

論文 繊維補強コンクリートの爆裂性状と内部蒸気圧との関係

木村 和広^{*1}・小澤 満津雄^{*2}・六郷 恵哲^{*3}・森本 博昭^{*3}

要旨：高強度コンクリートが火災などにより高温加熱を受けた際、爆裂現象を生ずることが問題となっている。爆裂現象を抑制する方法の一つに有機繊維を混入し、内部の水蒸気圧を緩和可能とされる方法がある。近年では実構造物の爆裂抑制対策にこの方法が用いられている。本研究では、爆裂抑制対策として各種有機繊維を混入した高強度コンクリートの加熱実験を行い、有機繊維の混入が内部蒸気圧の発現性状に及ぼす影響を検討した。その結果、①有機繊維の種類や形状によって、水蒸気圧の発現性状と爆裂抑制効果に差異が生じること、②爆裂の発生した供試体は蒸気圧の上昇が急激であることが明らかとなった。

キーワード：高強度コンクリート、高温加熱、爆裂、水蒸気圧、ポリプロピレン繊維、ポリエチレン繊維

1. はじめに

火災でのコンクリート構造物の安全性を確保する上で、コンクリートの耐火対策は必要不可欠である。コンクリートが高温加熱を受けたとき、表層部が爆発的に剥離する爆裂現象を生じることがある。爆裂現象により、鉄筋コンクリート部材のかぶりが減少し、内部の鉄筋が直接加熱される危険性がある。その結果、構造体として部材の耐力低下をもたらすために、その抑制が重要であると考えられる。爆裂のメカニズムとしては、熱応力説や水蒸気圧説が挙げられるが、未だに確たる結論が得られていないのが現状である。既往の研究では、耐火塗料の塗布、鋼板被覆、有機繊維の混入などに爆裂抑制効果があるとされている^{1)~6)}。本研究グループにおいても、

コンクリートの高温加熱による爆裂抑制対策を検討してきた⁷⁾⁸⁾。本論文では、水蒸気圧応力説に着目し、爆裂抑制に対して有効な手段の一つである各種有機繊維を混入した高強度コンクリートの加熱実験を行い、有機繊維の混入が内部蒸気圧の発現性状に及ぼす影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 使用供試体

表-1に本研究で使用し示方配合を示す。供試体は高強度コンクリートを対象とした。使用した配合の記号を表-2に示す。供試体は5種類とし、有機繊維の種類と繊維の長さおよび混入率により分類した。表-3に使用した有

表-1 示方配合

供試体名	W/C	s/a	単位量 (kg/m³)					繊維種類	繊維混入量	繊維長
	%	%	W	C	S	G	ad		(Vol%)	(mm)
Control	30	44.1	132	440	814	1048	13.2	NON		
PP-3-0.15								PP	0.15	3
PP-12-0.15										12
PE-12-0.15	28		123			22	PE	0.0375		
PE-12-0.0375										

表-2 供試体の分類

PP-12-0.15		
I	II	III
I 有機繊維の種類	:PP,PE	
II 繊維の長さ(mm)	:3,12mm	
III 混入率(vol%)	:0.15,0.0375	

表-3 繊維の特性

繊維	記号	密度 (g/cm ³)	融点 (°C)	直径 mm	長さ mm
ポリプロピレン	PP	0.91	170	0.11	3,12
ポリエチレン	PE	0.98	115~130	0.012	12

*1 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 学生 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 助教(正会員)

*3 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授(正会員)

機繊維の種類を示す。表より、使用した有機繊維はポリプロピレン(以下、PP)とポリエチレン繊維(以下、PE)とした。PPは繊維径が0.11mmで繊維長3mmと12mmの2種類を使用した。PEは繊維長を12mmとし、繊維径が0.012mmのものを使用した。コンクリートのW/Cは30%とした。セメントは早強ポルトランドセメント(密度：3.13g/cm³)を使用した。粗骨材の最大寸法は25mmとした。混和剤は高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系と架橋ポリマーの複合体)を使用した。使用する繊維によってワーカビリティが変化するため、予備試験により練り混ぜ性状を確認し、混和剤の使用量を決定した。供試体は、型枠に打設し1日経過後、脱型し、温度20℃一定の養生室内で14日間の湿布養生を行った。表-4、5にフレッシュ性状と材齢14日における圧縮強度と引張強度を示す。

2.2 供試体の形状寸法および実験装置

図-1に供試体の形状寸法を示す。図より、寸法は400×400×100mmとした。供試体内部の加熱面から8mmの位置に蒸気圧計測用鋼管を5本(外径5mm、内径2mm、長さ200mmと110mmの2種類)を配置した。鋼管は管内部の温度を均一に上昇させるために加熱面に対して平行に埋設した。また、鋼管内には、コンクリートの蒸気圧計測精度向上を期待して圧力媒体として油圧ジャッキ用油を充填した。蒸気圧は鋼管他端に取り付けた圧力計(K社製：計測許容値：2MPaおよび5MPaの2種類)により計測した。供試体内部の温度はK熱電対により計

表-4 フレッシュ性状

供試体の種類	温度 (℃)	スランプ (cm)	空気量 (%)
Control	20	21.5	1.9
PP-3-0.15	21	16	2.8
PP-12-0.15	21.5	7	2.9
PE-12-0.15	20	3.5	2.7
PE-12-0.0375	23	17.5	2.2

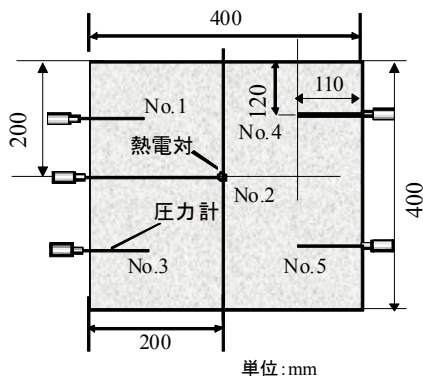


図-1 供試体の形状寸法

測した。温度計測位置は蒸気圧計測位置と同じく加熱面(下底面)から8mmとした。蒸気圧と熱電対の配置位置は、既往の研究⁷⁾より爆裂深さが加熱面から10mm程度であることを勘案して決定した。図-2に加熱試験装置を示す。図より、供試体の加熱には電気炉を用いた。電気炉は容量電圧200V、最大電流28Aの鉄クロム線を9本用いた装置である。加熱面は下底面350×350mmの範囲とした。加熱条件は、1200℃/hrとした。1200℃に達した後はヒーター電源を遮断して除冷するものとした。ただし、加熱段階で爆裂により鋼管内の蒸気圧が抜けるか、大きな爆裂が発生し試験継続が危険と判断された時点で加熱を中断して除冷を行った。

3. 実験結果

3.1 繊維の混入率の確認

コンクリートに混入した有機繊維の混入率を確認するために、練り混ぜたフレッシュコンクリートから約100gの試料を5回採取し、水洗い処理後、繊維を取り出した。繊維のコンクリート試料に対する重量から体積比率を計算し、混入率を確認した。表-6に各配合における繊維の混入率を示す。表より、有機繊維の混入率に若干ばらつきはみられるが、概ね所定の混入率の繊維がコンクリート全体に混入していることが確認された。

3.2 蒸気圧計測の校正曲線

鋼管内の油圧ジャッキ用油が温度上昇によって膨張するため、計測値への影響があると考えられる。そこで、

表-5 強度試験結果

供試体の種類	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
Control	69.8	5.63
PP-3-0.15	75.1	5.33
PP-12-0.15	67.8	5.83
PE-12-0.15	78.1	5.53
PE-12-0.0375	74.1	6.97

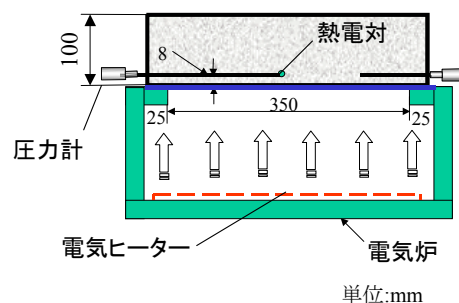


図-2 加熱試験装置

油圧ジャッキ用油の膨張圧の影響を検討するために油圧ジャッキ用油を充填した鋼管の直接加熱試験を行った。図-3に圧力媒体の膨張圧と炉内温度との関係を示す。図より、使用した油圧ジャッキ用油は、炉内温度が100℃から膨張し始め、曲線的に上昇し、炉内温度400℃で0.06MPaを示した。この実測値をもとに、校正曲線を作成し、実験で計測した蒸気圧の補正を行った。校正曲線を式(1)に示す。

$$y = -1.954 \times 10^{-2} + 3.57 \times 10^{-4} \cdot x - 1.813 \times 10^{-6} \cdot x^2 + 3.55 \times 10^{-9} \cdot x^3 \quad (1)$$

ここに、y：蒸気圧の補正分(MPa)，

x：供試体の温度(℃) ($0 \leq x \leq 400$)

3.3 内部温度および水蒸気圧の計測結果

図-4にControl供試体の加熱面から8mmの深さにおける内部温度と蒸気圧の経時変化を示す。蒸気圧は、既往の文献⁸⁾において、2MPa程度の値を得ている。しかし、本供試体では、圧力計測用媒体として用いたオイルの充填が不十分であったため、蒸気圧の計測値は0.2MPa以下と小さいものとなった。そのため、有意な結果が得られなかったと判断した。ここでは、内部温度と爆裂の関係について記述する。内部温度は、加熱後40分で200℃

に達し、1回目の爆裂が生じた。爆裂の発生とともに、内部水が直接熱せられことで気化し、内部温度が若干低下したと考えられる。その後、温度の上昇と爆裂および温度の低下を数回繰り返した。加熱後60分経過で内部温度は300℃に達した。

次に、図-5にPP-3-0.15供試体の内部温度と蒸気圧の経時変化を示す。図より、内部温度は、加熱後32分で193℃に達し、1回目の爆裂が生じた。爆裂の発生とともに温度が若干低下した。その後、温度の上昇と爆裂、温度の低下を数回繰り返した。加熱後50分経過で336℃に達した。蒸気圧は、温度が68℃付近から上昇し始め、供試体中央②の計測位置において193℃で2.5MPaを示した。その直後爆裂により低下した。加熱の継続により、再度蒸気圧は上昇し、温度200℃で3.26MPaを示した。その後、爆裂により蒸気圧は抜けた。本供試体は、PP3mm0.15vol%(1.365kg/m³)を混入したが、蒸気圧の低下と緩和効果は認められず、爆裂を抑制することができなかった。PPの融点170℃付近で蒸気圧の緩和効果を期待したが、蒸気圧は低下せず上昇した。

図-6にPP-12-0.15供試体の内部温度と蒸気圧の経時変化を示す。図より、内部温度は、加熱後38分で200℃に達した。その後、加熱を継続し、加熱後50分で400℃に達した。蒸気圧は、温度が120℃付近から上昇し始め、

表-6 繊維の混入率

供試体の種類	纖維の混入率(%)					平均(%)	
	No.	1	2	3	4		5
PP-3-0.15		0.27	0.19	0.16	0.15	0.15	0.18
PP-12-0.15		0.14	0.12	0.13	0.10	0.15	0.13
PE-12-0.0375		0.0440	0.0490	0.0360	0.0360	0.0360	0.0402
PE-12-0.15		0.17	0.18	0.14	0.12	0.15	0.15

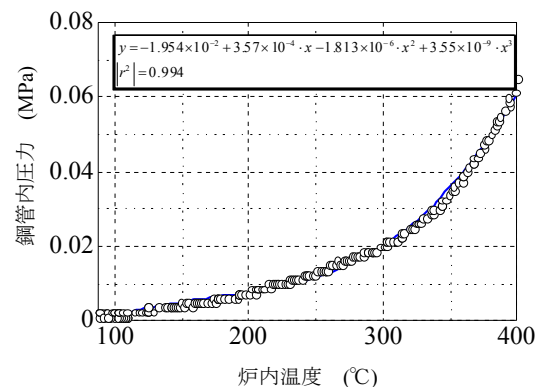


図-3 蒸気圧の校正曲線

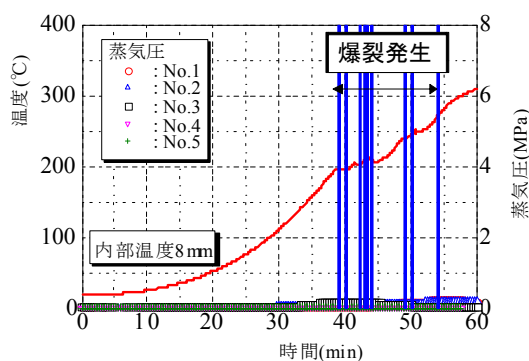


図-4 内部温度と蒸気圧の経時変化
(Control 供試体)

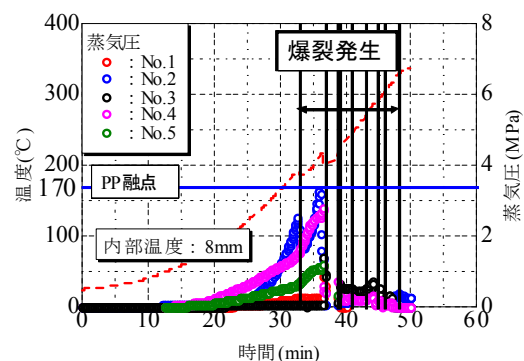


図-5 内部温度と蒸気圧の経時変化
(PP-3-0.15 供試体)

300℃で3.35MPaを示した。本供試体はPP12mm0.15vol% (1.365kg/m³)を混入した。蒸気圧の上昇はみられるが、爆裂は生じず、爆裂抑制に対して効果が得られた。

図-7にPE-12-0.15供試体の内部温度と蒸気圧の経時変化を示す。図より、内部温度は、加熱後30分で200℃に達した。その後、38分で380℃に達した。次に、蒸気圧は、温度が150℃付近から上昇し始め、300℃で2.77MPaを示した。その後、一時的に低下したが、再度の上昇し、温度350℃で蒸気圧の最大値7.6MPaを記録した。温度320℃付近から数回の爆裂を生じた。本供試体は、PE12mm0.15vol% (1.47kg/m³)の繊維を混入したが、蒸気圧の緩和効果は認められず、爆裂を抑制することができなかった。特に、蒸気圧は最大で7.6MPaに達した。

図-8にPE-12-0.0375供試体の内部温度と蒸気圧の経時変化を示す。図より、内部温度は、加熱後50分で200℃に達した。その後、60分で360℃に達した。次に、蒸気圧は、温度が92℃付近から上昇し始め、320℃で3.37MPaを示した。蒸気圧の上昇とともに、温度200℃付近から断続的に爆裂が生じた。PE12mm0.0375vol% (0.367kg/m³)の繊維を混入したが、蒸気圧の緩和効果は認められず、

爆裂を抑制することができなかった。

3.4 蒸気圧発生初期の性状

図-9に繊維混入供試体の最大蒸気圧を計測した箇所における蒸気圧発生初期の性状を示す。図より、爆裂が生じなかったPP-12-0.15は、蒸気圧が発生初期から緩やかに上昇し、30分経過後、0.15MPaを示した。一方、爆裂が生じたPP-3-0.15とPE-12-0.15およびPE-12-0.0375は蒸気圧発生時からある時間を経ると、蒸気圧の上昇勾配が急激となる点があることがわかる。すなわち、PP-3-0.15とPE-12-0.15およびPE-12-0.0375それぞれにおいて、24分と26分および12分である。爆裂の有無と蒸気圧上昇性状について、爆裂が抑制できたPP-12-0.15は内部の繊維が熔融し、生成された空隙による蒸気圧の緩和と内部の蒸気圧の上昇がバランスして急激な上昇を抑制できたものと考えられる。一方、爆裂が生じたPP-3-0.15とPE-12-0.15およびPE-12-0.0375は、蒸気圧の上昇と繊維の熔融に伴う空隙の生成による蒸気圧の緩和効果がバランスせず、蒸気圧の局部集中を起こし爆裂に至ったものと考えられる。混入した繊維の形状や混入量によって、繊維が熔融した場合に生成される空隙の量と形状が

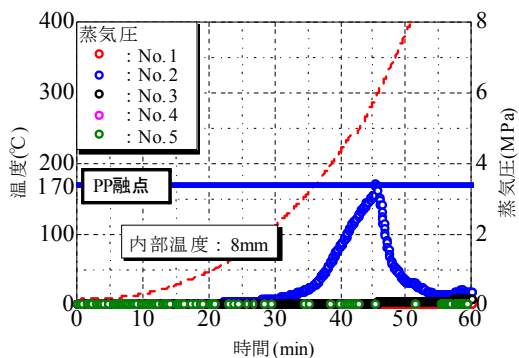


図-6 内部温度と蒸気圧の経時変化
(PP-12-0.15 供試体)

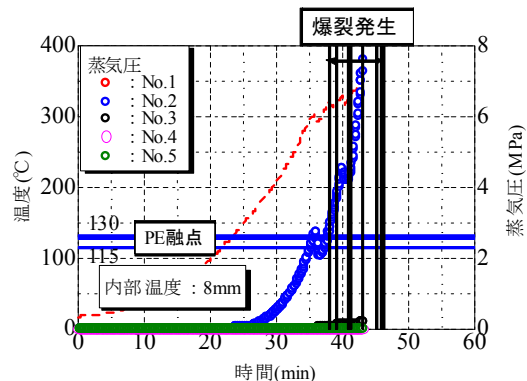


図-7 内部温度と蒸気圧の経時変化
(PE-12-0.15 供試体)

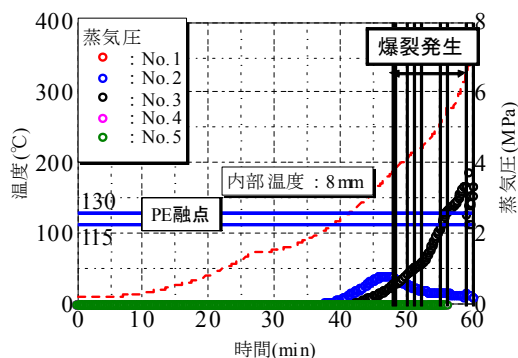


図-8 内部温度と蒸気圧の経時変化
(PE-12-0.0375 供試体)

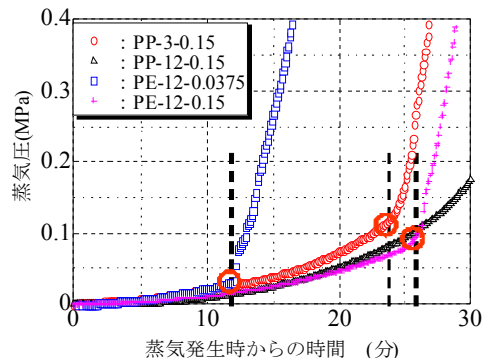


図-9 蒸気圧発生初期の性状

異なるため蒸気圧を緩和するに十分な空隙構造が生成されなかったと考えられる。

3.5 各供試体の加熱面のひび割れ状況

写真-1～5 に各供試体の加熱試験後のひび割れ状況を示す。写真より、control と PP-3-0.15 および PE-12-0.15 と PE-12-0.0375 は、加熱面全体に爆裂による剥離が生じている。剥離深さの最大値は、ほぼ 20mm に達している。一方、PP-12-0.15 は爆裂による剥離が生じておらず、加熱面に亀甲状にひび割れが確認された。

3.6 有機繊維混入による爆裂抑制効果

表-7 に爆裂試験状況のまとめを示す。表より、a)爆裂

の有無、b)加熱面のひび割れ性状、c)爆裂開始時の蒸気圧、d)爆裂発生時の内部温度、e)蒸気圧の最大値、f)剥離深さをまとめた。表より、PP-12-0.15 のみ爆裂を抑制することができた。PP-12-0.15 は繊維の混入量が 0.15vol% (1.365kg/m³)である。この量は、既報²⁾より、PP において繊維径 50 μ m で繊維長が 10～20mm の範囲で使用され、設計基準強度が 80～150MPa の高強度コンクリートでは、0.05～0.3vol% が実用化されているとする範囲に該当する。PP-3-0.15 は繊維長が 3mm であり、ワーカビリティの観点から繊維長を短くし爆裂抑制効果を期待したが、爆裂が生じた。PP-12-0.15 は繊維の径が他の 3 種類のもの

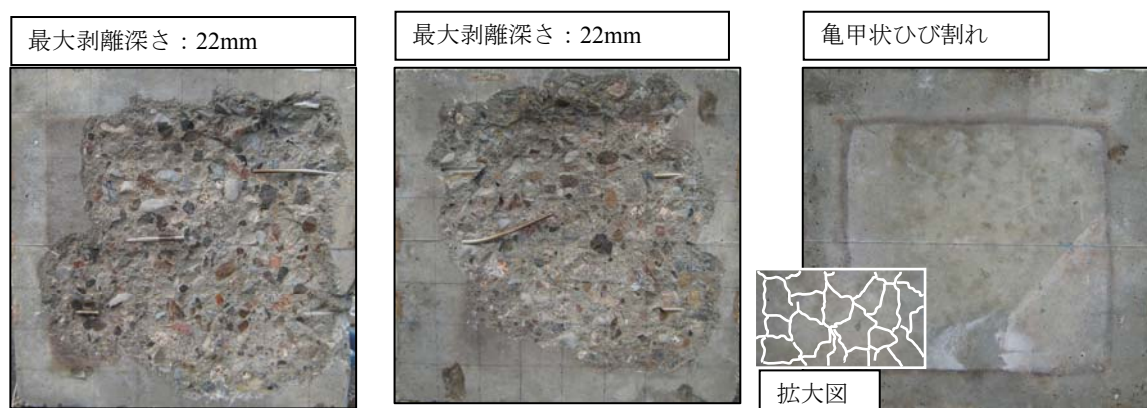


写真-1 加熱面の性状
(Control 供試体)

写真-2 加熱面の性状
(PP-3-0.15 供試体)

写真-3 加熱面の性状
(PP-12-0.15 供試体)

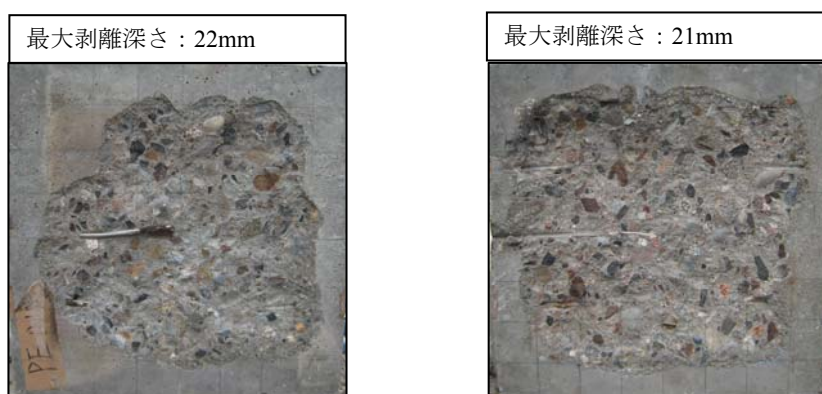


写真-4 加熱面の性状
(PE-12-0.15 供試体)

写真-5 加熱面の性状
(PE-12-0.0375 供試体)

表-7 爆裂性状のまとめ

項目		Control	PP-3-0.15	PP-12-0.15	PE-12-0.15	PE-12-0.0375
a)爆裂の有無		あり	あり	なし	あり	あり
b)加熱面のひび割れの性状		剥離	剥離	亀甲状	剥離	剥離
c)蒸気圧(爆裂開始時)	MPa	0.16	1.91	—	2.90	0.77
d)内部温度(爆裂開始時)	℃	191	191	—	295	218
e)蒸気圧の最大値	MPa	0.2	3.26	3.39	7.63	3.69
f)剥離深さの最大値	mm	22.0	22.3	—	22.2	21.3

よりも大きく、長さが一番長いものである。加熱により繊維が溶融することにより生成される1本あたりの空隙量が他の3種類に比べて大きい。このため、蒸気圧を緩和するのに十分な空隙が生成されたものと考えられる。

PP-3-0.15は混入質量はPP-12-0.15と同等であるが、繊維1本が溶けることによって形成される空隙量が1/4であるため、十分な蒸気圧緩和効果が得られなかったと考える。PE-12-0.15とPE-12-0.0375はPP-12-0.15に比べ、繊維長は同等であるが、繊維径が1/10であるため繊維1本が溶けることによって形成される空隙量が小さかったことが爆裂を抑制できなかった原因と考えられる。また、既報³⁾より、TG-DTA分析からPE繊維は温度300℃付近から急激な発熱があり、急激なガス化による爆裂への影響が報告されている。この点は、PE-12-0.15の蒸気圧が最大値7.6MPaで他の種類に比べて大きいことに関係していると考ええる。繊維を混入した供試体の最大蒸気圧は、爆裂に有無に関わらず3MPa以上を記録した。

以上のことから、爆裂を抑制するため有機繊維の形状と混入量との組み合わせについての最適解があると考えられるが、今後の検討課題としたい。

また、有機繊維の爆裂抑制対策と蒸気圧に関係について検討してきたが、さらに爆裂の発生条件についても検討を進める必要がある。

4. まとめ

本研究では高温環境下におけるコンクリートの爆裂抑制対策として、有機繊維の混入効果について検討した。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 爆裂を抑制するための有機繊維の形状と混入量との組み合わせについての最適解があると考えられる。
- 2) 長さ12mmのPP繊維を0.15vol%(1.365kg/m³)混入した供試体については爆裂を抑制することができた。
- 3) 繊維を混入した供試体の最大蒸気圧は、爆裂に有無に関わらず3MPa以上を記録した。
- 4) 爆裂を生じた供試体は、蒸気圧発生初期に急激な蒸気の上昇を生じる時期がある。一方、爆裂を生じない供試体は、蒸気圧は上昇するが、その上昇は緩やかであった。

以上、本研究では、有機繊維の爆裂抑制対策と蒸気圧に関係について、検討してきたが、爆裂の発生条件の検討を進める必要がある。

謝辞：本研究を実施するに際し、(株)日本インシュレーション 三摩 博将氏に多大なご協力を頂いた。ここの謝意を表する。併せて、本研究は科学研究補助金 基盤(C)NO.17560406 火災によるコンクリートの爆裂現象

の解明(代表：森本博昭)の補助により実施した。ここに謝意を表する。併せて、(株)テザックの山本基由氏よりPP繊維の提供を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献：

- 1) 土木学会：コンクリート構造物の耐火性技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集、コンクリート技術シリーズNo.63, 2004
- 2) 森田 武：コンクリートの爆裂とその防止対策，コンクリート工学，vol.45, No.9, pp.87-91, 2007.9
- 3) 森田 武，西田 朗，橋田 浩，山崎 庸行：火災時における高強度コンクリート部材の爆裂性状の改善に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集 第544号，pp.171-178, 2001.6
- 4) 長尾 覚博，中根 淳：高強度コンクリートの爆裂制御に関する検討結果，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, No.1, 1997
- 5) 百瀬 晴基，桜本 文敏，宮本 圭一，有田 史絵：耐火性能に優れたFc150N/mm²超高強度コンクリートの開発，鹿島技術研究所年報，第52号，2004.9
- 6) Long T. Phan：High-Strength Concrete at High Temperature: An Overview，Utilization of High Strength/High Performance Concrete，6th International Symposium Proc. Volume 1. June 2002，Leipzig, Germany, König, G. Dehn, F. Faust, T., Edit. pp.501-518, 2002
- 7) 王 若平，川上 寛正，小澤 満津雄，森本 博昭：コンクリートの爆裂現象に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28, No.1, pp.1703-1708, 2006
- 8) 小澤 満津雄，王 若平，坂 昇，森本 博昭：高温加熱によるコンクリートの爆裂現象に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29, No.1, pp.753-758, 2007