

鋼繊維補強コンクリートトンネル覆工体の 耐火性能に関する基礎的研究

BASIC STUDY ON FIRE RESISTANCE EFFICIENCY OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE TUNNEL LINING

川口博行¹⁾・阿曾利光²⁾・森田 武³⁾・西岡真帆⁴⁾

Hiroyuki KAWAGUCHI, Toshimitsu ASO, Takeshi MORITA, Maho NISHIOKA

This paper describes the fire resistance tests of full-scale thickness specimens in order to understand the fire resistance efficiency of SFRC lining for the ECL tunneling method. We compared the fire resistance efficiency of the SFRC lining and the RC segment, and clarified the effect of the steel fiber and the reinforcing bar. Rapid heating experiments of various concrete test pieces were done, and the SFRC lining and the RC segment which have full-scale thickness were experimented without fire proofing cover on the surfaces exposed to high temperature. The damage level of the lining surface due to explosive spalling, the temperature distribution in each lining, the residual compressive strength of the concrete and the crack situations etc. were compared.

Key Words: fire resistance, steel fiber reinforced concrete, RC segment, tunnel lining

1. はじめに

鋼繊維補強コンクリート(Steel Fiber Reinforced Concrete: SFRC)をトンネル覆工体に用いる例が近年増加してきている。また、SFRCを用いたECL工法(場所打ちライニング工法)も都市域において施工されている。SFRCによるトンネル覆工体はRCセグメントよりも経済的であるので、今後都市域においてRCセグメントに並ぶトンネル覆工体材料として普及することが期待されている。ここではSFRC覆工体の耐火性能を把握することを目的に、実大厚さの耐火実験を行い、SFRCとRCセグメントの耐火性能を比較するとともに、SFRC覆工体における鋼繊維の効果およびRCセグメントにおける鉄筋の効果を把握した。実験はコンクリートテストピースの急速加熱実験を行った後、実大厚さのトンネル覆工体としてのECL用SFRCとRCセグメントを耐火被覆なしの同一条件で行い、爆裂による覆工体表面の損傷の程度、覆工体内の温度分布、覆工体コンクリートの残存圧縮強度、覆工体に生じたひび割れ状況などの耐火性能を比較した。

2. 実験方法

(1) 実験目的

- 1) 正会員 清水建設(株)土木東京支店首都高大桥建設所
- 2) 正会員 清水建設(株)土木事業本部技術開発部
- 3) 非会員 工学博士 清水建設(株)技術研究所生産技術開発センター
- 4) 正会員 清水建設(株)土木事業本部技術第一部

実験は2つのステップに分けて行った。ステップ1は、コンクリートテストピースに関する急速加熱実験であり、急速加熱による供試体の爆裂性状を把握するとともに、加熱後の残存強度を確認することを目的とした。ステップ2は、実大厚さのトンネル覆工体を模擬した試験体に関するドイツのRABT曲線に準じた加熱実験であり、爆裂による損傷の程度、内部温度分布、コンクリートの残存圧縮強度、ひび割れ状況などを把握することを目的とした。

(2) 試験体

試験体コンクリートの配合を表-1に示す。骨材は配合①～④では石灰石、配合⑤のみ硬質砂岩である。コンクリートの養生は、ステップ1では現場養生で養生期間8週間、ステップ2では、SFRCは2日間の湿布散水養生の後、現場養生とし、RCセグメントおよびRCセグメント用コンクリートはセグメント製作工場にて製品と同一養生、材齢2週間で現場養生とした。ステップ2の試験体の全体養生期間は約3箇月である。コンクリートの硬化性状を表-2に示す。

表-1 試験体コンクリートの配合

配合種別	粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ フロー (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W/(C+F) (%)	フライアッシュ置換 率 F/(C+F) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤		
							水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	鋼繊維 SF	高性能AE減水剤 (C+F)×% g/m ³	増粘剤 g/m ³
① SFRC(1%)	20	62.5±7.5	2.0±1.5	38	20	65	190	400	100	1032	573	78.5	2.0	1050
② SFRC(0%)	20	62.5±7.5	2.0±1.5	38	20	65	190	400	100	1049	582	0	2.0	1050

配合種別	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W/(C+Sg) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤	
						水 W	セメント C	高炉 Sg	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE減水剤 (C+Sg)×% g/m ³	
③ RCセグメント用	20	3±1.5	1.5±1.0	33.5	43.5	134	200	200	823	1101	2.4	

配合種別	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
④ NATM二次覆工	20	15±2.5	4.5±1.5	61.7	47	167	271	861	1000	0.25

配合種別	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W/(C+Sg) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
⑤ RCセグメント用	20	8±1.5	1.5±1.0	36.4	43.5	142	390	823	1102	2.9

表-2 コンクリートの硬化性状

実験 ステップ	配合種別		圧縮強度 N/mm ²	含水率 %	材齢
1	①	SFRC(1%)	67.7	4.24	8週間
	②	SFRC(0%)	65.0	3.92	
	③	RCセグメント用	31.2	2.79	
	④	NATM二次覆工	20.9	2.45	
2	①	SFRC(1%)	70.5	3.99	3箇月
	②	SFRC(0%)	63.0	4.26	
	⑤	RCセグメント用	73.5	3.83	

注、含水率は、供試体を105～110℃で乾燥し、乾燥前の重量Wと乾燥後の重量W₀との差をW₀で除して求めた

ステップ1のコンクリート供試体はφ10cm×20cmの円柱とした。ステップ2の試験体は、実大厚さのトンネル覆工体を模擬し、SFRC(1%)、SFRC(0%)、RCセグメント用コンクリートを用いた有筋試験体および無筋試験体の4種類とした。各試験体の形状・寸法および熱電対の取り付け位置を図-1に示す。なお、RCセグメント用有筋試験体の主筋はD19、配力筋はD13で、配力筋のかぶり厚は22.5mmである。

(3) 加熱方法

a) ステップ1

炉内温度を所定の加熱温度に保った爆裂実験
 炉内に、底面を除く側面および天端面が加熱され
 るように4種類のコンクリート供試体を配置し、
 30分間加熱する方法とした。加熱温度は350～
 950℃とし、1温度水準につき4種類のコンクリート
 供試体を各1体ずつ炉に入れた。

b) ステップ2

床炉実験では、加熱面となる1面のみを残し耐
 火材で巻いた4種類の試験体を各々1体ずつ計4
 体セットし1面加熱試験を行った。昇温曲線は、
 RABT 曲線を採用した。マルチ加熱炉実験ではト
 ンネルの頂部と側壁部の違いを把握する目的で、
 試験体を炉の頂部および側部に設置して実験を行
 った。昇温曲線は図-2に示す RABT 曲線を採用
 した。

3. 実験結果

(1) ステップ1

a) 加熱温度における爆裂の有無

加熱温度と爆裂の有無の関係を表-3に示す。
 爆裂状況は次のとおりである。

- 加熱温度 450～650℃で SFRC(1%), SFRC(0%),
 RC セグメント用コンクリートの3種類につ
 いては、供試体内部からの爆裂が生じた。
 SFRC が他の試験体に比べ低い温度で爆裂し
 たのは、SFRC が高強度で、かつ含水率も高
 かったためと考えられる。
- SFRC(1%)は供試体内部からの爆裂であって
 も亀裂が全周に入るに留まり、鋼繊維の存在のため供試体は一体化していた。
- SFRC(1%)では加熱温度 950℃で供試体表面からの爆裂（コンクリート片の剥離）が生じた。

表-3 加熱温度と爆裂の有無

加熱温度(℃)	350			450			550			650			750			950		
SFRC(1%)	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	-	○	○	○	△	△	○
SFRC(0%)	○	○	○	○	×	○	○	×	○	×	○	-	○	○	○	○	○	○
RCセグメント用コンクリート	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	-	○	○	○	○	○	○
NATM二次覆工コンクリート	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○

○ … 爆裂なし

△ … 供試体表面からの爆裂(はく落・はく離)

× … 供試体内部からの爆裂

b) 残存圧縮強度

爆裂が生じなかった供試体について行った残存圧縮強度試験結果を図-3に示す。本実験では供試体内部
 温度を測定しなかったため供試体内部が一様に加熱温度と同程度の温度になったか否かは不明であるが、以
 下の傾向が把握された。

- 加熱温度が350℃になると圧縮強度残存率は80%程度となった。

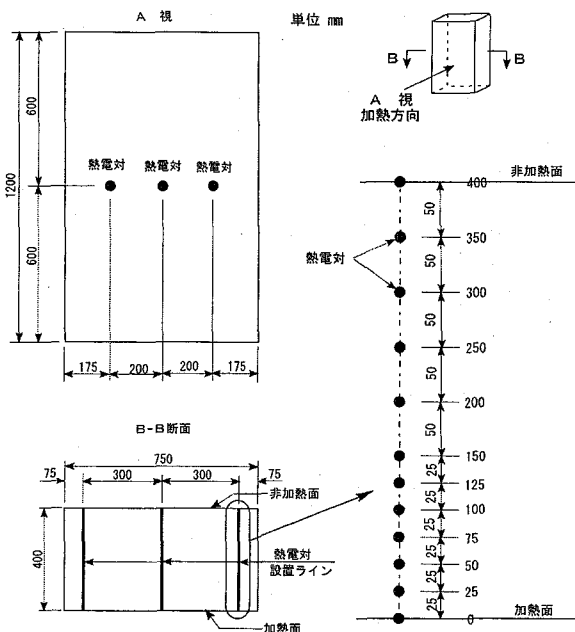


図-1 実大厚さのトンネル覆工体を模擬した試験体

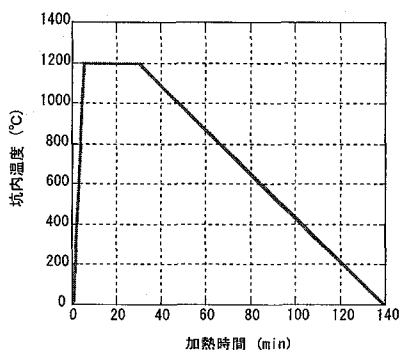


図-2 実験で採用した RABT 曲線

- 加熱温度の上昇とともに圧縮強度残存率は低下した。
- SFRC(1%)とセグメント用コンクリートでは、加熱温度が450℃を超えると急激に圧縮強度残存率が低下した。
- 加熱温度が350～750℃の間では550℃を除いて、SFRC(1%)とセグメント用コンクリートの圧縮強度残存率はほぼ同程度であった。
- 鋼繊維の効果は、すべての加熱温度において顕著に現れた。
- NATM二次覆工コンクリートは最も圧縮強度残存率が低かった。

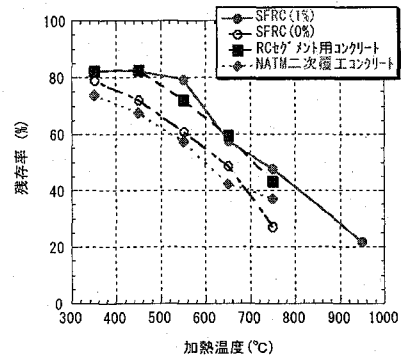
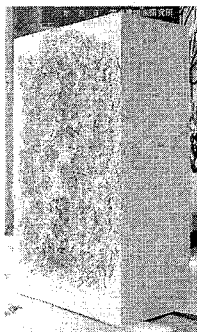


図-3 残存圧縮強度試験結果

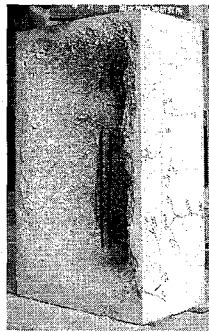
(2) ステップ2

a) 爆裂性状

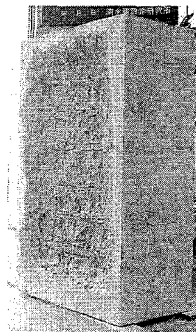
床炉実験に供した試験体の加熱実験後の状況を写真-1に、爆裂深さ（加熱後の損傷の程度）の測定結果を図-4に示す。本実験では次の傾向が把握された。



(a) SFRC(1%)



(b) SFRC(0%)

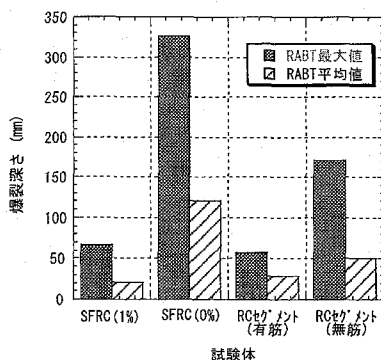


(c) RCセグメント(有筋)

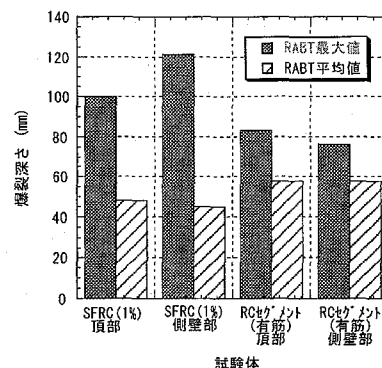


(d) RCセグメント用コンクリート(無筋)

写真-1 床炉実験に供した試験体の加熱後の状況



(a) 覆工材料別（床炉による）



(b) 部位別（マルチ加熱炉による）

図-4 爆裂深さ

- 爆裂深さの最大値は、SFRC(0%), RCセグメント用コンクリート（無筋）、SFRC(1%), RCセグメント（有筋）の順で小さくなり、補強材料が無いものは爆裂深さが大きくなった。
- SFRC(0%)およびRCセグメント用コンクリートを用いた無筋試験体では爆裂による断面欠損が深部にま

で達した。

- RCセグメント（有筋）の爆裂深さは鉄筋が露出する程度までであった。
- SFRC(1%)はRCセグメント（有筋）に比べて爆裂深さの最大値は大きい、平均値は小さかった。
- 爆裂深さの平均値は頂部と側壁部との差はほとんどないが最大値は頂部の方が側壁部よりも若干大きくなった。

b) 内部温度分布

炉内温度および各試験体の内温度の測定結果を図-5に示す。図-5よりSFRC(1%)よりもRCセグメント(有筋)試験体の内部温度の上昇が著しいことがわかる。この理由はコンクリートの性質の相違およびRCセグメント試験体内の鉄筋の熱伝導によるものと考えられる。SFRC(0%)およびRCセグメント用コンクリートを用いた無筋試験体では、温度測定位置におけるコンクリート温度が上昇しないうちから、爆裂によって熱電対が露出して急激に測定温度が上昇する傾向が見られた。

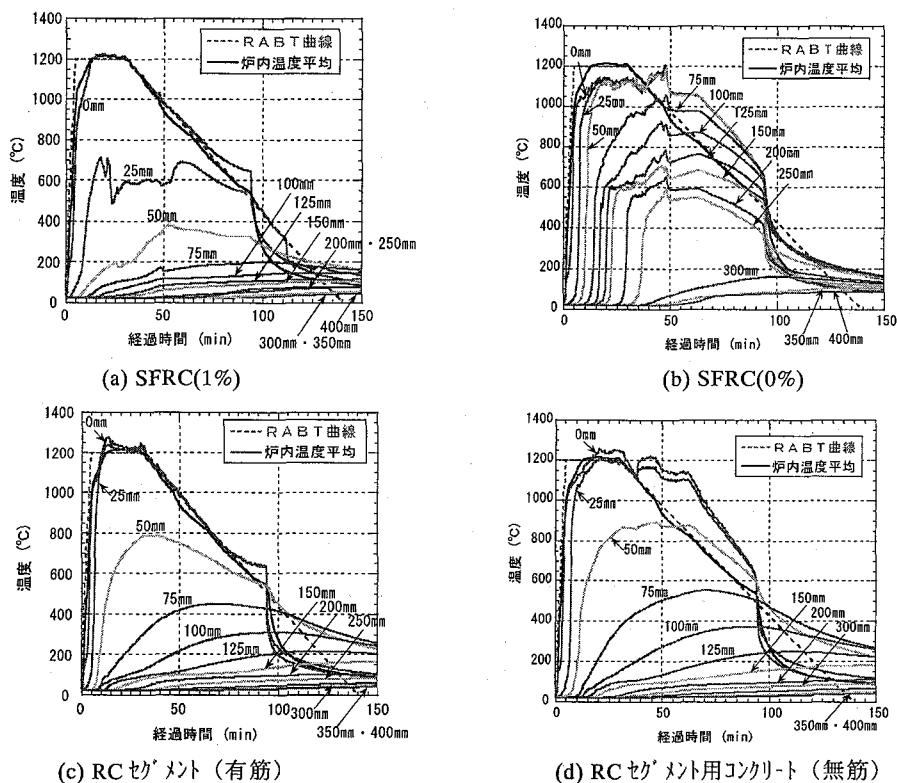


図-5 加熱面からの深度別温度変化

トンネル火災時における部材の許容温度について、オランダにおける道路トンネル用断熱材の要求性能の例として次の項目があげられている。

- ①コンクリート表面で380℃を超えないこと。
- ②鉄筋表面（コンクリート被り25mm）で250℃を超えないこと。

これらをコンクリートおよび鉄筋の許容温度の目安として、コンクリート温度が380℃以上となる加熱表面からの深度、およびRCセグメント(有筋)では部材内温度が250℃以上となる加熱表面からの深度を求めた結果を表-4に示す。この結果から次のことがいえる。

- RCセグメント(有筋)はSFRC(1%)に比べ、コンクリート内部温度が上がりやすく、380℃となる深度は81~118mmで、SFRC(1%)の約1.3倍となった。

表-4 250℃および380℃となる深度

実験炉	温度曲線	部位	380℃となる深度				250℃となる深度
			SFRC(1%)		RCセグメント(有筋)		RCセグメント(有筋)
			深度 mm	比率	深度 mm	比率	深度 mm
床 炉	RABT曲線	側壁部	63	1.00	81	1.29	112
マルチ加熱炉	RABT曲線	頂部	92	1.00	118	1.28	150
		側壁部	84	1.00	110	1.31	138

注, 比率はSFRC(1%)を基準としたものである

- 250℃となる深度は床炉で 112mm, マルチ加熱炉で 138~150mm であり, 実験炉によって差があるようである.
- 250℃および 380℃となる深度については頂部の方が側壁部よりも若干大きい.
- SFRC(1%)の場合, 構造体として要求される覆工厚よりも 63~92mm 程度部材を厚くすることにより, その部分が耐火被覆の役割を果たして構造体としての部材断面のコンクリート温度を 380℃以下に抑えられ, 耐火被覆を省略できる可能性がある.

c)加熱後のコンクリートの残存圧縮強度

加熱後の試験体で, 加熱面に平行にφ100mmのコアを抜きコンクリートの残存圧縮強度調べたところ, 次の結果が得られた.

- SFRC(1%)では加熱面から 200mm (コアの中心) では 83%程度, 300mm ではほぼ 100%近くの強度が残存している.
- RC セグメント (有筋) では加熱面から 200mm では 65~73%程度, 300mm では 70~76%近くの強度が残存している.

d)覆工体に生じたひび割れ状況

- SFRC(1%)に生じたひび割れは RC セグメント (有筋) に比べ幅が小さく, 試験体を貫通するひび割れは全ての試験体で認められなかった.
- RC セグメント (有筋) では全ての試験体で貫通ひび割れが生じた.

e)コンクリート中の補強材の効果

- SFRC(1%)と SFRC(0%)では爆裂深さに大きな差がみられ, 鋼繊維の混入効果は顕著であった.
- RC セグメント (有筋) と RC セグメント (無筋) では爆裂深さに大きな差がみられ, 鉄筋の効果は顕著であった.

4. おわりに

SFRC の耐火性能に関する知見を得ることを目的に耐火被覆なしで直接コンクリートを加熱する基礎的な実験を行った. その結果, SFRC(1%)について, φ10cm×20cm の円柱供試体では加熱温度が 350℃になると圧縮強度残存率は 80%程度となること, 実大厚さのトンネル覆工体ではコンクリート内部温度が 380℃となる深さは 100mm 以内であること, 最大爆裂深さはほぼ 120mm 程度までであること, 加熱面からコアの中心までの距離が 200mm ではコンクリートの残存圧縮強度が 80%以上であること, 発生するひび割れ幅は小さく覆工体を貫通するひび割れは生じないこと, 鋼繊維の補強効果は十分に認められることなどが確認でき, RC セグメントに無い耐火性能を持つことがわかった. 今後, これらの知見をもとに ECL 工法 (場所打ちライニング工法) という特徴を生かした耐火対策を検討していきたいと考えている.

謝辞: 本実験にあたり黒崎播磨(株)トンネル耐火材プロジェクトの黒田浩太郎氏にご協力をいただきました. ここに感謝の意を表します.