

Fc100N/mm²を超えるコンクリートの爆裂対策

- エチレンビニルアルコール共重合体繊維の適用 -

黒岩 秀介・小林 裕・陣内 浩

Keywords : High-strength concrete, Fire, Spalling, Organic fibers, Fire tests under load
高強度コンクリート, 火災, 爆裂, 有機繊維, 載荷加熱実験

1. はじめに

高強度コンクリートは、通常のコンクリートに比べて組織が緻密であることなどから、火災時に表面が爆裂しやすく、部材の耐力低下を生じる危険性が大きいとされている。対策として、ポリプロピレンなどの有機繊維をコンクリートに混入して爆裂を抑制する方法があり、既に設計基準強度 (Fc) 100 ~ 70N/mm² のコンクリートに適用されている^{1) 2) 3)}。有機繊維を混入する方法は、耐火被覆を省略できるなどの利点があるものの、コンクリート強度が高くなると、必要な繊維混入量が過大になり、コンクリートの圧縮強度を低下させたり、流動性が悪くなり施工を困難にする場合がある。そこで、Fc100N/mm² を超えるコンクリートを対象とし、流動性や圧縮強度への影響が小さい有機繊維を選定し、その繊維を混入した高強度RC短柱の載荷加熱実験、実大施工実験および繊維混入コンクリートの基礎物性試験を実施したので、その概要を報告する。

2. 有機繊維の選定

2.1 繊維選定試験の概要

エチレンビニルアルコール共重合体(密度1.14g/cm³、以下EVA繊維)、ビニロン(密度1.30g/cm³、以下PVA繊維)、ポリプロピレン(密度0.91g/cm³、以下PP繊維)からなる3種類の有機繊維を用いて、混入量をパラメータとして、フレッシュコンクリートの流動性と圧縮強度を調査した。繊維を混入するコンクリートの調査を表-1、混入量の水準を表-2に示す。コンクリートの使用材料は、結合材を高強度用3成分セメント⁴⁾(密度2.99g/cm³)、細骨材を安山岩砕砂(密度2.66g/cm³)、粗骨材を安山岩砕石(密度2.60g/cm³)、化学混和剤をポリカルボン酸系高性能AE減水剤とした。また、空気量調整剤(消

泡剤)を結合材質量の0.02~0.04%の範囲で使用した。練混ぜには強制2軸ミキサを用い、結合材と細骨材を15秒間空練り後、水と混和剤を投入し6分、粗骨材投入後2分、繊維を投入後1分練り混ぜた。練混ぜ後直ちにスランプフロー試験(JIS A 1150)などを実施し、圧縮強度用供試体を作製した。圧縮強度試験(JIS A 1108)は、標準養生材齢56日にて実施した。

2.2 繊維選定試験の結果

図-1 a)にスランプフローと繊維混入量との関係を示す。いずれの繊維も混入量の増加に伴ってスランプフローが小さくなる右下がりの直線になるが、EVA繊維の直線はほかの繊維よりも上方に位置していることから、EVA繊維を用いると、PP繊維やPVA繊維よりも、繊維を混入することによる流動性低下の傾向が小さいことがわかった。図1 b)に圧縮強度と繊維混入量との関係を示す。著者らは、PP繊維の混入が、Fc100N/mm²級では、混

表-1 繊維選定試験のコンクリートの調査

Concrete mix used for fiber selection tests

水 結合材 比	目標 空気量 %	単位量 (kg/m ³)				
		水	結合材	細骨材	粗骨材	混和剤
0.145	1.0	145	1000	495	845	26

表-2 繊維選定試験における繊維の種類と混入
Parameters for fiber selection tests

呼称	繊維の種類			繊維の混入量	
	材質	長さ mm	径 mm	kg/m ³	vol%
E10-1	EVA	10	0.05	3.0	0.26
E10-2				5.0	0.44
V12-1	PVA	12	0.04	2.8	0.22
V12-2				4.3	0.33
P10-1	PP	10	0.05	3.0	0.33
P10-2				4.0	0.44
P20-1		20		2.0	0.22
P20-2				3.0	0.33

Fc100N/mm²を超えるコンクリートの爆裂対策

入量2.15kg/m³(0.23vol%)までの範囲において、圧縮強度にほとんど影響しないことを確認している³⁾。爆裂対策として、さらに多量の繊維が必要となるFc100N/mm²を超えるコンクリートを対象とした今回の実験では、PP繊維の増加に伴い圧縮強度はやや低下傾向を示したものの強度比は高々5%減程度であった。また、EVA繊維とPVA繊維の混入による強度低下は認められない。以上、EVA繊維は、PP繊維やPVA繊維と比べて、混入量を増加しても流動性や圧縮強度への影響が小さいことから、超高強度コンクリートの爆裂防止に適している可能性があることがわかった。

3. 載荷加熱実験

3.1 実験概要

Fc100N/mm²を超えるコンクリートを用いたRC柱の耐火性能を把握する目的で、RC短柱の載荷加熱試験を実施した。試験体の一覧を表-3に示す。試験体は有機繊維の種類、混入量が異なる3体とした。繊維の種類は、Fc100N/mm²級で実績があるPP繊維²⁾と、前節の実験結果から選定したEVA繊維とした。試験体は、図-2に示す柱断面400×400mm、長さ800mmとし、上下100mmを被覆して加熱区間を600mmとした。かぶり厚さは40mmとし、柱主筋はUSD685の12-D19(Pg=2.15%)、横補強筋はスパイラルフープ4-U6.4-@55(Pw=0.55%)とした。コンクリートは、前節と同様の材料を用い、表-4に示す調合のものとした。試験体は打込み後1週で脱型し、載荷加熱試験を実施するまでの3~4カ月間、屋内にて自然乾燥とした。載荷方法は中心圧縮とし、載荷荷重は、試験体と同一断面寸法の無筋コンクリートから採取したコアの材齢91日における圧縮強度と軸力比0.3から決定した。荷重を保持した状態で加熱を開始し、加熱温度曲線はISO-834、加熱時間は最長6時間までとした。なお、載荷加熱実験時におけるコンクリートの含水率は5.0~5.1%であった。

3.2 実験結果

スパイラルフープおよび試験体中央の温度履歴を図-3、試験体の軸方向変位の推移を図-4に示す。PP繊維を2kg/m³混入した試験体(P2.0)およびEVA繊維を3.5kg/m³混入した試験体(E3.5)は、いずれも爆裂を生じず、

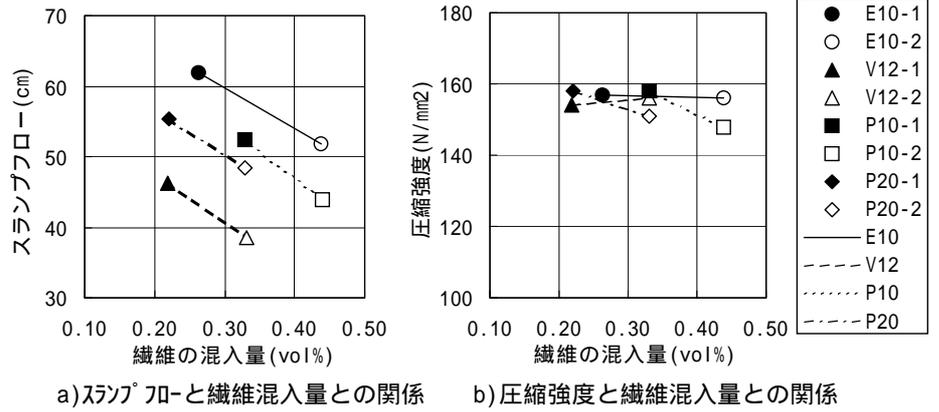


図-1 繊維選定試験の結果
Test results for fiber selection tests

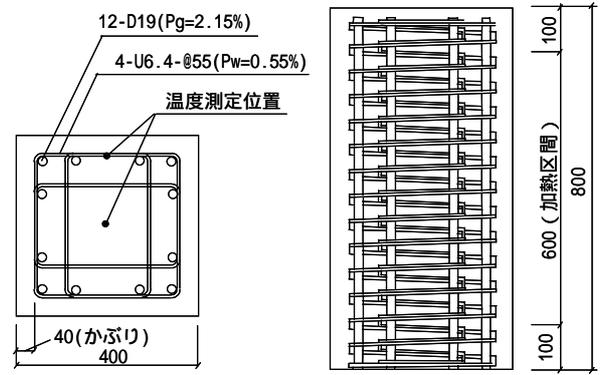


図-2 載荷加熱実験の試験体
Specimen for fire tests

表-3 載荷加熱実験の試験体一覧
Fire tests specimens

試験体名	W/B	骨材種類	有機繊維			軸力比 ^注 N/A _b	
			種類	長さ mm	径 mm		量 kg/m ³
P2.0	0.17	安山岩	PP	20	0.05	2.0	0.3
E2.5	"	"	EVA	10	0.05	2.5	"
E3.5	"	"	EVA	10	0.05	3.5	"

注) N: 載荷荷重、A: 試験体断面積、_b: 材齢91日のコア強度

表-4 載荷加熱実験のコンクリートの調合
Concrete mix used for fire tests

水結合材比	目標空気量 %	単位量 (kg/m ³)					
		水	結合材	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤	消泡剤
0.17	2.0	150	882	545	858	13.7	0.88

表-5 コンクリートの性質
Properties of concrete

試験体名	フレッシュ性状		材齢 56 日		材齢 91 日 (加熱試験時)		
	スランプフロー cm	空気量 %	標準	コア	コア		
			強度 N/mm ²	強度 N/mm ²	強度 N/mm ²	ヤング率 kN/mm ²	ポアソン比
P2.0	49.5	2.0	144	156	162	44.5	0.24
E2.5	61.3	1.7	147	159	169	45.4	0.25
E3.5	56.0	1.9	148	162	169	45.6	0.25

6時間まで荷重を支持した。EVA 繊維を 2.5 kg/m^3 混入した試験体 (E2.5) は、炉壁の小窓からの目視観察によれば、加熱後1分から18分にかけて部分的に爆裂を生じたものの、スパイラルフープの温度上昇を著しく早めるものではなく、5時間37分まで荷重を支持した。これらの結果から、今回実験を行った3体の有機繊維の種類および混入量の組み合わせは、いずれも5時間以上の十分な荷重支持能力を有することが確認できた。

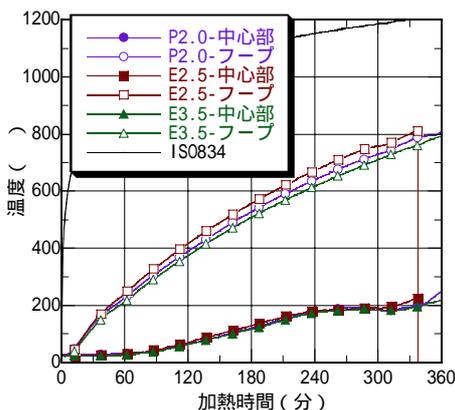


図-3 試験体内部の温度履歴
Temperature development in specimens

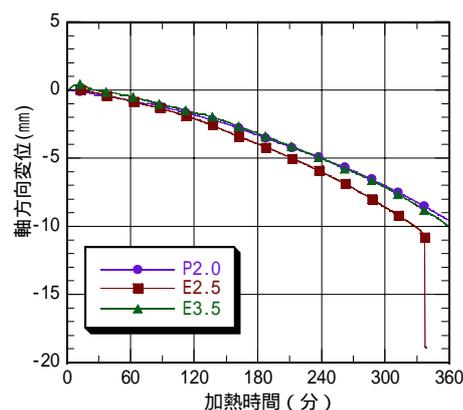


図-4 試験体の軸方向変位の推移
Axial deformation of specimens

4. 実大施工実験

4.1 実験概要

構造体コンクリートの強度発現は温度の影響を受けるため、夏期および冬期に実機試し練りを実施した。

4.1.1 使用材料・調合

コンクリートの使用材料を表-6、調合を表-7に示す。結合材には高強度コンクリート用の3成分セメントを用い、水結合材比は0.17とした。混入する繊維はPP繊維とEVA繊維の2種類とし、混入量はPP繊維を 2.0 kg/m^3 、EVA繊維を 2.5 kg/m^3 とした。この混入量はいずれもコンクリート容積の0.22%にあたる。

4.1.2 試験方法

実機試し練りおよび評価試験の手順はつぎのとおりである。

レディーミクストコンクリート工場で繊維以外の材料を練混ぜ、アジテータ車にて現場に輸送する。

現場受入れ検査としてフレッシュ性状の試験と圧縮強度用供試体の採取を行う。

アジテータ車に繊維を添加し、2分間高速攪拌を行う。繊維混入コンクリートのフレッシュ性状の試験を行う。スランプフローの低下が大きいものは、高性能AE減水剤を添加する。フレッシュ性状の試験後、圧縮強度用供試体を採取する。

繊維混入コンクリートを模擬柱に打設する。

模擬柱から所定材齢にコア抜きを行い、構造体コンクリートの強度発現を確認する。

模擬柱は、図-5に示すように、高さ3600mmの長柱(図-3)と、上下を厚さ100mmの発泡ポリスチレンで断熱した高さ1100mmの短柱(図-4)の2種類とし、断面寸法はいずれも $950 \times 950 \text{ mm}$ とした。短柱は無筋コンクリー

表-6 実大施工実験のコンクリートの使用材料

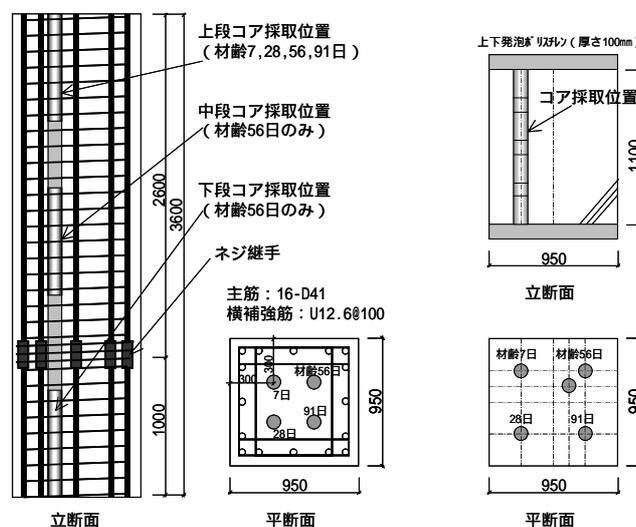
Material of concrete for full-scale tests

結合材 B	普通ポルトランドセメント：スガ石膏：シカホーム = 7 : 2 : 1 (密度 2.99 g/cm^3)
細骨材 S	大月産安山岩砕砂 (夏：表乾密度 2.63 g/cm^3 、冬：表乾密度 2.63 g/cm^3)
粗骨材 G	大月産安山岩砕石 (夏：表乾密度 2.65 g/cm^3 、冬：表乾密度 2.64 g/cm^3)
化学混和剤	SP：ポリカルボキシル系高性能 AE 減水剤
繊維	PP：ポリプロピレン繊維 (密度 0.91 g/cm^3 、径 0.05 mm 、長 20 mm) EVA：エチレン・ビニルアルコール共重合体繊維 (密度 1.14 g/cm^3 、径 0.05 mm 、長 10 mm)

表-7 実大施工実験のコンクリートの調合

Concrete mix used for full-scale tests

時期	繊維種類	W/B	目標空気量 %	単位量 (kg/m^3)					
				W	B	S	G	SP	繊維
夏	PP	0.17	1.0	150	883	604	835	15.9	2.0
	EVA	0.17	1.0	150	883	604	835	15.9	2.5
冬	PP	0.17	1.0	150	883	604	835	17.7	2.0
	EVA	0.17	1.0	150	883	604	835	17.7	2.5



a) 長柱 b) 短柱

図-5 実大施工実験の模擬柱
Full-scale mockup

トとしたが、長柱には、施工性の確認を目的として、高さ1mの部分に継手を有する鉄筋を配した。なお、長柱に打設したのは夏期のPP 繊維混入コンクリートのみとし、その他の繊維混入コンクリートは短柱に打設した。

4.2 実験結果

4.2.1 フレッシュ性状および施工性

フレッシュコンクリートの試験結果を図-6に示す。PP繊維を2.0kg/m³混入した場合のスランプフローは、高性能AE減水剤を1.8kg/m³現場添加しても、50cm以下となった。しかしながら、繊維混入コンクリートはこの程度のスランプフローでも打込み可能で、かなり打設時間はかかったものの、配筋した実大模擬柱に未充填部分は認められなかった。一方、EVA繊維を2.5kg/m³混入した場合のスランプフローの変化は小さく、高性能AE減水剤の現場添加を行わなくても60cm以上を確保でき、EVA繊維は繊維混入コンクリートの良好な施工性を十分に確保できることが確認できた。

4.2.2 強度発現

圧縮強度試験の結果を図-7に示す。ベースコンクリートと繊維混入コンクリートの標準養生した供試体の強度の比較から、繊維の混入により強度はやや低下傾向にあるものの強度比で高々3%減程度であることがわかる。また、繊維混入コンクリートのコア供試体の強度はいずれも150N/mm²以上に達しており、水結合材比0.17、PP繊維2kg/m³あるいはEVA繊維2.5kg/m³という条件であれば、夏冬いずれにおいても構造体コンクリート強度150N/mm²を確保できることがわかった。

5. 繊維混入コンクリートの基礎物性

5.1 実験概要

Fc100N/mm²超級コンクリートの爆裂対策として必要となる繊維量は、Fc100N/mm²級と比較して多くなるので、流動性、強度、耐久性に及ぼす影響の程度を調査した。試験項目の一覧を表-8に示す。フレッシュ性状について、水結合材比(W/B=)0.25の混入量2.5 kg/m³、W/B=0.17の混入量2.5, 4.0 kg/m³、W/B=0.145の混入量2.5, 4.0, 6.0kg/m³を、それぞれ繊維を混入していないものと比較した。W/B= 0.17については、120分までの経時変化も測定した。力学性状については、フレッシュ性状と同じ水準について、標準養生材齢7, 28, 56, 91日の圧縮強度と初期加熱養生材齢56, 91日の圧縮強度およびヤング係数を測定した。初期加熱養生の方法は、封かん供試体に対して、打込み後9~12時間まで20 養生、その後12時間で雰囲気温度を80 まで上昇させ、12

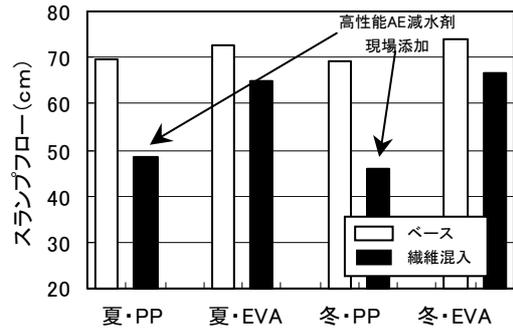


図-6 実大施工実験におけるスランプフローの比較
Slump flow test results

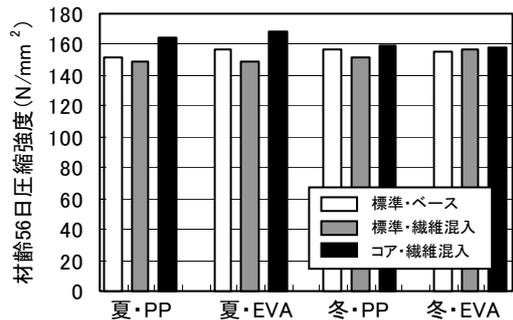


図-7 実大施工実験における圧縮強度の比較
Compressive strength test results

表-8 基礎物性試験の試験項目
Test parameters

項目	試験項目
フレッシュ性状	項目 ・スランプフロー(JIS A 1150) ・空気量(JIS A 1128) 因子と水準 ・W/B= 0.25: EVA= 0, 2.5kg/m ³ , PP=2.0kg/m ³ ・W/B= 0.17: EVA= 0, 2.5, 4.0kg/m ³ , PP=2.0kg/m ³ ・W/B= 0.145: EVA= 0, 2.5, 4.0, 6.0kg/m ³ , PP=2.0kg/m ³ W/B=0.17のEVAは120分まで経時変化測定
力学性状	項目 ・圧縮強度(JIS A 1108) ・ヤング係数(JIS A 1149) 因子と水準 ・W/B= 0.25: EVA= 0, 2.5kg/m ³ , PP=2.0kg/m ³ ・W/B= 0.17: EVA= 0, 2.5, 4.0kg/m ³ , PP=2.0kg/m ³ ・W/B= 0.145: EVA= 0, 2.5, 4.0, 6.0kg/m ³ , PP=2.0kg/m ³ 標準養生材齢7, 28, 56日(EVAとPP) 初期高温養生材齢56日(EVAのみ) ヤング係数は初期高温養生材齢56日のみ測定
耐久性	項目 ・乾燥収縮率(JIS A 1129-1): 標準養生7日間 ・促進中性化(日本建築学会法) ・凍結融解抵抗性(JIS A 6204): 標準養生28日間 因子と水準 ・W/B= 0.17: EVA= 0, 4.0kg/m ³

表-9 基礎物性試験のコンクリートの使用材料
Materials of concrete

結合材 B	普通ポルトランドセメント: スラグ石膏: シカユーム= 7:2:1 (密度2.99g/cm ³)
細骨材 S	安山岩砕砂 (表乾密度2.66g/cm ³)
粗骨材 G	安山岩砕石 (表乾密度2.61g/cm ³)
混和剤 SP	ポリカルボキシル系高性能AE減水剤
繊維	PP繊維 (密度0.91g/cm ³ , 径0.05mm, 長20mm) EVA繊維 (密度1.14g/cm ³ , 径0.05mm, 長10mm)

時間 80 を保ち、60 時間かけて 20 まで低下させ、それ以降を試験材齢の 56 日まで 20 で保管するものとした。耐久性については、乾燥収縮率、凍結融解抵抗性、促進中性化に関して、W/B= 0.17 の混入量 4.0kg/m³ を繊維無混入と比較した。コンクリートの使用材料を表 -9、調合を表 -10 に示す。

5.2 実験結果

5.2.1 流動性

繊維混入量とスランプフローの関係を図 -8 に示す。高性能 AE 減水剤の追加を行わずにスランプフロー 60cm 以上を確保するには、W/B=0.17 では 2.5kg/m³、W/B=0.145 は 4.0kg/m³ の混入量が限度となる。繊維混入コンクリートのスランプフローの経時変化を図 -9 に示す。繊維の混入は、現場にてアジテータ車に直接投入し、高速攪拌によって行うことが多い。しかし、同図によれば、繊維混入後のスランプフローの経時変化は小さいため、レディーミクストコンクリート工場で繊維を混入し、輸送することも可能といえる。

5.2.2 圧縮強度

繊維混入量と圧縮強度の関係を図 -10、11 に示す。混入量が増えると圧縮強度はやや低下する傾向を示し、繊維混入量が 6.0kg/m³ になると低下量も大きくなる。繊維混入量 4.0kg/m³ までの範囲について、繊維混入前後の強度の比較を図 -10 に示す。同図には今回の実験以外の

表-10 基礎物性試験のコンクリートの調合
Mix proportion of concrete

W/B	繊維種類	繊維量 kg/m ³	単位量				
			W kg/m ³	B kg/m ³	S kg/m ³	G kg/m ³	SP kg/m ³
0.25	-	0	150	600	809	848	7.20
	EVA	2.5	150	600	809	848	7.20
	PP	2.0	150	600	809	848	7.20
0.17	-	0	150	882	585	848	13.23
	EVA	2.5	150	882	585	848	13.23
		4.0	150	882	585	848	13.23
	PP	2.0	150	882	585	848	13.23
0.145	-	0	145	1000	495	848	22.0
	EVA	2.5	145	1000	495	848	22.0
		4.0	145	1000	495	848	24.0
		6.0	145	1000	495	848	24.0
	PP	2.0	145	1000	495	848	22.0

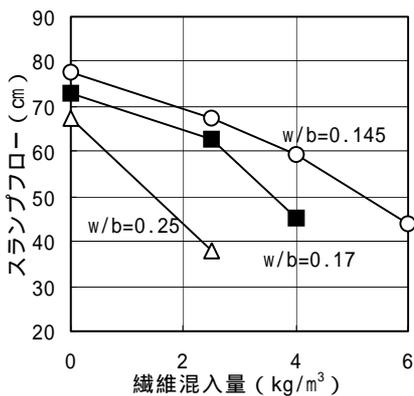


図-8 繊維混入量とスランプフロー
Fiber amount vs slump flow mixing

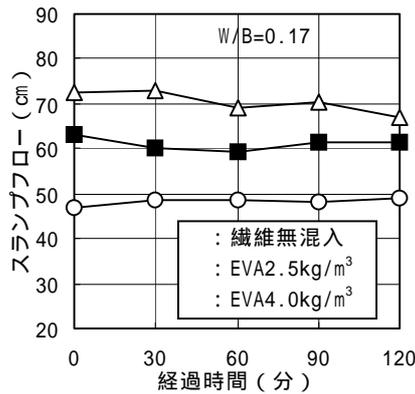


図-9 スランプフローの経時変化
Slump flow vs time after mixing

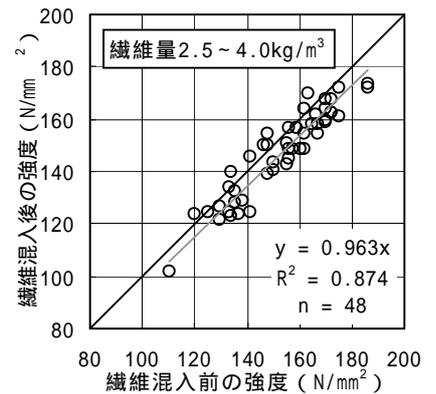


図-10 繊維混入前後の圧縮強度の比較
Effect of fiber inclusion on compressive strengths

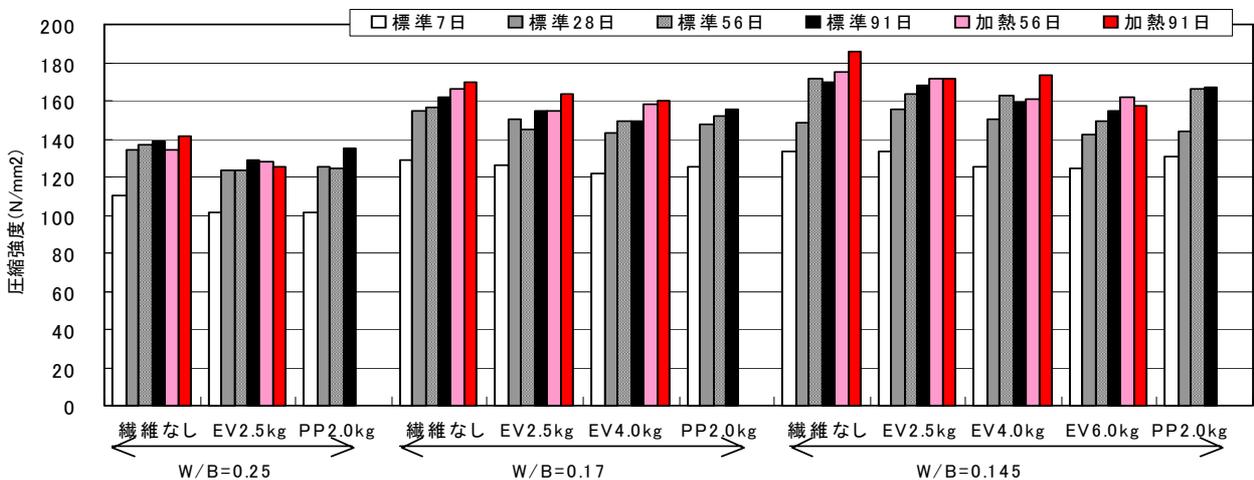


図-11 繊維混入量と圧縮強度の関係
Compressive strengths under various conditions

データもプロットしているが、この混入量の範囲であれば、繊維混入前後の強度は、強度比で4%減以下であり、ほぼ同等とみなすことができる。

5.2.3 耐久性

乾燥収縮率試験、凍結融解抵抗性試験、促進中性化試験について、W/B=0.17の繊維を混入しないコンクリートと混入量4.0kg/m³のコンクリートを比較した。前者のフレッシュ時の空気

量は1.1%で標準養生材齢28日の強度は150N/mm²、後者は1.9%で141N/mm²であった。図-12に乾燥収縮試験の結果を示す。乾燥による長さ変化率および重量変化率に繊維混入の影響は認められない。図-13に凍結融解抵抗性試験の結果を示す。繊維の有無にかかわらず、300サイクルにおいても相対動弾性係数はほぼ100%である。促進中性化試験の結果は図示していないが、繊維混入、無混入ともに促進期間26週までで中性化は認められなかった。以上の結果から、繊維の混入は、4.0kg/m³までの範囲であれば、Fc100N/mm²超級の高強度コンクリートの高耐久性にほとんど悪影響を及ぼさないといえる。

6. まとめ

Fc100N/mm²を越えるコンクリートの爆裂対策用として新たに選定したエチレンビニルアルコール共重合体(EVA)繊維の適用性を検討した。本実験の結果から得られた知見を以下にまとめる。

載荷加熱実験によりつぎの2点を確認した。

- EVA繊維(長さ10mm、径0.05mm)を混入量2.5kg/m³とした場合、若干の爆裂は認めらるものの、5時間以上の荷重支持能力があった。
- ポリプロピレン繊維(長さ20mm、径0.05mm)を混入量2.0kg/m³とした場合、爆裂を起こさずに6時間まで荷重を支持した。

実大施工実験によりつぎの4点を確認した。

- EVA繊維を2.5kg/m³混入する場合、スランプフローの低下は小さく、施工性は良好であった。
- ポリプロピレン繊維を2kg/m³混入する場合、スランプフローの低下は著しく、高性能AE減水剤を現場添

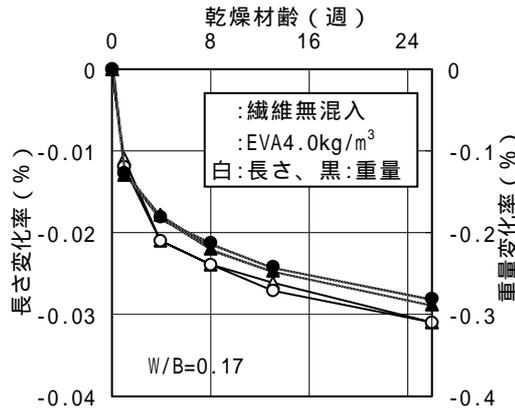


図-12 繊維混入前後の乾燥収縮による長さ変化率の比較
Drying shrinkage test results

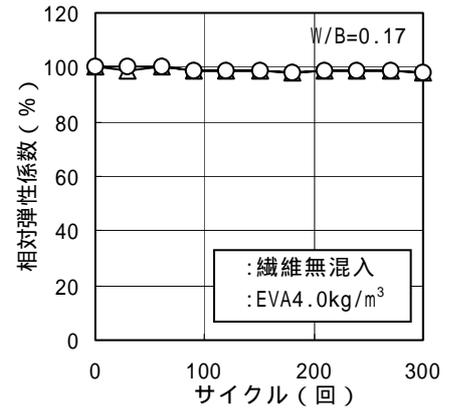


図-13 繊維混入前後の凍結融解抵抗性の比較
Freeze thaw test results

加しても、50cm程度までしか広がらなかった。ただし、打込みにかなりの時間を要するものの、この程度の流動性でも配筋された柱に密実に充填することは可能であった。

- 繊維の混入により強度は低下傾向にあるものの、その程度は強度比で4%減以下であった。
- 水結合材比0.17、ポリプロピレン繊維2kg/m³あるいはEVA繊維2.5kg/m³の条件で、夏・冬いずれも構造体コンクリート強度150N/mm²を確保できた。

EVA繊維の混入量をパラメータとしてコンクリートの流動性、強度、耐久性への影響を調査した。結果、混入量4.0 kg/m³までの範囲において、強度や耐久性に及ぼす影響は小さいことを確認した。

参考文献

- 1) 黒岩秀介, 小林裕, 馬場重彰: ポリプロピレン繊維による高強度RC柱の耐火性能改善技術, 大成建設技術センター報, 第34号, pp.27.1-27.4, 2001
- 2) KUROIWA Shusuke, KOBAYASHI Yutaka and BABA Shigeaki: Fire Performance of Reinforced Concrete Columns Using High-strength Concrete with Polypropylene Fibers, Proceedings of the 1st fib Congress, Session 11, Safety of concrete structures, pp.129-134, 2002.10
- 3) 黒岩秀介, 陣内浩, 小林裕, 川端一三, 西川泰弘, 木村雄一, 阿部剛士, 嶋田孝一: 耐火性能向上を目的にポリプロピレン繊維を混入した高強度コンクリートの実用化および適用, 日本建築学会技術報告集 第16号, pp.17-22, 2002.12
- 4) 陣内浩, 黒羽健嗣, 並木哲, 後藤和正: 超高強度コンクリートによる柱構造体の強度発現性状の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1 pp.255-260, 1994
- 5) 陣内浩, 早川光敬, 黒岩秀介: 実用化を迎えた設計基準強度150N/mm²級超高強度コンクリートの性能, セメント・コンクリート, No.678, pp.10-16, 2003.8