論文　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

崔 景喆 [*1]・金 圭庸 [*2]・朴 奎衍 [*3]・金 武漢 [*4]

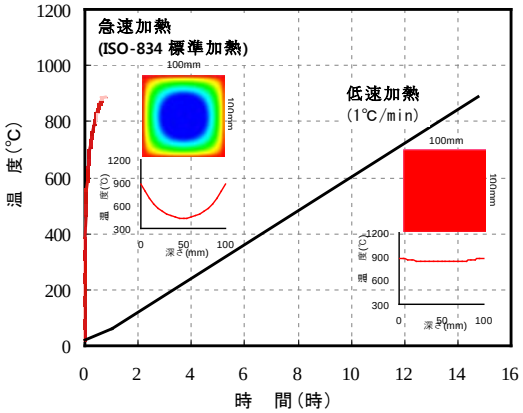
要旨：高温における高強度コンクリートの爆裂現象は内部要因として組織の緻密化による水蒸気圧力及び熱応力，外部要因として加熱速度の影響を受ける。本研究は組織の緻密度が異なる圧縮強度 30,50,70,90,110MPa のコンクリートを対象に急速加熱と低速加熱条件による水蒸気圧力及び爆裂性状を評価した。その結果，低速加熱時では水蒸気の発生時間が遅れ，試験体内外部の温度応力差が小さく爆裂がほぼなかったが，急速加熱では加熱初期に水蒸気圧力が発生して温度応力差が大きくなり，爆裂発生に影響を及ぼした。圧縮強度及び加熱速度に関わらず，コンクリート試験体の熱膨張ひずみ 0.002 以上からは水蒸気圧力が低下する現象が確認された。

キーワード：　加熱速度，高強度コンクリート，水蒸気圧力，爆裂，熱膨張ひずみ

1. はじめに

コンクリートの爆裂は水蒸気圧力による引張応力，内外部の温度差による熱応力が主要因として報告されている。爆裂に影響を及ぼす内部要因は水セメント比及び圧縮強度，透気性，含水率などの組職構造であり，外部要因は加熱速度と最高温度，載荷条件などがある。このようにコンクリートの爆裂現像は多様な要因が関わっており，コンクリート内部組織の緻密度と加熱速度の影響を十分に検討する必要がある [1,7]。

したがって，本研究は**図－1**のように急速と低速加熱によるコンクリート試験体内外部の熱応力が異なった状態で水蒸気圧力，熱膨張ひずみ挙動を評価し，コンクリートの爆裂性状との関連性を検討分析したものである。



図－1 加熱速度によるコンクリート試験体内部の温度分布
（900℃加熱時，温度分布予想図）

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を評価するため，加熱条件は急速加熱とし ISO-834 標準加熱方式，低速加熱は 1℃/min の速度とし RILEM TC 129-MHT 「Part 3 - Compressive strength for service and accident conditions」に準じて行った [8]。

コンクリートの圧縮強度は W/B 55%の普通強度から W/B 40，33，23，18%の高強度まで設定し，W/B 33%以下の高強度コンクリートは強度増加のためにシリカフュームをそれぞれセメントの 5%, 16%, 23%置換した。

評価項目はコンクリートの圧縮強度及び加熱速度による爆裂性状，重量減少率，水蒸気圧力，熱膨張ひずみである。また，本研究に使用した材料を**表－3**に示す。

表－1　実験計画

F_{ck} (MPa)	加 熱 速 度	評　価　項 目
30 50 70 90 110	・急速加熱 (ISO-834 標準加熱) ・低速加熱 (1℃/min)	・爆裂性状 ・重量減少率(wt.%) ・含水率(wt.%) ・水蒸気圧力(kPa) ・熱膨張ひずみ

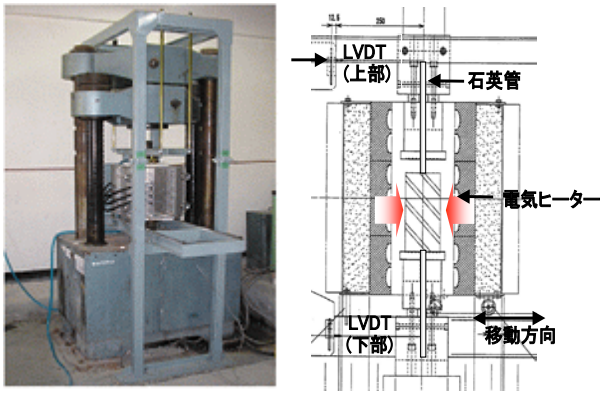
表－2　コンクリートの調合

ID	W/B (%)	S/a (%)	Air (%)	単 位 量 (kg/m³)					
				W	C	BFS	SF	S	G
30M	55	45	4±2	185	336	-	-	797	956
50M	40			175	437			770	924
70M	33			165	475		25	792	950
90M	23		2±1	160	508	104	83	708	849
110M	18			160	596	133	133	617	740

*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 ポスコ建設 建築事業本部 部長（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
高炉スラグ	密度：2.97g/cm^3，比表面積：6,000cm^2/g
シリカフューム	密度：2.57g/cm^3，比表面積 ：200,000cm^2/g
粗骨材	花崗岩砕石 (最大寸法：13mm，密度:2.7g/cm^3，吸水率：0.9%)
細骨材	海砂(密度：2.65g/cm^3，吸水率：1.0%)
混和剤	高性能減水剤(ポリカルボン酸系)



図－2 載荷及び加熱装置

2.2 試験体の作製及び養生方法

圧縮強度及び加熱速度によるコンクリート内部の水蒸気圧力を評価する試験体は 断面 100×100mm，高さ 200mm の角柱型とした。圧力測定用金属管はコンクリートを打ち込む前に試験体の表面から 30mm，50mm の位置に設置した。また,圧縮強度を評価するコンクリート試験体は「KSF 2403 コンクリートの強度試験用試験体作製方法」に準じ，Φ100×200mm の円柱型試験体で作製した。

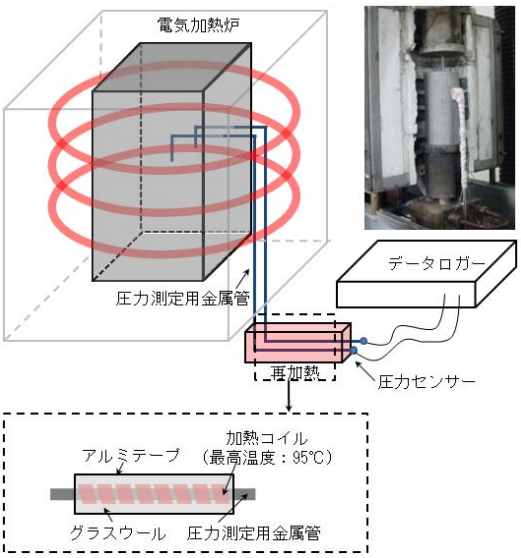
試験体の養生方法は，作製後約 24 時間で脱型し，7 日間標準水中養生を行なった後，温度 20℃，60%R.H.の恒温恒湿室で材齢 56 日間の気乾養生した後，加熱試験を行った。

2.3 試験方法

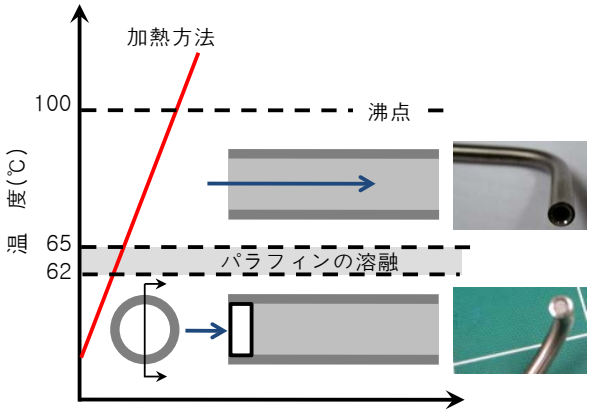
(1) コンクリートの加熱試験方法

図－2 に載荷及び加熱装置の概要を示す。2000kN 級 UTM 載荷装置に電気加熱炉を設置して,荷重を載荷した状態で試験体の加熱が可能な装置である。本研究では、非載荷状態で加熱試験を行った。コンクリート試験体の変形は加熱炉上下部を通じて設置した石英管の変化をキャンチレバー形 LVDT 変位計により測定した。

コンクリート試験体の加熱は**図－1** のように 900℃まで急速及び低速加熱を行った後，爆裂性状と熱膨張ひずみを評価した。また，加熱後 24 時間まで冷却して式(1)により重量減少率を算出した。



図－3 水蒸気圧力評価方法



図－4 パラフィンによる金属管の開閉方法

$$\text{重量減少率} = W_{spalling} / W_{initial} \qquad (1)$$

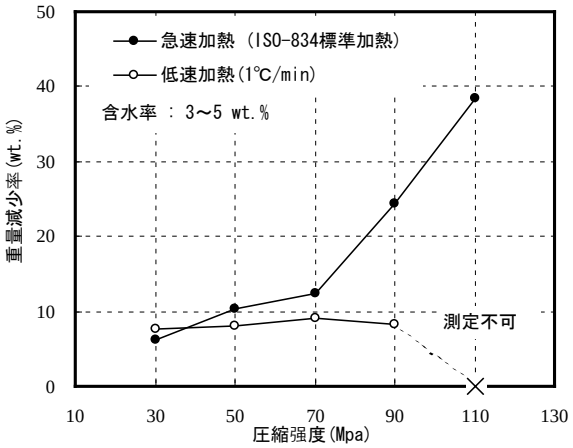
ここで，$W_{spalling}$：爆裂によるコンクリート重量減少量 (g)
$W_{initial}$ ：加熱前の試験体重量 (g)

(2) コンクリート内部の水蒸気圧力評価方法

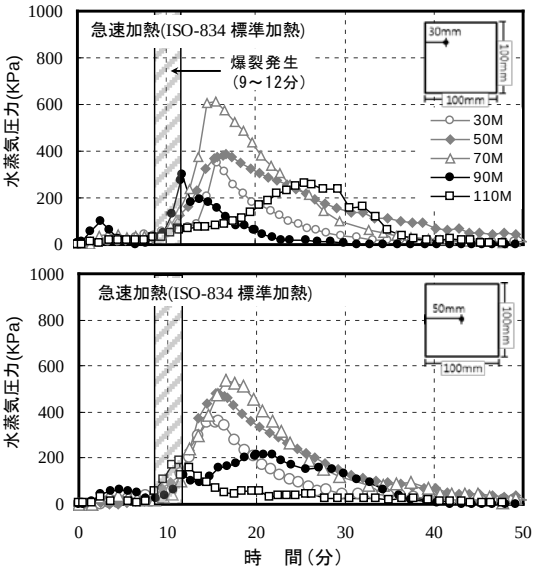
図－3 にコンクリート内部の水蒸気圧力評価方法を示す。水蒸気圧力を測定するためコンクリート内部に圧力測定用金属管を挿入した。圧力測定用金属管(内法 :1mm, 外法 :2mm)は耐熱性のある SUS304 材質を使用した。管の内部に圧力伝達媒体を充填していない，コンクリート内部で発生した水蒸気圧力が圧力測定用金属管の未端に設置した圧力センサーを通じて圧力が測定されるよ

表－4 加熱速度及び圧縮強度による爆裂性状

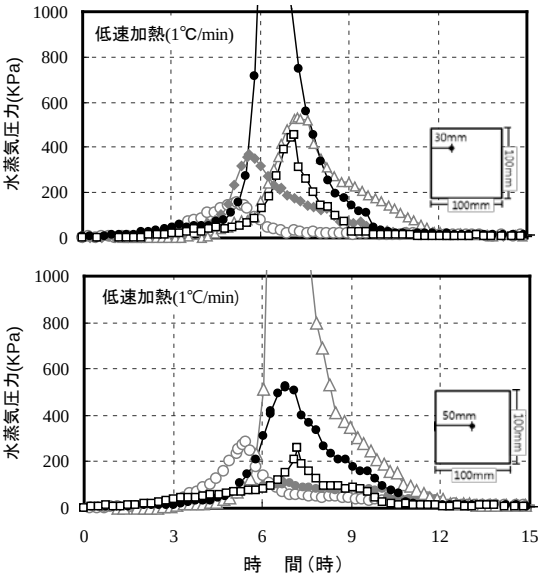
加熱速度	Specimen ID				
	30M	50M	70M	90M	110M
ISO-834					
爆裂時間	－	12 分	10 分	9 分	9 分
1℃/min					
爆裂時間	－	－	－	－	7 時間



図－5 爆裂によるコンクリート試験体の重量減少率



(a) 急速加熱(ISO-834 標準加熱)



(b)　低速加熱(1℃/min)

図－6 加熱速度によるコンクリートの内部水蒸気圧

うにした。本研究で外気に露出した圧力測定用金属管の部分では冷却によって水蒸気が凝縮するため，95℃以上に加熱した軟質の加熱コイルを利用し水蒸気圧力の損失を防いだ。

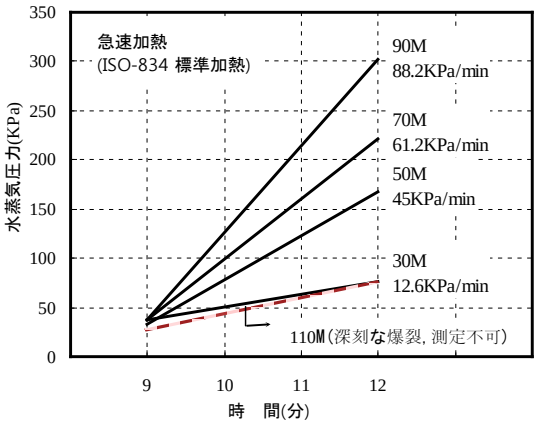
また，骨材やセメントペーストの流入によって 圧力測定用金属管の閉鎖を防止するため**図－4** に示すように溶融点 62~65℃のパラフィンを 圧力測定用金属管入口に詰め込んだ。このパラフィンは水蒸気圧力が発生する前に溶融するために水蒸気圧力の測定に影響を及ぼさなかった。

なお，コンクリート試験体から圧力測定用金属管が引き抜かれることを防止するために挿入される部分を 90°に屈曲して作製した。

3. 実験結果及び考察

3.1 コンクリートの爆裂性状

加熱速度及びコンクリートの圧縮強度による爆裂性状を**表－4** に示す。急速加熱したコンクリート試験体の場合，30M を除く全ての試験体で爆裂が発生した。50M と 70M の場合には熱伝達が集中される試験体角部で剥離が発生したが，圧縮強度が高くなるほど爆裂が激しくなり，90M と 110M は表面部まで全体的に爆裂が発生した。しかし，低速加熱したコンクリート試験体の場合は 110M を除く全ての試験体において爆裂が発生しなかっ



図－7 試験体の表面から 30mm の位置における水蒸気圧力の上昇速度

た。爆裂によるコンクリート試験体の重量減少を図－5に示す。爆裂が発生しなかった急速加熱条件の 30M と低速加熱条件の 30M~90M の試験体は 6~9%の重量が減少した。これは加熱によるコンクリート内部水分の蒸発量と判断される。急速加熱条件の 50M と 70M は重量減少率が 10~12%で比較的軽微な爆裂が発生した。爆裂が激しく発生した 90M と 110M の場合，それぞれ 25%, 39%の重量減少が発生した。また，加熱中に破壊された低速加熱条件の 110M の場合，試験体が完全破壊したため重量減少の測定が不可能であった。

3.2 コンクリートの内部水蒸気圧力

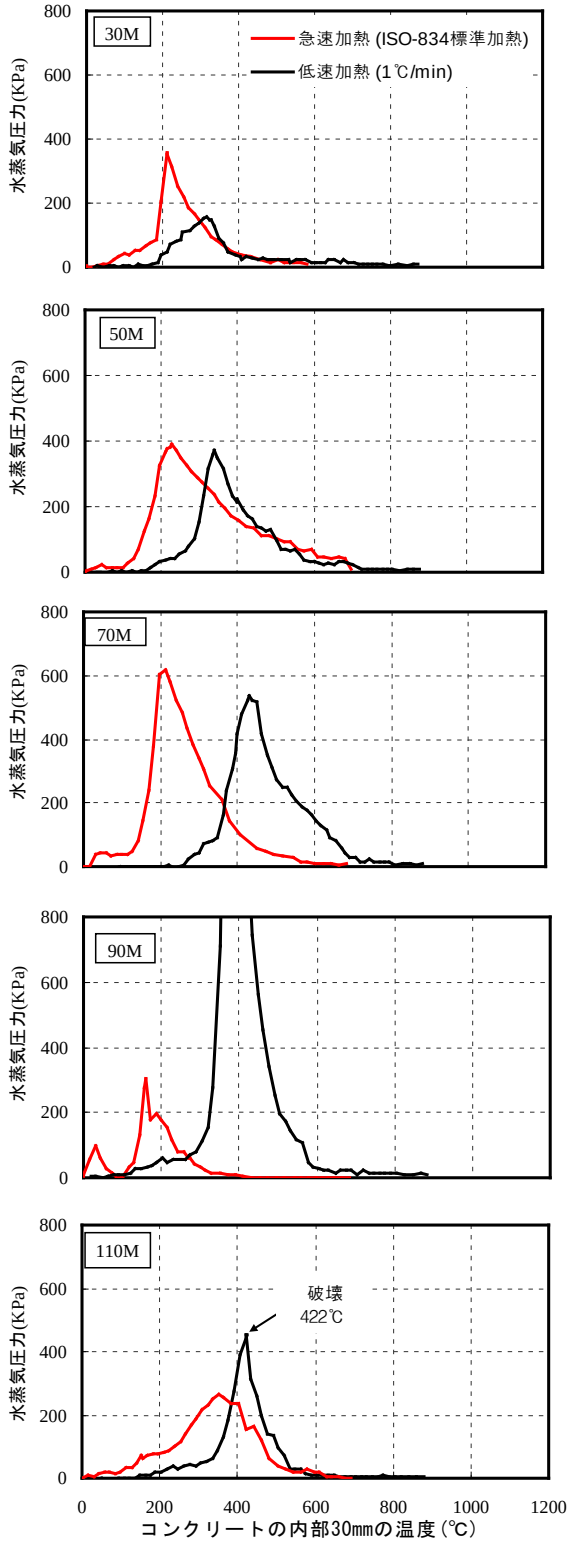
図－6 に加熱速度及び圧縮強度に対するコンクリートの内部水蒸気圧力を示す。急速加熱の場合は 30M から 70M まで，380~600KPa の水蒸気圧力が発生したが，表面部まで全体的に爆裂が発生した 90M と 110M は 300KPa 以下の水蒸気圧力が発生した。また，爆裂発生時点である加熱 9~12 分に水蒸気圧力が発生した。

低速加熱した場合，70M と 90M は内部組織が緻密であり内部水蒸気圧力が 2000~3000KPa と非常に高く測定されたが，水蒸気圧力による爆裂は発生しなかった。

本研究の小型試験体において低速加熱の場合，試験体の温度は均等であり急激な温度差により表面側に水蒸気凝縮が形成せず 70M では 50mm， 90M では 30mmの位置で最高水蒸気圧力となった。

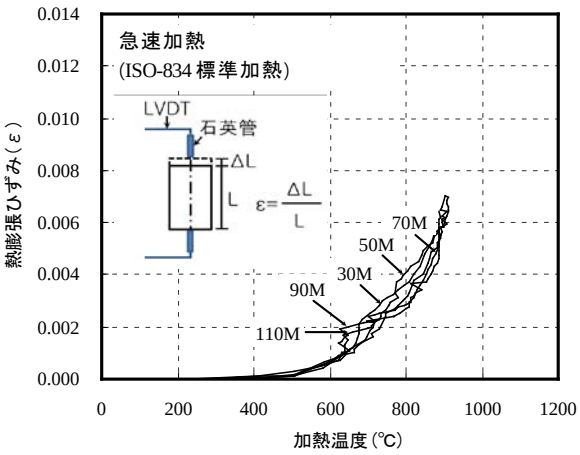
低速加熱条件 110M の場合，試験体の部分爆裂ではなく試験体の全体破壊が起こった。これは超高強度による組織の緻密性と脆性に起因するためだと思われる。

図－7 に急速加熱したコンクリート試験体の表面 30mm 深さで爆裂が発生した 9~12 分の間の水蒸気圧力の初期上昇速度を示した。爆裂が発生しない 30M は，12.6KPa/min 速度で水蒸気圧力が上昇し，軽微な爆裂が発生した。50M 及び 70M は，それぞれ 45.0, 61.2KPa/min

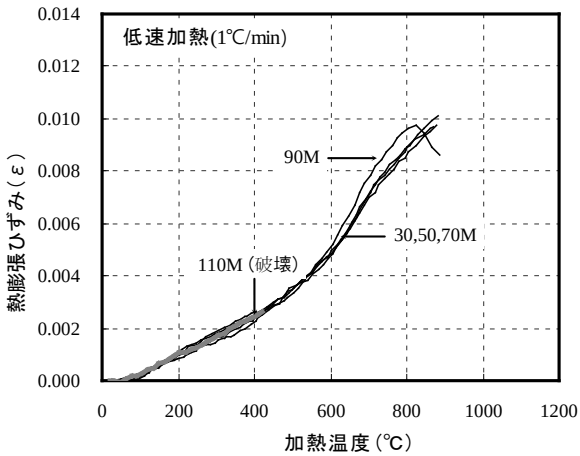


図－8 試験体の表面から 30mm の位置における加熱速度及び圧縮強度による水蒸気圧力

の速度で水蒸気圧力が上昇した。爆裂が激しく発生した 90M は 88.2KPa/min で初期に急激に水蒸気圧力が上昇する結果を示したが，110M は加熱初期から爆裂が継続的に発生して 30mm で表面水蒸気圧力の上昇が 16.2KPa

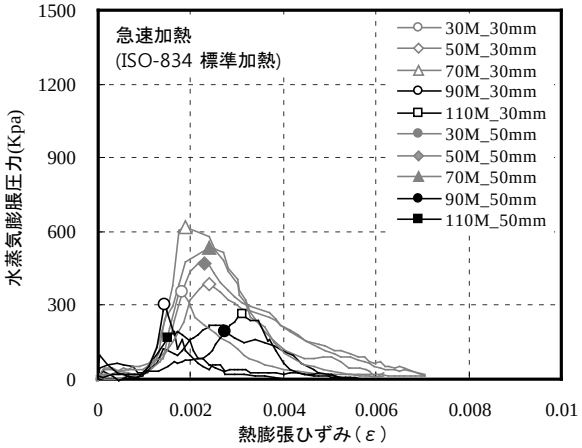


(a)　急速加熱(ISO-834 標準加熱)

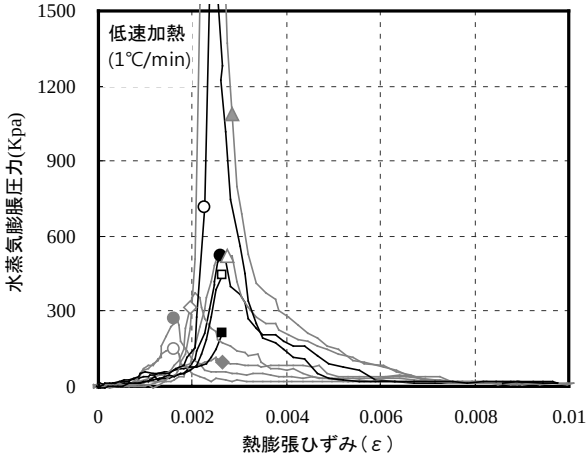


(b)　低速加熱(1℃/min)

図－9 加熱速度によるコンクリートの熱膨張ひずみ



(a)　急速加熱(ISO-834 標準加熱)



(b)　低速加熱(1℃/min)

図－10 加熱速度による熱膨張ひずみと内部水蒸気圧力

/min 程度で低くなった。全般的にコンクリートの圧縮強度が大きくなるほど初期の表面水蒸気圧力の上昇速度が高かった。

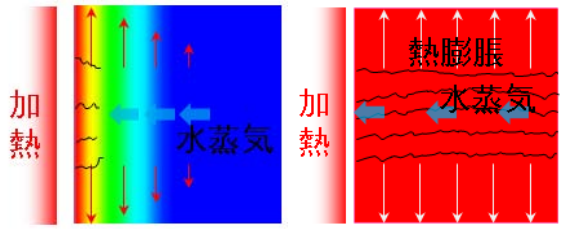
図－8 に加熱速度及び圧縮強度による内部の 30mm で水蒸気圧力を示した。急速加熱の場合は加熱直後から水蒸気圧力が発生し 100℃以後に急激に上昇し，200~250℃で最高圧力を示した。しかし，低速加熱の場合，200℃で水蒸気圧力が発生し 350~400℃で最高値を示した。急速加熱の場合，表面部の温度が急激に上昇し，30mm で水蒸気圧力が低速加熱条件よりも約 100℃低い温度で発生し，最高圧力も約 200℃低い温度で発生した。

これより，急速加熱によって初期に発生した表面水蒸気圧力がコンクリートの爆裂発生に影響を及ぼすために爆裂の危険が増加し，これは爆裂性状の評価を通じても確認することができる。

3.3 コンクリートの熱膨張ひずみと内部水蒸気圧力

加熱速度によるコンクリート試験体の熱膨張ひずみを**図－9** に示した。急速加熱したコンクリート試験体の場合，加熱温度 400℃以後に熱膨張ひずみが発生して加熱終了時まで約 0.007 の熱膨張ひずみを示した。90M, 110M の場合，爆裂が激烈に発生する 600~700℃間で爆裂による衝撃によって非線形的に挙動する傾向を示した。一方，低速加熱したコンクリート試験体の場合，加熱と同時に熱膨張ひずみが増加し爆裂が発生しない 30~90M は最終的に 0.01 の熱膨張ひずみを示した。しかし，110M の場合は加熱温度 400℃で破壊し，0.0027 の熱膨張ひずみを示した。内部水蒸気圧力と熱膨張ひずみの関係を**図－10** に示した。圧縮強度及び加熱速度に関わらず，コンクリート試験体は熱膨張ひずみ 0.002~0.003 の間に最高水蒸気圧力になった。熱膨張ひずみ 0.002 以上で熱膨張によってひび割れを通して，コンクリート内部の水蒸気が外部に排出し，水蒸気圧力が低くなると考えられる。

加熱速度によるコンクリート試験体の熱膨張ひずみの評価から急速加熱したコンクリート試験体は加熱温



(a) 急速加熱 (ISO-834 標準加熱)　　(b) 低速加熱 (1℃/min)

図－11 熱膨張ひずみによる水蒸気の放出

度 700℃以上で，低速加熱した場合は加熱温度 400℃以上で熱膨張ひずみ 0.002 になることを確認した。急速加

熱したコンクリート試験体の場合は表面の温度上昇が早くなり，試験体の内外部の温度差が大きく発生する。したがって，内部コンクリートが表面部コンクリートの熱膨張を拘束し，内外部熱応力差が生じて全体的な熱膨張ひずみが低くなる。低速加熱したコンクリート試験体は内外部の温度が均等に上昇し，熱膨張ひずみが急速加熱より大きくなった。

熱膨張ひずみと水蒸気圧力の関係から低速加熱したコンクリート試験体は，内部の水蒸気が熱膨張ひずみによってひび割れを通じて放出される。急速加熱の場合は熱膨張ひずみによってひび割れが発生せずに，コンクリート内部は凝縮した水蒸気の放出が抑制されるために，爆裂が発生すると考えられた。

4. まとめ

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を評価した結果は以下の通りである。

(1) 急速加熱したコンクリート試験体は，最高水蒸気圧力が加熱時間 10~20 分，加熱温度 700℃になり，低速加熱した場合は加熱時間 6~8 時間，加熱温度 400℃になることが分かった。

(2) 加熱速度に関わらず，コンクリートの内部水蒸気圧力は熱膨張ひずみ 0.002 以上で最高水蒸気圧力に到達後，減少することを確認した。

(3) 急速加熱したコンクリートは内外部の温度差によって熱膨張ひずみの遷移帯が形成され，内部のコンクリートが表面部の熱膨張ひずみを拘束し，全体的な熱膨張ひずみが低速加熱条件と比べて小さくなった。

(4) 低速加熱条件の場合は試験体の内外部の熱応力がほぼ均等であり，水蒸気の発生時に熱膨張ひずみによってひび割れが発生することによって爆裂が生じなかったと考えられる。

謝辞

本論文は教育科学技術部と韓国研究財団の地域革新人力養成事業(2012H1B8A2025606)の支援を受けて遂行された研究です。

参考文献

1) Yufang Fu, Lianchong Li, " Study on mechanism of thermal spalling in concrete exposed to elevated temperatures", Materials and Structures original article, vol. 44, 2011, pp.361～376

2) Mugume Rodgers Bangi, Takashi Horiguchi, " Pore pressure development in hybrid fibre-reinforced high strength concrete at elevated temperatures", Cement and Concrete Research, vol. 41, 2011, pp.115～1156

3) Jean-christophe mideguia, Pierre Pimienta, Albert Noumowe, Mulumba Kanema, " Temperature, pore pressure and mass variation of concrete subjected to high temperature - Experimental and numerical discussion on spalling risk", Cement and Concrete Research, vol. 40, 2010, pp.477～478

4) Long T.Phan, " Pore pressure and explosive spalling in concrete", Materials and Structures original article, vol. 41, 2008, pp.1623～1632

5) Jeongwon Ko, Takafumi Noguchi, Dongwoo Ryu, " The spalling mechnism of high-strength concrete under fire", Magzine of Concrete Research, vol. 63, 2011, pp.357～370

6) G.R. Conzolazio, M.C. Mcvay, J.W. Rish III, "measurement and prediction of pore pressures in saturated cement mortar subjected to radiant heating", ACI materials Journal, vol. 95, 1998, pp,525～536

7) Hertz KD, "Limits of spalling of fire-exposed concrete", Fire Safety Journal, Vol. 38, 2003, pp. 103～116

8) RILEM TC 129-MHT 「Part 3 - Compressive strength for service and accident conditions」