論文 天然繊維を適用した超高強度コンクリートの爆裂抑制効果

Davaajav Munkhtsatsral^{*1}・小澤 満津雄^{*2}・周波^{*3}・内田 裕市^{*4}

要旨:本研究では、天然のジュート繊維による超高強度繊維補強コンクリート(UFC)の火災時の爆裂抑制効果 を検討するために、UFC の加熱試験を実施した。すなわち、蒸気圧計測試験と残存圧縮強度試験(200℃, 400℃, 600℃)を実施した。爆裂抑制繊維はポリプロピレン繊維(以下, PP 繊維)とジュート繊維を用いた。その結果, ジュート繊維を 0.3vol%混入することで爆裂抑制効果が確認できた。一方, PP 繊維は最大で 0.2vol%まで繊維 を混入したが、爆裂を抑制することはできなかった。ジュート繊維を混入した場合、残存圧縮強度について は 200℃と 400℃加熱で強度が増加し、600℃加熱で強度が低下する傾向を示した。 キーワード:爆裂、火災、UFC、鋼繊維、ジュート繊維、ポリプロピレン繊維

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート (Ultra-High Strength Fiber Reinforced Concrete: UFC) は, 圧縮強度が 150MPa 以上であり、鋼繊維もしくは合成繊維を用いることで耐 久性に優れた高い力学性能を有する¹⁾。しかし、火災時 に爆裂を生じやすいという欠点がある。一般的に, UFC の耐火対策としてポリプロピレン(以下, PP)繊維を混 入する方法がある²⁾。しかしながら,UFC に PP 繊維を 混入しても十分な爆裂抑制効果が得られないことがあり, 検討が必要な状況である 3)。それに対し、本研究グルー プは天然のジュート繊維(以下, Jute)を UFC に適用した 場合の爆裂抑制効果を検討している。その結果、アラミ ド繊維を使用した UFC(fc:150MPa クラス)に Jute 繊維や 水溶性 PVA(WSPVA)繊維を混入した場合に PP 繊維と同 等以上の爆裂抑制効果があることを確認している⁴⁾。さ らに高強度の UFC(fc:200MPa クラス)に, Jute 繊維を混入 した場合においても、爆裂抑制効果を確認している。本 研究では, UFC に Jute 繊維を混入した場合の爆裂抑制効 果の定量化を行うことを目的とした。すなわち、蒸気圧 説に着目し, 蒸気圧計測試験を実施した。加えて, 加熱

後の残存圧縮強度試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 配合

表-1 に本研究で使用した基本配合を示す。力学特性を 確保するために、鋼繊維を添加した。本配合は専用の結 合材と細骨材および専用の高性能減水剤を用いた。使用 した鋼繊維は直径 0.02mm、繊維長 15mm である。供試 体の種類は爆裂抑制繊維が未混入のものを Control と定 義し、7 種類とした。すなわち Control に対して、Jute 繊 維を 0.05~0.3vol%混入したものを 4 種類作製し、 Jute-0.05、Jute-0.1、Jute-0.2、Jute-0.3 とした。蒸気圧低 減効果の比較用に PP 繊維を 0.1、0.2vol%混入したものを 2 種類作製し、PP-0.1、PP-0.2 とした。

2.2 使用した爆裂抑制繊維

表-2 に本研究で使用した爆裂抑制繊維の種類とその 特性を示す。使用した繊維は, PP 繊維と Jute 繊維の 2 種類である。繊維長はいずれも 12mm とした。PP 繊維の 特徴は約 170℃で融点を示すことである。コンクリート 中の PP 繊維は火災時に 170℃で溶融し, 空隙を形成す

表-1 UF	C (の基	本酉	2合
--------	-----	----	----	----

単位量(kg/m ³)			
結合材	細骨材	水+減水剤	鋼繊維
1322	932	154+26	157

表-2 爆裂抑制繊維

繊維種類	繊維長(mm)	繊維径(µm)	融点(℃)	密度(g/cm ³)	熱による状態変化
Jute	12	10-30	-	1.3-1.45	炭化
РР	12	42	170	0.91	溶解

*1 群馬大学 工学部社会環境デザイン工学科 学生 (学生会員)

*2 群馬大学 理工学研究院 環境創生部門 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 岐阜大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 学生 (学生会員)

*4 岐阜大学 総合情報メディアセンター 教授 工博(正会員)

る。この空隙から水蒸気が逸散し、爆裂を抑制できると されている。それに対して、Jute 繊維は天然の麻繊維で あり、植物の茎(ストロー)が複数の束になった構造と なっている。Jute 繊維を混入したコンクリートが火災を 受けると水蒸気はこのストロー構造により、外部に逸散 することで爆裂を抑制できると考えられる。既報では、 圧縮強度 70MPa の高強度コンクリートにジュート繊維 を 0.075vol%混入した供試体において、RABT 曲線によ り加熱試験を行い、爆裂抑制効果が確認できている⁵。

2.3 供試体の作製

UFCの練混ぜにはホバート型ミキサを使用した。ベー スモルタルを作製後,鋼繊維と爆裂抑制繊維を混入した。 練混ぜを終了後,流動性を確認するために,フロー試験 を実施した。フロー試験後,φ50×100mmの型枠に打設し た。供試体は打設後,20℃で48hr 前養生後,90℃で48hr の蒸気養生を実施した。蒸気養生を実施後,温度20℃の 部屋において1か月間の封緘養生を行った。

2.4 試験項目

試験項目は残存圧縮強度試験と蒸気圧計測試験および 爆裂判定試験とした。供試体の形状・寸法はφ50×100mm の円柱供試体とした。各加熱条件につき供試体数は3本 ずつとした。

2.5 残存圧縮強度試験

加熱試験には電気炉を用いた。電気炉は最高温度が 1150℃まで上昇可能なもので,内寸:300×115×215mm のものを用いた。図-1,2 に残存圧縮強度試験の加熱パ ターンおよび加熱試験の状況を示す。供試体を3本ずつ 電気炉に入れ200℃,400℃,600℃まで0.5℃/minの加熱 速度で加熱した。炉内温度が所定の値となった後,1hr. 保持した。加熱終了後,電気炉の電源を切って自然冷却 を行った。供試体は冷却後に圧縮試験を実施し加熱後の 残存圧縮強度を確認した。試験の対象はJute 繊維混入供 試体のみとした。なお,PP 繊維混入供試体は基本特性 を確認するために,加熱無しの供試体を対象として,圧 縮試験を実施した。

2.6 蒸気圧測定試験と爆裂判定試験

ここでは、蒸気圧測定試験と爆裂判定試験を同一供試体で実施した。図-3 に蒸気圧計測用供試体の形状・寸法を示す。供試体寸法は φ50×100mm とした。供試体内部に蒸気圧計測用パイプを配置した。設置位置は、供試体断面中央とし、差込深さは供試体下面から 25mm の位置とした。図-4 に蒸気圧計測システムを示す。蒸気圧は計測用パイプの他端に取り付けた圧力計(計測許容値: 5MPa)により計測した。蒸気圧計測用パイプの中には圧



図-1 残存圧縮強度試験の加熱パターン







図-4 蒸気圧計測システム



図-3 蒸気圧計測用供試体



加熱温度(℃)

残存圧縮強度試験結果







カ伝達媒体としてシリコンオイルを注入した。供試体内 部の温度は熱電対により計測した。図-5 に加熱曲線を示 す。蒸気圧計測の加熱曲線は ISO 標準加熱曲線を目標と した⁴⁾が、実際の炉内温度は ISO 曲線より 100℃程度低 くなった。加熱時間は予備試験の結果から、30min とし た。シリコンオイルの膨張圧を補正するために、以下の 試験を実施した。すなわち、蒸気圧計測用パイプの片方 の先端を溶接により塞ぎ、シリコンオイルを充填したも のを用意し、ISO 加熱曲線でパイプを直接加熱した。加 熱時にはパイプ内のシリコンオイルが膨張するためその 膨張圧と温度を計測した。シリコンオイルの膨張圧と温 度の関係を用いて、計測値からシリコンオイルの膨張分 を差し引いた。

3. 結果および考察

3.1 フレッシュ性状

図-7

図-6にモルタルフロー(0打)試験結果を示す。図より, Control のフローは 295mm であった。Jute 繊維を混入した Jute-0.05~0.3 はそれぞれ 281mm, 272mm, 253mm, 231mm であった。Jute 繊維の添加量が増加するとフロー 値が低下する傾向を示した。それに対して, PP 繊維を混 入した PP-0.1 と PP-0.2 はそれぞれ 277mm と 263mm と なった。Jute 繊維と同様に PP 繊維の混入率が大きくなる とフロー値が低下する傾向を示した。しかし, Jute 繊維 を混入した配合に比べてフロー値がやや大きかった。

3.2 残存圧縮強度

図-7にJute繊維を混入した場合の加熱後の残存圧縮強 度試験結果を示す。加熱設定温度が 400℃で Control と Jute-0.05 は爆裂を生じたため、強度試験が実施できなか った。常温での圧縮強度は Control と Jute-0.05~0.3 にお いて 169MPa~182MPa となった。それに対し、PP-0.1、 PP-0.2 はそれぞれ 189MPa と 187MPa とやや大きかった。 Control と Jute-0.05~0.3 を 200℃で加熱した場合, 圧縮強 度は 205~230MPa であり, 加熱に伴い強度が増加する傾 向を示した。これは加熱により、未水和セメントの水和 反応が進行したものと考えられ、この現象については宮 本ら ⁶⁾も同様の報告を示している。400℃加熱では, Jute-0.1~Jute-0.3 の圧縮強度は 190~201MPa となり 200℃加熱供試体とほぼ同程度の残存強度となった。 600℃加熱では、Jute-0.1~Jute-0.3 の圧縮強度は 131~ 134MPa と 200℃と比べて約 70MPa 減少する傾向を示し た。 図-8 に残存圧縮強度比と温度の関係を示す。



残存圧縮強度について, Jute 繊維を 0.1vol%以上混入した 場合,200℃加熱で常温の強度と比較し,加熱時圧縮強度 は 1.1~1.3 倍程度大きくなった。400℃加熱では若干強度 が低下した。600℃加熱では常温の強度の 0.8 倍まで強度 が低下する結果となった。これは,加熱に伴うマイクロ クラックの影響とセメント水和物の熱分解の影響が考え られる。既往の知見でも同様な報告がなされている⁶。

3.3 内部蒸気圧

図-9~15 に Control と Jute および PP 繊維を混入した 場合の蒸気圧と内部温度および炉内温度の経時変化の一 例を示す。図-9 より Control 供試体は,加熱後,6.8min で内部温度が 39.1℃で内部の蒸気圧は上昇し始めた。 8.3min で爆裂が生じ始め,15.8min で蒸気圧の最大値 1.61MPa に達した。16.5min で大きな爆裂が生じた。加熱 後28min で内部温度が炉内温度とほぼ同じとなった。

図-10より Jute -0.05 供試体は,加熱後,9.3min で内部 温度が 114.9℃で内部の蒸気圧は上昇し始めると同時に 爆裂が生じ始めた。15.7min で蒸気圧の最大値 2.46MPa に達した。16.3min で大きな爆裂が生じた。加熱後 24min で内部温度が炉内温度と同じとなった。これは,爆裂に よって内部に埋め込んだ熱電対が炉内に曝されたことに よると考えられる。

図-11より Jute -0.1 供試体は,加熱後,7.0min で内部 温度が 64.3℃で内部の蒸気圧は上昇し始めた。9.0min で 爆裂が生じ始め,12.3min で蒸気圧の最大値 0.96MPa に 達した。19.2min で大きな爆裂が生じた。加熱後 26min で内部温度が炉内温度と同じとなった。

図-12より Jute-0.2 供試体は,加熱後,9.4min で内部 温度が 110.2℃で内部の蒸気圧は上昇し始めると同時に 爆裂が生じ始めた。13.2min で蒸気圧の最大値 0.73MPa に達した。19.0min で大きな爆裂が生じた。加熱後26min で内部温度が炉内温度と同じとなった。

図-13 より Jute-0.3 供試体は,加熱後,6.8min で内部 温度が 36.6℃で内部の蒸気圧は上昇し始めた。11.0min で小規模な爆裂が生じた。17.0min で蒸気圧の最大値 2.12MPa に達した。それ以降爆裂は生じなかった。加熱 後 30min の炉内温度は約 630℃であるが,コンクリート 内部温度は 436.5℃であり,約 200℃の差がある。このこ とより,Jute-0.3 は損傷が小さいことがわかる。

図-14より PP-0.1 供試体は,加熱後,9.0min で爆裂が 生じ始め,10.3min で内部温度が104.6℃で内部の蒸気圧 は上昇し始めた。16.8min で蒸気圧の最大値2.59MPa に 達した。18.8min で大きな爆裂が生じた。加熱後23min で内部温度が炉内温度と同じとなった。

図-15 より PP-0.2 供試体は,加熱後,9.5min で内部温 度が 127.0℃で内部の蒸気圧は上昇し始めると同時に爆 裂が生じ始めた。12.7min で蒸気圧の最大値 0.72MPa に 達した。14.7min で大きな爆裂が生じた。加熱後 25min で内部温度が炉内温度と同じとなった。

図-16にPP繊維およびJute繊維を混入した場合の蒸気 圧最大・最小値および平均値を示す。図より,計測値の 最大値と最小値にばらつきがあることが分かる。ばらつ きが一番小さいものは, PP 繊維を 0.2vol%混入したもの で,最大値と最小値の差は 0.3MPa であった。ばらつき が一番大きいものは Jute-0.1 であり,最大値と最小値の 差は約 4MPa 程度あった。計測値のばらつきについては, 今後,計測方法の検証が必要であると考える。

その上で,爆裂抑制繊維の蒸気圧低減効果について, 平均値で議論する。Control は 2.53MPa であった。PP 繊 維を0.1vol%と0.2 vol%混入したものはそれぞれ1.76MPa と1.0MPa となった。Jute 繊維は0.05 vol%から0.2 vol% まで蒸気圧がそれぞれ2.26MPa と0.64MPa となり,低減 効果が確認できた。一方で0.3 vol%では2.10MPa となり 大きくなる傾向を示した。この点については、今後更に 検討が必要であると考える。

3.4 爆裂判定

表-3 に各供試体の爆裂状況を示す。Control と Jute-0.05 および Jute-0.1 と Jute-0.2 はいずれ供試体の損傷が著しい ことがわかる。PP-0.1 と PP-0.2 も供試体の損傷が著しい ことがわかる。一方, Jute-0.3 は,爆裂は生じているが, ほかの種類と比較しても損傷が少ないことがわかる。

3.5 PP 繊維と Jute 繊維の爆裂抑制効果

ここでは、PP 繊維と Jute 繊維の爆裂抑制効果について 考察する。PP 繊維は、繊維混入率 0.1 vol%から 0.2 vol% に大きくなると蒸気圧の低減効果は確認できた(図-16)。 しかしながら、爆裂を抑制することができなかった。PP 繊維は繊維が溶融することで蒸気圧逸散ネットワークを 形成する。その蒸気圧逸散ネットワークにより、蒸気圧 を外部に逸散し爆裂を抑制するとされている。ISO 曲線 による加熱試験では、爆裂が繊維の溶融よりも前に生じ たため、爆裂を抑制することができなかったと考えられ る。一方、Jute 繊維は 0.2vol%までは蒸気圧低減効果が確 認できたが、爆裂を抑制する効果は小さかった。Jute 繊 維を 0.3vol%混入すると繊維混入無しの Control 供試体に 比べて爆裂の抑制効果は確認できた。一方で、蒸気圧の 計測値が大きく、今後更に検証が必要であると考える。

以上, PP 繊維と Jute 繊維を混入した場合の蒸気圧低減 効果と爆裂抑制効果を検討したが,蒸気圧低減効果を期 待した繊維混入では爆裂を抑制できないことがあり,熱 応力の緩和効果も含めて,今後更に検討が必要であると 考えられる。

表-3 各供試体の爆裂性状

供試体の種類	No.1	No.2	No.3	
Control		A DO		
Jute-0.05				
Jute-0.1				
Jute-0.2	-			
Jute-0.3				
PP-0.1				
PP-0.2	A A			

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結論を以下に示す.

- 流動性について、Jute 繊維と PP 繊維ともに繊維混 入率が大きくなるとフロー値が低下する傾向を示 した。爆裂繊維未混入の Control 供試体に比べて、 爆裂抑制繊維が 0.2vol%の場合、フロー値は、Jute 繊維では約 40mm、PP 繊維では約 30mm 小さくな った。
- 2) 残存圧縮強度について、jute 繊維 0.1vol%以上混入 した場合、200℃加熱では常温の強度と比較して、 加熱時圧縮強度は 1.1~1.3 倍に大きくなった。400℃ 加熱では若干強度が低下した。600℃加熱では常温 の強度の 0.8 倍まで強度が低下する結果となった。
- UFC に PP 繊維を 0.1~0.2vol%混入した場合,蒸気 圧の低減効果が確認できたが,爆裂を抑制すること はできなかった。
- 4) Jute 繊維を 0.05~0.2vol%混入した場合,蒸気圧の 低減効果は確認できたが爆裂を抑制することはで きなかった。それに対して, Jute を 0.3vol%混入し たものは爆裂抑制効果が大きかった。

今後の課題として, 蒸気圧の計測方法の改善および ジュート繊維の熱応力緩和効果を検討し, ジュート 繊維の爆裂抑制の定量化を行いたいと考えている。

参考文献

- 土木学会:超高強度繊維補強コンクリートの設計・ 施工指針(案),コンクリートライブラリー,No.113, 2004
- Kalifa, P., Menneteau, F.D., Quenard, D.: Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research, 30, pp.1915 -1927,2000.
- 川口潤,小澤満津雄,周波,内田裕市:超高強度繊 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.35, No.1, pp.1153-1158, 2013
- 4) 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.35, No.1, pp.1120-1125, 2012
- 5) 土木学会:コンクリート構造物の対価技術研究小委 員会報告ならびにシンポジウム論文集, Vol.63, No.1, pp.63, 2004
- 宮本圭一,安部武雄:超高強度コンクリートの高温 加熱後の力学的性質(Fc150とFc200),日本建築学 会大会学術講演梗概集(東海),pp.193-194,2012
- 河辺伸二,一瀬賢一,川口徹,長尾覚博:高温加熱 を受けた高強度コンクリートの強度特性に関する 研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2000