

論文 ポリプロピレン短繊維による鋼繊維補強コンクリートの耐火性能に関する研究

川西 貴士*1・屋代 勉*2・田中 善広*3・小林 一博*4

要旨: コンクリートの剥落防止, 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。都市型の大深度地下シールドセグメントには, 耐火性能が求められているが, 鋼繊維補強高流動コンクリートの耐火性能については, 十分把握されていないのが現状である。そこで, 爆裂に対して効果的であるポリプロピレン短繊維の種類を変化させたコンクリートについて, 耐火試験を実施し, その耐火性について検討を行った。その結果, アスペクト比が 600 程度のポリプロピレン短繊維を使用することで, 爆裂を抑制可能であることが分かった。

キーワード: ポリプロピレン短繊維, 鋼繊維, 高流動, 耐火, 爆裂, アスペクト比, シールドセグメント

1. はじめに

耐力やじん性の向上, ひび割れ分散効果を持つ鋼繊維補強コンクリートは, コンクリートの剥落防止や鉄筋量の低減が可能となる。また, 自己充てん性を持つ高流動コンクリートは, 施工性の向上を図れるとともに, 締固めが不要となるため, 型枠の剛性を低減でき, 製作コストの低減が可能となることから, 近年シールドセグメントに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¹⁾。

一方で, トンネル内で大規模火災が発生した場合, ガソリン, 油や木材など可燃性の物質が閉鎖された空間で燃焼するため, トンネル内は急速に 1000℃を超える高温に晒される可能性がある。このような高温履歴を受けた場合, コンクリートが爆裂したり, 強度低下を引き起こすことにより, 大きな損傷を受けることが問題となることから, 都市型の大深度地下シールドトンネルにおいては, 爆裂を抑制した耐火性能が求められている²⁾。

爆裂の原因の一つとして, 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剥離する水蒸気圧説が挙げられる。この対策として, 一般に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ておき, 高温履歴を受けた場合, この PP 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。著者らは, この考え方を基に, 高流動 SFRC の耐火性能について研究を進めている³⁾。

しかし, 鋼繊維による補強が, 耐火性能に与える影響については, 爆裂深さが小さくなるとの見解⁴⁾もあれば,

大きくなるとの見解⁵⁾もあり, 試験条件によって異なる結果となっており, はっきりとは解明されていない。また, 高流動コンクリートの耐火性能については, 一般に, 単位水量が増加することと, 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, 爆裂しやすいと報告されており^{4), 6)}, 高流動 SFRC は, 耐爆裂性に劣ることが懸念される。

そこで, コンクリートの流動性および混和材と, 爆裂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各種コンクリートについて耐火試験を行い, 高流動 SFRC の耐爆裂性について, 実験的に検証を行った。

2. 実験概要

2.1 実験ケース

コンクリートには, スランプタイプのコンクリート(以下, 中流動と呼称), 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, 石灰石微粉末とフライアッシュの 2 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) と呼称)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, 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-1 に示す。実験ケースの組合せを表-2 に示す。

*1 (株)大林組 東京本社技術本部技術研究所土木材料研究室 主任 工修 (正会員)

*2 (株)大林組 東京本社土木本部生産技術本部シールド技術部 主任 工修 (正会員)

*3 (株)大林組 東京本社ピッツバーグ工事事務所 副主査 工修 (非会員)

*4 石川島建材工業(株) セグメント事業本部技術部 課長 (正会員)

2.2 試験体の作製

(1) 使用材料および配合

使用材料を表-3 に示す。結合材については、全て普通ポルトランドセメントをベースにした。中流動は、セメントのみ、粉体系は、セメントの他に増量材として、石灰石微粉末とフライアッシュの2種類を使用した。増粘剤系は、分離低減剤としてセルロース系の増粘剤を使用した。

配合の組合せを表-4 に示す。フレッシュコンクリートの性状は、中流動はスランプ 18±2.5cm、高流動コンクリートはスランプフロー55±5cm、および空気量は全て 3.0±1.5%であった。水セメント比は、強度レベルを一定にするために、統一して 36%とした。鋼繊維は 0.6vol%とし、PP 繊維は 0.2vol%とした。PP 繊維のアスペクト比の増加に伴い、コンクリートのワーカビリティが低下するため、単位粉体量が増加する傾向となった。

(2) 試験体の形状および作製方法

試験体の概略図を図-1 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、かぶりを 50mm 確保した。

強制練り 2 軸ミキサで練り混ぜたコンクリートを型枠中央部に投入した後、中流動については、内部振動機を用いて十分に締固めを行い、粉体系および増粘剤系については、締固めを行わず、そのまま充てんすることで、打込みを行った。

2.3 耐火試験概要

耐火試験の概略図を図-2 に示す。耐火炉は壁炉を使用した。炉内に配置されている 4 個のバーナーにより昇温し、輻射熱により炉内を加熱した。耐火試験は一面加

表-1 PP 繊維の種類

記号	織度 (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

表-2 実験ケース

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

※試験体の記号

SL - 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

(SL : 中流動, LP : 粉体系 (C+LP),

FA : 粉体系 (C+FA), VM:増粘剤系)

表-3 使用材料

項目	記号	品名	密度 (g/cm ³)
セメント	C	普通ポルトランドセメント	3.16
混和材	LP	石灰石微粉末	2.71
	FA	フライアッシュⅡ種	2.20
細骨材	S	陸砂	2.62
粗骨材	G	砕石2005	2.67
混和剤	VM	セルロース系増粘剤	—
繊維	SF	鋼繊維	7.85
	PP	ポリプロピレン繊維	0.91

表-4 配合の組合せ

試験体の種類				配合条件					配合の組合せ				
試験体の記号	コンクリートの種類	PP繊維の記号	アスペクト比	スランプ・スランプフロー (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	単位粉体量 P (kg/m ³)	細骨材率 s/a (%)	石灰石微粉末 LP	フライアッシュ FA	増粘剤 VM	鋼繊維 SF	PP繊維 PP
SL-B	中流動	PPB	114	18±2.5	3.0±1.5	36.0	472	55.7	—	—	—	0.6vol%	0.2vol%
SL-C		PPC	410				472	55.7					
SL-D		PPD	570				500	55.7					
LP-C	粉体系 (C+LP)	PPC	410	55±5	3.0±1.5	36.0	608	61.0	○	—	—	0.6vol%	0.2vol%
LP-D		PPD	570				676	57.9					
FA-A	粉体系 (C+FA)	PPA	69	55±5	3.0±1.5	36.0	555	62.5	—	○	—	0.6vol%	0.2vol%
FA-C		PPC	410				573	62.0					
FA-D		PPD	570				625	59.4					
FA-E		PPE	855				677	57.1					
VM-B	増粘剤系	PPB	114	55±5	3.0±1.5	36.0	528	62.1	—	—	○	0.6vol%	0.2vol%
VM-C		PPC	410				542	61.5					
VM-D		PPD	570				583	59.6					

※P : 単位粉体量 (C+LP+FA)

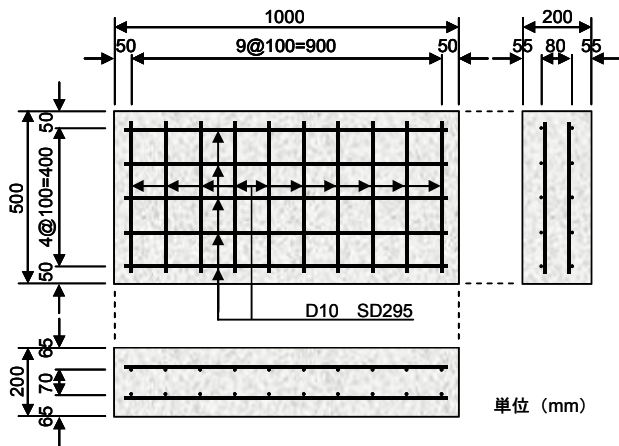


図-1 試験体概略図

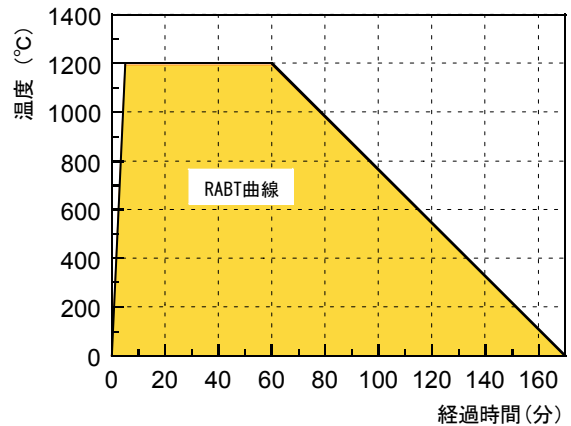


図-3 RABT 曲線

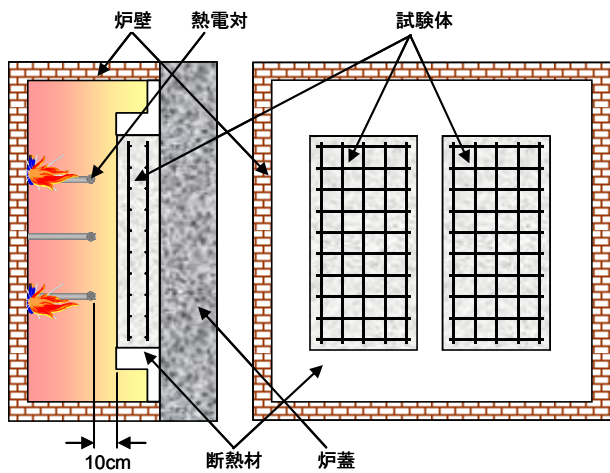


図-2 耐火試験概略図



写真-1 炉内状況

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、図-3に示す加熱開始後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。

測定項目として、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、炉壁の窓に設置した耐熱用のCCDカメラと窓から直接目視により観察を行った。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、50mm間隔に分割し、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。

3. 実験結果

3.1 爆裂の状況

爆裂の発生は、いずれも加熱開始後2分～2分30秒程度経過した時点（炉内温度で500～600℃位）から爆裂が発生し、概ね5～10分位までで収まり、その後爆裂は進行しなかった。爆裂は、5～10cm位の円形で厚さ数mmのコンクリート片が、表層から剥離して発生した。爆裂の軽微な試験体については、数回剥離して収束したが、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剥離し、爆裂範囲が重なり合って、層状に損傷を受け、広範囲にわたって爆裂が発生した。CCDカメラで撮影した炉内状況の一例を写真-1に示す。

3.2 爆裂深さと爆裂面積率

爆裂深さの測定結果を表-5に示す。また、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図-1に示す。最大爆裂深さおよび平均爆裂深さの両者とも爆裂面積率との間に相関関係があることが認められた。前節で述べたとおり、爆裂は、5～10cm程度のコンクリート片が、断続的に剥離し、相互の爆裂範囲が重なり合っ

表-5 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	爆裂深さ (mm)		爆裂面積率 (%)
				最大爆裂深さ	平均爆裂深さ	
SL-B	中流動	PPB	114	12.0	1.0	21.2
SL-C		PPC	410	3.0	0.1	8.7
SL-D		PPD	570	3.0	0.1	5.2
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
VM-B		増粘剤系	PPB	114	28.0	5.7
VM-C	PPC		410	7.0	0.4	12.6
VM-D	PPD		570	0.0	0.0	0.0

て損傷を受けるため、爆裂は局部的に発生しないことを付けているものと思われる。

PP 繊維の種類について着目すると、全ての試験体の爆裂深さは、PP 繊維の種類によって影響を受けていることが分かる。アスペクト比の大きい 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 については、平均爆裂深さが 0mm、VM-D については、全く爆裂が発生しなかった。逆に、アスペクト比の小さい PP 繊維を使用している 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、最もアスペクト比の大きい PPE を用いた FA-E については、FA-D よりも爆裂による損傷が大きい結果となった。

爆裂深さの分布図を図-2 に示す。アスペクト比の小さい PP 繊維を使用した FA-A および VM-B については、試験体の表面全体に損傷を受けており、爆裂が広範囲に及んでいることが確認できる。しかし、爆裂は中央部に集中しており、試験体の外周付近は、ほとんど損傷を受けなかった。試験体端部は、自由膨張できるため、拘束効果が低減されることや、側面からも水分が逸散していることが考えられ、水蒸気圧や熱応力が緩和されたことが原因として考えられる。

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図-3 に示す。また、爆裂面積率とアスペクト比との関係を図-4 に示す。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。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大きくなっており、変曲点が認められた。アスペクト比が増加しすぎると、PP 繊維が細長くなりすぎて、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として考えられる。爆裂面積率についても、爆裂深さと同様な傾向が認められた。ま

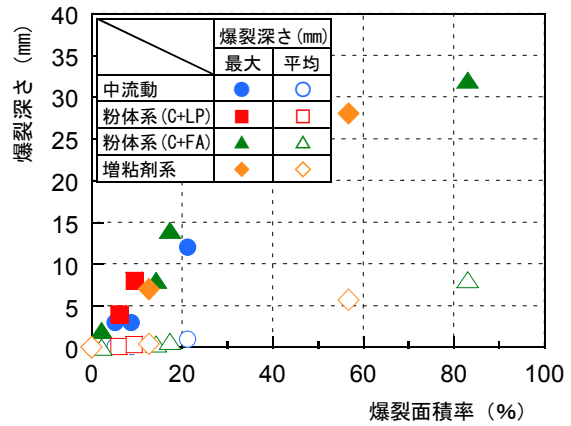


図-1 爆裂深さと爆裂面積率

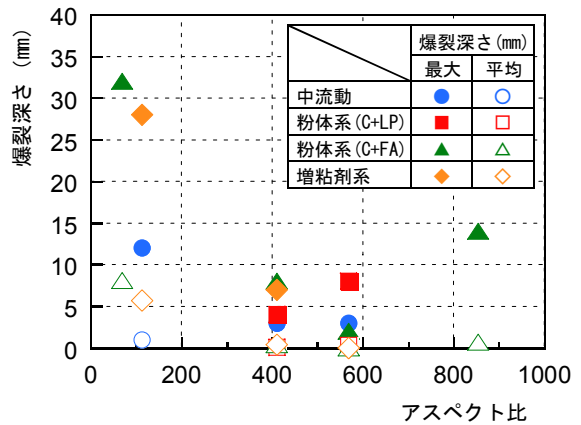


図-3 アスペクト比と爆裂深さの関係

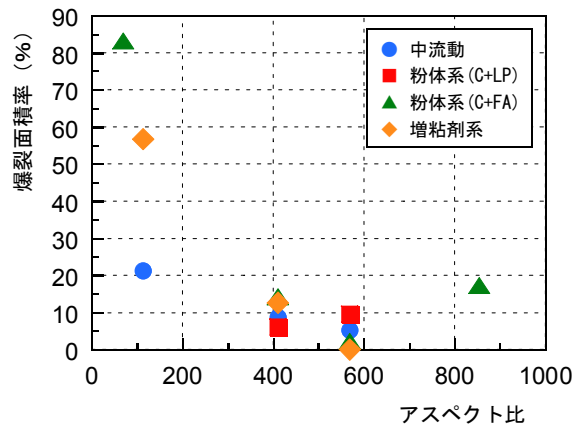


図-4 アスペクト比と爆裂面積率の関係

た、アスペクト比の小さい SL-B、FA-A および VM-B 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), 6)}と同様な傾向を示した。

3.3 耐火試験後の外観調査

爆裂による損傷の程度が比較的小さかった PP 繊維(長さ 10mm、アスペクト比 570)を用いた SL-D、LP-D、FA-D および VM-D の耐火試験後の試験体表面の状況を写真-2 に示す。粉体系 (C+FA) の FA-D および増粘剤系の VM-D については、爆裂が抑制されていることが、この写真か

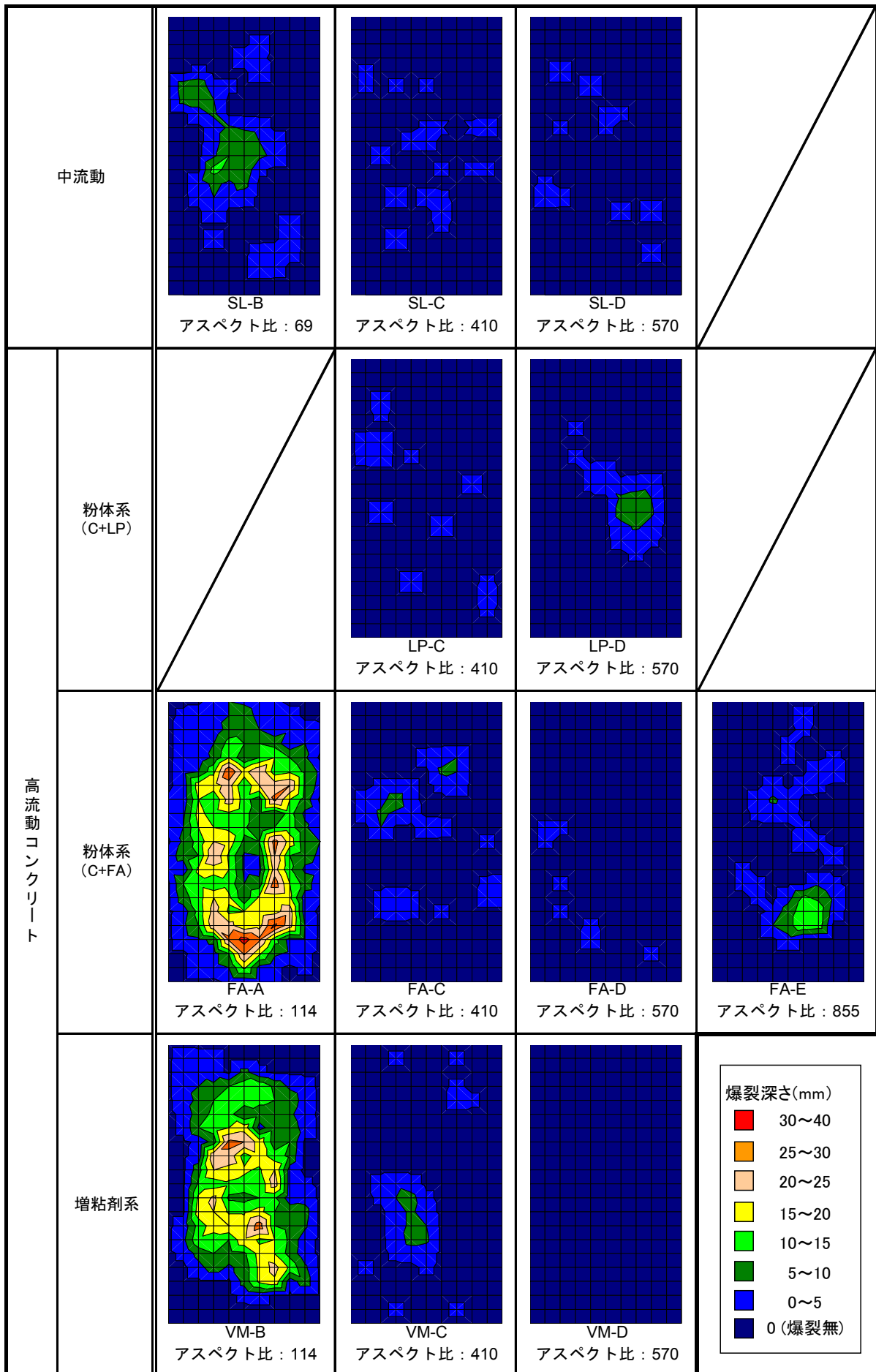


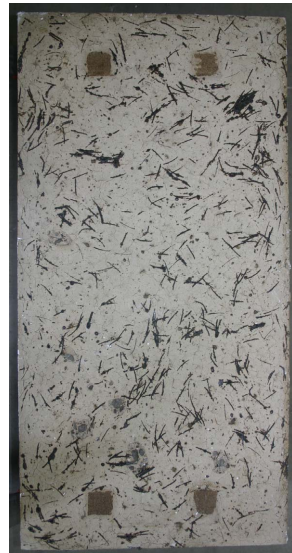
図-2 爆裂深さの分布図



中流動
SL-D



粉体系 (C+LP)
LP-D



粉体系 (C+FA)
FA-D



増粘材系
VM-D

写真-2 耐火試験後状況

らも確認できる。LP-DとFA-Dは、白っぽい色を呈しているが、これは石灰石微粉末とフライアッシュの影響であると思われる。

4. まとめ

鋼繊維補強高流動コンクリートの耐爆裂性を確認するために、流動性と混和材の異なるコンクリートとアスペクト比の異なるポリプロピレン短繊維をパラメータとして試験体を作製し、耐火試験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) アスペクト比 69～114 のポリプロピレン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) フライアッシュを用いた粉体系高流動コンクリート、あるいは増粘剤系高流動コンクリートとし、アスペクト比が 570 のポリプロピレン短繊維を混入することで、鋼繊維補強高流動コンクリートの爆裂を抑制することが可能である。

耐火性能の劣弱が懸念される鋼繊維補強高流動コンクリートについて、最適なポリプロピレン短繊維を調整選定することで、爆裂による損傷を抑制できることが確

認された。今後、耐火性能を必要とするシールドセグメントの配合計画を検討する際に、活用できるものと思われる。

参考文献

- 1) 土橋浩, 松原健太, 屋代勉, 小林一博: 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, 2006.11
- 2) 森田武: トンネル火災におけるコンクリートの耐火性について, コンクリート工学, Vol.38, No.11, pp.61-65, 2000.11
- 3) 北岡隆司, 屋代勉, 藤井亜紀, 川西貴士, 小林一博: ポリプロピレン繊維混入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 62 回年次学術講演会概要集, 部門V, pp.1215-1216, 2007.9
- 4) 浦野知子, 林成卓, 土橋浩, 角田浩: 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, 2004.6
- 5) 馬場弘二, 伊藤哲男, 松本健次, 矢吹増男, 吉武勇, 中川浩二: 高温加熱を受ける繊維補強コンクリートの特性, 土木学会論文集, No.781, V-66, pp.205-212, 2005.2
- 6) 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, 1996.4