# 論文 加熱速度によるリング型鋼管拘束コンクリートの水蒸気圧力と 拘束応力

黄 義哲\*1・金 圭庸\*2・南 正樹\*3・小澤 満津雄\*4

要旨:加熱速度とコンクリートの圧縮強度はコンクリート内部で水蒸気圧力と熱応力の発生に影響を及ぼす ため、コンクリートの爆裂の主な要因となる。本研究では高強度および超高強度コンクリートを対象として リング型拘束試験体を作製し急速および低速加熱を行い、コンクリート内部の水蒸気圧力と拘束応力を測定 した。その結果、加熱速度によるコンクリートの内部温度の違いが水蒸気圧力と拘束応力の形成に影響を及 ぼすことが分かった。特に、低速加熱の場合、超高強度コンクリートは内部の温度差が小さいため、試験体の 断面中央部に形成されて水分凝集層と拘束応力の上昇による爆発爆裂が生じる可能性があることが分かった。 キーワード:加熱速度、圧縮強度、リング型拘束試験体、水蒸気圧力、拘束応力、爆発爆裂

#### 1. はじめに

コンクリートは圧縮強度が大きくなるほど結合材量 が多く緻密な内部構造のため、高温に露出された場合で は爆裂が生じる可能性が高くなる。また、コンクリート の爆裂現象(表面爆裂,爆発爆裂)は加熱速度の影響を受 けると報告されている<sup>1-5)</sup>。コンクリートの爆裂は水蒸気 圧力と熱応力が主な要因として作用するが、加熱速度に よるコンクリート内部の水蒸気圧力と熱応力が爆裂現 象に及ぼす影響に関する研究事例が少ない。

一方,既往の研究<sup>68</sup>では図-1に示すように,リング 型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,この方法では,コ ンクリートを拘束する鋼製リングのひずみからコンク リート内部の拘束応力を計算することができる。また, 筆者らは既往の研究<sup>9</sup>で加熱速度によるコンクリートの 水蒸気圧力を評価したが,コンクリートの熱応力は評価 できなかったため,鋼製リングによる拘束条件を用いて コンクリートの拘束応力を評価した。

そこで、本研究は図-2 に示すように急速と低速加熱 条件でコンクリート内部の温度差によって生じる水蒸 気圧力と拘束応力を評価し、加熱速度による爆裂特性に ついて検討・分析したものである。

# 2. 実験計画および方法

#### 2.1 実験計画および試験体作製

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。加熱速度によるコンクリート内部の水蒸 気圧力と拘束応力を評価するために、加熱条件は急速加 熱(ISO-834 標準加熱方式)および低速加熱(1℃/min の速



図-1 リング型拘束によるコンクリートの膨張挙動 6-8)





\*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

f <sub>ck</sub> (MPa)	加熱速度	評価項目								
60 (高強度) 100 (超高強度)	急速加熱 (ISO-834) 低速加熱 (1℃/min.)	<ul> <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> </ul>								

W/B	f <sub>ck</sub> (MPa)	Slump flow (mm)	Air (%)	S/a (%)	単位量 <sup>1)</sup> (kg/m <sup>3</sup> )					
					W	С	FA	SF	S	G
0.3	60	$\begin{array}{c} 650 \\ \pm \\ 100 \end{array}$	4	40	165	471	0	0	681	1026
0.2	100	$750 \pm 100$	2	43	150	525	150	75	642	870

表-2 コンクリートの調合

1) W: 水, C: セメント, FA: フライアッシュ, SF: シリカフューム, S: 細骨材, G: 粗骨材

度とし RILEM TC 129-MHT 「Part 3 - Compressive str ength for service and accident conditions」)の方式を採用 した <sup>9,10</sup>。また,評価項目は W/B0.2, 0.3 のコンクリート に対して,爆裂性状,内部温度,水蒸気圧力,拘束応力 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を結合材とし、細骨材は密 度 2.65g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.0%, 粗粒率 2.5, 実積率 66%の海 砂, 粗骨材は密度 2.62g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.8%, 粗粒率 2.5, 実積率 66%, 最大寸法 20mm の花崗岩砕石であり、全て の骨材は表面乾燥状態のものを用いた。特に, 超高強度 コンクリートには結合材として密度 2.20g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3,000cm<sup>2</sup>/g のフライアッシュと密度 2.50g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 200,000cm<sup>2</sup>/g のシリカフュームを各々20 と 10%置換し て, ポリカノレボン酸系高性能減水剤を用いた。

一方,リング型拘束試験体の概要を図-3 に示す。拘 束リングは直径 300mm,高さ 50mm,厚さ 7mm の鋼管 を用いて、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の深さに常温用(80℃)のひ ずみゲージを設置して測定した。60,100MPa コンクリー トのフレッシュ性状の場合、それぞれのスランプフロー は 560,680mm,空気量は 3.8,2.1%であり、加熱前 60, 100MPa コンクリートの含水率は、それぞれ 3.95,4.20% で安定した。また、リング型拘束試験体は、一定の温度 と湿度を維持するために温度 22±2℃、湿度 50±10%のチ

# ャンバーで養生した。 2.2 試験方法

# (1) 加熱方法の概要

加熱に使用された電気加熱炉を図-4 に示す。加熱炉





図-3 リング型拘束試験体の概要



-炉内部大きさ: ø540×400mm
 -加熱容量: MAX.1000℃
 図−4 電気加熱炉

上部に試験体を設置し,試験体下部を加熱する1面加熱 方式を使用して急速と低速加熱を行った。また,リング 下回部分を断熱することでリングは直接加熱されなか った。

# (2) リング型拘束試験体の拘束応力計算<sup>7,8)</sup>

拘束リングがコンクリートを拘束する際に生じる拘

$$\sigma_{restrained} = \varepsilon_{\theta} \times E_s \times \frac{t}{R} \qquad \qquad \vec{\mathbf{x}}(1)$$

ここで、  $\sigma_{expand}$  :コンクリートの熱膨張圧(MPa)

**σ**restrained :コンクリートに生じる拘束応力(MPa)

- *ε*<sub>θ</sub> :りング材円周方向ひずみ
- *E<sub>s</sub>* :リング材弾性係数(MPa)
- t :リング材厚み(mm)
- R :リング内半衛(mm)



(a) 爆裂性状および片の大きさ

(b) 爆裂深さ分布

図-5 加熱速度による 100MPa コンクリートの爆裂特性

束応力は、拘束リング表面のひずみ値から、測定断面の 平均拘束応力として、内圧を受ける円筒モデルにより算 出可能である。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、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ている。したがって、リン グ型拘束試験体の拘束応力は式(1)を用いて計算した。

#### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 爆裂性状および内部温度

加熱速度による 100MPa コンクリートの爆裂性状を 図-5の(a)に示す。急速と低速加熱実験の結果,100MPa コンクリートでは爆裂現象が現れた。

急速加熱を受けた 100MPa コンクリートは, 試験体の 加熱面中央から小さな破片が脱落する表面爆裂が生じ た。継続的な表面爆裂が生じ,約65mmの最大爆裂深さ を現れた。

しかし,低速加熱を受けた 100MPa コンクリートでは, 内部で一気に大きく破壊される爆発爆裂が生じ,約42m mの最大爆裂深さを示した。また,図-5の(a)に示すように,爆裂性状による破片の大きさが異なって現れた。 表面爆裂で破片の大きさは30mm×60mm程度であるが, 爆発爆裂の破片の大きさは160mm×160mm,厚さ20mm 程度として表面爆裂に比べて約5倍大きくなった。 爆裂種類による 100MPa コンクリートの爆裂深さ分布 を 図-5の(b)に示す。急速加熱の場合,表面爆裂により 試験体の加熱面中央からコンクリートが脱落したが,鋼 製リングに近いコンクリートでは爆裂が生じない,狭く 深い形状を示した。これは,加熱温度が急に上昇する試 験体の中央部分から爆裂が生じ,鋼製リングに近いコン クリートの膨張力が緩和されたためであると判断され る。

低速加熱の場合一気に爆裂が生じたが、表面爆裂に比 べ広く浅い形状を現れた。試験体のコンクリートは全体 的に10mm以上が脱落して、爆発爆裂が生じる場合には 急な断面損失が生じる可能性があると判断される。

加熱速度によるコンクリートの内部温度を図-6 に示 す。急速加熱の場合には、コンクリートの圧縮強度に関 わらず試験体内部の温度差が大きくなった。爆裂が生じ ない 60MPa コンクリートの場合、加熱終了時 5mm と 4 0mm 深さの温度は約 300℃の差がある。また、100MPa コ ンクリートでは加熱開始後約 8 分 30 秒から表面爆裂が 生じ、約 17 分には 5mm 位置の熱電対で急な温度変化を 現れた。これは表面爆裂により 5mm 位置の熱電対が露 出したものと判断される。以後、継続的な表面爆裂によ り深さ 10, 25, 40mm の順で約 300℃付近の類似な温度 範囲で熱電対が露出されることを確かめた。



図-6 加熱速度によるコンクリートの内部温度

低速加熱の場合には、急速加熱に比べて試験体内部の 温度差が小さきなった。爆裂が生じない 60MPa コンクリ ートの場合、加熱終了時 5mm と 40mm 深さの温度は約 130℃の差を示した。また、100MPa コンクリートでは加 熱開始後約 8 時間 41 分で爆発爆裂が生じた。この爆裂 により深さ 5, 10, 25mm 位置の熱電対が同時に露出され て、急な温度変化が生じることが確かめた。

#### 3.2 水蒸気圧力

加熱速度による 100MPa コンクリートの水蒸気圧力を 図-7に示す。急速加熱の場合,試験体の加熱面から5, 10,25,40mmの順にコンクリート内部の水蒸気圧力が 急に上昇し再び排出される現象が現れた。これは、急速 加熱により試験体内部の温度差が大きくなるためであ ると考えられる。また,60MPa コンクリートは内部ひび 割れによって爆裂が生じず水蒸気圧力が排出されたが, 100MPa コンクリートでは凝縮された水蒸気圧力が排出 される現象によって表面爆裂が生じたと考えられる。

低速加熱の場合,コンクリート試験体内部の水蒸気圧 力が緩やかに上昇する現象が現れた。特に,100MPa コ ンクリートは 5, 10mm 位置の水蒸気圧力が排出された が,最大 7.6MPa まで凝縮された 25,40mm 位置の水蒸気 圧力が一気に排出されるため,爆発爆裂が生じたと考え られる。

一方,図-8に示すように,加熱速度による 60,100MPa コンクリート内部の水蒸気の移動を確認するために,水 蒸気圧力と SVP(飽和水蒸気圧)曲線を比較した。SVP 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,曲線を基準に左部分は過飽和状態,右部分 は不飽和状態である<sup>11)</sup>。

急速加熱の場合,コンクリートの圧縮強度にかかわら ず全体的に水蒸気圧力が SVP 曲線と類似または過飽和状 態を示した。急速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を現れ,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。100MPa コンクリートは 60MPa コンクリートに比べて内部構造が緻密であるた め,過飽和状態の水蒸気圧によって表面爆裂が生じると 考えられる<sup>12,13</sup>。



低速加熱の場合,60MPa コンクリートは SVP 曲線と 類似な飽和状態を示し,100MPa コンクリートは 40mm 位置の水蒸気圧力を除いて不飽和状態を示した。低速加 熱ではコンクリートの圧縮強度にかかわらず全体的に 水蒸気圧力が緩やかに上昇した。これにより水蒸気圧力 が排出される時期が遅くなって,コンクリート試験体の 加熱面から深い位置に水蒸気が移動する過飽和された 水蒸気圧力が形成されたと判断される。この水蒸気圧力 によって100MPa コンクリートでは爆発爆裂が生じたと 判断される。



図-10 コンクリートの熱膨張による 水分凝集層の形成

# 3.3 拘束応力

加熱速度によるコンクリートの拘束応力を図-9 に示 す。急速加熱の場合、コンクリートの圧縮強度にかかわ らず試験体の拘束応力は加熱温度が高くなるほど大き くなったが、100MPa コンクリートの最大拘束応力が 60MPa コンクリートに比べて大きくなった。また、試験 体内部の温度差により加熱面に近いほど拘束応力が大 きくなる傾向が現れた。したがって、コンクリート加熱 面の急な熱膨張によってひび割れが生じ、コンクリート 内部の水分は外部に排出および内部に移動する現象が 生じたと考えられる。内部に移動した水蒸気が凝縮され て,過飽和状態の水分凝集層が生じ,凝縮された水蒸気 圧力がコンクリートの熱膨張により排出されるときに, 表面爆裂が生じる。

低速加熱の場合,急速加熱に比べて試験体内部の温度 差が小さいので,コンクリートの圧縮強度にかかわらず 拘束応力は全体的に緩やかに上昇する傾向が現れた。ま た,試験体の全体的な熱膨張によってコンクリート内部 の水分移動が難しいので,急速加熱に比べてコンクリー トの深い部分に水分凝集層が形成され,凝縮されている 時間が長くより大きな圧力を示す。100MPa コンクリー トでは,熱膨張によって水分凝集層の水蒸気が急激に排 出されるときに,一度に爆発爆裂が生じたと判断される。

一方,鋼製リングのひずみゲージは常温用(80℃)であ るため約6時間までの膨張ひずみを測定することができ たが,以後の拘束応力は継続的に上昇するものと考えら れる。

# 4. まとめ

本研究で加熱速度によるリング型拘束コンクリート の水蒸気圧力と拘束応力を評価した結果,以下の知見が 得られた。

- (1) 超高強度コンクリートは、急速加熱ではコンクリート加熱面から拘束応力が大きくなって水分凝集層が形成されて表面爆裂が、低速加熱では拘束応力が緩やかに上昇してコンクリートの深い部分に水分凝集層が形成されて爆発爆裂が生じる。
- (2) コンクリート内部に移動した水蒸気が凝縮されて 水分凝集層を形成され、爆発爆裂が生じる場合には 表面爆裂に比べて水蒸気圧力が大きくなることが 分かった。
- (3) コンクリートの温度が高くなるほど熱膨張が大きくなるため、拘束応力の増加および水分凝集層の形成に影響を及ぼす。コンクリートの温度分布による異なる拘束応力と水分凝集層は、表面および爆発爆裂の主な要因であることを確認した。

# 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

- Fu, Y., & Li, L.: Study on mechanism of thermal spalling in concrete exposed to elevated temperatures. Materials and structures, 44(1), 361-376, 2011.
- 2) Bangi, M. R., & Horiguchi, T.: Pore pressure development

in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures. Cement and Concrete Research, 41(11), 1150-1156, 2011.

- Ko, J., Ryu, D., & Noguchi, T.: The spalling mechanism of high-strength concrete under fire. Magazine of Concrete research, 63(5), 357-370, 2011.
- Phan, L. T.: Pore pressure and explosive spalling in concrete. Materials and structures, 41(10), 1623-1632, 2008.
- Hertz, K. D.: Limits of spalling of fire-exposed concrete. Fire safety journal, 38(2), 103-116, 2003.
- 6) 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),70(1),104-117,2014.
- 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.
- 8) 崔景喆,金圭庸,朴奎衍,金武漢:急速と低速加熱に よるコンクリートの内部水蒸気圧力及び爆裂特性. コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 1165-1170, 2013.
- ISO-834 Fire resistance tests-elements—elements of building construction. International Standard ISO 834, Geneva, 1975.
- 10) RILEM TC 129-MHT [Part 3 Compressive strength for service and accident conditions]
- Ichikawa, Y., & England, G. L.: Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures. Nuclear Engineering and design, 228(1), 245-259, 2004.
- Hermathy, T. Z.: Effect of moisture on the fire endurance of building materials. Moisture in Relation to Fire Tests. ASTM Special Technical Publication, (385), 74-95, 1965.
- Jansson, R.: Fire spalling of concrete-A historical overview. In MATEC Web of Conferences, Vol. 6, p. 01001, EDP Sciences, 2013.