

# 論文 非晶質鋼繊維を混入した超高強度コンクリートの爆裂特性

南 正樹\*1・金 圭庸\*2・崔 景喆\*3・金 武漢\*4

**要旨**：本研究では、0.3 及び 0.5vol.%混入率の範囲である非晶質鋼繊維の補強がポリプロピレン繊維を 0.15vol.%混入した超高強度コンクリートの爆裂特性に及ぼす影響について検討した。圧縮強度及び非晶質鋼繊維の混入率を変数とし、ISO-834 加熱曲線に準じてコンクリート試験体の爆裂特性を評価した。その結果、超高強度コンクリートの爆裂制御には溶融されたポリプロピレン繊維が形成する空隙ネットワークによる水蒸気移動の効果が大きく作用することが分かった。また、0.3vol.%までは非晶質鋼繊維が試験体の爆裂制御に及ぼす影響は少なかったが、0.5vol.%の繊維混入率では水蒸気移動空隙ネットワークの形成が抑制された。

**キーワード**：ポリプロピレン繊維, 非晶質鋼繊維, 超高強度コンクリート, 爆裂特性, 水蒸気圧力

## 1. はじめに

コンクリートは優れた力学性能、耐久性及び経済性を持っていることから、今まで建設産業分野で代表的な構造材料として利用されている。現代の建設産業では構造物の高層化及び大型化が要求されているため、超高強度コンクリートのように高性能の建設材料が適用されている。超高強度コンクリートは所要の圧縮強度を発現するために、非常に低い水結合材比の調合を用いるのが一般的であり、普通強度のコンクリートに比べて機械的な強度と耐久性が高くなる。しかし、超高強度コンクリートは火災のように高温環境下では、爆裂現象の発生が欠点となる。

爆裂は高温環境下でのコンクリート内部に存在する水蒸気圧力と熱応力によって、コンクリートの母体からマトリックスの一部が剥離する現象である。このようなコンクリートの爆裂を予測するのは非常に難しく、爆裂は脆性的に生じる特徴がある。鉄筋コンクリート造構造物で爆裂が発生すると、鉄筋が高温に直接に露出され急激な剛性の低下や設計断面の減少による構造耐力の低下が起こる。このような問題の原因であるコンクリートの爆裂を制御するために、ポリプロピレン繊維などの有機系の繊維を超高強度コンクリートに混入して混入繊維の溶融点以上の高温では、コンクリート内部に連続空隙が形成される特性に基づく水蒸気圧力を低減させる方法を使用している。

一方、コンクリートの曲げ引張性能を改善させるために開発された繊維補強コンクリートの場合、繊維の物性、繊維とマトリックスとの付着性能及びマトリックスの強度によって曲げ引張性能が異なる。特に、鋼繊維補強コンクリートは高温環境下において曲げ引張性能と共

に爆裂制御にも効果があると報告されている。Peng らの研究では鋼繊維と有機繊維を混入するとコンクリートの破壊エネルギーが増加し、この結果は高温環境下でのコンクリートの爆裂を低減させることが出来ると報告している<sup>1)</sup>。なお、Ding の研究では鋼繊維とポリプロピレン繊維を混入したコンクリートにおける高温環境下で生じた鋼繊維の周辺の界面転移区域 (Interfacial Transition Zone) から発生したひび割れによって水蒸気圧力の排出が出来るが、爆裂低減のための空隙ネットワークの形成にはポリプロピレン繊維の影響が高いと報告している<sup>2)</sup>。

最近、繊維補強コンクリートの分野においてフック型鋼繊維を混入したコンクリートだけではなく、フック型鋼繊維より引張強度が高く比重が低い非晶質鋼繊維を用いた研究が進んでいる<sup>3)</sup>。建設材料として活用するために力学特性を中心に非晶質鋼繊維補強コンクリートが検討されているが、超高強度コンクリートで必須的に検討しなければならない爆裂特性に関する研究はまだ少ない。そこで、本研究はポリプロピレン繊維を混入した超高強度コンクリートに対して高温環境下での爆裂特性、質量減少率及び内部水蒸気圧力に非晶質鋼繊維が及ぼす影響について実験的に検討・評価したものである。

## 2. 実験計画及び方法

### 2.1 実験計画

表-1 に本研究の実験計画を示す。試験体は超高強度コンクリートの圧縮強度及び非晶質鋼繊維の混入率に分類し、6 水準とした。圧縮強度の場合、設計圧縮強度 100 及び 150MPa とし、全ての試験体には 0.15vol.%のボ

\*1 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 助教授 博(工) (正会員)

\*2 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 博(工) (正会員)

\*3 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 博士研究員 博(工) (正会員)

\*4 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 名誉教授 博(工) (正会員)

表-1 実験計画

実験要因及び水準					試験体の含水率 (%)	評価項目
試験体種類*	混入繊維の種類	繊維混入率 $V_f$ (%)		設計圧縮強度 $f_c$ (MPa)		
		ポリプロピレン	非晶質鋼繊維			
100-0.0	ポリプロピレン	0.15	0.0	100	2.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>爆裂外観形状</li> <li>質量減少率(%)</li> <li>爆裂発生時間(分)</li> <li>爆裂破片寸法(mm)</li> <li>残存圧縮荷重(kN)</li> <li>水蒸気圧力(kPa)</li> </ul>
100-0.3	ポリプロピレン	0.15	0.3	100	2.6	
100-0.5	+非晶質鋼繊維	0.15	0.5	100	2.7	
150-0.0	ポリプロピレン	0.15	0.0	150	2.8	
150-0.3	ポリプロピレン	0.15	0.3	150	2.6	
150-0.5	+非晶質鋼繊維	0.15	0.5	150	2.6	

\* 設計圧縮強度-非晶質鋼繊維の混入率

表-2 試験体の調合

試験体種類	W/B	S/a (%)	単位量* (kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	SF	BFS	石膏	S	G
100-0.0	0.19	45	160	589	126	126	-	617	740
100-0.3									
100-0.5									
150-0.0	0.15	45	160	693	160	160	53	513	615
150-0.3									
150-0.5									

\* SF: シリカフェーム, BFS: 高炉スラグ微粉末

表-3 加熱前の試験体の圧縮強度及び曲げ強度

試験体の種類	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)
100-0.0	100.71	7.66
100-0.3	101.85	9.37
100-0.5	103.59	12.33
150-0.0	151.71	8.47
150-0.3	151.97	11.70
150-0.5	152.46	14.37



図-1 混入繊維の形状及び物性

ポリプロピレン繊維が混入された。また、非晶質鋼繊維は2水準の圧縮強度によって各々0.0, 0.3及び0.5vol.%を混入した。一方、爆裂特性を検討するためにISO-834標準加熱曲線を用いて試験体を加熱した後、爆裂発生の有無、爆裂外観形状、爆裂発生時間、質量減少率、爆裂破片寸法及び残存圧縮荷重を測定した。また、加熱中には超高強度コンクリート試験体の内部で形成される水蒸気圧力を測定した。

## 2.2 試験体

本研究では3つの形態の試験体を作製した。圧縮強度、爆裂特性及び含水率を測定するためにφ100×200mmの円柱形の試験体を作製し、水蒸気圧力を測定するためには100×100×200mmの角柱試験体を用いた。また、曲げ強度を測定するための試験体は、100×100×400mmの角柱試験体を作製した。

表-2に超高強度コンクリートの調合を示す。セメントはASTM Type I (密度:3.15g/cm<sup>3</sup>, 比表面積:3,200cm<sup>2</sup>/g)

の普通ポルトランドセメントをした。また、高炉スラグ微粉末(密度:2.50g/cm<sup>3</sup>, 比表面積:6,000cm<sup>2</sup>/g), 石膏(密度:2.90g/cm<sup>3</sup>, 比表面積:3,550cm<sup>2</sup>/g)及びシリカフェーム(密度:2.50g/cm<sup>3</sup>, 比表面積:200,000cm<sup>2</sup>/g)は混和材として用いた。一方、粗骨材は表乾密度2.70g/cm<sup>3</sup>, 吸水率0.9%, 最大寸法20mmの花崗岩砕石を使用し、細骨材には密度2.65g/cm<sup>3</sup>, 吸水率1.0%, 粗粒率2.6の川砂を採用した。

なお、図-1に超高強度コンクリート試験体に混入した繊維の形状及び物性を示す。ポリプロピレン繊維は長さ15mm, 直径20μm, 見掛け密度0.91g/cm<sup>3</sup>及び溶融点170℃であり、非晶質鋼繊維は長さ30mm, 幅1.6mm, 厚さ20μm, 見掛け密度7.2g/cm<sup>3</sup>及び引張強度1,400MPaのものを用いた。

超高強度コンクリート試験体は材齢28日まで温度20±2℃の条件で水中養生した後、温度20±2℃及び相対湿度60±5%の恒温恒湿室で300日間養生された。試験体の含水率はRilem committee TC 129から提示している方法を用いて測定した。試験体を105℃の乾燥装置で質量変化が生じない時の値を試験体の乾燥質量とし、式(1)によって含水率を求めた。本研究で用いた試験体の含水率は2.6~2.8%の範囲となり、ほぼ同等の状態であった。

$$W_{moisture} = \frac{W_{initial} - W_{dry}}{W_{initial}} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 $W_{moisture}$ : 含水率(%),

$W_{initial}$ : 乾燥前の試験体質量(g),

$W_{dry}$ : 乾燥後の試験体の質量(g)

高温環境下での超高強度コンクリートの爆裂特性評価に用いた試験体の加熱前の圧縮強度及び曲げ強度を表-3に示す。圧縮及び曲げ試験は ASTM C39「Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens」及び ASTM C 1609「Standard Test Method for Flexural Performance of Fiber-Reinforced concrete(Using Beam with Third-Point Loading)」に準じて行った。圧縮強度の場合、全ての試験体が目標とする設計強度の範囲であることが認められた。また、非晶質鋼繊維の混入率が增加するほど試験体の曲げ強度が向上することが分かった。

### 2.3 実験方法

図-2に超高強度コンクリートの加熱方法を示す。試験体の加熱には ISO-834 標準加熱曲線を採用し、50分間 900℃まで試験体の加熱を行った。ISO-834 標準加熱方法は火災状況を想定しているため、非常に速い速度で試験体を加熱することから加熱される試験体の内部温度分布は測定深さによって不均等になる。加熱装置はステンレスボックスの形態であり、加熱中には試験体の状況を観察することが難しい。しかし、コンクリート試験体が爆裂する時に、その状況によって特定の音が生じると報告されている。従って、加熱試験中には試験体に爆裂が生じる間に現れる音から試験体の爆裂時点を推定し、加熱試験が終了された後に試験体の爆裂発生状況を観察した。

なお、加熱試験による試験体の質量減少率は、加熱前後に測定した試験体の質量を用いて式(2)に準じて計算し、その値に基づく爆裂によって損失された試験体の量を推定した。

$$W_{loss} = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

ここで、 $W_{loss}$ ：質量減少率(%),

$W_1$ ：加熱前の試験体の質量(g),

$W_2$ ：加熱後の試験体の質量(g)

また、爆裂によって試験体から剥離した破片の寸法は、コンクリート用の骨材の粒度評価に用いる金属篩によって 0.6mm 以下, 0.6mm~1.25mm, 1.25mm~2.5mm, 2.5mm~5mm, 5mm~10mm, 10mm 以上の 6つのレベルと分類した。

図-3に本研究で用いた試験体の水蒸気圧力の測定方法を示す。コンクリートを打設する前に試験体のモールドの表面から 10mm 及び 30mm の深さに金属パイプを設置して試験体を作製し、加熱試験中にパイプから排出される水蒸気圧力は加熱コイルが巻いている圧力センサーを用いて測定した。水蒸気圧力の測定に採用した金属パイプの材質は SUS304 であり、内径 1mm, 外径 2mm のものを用いた。また、コンクリート試験体から引抜き

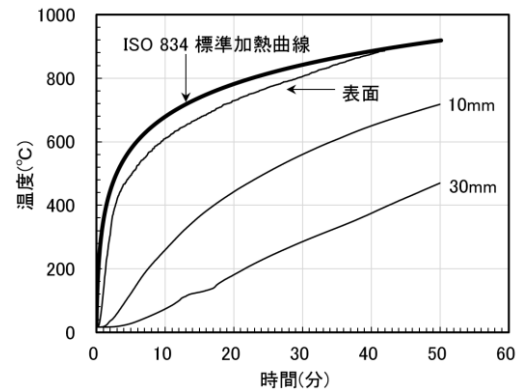


図-2 試験体の加熱方法

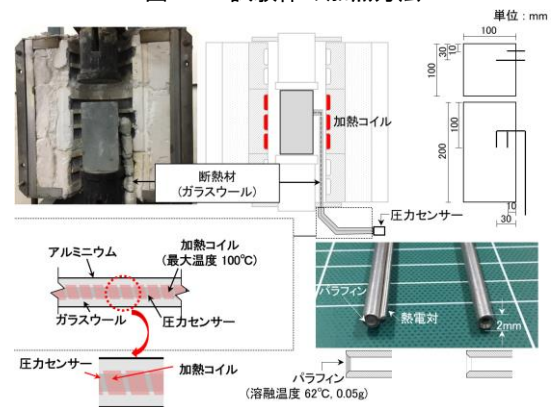


図-3 試験体の水蒸気圧力の測定方法

れることを防止するために、コンクリート試験体に埋立てる部分のパイプを 90° に屈曲させて作製した。一方、フレッシュコンクリートの骨材やセメントペーストがパイプに入ることを防止するために、パイプの入口をパラフィンを用いて閉じた。ここで使用したパラフィンの融点は 62℃であり、水蒸気圧力が生じる加熱温度の以前にパラフィンが溶融し、水蒸気の排出には影響しないように実験を行った。

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 爆裂特性

図-4に ISO-834 標準加熱試験方法によって評価した超高強度コンクリート試験体の加熱後の表面状況を示す。爆裂が抑制された 100-00 及び 100-0.3 試験体には、表面の変色や部分的にひび割れが見えた。また、爆裂が生じた試験体は表面からコンクリートが剥離し、内部のコンクリートマトリックスが露出された。一般的に超高強度コンクリートの爆裂は、発生形態によって大量のエネルギー放出と共に試験体の一部が大きく破壊される爆発的な爆裂と試験体の表面が小さい規模で継続的に損失される段階的な爆裂に区分できる。加熱後に残った試験体の形状及び剥離した破片の形態から、本研究の範囲で検討した試験体の爆裂は段階的に発生したと判断される。

また、非晶質鋼繊維を混入した試験体の場合、非晶質

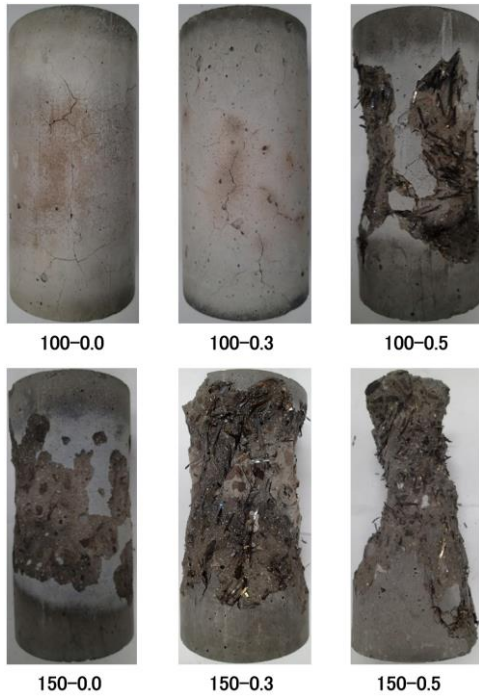


図-4 試験体の加熱後の表面状況

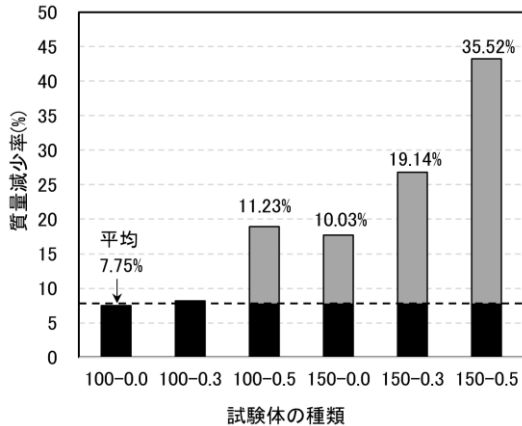


図-5 加熱試験前後の試験体の質量減少率

鋼繊維の混入率が増加するほど爆裂程度が著しくなった。これは非晶質鋼繊維がポリプロピレン繊維の溶融によって形成される空隙ネットワークの発生を抑制したためと判断される。

一方、本研究で設定したポリプロピレン繊維の混入率 0.15vol.%の場合、100MPaの超高強度コンクリートの爆裂に対する防止には効果があったが、150MPaの超高強度コンクリートの爆裂を制御することは出来なかった。ポリプロピレン繊維によって150MPaの超高強度コンクリートの爆裂を制御するためには、本研究の範囲で検討した 0.15vol.%以上のポリプロピレン繊維の混入率を考慮すべきだと考えられる。

図-5 に加熱試験前後の試験体の質量減少率を示す。爆裂が生じなかった試験体でも約7~8%の質量減少率が測定された。これは、コンクリートの含水率(約3%)より4~5%程度多いものの、爆裂によって剥離したコンクリートからの質量減少率ではなく、試験体の内部に様々

表-4 加熱中に爆裂と予想される音が出た時間

試験体の種類	爆裂発生時間(分)	爆裂終了時間(分)	爆裂持続時間(分)
100-0.0	爆裂なし	爆裂なし	爆裂なし
100-0.3	爆裂なし	爆裂なし	爆裂なし
100-0.5	10.12	23.33	13.21
150-0.0	8.70	19.53	10.83
150-0.3	7.33	18.33	11.17
150-0.5	7.17	22.08	14.75

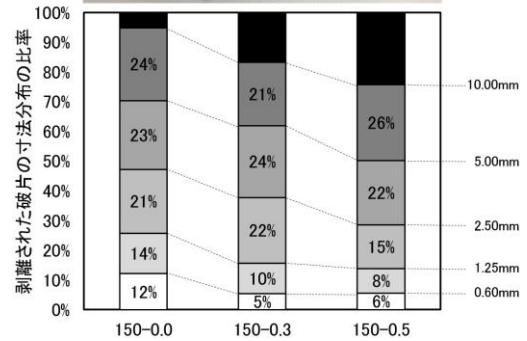
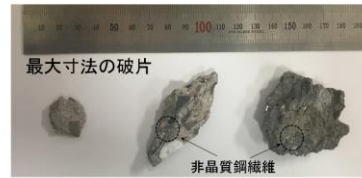


図-6 爆裂破片の大きさ別分布及び最大の破片形態

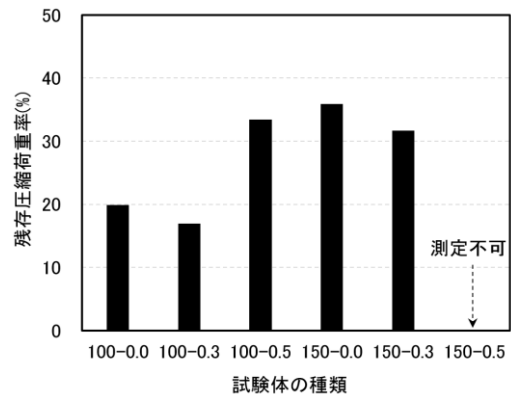


図-7 加熱試験後の残存圧縮荷重率

な形で存在(自由水、結合水など)する水分の蒸発による質量の減少であると考えられる。そこで、爆裂による試験体の質量減少率は、爆裂が発生していない試験体の質量減少率(平均7.75%)を考慮して推定した。特に、設計圧縮強度150MPaの試験体において、試験体の爆裂を制御することができるポリプロピレン繊維が混入されなかったため、非晶質鋼繊維の混入量が多いほど爆裂によって剥離したコンクリートの量が増加することが分かった。

表-4 に加熱中の試験体に爆裂が生じたと予想される音が出た時間を示す。その結果、爆裂が発生した試験体における最初の爆裂と推定される音は、加熱開始から約7~10分が経過した時点で観測された。最初の爆裂の以後に数回の音が観測されて、この現象は約10~15分ま

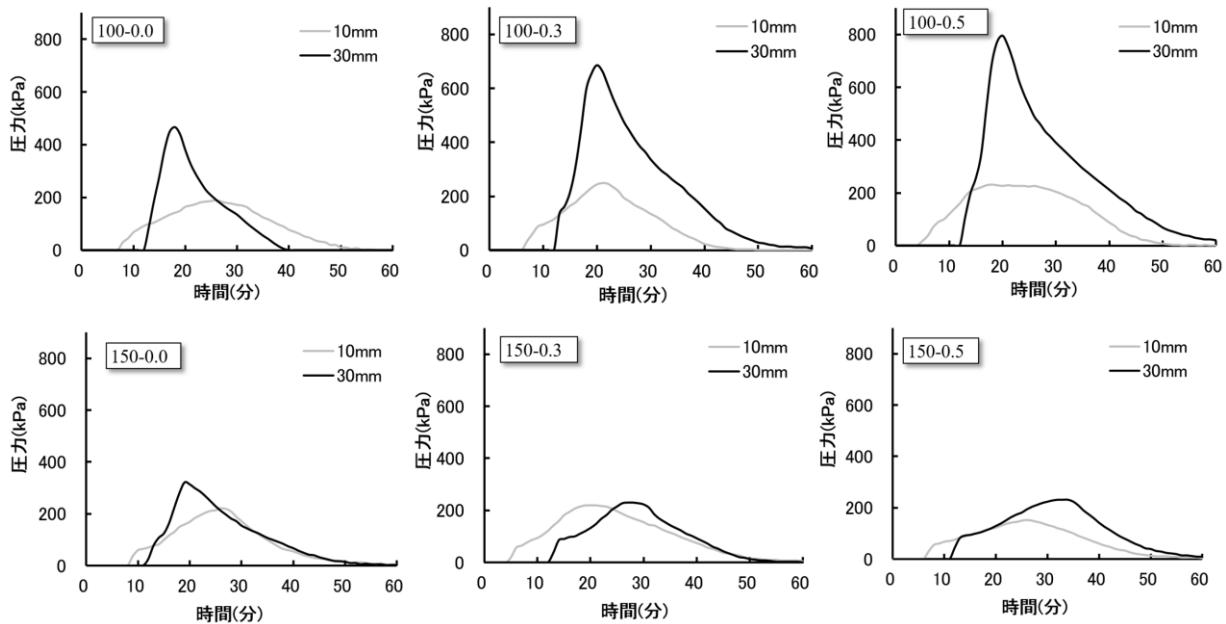


図-8 試験体内部の水蒸気圧力と時間との関係曲線

で持続的に現れた。最初の爆裂が発生する時間は試験体の圧縮強度が増加するほど、非晶質鋼繊維の混入率が増加するほど速くなるのが分かった。

図-6 に全ての水準で爆裂が生じた圧縮強度 150MPa 級の試験体において、爆裂によって剥離したコンクリート破片の大きさ別分布及び最大寸法の破片形態を示す。非晶質鋼繊維を混入しなかった 150-0.0 試験体では 5mm を超える破片の比率が約 30%以下となったが、非晶質鋼繊維を各々 0.3vol.%及び 0.5vol.%混入した 150-0.3 試験体と 150-0.5 試験体では、5mm を超える破片の比率が約 40～50%となった。非晶質鋼繊維を混入した試験体の場合、コンクリートマトリックスに非晶質鋼繊維が強く付着されたため、爆裂の発生と共に大きい寸法の破片が剥離したと考えられる。また、非晶質鋼繊維の混入率が増加するほど爆裂による 5mm 以上の大きい破片が剥離する可能性が高くなることが認められた。

図-7 に ISO-834 標準加熱試験後の試験体の残存圧縮荷重率を示す。著しく爆裂が生じた 150-0.5 試験体の断面が異形となり、試験体の中心軸が維持されていないため圧縮荷重試験が出来なかった。また、全ての水準で爆裂が生じた圧縮強度 150MPa 級の試験体の場合、断面損失が大きいため、非晶質鋼繊維の混入率による直接的な比較は出来なかった。一方、圧縮強度 100MPa 級の試験体における爆裂が抑制された 100-0.0 及び 100-0.3 試験体の残存圧縮荷重率は約 20%以下となったが、爆裂が生じた 100-0.5 試験体の残存圧縮荷重率は約 35%以上となり、非晶質鋼繊維の効果が明らかに見られた。高温加熱によって生じるコンクリート内部のひび割れを混入された非晶質鋼繊維が抑制するため、爆裂した試験体の残存圧縮荷重率の急激な低下を防止すると判断される。

### 3.2 水蒸気圧力

図-8 に加熱試験中に試験体の内部から発生する水蒸気圧力と時間との関係について示す。全ての試験体における時間と水蒸気圧力に対する曲線の形態は 10mm 深さから圧力が形成されて、数分後には 30mm 深さの圧力が増加する傾向が見られた。また、試験体の種類によらず各々の位置から測定した試験体の 30mm での最大圧力は 10mm での最大圧力より高くなるのが分かった。この結果については、ISO-834 標準加熱試験のように急速に高温環境となる場合には加熱面から近い位置の水蒸気圧力が急激に形成されると Bangi らが報告している<sup>4)</sup>。このように形成された圧力は試験体の断面に不均等な圧力分布が現れ、圧力差によって表面の水蒸気がコンクリートの内部に移動するためと判断される。

以上の水蒸気圧力の挙動は加熱を受けたコンクリートでの水蒸気の発生と移動の関係から説明できる。加熱を受けたコンクリートの内部の水蒸気は繊維の溶融によって形成される空隙ネットワーク及びひび割れに移動する。非晶質鋼繊維が混入されたコンクリートでは繊維の架橋作用によってセメントマトリックスのひび割れが抑制されて水蒸気の移動が出来る通路の一部が制限的となり、表面の周辺の水蒸気が内部に移動することが難しくなる可能性がある。従って、本研究の範囲では 10mm 深さでの水蒸気圧力の形成時点が早くなり、30mm 深さで生じた水蒸気はそれ以上に深く移動することが出来ないため、水蒸気圧力が高くなったと考えられる。

図-9 に加熱試験中に試験体の内部から発生する水蒸気圧力と温度との関係について示す。水蒸気圧力の評価結果は飽和水蒸気圧力(Saturation Vapor Pressure, SVP)と比較した。ポリプロピレン繊維だけを混入した 100-0.0 及

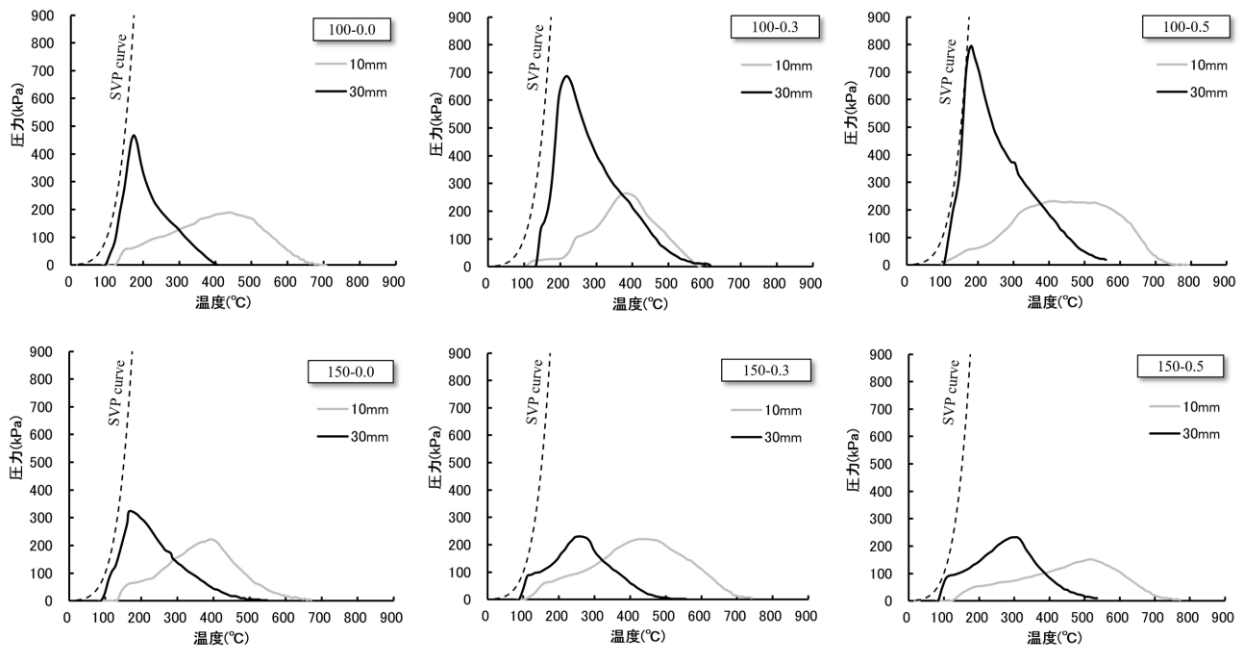


図-9 試験体内部の水蒸気圧力と温度との関係曲線

び 150-0.0 試験体の圧力は全ての測定深さにおいて、飽和水蒸気圧力を超えなかった。ポリプロピレン繊維は 170°C の温度で熔融されてコンクリートの内部での水蒸気の凝集を防止する効果があると考えられる。非晶質鋼繊維を 0.3vol.% 混入した場合でもポリプロピレン繊維の熔融による水蒸気圧力の低下が出来ることが認められた。一方、非晶質鋼繊維を 0.5vol.% 混入した試験体において 100-0.5 試験体の場合は、飽和水蒸気圧力を超える水蒸気圧力が測定された。これは過飽和水蒸気圧力状態であり、超高強度コンクリートの試験体内部に水分凝集層が形成された結果と判断することが出来る。

#### 4. まとめ

非晶質鋼繊維を混入した超高強度コンクリートの加熱実験から爆裂特性を検討した結果、本実験範囲内で以下の結論を得た。

- (1) ポリプロピレン繊維と非晶質鋼繊維を混入した超高強度コンクリートの爆裂特性において、加熱によって生じた水蒸気の排出には非晶質鋼繊維よりポリプロピレン繊維の熔融によって形成される空隙ネットワークの効果が大きいことが分かった。
- (2) 非晶質鋼繊維は常温での超高強度コンクリートの曲げ性能や加熱後の圧縮性能を改善させる効果はあるが、過度な非晶質鋼繊維の混入は高温環境下での超高強度コンクリートの内部から生じる水蒸気が排出される通路として作用するひび割れの発生を抑制するため、爆裂の原因となる水分凝集層が形成される可能性が高くなると考えられる。
- (3) 非晶質鋼繊維を超高強度コンクリートの補強材とし

て適用するためには、爆裂制御性能及び曲げ引張性能などを総合的に検討する必要があると思われる。

#### 謝辞

本研究の成果(の一部)は 2017 年度韓国政府(教育部)の財源から韓国研究財団の支援(No. 2017R1D1A1B03034776, 基礎研究事業)及び東京工業大学科学技術創成研究院フロンティア材料研究所共同利用研究を利用して得られたものです。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) Peng GF, Yang WW, Zhao J, Liu YF, Bian SH and Zhao LH : Explosive spalling and residual mechanical properties of fiber-toughened high-performance concrete subjected to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 36, pp. 723-727, 2006
- 2) Ding Y, Zhang C, Cao M, Zhang Y and Azevedo C : Influence of different fibers on the change of pore pressure of self-consolidating concrete exposed to fire, *Construction and Building Materials*, Vol. 113, pp. 456-469, 2016
- 3) Yoo DY, Banthia N, Yang JM and Yoon YS : Size effect in normal-and high-strength amorphous metallic and steel fiber reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, Vol.121, pp. 676-685, 2016
- 4) Bangi MR, Horiguchi T : Effect of fibre type and geometry on maximum pore pressures in fibre-reinforced high-strength concrete at elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, pp. 459-466, 2012