

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 4 月 20 日現在

機関番号：13701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560461

研究課題名（和文）ハイブリッド耐火コンクリートの開発とその性能評価

研究課題名（英文）Development of Hybrid fire proof concrete

研究代表者

小澤 満津雄（MITSUO OZAWA）

岐阜大学・工学部・助教

研究者番号：80313906

研究成果の概要（和文）：

高温環境下におけるアラミド繊維を用いた超高強度繊維補強コンクリート(UFC)の爆裂抑制方法を検討するために、爆裂抑制繊維としてポリプロピレン繊維(PP)と水溶性ポリビニールアルコール繊維(WSPVA)および Jute 繊維を 0.19%vol 添加したケースについて加熱試験を実施した。加熱温度は、400、600、800 とした。その結果、爆裂抑制繊維を添加したものは、添加しないものに比べて爆裂抑制効果が確認できた。

研究成果の概要（英文）：

The researcher examined the relationship between spalling behavior and weight loss for ultrahigh-strength fiber-reinforced concrete (UFC) containing different kinds of short fibers (jute, PP,WSPVA) in high-temperature environments at 400, 600 and 800°C. The explosive spalling that occurred under these conditions caused severe damage to the control specimen without fiber reinforcement but only slight damage to the jute specimen. It was therefore inferred that adding 0.19% by volume of natural jute fibers (length: 12 mm) to UFC is effective in the prevention of spalling-related damage.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2011 年度	700,000	210,000	910,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：jute, PP, WSPVA, アラミド, 爆裂抑制, 耐火性, 通気率, 高強度コンクリート

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート構造が火災を受けると、表層部が爆発的に剥離・剥落するいわゆる爆裂が発生する。コンクリートが剥落すると内部鉄筋は露出し高温により品質は大きく低下する。その結果、構造物の耐荷性能は著し

く損なわれ、極めて危険な状態となる。また、鎮火後の構造物の復旧に際しても、費用の増大は避けることができず、社会的な損失は大きなものとなる。これらのことから、爆裂はコンクリート工学における重要な研究テーマとなっている。例えば、主としてトンネル

火災事故を想定した土木学会シンポジウムが2005年に開催された。2008年度に開通した世界第7位の長大トンネルである東海北陸自動車道飛騨トンネルのコンクリートセグメントの設計は、爆裂に対する安全性が考慮されている。2009年9月にドイツのLipzigで爆裂に関する国際WORKSHOPが開催され、諸外国の研究者から爆裂に関する論文が多数報告された。しかしながら、爆裂メカニズムの解明や爆裂抑制方法について課題があることが確認された。爆裂の防止対策として、有機繊維をコンクリートに混入することが効果的であることが報告されている。これは有機繊維が高温により溶融、消失することにより微細空隙が形成され、これが蒸気圧緩和に有効であると考えられる。有機繊維の有効性について、申請者らも検討を行っている。一方、鋼繊維と有機繊維を組み合わせた耐火性能の向上を目指した研究がある⁷⁾。しかし、この場合、鋼繊維が腐食する問題を抱えている。

2. 研究の目的

そこで、本研究では、アラミド繊維混入コンクリートをベースとして有機繊維または天然繊維の組み合わせによるハイブリッド耐火コンクリートの開発を着想した。申請者らは、天然繊維を用いた爆裂抑制効果について、予備実験により、有効性を確認している。本研究では、アラミド繊維と各種繊維との組み合わせによる爆裂抑制効果の詳細を検討する。特に、中空(ストロー)構造をもつ繊維の蒸気圧低減効果に着想した。ストロー構造を有する有機繊維の爆裂抑制効果について検討した。

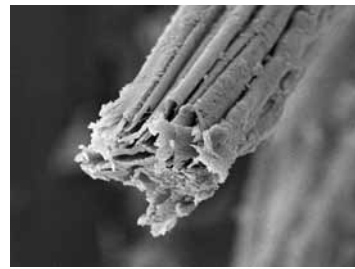
3. 研究の方法

(1) 配合

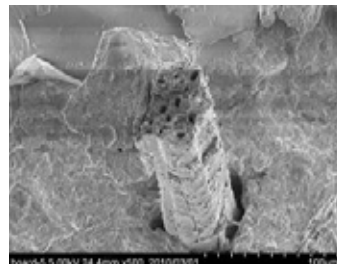
水結合材比は0.19とした。セメントはシリカフュームセメント(密度:3.08g/cm³)を用いた。微細組織の充填材として珪石粉末(密度:2.6g/cm³,比表面積8180cm²/g)を用い、細骨材には6号珪砂(密度:2.6g/cm³)を使用した。また、混和剤には、超高強度コンクリート用高性能減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)を使用した。供試体の種類はアラミド繊維のみを用いたものをControlと定義し、5種類とした。すなわち Control に対して、PP繊維, WSPVA繊維, Jute繊維 3mm, Jute繊維 12mm を爆裂抑制繊維として添加した。

(2) 繊維

本研究では、力学性能を確保するために集束タイプのアラミド繊維を用いた。本研究で用いたアラミド繊維(コポリパラフェニレン・3,4'-オキシジフェニレン・テレフタラミド)



a) Jute 繊維単体



b) コンクリート中の繊維

図-1 Jute 繊維の SEM 写真

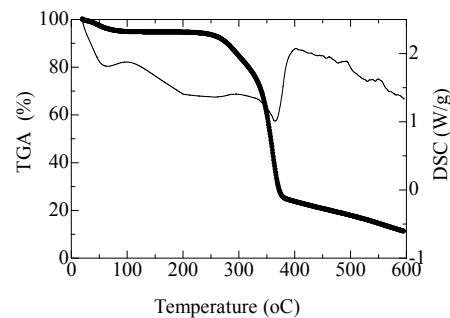


図-2 Jute 繊維の DSC-TGA 結果

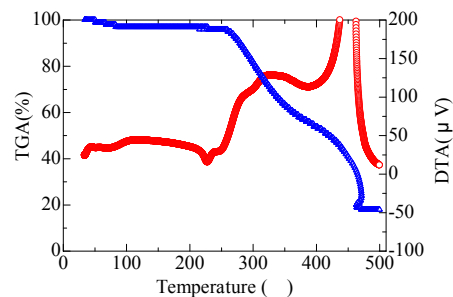


図-3 WSPVA 繊維の DTA-TGA 結果

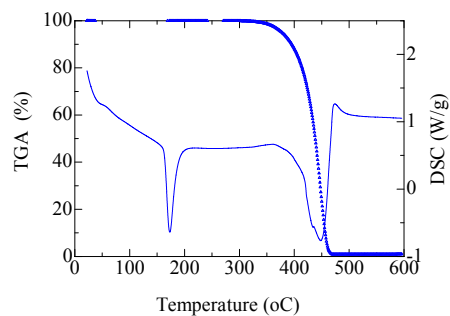


図-4 PP 繊維の DSC-TGA 結果

の材料特性は、密度 1.39 g/cm³、引張強度 3410 N/mm²、引張弾性率 74 kN/mm² である。集束タイプのアラミド繊維は繊維径 12 μ m の繊維 267 本をエポキシ系樹脂により集束してスティック状に加工したものである。繊維長は 20mm のものを用いた。次に、本研究で使用した爆裂抑制繊維の種類と熱特性を表-2 に示す。使用した繊維は合成繊維としてポリプロピレン繊維(以下, PP: 繊維長 12mm, 繊維径 42 μ m)と水溶性 PVA 繊維(以下, WSPVA: 繊維長 4mm, 繊維径 10 μ m)およびジュート繊維(以下, Jute: 繊維長 3mm および 12mm, 繊維径 10~30 μ m)とした。比較の為に、従来使用されている PP 繊維の特性を併記する。図-1 に Jute 繊維の SEM 写真(a)単体, b)コンクリート中の繊維を示す。Jute 繊維は天然の麻繊維の一種であり、植物の茎であるため、複数のストローが束になった構造となっている。ストロー構造であることから、コンクリートが加熱された場合に蒸気圧逸散ネットワークを形成することで蒸気圧の低減効果があると考えられる。既報では、混入率 0.075%vol とすることで爆裂抑制効果が確認されている。WSPVA 繊維は、耐火レンガなどの不定形耐火物の爆裂抑制に用いられている材料である。本研究で使用した繊維は 50-90 の水溶液中で溶解する特性を有している。既報より、混入率が 0.15%vol で爆裂抑制効果が確認されている。なお、WSPVA 繊維は蒸気養生(90 , 48 時間)を実施した後も溶解せずに供試体中で存在していることを確認している。図-2 に Jute 繊維の示差走査熱量測定(以下, DSC)と熱重量測定(以下, TGA)の結果を示す。DSC の吸熱のピークは 360 であり、また, TGA の結果より, 100 付近で脱水による重量変化がみられ, 260 から熱可塑性を示し, 360 までに熱分解が生じることがわかる。次に 図-3 に WSPVA 繊維の示差熱分析(以下, DTA)と TGA の結果を示す。DTA の結果より 227 付近で吸熱のピークを示している。また, 246 付近から重量変化が見られ, 470 までに熱分解が生じることがわかる。図-4 に PP 繊維の DSC と TGA の結果を示す。図より, 173 付近で吸熱のピーク(融点)を示している。また, 400 付近で、質量減少が開始し, 450 で焼失していることが分かる。

(3) 供試体

供試体寸法は圧縮強度と加熱試験用として Φ 50 \times 100mm の円柱供試体を 15 本づつ作製した。Control 供試体は、曲げ強度試験用として 40 \times 40 \times 160mm を 3 本作製した。練り混ぜには、容量 10l のホバートミキサーを使用した。練り混ぜ方法を以下に示す。水、混和剤、繊維以外の材料を投入して、1 分間搅拌を行った。水と混和剤を投入し、2 分間搅

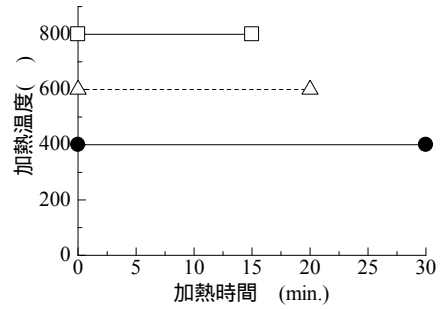
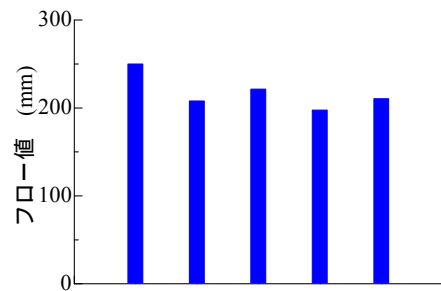


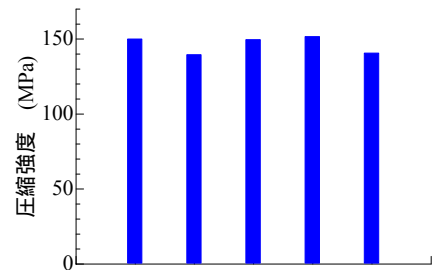
図-5 加熱パターン

図-6 通気率試験装置



Control PP WSPVA Jute3 Jute12

図-7 フロー試験結果



Control PP WSPVA Jute3 Jute12

図-8 圧縮強度試験結果

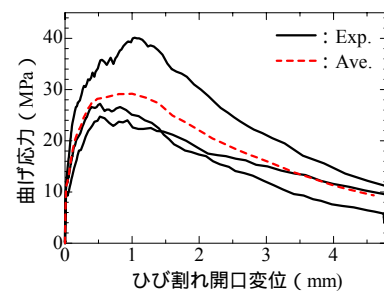


図-9 曲げ強度試験結果(Control)

表-1 各供試体の爆裂状況

供試体の種類	加熱温度(°C)		
	400	600	800
Control			
PP			
WSPVA			
Jute3			
Jute12			

拌を行い、容器内の粉体を掻き出し、さらに5分間攪拌を行った。アラミド繊維を投入し、3分間の攪拌を行った。爆裂抑制繊維を投入して1分間攪拌を行った。練り上がり温度およびモルタルフロー値を計測した。

モルタルを各供試体の型枠に打ち込みしテーブルバイブレーターで締め固めた。作製した供試体は、1日間20°Cの恒温で養生を行った後、蒸気養生(90°C, 2日間)を行った。

(4) 加熱試験

加熱試験には電気炉を用いた。電気炉は最高温度が1150°Cまで上昇可能なもので、内寸:300×150×250mmのものを用いた。図-5に加熱パターンを示す。電気炉の設定温度と加熱時間はそれぞれ400°C(30分)、600°C(20分)、800°C(15分)とした。予め、炉内温度を設定温度に保持し、電気炉を開閉し供試体を2本ずつ電気炉内に設置した。所定の時間、供試体を加熱した後電気炉の電源を切って自然冷却を行った。電気炉扉の開閉の際、炉内温度は30°C程度低下したが、1分程度で所定の温

度に回復できることを確認した。各設定温度で加熱前後の重量を測定し、重量変化から式(1)を用いて重量損失率を算出した。加熱後の残存重量は、残った大きな塊で重量の重い方を選択して測定した。算出した重量損失率には、水分損失も含まれているが、本研究では、爆裂抑制効果を重量損失率で評価することとした。

$$asp = (Wini - Wafter) / Wini \times 100 \quad (1)$$

ここに、
asp: 重量損失率(%)
Wini: 加熱前の重量(g)
Wafter: 加熱後の残存重量(g)

4. 研究成果

(1) フレッシュ性状

図-7にモルタルフロー(0打)を示す。Controlのフローは250mmである。一方、各種爆裂抑制繊維を添加するとフローは低下した。すなわち、PP繊維とWSPVA繊維およびJute繊維3mmと12mmでフローは、208mm, 221mm, 197mm, 210mmとなった。練り上がり温度は、26~28°Cの範囲であった。

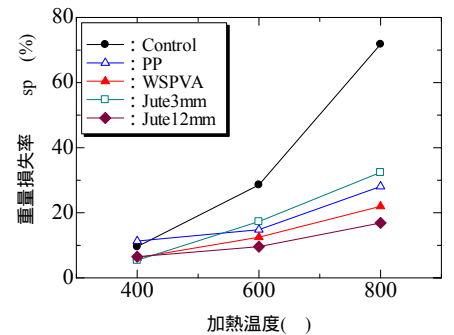
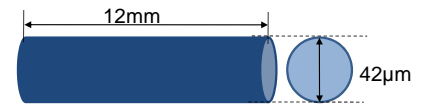


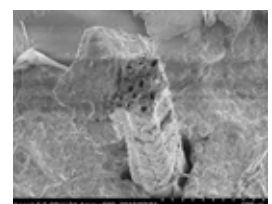
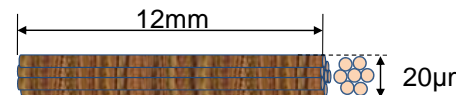
図-10 重量損失率



a) PP 繊維(融点: 170°C)



b) WSPVA 繊維(50-90°C 水溶性)



c) Jute 繊維(中空構造)

図-11 爆裂抑制繊維の概形

(2) 強度特性

図-8.9に各シリーズの圧縮強度とControl供試体の曲げ強度試験結果を示す。図-8より、圧縮強度は各シリーズともに140~150MPa程度の範囲となった。また、図-9に示す通り、曲げ強度の平均値は30MPa程度であった。

(3) 爆裂性状

表-1 に加熱温度 400,600,800 における Control, PP, WSPVA, Jute3mm, Jute12mm 供試体の爆裂状況を示す。表より、各シリーズともに、加熱温度が高くなるほど、爆裂損傷が激しくなっているが、爆裂抑制繊維を混入することで Control より爆裂を抑制できていることがわかる。加熱温度 400 で 30 分加熱したケースは Control, PP, WSPVA, Jute3mm 供試体は爆裂を生じている。この場合の損傷は表面剥離よりも内部からの破壊が顕著である。加熱温度 600 で 20 分加熱したケースは、Control 供試体の損傷が大きい。PP, WSPVA, Jute3mm においても損傷はあるが Control に比べて爆裂の規模は小さい。主に、表面剥離による損傷が観察できる。加熱温度 800 で 15 分加熱したケースは、Control 供試体が供試体の原型を留めないほど損傷している。一方、PP, WSPVA, Jute3mm においても損傷はあるが Control に比べて爆裂の規模は小さい。主に、表面剥離による損傷が観察できる。Jute12mm 供試体は、400, 600 加熱においては大きな損傷はみられない。800 では、表面が爆裂により剥離しているが、他のシリーズに比べて爆裂の程度が一番小さいことがわかる。今回の加熱試験は、所定の温度に保持された電気炉内に供試体を投入して加熱を行っており、供試体表面と内部の温度勾配が非常に大きく実際の火災よりも初期の温度条件が厳しいものである。この条件下においても、爆裂抑制用繊維を混入することで爆裂抑制効果が確認できた。

(5) 爆裂抑制繊維の効果

図-10 に重量損失率を示す。図より、各供試体とも加熱温度が 400,600,800 と高くなると重量損失率が高くなる傾向にある。しかし、爆裂抑制繊維を混入すると 800 加熱でも重量損失率が 30%程度に抑制できることがわかる。特に、WSPVA 繊維と Jute12mm は PP 繊維よりも爆裂抑制効果が期待できる可能性が示された。図-11 に今回使用した繊維の概形を示す。PP 繊維は一般的に爆裂抑制用として用いられているが、今回の結果では損傷率が大きい場合があった。PP 繊維の融点は 170 前後であるが、今回の加熱試験は急激な温度勾配を供試体に与えたため PP 繊維が溶融する前に爆裂が生じた可能性が考えられる。一方、WSPVA は PP 繊維に比べて重量損失率は小さかった。WSPVA 繊維が 50-90 の水溶液中で溶解することから急激な温度勾配が供試体内部に生じた場合でも、水分存在下で繊維の一部が溶解するか、繊維とセメントマトリックスとの付着力が緩和されたため蒸気圧逸散ネットワークが形成され爆裂を低減できたと考えられる。次に Jute 繊維について、繊維長 3mm よりも 12mm が爆裂抑制効果の高いことが分かる。Jute 繊維は、

複数の管(中空構造)が束になっていることから、蒸気圧逸散ネットワークを形成し爆裂を抑制できることを著者らはこれまでに示したが、繊維長 3mm では蒸気圧逸散ネットワークの形成が十分ではなく爆裂抑制効果が小さくなったと考えられる。以上のように、繊維の種類と長さによって爆裂抑制効果に差異が見られた。

(6) まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す。

加熱試験において各供試体とも加熱温度が 400, 600, 800 と高くなると重量損失率が高くなる傾向にある。しかし、爆裂抑制繊維を混入すると 800 加熱でも重量損失率が 30%程度に抑制できることがわかった。

PP 繊維は一般的の爆裂抑制用として用いられているが、今回の結果では重量損失率が大きい場合があった。PP 繊維の融点は 170 前後であるが、今回の加熱試験は急激な温度勾配を供試体に与えたため PP 繊維が溶融する前に爆裂が生じた可能性が考えられる。

WSPVA 繊維が 50-90 の水溶液中で溶解することから急激な温度勾配が供試体内部に生じた場合でも、繊維が水分存在下で一部が溶解するか、繊維とセメントマトリックスとの付着力が緩和されたため蒸気圧逸散ネットワークが形成され爆裂を低減できたと考えられる。また、今回使用した繊維長が 4mm であることを勘案すると、繊維長を更に長くすると爆裂抑制効果が高まることが期待できると考えられるが、今後更に検討したい。

Jute 繊維について、繊維長 3mm よりも 12mm が爆裂抑制効果の高いことが分かる。Jute 繊維は、複数の管(中空構造)が束になっていることから、蒸気圧逸散ネットワークを形成し爆裂を抑制できることが考えられるが、繊維長 3mm では蒸気圧逸散ネットワークの形成が十分ではなく爆裂抑制効果が小さくなったと考えられる。

本研究の範囲内において、繊維の種類と長さによって爆裂抑制効果に差異が見られた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 4 件)

川口 潤, 小澤 満津雄, 周 波, 内田 裕市: 超強度繊維補強コンクリートの爆裂抑制と加熱後の残存強度に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, 2012(投稿中)

M.Ozawa , Z. Bo , Y. Uchida , H. Morimoto : Preventive Effects of Fibers on Spalling of UFC at High Temperatures, Journal of Structural Fire Engineering(投稿中)

小澤 満津雄, 俵 想太郎, 内田 裕市, 森本 博昭:高温環境下における各種短繊維を添加した超高強度繊維補強コンクリートの爆裂抑制効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, 1120-1125, 2012.

小澤 満津雄, R. Dantas, 森本 博昭: 高温環境下における繊維混入高強度コンクリートの通気率変化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, CD-ROM, 1199-1204, 2011.

〔学会発表〕(計 2件)

M.Ozawa , Z. Bo , Y. Uchida , H. Morimoto:Preventive Effects of Different Types of Fibers on UFC Spalling at High Temperatures , Proceedings of 7th International Conference on Structures in Fire , M. Fontana , A. Frangi , M. Knobloch (Eds.) , 747-755 , Zurich(Switzerland) , 2012.6.

M.Ozawa , Y.Uchida , H.Morimoto: Prevention of Spalling for UFC using WS-PVA Fiber and Jute Fiber at High Temperature , Proceeding of the 9th International Symposium on High Performance Concrete-Design, Verification&Utilization,Vol.1,222-229, Rotorua(New-Zealand) , 2011.8.

〔図書〕(計 0件)

6. 研究組織

(1)研究代表者 小澤 満津雄
(OZAWA MITSUO)

岐阜大学・工学部・助教
研究者番号：80313906

(2)研究分担者 内田 裕市
(UCHIDA YUICHI)

岐阜大学・総合情報メディアセンター・教授
研究者番号：20213449

(3)連携研究者 森本 博昭
(MORIMOTO HIROAKI)

岐阜大学・工学部・特任教授
研究者番号：30021629