では、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た。

図-3 にシールドトンネル部地質想定縦断面図を示す。横浜環状北線シールドトンネル工事は、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台のシールドマシン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箇所の分合流部がある。

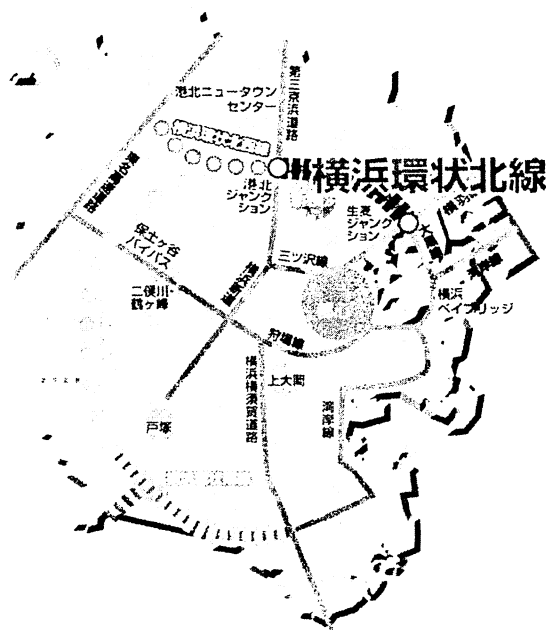


図-1 事業概要

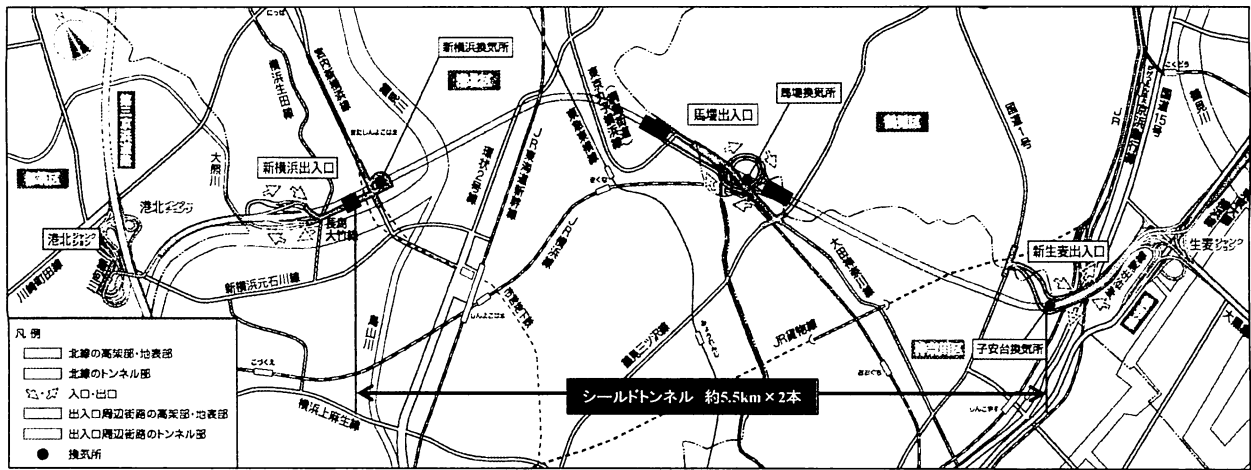


図-2 路線平面図

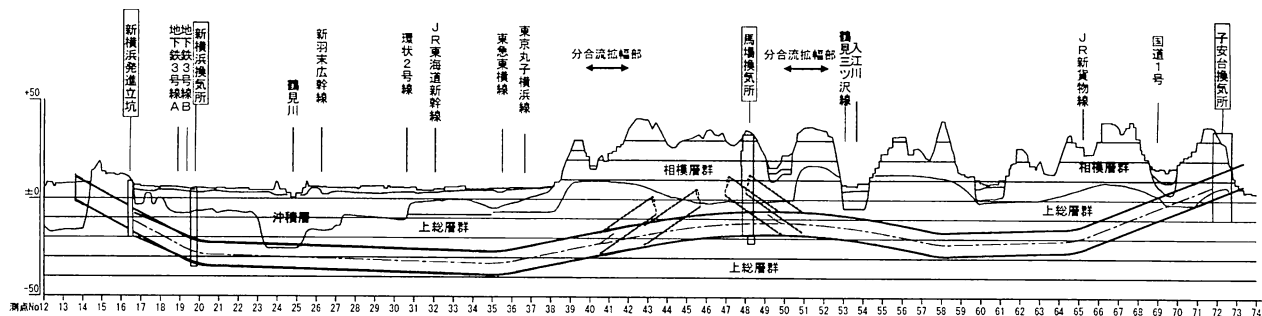


図-3 シールドトンネル部の地質想定縦断面図

シールドトンネルの土被りは 11m～56mで、掘削対象土質は泥岩 (Km) , 砂質泥岩 (Kms) , 砂・砂岩 (Ks) が主体で、N値はいずれも 50 以上、Km および Kms の一軸圧縮強度は 1000kN/m²以上と硬質な地盤である。ただし、鶴見川付近と国道 1 号付近においては、N 値 3 程度の沖積層がトンネル頂部まで達している。Ks 層の透水係数は 10⁻³ オーダーであり、トンネルには最大 0.5MPa の水圧が作用する。

シールドトンネル部は、全線を通じて縦流換気方式を採用しており、図-4に示すように床版上部は車両の走行空間 (2車線+全路肩)、床版下部は避難通路、維持管理用通路、機器設置・機器配管スペース、ケーブルラック設置スペースとして使用される。

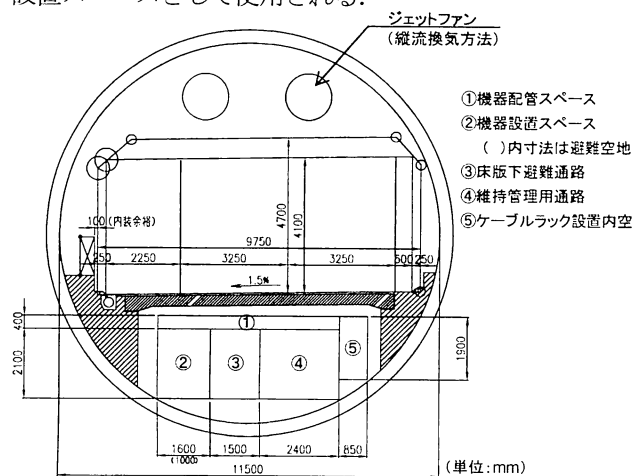


図-4 トンネル断面図 (一般部)

2. 道路トンネル覆工の要求性能と改善事項

道路トンネルの覆工は、耐久性に加えて、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していることが必要である。従来、シールド工法により構築した道路トンネルにおいては、二次覆工が耐火機能を果たしていた。しかし、近年は、コスト削減や工期短縮への取組みから二次覆工を省略する事例が多く、首都高速中央環状新宿線では、セグメント内面に耐火吹付けや耐火パネルを施工することにより耐火性を確保した。また、首都高速中央環状品川線においては、さらなるコスト削減・工期短縮と維持管理 (点検容易性) に対する配慮から、コンクリートに有機短繊維を混入し耐火機能を有した RC セグメントを適用した。

北線においては、自己充填性を有する高流動コンクリートに有機短繊維と鋼繊維を混入して製作した耐火型鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント (以下、耐火型 SFRC セグメント) の適用を試みることにした。

3. SFRCセグメントの概要

鋼繊維のみを混入した鋼繊維補強高流動コンクリートセグメント (以下、SFRC セグメント) は、耐久性の向上を目的として開発したもので、既に実施工に適用しており、中央環状新宿線において 60 リング (セグメント

幅 1.5m) 試験採用している。

SFRC セグメントと従来の RC セグメントの構造概要図を図-5 に示す。SFRC セグメントの開発にあたって実施した構造性能確認試験の一覧を表-3 に示す。一般に、コンクリートに鋼繊維を混入すると、コンクリートの引張強度が期待でき、せん断強度が増加することが知られている。鋼繊維を 0.6vol%混入した SFRC セグメントについては、これまで実施した構造性能確認試験により、従来の RC セグメントに対して、セグメントの曲げ耐力の向上やせん断耐力の向上が図られ、配力筋やフープ筋を省略しても従来の RC セグメントと同等の構造性能が得られることを確認している。本工事の SFRC セグメントにおいては、鋼繊維の混入率 0.6vol%とし、配力筋およびフープ筋を省略するものとした。また、供用時の応力状態が軸圧縮力卓越であるため、鉄筋量は最小鉄筋量とした。

SFRC セグメントの製作においては、高流動コンクリートにより製作時にテーブルバイブレータが不要、鉄筋量が少なくコンクリートの充填に有利など、製作性が大きく向上し、品質の確保が容易となる。さらに、ひび割れ防止効果や主鉄筋の防錆効果によって、耐久性が向上するなどの利点も挙げられる^{1)~3)}。

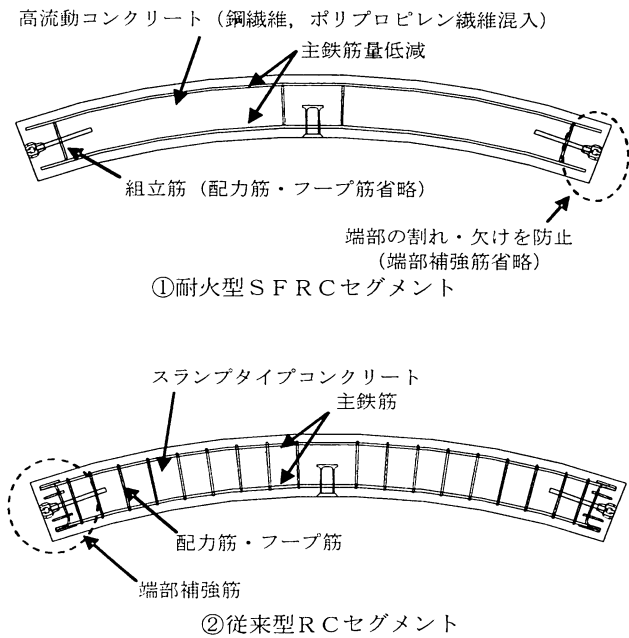


図-5 セグメント構造概要図

表-3 SFRCセグメントの構造性能確認試験一覧表

項目（性能）		セグメントに対する補強効果	性能・効果の確認	
			セグメント性能確認試験	試験結果
鋼繊維	耐久性	ひび割れが分散して発生し、ひび割れ幅は小さくなる。	・単体曲げ試験	供試体に曲げひび割れが分散して発生することを確認した。
		万一、セグメントに損傷があった場合でも、コンクリート片のはく離、はく落防止できる。	・充填分散状況確認試験 （供試体作成、断面切断）	X線写真撮影により、鋼繊維が均等に分散していることを確認した。
			・推力試験	掘進時のシールドジャッキ推力に対して、ひび割れの発生がないことを確認した。
			・端面はく離誘発試験	従来のRCセグメントに比べ、はく離に対する抵抗性が高いことを確認した。
	構造性能	所要の強度の確保およびじん性向上により、トンネルのぜい性破壊を防止する。	・単体曲げ試験 ・曲げ圧縮破壊試験	従来のRCセグメントと同等の曲げ強度および変形性能を有していることを確認した。 圧縮破壊が鉄筋の座屈に起因せず、コンクリート強度で決定されることを確認した。
			・単体曲げ試験	従来のRCセグメントと同等の曲げ強度および変形性能を有していることを確認した。
		セグメントのせん断耐力が向上する。	・曲げ試験 （主鉄筋応力分布確認試験）	配力筋を省略した場合でも従来のRCセグメントと同等の主鉄筋の応力分布であることを確認した。
		セグメントのせん断耐力が向上する。	・リング継手(ほぞ)せん断試験	ほぞを設置した場合、リング継手(ほぞ)のせん断強度が増加することを確認した。

4. 耐火型SFRCセグメントの開発概要

(1) 開発にあたっての課題

トンネル内火災による覆工コンクリートの爆裂原因の一つとして、コンクリート内の水分が気化する際に発生する水蒸気圧によって、表層のコンクリートがはく離する水蒸気圧説が挙げられる。この対策として、昨今では、有機短繊維をコンクリート内に混入しておき、高温履歴を受けた際に、この有機短繊維が熔融・気化して水蒸気圧を逃がす空隙を形成させる方法がとられる。

この考え方をもとに、本工事では、有機短繊維を混入することによって、セグメント自体に耐火機能を確保させることとした。しかし、鋼繊維による補強が耐火性に与える影響については、爆裂深さが低減するとの見解もあるが、はっきりとは解明されていない。また、一般に高流動コンクリートは、単位水量が増加しやすいことと、水結合材比が小さく内部組織が緻密になりやすいことから、爆裂しやすいとの報告もある。そのため、耐火型SFRCセグメントの耐火性能の検証を行った。

(2) 開発の方向性

耐火型 SFRC セグメントの開発フローを図-6 に示す。

ステージ1では、鋼繊維補強高流動コンクリート（以下、高流動 SFRC）の混和材の種類と、爆裂抑制に対して効果的であるポリプロピレン繊維（以下、PP 繊維）の種類をパラメータとした要素耐火試験を実施し、各種配合について爆裂抵抗性を検証し、その結果から配合の選定を行うこととした。

ステージ2では、ステージ1で選定した配合において、耐火性に関する要求性能を満足することを確認するため、設計断面力を導入した実大規模耐火試験を実施し、爆裂抵抗性および断面内温度分布の検証を行うこととした。

ステージ3では、耐火型 SFRC セグメントの強度に関する要求性能が満足されることを確認するため、実物のセグメントを用いて「単体曲げ試験」、「継手曲げ試験」、「推力試験」を実施し、構造性能を確認することとした。

5. ステージ1：要素耐火試験

(1) 試験概要

a) 試験ケース

高流動コンクリートの混和材の種類による爆裂抵抗性の検証を行うため、粉体系高流動コンクリート（以下、粉体系）および増粘剤系高流動コンクリート（以下、増粘剤系）を使用した。さらに、粉体系については、石灰

石微粉末、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末の3種類の混和材を混入したコンクリート（以下、それぞれ粉体系（C+LP）、粉体系（C+FA）、粉体系（C+BS））を使用し、合計4種類のコンクリートとした。

また、PP 繊維には、繊維度およびアスペクト比の異なる5種類の繊維を使用した。アスペクト比は、PP 繊維が円形であるものと仮定して、繊維度から換算径を算出し、長さで換算径の比率で求めた。PP 繊維の種類の一覧を表-4に、試験ケースの組合せを表-5に示す。

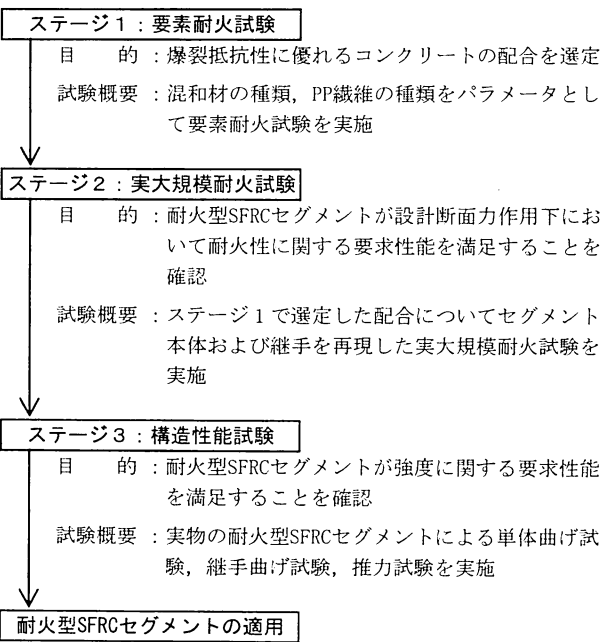


図-6 耐火型 SFRC セグメントの開発フロー

表-4 PP 繊維の種類

記号	繊維度 (dtex)	換算径 (μ m)	長さ (mm)	アスペクト比
PPA	3700	700	48	69
PPB	2.2	17.5	2	114
PPC	17	48.8	20	410
PPD	2.2	17.5	10	570
PPE	2.2	17.5	15	855

表-5 試験ケース

PP繊維の種類		コンクリートの種類			
記号	アスペクト比	粉体系 (C+LP)	粉体系 (C+FA)	粉体系 (C+BS)	増粘剤系
PPA	69	—	FA-A	—	—
PPB	114	—	—	—	VM-B
PPC	410	LP-C	FA-C	—	VM-C
PPD	570	LP-D	FA-D	BS-D	VM-D
PPE	855	—	FA-E	—	—

※試験体の記号

LP - B
PP繊維の種類
(A : PPA, B : PPB, C : PPC, D : PPD, E : PPE)
コンクリートの種類
(LP : 粉体系 (C+LP), FA : 粉体系 (C+FA),
BS : 粉体系 (C+BS), VM : 増粘剤系)

b) 試験体概要

試験体の概要図を図-7 に示す。試験体の形状は、幅 0.5m×長さ 1.0m×厚さ 0.2m の平板状とした。配筋は、D10 を 100mm 間隔で 2 段配置とし、加熱面からの純かぶりを 50mm 確保した。

コンクリートの仕様は、コンクリートの設計基準強度 48N/mm^2 ，スランプフロー $50\sim 65\text{cm}$ ，鋼繊維混入率 $0.6\text{vol}\%$ とした。PP 繊維については、一般に、混入率 $0.165\text{vol}\%\sim 0.33\text{vol}\%$ 程度の範囲で爆裂防止効果がある⁴⁾とされており、本試験においては、 $0.165\text{vol}\%$ より少し多めの混入率 $0.2\text{vol}\%$ とした。

コンクリートに用いる粉体は、全て普通ポルトランドセメントをベースとした。混和材の置換率は、設計基準強度を確保できるものとし、石灰石微粉末およびフライアッシュについては 20%、高炉スラグ微粉末については 50%とした。また、増粘剤系には、分離低減剤としてセルロース系の増粘剤を使用した。

c) 耐火試驗方法

加熱方法の概要を図-8 に示す。耐火炉は汎用壁炉を使用した。耐火試験は一面加熱とし、耐火炉に設置する炉蓋に試験体を2体並行に設置して加熱を行った。試験体の側面から熱の出入りがないように、試験体の周辺には、断熱材を設置した。

加熱条件は、トンネル火災を想定して、加熱開始後 5 分で 1200℃まで昇温し、55 分間温度を保持するドイツ規格の RABT 曲線⁵⁾を採用した。炉内の温度管理は、試験体の加熱面から 10cm 離れた箇所に配置した熱電対を用いて行った。

d) 確認項目

確認項目として、耐火試験時は、炉内温度、爆裂の発生する時間および試験体表面の目視観察を行った。試験体表面の状況は、炉壁の小窓より CCD カメラを用いて観察した。耐火試験後は、外観調査と爆裂深さの測定を行い、爆裂深さは 50mm メッシュでノギスを用いて測定した。測定値の最大値を最大爆裂深さ、各測点の測定値を平均した値を平均爆裂深さとした。また、爆裂が認められた測点数を全測点数で除した値を、爆裂面積率として評価した。

(2) 耐火試験結果および考察

a) 試験体の外観と爆裂の状況

爆裂により大きく損傷した FA-A および VM-B は、加熱開始後 2 分～2 分 30 秒程度経過した時点（炉内温度で 500～600℃位）から、コンクリート片が断続的にはく離し、爆裂範囲が重なり合って広範囲にわたって層状に損

傷を受けた。爆裂は、概ね加熱開始後 5~10 分までで収まり、その後は、進行しなかった。その他の爆裂が軽微であった試験体については、コンクリート表面が数回はく離した程度で収束した。

b) PP 纖維のアスペクト比の影響

爆裂深さの測定結果を表-6、PP 繊維のアスペクト比と爆裂深さの関係を図-9、アスペクト比と爆裂面積率の関係を図-10、爆裂深さの分布図を図-11 に示す。

PP 繊維の種類について着目すると、最大爆裂深さおよび平均爆裂深さの両者とも、アスペクト比が 570 以下の範囲では、アスペクト比の増加に伴い、爆裂深さが低下する傾向にあることが確認できた。特に、アスペクト比 570 の PP 繊維を使用した FA-D, BS-D, VM-D については、コンクリート表面がはく離する程度であった。逆に、アスペクト比の小さい PP 繊維を使用している FA-A および VM-B については、爆裂深さが大きい結果となった。一方で、最もアスペクト比の大きい PPE については、PPD と比較して爆裂深さが大きくなっており、変曲点が認められた。これは、アスペクト比が大きすぎると、PP 繊維が細長くなり過ぎ、繊維と繊維が絡み合って繊維の分散性が低下することと、1 本の繊維が曲がりやすくなるため、PP 繊維が消失した後にできる水蒸気圧を外側へ逃がすための空隙が、外部まで繋がりにくくなっているものと考えられる。

爆裂面積率についても、爆裂深さと同様の傾向が認められた。特に、アスペクト比 570 の PP 繊維を使用した BS-D、VM-D については、ほぼ完全に爆裂を抑制できている。

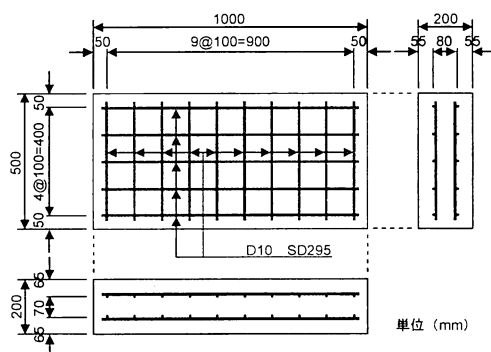


図-7 試験体概要図（要素耐火試験）

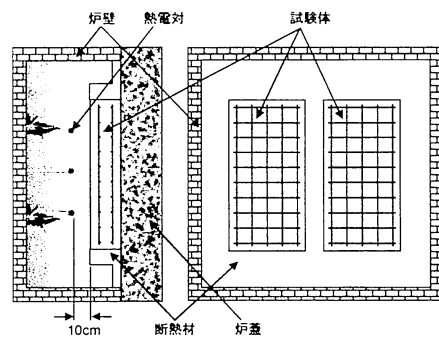


図-8 耐火試験概要図（要素耐火試験）

(3) 要素耐火試験より得られた知見

要素耐火試験より、以下の知見が得られた。

- ①高流動 SFRC は、爆裂抑制効果の高いアスペクト比の PP 繊維を混入することで、爆裂を抑制することが可能である。
- ②PP 繊維のアスペクト比の増加に伴い、爆裂深さおよび爆裂面積率は減少する傾向が認められ、アスペクト比 570 の PP 繊維が、爆裂を抑制する効果が高かった。ただし、アスペクト比が 855 になると爆裂抵抗性が低下した。
- ③爆裂抑制効果の高いアスペクト比 570 の PP 繊維を混入したコンクリートのうち、高炉スラグ微粉末を用いた粉体系高流動コンクリートおよび増粘剤系高流動コンクリートについては、ほぼ完全に爆裂を抑制することができた。

要素耐火試験結果より、耐火型 SFRC セグメントの配合は、混和材に増粘剤系よりも経済性に優れ、環境に配慮したグリーン調達材である高炉スラグ微粉末を使用し、爆裂抑制効果が高いアスペクト比 570 の PP 繊維を採用することとした。試験に使用した鋼繊維と PP 繊維（アスペクト比 570）の例をそれぞれ写真-1、写真-2 に示す。

6. ステージ2：実大規模耐火試験

(I) 耐火工の要求性能

首都高では、表-7 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、避難環境および消火活動環境の確保、火災時および

表-7 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

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。

耐火型 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いる。このため、「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。

表-6 爆裂深さ測定結果

記号	コンクリートの種類	PP繊維の種類	アスペクト比	最大爆裂深さ(mm)	平均爆裂深さ(mm)	爆裂面積率(%)
LP-C	粉体系(C+LP)	PPC	410	4.0	0.1	6.1
LP-D		PPD	570	8.0	0.3	9.5
FA-A	粉体系(C+FA)	PPA	69	32.0	8.1	83.1
FA-C		PPC	410	8.0	0.4	14.3
FA-D		PPD	570	2.0	0.0	2.2
FA-E		PPE	855	14.0	0.7	17.3
BS-D	粉体系(C+BS)	PPD	570	2.0	0.0	1.3
VM-B	増粘剤系	PPB	114	28.0	5.7	56.7
VM-C		PPC	410	7.0	0.4	12.6
VM-D		PPD	570	0.0	0.0	0.0

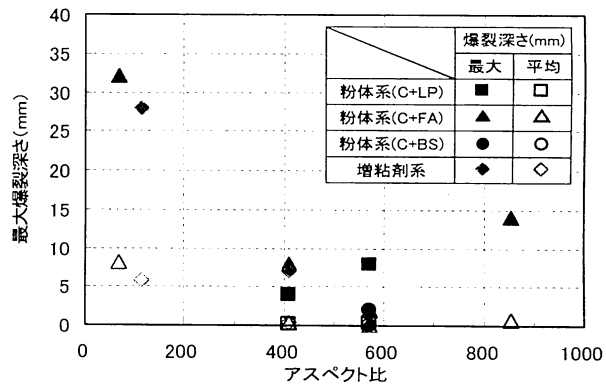


図-9 アスペクト比と爆裂深さの関係

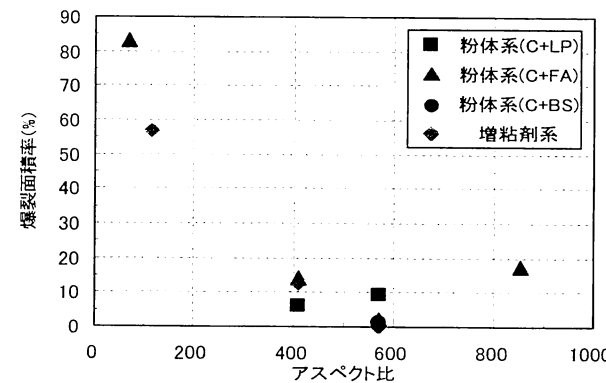


図-10 アスペクト比と爆裂面積率の関係



写真-1 鋼繊維



写真-2 ポリプロピレン繊維

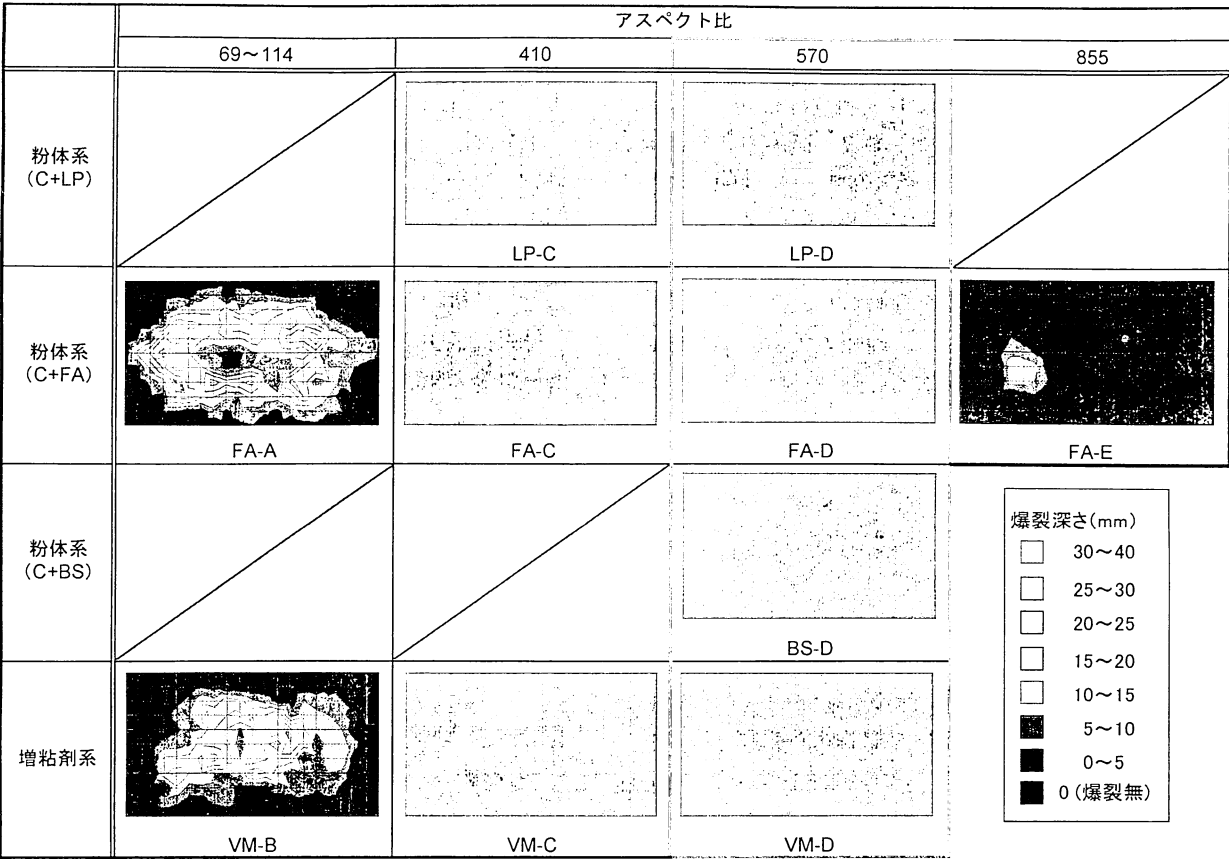


図-11 爆裂深さの分布 (要素耐火試験)

(2) 耐火試験概要

a) 試験体概要

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などで異なる。そこで、試験体は、ステージ1で選定した配合にて、継手の有無を再現した実大規模の試験体を作製し、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。

試験体の概要を図-12、図-13に示す。試験体は、実際のセグメントを模擬して幅 2000mm×長さ 2600mm×厚さ 400mm (加熱面：幅 2000mm×長さ 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⁶⁾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、シーリング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-14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。

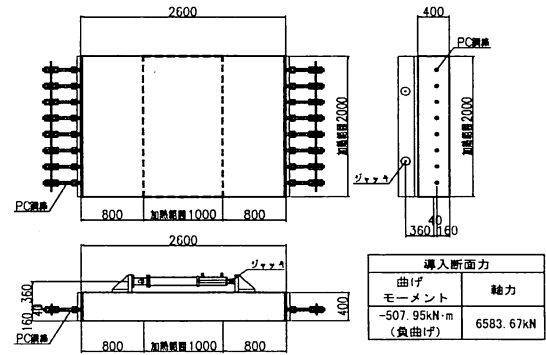


図-12 ケース 1 試験体 (セグメント本体部)

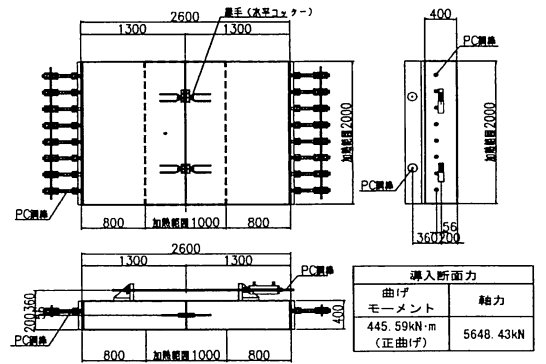


図-13 ケース 2 試験体 (セグメント継手部)

b) 耐火試験方法

加熱方法の概要を図-15 に示す。汎用耐火炉上部に試験体を設置し RABT 曲線（図-17、図-18 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、試験体背面に設置したジャッキもしくは PC 鋼棒の荷重を制御した。なお、加熱時における試験体の表面状態は、汎用耐火炉側面の小窓より CCD カメラを用いて観察した。

c) 確認項目

表-7 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-8 に示す。

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ないことを確認した。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、これ以下であることを確認した。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考慮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℃）以下であることを確認した。

なお、表-7 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、発熱性試験を行い、要求性能を満足していることを確認した。

(3) 耐火試験結果および考察

a) 試験体の外観と爆裂の状況

いずれのケースも、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。加熱した部位におけるコンクリートはく離状況について、50mm メッシュで測定した結果を図-16 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 程度であった。

b) 構造部材および地山側シール材の受熱温度

試験体におけるコンクリートおよび鉄筋の温度履歴をそれぞれ図-17、18 に、ケース 2 の継手部および地山側シール材位置における温度履歴を図-19 に示す。コンクリートの温度分布は、加熱面から内部側に離れるほど低く、ケース 1、2 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。応力度照査では、加熱面の発生応力度がコンクリート強度を超える範囲は、断面欠損しているものとして扱い、収束するまで繰り返し計算を行った。その結果、発生応力度がコンクリート強度を上回る範囲は、ケース 1 では加熱面から 30mm、ケース 2 では加熱面から 2mm の範囲にとどまり、セグメントの安全性を確認することができた。

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。

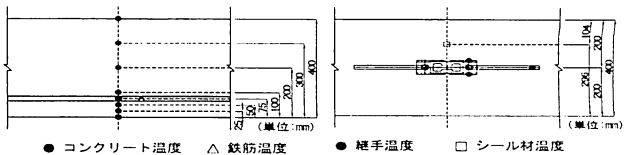


図-14 熱電対設置位置

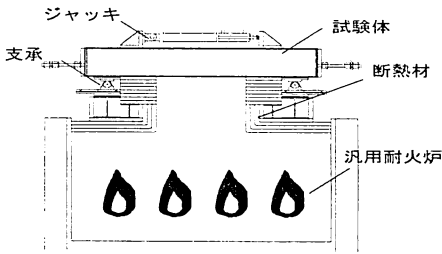


図-15 加熱方法の概要

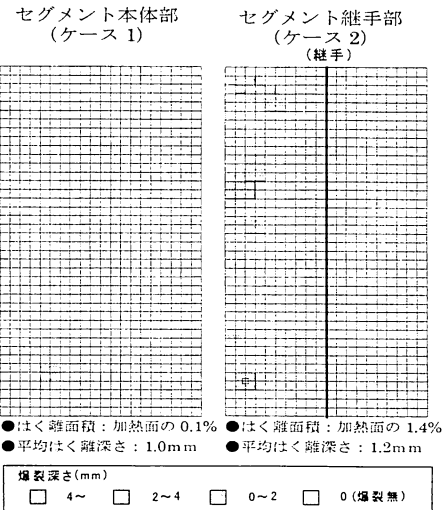


図-16 はく離深さ測定結果

表-8 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
④, ⑤, ⑦	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
④～⑦	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
④, ⑤, ⑦	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 (④～⑦) は、表-7 に示す「火災時および火災後」における要求性能を示す。

(4) 実大規模耐火試験より得られた知見

耐火試験結果のまとめを表-9 に示す。いずれも判定基準を満足することから、本工事で適用する耐火型 SFRC セグメントは、表-7 に示した「火災時および火災後」における要求性能を十分確保しているものといえる。

7. ステージ3：構造性能試験

(1) 試験概要

本工事への適用にあたり、PP 繊維を混入した耐火型 SFRC セグメントが、強度に関する要求性能を満足することを確認するため、「単体曲げ試験」、「継手曲げ試験」、「推力試験」を実施し、所要の強度を有していることを確認した。とくに、単体曲げ試験では、鉄筋量が、最小鉄筋量で決まっている本 SFRC セグメントについても、所要の変形性能を有していることを確認した。本稿では、単体曲げ試験の結果について詳述する。

a) 試験体概要

単体曲げ試験の試験体としては、本工事に適用する耐火型SFRCセグメントのA型セグメント（幅2.0m×厚さ0.4m×外周寸法4.637m）を使用した。コンクリート設計基準強度は42N/mm²、PP繊維と鋼繊維の混入率は、それぞれ0.2vol%と0.6vol%である。主鉄筋は、D16×14本とD13×2本を上下に2段配置しており、配力筋およびフープ筋は、省略している。試験に使用した耐火型SFRCセグメントの鉄筋の配筋状況を写真-3に示す。

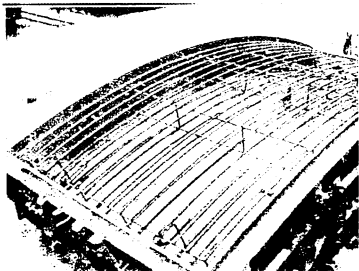


写真-3 耐火型 SFRC セグメントの配筋状況

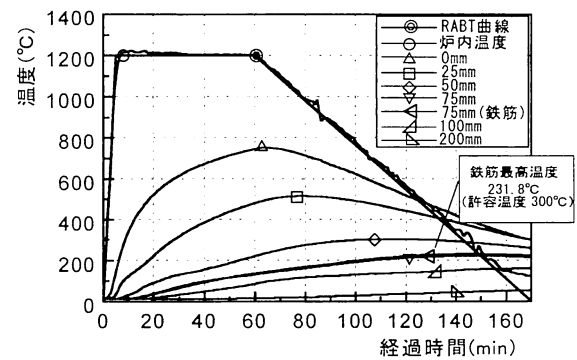


図-17 ケース1 コンクリート・鉄筋の温度履歴

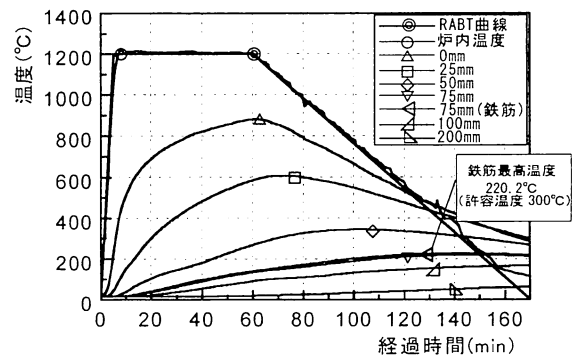


図-18 ケース2 コンクリート・鉄筋の温度履歴

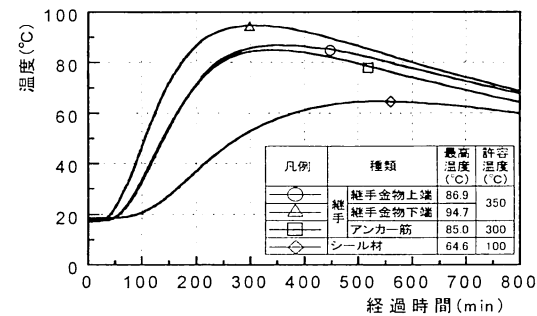


図-19 ケース2 継手部・シール材位置の温度履歴

表-9 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	耐力に影響なし 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	耐力に影響なし 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

b) 試験方法

単体曲げ試験は、両端可動支持による鉛直方向2点載荷で行った。載荷ピッチは、ひび割れ発生までは10kNピッチで行い、ひび割れ発生後は、20kNピッチとした。

単体曲げ試験状況を写真-4に示す。

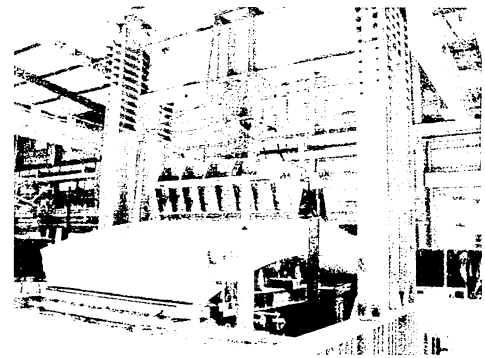


写真-4 単体曲げ試験状況

(2) 単体曲げ試験における理論上の荷重-変位関係

単体曲げ試験における荷重-変位関係を図-20、材料実強度と鋼繊維補強によるコンクリート引張強度を考慮した破壊荷重計算値と実測値の比較表を表-10 に示す。計算値は、コンクリートのひび割れの発生、鉄筋の降伏、コンクリートの圧壊と、順を追って低下する梁部材の剛性 (M- ϕ 曲線) を考慮して算出した。

本工事の SFRC セグメントは、鋼繊維の混入によるコンクリートの引張強度は考慮せず、通常の RC セグメントとして設計しており、設計上の荷重-変位関係は、図-20 計算値①に示すとおりとなる。

鋼繊維の混入によるコンクリートの引張強度を考慮した場合の荷重-変位関係は、計算値②に示すとおりとなる。ここに、コンクリートの引張強度は、鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針 (案)⁷⁾ を参考とした。また、計算値②に対し、コンクリートおよび鉄筋の実強度を考慮した場合の荷重-変位関係は、計算値③に示すとおりとなる。

図-20 から分かるように、通常の RC セグメントに比べてコンクリートの引張強度を期待できる SFRC セグメントは、ひび割れ発生後のセグメントの剛性が高く、最大荷重も大きくなる。また、計算値②および③では、ひび割れ発生後から最大荷重となる鉄筋の降伏までは、荷重の増加とともに変位が大きくなるが、最大荷重を迎えた後に、変位は進行するものの荷重が一旦低下する。これは、鉄筋が降伏することにより、ひび割れ幅が大きくなり、鋼繊維の混入によるコンクリートの引張強度が、ひび割れ幅の増加にともなって低下するためである。

表-10 材料実強度と鋼繊維補強によるコンクリート引張強度を考慮した破壊荷重計算値と実測値の比較

	計算条件		最大荷重 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 (RCとして評価)	436 (kN)	760 (kN)
②	設計強度	考慮する (SFRCとして評価)	570 (kN)	
③	実強度※	考慮する (SFRCとして評価)	672 (kN)	

※コンクリート圧縮強度 : 63.2N/mm² (一軸圧縮試験より)
鉄筋降伏強度 : 367.4N/mm² (鉄筋引張試験より)

(3) 単体曲げ試験結果および考察

実測では、ひび割れ発生までの荷重-変位関係は、計算値に近似しており、本セグメントは、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①147kN に対して 380kN で発生し、最大荷重は、計算値①436kN に対して 760kN であった。実測値の最大荷重は、計算値①を大きく上回り、概ね計算値③に近い値となった。このことから、設計上考慮していない鋼繊維が、曲げ耐力に寄与していることが分かる。また、最大荷重を迎えた後の実測の荷重低下量は、計算値②および③に比べて小さい。このことから、計算上想定している限界ひび割れ幅よりも、実際の限界ひび

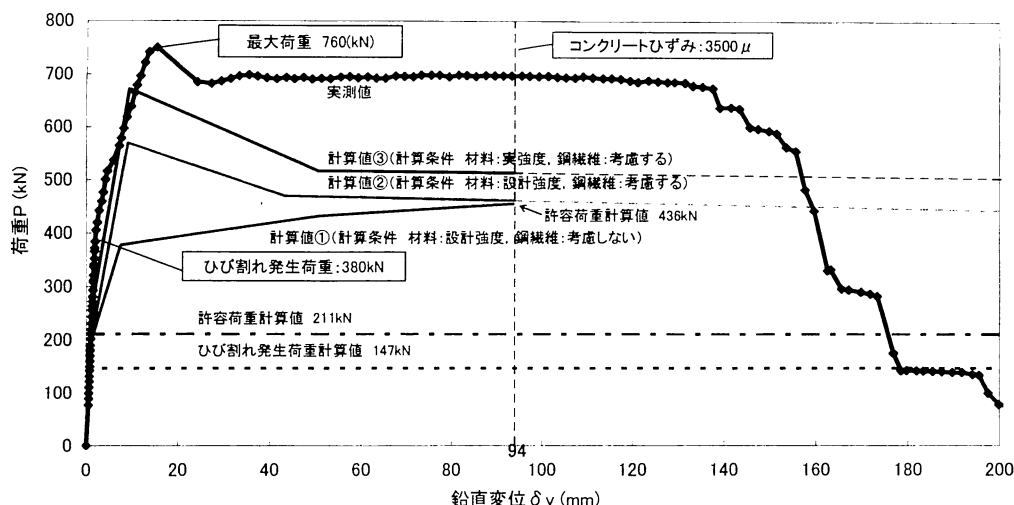
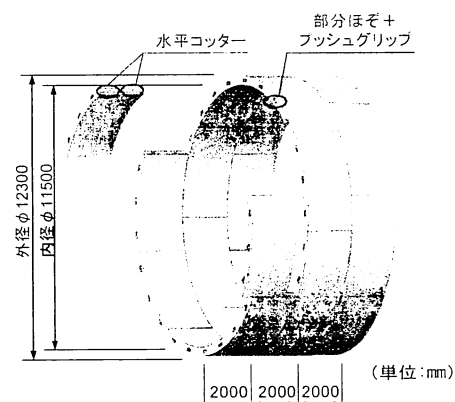


図-20 単体曲げ試験における荷重－変位関係

割れ幅は大きく、コンクリートの引張強度を期待できる領域が大きいことが分かる。その後は、荷重を保持した状態を保ちながら変位が 138 mm まで進行しており、計算値①において、コンクリートの終局ひずみ 3,500 μ に相当する変位 94mm を大きく上回る結果となった。このことから、鋼繊維の補強効果によりコンクリートのじん性が向上し、SFRC セグメントが、設計で期待している以上の変形性能を有していることが分かる。変位が 138 mm を超えると、荷重が段階的に低下しているが、これは、変位の進行とともに引張鉄筋の破断が生じたことによる。

(4) 単体曲げ試験より得られた知見

単体曲げ試験により、耐火型 SFRC セグメントは、強度に関する要求性能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。



セグメント主要寸法		継手構造	
項目	主要寸法	継手位置	継手
外径	φ 12,300mm	リング間	部分ほぞ+プッシュグリップ
内径	φ 11,500mm	セグメント間	水平コッター
桁高	400mm (外径比率 3.25%)	混入繊維	
幅	2,000 mm	種 類	混入率
分割数	9 分割 (縮小 K)	鋼繊維	0.6vol1%
		PP 繊維	0.2vol1%

図-21 耐火型 SFRC セグメントの構造概要

8. おわりに

本工事への適用にあたって実施した耐火試験および構造性能試験により、耐火型 SFRC セグメントは、二次覆工を省略した道路トンネルのセグメントとして、要求性能を満足していることを確認した。本工事で採用した耐火型 SFRC セグメントの構造は、図-21 に示すとおりである。また、これまでの試験等から確認した耐火型 SFRC セグメントの特徴を表-11 にまとめている。

本稿にて紹介した耐火型 SFRC セグメントは、平成 21 年 4 月に製作を開始し、平成 22 年 9 月現在で全体の約 30%にあたる 1,600 リングの製作が完了している。耐火型 SFRC セグメントについては、引続き実施工をとおして、構造性能や耐久性等の評価を行っていく予定である。

本稿が、今後のシールドトンネル計画の参考となれば幸いである。

表-11 耐火型 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 - 鋼繊維により、セグメント端部の割れ、欠けを防止 - 製作時はテーブルバイブレータが不要であり、鉄筋量が少なくコンクリートの充填に有利等から製作用性が向上し、品質の確保が容易
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向上 - 鋼繊維の混入により、コンクリートの引張強度が期待できる - 鋼繊維の混入により、応力分散性能が期待でき、配力筋、フープ筋、せん断補強筋等の省略が可能
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抑制 - 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)

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, 2006. 3.
- 2) 屋代ほか：高炉スラグ微粉末を用いた鋼繊維補強高流動コンクリートセグメントの耐火性，土木学会第 64 回年次学術講演会，P. 53, 2009. 9.
- 3) 川西ほか：ポリプロピレン短繊維の形状と混入率を変化させた鋼繊維補強高流動コンクリートの耐火性，土木学会第 64 回年次学術講演会，P. 779, 2009. 9.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書【施工編】2007 年制定，P. 269.
- 5) 日本道路協会：シールドトンネル設計・施工指針（平成 21 年 2 月），P185, 2009. 2.
- 6) 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，2004. 10.
- 7) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），コンクリートライブラリー97.

THE APPLICATION OF FIREPROOF SFRC SEGMENTS TO METROPOLITAN EXPRESSWAY YOKOHAMA CIRCULAR NOTHERN ROUTE Adoption of a fire-

Kazuhiro TSUNO, Yoshihiko ADACHI, Kenta MATSUBARA and Yoshinari KONDO

Fire protection for road tunnel lining shall be considered with necessary structural capacity as well as durability. Shield tunnel at Yokohama Circular Northern Route will employ Fireproof SFRC (Steel Fiber Reinforced Concrete) Segments using high flow concrete with polypropylene fiber and steel fiber in order to omit secondary concrete lining.

Prior to actual implementation on site, several tests have been carried out to confirm fire protection and structure performance. As for fire protection requirement, one is test for small sample with various types of polypropylene fiber and admixture, and the other is full scale test under design load condition. In addition structure performance tests for flexure rigidity and capacity have been carried out.