

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

竹内 博幸*

要 旨

高強度コンクリートの火災時における爆裂対策として、外殻体に有機繊維を混入し、躯体外周部で爆裂を抑制する方法について検討した。外殻体を製造する方法は、流し込み成形と遠心成形の2方式とし、それぞれについて調合と繊維種類・量の最適化を図った。耐火性能の検討は、電気炉による加熱試験、小型耐火炉（ISO加熱曲線に近い加熱が可能）を用いての加熱試験、の2段階の要素実験を経て外殻体の最適化を図り、その結果に基づき実際の柱形状の試験体によりISO 834加熱曲線による載荷加熱試験を行った。

要素実験の結果、 $F_c=85\text{N/mm}^2$ の場合、① 流し込み成形による外殻体は、ポリプロピレン繊維 0.1%混入が、② 遠心成形による外殻体は、ビニロン繊維 0.1%混入が、耐火性能と施工性の両面から最適と評価された。載荷加熱試験の結果、 $F_c=85\text{N/mm}^2$ の場合、① 流し込み成形によるポリプロピレン繊維0.1%混入の外殻体は、かぶり部分全体に爆裂が発生したが、部材全体としては3時間の耐火性能が認められた。② 遠心成形によるビニロン繊維 0.1%混入の外殻体は、隅角部に爆裂が発生したが、3時間の耐火性能が認められた。

1. はじめに

60N/mm^2 を超える圧縮強度の高強度コンクリートの火災時における爆裂対策として、一昨年度に耐火性能を実証した被覆材料による爆裂対策に引き続き、外殻体に有機繊維を混入し、躯体外周部で爆裂を抑制する方法について検討した。外殻体を製造する方法は、流し込み成形と遠心成形の2方式とし、それぞれについて調合と繊維種類・量の最適化を図った。耐火性能については、電気炉による加熱試験、ISO 加熱曲線に近い加熱ができる小型耐火炉による加熱試験の2段階の要素実験を経て外殻体の最適化を図った。その結果に基づき、実際の柱形状の試験体によりISO834 加熱曲線による載荷加熱試験を行った。

2. 繊維混入による爆裂抑制方法の検討:要素実験1

2.1 実験方法

躯体外周部を構成する外殻体の製造方式としては、流し込み成形と遠心成形を対象とし、事前の練混ぜおよび外殻成形の検証実験により、爆裂対策として混入する繊維は、前者にはポリプロピレン繊維（PPF:密度 0.91g/cm^3 ）を、後者にはビニロン繊維（VF:密度 1.39g/cm^3 ）を用いることとした。その主な選定要因は、密度の違いによる外殻体内における繊維分散の傾向による。第1段階の要素実験では、繊維形状と混入量と爆裂抑制効果の関係を検証し、耐火試験に適用する仕様を絞り込むため、電気炉による加熱試験を行った。要素実験の概要と仕様を図-1に示す。なお、各試験体には、試

験体表面とかぶり厚さを 40 mmとした鉄筋位置に熱電対を設置し、それぞれの位置の温度を測定した。

試験体	:コンクリート板 $130\times 280\text{mm}$ (遠心 $100\times 280\text{mm}$) 厚さ40mmの形状
耐火時間	:3時間
加熱時間	:3時間
加熱温度	:最大 1150°C
計測	:試験体表面温度、かぶり40mm鉄筋位置の 温度、炉内温度

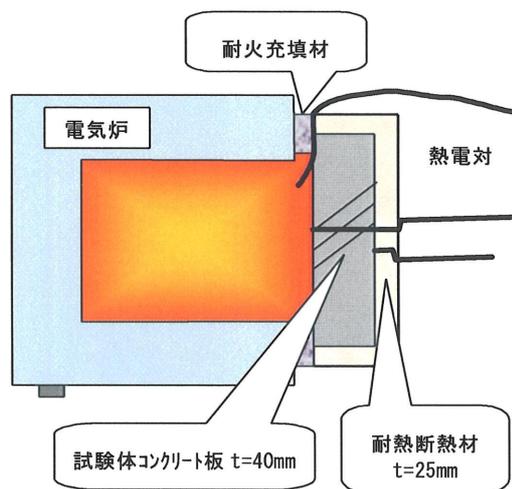


図-1 要素実験1概要

*本社 建築エンジニアリング部

2.2 実験結果

試験体の諸元と要素実験の実施結果を表-1に示す。PPFを混入した場合、 $F_c=105\text{N/mm}^2$ では長さ6mmでは必ずしも十分な爆裂抑制効果が得られないため、同条件における耐火試験には長さ12mmのものが適切と考えられた。なお、事前の流し込み成形の製造実験においてPPFは長さ12mmでは混入率0.2%まで製造・施工に対応できるフレッシュ性状を有していることが検証された。遠心成形用のVFについては、長さ6mm、混入率0.1%で十分な爆裂抑制効果があるものと判断された。試験体の大半は、製造後に気中養生としたが、流し込み成形試験体の一部については送風機などで強制的に乾燥させた。試験体の他の条件を同一とした場合、試験体を乾燥させた方が気中養生したものと比較して爆裂が抑制される傾向にあった。

表-1 試験体および試験結果(要素実験1)

成形方法	Fc N/mm ²	繊維			養生	爆裂状況
		種類	長さ (mm)	混入率 (vol%)		
流し込み	105	PPF	—	0	乾燥	×
			3	0.1	気中	△
			3	0.2	気中	△
			3	0.3	気中	○
			6	0.1	乾燥	◎
			6	0.1	気中	×
			6	0.2	気中	◎
			9	0.1	乾燥	◎
			12	0.1	乾燥	◎
			12	0.1	気中	○
			12	0.2	気中	○
			12	0.3	気中	◎
			12	0.1	乾燥	◎
			流し込み	85	PPF	—
6	0.1	気中				×
6	0.2	気中				△
遠心	75	VF	—	0	気中	◎
			6	0.1	気中	◎
			12	0.1	気中	◎
			12	0.15	気中	◎
遠心	85	VF	6	0.1	気中	◎
爆裂記号	×: 爆裂面積 100%もしくは破壊 △: 爆裂面積 20~100%未満 ○: 爆裂面積: 5~20%未満 ◎: 爆裂面積: 5%未満					

3. 繊維混入による爆裂抑制方法の検討:要素実験2

3.1 実験方法

要素実験1の結果に基づき、爆裂抑制効果が期待できる各強度レベルにおける繊維混入率について図-2に示す仕様の試験体を作製し、無載荷状態でISO加熱曲線に準拠した加熱試験を行った。表-2に、実施対象とした試験体の一覧を示す。また、試験体に用いたコンクリートの調合を表-3に示す。なお、試験体のコンクリートの調合は、次段階の載荷加熱試験体と共通である。また、試験体のコンクリートに混入した繊維は、要素実験1の結果に基づき、流し込み成形用のPPFは長さ12mm、遠心成形用のVFは長さ6mmとした。

表-2 試験体一覧(要素実験2)

試験体名	成形方法	外殻体			中詰め
		Fc N/mm ²	繊維		
			種類	混入率	Fc N/mm ²
流 85-00	流し込み	85	—	—	70
流 85-01		85	PPF	0.1%	80
流 85-02		85	PPF	0.2%	80
流 85-03		85	PPF	0.3%	80
流 105-02	遠心	105	PPF	0.2%	100
遠 75-00		75	—	—	70
遠 85-00		85	—	—	80
遠 85-01		85	VF	0.1%	80
遠 85-02		85	VF	0.2%	80

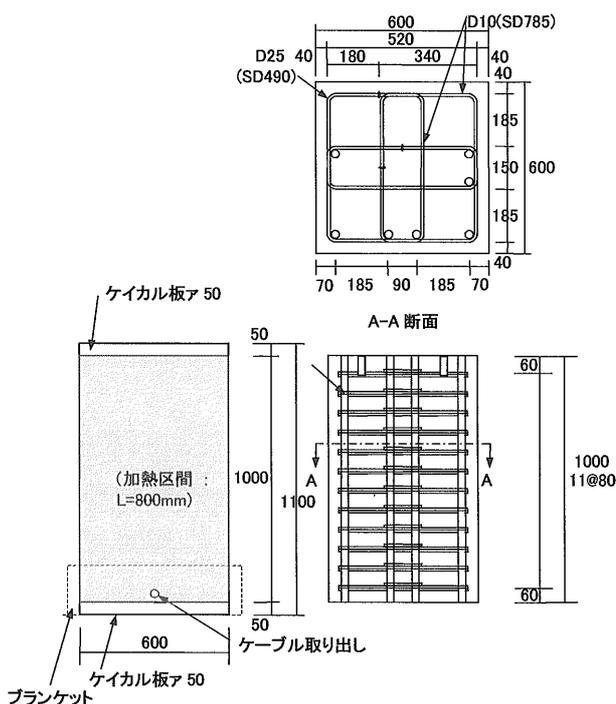


図-2 試験体(要素実験2:例)

3.2 実験結果

加熱試験時の各試験体における面中央表層・かぶり深さ位置および隅角部表層の各位置での最高温度を表-4に示す。加熱試験の結果、流し込み成形外殻体による試験体は、いずれも表層部に爆裂が発生し、鉄筋に達しない深さで各面につき50%前後の面積に剥離・剥落が見られた。一方、遠心成形外殻体による試験体は、いずれも爆裂の発生は見られないものの、加熱途中で隅角部に鉛直方向のひび割れが発生し、加熱の進行に伴いその幅が拡大する傾向が見られた。また、試験体の温度履歴について見ると、いずれも流し込み成形外殻体による試験体の方が遠心成形外殻体による試験体に比較して測定温度は低くなっている。これらの結果より、遠心成形の場合、その製造方法により外表部が緻密化し、流し込み成形に比較して余剰の水分・気泡が少ないため、外部からの熱の伝達が抑制される傾向にあると推察される。

表-3 試験体コンクリート調査

成形	調合	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	B	S	G
流し込み	Fc85	24.0	47.5	160	667 ¹⁾	744	835
	Fc105	20.0	43.3	160	800 ¹⁾	628	835
遠心	Fc75	27.7	41.0	155	560 ²⁾	698	1009
	Fc85	23.0	39.5	162	704 ³⁾	617	949

注] 1) シリカヒューム:内割 10%混入
 2) 高強度混和材:内割 3%混入
 3) 高強度混和材:内割 6%混入

表-4 実験結果(要素実験2)

試験体	成形	Fc N/mm ²	繊維 (%)	最高温度(°C)		
				中央		隅角 表面
				表面	かぶり	
流 8502	流し込み	85	0.2	651	355	696
流 10502		105	0.1	697	353	742
遠 7500	遠心	75	0.1	817	458	788
遠 8501		85	0.2	846	445	834

4. 繊維混入による爆裂抑制方法の検討: 載荷加熱試験

4.1 実験方法

2段階の要素実験の実施結果に基づき、爆裂抑止効果が高いと判断された仕様にて耐火試験体を作製した。試験体の形状・仕様を図-3に示す。また、表-5に対象とした試験体の一覧を示す。各試験体は、外殻体を流し込み成形あるいは遠心成形で作製し、それぞれ柱主筋を配筋した後に所定強度を有する中詰めコンクリートを打設し、一体化した。加熱炉の熱源には都市ガス(燃焼能力:46,000kJ/m³)を用い、加熱温度の管理は試験体から10cm離れた位置での測定値により行った。また、載荷軸力は、各試験体とも軸力比:0.25として設定した。載荷加熱試験の条件を表-6に示す。

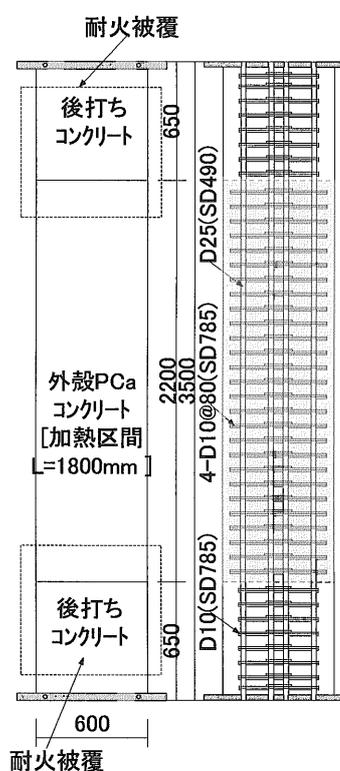


図-3 載荷加熱試験体(例)

表-5 載荷加熱試験体一覧

試験体名	成形	外殻			中詰 Fc N/mm ²
		Fc N/mm ²	繊維		
			種類	混入率	
流 85-01	流し	85	PPF	0.1%	80
流 105-01	込み	105	PPF	0.1%	100
遠 85-01	遠心	85	VF	0.1%	80

4.2 実験結果

耐火試験後の状況を写真-1に示す。比較のために、過年度に実施した繊維なしの無被覆の試験体の状況も合わせて示す。遠心成形外殻 PCa 試験体では、加熱開始後 60 分程度で柱隅角部に縦ひび割れが発生したが、コンクリート自体の爆裂は発生しなかった。繊維以外の要因としては、遠心成形外殻 PCa の含水率が 2.1%と流し込み成形 PCa のそれ(3.6%)に比較して小さいことも影響していると考えられる。流し込み成形では、いずれの試験体についても外殻 PCa 部に爆裂が発生したが、その程度については Fc85 と Fc105 に大きな差異は見られなかった。一方、過年度の繊維なしの試験体に比較すると爆裂程度は低く、繊維混入による爆裂抑制効果が伺える。加熱試験時に計測された柱主筋の最高温度を表-7に示す。高強度部材の主筋として用いられる USD685 は 600℃を超えると降伏強度および引張強度が低下するとの報告がある¹⁾が、今回繊維を混入した試験体はいずれも主筋は 600℃に達していないことから主筋の交換や補強は不要と考えられる。

表-6 加熱試験条件

加熱試験条件	荷重軸力比	Fc×0.25
	加熱温度	ISO834 標準加熱
	加熱時間	3時間加熱、後追い9時間
	加熱区間	1, 800 mm

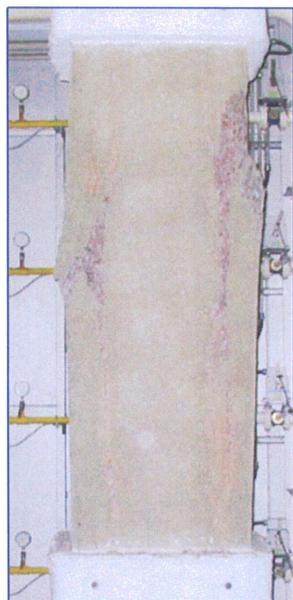
5. 繊維混入外殻 PCa の製造

5.1 検討方法

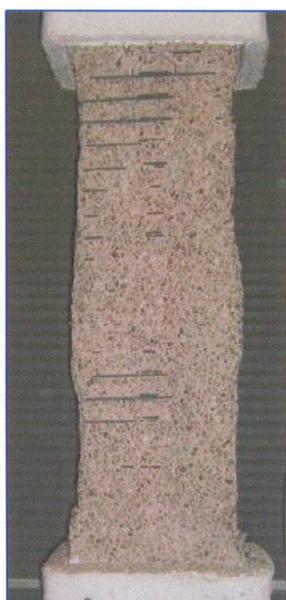
繊維を混入した外殻 PCa の調合を決定し、フレッシュ性状が製造方法に及ぼす影響を検討するために、実機による試験練りを行った。繊維の混入率を実験因子とし、検討対象とする設計基準強度 Fc は、流し込み成形では 75~105N/mm²とし、遠心成形では 75・85N/mm²とした。なお、事前の室内練混ぜ試験により混入する繊維は、前者では PPF(長さ:12mm)、後者では VF(長さ:6mm)とした。検討した繊維混入率を表-8に、また、流し込み成形および遠心成形の調合を表-9および表-10に示す。

表-7 柱主筋の最高温度

試験体	一般部		隅角部	
	温度(℃)	時間(分)	温度(℃)	時間(分)
遠心 85	375	264	231	308
流し込み 85	533	249	321	262
流し込み 105	494	252	311	234
繊維なし	871	181	991	181



遠心: Fc85N/mm²



流し込み: Fc85N/mm²



流し込み: Fc105N/mm²



在来繊維なし:
Fc100N/mm²

写真-1 加熱試験後の試験体の状況

5.2 検討結果

流し込み成形および遠心成形のフレッシュコンクリートの試験結果を表-11に示す。練混ぜによるフレッシュ性状により、前者については $F_c=85\text{N/mm}^2$ および $F_c=105\text{N/mm}^2$ で、繊維混入率の上限は 0.2vol%、後者についても $F_c=85\text{N/mm}^2$ でやはり0.2vol%と判断された。また、流し込み成形および遠心成形の試験体における圧縮強度の試験結果を図-4および図-5に示す。繊維混入による圧縮強度への影響は、遠心成形 $F_c=85\text{N/mm}^2$ の繊維0.2%でやや強度が小さくなっているものの、その他の割合については繊維無混入とほぼ同様の傾向であり、圧縮強度に及ぼす影響は小さい。流し込み成形では、構造体と同一養生供試体の強度発現により、また遠心成形ではコア供試体の強度発現により、設計基準強度に対する水結合材比は今回設定した値で安全側に対応できることが分かる。

表-8 調合試験における繊維混入率

成形方法	想定 F_c (N/mm^2)	W/B (%)	繊維長さ	混入率 (%)
流し込み	75	27.0	PPF 12 mm	0
	85	24.0		0
				0.1 0.2
105	20.0	0.1 0.2		
遠心	75	27.7	VF 6 mm	0
	85	23.0		0 0.1 0.2

表-9 流し込み成形調合表

調合記号	W/B (%)	s/a (%)	SF/(C+SF) (%)	単位量 (kg/m^3)				
				W	B		S	G
					C	SF		
Fc 75	27.0	49.8	7.5	160	548	44	814	835
Fc 85	24.0	47.5	10.0	160	600	67	744	835
Fc105	20.0	43.3	10.0	160	720	80	628	835

注] C: 普通ポルトランドセメント、SF: シリカフェューム(粉体)

表-10 遠心成形調合表

調合記号	W/B (%)	s/a (%)	AD/(C+AD) (%)	単位量 (kg/m^3)				
				W	B		S	G
					C	AD		
Fc 75	27.7	41.0	3.0	155	543	17	698	1,009
Fc 85	23.0	39.5	6.0	162	662	42	617	949

注] C: 普通ポルトランドセメント、AD: 高強度混和材

表-11 フレッシュコンクリート試験結果

成形方法	調合記号	繊維混入率 (%)	スランブ (cm)	スランブフロー ($\text{cm} \times \text{cm}$)	空気量 (%)	温度 ($^{\circ}\text{C}$)
流し込み	Fc 75	0	—	42.0×41.0	1.7	31.0
	Fc 85	0	—	51.5×51.0	1.8	31.0
		0.1	—	49.0×47.0	1.7	31.0
		0.2	—	37.5×34.5	2.8	31.0
	Fc105	0.1	—	48.0×47.0	2.0	30.0
		0.2	—	49.0×48.0	2.0	31.0
遠心	Fc75	0	20.0	—	1.2	30.0
	Fc85	0	23.5	—	1.7	31.0
		0.1	25.0	—	2.2	30.0
		0.2	24.5	—	1.6	30.0

6. まとめ

60N/mm²を超える圧縮強度の高強度コンクリートの火災時における爆裂対策として、外殻体に有機繊維を混入し、躯体外周部で爆裂を抑制する方法について検討したところ、以下の事項が明らかになった。

- (1) 流し込み成形用にPPFを混入した場合、 $F_c=105\text{N/mm}^2$ のコンクリートでは、耐火試験には長さ12mmのものが適切と考えられ、混入率0.2%まで所要のフレッシュ性状を有していることが検証された。遠心成形用のVFについては、長さ6mm、混入率0.1%で十分な爆裂抑制効果があるものと判断された。
- (2) 流し込み成形外殻による試験体は、いずれも表層部に爆裂が発生し、鉄筋に達しない深さの範囲で剥離・剥落が見られた。遠心成形外殻による試験体は、爆裂は発生せず、隅角部に鉛直方向にひび割れが発生し、加熱に伴いその幅が拡大する傾向が見られた。
- (3) 遠心成形外殻体による試験体では、加熱に伴い柱隅角部に縦ひび割れが発生したが、コンクリート自体の爆裂は発生しなかった。流し込み成形外殻体による試験体では、いずれの試験体についても外殻部表層に爆裂が発生したが、爆裂程度は軽微で、繊維混入による爆裂抑制効果が伺える。
- (4) 流し込み成形では、 $F_c=85\text{N/mm}^2$ および 105N/mm^2 で、繊維混入率の上限は0.2vol%であり、遠心成形では $F_c=85\text{N/mm}^2$ でやはり0.2vol%と判断された。

なお、本研究は、当社と(株)奥村組の2社による共同研究「高強度コンクリートの爆裂防止対策」により実施した。

【参考文献】

- 1) 森達哉、竹内博幸他：被覆による高強度コンクリート爆裂防止の研究(その1、その2)日本建築学会大会講演梗概集(近畿)、pp. 405-408、2005. 9

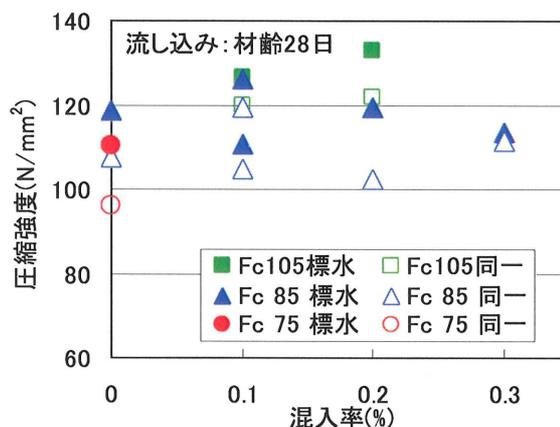


図-4 流し込み成形試験体の圧縮強度試験結果

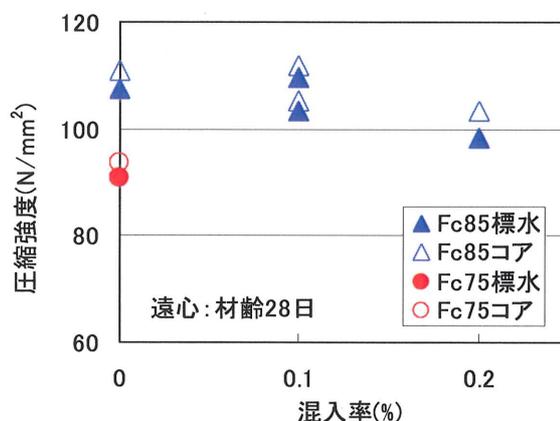


図-5 遠心成形試験体の圧縮強度試験結果