

耐火型高機能SFRCセグメントの開発

川西 貴士 近松 竜一
吉田 公宏 屋代 勉
(本社土木本部) (本社土木本部)

Development of High-Performance Fire-Resistant SFRC Segments

Takashi Kawanishi Ryuichi Chikamatsu
Masahiro Yoshida Tsutomu Yashiro

Abstract

Recently, in order to prevent spalling, reduce the amount of reinforced steel required for construction, improve workability, and reduce production costs, steel fiber reinforced high-fluidity concrete has been applied to shielding. In addition, such shields should be fire-resistant. Therefore, the fire resistance was investigated by subjecting concrete comprising short mixed polypropylene fibers to the RABT curve test. Moreover, an axial compressive force was applied to the specimen during this test, and the fire resistance was verified. As a result, it was suggested that short polypropylene short fibers with an aspect ratio of 400–600 and 0.2 vol% to mix could help control explosive spalling.

概要

コンクリートのはく落防止、鉄筋量低減、施工性向上および製作コスト縮減など様々な利点から、近年、鋼繊維補強高流動コンクリートがシールドセグメントに適用されている。都市部のシールドセグメントには、さらに耐火性が求められている。そこで、火災時の爆裂に対して効果があるポリプロピレン短繊維を混入したコンクリートについて、RABT曲線による耐火試験を実施した。また、実規模レベルの試験体を用いて、実際のセグメントに作用する軸力を導入した状態で耐火試験を実施し、その耐火性について検証した。その結果、アスペクト比が400～600のポリプロピレン短繊維を0.2% (容積比) 混入することで、爆裂の抑制が可能であることを確認した。

1. はじめに

シールドトンネル内で、車両事故などによる火災が発生した場合、閉鎖された空間で燃焼するため、覆工コンクリートは、急速に1000℃以上の高温に晒される。覆工コンクリートが1000℃以上の高温履歴を受けた場合、爆裂の発生や強度の低下により、トンネルの崩壊や、避難救助の妨げとなる可能性がある。特に、シールドトンネルのセグメントには、高強度のコンクリートが用いられることが多く、爆裂が生じやすい。従来は二次覆工や耐火被覆によりセグメントを防護してきたが、近年、コストダウンの観点から二次覆工が省略される傾向にあり、セグメント自体に耐火性能が求められている¹⁾。

爆裂の原因として、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、表層部のコンクリートのはく離することと、表層部と内部の温度差により、表層部に熱応力が発生し、表層部のコンクリートが圧縮破壊することが挙げられる。一般に、爆裂を抑制する対策として、ポリプロピレン短繊維 (以下、PP繊維と呼称) をコンクリート内に混入し、高温履歴を受けた場合、このPP繊維が溶融・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ており、著者らも、この方法による耐火コンクリートの研究を進めてきた²⁾。

一方、シールドトンネル用のセグメントとして、曲げじん性の向上、鉄筋量の削減および製作の省力化などの観点から、鋼繊維補強高流動コンクリート (以下、高流動SFRCと呼称) が適用されている³⁾。

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⁴⁾もあるが、一般に、高流動コンクリートは、水粉体比が小さく、単位粉体量が多い傾向があり、内部組織が緻密になりやすい。そのため、爆裂が発生する危険性が高いとの報告^{4),5)}があり、高流動SFRCの耐火性について検証する必要がある。

そこで、基礎実験と実規模実験の2つのケースに大別して耐火試験を実施した。基礎実験では、爆裂抑制に対して効果的であるPP繊維の種類をパラメータとした小型試験体を用いて、RABT曲線による耐火試験を行い、爆裂抵抗性について検証した。また、実際のセグメントには、土水圧によってコンクリートに圧縮応力が作用するが、火災時にはさらに熱応力が発生するため、無応力状態に比べて、爆裂抵抗性の低下が懸念される。そこで、実規模実験では、実規模レベルの試験体を作製し、実際のセグメントに作用する軸力を導入した状態で耐火試験を行い、爆裂抵抗性を検証した。また、加熱時のセグメントの内部 (加熱表面から深さ方向) の温度分布性状についても確認を行った。

Table 1 PP繊維の種類
Type of Polypropylene Short Fiber

記号	繊度 (dtex)	換算径 (μm)	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

Table 2 実験ケース (基礎実験)
Test Cases

PP繊維の種類		鋼繊維の混入率 (vol%)	コンクリートの種類				
記号	アスペクト比		中流動 (SL)	粉体系 (C+LP)	粉体系 (C+FA)	粉体系 (C+BS)	増粘剤系 (VM)
PPA	69	0.6	—	—	FA-A	—	—
PPB	114	0.6	SL-B	—	—	—	VM-B
PPC	410	0.6	SL-C	LP-C	FA-C	—	VM-C
		0.0	SL-C-N	—	—	—	—
PPD	570	0.6	—	—	FA-D	—	—
			SL-D	LP-D	FA-D	BS-D	VM-D
PPE	855	0.6	—	—	FA-E	—	—
			—	—	FA-E	—	—

※試験体の記号
SL - C - N
鋼繊維の有無 (無記述: 鋼繊維の混入率0.6vol%, N: 鋼繊維なし)
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 (SL: 中流動, LP: 粉体系 (C+LP), FA: 粉体系 (C+FA), BS: 粉体系 (C+BS), VM: 増粘剤系)

2. 小型試験体による基礎実験

2.1 実験概要

2.1.1 実験ケース 高流動SFRCには、粉体系高流動コンクリート (以下、粉体系と呼称) および増粘剤系高流動コンクリート (以下、増粘剤系と呼称) を使用した。粉体系には、混和材として石灰石微粉末、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を、それぞれ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) および粉体系 (C+BS) と呼称) を使用した。また、比較用として、スランプタイプの中流動コンクリート (以下、中流動と呼称) を使用したのもも試験を行った。

また、PP繊維は、繊度およびアスペクト比の異なる5種類の繊維 (アスペクト比69~855) を使用した。アスペクト比は、PP繊維の断面が円形であるものと仮定して、繊度から換算径を算出し、繊維長さとの比率により求めた。PP繊維の種類をTable 1に、また、基礎実験に用いた試験体の種類をTable 2に示す。

2.1.2 試験体の作製 試験体の概要をFig. 1に示す。試験体の寸法は、幅500mm×長さ1,000mm×厚さ200mm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、混和材の置換率は、石灰石微粉末およびフライアッシュを20%、高炉スラグ微粉末を50%とし、水粉体比は28.8%とした。また、増粘剤系にはセルロース系の増粘剤を使用した。

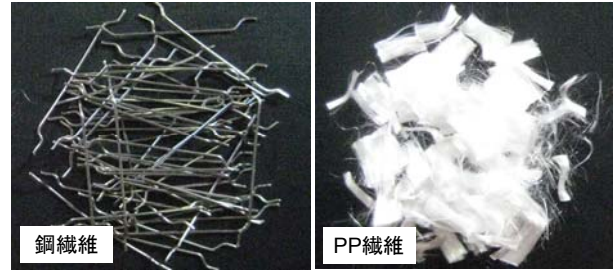


Photo 1 鋼繊維およびPP繊維の例
Example of Steel Fiber and Polypropylene Short Fiber

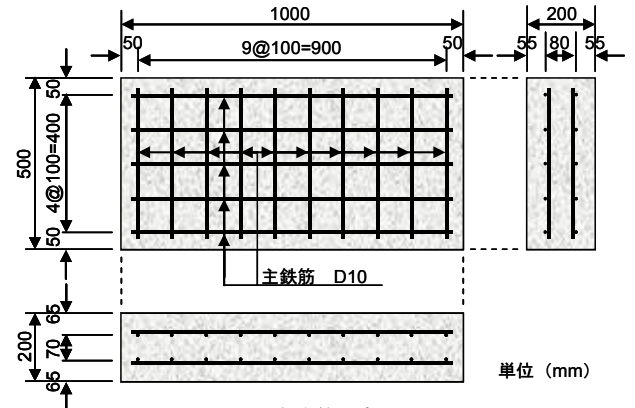
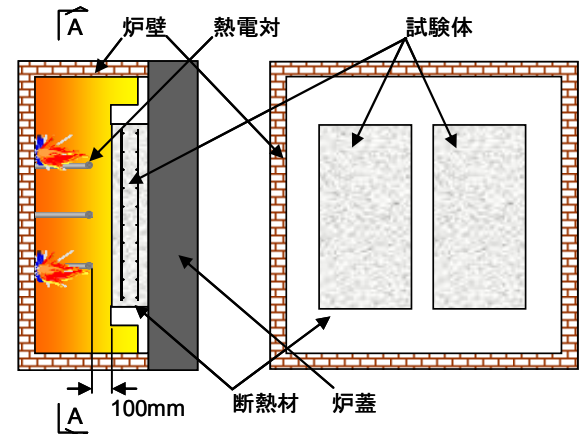


Fig. 1 試験体の概要
Outline of Test Specimen



[実験概要・断面図] [試験体の加熱表面(A-A)矢視図]

Fig. 2 耐火試験の概要
Outline of Fire Resistance Test

フレッシュコンクリートの品質として、中流動はスランプ 18 ± 2.5 cm、高流動コンクリートはスランプ 55 ± 5 cmとし、空気量は全て 3.0 ± 1.5 %とした。なお鋼繊維の混入率は、無混入および0.6% (容積比) とし、PP繊維の混入率は、0.2% (容積比) とし、全試験体共通とした。鋼繊維とPP繊維の外観の一例をPhoto 1に示す。

2.1.3 耐火試験概要 耐火試験の概要をFig. 2に示す。耐火試験には、壁用耐火炉を使用し、側面に設置されている4個のガスバーナーにより加熱した。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。

Table 3 爆裂深さ測定結果
Results of Explosive Spalling Depth

記号	コンクリートの種類	PP繊維の種類		最大爆裂深さ (mm)	平均爆裂深さ (mm)	爆裂面積率 (%)
		記号	アスペクト比			
SL-B	中流動	PPB	114	12	1.0	21.2
SL-C		PPC	410	3	0.1	8.7
SL-C-N			5	0.1	4.8	
SL-D		PPD	570	3	0.1	5.2
LP-C	粉体系 (C+LP)	PPC	410	4	0.1	6.1
LP-D		PPD	570	8	0.3	9.5
FA-A	粉体系 (C+FA)	PPA	69	32	8.1	83.1
FA-C		PPC	410	8	0.4	14.3
FA-D		PPD	570	2	0.0	2.2
FA-E		PPE	855	14	0.7	17.3
BS-D	粉体系 (C+BS)	PPD	410	2	0.1以下	1.3
VM-B	増粘剤系	PPB	114	28	5.7	56.7
VM-C		PPC	410	7	0.4	12.6
VM-D		PPD	570	0	0.0	0.0

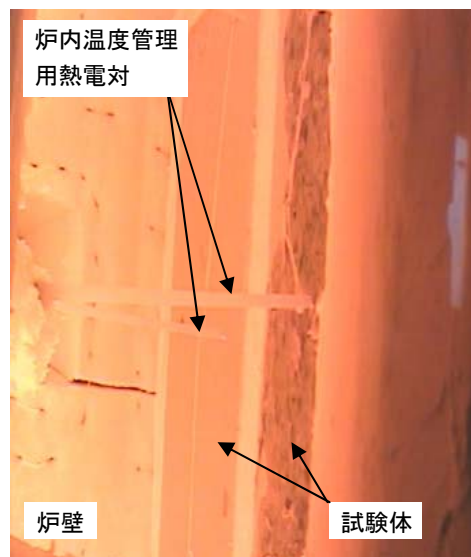


Photo 2 耐火実験状況
The State of Fire Resistance Test

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、60分まで1200℃を保持するドイツ規格のRABT曲線を採用した。炉内の温度管理は、試験体の加熱面から100mm離れた箇所に配置した熱電対を用いて行った。

耐火試験時は、測定項目として、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、壁用耐火炉の側壁にある観察窓に設置した耐熱CCDカメラおよび観察窓からの直接目視により観察した。耐火試験後は、外観調査と爆裂深さの測定を行った。爆裂深さは、試験体表面を50mm間隔に分割した全231点について、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の数を全測点数で除した値を爆裂面積率として評価した。

2.2 実験結果および考察

2.2.1 爆裂の発生状況 爆裂が発生した試験体においては、加熱開始後2分～2分30秒経過した時点（炉内温度で500～600℃）から爆裂が生じ、概ね5～10分までで収まり、その後爆裂は発生しなかった。爆裂により、50～100mmの円形で厚さ数mmのコンクリート片が表層からはく離した。

爆裂が軽微であった試験体については、数回はく離が生じた後に収束したが、損傷が大きい試験体については、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い、広範囲にわたって層状に損傷を受けた。爆裂深さの測定結果をTable 3に示す。爆裂面積率と最大爆裂深さおよび平均爆裂深さとの関係をFig. 3に示す。爆裂面積率の増加に伴い、最大爆裂深さおよび平均爆裂深さも増加傾向を示した。また、CCDカメラで撮影した耐火試験時の炉内状況をPhoto 2に示す。

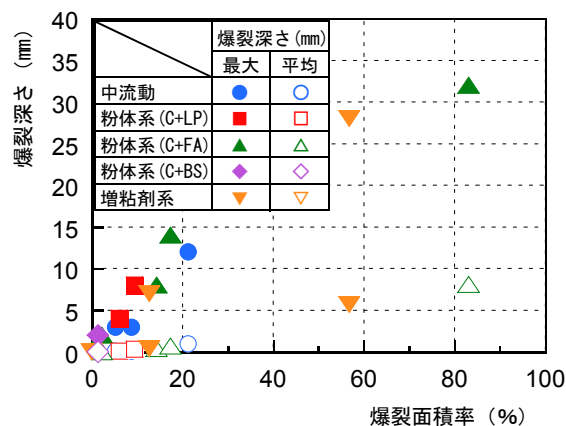


Fig. 3 爆裂面積率と爆裂深さの関係
Relationship between Explosive Spalling Area Ratio and Depth of Explosive Spalling

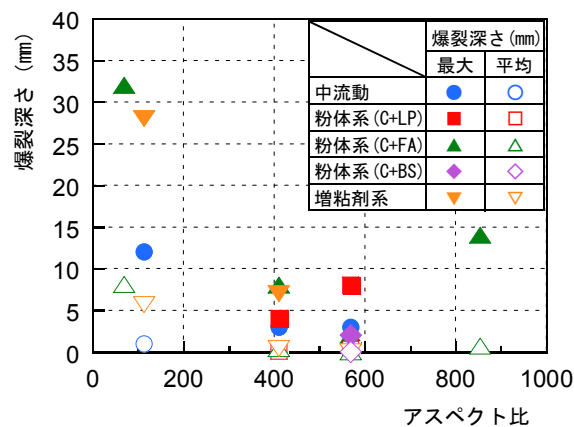
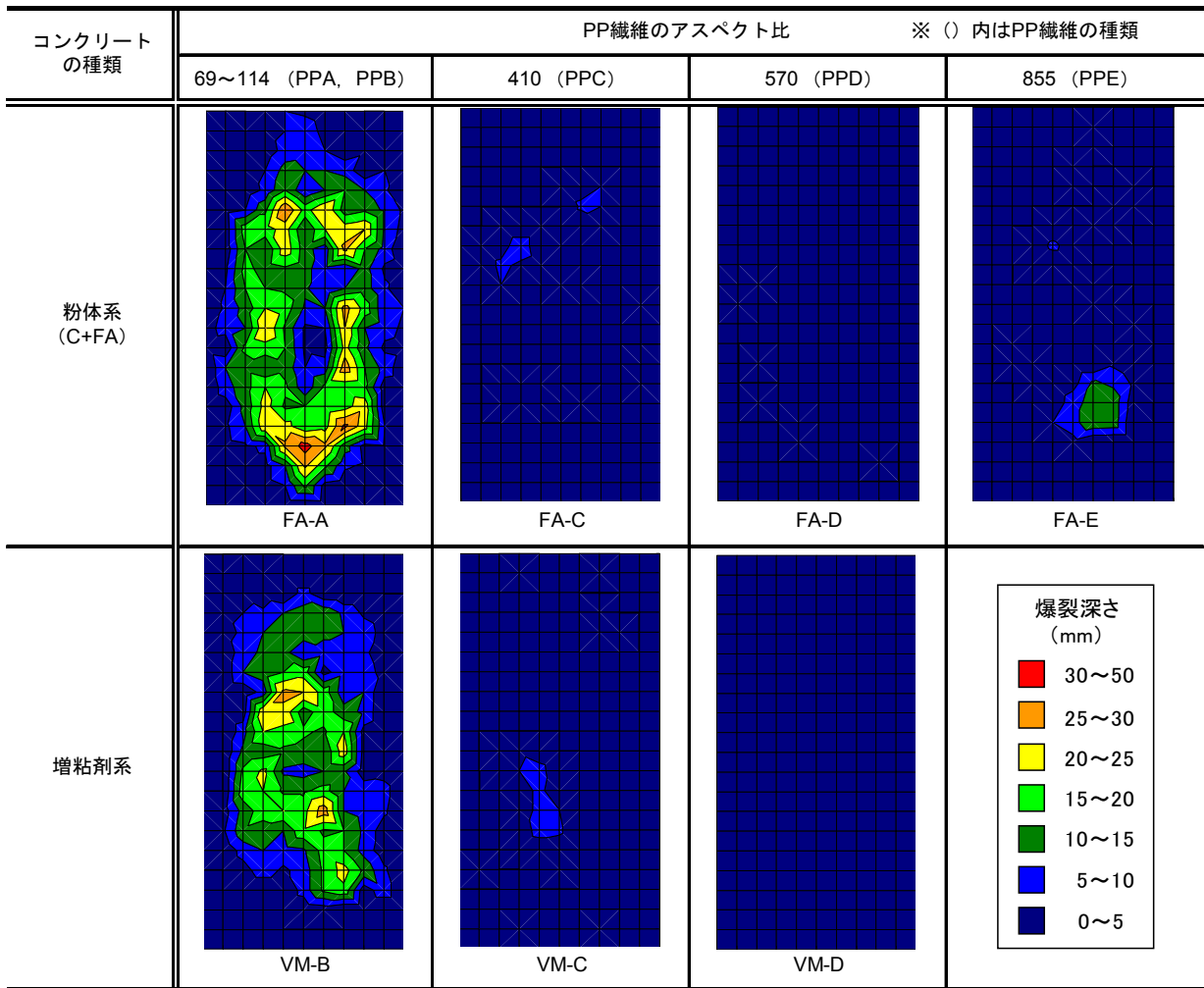


Fig. 4 アスペクト比と爆裂深さの関係
Relationship between Aspect Ratio of Polypropylene Short Fiber and Depth of Explosive Spalling

Table 4 爆裂深さの分布図
Distribution of Explosive Spalling Depth



2.2.2 PP繊維のアスペクト比の影響 最大爆裂深さおよび平均爆裂深さとアスペクト比との関係をFig. 4に示す。また、爆裂深さの分布図の一例として、粉体系 (C+FA) および増粘剤系の測定結果をTable 4に示す。

アスペクト比が570のPPDを使用した試験体は、概ね爆裂深さが小さく抑えられた。特に、FA-D、VM-DおよびBS-Dについては、ほぼ完全に爆裂が抑制できた。逆に、アスペクト比の小さいPPAやPPBを使用しているSL-B、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。また、Fig. 4によると、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が確認された。しかし、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増加した。アスペクト比が大き過ぎると、PP繊維が細長くなり過ぎて、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ことが原因の一つとして推察される。

2.2.3 その他の影響 アスペクト比の小さいPPAやPPBを用いたに着目すると、高流動コンクリートよりも中

流動の方が爆裂による損傷の程度が小さく抑えられており、既往の知見^{4),5)}と同様な傾向を示した。

中流動でPPCのPP繊維を用いたSL-Cについて、鋼繊維の有無による比較を行った。Table 3によると、爆裂深さに顕著な差は認められなかった。両者とも比較的軽微な爆裂で収まっていた。

また、前項の結果から、爆裂の抑制に効果的なPPDを使用した試験体において、混和材の種類やコンクリートの種類による影響はほとんど認められず、いずれも高い爆裂抵抗性を有していることが確認された。

3. 軸力を導入した試験体による実規模実験

3.1 実験概要

3.1.1 実験ケース 前章に示した耐火試験結果より、小型試験体においては、アスペクト比の大きいPP繊維を容積比で0.2%混入することで爆裂を抑制できることが確認できた。実規模実験では、実規模レベルの試験体を作製し、実際のセグメントに想定される軸力を導入した状態での耐火性を確認することを目的とした。

混和材として高炉スラグ微粉末を用いた粉体系(C+BS)をベースとし、基礎実験で爆裂に対して抑制効果の高かったPPC(アスペクト比:410)およびPPD(アスペクト比:570)の2種類について検討した。試験体の記号は、PPCを用いた試験体をBS-Cとし、PPDを用いた試験体をBS-Dとした。

3.1.2 試験体の作製 実験に使用した粉体系(C+BS)については、基礎実験と同様に、高炉スラグ微粉末の置換率は50%、鋼繊維の混入率は容積比で0.6%、PP繊維の混入率は容積比で0.2%とした。

試験体の概要をFig. 6に示す。試験体の寸法は、幅1,700mm×長さ1,900mm×厚さ500mmとした。主鉄筋はD16を使用し、115mm間隔で加熱面から75mmの位置に配置した。試験体には、実際のセグメントに作用する圧縮応力を考慮し、PC鋼棒を使用しポストテンション方式により14.4N/mm²(許容圧縮応力度の8割)の平均圧縮応力度を作用させた状態で耐火試験を実施した。

3.1.3 耐火試験概要 耐火試験の概要をFig. 7に示す。基礎実験と同様に壁用耐火炉を使用し、加熱条件はRABT曲線とした。

測定項目も基礎実験と同様に、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い、耐火試験後は、外観調査と爆裂深さの測定を行った。爆裂深さは、試験体表面を50mm間隔に分割した全513点について、測定した。また、実規模実験においては、コンクリート内部に熱電対を埋設することにより、加熱面から0、25、50、70、100、200、300および500mmの位置において、深さ方向におけるコンクリート温度を測定した。加熱面から0mmの位置については、熱電対の先端を型枠に密着させた状態でコンクリートに埋設した。

3.2 実験結果および考察

実規模実験における試験体BS-CおよびBS-Dの爆裂深さの分布をFig. 8に示す。

アスペクト比570のPPDを用いた試験体BS-Dは、数mmのはく離が認められたものの、概ね爆裂を抑制できた。また、アスペクト比410のPPCを用いたBS-Cについても、局部的にコンクリート表面がはく離しているが、極く表層に限定され、軽微な損傷に抑えられた。平均的な爆裂深さは、試験体BS-Cで3.3mm、試験体BS-Dで0.3mmとアスペクト比の大きいPP繊維を用いた方が、損傷の程度は小さく、基礎実験で得られた結果と同様の傾向が認められた。軸力を導入した場合においても、アスペクト比が410~570のPP繊維を0.2vo1%混入することで、軸力導入下においても爆裂を十分抑制できることが確認された。

断面内の深さごとの温度履歴をFig. 9およびFig. 10に示す。炉内の温度は、概ねRABT曲線に沿って推移した。また、どの測点においても局所的な変曲点はなく、爆裂による特異点は認められなかった。コンクリートの表層部(加熱面から0mm)の最大温度は、700℃~900℃であり、1200℃まで達しなかった。これは、炉内の温度は1200℃

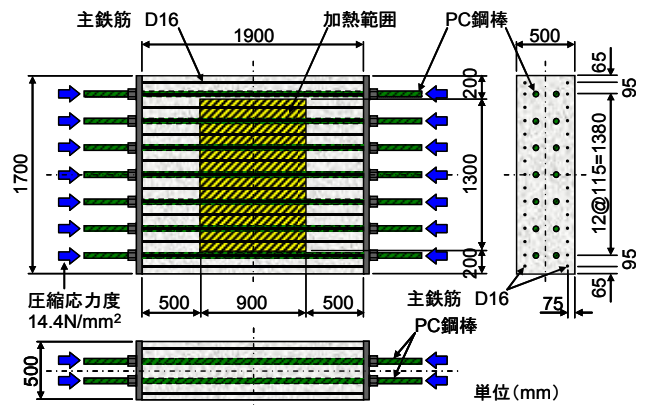


Fig. 6 試験体の概要
Outline of Test Specimen

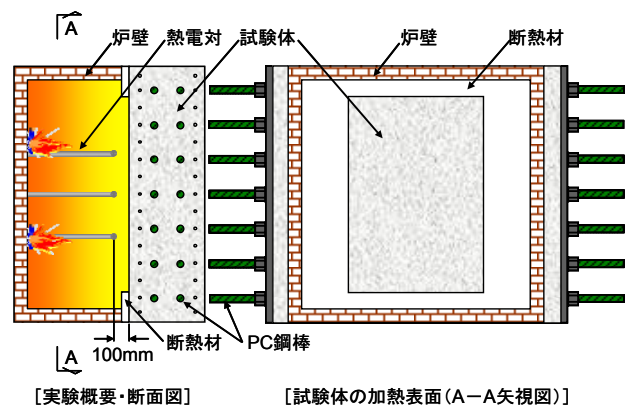


Fig. 7 耐火試験の概要
Outline of Fire Resistance Test

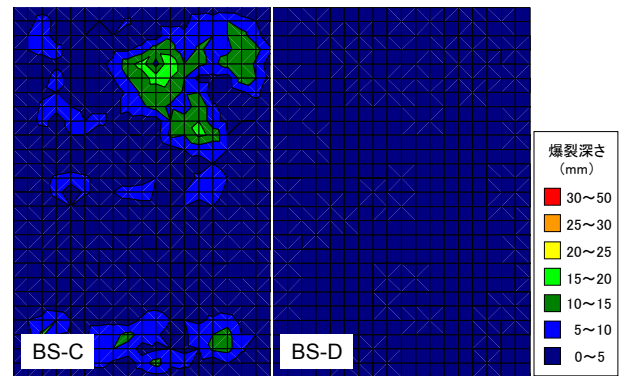


Fig. 8 爆裂深さの分布図
Distribution of Explosive Spalling Depth

に達しているが、コンクリートの表層部は、受熱した温度が内部に伝導されたためと思われる。加熱開始から60分経過後、炉内温度が低下する段階では、コンクリート内部の温度は、常に均一になるようとするため、コンクリートの表層部の温度は、コンクリート内部へ伝導し、裏面側の温度は上昇する。そのため、最大温度に達する時間は、加熱面から深くなるほど長くなった。RABT曲線の終了時(加熱開始から170分後)においても、加熱面のコンクリート温度は300℃程度の温度であった。

加熱面からの深さとコンクリートの最高到達温度の関係をFig. 11に示す。温度測定値から直線補間して求めた場合、コンクリートの許容温度を250℃～380℃⁶⁾とすると、その温度に達する加熱面からの深さは、41mm～69mmの範囲となった。また、鉄筋の許容温度を250℃～350℃⁶⁾とすると、その温度に達する加熱面からの深さは、45mm～69mmの範囲となった。

4. まとめ

ポリプロピレン短繊維を混入した鋼繊維補強高流動コンクリートについて、各種耐火試験を行い、爆裂防止性能を検証した。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) アスペクト比が69～114のポリプロピレン短繊維を使用した場合、中流動タイプのコンクリートに比べて高流動タイプのコンクリートの方が、爆裂深さが大きい傾向が認められた。
- 2) ポリプロピレン短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た。ただし、アスペクト比が850になると、逆に爆裂抵抗性が低下した。
- 3) アスペクト比が410～570のポリプロピレン短繊維を0.2vol%混入することで、軸力導入下においても、十分な爆裂抵抗性が確保できる。
- 4) RABT曲線による高温履歴を受けた場合、コンクリートについては、加熱面から41mm～69mm以深で健全性を確保でき、鉄筋については、かぶりを45mm～69mm確保することで、許容温度以内に抑制できる。

シールドトンネルにおける耐久かつ合理的な覆工構造を実現する技術として、本開発の成果を基に、耐火型高性能SFRCセグメントを積極的に展開していく予定である。

参考文献

- 1) 田嶋仁志：シールドRCセグメント構造の耐火技術と設計，コンクリート工学，Vol. 45，No. 9，pp. 61-66，(2007)
- 2) 石田知子，他：トンネル覆工用耐火コンクリートの開発，大林組研究所報，No. 70，(2006)
- 3) 土橋浩，他：鋼繊維補強高流動コンクリート（SFRC）セグメントの現場適用，コンクリート工学，Vol. 44，No. 11，pp. 45-50，(2006)
- 4) 浦野知子，他：鋼繊維補強コンクリートの耐火性能，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，pp. 321-326，(2004)
- 5) 野萱勝久：特集高流動コンクリートの基本と実際高流動コンクリートの性質－硬化コンクリート，建築技術，No. 553，pp. 67-71，(1996)
- 6) 社団法人日本道路協会：シールドトンネル設計・施工指針，pp. 185-186，(2009)

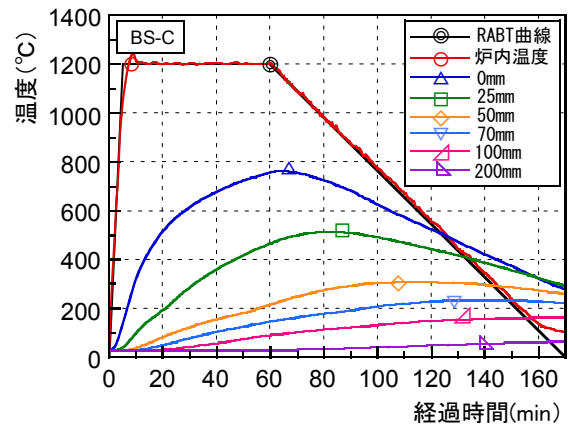


Fig. 9 温度履歴 (試験体BS-C)
Temperature-Time Relationship (BS-C)

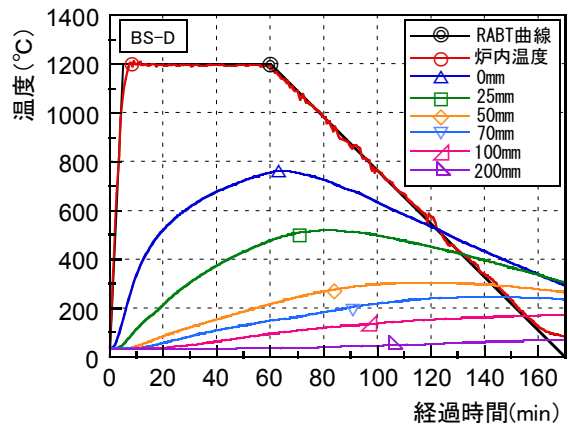


Fig. 10 温度履歴 (試験体BS-D)
Temperature-Time Relationship (BS-D)

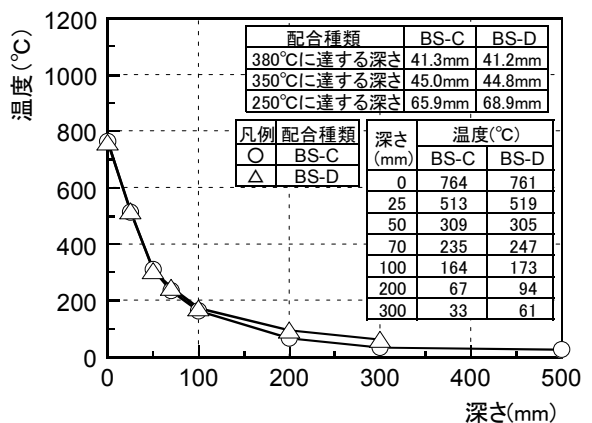


Fig. 11 加熱面からの深さと最高温度の関係
Relationship between Depth from heated surface and Maximum Temperature