

# 論文 リング拘束試験体を用いたコンクリートの爆裂特性と超音波透過時間の評価

黄 義哲\*1・金 圭庸\*2・南 正樹\*3・小澤 満津雄\*4

**要旨:** リング拘束コンクリートを用いて 40, 60, 80, 100MPa 級コンクリートについて、爆裂特性と超音波透過時間を評価した。その結果、比較的緻密な内部組織を持っている 80, 100MPa 級コンクリートは、高温によって爆裂した。これは独立した空隙による水蒸気膨張圧力が大きくなり、コンクリートの膨張による拘束応力の増加が原因であると考えられる。また、100MPa 級コンクリートは 80MPa 級に比べて加熱面の水分凝集層が大きいと、より深く広い範囲の爆裂が生じた。一方、高温によるコンクリートの劣化から試験体の超音波透過時間は増加し、超音波透過時間の変化は断面損失が及ぼす影響が大きいと考えられる。

**キーワード:** 圧縮強度, リング拘束試験体, 水蒸気圧力, 拘束応力, 爆裂, 超音波透過時間

## 1. はじめに

高温を受けたコンクリートは力学的特性が低下し、圧縮強度が高いほど緻密な内部組織を形成するため爆裂が生じる可能性が高くなる。爆裂の主な要因は水蒸気圧力、熱応力、複合応力などであると報告されている<sup>1-3)</sup>。また、高温を受けて爆裂が生じたコンクリートは、力学的特性の低下と断面損失によって耐力が低下するため安全性の検討が必要である。最近ではコンクリートの健全度評価ができる超音波を用いて、加熱中コンクリートの安全性について評価した研究が報告されている<sup>4)</sup>。しかし、圧縮強度の差によって生じるコンクリートの水蒸気圧力、熱膨張力及び爆裂有無による超音波透過時間を検討した事例はまだ少ない状況である。

一方、既往の研究<sup>5-6)</sup>では図-1に示すように、リング拘束試験体を用いて急速加熱条件で水蒸気圧力と拘束応力を検討した事例が報告されており、この方法はコンクリートを拘束する鋼管のひずみからコンクリートの膨張応力を計算することができる。

従って、本研究はリング型鋼管で拘束した 40MPa から 100MPa 級までのコンクリート試験体について、水蒸気圧力及び拘束応力によるコンクリートの爆裂特性と加熱中コンクリートの劣化と断面損失による超音波透過時間を検討・分析したものである。

## 2. 実験計画及び方法

### 2.1 実験計画及び試験体作製

本研究の実験計画及びコンクリートの調合を表-1に示す。加熱条件は急速加熱(ISO-834 標準加熱方式)<sup>7)</sup>、評価項目は W/B 0.450, 0.350, 0.200, 0.145 のコンクリート

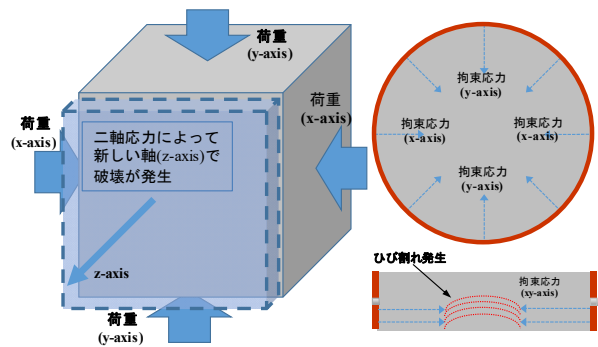


図-1 二軸応力によるコンクリートのひび割れと爆裂メカニズム<sup>5-6)</sup>

に対して、爆裂性状、内部温度、水蒸気圧力、拘束応力、超音波透過時間とした。

試験体の作製には、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、密度 2.20g/cm<sup>3</sup>、比表面積 3,000cm<sup>2</sup>/g のフライアッシュ、密度 2.50g/cm<sup>3</sup>、比表面積 200,000cm<sup>2</sup>/g のシリカフェーム、密度 2.50g/cm<sup>3</sup>、比表面積 6,000cm<sup>2</sup>/g の高炉スラグ微粉末及び密度 2.90g/cm<sup>3</sup>、比表面積 3,550cm<sup>2</sup>/g の石膏を結合材とし、細骨材は表乾密度 2.65g/cm<sup>3</sup>、吸水率 1.0%の海砂を用いた。粗骨材の場合は表乾密度 2.7g/cm<sup>3</sup>、吸水率 0.9%、最大寸法 13mm(80, 100 MPa 級)と 25mm(40, 60 MPa 級)の花崗岩碎石を使用した。また、コンクリートのスランブ及びスランブフローは、ポリカルボン酸系高性能減水剤の添加によって目標値を達成した。

一方、リング拘束試験体の概要を図-2に示す。拘束

\*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 教授 工博 (正会員)

\*3 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科 助教授 工博 (正会員)

\*4 群馬大学 理工学研究院 環境創生部門 准教授 工博 (正会員)

表-1 実験計画及びコンクリートの調合

W/B	f <sub>ck</sub> (MPa)	Slump flow (mm)	Air (%)	S/a (%)	単 位 量 <sup>2)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )								加熱速度	評 価 項 目	
					W	C	FA	SF	BSF	SO <sub>4</sub>	S	G			
0.450	40	150 ± 25 <sup>1)</sup>	4.5	43.6	163	180	90	-	90	-	-	763	991	急速加熱 (ISO-834)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・爆裂性状</li> <li>・内部温度 (°C)</li> <li>・水蒸気圧力 (MPa)</li> <li>・拘束応力 (MPa)</li> <li>・超音波速度</li> </ul>
0.350	60	650 ± 100	4	40	165	471	0	0	-	-	681	1026			
0.200	80	750 ± 100	2	43	150	525	150	75	-	-	642	870			
0.145	100	750 ± 100	2	35	150	651.72	-	124.14	206.90	51.72	488.55	848.74			

1) Slump (mm)

2) W: 水, C: セメント, FA: フライアッシュ, SF: シリカフューム, BSF: 高炉スラグ微粉末, SO<sub>4</sub>: 石膏, S: 細骨材, G: 粗骨材

リングは直径 300mm, 高さ 50mm, 厚さ 7mm の鋼管であり, 2 段に設置してシリコンを用いて接合した後, その内にコンクリートを打設した。また, 熱電対と圧力測定用パイプは, 試験体の加熱面から 5, 10, 25, 40mm の深さに設置した。鋼製リングのひずみは試験体の加熱面から 5, 10, 25, 40, 75mm の深さに設置した常温用 (80°C) のひずみゲージによって測定した。加熱前の含水率の場合, 40MPa 級コンクリートは 3.41%, 60, 80, 100MPa 級コンクリートは 3.95% と示した。また, リング拘束試験体は, 一定な温度と湿度を維持するために温度 22±2°C, 湿度 50±10% のチャンバーで養生した。材齢 28 日のコンクリート試験体の圧縮強度はそれぞれ 43.07, 69.28, 85.51, 100.18MPa と測定された。

## 2.2 試験方法

### (1) 加熱方法の概要

加熱に使用した電気加熱炉を図-3 に示す。加熱炉上部に試験体を設けて, 試験体下部を加熱する 1 面加熱方式を使用した。また, リング周り下回部分を断熱することで鋼管リングには直接加熱しなかった。

### (2) リング拘束試験体の拘束応力計算<sup>5-6)</sup>

拘束リングがコンクリートを拘束する際に生じる拘束応力は, 拘束リング表面のひずみ値から, 内圧を受ける円筒モデルにより測定断面の平均拘束応力の算出が可能である。円筒モデルは円筒表面に生じるひずみを平面応力状態として, 円周方向ひずみ成分に軸方向ひずみ成分も付加して膨張圧を求める。したがって, リング拘束試験体の拘束応力は式(1)を用いて計算した。

$$\sigma_{restrained} = \varepsilon_{\theta} \times E_s \times \frac{t}{R} \quad \text{式(1)}$$

ここで,  $\sigma_{restrained}$  : コンクリートに生じる拘束応力(MPa)

$\varepsilon_{\theta}$  : リング材円周方向ひずみ

$E_s$  : リング材弾性係数(MPa)

t : リング材厚み(mm)

R : リング内半径(mm)

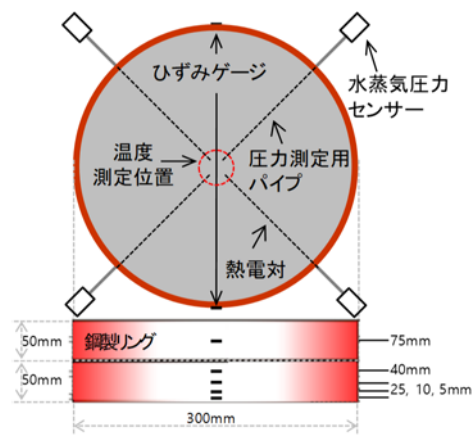


図-2 リング拘束試験体の概要

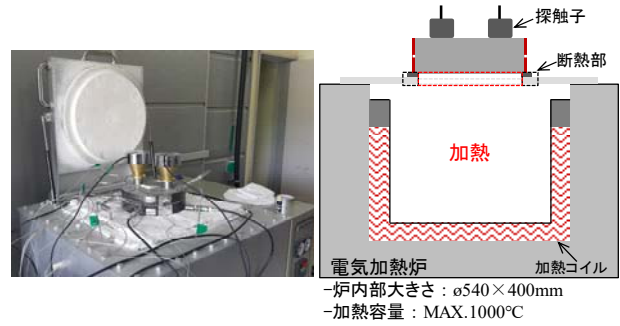
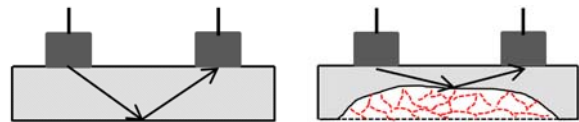


図-3 電気加熱炉



(a) 加熱前

(b) 加熱中

図-4 加熱を受ける試験体を透過する超音波

### (3) 超音波透過時間の測定方法<sup>4)</sup>

超音波透過時間は, 図-3, 4 に示すように加熱中リング拘束試験体の上面から Pulse velocity instrument を用いて間接法で測定した。

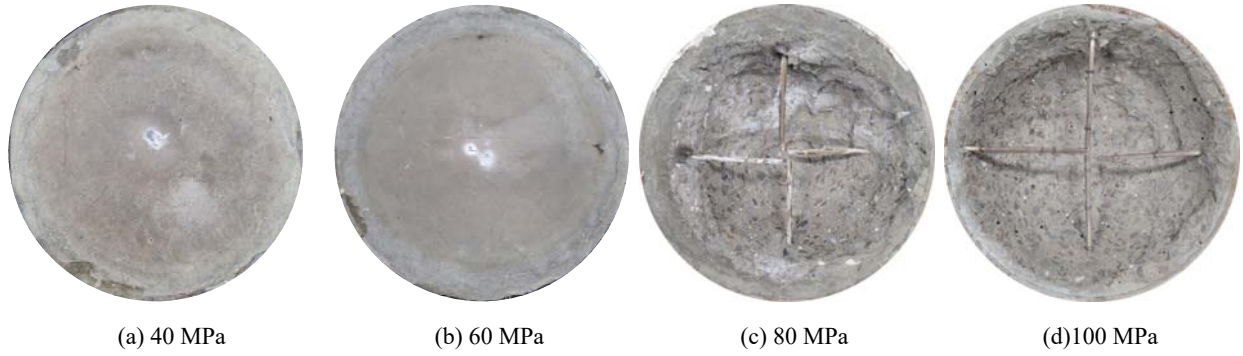


図-5 リング拘束試験体の加熱後の状態

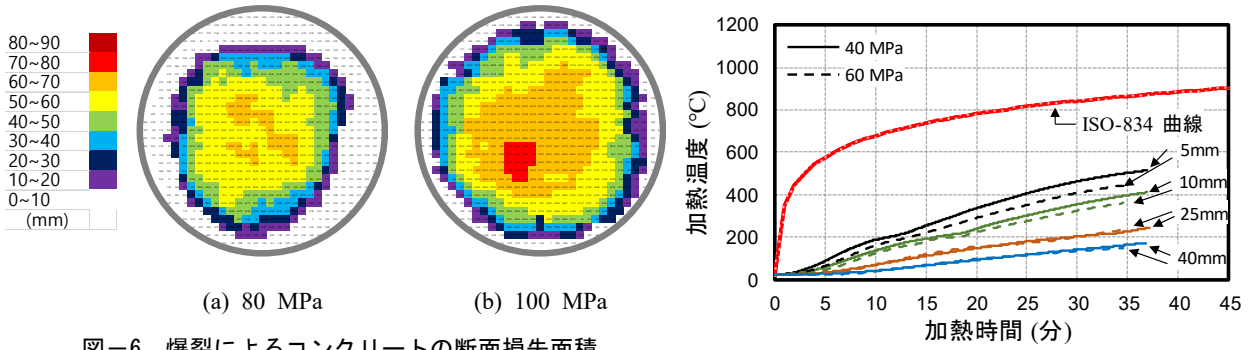


図-6 爆裂によるコンクリートの断面損失面積

### 3. 実験結果及び考察

#### 3.1 爆裂性状及び内部温度

リング拘束試験体の加熱後の状態を図-5に示す。40, 60MPa級コンクリートは爆裂が生じなかったが、80, 100MPa級コンクリートは爆裂によって断面が破られて全ての金属パイプと熱電対が露出された。爆裂によるコンクリートの断面損失面積を図-6に示す。100MPa級コンクリートは80MPa級コンクリートに比べて広く深い破壊面積を現れ、圧縮強度が高くなるほど爆裂による断面損失が大きいことが分かった。

圧縮強度によるコンクリートの内部温度、爆裂片、最大爆裂深さを図-7に示す。100MPa級コンクリートの場合は急激な爆裂発生の影響で25分に加熱を終了した。爆裂しなかった40, 60MPa級コンクリートは内部温度が徐々に上昇したが、爆裂した80, 100MPa級コンクリートは断面が破られて5mm位置で急に温度が上昇した。以後、継続的な爆裂により深さ10, 25, 40mmの順で熱電対が露出される

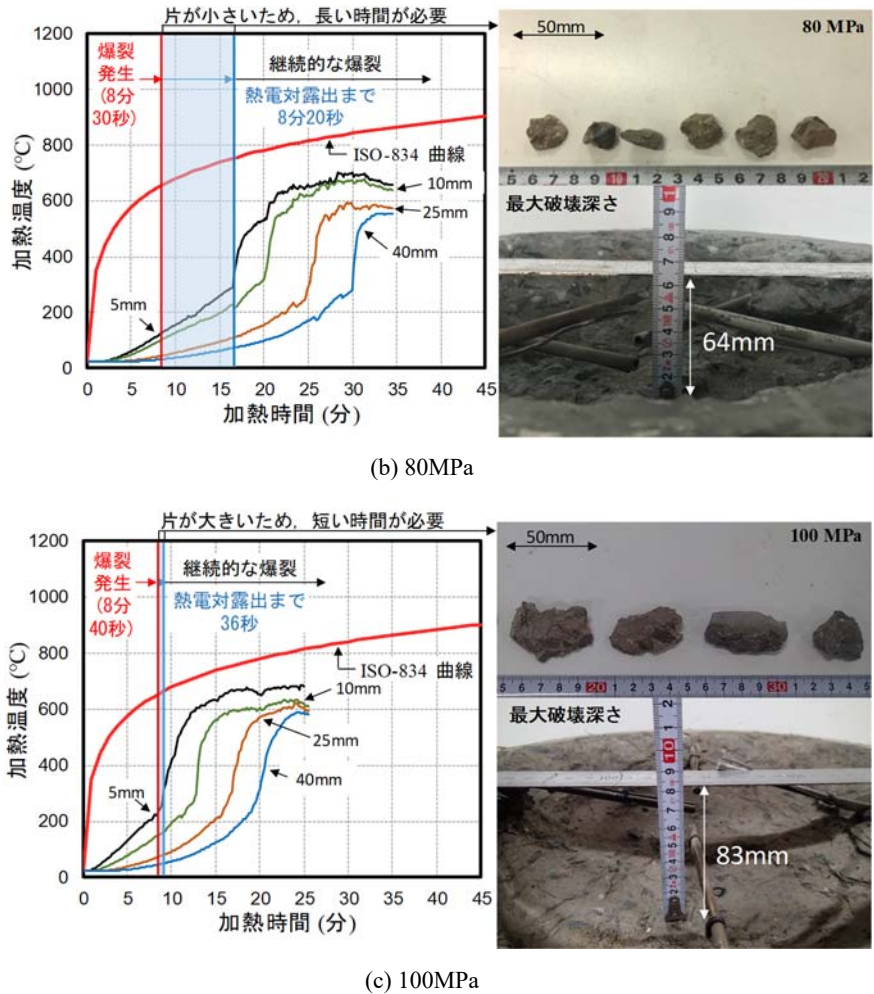


図-7 圧縮強度によるコンクリートの内部温度、爆裂片、最大爆裂深さ

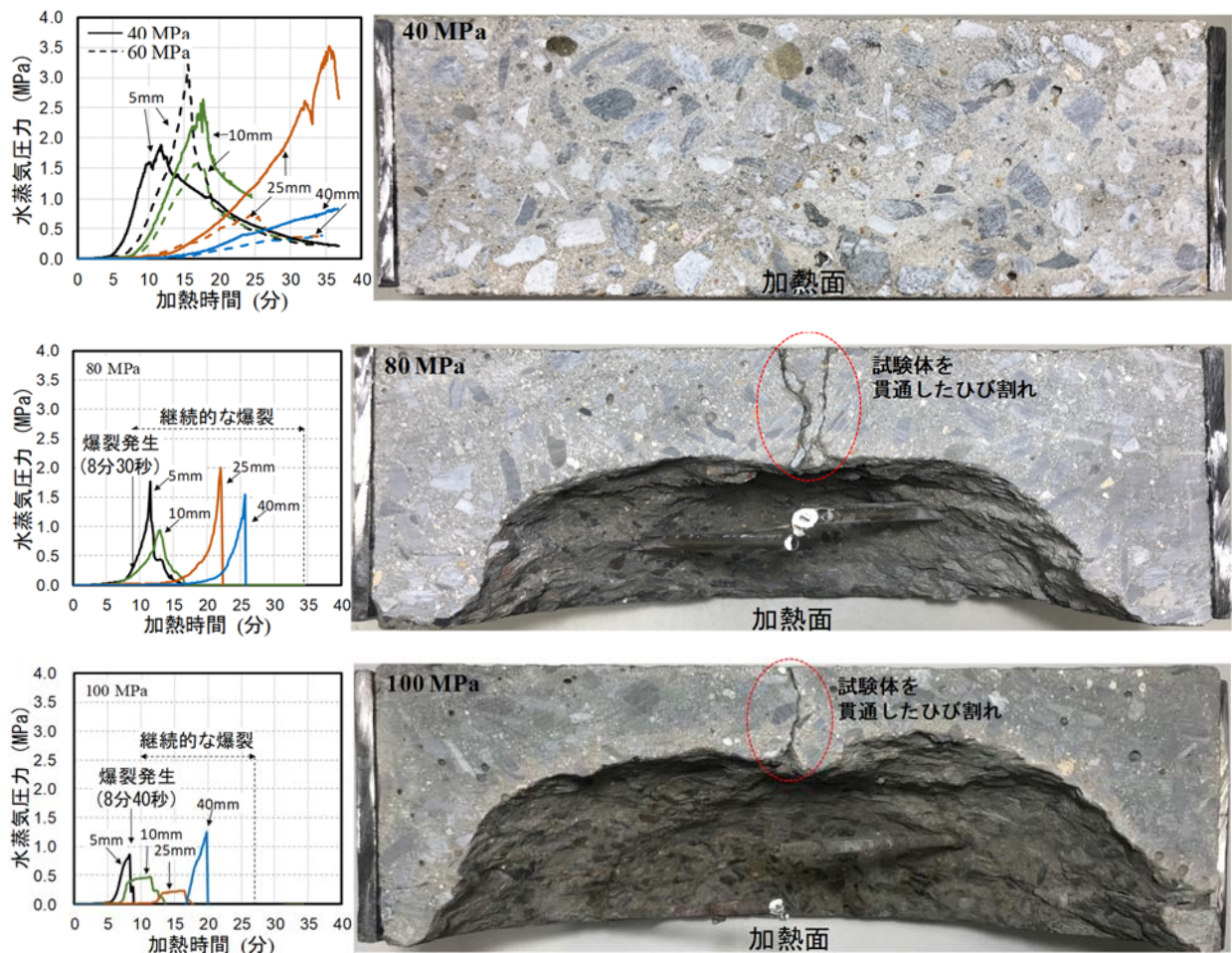


図-8 圧縮強度によるコンクリートの水蒸気圧力，試験体断面

ことが見られた。

また，最初爆裂以後 5mm 位置で急激な温度上昇の観察ができるまでの時間は，80MPa 級コンクリートは約 8 分 20 秒，100MPa 級コンクリートは約 36 秒と確認された。この現象の原因は爆裂によって剥離したコンクリート片の大きさためだと考えられる。爆裂片の最大寸法の場合，100MPa 級コンクリートは約 50mm，80MPa 級コンクリートは約 13mm であり，爆裂片が大きいほど急激な断面損失が生じた。また，最大爆裂深さの場合にも爆裂片が大きいほど深くなることが分かった。

### 3.2 水蒸気圧力

圧縮強度によるコンクリートの水蒸気圧力，試験体断面を図-8 に示す。40, 60, 80, 100MPa 級コンクリートの最大水蒸気圧力は，それぞれ 3.52, 3.22, 2.00, 1.25MPa と測定された。コンクリートの圧縮強度が大きくなるほど，加熱によって発生した水蒸気圧力が排出されるまでに必要な時間が短くなる傾向が見られた。また，40, 60MPa 級コンクリートでの水蒸気圧力の形成と排出は徐々に進行されたが，80, 100MPa 級コンクリートでは水蒸気圧力の形成と排出が急になる傾向が見られた。

これは爆裂しなかった 40, 60MPa 級コンクリートの場合，熱応力によって生じた微細ひび割れと空隙ネットワ

ークを通じて自由な水分移動が可能であるため大きい水蒸気圧力が現れた。爆裂した 80, 100MPa 級のコンクリートの場合，緻密な内部組織によって連続した空隙より独立した空隙が多いため水分の移動が難しくなる。従って，排出される水蒸気圧力の値が小さいと考えられる<sup>8)</sup>。

コンクリートの水蒸気圧力と SVP 曲線(Saturation vapor pressure curve, 飽和水蒸気圧力曲線)の関係を図-9 に示す。SVP 曲線は現在の温度で水蒸気が持つことができる最大の水蒸気圧力を示し，SVP 曲線を基準に左部分は過飽和状態，右部分は不飽和状態を示す。過飽和状態の水蒸気はコンクリート爆裂の主な原因であると報告されている水分凝集層の形成を意味する<sup>9)</sup>。図-9 は 40, 60, 80, 100MPa 級コンクリートで過飽和状態の水蒸気圧力が形成される曲線を表している。

40, 60MPa 級コンクリートは約 200°C の温度範囲まで水分凝集層が生じた。爆裂しなかった 40, 60MPa 級コンクリートの場合，加熱によって加熱面から生じた水蒸気が外部に排出および内部に移動する現象が現れた。これによってコンクリート試験体の加熱面付近では過飽和状態の水蒸気圧力が形成された。

一方，爆裂が生じた 80MPa 級コンクリートの場合，約

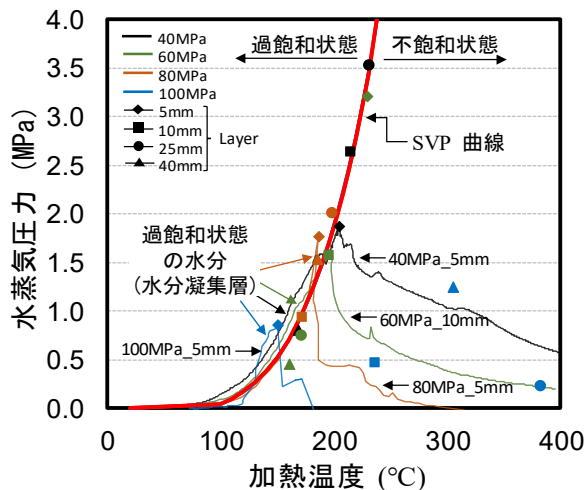


図-9 コンクリートの水蒸気圧力と SVP 曲線の関係

180~190°Cの温度範囲で 40, 60MPa 級コンクリートに比べて小さい水分凝集層が生じた。爆裂した 100MPa 級コンクリートは最大水蒸気圧力が最も小さいが、加熱面から 5mm の測定位置では約 120~150°Cの温度範囲で最も速く広い水分凝集層が生じた。これは圧縮強度が大きくなるほどコンクリートの内部組織が緻密なので、100MPa 級コンクリートの加熱面から 5mm の測定位置では空隙内の水分移動が難しいためであると判断される。また、100MPa 級コンクリートの加熱面から 5mm の測定位置に生じた水分凝集層では、独立した空隙によって排出されなかった水蒸気が大きいエネルギーを凝縮して爆裂性状に影響を与えたと考えられる<sup>10-11)</sup>。

### 3.3 拘束応力

各圧縮強度におけるコンクリートの拘束応力を図-10 に示す。リング拘束試験体の加熱面から 5, 10, 25, 40, 75mm 位置の拘束応力を比較した。全てのコンクリートでは、加熱面に近いほど熱応力が大きいため拘束応力が増加した。また、コンクリート下部の膨張によってリング鋼管の下部では引張力が作用して膨張し、リング鋼管の上部では圧縮力が作用して 40mm 位置では収縮ひずみが現れた。75mm 位置は温度変化が少ないので、拘束応力の変化が生じなかったと判断される。

爆裂しなかった 40, 60MPa 級コンクリートは熱応力によって生じた微細ひび割れと空隙ネットワークを通じて水蒸気圧力が排出されるため、80, 100MPa 級コンクリートに比べてコンクリートの膨張が抑制される。リング鋼管のひずみはコンクリートの膨張に影響を受けるため、40, 60MPa 級コンクリートは 80, 100MPa 級コンクリートに比べて拘束応力が小さいと判断される。

爆裂した 80, 100MPa 級コンクリートは 40, 60MPa 級コンクリートに比べて拘束応力が大きくなった。特に加熱面から 5mm の測定位置は 100MPa 級コンクリートで最大の拘束応力が見られた。100MPa 級コンクリートの

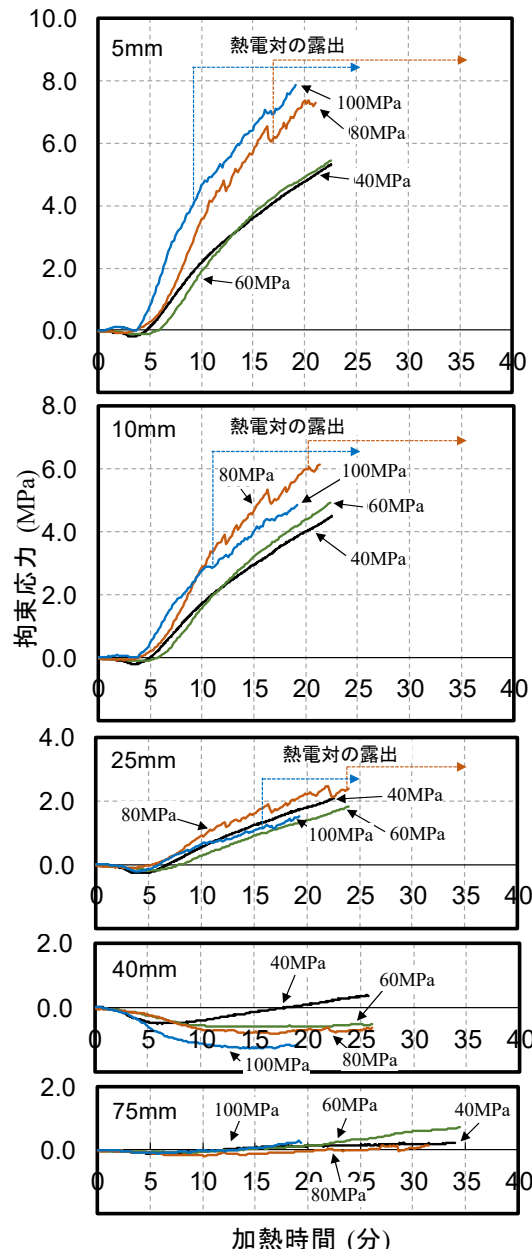


図-10 各圧縮強度におけるコンクリートの拘束応力

加熱面から 5mm の測定位置では、独立した空隙内に凝縮された水蒸気圧力の一部が膨張力として作用したためだと考えられる。

一方、80, 100MPa 級コンクリートの場合、爆裂した後の拘束応力は、コンクリートの断面損失を考慮しなかったため、その値を信頼することはできないと考えられる。

### 3.4 超音波透過時間

圧縮強度によるコンクリートの超音波透過時間比及び残存試験体厚さ比を図-11 に示す。爆裂しなかった 40, 60MPa 級コンクリートは、加熱時間が増加するほどコンクリートの劣化によって超音波透過時間が遅くなるが、爆裂した 80, 100MPa 級コンクリートは爆裂による断面損失とコンクリートの劣化によって超音波透過時間が変化した。爆裂によってコンクリートの断面が破られた

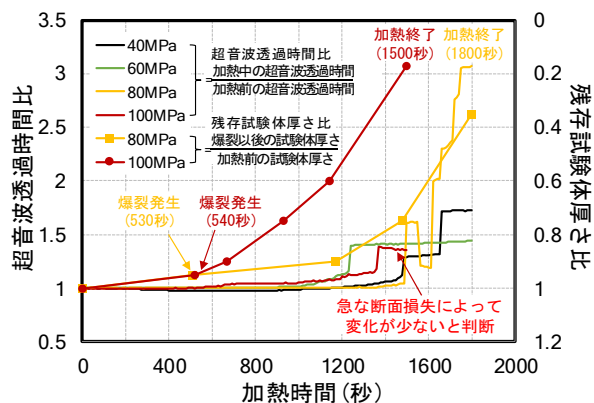


図-11 圧縮強度によるコンクリートの超音波透過時間比及び残存試験体厚さ比

場合、超音波透過時間が短くなるが、劣化が生じた場合、超音波透過時間は遅くなる。80MPa 級コンクリートは 100MPa 級コンクリートに比べて超音波透過時間が急に遅くなった。100MPa 級コンクリートの場合、加熱された部分が爆裂によって脱落し、その部分の残存断面は比較的健全な状態の新しい加熱面になるため、超音波透過時間の変化が少ないと判断される。

#### 4. まとめ

リング拘束コンクリートの爆裂特性と超音波透過時間を評価した結果、以下の知見が得られた。

- (1) リング拘束試験体にコンクリートの水蒸気圧力と拘束応力を評価することができ、圧縮強度によるコンクリートの爆裂特性は熱応力と水蒸気膨張圧力の直接的な影響を受けると判断される。
- (2) 40, 60MPa 級コンクリートは空隙ネットワークを通じて水分移動がスムーズであるが、80, 100MPa 級コンクリートは緻密な空隙構造により水分移動が抑制されることから、水蒸気膨張圧力が外部に排出されず内部で凝縮された。
- (3) コンクリートの圧縮強度が大きいほど加熱面の水分凝集層のエネルギーが増加し、エネルギーの一部は膨張力として作用することで拘束応力が大きいことが分かった。
- (4) 超音波透過時間は加熱によるコンクリートの劣化と断面損失によって異なる特性が見られた。超音波透過時間の信頼性を高めるためには、コンクリートの劣化及び断面損失について複合的に考慮する必要があると考えられる。

#### 謝辞

本論文は 2015 年度韓国研究財団の支援を受けて行われた基礎研究事業(No.2015R1A5A1037548)の結果であり、ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) Fu, Y., & Li, L.: Study on mechanism of thermal spalling in concrete exposed to elevated temperatures. *Materials and structures*, Vol.44, No.1, pp.361-376, 2011.
- 2) Choe, G., Kim, G., Yoon, M., Hwang, E., Nam, J., & Guncunski, N. : Effect of moisture migration and water vapor pressure build-up with the heating rate on concrete spalling type. *Cement and Concrete Research*, Vol.116, pp.1-10, 2019.
- 3) 谷辺徹, 小澤満津雄, 鎌田亮太, 内田裕市, & 六郷恵哲.: 高温環境下での高強度コンクリートの耐爆裂性評価における爆裂発生指標の提案. *土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)*, Vol.70, No.1, pp.104-117, 2014.
- 4) Hwang, E., Kim, G., Choe, G., Yoon, M., Guncunski, N., & Nam, J. : Evaluation of concrete degradation depending on heating conditions by ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, Vol.171, pp.511-520, 2018.
- 5) Ozawa, M., Tanibe, T., Kamata, R., Uchida, Y., Rokugo, K., & Parajuli, S. S.: Behavior of ring-restrained high-performance concrete under extreme heating and development of screening test. *Construction and Building Materials*, Vol.162, pp.215-228, 2018.
- 6) 谷辺徹.: 高温下におけるコンクリートの爆裂発生指標とリング拘束試験方法 (Doctoral dissertation, 岐阜大学 (Gifu University)), 2014.
- 7) ISO-834 Fire resistance tests-elements—elements of building construction. *International Standard ISO 834*, Geneva, 1975.
- 8) Back, J. W., Kim, G. Y., Nam, J. S., Hwang, E. C., Choe, G. C., & Yoon, M. H. Water Vapor Pressure and Spalling Properties of High Strength Concrete Restrained by Steel-Ring, *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol.30, No.6, pp.617-624, 2018.
- 9) Ichikawa, Y., & England, G. L.: Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures. *Nuclear Engineering and design*, Vol.228, No.1, pp.245-259, 2004.
- 10) Hermathy, T. Z.: Effect of moisture on the fire endurance of building materials. *Moisture in Relation to Fire Tests*. ASTM Special Technical Publication, Vol.385, pp.74-95, 1965.
- 11) Jansson, R.: Fire spalling of concrete—A historical overview. In *MATEC Web of Conferences*, Vol. 6, pp. 01001, EDP Sciences, 2013.