

論文 繊維の溶融及び気化を考慮した超高強度コンクリートの爆裂特性

李 泰圭 *1・金 圭庸 *2・李 昇勳 *3・金 武漢 *4

要旨： 最近，高強度コンクリートの爆裂を防止するため Polypropylene 繊維を混入して水蒸気圧力を低減する方法が使用される。超高強度コンクリートにおいて急激に温度が上昇する場合，表面辺りで水蒸気の飽和により爆裂が初期に発生するために十分な考慮が必要である。本研究では超高強度コンクリートの内部温度上昇において繊維の溶融及び気化による空隙形成が爆裂に及ぼす影響を評価するために，W/B 12.5%の超高強度コンクリートに対し，繊維溶融点の異なる Polyethylene, Polypropylene と Nylon を 0. 0, 0.15, 0.25 vol% 混入し，爆裂性状，重量損失量，コンクリート内部温度分布による繊維重量損失率を解析的に分析・検討した。

キーワード： 爆裂，超高強度コンクリート，空隙形成，繊維の溶融および気化，繊維重量損失率

1. はじめに

高強度コンクリートの爆裂メカニズム研究¹⁾ではコンクリート構造物の火災安全性能を確保するために爆裂防止として Polypropylene 繊維を混入する方法が使用される。^{2,3,4)}

一方，このような繊維混入による高強度コンクリートの水蒸気圧力を低減するためには図－1に示すように繊維の体積が溶融点から変化するから，溶融点の低い繊維が良いと報告されている。^{2,3)} 超高強度コンクリートにおいて急激に温度が上昇する場合，水蒸気の飽和が表面から近く形成され，コンクリートの熱容量が大きくなるために，十分な繊維の溶融による内部空隙ネットワークを形成することができなくなることもある。⁵⁾

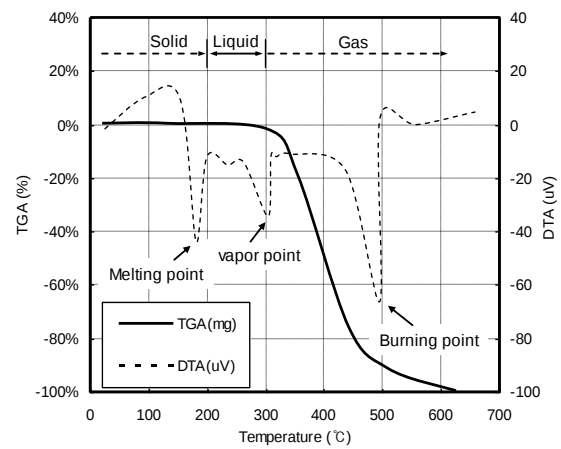
本研究では繊維の溶融および気化が超高強度コンクリートの爆裂特性に及ぼす影響を分析・検討したものである。

2. 実験計画及び方法

2.1 実験計画及びコンクリートの調合

本研究の実験計画及びコンクリートの調合を表－1及び表－2に示す。繊維の溶融と爆裂特性を分析するために超高強度コンクリートの W/B は 12.5%に設定し，スランプフローは 750±100mmの目標値を満たしている。超高強度コンクリートに使用した繊維は溶融点を考慮して Polyethylene, Polypropylene, Nylon とし，繊維混入率は各々0.0, 0.15, 0.25vol%とした。

加熱方法は ISO－834 標準加熱曲線によって 60 分間とし，繊維を混入した超高強度コンクリートの爆裂性状，熱膨張ひずみ，重量損失率，コンクリート内部温度分布による繊維重量損失率などを評価した。



図－1 温度による繊維の状態変化図

表－1 実験計画

W/B (%)	Slump-flow (mm)	繊維種類 ¹⁾	繊維混入率 (vol.%)	加熱方法	試験項目
12.5	750 ± 100	PE PP NY	0 0.15 0.25	ISO-834 標準加熱	爆裂性状 熱膨張ひずみ 重量損失量 繊維重量損失量

1) PE: polyethylene, PP: polypropylene, NY: Nylon

表－2 コンクリートの調合

W/B (%)	S/a (%)	Air (%)	単位重量 (kg/m ³)						
			W	C	BFS	SF	Gy ¹⁾	S	G
12.5	35	2±1	150	660	240	240	60	389	736

1) Gypsum

*1 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)

*2 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 副教授 工博 (正会員)

*3 大韓民国 三星物産(株)建設部門 基盤技術研究所 首席研究員 (正会員)

*4 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 名誉教授 工博 (正会員)

表-3 使用材料の物理的性質

材料	物理的性質
セメント	普通ポルトランドセメント 密度: 3.15g/cm ³ , 比表面積: 3,200cm ² /g
細骨材	海砂(密度: 2.65g/cm ³ , 吸水率: 1.0%)
粗骨材	花崗岩碎石 (最大寸法: 13mm, 密度: 2.7g/cm ³ , 吸水率: 0.9%)
高炉スラグ	密度: 2.97g/cm ³ , 比表面積: 6,000cm ² /g
シリカフェーム	密度: 2.57g/cm ³ , 比表面積: 200,000cm ² /g
石膏	密度: 2.97g/cm ³ , 比表面積: 3,550cm ² /g
ファイバー	PE 直径: 12 μm, 長さ: 12mm 密度: 0.91 g/cm ³ , 融点: 110 °C
	PP 直径: 20,40 μm, 長さ: 12mm 密度: 0.91 g/cm ³ , 融点: 165 °C
	NY 直径: 20,40 μm, 長さ: 12mm 密度: 1.1 g/cm ³ , 融点: 225 °C
混和剤	高性能減水剤 (ポリカルボン酸系)

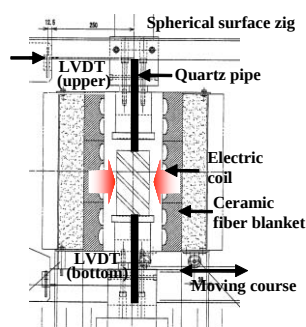


図-2 加熱試験装置全景及び加熱炉詳細図

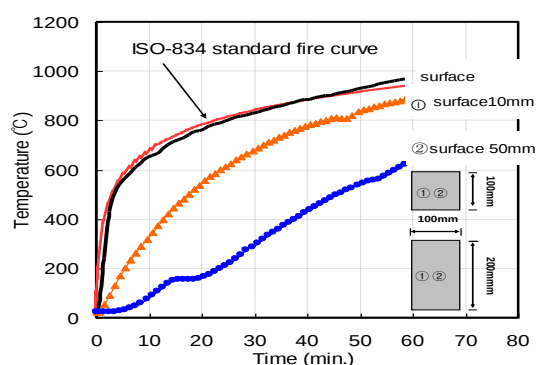


図-3 本研究の加熱曲線とコンクリート内部温度

2.2 使用材料

本研究に使用した材料を表-3 に示す。セメントは比表面積 3,200cm²/g 及び密度 3.15g/cm³ の 1 種普通ポルトランドセメントを用い、細骨材は密度 2.65g/cm³, 吸水率 1.0% の海砂を用いた。粗骨材は密度 2.70g/cm³, 吸水率 0.9% 及び最大寸法 13mm の花崗岩碎石を用い、繊維は

表-4 繊維種類及び混入率による
超高強度コンクリートの爆裂性状

W/B (%)	繊維特性		PE 繊維 (12 μm のみ)	PP 繊維	NY 繊維
	混入率 (vol%)	直径 (μm)			
12.5	0.15	20			
		40			
	0.25	20			
		40			

Polyethylene, Polypropylene, Nylon を用いた。各々の融点は 110°C, 165°C, 225°C で、直径は Polyethylene は 12 μm の 1 種類, Polypropylene と Nylon は各々 20, 40 μm の 2 種類で、長さは 12mm の繊維を使用した。

2.3 試験体の作製及び養生方法

試験体の作製は「KS F 2403 コンクリートの強度試験用試験体作製方法」に準じ、圧縮強度試験では Φ100×200mm の円柱型試験体を用い、爆裂特性を評価するための試験体は □100×200 mm とした。

試験体の養生は作製後約 24 時間で脱型し、7 日間標準水中養生を行なった後、温度 20°C, 60% R.H. の恒温恒湿室内で材齢 56 日間の気乾養生した後加熱試験を行った。

2.4 試験方法

図-2 に荷重及び加熱装置の概要を示す。2000kN 級 UTM 荷重装置に電気加熱炉を設置して、荷重を荷重した状態で試験体の加熱が可能な装置である。コンクリート試験体のひずみは加熱炉上下部を通じて設置した石英管の変化をカンチレバータンク形 LVDT 変位計により測定した。

コンクリート試験体の加熱は試験体を固定するために 0.2 kN 荷重を荷重した状態で図-1 に示すように ISO-834 標準加熱曲線によって 60 分間加熱を行って、爆裂性状と熱膨張ひずみを評価した。また、加熱後 24 時間まで冷却して重量損失率を測定し、式(1)により算出した。

$$\text{重量損失率} = W_{\text{spalling}} / W_{\text{initial}} \quad (1)$$

ここで, W_{spalling} : 爆裂によるコンクリート重量損失量 (g)

W_{initial} : 実験前の試験体重量 (g)

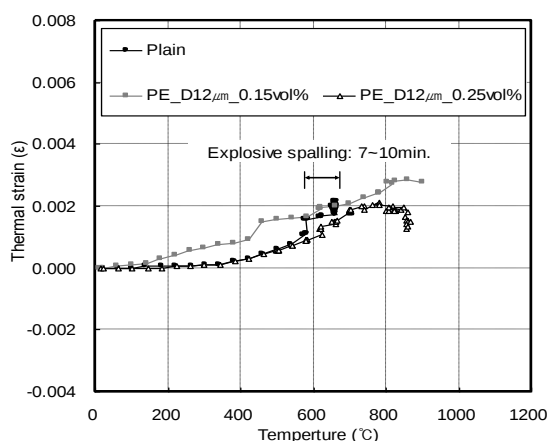
3. 実験結果及び考察

3.1 繊維を混入した超高強度コンクリートの爆裂性状

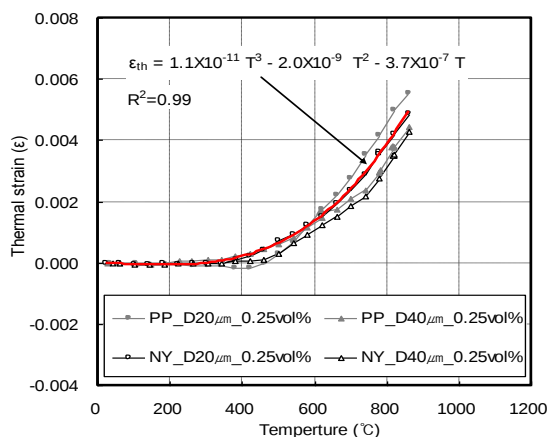
表-4 に 繊維種類及び混入率による超高強度コンクリートの爆裂性状を示す。繊維混入率 0.15vol%を混入した超高強度コンクリートの場合, 全試験体に爆裂が生じている。PP 繊維および Nylon 繊維を混入した場合, PE 繊維に比べて表面爆裂が抑制され形状が維持された。

また, 繊維混入率 0.25vol.%において PE 繊維を混入した超高強度コンクリートの場合, 完全爆裂が生じたが, PP 繊維を混入した超高強度コンクリートは表面爆裂, Nylon 繊維を混入した場合は爆裂がかなり抑制された。

各々の繊維溶融点は PE 繊維 (110℃, 実測値は 157℃)



a) 破壊爆裂が生じた場合



b) 表面爆裂や爆裂が生じない場合

図-4 加熱温度による熱膨張ひずみ

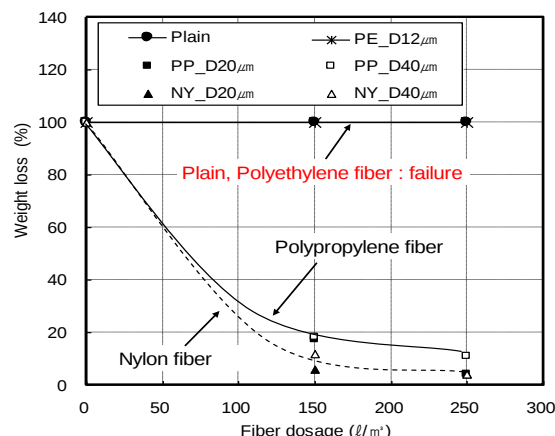


図-5 繊維混入によるコンクリートの重量損失率

<PP 繊維 (165℃, 実測値は 167℃) <Nylon (225℃, 実測値は 220℃) であるが, 超高強度コンクリートに繊維を混入した場合, 同じ混入率においては爆裂が Nylon 繊維コンクリート < PP 繊維コンクリート < PE 繊維コンクリートのように大きく現れた。この結果から超高強度コンクリートの爆裂防止するためには, 溶融点が高い繊維が良い効果を表すとは言えず。したがって, 超高強度コンクリートでは繊維の特性に関して検討が必要である。

3.2 コンクリートの熱膨張ひずみと重量損失率

図-4 に爆裂試験時の加熱温度による熱膨張ひずみを示す。熱膨張ひずみは破壊爆裂が生じた場合と表面爆裂や爆裂が生じない場合の 2 つに分類した。

破壊爆裂が生じた Plain と PE 繊維を混入した超高強度コンクリートの場合において繊維混入率に関わらず加熱温度によって熱膨張ひずみが徐々に増加したが, 7 分から 10 分まで爆裂が発生するとともに急激に熱膨張ひずみが低下し, 800℃以上の温度においては収縮が発生しコンクリート試験体は最終的に破壊した。

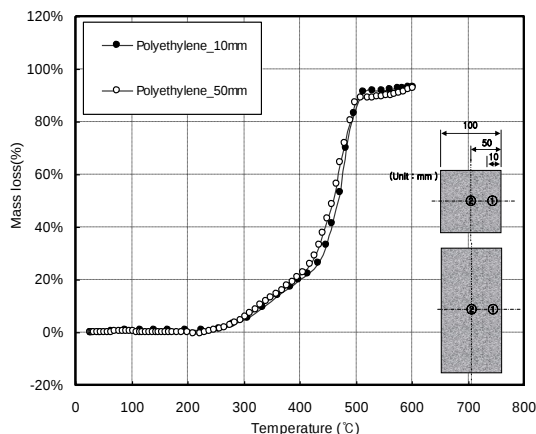
表面爆裂や爆裂が生じない場合, 繊維混入率 0.25vol.% では熱膨張ひずみが 400℃から急激に増加し, 繊維の直径が小さくなるほど熱膨張ひずみは増加する傾向を示す。また, PP 繊維を混入した場合, Nylon 繊維を混入した超高強度コンクリート試験体に比べて熱膨張変形がやや高い傾向を示す。

図-5 に繊維混入によるコンクリートの重量損失率を示す。超高強度コンクリート試験体において 繊維混入率が大きくなるほど爆裂による断面損失量が低下し, 直径が小さい繊維を混入した場合, コンクリートの爆裂防止効果があることを確認した。

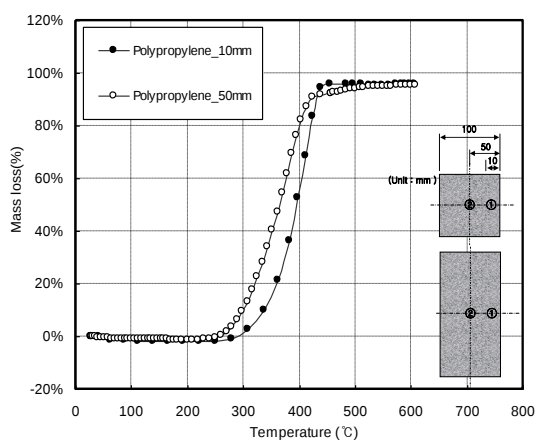
4. 内部温度分布解析による繊維重量損失率

4.1 温度上昇による繊維の溶融および酸化量

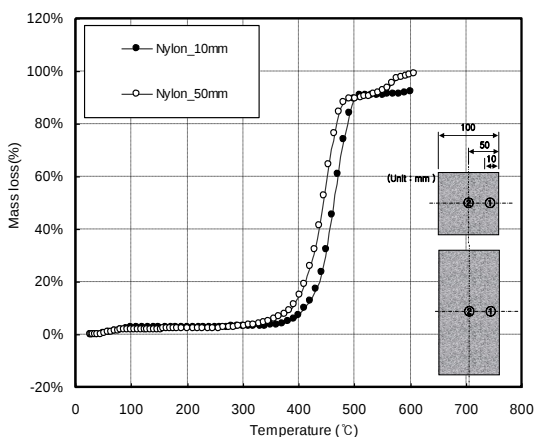
図-6 にコンクリート内部温度による繊維重量損失率



(a) Polyethylene fiber



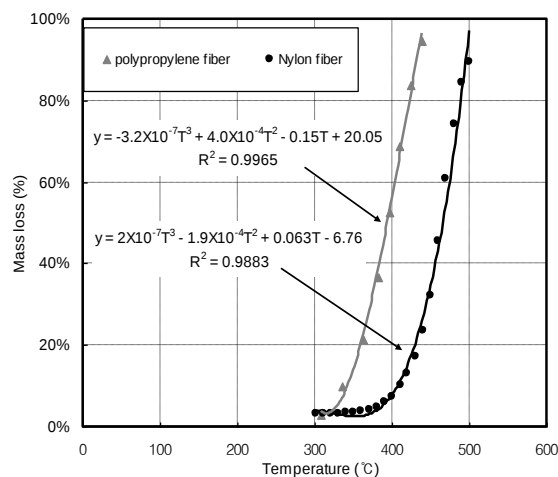
(b) Polypropylene fiber



(c) Nylon fiber

図－6 コンクリート内部温度による繊維重量損失率

TG-DTA)を示す。PE 繊維の場合、熔融点は低い、繊維溶融によって気化する温度は約 255℃であり、PP 繊維(の熔融点と類似な値を示し、空隙形成によるコンクリートの爆裂防止効果は低くなると考えられる。また、PE 繊維と同様な熔融点の PP 繊維は 100℃から～300℃まで



図－7 繊維の溶融と気化によって生じた重量損失率の推定式

重量が増加する。これはコンクリート空隙の閉鎖による爆裂の危険性が高いと考えられる。ただし、PP 繊維の場合は、加熱後約 10 分で急激な気化によって空隙の形成が生じ、初期爆裂以後においては超高強度コンクリートの爆裂防止に十分な効果があると考えられる。

一方 Nylon 繊維の場合、他の繊維より熔融点は高くても、100℃から 300℃までは繊維の重量減少が約 3.0%である。それから初期に発生される空隙による PE 繊維と PP 繊維に比べて超高強度コンクリートの爆裂防止に効果があると考えられる。

これらの結果から超高強度コンクリートの爆裂防止のために、混入した繊維が繊維重量損失率に及ぼす影響は大きいと考えられるが、初期爆裂を低減して、効果的な耐火性能を確保するためには繊維の気化によるコンクリート内部の空隙形成に対し更なる検討が必要である。

そこで、本論文の範囲内における繊維の重量損失量の推定式を式(2)に定義した。なお、繊維の溶融および気化による生じる重量損失率は図－7 に示すように 300℃以後では、繊維種類による係数は表－5 に示す。

$$R_f = a \cdot T^3 + b \cdot T^2 - c \cdot T + d \quad T > 300^\circ\text{C} \quad (2)$$

(ただし、Nylon 繊維は 3%の繊維重量損失率を追加する。)

ここで、 R_f : 繊維の重量損失率(%)

T : 温度(℃)

a, b, c, d : 相関係数

表－5 繊維種類による相関係数

繊維の種類	a	b	c	d
Polypropylene	-3.2×10^{-7}	4.0×10^{-4}	-0.15	20.05
Nylon	2×10^{-7}	-1.9×10^{-4}	0.063	-6.76

4.2 コンクリートの内部温度分布及び繊維重量損失率

図-8 にコンクリート試験体の解析モデルを示す。解析は外部熱源の影響による非線形温度分布解析(Nonlinear transient heat flow analysis)を行った。

コンクリート試験体の熱伝達解析には有限要素解析プログラム Midas FEA を用いた。コンクリート材料の熱特性値は EN 1992-1-2:2004(E)⁶⁾に準じ、式(3)、(4)により算出した。

$$C_p(T) = 900 \text{ (J/kg} \cdot \text{T)} \quad 20^\circ\text{C} \leq T \leq 100^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$C_p(T) = 900 + (T-100) \text{ (J/kg} \cdot \text{T)} \quad 100^\circ\text{C} < T \leq 200^\circ\text{C}$$

$$C_p(T) = 900 + (T-200)/2 \text{ (J/kg} \cdot \text{T)} \quad 200^\circ\text{C} < T \leq 400^\circ\text{C}$$

$$C_p(T) = 1100 \text{ (J/kg} \cdot \text{T)} \quad 400^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}$$

$$\lambda_c = 2 - 0.2451 (T/100) + 0.0107 (T/100)^2 \quad (4)$$

ここで, C_p : 比熱(J/kg・℃)

λ_c : 熱伝導率 (W/m・℃)

T : 温度 (℃)

図-9 にコンクリート内部のセンサーを用いて測定した実験値と温度履歴の解析値の比較結果を示す。解析結果は実験値との差がややあるが、超高強度コンクリートの爆裂が発生される 5 分から 30 分までの温度分布解析による繊維損失率の計算に及ぼす影響は小さいと考えられる。加熱時の温度分布による繊維の重量損失率の算定のために、次のように仮定した。

- ① 加熱による実際のコンクリート試験体の内部温度分布は解析条件と同じである。
- ② 繊維は試験体内部で均等に分布する。
- ③ 繊維の重量損失率は式(1)により計算する。

図-10 に表面からの距離による温度面積の計算方法を示す。面積率の計算は 0～10mm, 10～30mm, 30～50mm の 3 領域にして、全体面積に対し各々 36%, 48%, 16% である。また、繊維の分散も均等分布と仮定してコンクリートの面積率とした。

表面からの距離による温度分布は爆裂発生時間として 5, 10, 15, 20, 30 分とした。また、温度範囲は繊維の熔融点を考慮して 300℃以下, 300℃～400℃, 400℃～500℃, 500℃以上の 4 水準に分類した。

図-11 に加熱時間による温度分布面積率を示し、各々のコンクリート内部領域において繊維の重量損失率は式(5)により計算した。

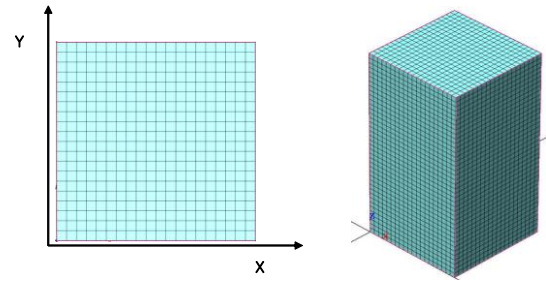


図-8 コンクリート試験体のモデル概要

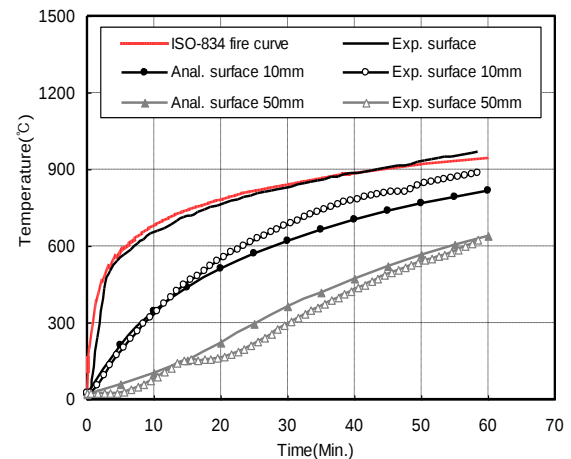


図-9 実験値と温度解析値の比較

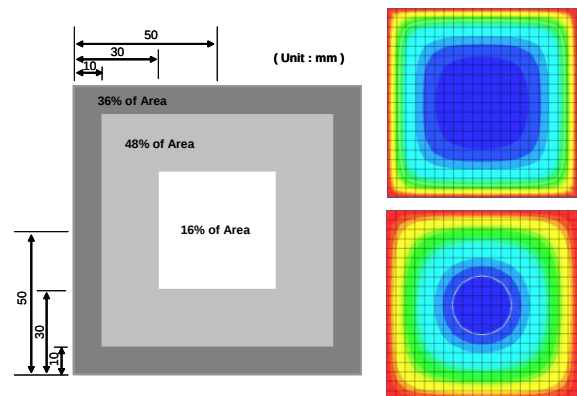


図-10 表面から距離による温度面積の計算方法

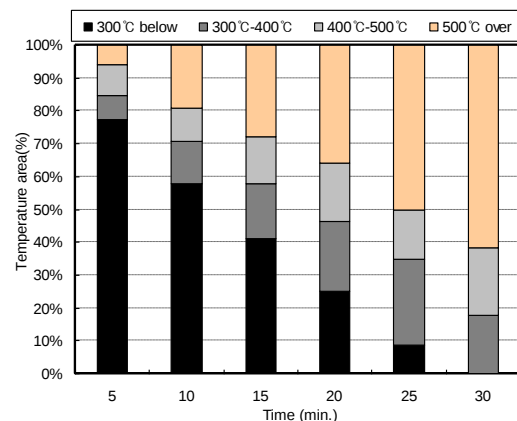
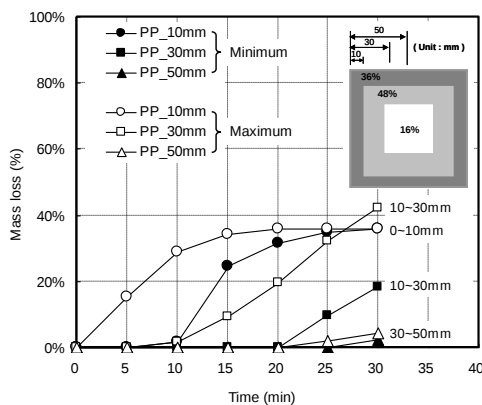


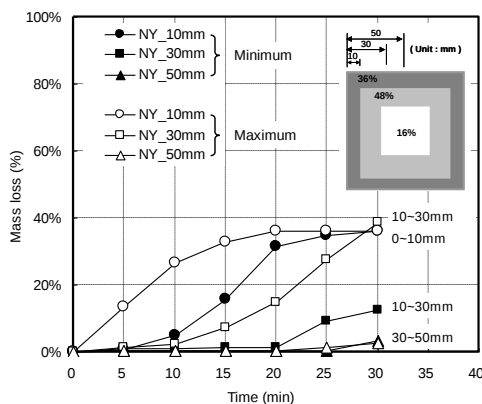
図-11 加熱時間による温度分布面積率

$$R_p = F_r \times A_r \times F_m \times (A_{300-400} + A_{400-500} + A_{500}) \quad (5)$$

ここで, R_p :設定領域の繊維重量損失率(%)
 F_r :全ての繊維混入率(%)
 A_r :設定領域の面積率(%)
 F_m :温度による繊維重量損失率(%)
 $A_{300-400}$:300～400℃の面積率(%)
 $A_{400-500}$:400℃～500℃の面積率(%)
 A_{500} :500℃以上の面積率(%)



a) Polypropylene 繊維の重量損失率



b) Nylon 繊維の重量損失率

図-12 加熱時の繊維種類による
コンクリート内部領域の繊維重量損失率

図-12 に加熱時の繊維種類によるコンクリート内部領域の繊維重量損失率を示す。繊維重量損失率の最小値を考慮した場合、表面から 10mm までは Nylon 繊維を混入したコンクリート試験体は PP 繊維を混入したコンクリート試験体に比べ、初期 5 分から 10 分までに繊維の繊維重量損失率が大きく、その値は全体繊維量の 5～25%であると考えられる。

また、繊維重量損失率の最大値を考慮した場合、10 分から 20 分までは PP 繊維を混入したコンクリート試験体に比べて小さいが、20 分以後には類似な傾向を示す。

繊維混入率が大きくなるほど表面から 10mm までの領域における繊維重量損失率が高く上昇し、全体繊維損失率は 30 分以後に繊維の気化によって約 60%の空隙が形成され、水蒸気圧力の低減が十分にできると考えられる。

5. まとめ

繊維の熔融及び気化を考慮した超高強度コンクリートの爆裂特性に関する研究結果は次の通りである。

(1) 繊維熔融点による超高強度コンクリートの爆裂性状を評価した結果、熔融点が高い繊維を混入した場合でも初期に爆裂が発生する。

(2) 有機繊維の熔融及び気化による空隙形成において、PE 繊維および PP 繊維の場合、熔融点は低い繊維の気化点が高く、Nylon 繊維の場合、熔融点は高いが 100℃から 300℃の間に全体繊維量の約 3%程度が初期に損失して爆裂を防止する効果が大きいと判断される。

(3) コンクリート内部温度分布解析 による内部領域の繊維重量損失率は繊維混入率が大きくなるほど表面から 10mm までの領域では繊維重量損失率が高くなり、空隙形成が急激に上昇された。

謝辞

本研究は国土海洋部(09 先端都市事業 A01), および 2010 年度韓国政府(教育科学技術部)の財源による韓国研究財団の支援を受けて遂行された研究(NRF-2010-0014723)であり,研究者の一部は BK (Brain Korea) 21-2 段階事業の支援を受けました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) KD.Hertz: Limits of spalling of fire-exposed concrete, Fire Safety Journal, Vol. 38, pp. 103～116, 2003
- 2) T. Atkinson, "Polypropylene fibres control explosive spalling in high-performance concrete," CONCRETE Vol. 38, No. 10, 2004, pp. 69～70
- 3) Kalifa P and Menneteau FD and Quenard D.: Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research, Vol. 30, pp. 1915～1927, 2000
- 4) Matthias Zeiml and David Leithner and Roman Lacker and Herbert : How to polypropylene fibers improve the spalling behavior of in-situ concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp. 929～942, 2006
- 5) 金圭庸, 宮内 博之, 李泰圭: 中心軸荷重を受ける超高強度コンクリート柱部材の耐火性能評価, 日本建築學會大會學術講演梗概集, A-2, pp. 7-8, 2011
- 6) Comite Europeen de Normalisation (CEN): Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-2: Structural Fire Design, CEN/TC 250/SC 2, pp. 59～62, 1993