

報告 簡易耐火試験による超高強度コンクリート爆裂対策の検討

竹内 博幸^{*1}・高橋 祐一^{*2}・山本基由^{*3}

要旨: 過年度において報告した簡易耐火試験による 100N 級高強度コンクリートの爆裂対策の選定手法を適用し, 100N を超える領域の超高強度コンクリートの爆裂対策として, 既に 80N 級高強度コンクリートで実績のある有機系繊維混入による手法の有効性について検討した。同試験による検討の結果, 同じ有機系の繊維でも繊維径のより小さいものを混入することにより, 超高強度領域のコンクリートの爆裂対策に有効であることが明らかになった。

キーワード: 超高強度コンクリート, 有機系繊維, 繊維径, 爆裂対策, 簡易耐火試験

1. はじめに

筆者らは, 過年度に, 電気炉による各種被覆材の耐火試験を行い, そこで3時間耐火を検証された被覆材は, 実大規模の試験体による載荷加熱実験においても3時間耐火が認められることを報告した¹⁾。また, それと同様の評価方法を適用し, 設計基準強度 80N/mm² の実構造物に, 爆裂対策として高強度コンクリートにポリプロピレン製 (以下 pp 製) 短繊維を混入する手法を適用した²⁾。

そこで, 今回は, さらに高強度域である設計基準強度 125N/mm² の超高強度コンクリート (大臣認定取得) について, 爆裂対策としてより断面の小さい pp 製繊維を含む各種断面形状の繊維を混入した試験体による過年度と同様の簡易耐火試験を実施し, その有効性と適切な繊維の断面形状・寸法, 混入量の条件について検討した。

2. 試験方法

2.1 試験概要

今回実施した簡易耐火試験方法は, 過年度に実施したものと試験体の形状・寸法以外はほとんど変わらないが, 試験体は電気炉の蓋の内側に取り付け, 電気炉の内部側より加熱し, 試験体表面 (炉内部側) とかぶり部分 (表面より 40 mm 試験体内側) の温度を熱電対にて測定した。

爆裂防止効果は, 基本的に加熱3時間内における爆裂の有無によるが, 試験後の試験体表面や内部の状態も参考とした。試験体の形状と納まりを図-1に示す。なお, 試験体に用いたコンクリートの調合と各種試験結果を表-1に, 爆裂対策の適用材料として試験体コンクリートに混入した有機繊維の仕様を表-2に示す。また, 電気炉による加熱状況を写真-1に示す。

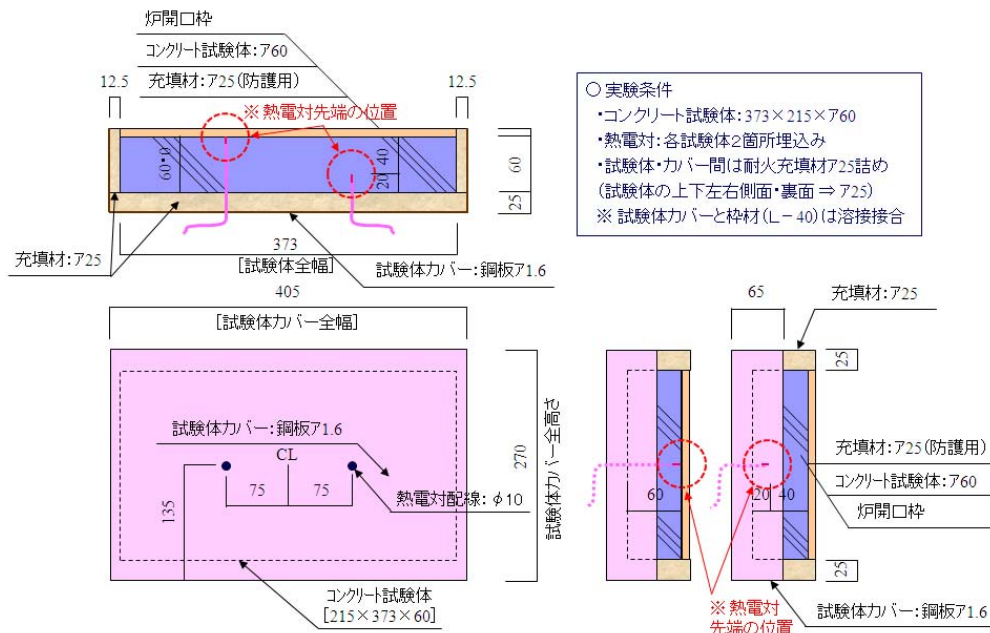


図-1 試験体形状および電気炉蓋内納まり

*1 五洋建設株式会社 技術研究所 建築グループ (正会員)

*2 五洋建設株式会社 技術研究所 建築グループ 博士 (工学) (正会員)

*3 株式会社テザック 産業資材グループ 博士 (工学) (正会員)

表－1 試験体コンクリートの調合と各種試験結果

No	調 合		単位量(kg/m ³)			フレッシュ試験(繊維混入後)			圧縮強度(N/mm ²) (標準養生)	
	繊維種類 (径・長さ)	W/C (%)	W	C	繊維量 (Vol.%)	スランプフロー (cm)	空気量 (%)	CT (℃)	σ_{28}	σ_{91}
1	25×110 μ ・12 mm	17.0	155	912	0.2	56.7×55.4	1.5	21	146	167
2	25×110 μ ・3 mm	17.0	155	912	0.2	72.7×70.8	1.5	21	140	171
3	ϕ 41 μ ・12 mm	17.0	155	912	0.2	66.0×62.3	1.8	22	143	164
4	ϕ 41 μ ・6 mm	17.0	155	912	0.2	72.3×70.3	1.8	22	144	173
5	ϕ 23 μ ・12 mm	17.0	155	1107	0.2	69.2×67.1	2.2	23	157	185
6	ϕ 23 μ ・12 mm	17.0	155	1107	0.1	70.5×70.2	1.9	23	157	191

2.2 試験条件

今回、簡易耐火試験を実施した試験体の一覧を表－3に示す。試験は、2種類の電気炉 FP410 と FP42 に分けて行った。JIS 曲線と FP410・FP42 の加熱性能（今回実測したうちの最高値）を比較したものを表－4に示す。これより、JIS の 10 分以降の 700℃を超えた付近の上昇速度に対しては、FP410 は 60 分以降のそれが相当し、それほど大きな遜色はないが、JIS 曲線では 5 分で到達する温度（540℃）を FP410 では 50 分を要しており、初期段階における加熱性能に大きな差が見られる。しかしながら、過年度の実験では、同一の電気炉による試験結果と JIS 加熱曲線適用の載荷耐火試験炉による試験結果が同様の傾向を示したことから、今回も実大規模の耐火試験に先立って、電気炉により基本性状を確認することとした。また、各試験体の試験開始前時点における加熱面の含水率を表－3中に示す。試験直前には、含水率はいずれも 4.0%以下と低い測定値であった。

2.3 加熱方法

電気炉による加熱は、ランプタイム（温度上昇時間）90 分、ソークタイム（定温時間）180 分、設定温度 1, 150℃ の設定で行った。加熱試験時は、電気炉内部の温度計と

表－2 繊維材の品質基準

資材名	検査項目	品質基準値
ポリプロピレン繊維	外 観	異物混入なし
	長さ(mm)	基準値±2.0
	断面の大きさ(mm) ^{*1}	基準値±0.010
	破断強度(N/mm ²)	300 以上
	密度(g/cm ³)	0.90～0.92
	付着水分(%)	1.0 以下

注]*1:繊維(dtex)＝10000mの質量より算定



写真－1 電気炉による加熱状況

表－3 試験体一覧

No	繊維種類 ¹⁾			試験体				使用炉
	繊維種類 ¹⁾	混入量 (Vol.%)	摘 要	W/C (%)	厚さ (mm)	形状	含水率 (Wt.%)	
1	25×110／12	0.20	pp.矩形断面	17.0	60	板状	3.5	FP410
2	25×110／3	0.20	pp.矩形断面	17.0	60	板状	3.4	FP42
3	ϕ 41／12	0.20	pp.円形断面	17.0	60	板状	3.6	FP410
4	ϕ 41／6	0.20	pp.円形断面	17.0	60	板状	3.7	FP42
5	ϕ 23／12	0.20	pp.円形断面	14.0	60	板状	3.4	FP410
6	ϕ 23／12	0.10	pp.円形断面	14.0	60	板状	3.6	FP42

注] 1) 断面寸法(μ)／同長さ(mm)

表－4 加熱曲線の比較 (JIS 加熱曲線と電気炉の加熱性能)

時間 (分)	5	10	15	20	25	30	40	50	60	75	90	120	150	180	210	240
JIS	540	705	760	795	820	840	880	905	925	955	980	1010	1030	1050	1070	1095
FP410	27	65	128	159	211	280	419	548	669	836	952	1086	1103	1104	1104	1106
FP42	30	39	66	128	207	278	386	465	529	603	663	756	822	881	925	954

注]単位:℃

は別に内部温度を測定したが、電気炉の加熱能力に差があるため、相対的に加熱能力の高いFP410にて爆裂抑制が期待できる試験体の加熱試験を実施した。

3. 試験結果

3.1 試験経過の概況

(1) 試験体 No.1

- ・試験体のコンクリート：W/C＝17.0%
- ・繊維：断面 $25 \times 110 \mu$ ，長さ 12 mm，容積比 0.20%
- ・加熱炉：FP410

ランプタイム（90 分）中の 54 分に 1 回目の爆裂があり、温度が大きく低下した。その後、何回か爆裂が繰り返され、徐々にその程度が激しくなったため、加熱開始から 66 分で加熱を中止した。加熱試験における温度履歴を図－2に示す。

加熱後の試験体は、写真－2に示すように、加熱表面が薄く剥離している状態で、爆裂は発生したものの、試験体全体にわたりにひび割れや破砕に到る損傷は見られなかった。

(2) 試験体 No.2

- ・試験体のコンクリート：W/C＝17.0%
- ・繊維：断面 $25 \times 110 \mu$ ，長さ 3 mm，容積比 0.20%
- ・加熱炉：FP42

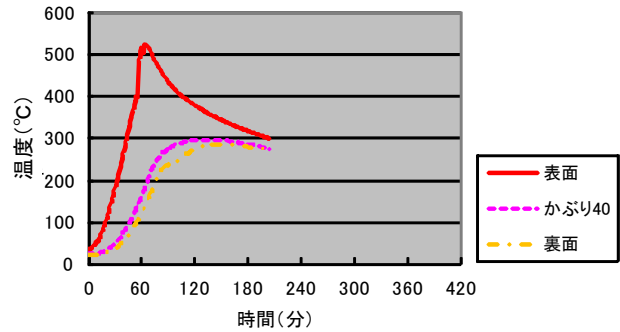
ランプタイム（90 分）中の 83 分に 1 回目の爆裂があり、温度が大きく低下した。その後、何回か爆裂が繰り返され、徐々にその程度が激しくなったため、加熱開始から 104 分で加熱を中止した。加熱試験における温度履歴を図－3に示す。

爆裂が発生した時間は、試験体 No. 1 より遅かったが、写真－3に示すように、爆裂の程度は激しく、厚さ 60 mmの試験体が一部破砕されていた。

(3) 試験体 No.3

- ・試験体のコンクリート：W/C＝17.0%
- ・繊維：断面 $\phi 41 \mu$ ，長さ 12 mm，容積比 0.20%
- ・加熱炉：FP410

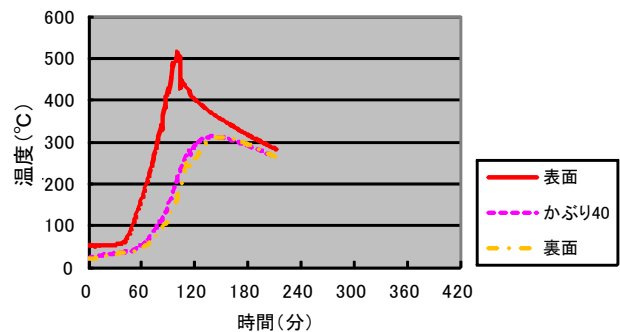
ランプタイム（90 分）から温度は円滑に上昇し、ソークタイム（180 分）を含む試験時全体にわたって、1 度も爆裂の発生はなく、加熱を終了した。加熱試験における温度履歴を図－4に示す。



図－2 加熱温度履歴(試験体 No.1)



写真－2 加熱終了後状況(試験体 No.1)

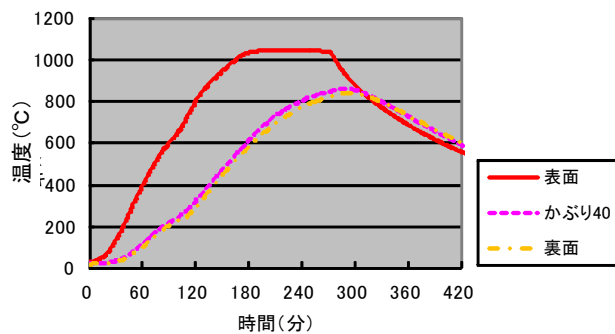


図－3 加熱温度履歴(試験体 No.2)



写真－3 加熱終了後状況(試験体 No.2)

試験体の加熱表面は、写真－４に示すように、薄茶色に変色しているが、ひび割れ、剥離などの劣化は見られず、構造体としての性状は保持されていた。



図－４ 加熱温度履歴(試験体 No.3)



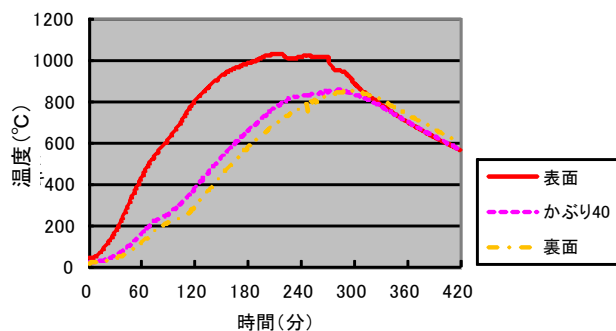
写真－４ 加熱終了後状況(試験体 No.3)

(4) 試験体 No.4

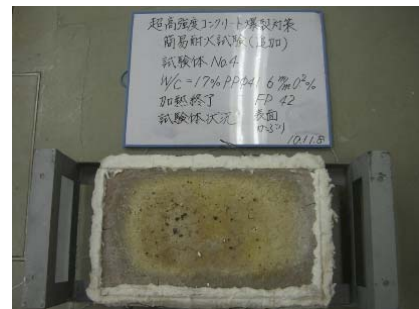
- ・試験体のコンクリート：W/C=17.0%
- ・繊維：断面 $\phi 41 \mu$ ，長さ 6 mm，容積比 0.20%
- ・加熱炉：FP42

ランプタイム（90 分）から温度は円滑に上昇し，ソークタイム（180 分）を含む試験時全体にわたり，1 度も爆裂の発生はなく，加熱を終了した。加熱試験における温度履歴を図－５に示す。

試験体の加熱表面は、写真－５に示すように、薄茶色に変色しているが、ひび割れ、剥離などの劣化は見られず、構造体としての性状は保持されていた。



図－５ 加熱温度履歴(試験体 No.4)



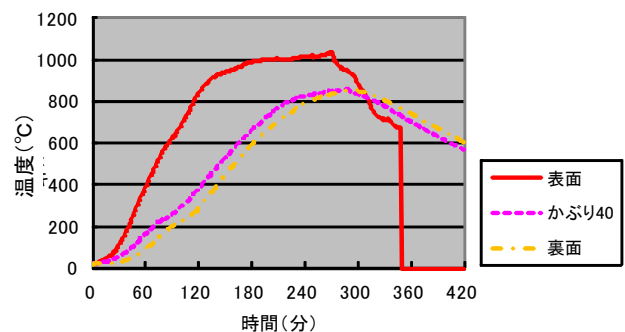
写真－５ 加熱終了後状況(試験体 No.4)

(5) 試験体 No.5

- ・試験体のコンクリート：W/C=14.0%
- ・繊維：断面 $\phi 23 \mu$ ，長さ 12 mm，容積比 0.20%
- ・加熱炉：FP410

ランプタイム（90 分）から温度は円滑に上昇し，ソークタイム（180 分）を含む試験時全体にわたり，1 度も爆裂の発生はなく，加熱を終了した。加熱試験における温度履歴を図－６に示す。なお，表面温度が 350 分付近で急低下しているのは，熱電対の損傷によるものである。

試験体の加熱表面は、写真－６に示すように、薄茶色に変色しているが、ひび割れ、剥離などの劣化は見られず、構造体としての性状は保持されていた。



図－６ 加熱温度履歴(試験体 No.5)



写真－６ 加熱終了後試験体状況(試験体 No.5)

(6) 試験体 No.6

- ・試験体のコンクリート：W/C=14.0%
- ・繊維：断面 $\phi 23 \mu$ ，長さ 12 mm，容積比 0.10%

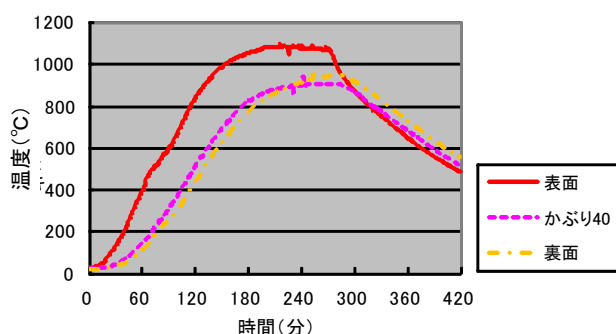
・加熱炉：FP42

ランプタイム（90 分）から温度は円滑に上昇したが、ソークタイム（180 分）の途中で弱い破裂音が何回か発生した。しかし、その後は爆裂らしい現象の発生は見られず、加熱を終了した。加熱試験における温度履歴を図－7に示す。

試験体の加熱表面は、写真－7に示すように、薄茶色に変色し、大部分に剥離の痕跡が見られたが、破碎にまでは到っていなかった。

3.2 試験結果の比較

表－5に、簡易耐火試験結果一覧を示す。



図－7 加熱温度履歴(試験体 No.6)



写真－7 加熱終了後状況(試験体 No.6)

爆裂性状と各種要因との関係についてみると、繊維の断面形状は、同一繊維量では、断面積が小さいほど爆裂防止効果が大きい傾向にあることが分かる。繊維量が同一の場合、繊維径が小さくなると相対的に本数が増大するため、繊維熔融後の空隙孔が増大し、爆裂現象を緩和するものと考えられる。³⁾

繊維長さについては、今回の試験では比較設定が少ないが、有意な傾向は特に見られない。繊維量についても、異なる因子が一つだけであったが、断面が小さい場合は0.20Vol.%では十分な爆裂防止効果が見られるものの、0.10Vol.%では若干不足していることが分かる。

試験体の温度については、爆裂が発生しない場合は、表面温度が設定温度近傍の 1000℃以上まで上昇するが、爆裂発生の場合は、500℃を少し上回る辺りで爆裂が発生していた。なお、かぶり厚さ 40 mmの位置では、爆裂が発生しない場合は表面温度より 165～186℃低い温度であり、爆裂が発生する場合は表面温度より 202～224℃低い温度であった。

4. 繊維材の混入

4.1 繊維材の混入方法

今回は、試験体を作製するにあたり、室内および実機での試験練りにおいて、超高強度領域のコンクリートに繊維を混入させる方法について検討した。

最終的に設定された実機製造コンクリートに繊維材を混入する要領は、以下の通りである。

- (1) 繊維は 2 回に分割して混入する。混入する所定量の有機繊維を 2 分割し、アジテータ車のドラムを逆転させてコンクリートをホッパー近くまで上げた状態で 1 回目の繊維材料を投入する。投入の際は、ドラム内のコンクリート中に繊維材を直接投入できるように板状の投入ホッパーを用いる。

表－5 簡易耐火試験結果一覧

No.	W/C (%)	繊維種類				使用炉	爆裂有無	爆裂時間	最高温度(℃)			評価
		断面形状	断面(μ) [断面積]	長さ(mm)	混入量(Vol.%)				表面	40 mm	裏面	
1	17.0	矩形	25×110 [2750]	12	0.20	FP410	有	63 分	522	298	286	×
2	17.0	矩形	25×110 [2750]	3	0.20	FP42	有	114 分	515	313	312	×
3	17.0	円形	φ 41[1320]	12	0.20	FP410	無	—	1048	862	840	○
4	17.0	円形	φ 41[1320]	6	0.20	FP42	無	—	1022	857	850	○
5	14.0	円形	φ 23[415]	12	0.20	FP410	無	—	1040	865	852	○
6	14.0	円形	φ 23[415]	12	0.10	FP42	(有) ¹⁾	64 分	1090	910	951	△

注] 1) 弱い破裂音発生のみで爆裂発生なし

- (2) その後、高速で 120 秒間正転させて、投入した繊維材料が均一になるよう混練する。
- (3) (1)と同様にアジテータ車のドラムを逆転させてコンクリートをホッパー近くまで上げて、残りの繊維材料を投入し、高速で 120 秒間正転させて、混練する。
- (4) 繊維材料を混入させた後、フレッシュコンクリート試験を行い、所定の品質基準内にあることを確認する。

4.2 繊維洗い出し試験

繊維材を混入した後のフレッシュコンクリート試験中の 1 項目として繊維洗い出し試験を行う。繊維材の混入量を求める同試験は、所定量の試料を水中で分離させながら洗い出し、ふるい分けた繊維材と粗骨材量によって、単位容積当たりの混入量を求める。

繊維材洗い出し試験の方法を以下に示す。

- (1) 繊維材混入後の試料を、圧縮強度試験用簡易型枠 2 本分 (3,142cc) 採取する。
- (2) 採取した試料の質量測定後、直ちに簡易型枠内の試料を水でバケツへ洗い出し、試料全量を浸漬させる。
- (3) 浸漬させた試料を攪拌し、浮遊してきた繊維材を 75 μ m ふるいで濾し取る。
- (4) バケツに沈殿した骨材などを 5mm ふるいで、粗骨材とモルタル分を含んだ水に分ける。ふるい分けた粗骨材の質量を測定する。
- (5) (4)のモルタルを含んだ水を攪拌し、浮遊してきた繊維材を 75 μ m ふるいで濾し取る。
- (6) (3)および(5)により採取した繊維材を水洗いし、付着微粒分をバケツに沈殿させ、浮遊してきた繊維材を 75 μ m ふるいで濾し取る。
- (7) 採取された繊維材を温度 110℃で 24 時間炉乾燥し、絶乾質量を測定する。
- (8) 繊維材の単位容積混入量を次式により算定する。

$$PP=PP' \times [M0 / (Con0 - G')] \quad (\text{kg/m}^3)$$

ここに、PP：繊維材単位容積混入量 (kg/m³)

M0：計画調合の単位モルタル量 (kg/m³)

Con0：計画調合の単位容積質量 (kg/m³)

G'：試料中の測定単位粗骨材量 (kg/m³)

PP'：試料中の測定単位繊維材量 (kg/m³)

4.3 繊維洗い出し試験の実施例

過年度の 3 期にわたる実機試験練りと耐火試験体作製に伴い製造された超高強度領域のコンクリートを対象とする繊維材洗い出し試験の結果を表 6 に示す。

これより、一連の実機製造による繊維を混入した超高強度コンクリートの繊維量は、0.184～0.240Vol.%であり、

いずれも管理基準値の 0.20±0.04%の範囲にある。

表 6 繊維混入量・洗い出し試験結果

繊維種類: 径(μ)・長さ(mm)	目標量 (Vol.%)	W/C (%)	練混ぜ量 (m ³)	測定値 (Vol.%)
PP: 40×110・12	0.20	22.0	3.0	0.210
PP: 40×110・12	0.20	17.0	3.0	0.220
PP: 40×110・12	0.20	14.0	3.0	0.240
PP: 40×110・12	0.20	17.0	3.0	0.227
PP: ϕ 41・12	0.20	17.0	3.0	0.187
PP: ϕ 41・12	0.20	14.0	2.0	0.184

5. まとめ

今回は、超高強度域である設計基準強度 125N/mm²の超高強度コンクリートについて、爆裂対策としてより断面の小さい pp 製繊維を含む各種断面形状の繊維を混入した試験体による過年度と同様の簡易耐火試験を実施し、その有効性と適切な繊維の断面形状・寸法、混入量について検討したところ、以下の事項が明らかにされた。

- (1) 繊維の断面積が小さいほど爆裂防止効果が大きい傾向にあることが分かる。
- (2) 繊維長さについては、今回の試験の範囲では有意な傾向は見られない。
- (3) 繊維量については、断面が小さい場合は 0.2Vol.%で十分な爆裂防止効果が見られるものの、0.1Vol.%では若干不足している。
- (4) 試験体の温度については、爆裂が発生しない場合は、表面温度が 1000℃以上まで上昇し、爆裂発生の場合は、500℃を少し上回る辺りで爆裂が発生していた。
- (5) かぶり厚さ 40 mm の位置では、爆裂が発生しない場合は表面温度より 165～186℃低い温度であり、爆裂が発生する場合は表面温度より 202～224℃低い温度であった。

参考文献

- 1) 竹内博幸，森達哉，河野政典，他：被覆材料によるコンクリート爆裂防止対策の研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1187-1192，2006.7
- 2) 竹内博幸：外殻体への繊維混入による高強度コンクリート爆裂対策，五洋建設技術年報，Vol.36，pp.36-41，2006.11
- 3) 百瀬晴基，桜本文敏，他：ポリプロピレン繊維を混入した設計基準強度 150N/mm²の超高強度コンクリートの耐火性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.995-1000，2003.6