

論文 複合有機繊維の混入率が高強度コンクリートの耐火特性に及ぼす影響

韓 千求*1・韓 敏喆*2・李 建哲*3・李 周宣*4

要旨: 本研究では, PP, NY 繊維間の複合有機繊維の混入率変化による高強度コンクリートの耐火性能を分析したものである。その結果, フレッシュコンクリートの特性として流動特性は, すべての試料が目標範囲を満足したが, 繊維の混入率の増加によって若干低下する傾向を示した。硬化コンクリートの特性として 28 日圧縮強度は, 全般に 80MPa 以上であり, 複合有機繊維の割合変化による特別な変化は見られなかった。耐火特性としてプレーン調合の場合激しい爆裂が発生したが, 有機繊維混合の場合は, 爆裂が大きく減少した。また, この性能は, 複合有機繊維を使用することにより顕著に改善された。

キーワード: 高強度コンクリート, 爆裂防止, ポリプロピレン繊維, ナイロン繊維

1. はじめに

最近, 都心地建築構造物は, 高層化・大型化とともに長寿命化の要求が強くなることにより, 高強度コンクリートの需要増加およびその性能が一步発展している。

このように高強度コンクリートは, 部材サイズの縮小, 新しい建築空間の創出, 高耐久性の成就など普通強度コンクリートに比べて多くの利点があり, 現代建築構造物において必要不可欠な材料として認識されてきた。しかし, このような高強度コンクリートの場合は, 火災時高熱を受けると, コンクリート内部の緻密な組織により, 構造体コンクリート内部に拘束応力より大きな水蒸気圧の発生によって爆裂現象が発生するが, 深刻な場合は構造物の破壊にも至る原因になる¹⁾。

このような爆裂を防止する方法としては, PP (ポリプロピレン) 繊維などの有機繊維を混入する方法以外にも, 吹付け耐火被覆, 耐火ボード貼付けおよび非脱型型枠などを利用する方法が報告されている^{2),3)}。

一方, 筆者らは PP(Polypropylene) 繊維と NY(Nylon)繊維を複合使用する場合, 既往の研究で報告されている PP, PVA, NY 繊維を単独に使用した場合より, 優れた耐火性能を発揮することを報告した。

そこで, 本研究では建設工事費を低廉かつ効率的な耐火安定性を確保するために, PP および NY 繊維の複合混入率変化による高強度コンクリートの爆裂特性について検討して, 高性能コンクリートの耐火性向上工法開発に寄与するのを目的とした。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本研究の実験計画を表—1に, コンクリートの調合を表

—2に示す。調合要因として水結合材比(W/B)20%に対して繊維を混入していないものをプレーンコンクリートとし, PP 繊維と NY 繊維の置換率変化を図—1に行った。すなわち, PP 繊維および NY 繊維の混入率を 0~0.075%まで 0.025%ずつそれぞれ 4 水準とし, こ

表—1 実験計画

実験要因		実験水準	
調合事項	W/B(%)	1	20
	目標スランブフロー(mm)	1	600±100
	目標空気量(%)	1	3.0±1.0
	繊維種類および混入率(%)	16	図—1 参考
実験事項	フレッシュコンクリート	2	・スランブフロー ・空気量
	硬化コンクリート	6	・圧縮強度 (3, 7, 28 日) ・引張り強度 (28 日) ・耐火試験 (φ100×200 mm 供試体) - 爆裂有無 - 爆裂等級 - 質量減少率 - 残存圧縮強度率

表—2 コンクリート調合

W/B (%)	s/a (%)	AE/B (%)	SP/B (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	FA	SF	S	G
20	40	0.04	2.75	162	319	162	81	535	839

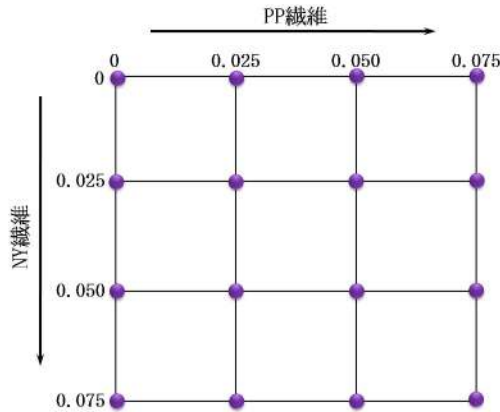
W/B: 水結合材比, AE: AE 剤, SP: 高性能減水剤, FA: フライアッシュ, SF: シリカフューム

*1 韓国清州大学校 建築工学科教授 工博 (正会員)

*2 韓国清州大学校 建築工学科助教授 工博 (正会員)

*3 韓国建資材試験研究院 防水補修補強センター先任研究員 工博 (正会員)

*4 韓国清州大学校 建築工学科大学院生 (正会員)



図—1 複合有機繊維の混入率調査

れを所定の比率で相互複合したものを含めて全部 16 水準とした。また、プレーンコンクリートの目標スランプフローは $600 \pm 100\text{mm}$ 、目標空気量 $3.0 \pm 1.0\%$ を満足するように調合設計し、すべての調合に適用した。

実験事項としてフレッシュコンクリートはスランプフローおよび空気量を測定し、硬化コンクリートは所定の材齢における圧縮強度および引張強度を測定した。また、耐火特性は、28 日標準養生した供試体を用い、各供試体の爆裂有無、爆裂等級、質量減少率および残存圧縮強度率の測定を行った。ここで用いた試験体は、含水率が約 2.8~3.1% 程度の $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 供試体であり、実際部材実験を実施する以前段階での研究である。そのため、本研究では円柱供試体を対象とし、実構造体サイズ条件の模擬試験は、今後この結果を反映して再検討する。

2.2 使用材料

表—3~8 に、本実験に用いた材料の物理・化学的性質を示す。セメントは、韓国産の普通ポルトランドセメントを用いた。骨材として細骨材は、川砂と砕砂を 1:1 比率で混合した混合砂を、粗骨材は、韓国産砕石を用いた。また、混和材料として、フライアッシュは韓国 H 社のものを、シリカフェームはノルウェー産を用いた。高性能減水剤および AE 剤は、韓国 E 社のポリカルボン酸系および陰イオン系のものを用いた。有機繊維として、PP 繊維と NY 繊維は韓国 S 社のものを使用した。写真—1 にその形状を示す。

2.3 試験方法

試験方法としてコンクリートの練混ぜは、強制式 2 軸ミキサーを用いた。また、フレッシュコンクリートのスランプフローおよび空気量試験は、JIS と類似である KS F 2594, 2421 に準じて行い、硬化コンクリートの圧縮強度および残存圧縮強度は、KS F 2405 に準じて行った。

耐火試験は、供試体を種類別分けて床加熱炉内に垂直配置し、ISO 834-1 の標準加熱曲線に準じて 1 時間加熱を実施した。写真—2 に、その加熱炉内部の試験体配置

表—3 セメントの物理的性質

密度 (g/cm^3)	粉末度 (cm^2/g)	安定度 (%)	凝結時間(分)		圧縮強度(MPa)		
			初結	終結	3 日	7 日	28 日
3.15	3,144	0.18	230	375	20.9	28.4	38.9

表—4 骨材の物理的性質

区分	密度 (g/cm^3)	粗粒率 (FM)	吸水率 (%)	単位容 積質量 (kg/m^3)	0.08mm ぶ るい通過率	
					(%)	
細骨材	川砂	2.60	2.21	0.46	1,518	0.30
	砕砂	2.60	3.26	0.46	1,684	0.32
粗骨材	2.65	6.55	0.58	1,564	0.40	

表—5 フライアッシュの物理・化学的性質

密度 (g/cm^3)	粉末度 (cm^2/g)	強熱 減量 (%)	湿粉 (%)	SiO ₂ (%)	活性度 指数 (%)	フロー 値比 (%)
2.20	4,012	2.5	0.0	52.4	97	97

表—6 シリカフェームの物理・化学的性質

密度 (g/cm^3)	粉末度 (cm^2/g)	強熱 減量 (%)	化学的構成(%)				
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
2.20	200,000	1.50	96.40	0.25	0.12	0.38	0.1

表—7 混和剤の物理的性質

区 分	主成分	形状	色彩	密度 (g/cm^3)
高性能 減水剤	ポリカルボン 酸系	液状	暗褐色	1.05
AE 剤	陰イオン系	液状	微白色	1.04

表—8 複合有機繊維の物理的性質

区 分	長さ (mm)	密度 (g/cm^3)	直径 (mm)	引張り強度 (MPa)	融解点 ($^{\circ}\text{C}$)
PP 繊維	19	0.91	0.04	560	160
NY 繊維	12	1.15	0.012	918	225



a) PP 繊維 b) NY 繊維

写真—1 繊維の種類

状況を示す。

ここで、爆裂可否は肉眼で観察調査し、爆裂等級は、式—1 のように質量減少率を基準とし、非爆裂~1/4 は爆裂 1 等級、1/4~2/4 は爆裂 2 等級、2/4~3/4 は爆裂 3 等級、3/4~4/4 は爆裂 4 等級と分類して評価した。また、残存



写真-2 加熱炉内部の試験体配置状況

圧縮強度率は、加熱試験の前後の強度を測定し、百分率として示した。

$$\text{質量減少率} = \frac{W_L}{W_C} \times 100 \quad (1)$$

ここに、 W_L ： 耐火試験後の質量
 W_C ： 耐火試験後の質量

3. コンクリートの基礎特性

3.1 フレッシュコンクリート

図-2 は、NY 繊維混入率別に PP 繊維の混入率変化とスランプフローの関係を示したものである。

まず、プレーン試料の場合、目標スランプフロー600±100mmを満足した。有機繊維の種類および混入率変化によっては、プレーン試料と大きな差はなく、類似な傾向を示したが、PP 繊維0.075%と NY 繊維0.075%を混合した場合は、流動性がプレーンより約 20%低下した。これは、多量の繊維が混入されることにより、ファイバーボールなどの現象が発生し、流動性を低下させたと考えられる。

図-3 は、それぞれの複合有機繊維の混入率と空気量の関係を示したものである。複合有機繊維の混入率変化による空気量は、すべての試料において目標範囲である3.0±1.0%を満足し、全般に複合有機繊維の混入率の増加により空気量は若干増加する傾向も見えるが、明らかな差は見られなかった。

3.2 硬化コンクリート

図-4~6 は、材齢別に複合有機繊維の混入率と圧縮強度の関係を、図-7 は、材齢 28 日の引張強度を示したものである。

繊維を複合使用した場合、材齢 7 日で NY 繊維 0.075%+PP 繊維 0.075%を除外したすべての試料では、明らかな増減傾向は表れなかったが、材齢 28 日では、すべての試料において 80MPa 以上の高強度を発揮した。特に、繊維

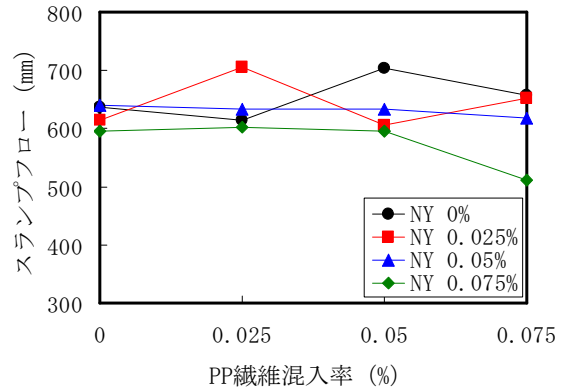


図-2 繊維混合率とスランプフローの関係

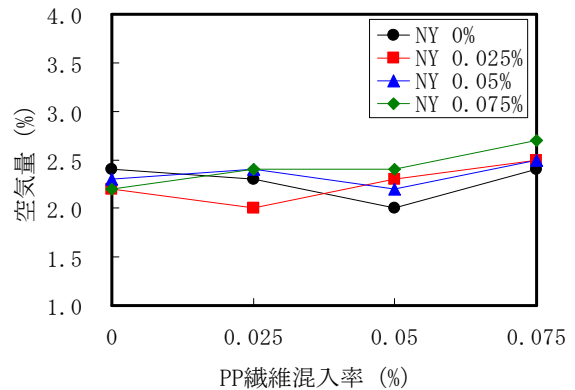


図-3 繊維混合率と空気量の関係

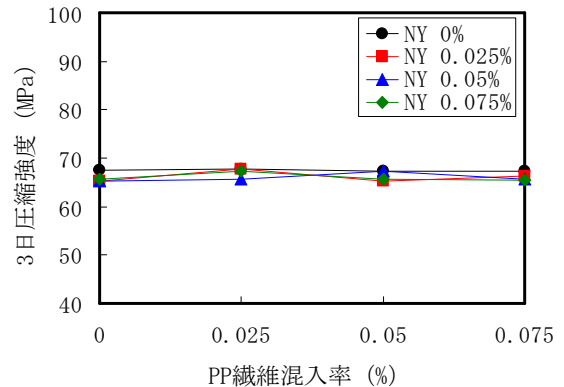


図-4 繊維混合率と3日圧縮強度の関係

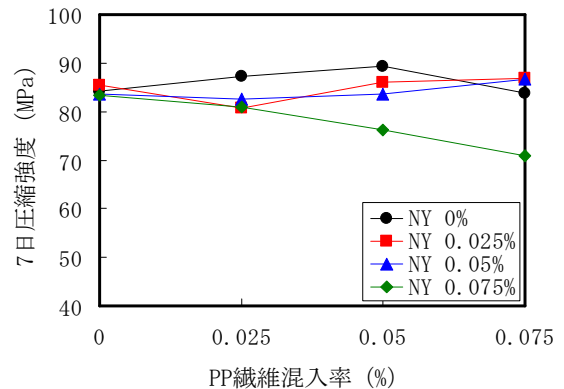


図-5 繊維混合率と7日圧縮強度の関係

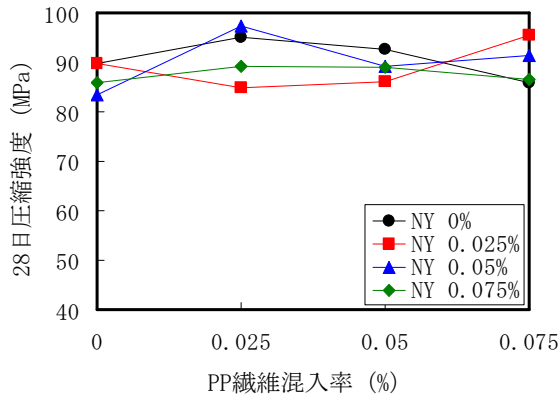


図-6 繊維混合率と28日圧縮強度の関係

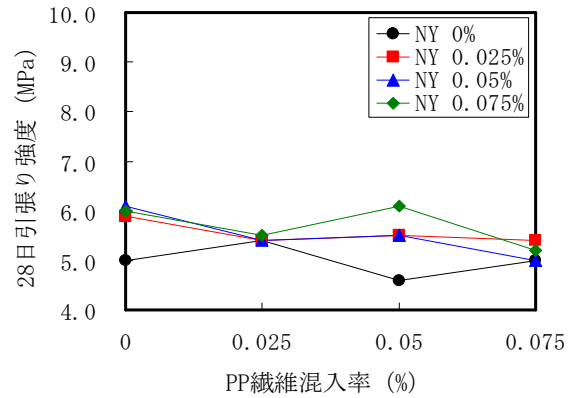


図-7 繊維混合率と28日引張り強度の関係

の混入率が増加するにも関わらず強度が増加しないのは、繊維がコンクリートとの付着強度に影響を及ぼさないためと考えられる。

複合有機繊維の混入率調査による材齢28日の引張強度は、圧縮強度の約5~7%前後であり、繊維の混入率による影響は少ないと判断される。

4. コンクリートの耐火特性

4.1 爆裂性状

写真-3は、1時間の非加力耐火試験後、複合有機繊維の混入率変化による供試体の爆裂性状および爆裂等級を示したものである。また、図-8は、加熱時試験体内部の温度分布を示したものである。

繊維種類		PP 繊維混入率(%)											
		0			0.025			0.050			0.075		
NY 繊維 混 入 率 (%)	0												
	爆裂等級	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0.025												
	爆裂等級	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0.050												
	爆裂等級	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	0.075												
	爆裂等級	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

— 爆裂発生の有無基準
 ⋯⋯⋯ 爆裂が発生しない最小繊維混入率の範囲

写真-3 複合有機繊維の混合率調査変化による爆裂性状および爆裂等級

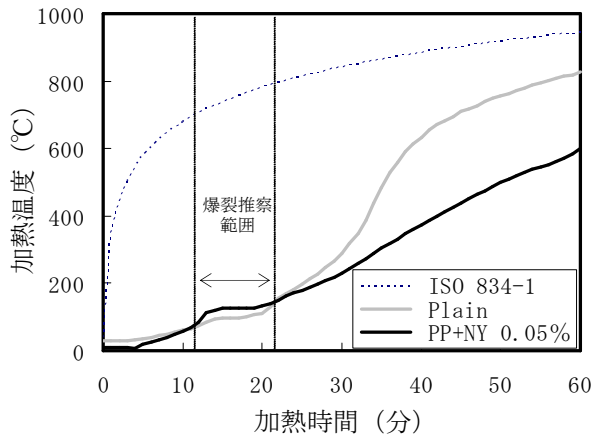


図-8 加熱炉および試験体温度曲線

繊維無混入のプレーンの場合には、急激な高温による内部水蒸気圧の影響により激しい爆裂が発生した。また、PP および NY 繊維をそれぞれ単独に混入する場合、混入率 0.075%以上では表面剥離爆裂の発生は確認されなかった。これは、既往の研究で報告された研究結果である PP 繊維 0.1%を混入する場合には、爆裂の防止に効果的だという研究^{1),2)}に比べて、より少ない量でも爆裂が防止できることを確認した。

特に、PP 繊維 0.025%と NY 繊維 0.025%を同時に混入した配合には、繊維量が 0.05%として 2/3 の量にも関わらず、爆裂が防止できることを確認した。これは、高温加熱の時、繊維の直径および熔融温度の効率的な組合せで水蒸気の排出が容易となり、爆裂現象が防止されたと考えられる¹⁾。

4.2 質量減少率および残存圧縮強度

図-9, 10 は、耐火試験後の複合有機繊維混入率と質量減少率および残存圧縮強度率の関係を、図-11 は、加熱時コンクリート内部の水分移動に関する概念図を示したものである。

まず、質量減少率は、繊維無混入のプレーンの場合、激しい爆裂が発生し、42%程度の質量減少率を示した。また、繊維を単独または複合して 0.025%以上混入した場合は、すべての試料において 7~10%前後の良好な爆裂防止効果を示したが、最小繊維混入率の範囲では PP 繊維 0.025%に NY 繊維を 0.025%混入した場合が最も少ない質量減少率を示した。

プレーン試料の場合、耐火試験後の残存圧縮強度率は、爆裂と内部ひび割れなどの影響により大きく低下し、強度測定が不可能であったが、複合有機繊維の混入により全試料とも 40%以上の比較的良好な爆裂防止効果を示した。特に、PP 0.025%と NY 0.025%の残存強度についてもプレーンに比べて約 50%の強度を発揮することを確認した。

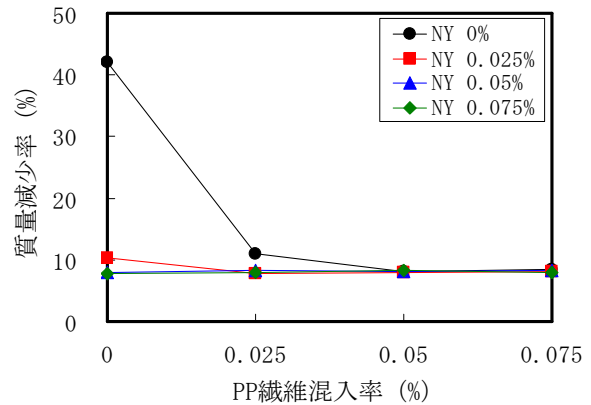


図-9 繊維混合率と質量減少率の関係

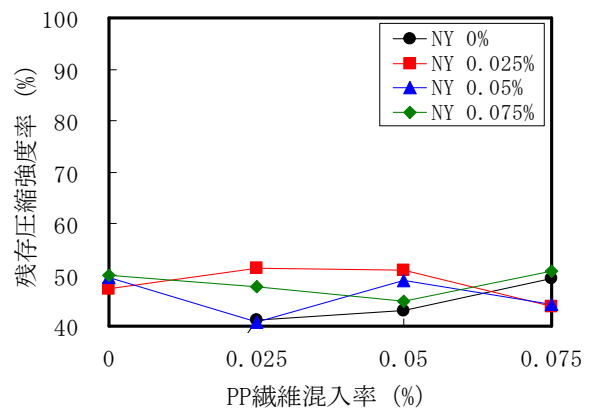


図-10 繊維混合率と残存圧縮強度率の関係

これは、図-11 の概念図から説明できる。まず、a) の PP 繊維を 0.1%使用した場合、広く知られたように、高温環境条件に露出されたコンクリートは、持続的な受熱温度の上昇によって、加熱面から近い領域から内部に繊維が段階的に溶ける。

このとき、繊維が溶けた空隙から水蒸気が外部に放出され、水蒸気圧の緩和により爆裂を防ぐことができる。

一方、b) の NY+PP 繊維を 0.05%使用した場合は、加熱面からまず繊維が太く熔融点(160 °C)が低い PP 繊維が AE 空隙などの大きい空隙の水蒸気圧を緩和させる。その後、PP 繊維に比べて約 22 倍小さい体積と熔融点(220°C)が比較的に高い NY 繊維が順次的に溶けて小さい空隙である毛細管空隙の水蒸気圧を徐々に緩和させ、結局、これが爆裂を防ぐ役割をする。そのため、爆裂防止に効果があると国内外でよく知られている PP 繊維使用量 0.1%より半分である 0.05%だけでも爆裂が防止できると考えられる。

しかし、NY 繊維のみを 0.05%混入した場合、NY+PP 繊維 0.05%混入した場合より爆裂面積が大きくなる。これは、直径が小さい繊維のみを大量含有する場合が直径が大きいものと小さいものが適切に混ぜられているもの

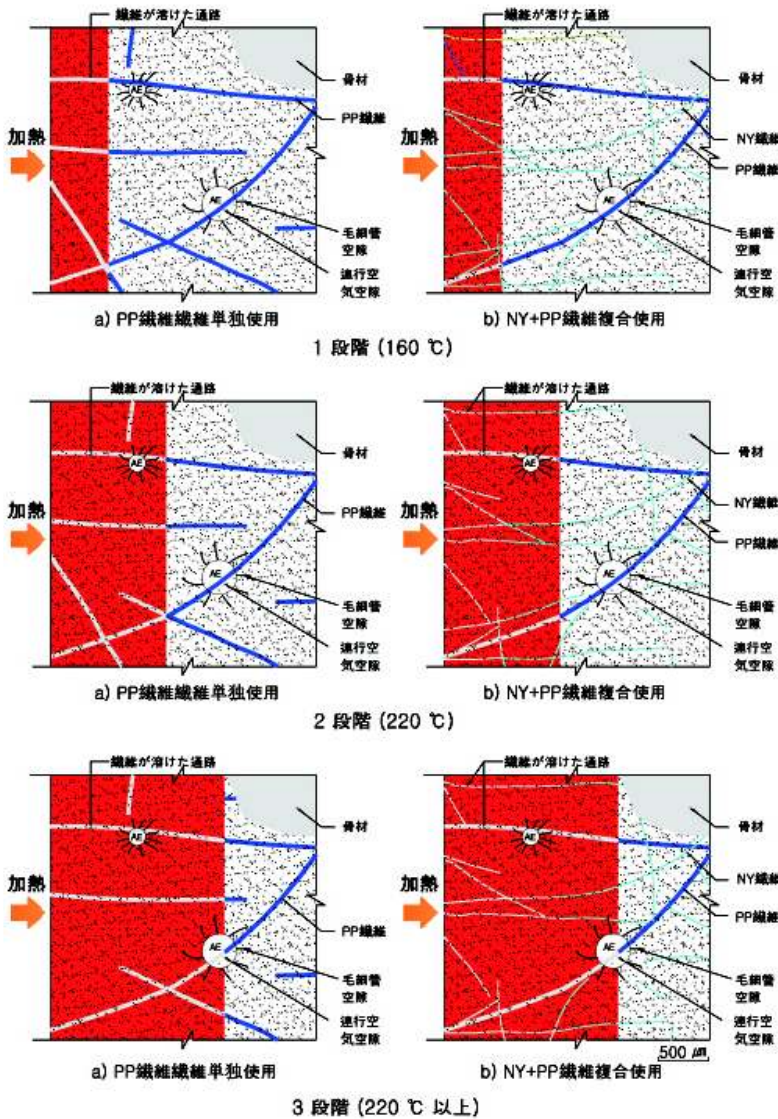


図-11 加熱時のコンクリート内部の水分移動概念図

より水蒸気が排出されにくくなるためと考えられる。

5. まとめ

本研究では PP, NY 繊維の複合混入率変化による高強度コンクリートの耐火性能を分析したもので、その結果を以下に示す。

- 1) フレッシュコンクリートの特性として流動性および空気量は、いずれの試料においても目標範囲を満足したが、繊維の混入率増加によっては、流動性は若干低下する傾向を示した。
- 2) 硬化コンクリートの特性として、材齢 28 日の圧縮強度は、全般に 80MPa 以上の高強度コンクリートの性質を示したが、複合有機繊維の組み合わせによっては明確な傾向は見られなかった。
- 3) 耐火特性として、プレーン調合の場合は、激しい爆裂が発生したが、繊維の混入により爆裂が防止される結果が得られた。PP と NY を単独で使用した場

合は 0.075 % 以上、PP+NY の場合は 0.05 (0.025+0.025) % 以上でも爆裂が防止できることが明らかになった。

4) 耐火試験後の特性として、最小繊維混入率の範囲では PP 繊維 0.025% に NY 繊維 0.025% を混合した場合が質量減少率は最も少なく、残存圧縮強度は最も大きくなった。

総合的に、フレッシュコンクリートの特性、硬化コンクリートの特性および経済性まで考えると、PP 繊維 0.025% と NY 繊維 0.025% の場合が最も効果的な爆裂防止工法であると判断される。

謝辞

本研究は、2006 年度の建設核心技術研究開発事業（韓国国土海洋部）「05-CCT-D11, 高性能・多機能コンクリートの開発および活用技術（Concrete Corea 研究団）」の支援を得た。ここに付記して感謝する。

参考文献

- 1) Han Cheon Goo, Yang Seong Hwan, Han Min Cheol, Song Young Won: Properties of Spalling Resistance of High Strength Concrete Made with Various Aspect Ratios and Fiber Contents of PP and NY Fiber, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.24 no.7, pp.69-76, 2008. 7
- 2) Han Cheon Goo: Concrete with Spalling Resistance, Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol.10 no.6, pp.5-12, 1998. 12
- 3) Journal of the Korea Concrete Institute: Properties of High heated Concrete, Magazine of the Korea Concrete Institute, Vol.14 no.2, 2002. 3
- 4) Han Cheon Goo, Kim Seong Soo, Kim Sang Shik, Jang Ki Hyun: Prevention Spalling of High Performance Concrete Depending on the Length Variation and Contents of NY&PP Fiber, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol.24 no.11, pp.69-76, 2008. 11
- 5) Han Cheon Goo, Hwang Yin Seong, Lee Jea Sam, Kim Kyoung Min: Spalling and Fire Enduring Properties of High Strength RC Column Subjected to Axial Load Depending on Fiber Contents, Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.18 no.1, pp.83-90, 2006.