

論文 拘束リング試験法を適用したコンクリートの高温環境下における耐爆裂性評価に関する基礎的研究

谷辺 徹^{*1}・小澤 満津雄^{*2}・鎌田 亮太^{*1}・六郷 恵哲^{*3}

要旨: コンクリートが高温に曝される際の爆裂現象のメカニズムおよびその評価方法について検討を行った。鋼製拘束リングにコンクリートを充填した供試体をRABT加熱曲線で1面加熱試験を実施し、加熱中の熱応力、水蒸気圧の測定および爆裂現象の観察を実施した。本法により加熱を受けるコンクリートの熱応力が測定可能であり、爆裂発生時点での熱応力は水蒸気圧より卓越していることが確認された。また、推定した最大熱応力はコンクリートの推定残存強度と同等の値を示し、圧壊による爆裂の可能性が確認された。加熱後の爆裂深さおよび残存強度特性の評価や加熱劣化状況の観察も実施し、評価方法に関する課題を抽出した。

キーワード: 爆裂, 水蒸気圧, 熱応力, 拘束, リング, RABT加熱曲線, 残存強度

1. はじめに

コンクリートは火災などで急激に高温に曝された場合に爆裂現象が生じることがあり、高強度、高含水なほど発生しやすいとされている¹⁾。また、この爆裂現象の発生原因として、コンクリート中の水蒸気圧、熱膨張の拘束応力や温度分布に起因する熱応力が影響していると報告されている¹⁾。しかし既往の文献では、水蒸気圧測定結果から爆裂現象を評価している例は多数報告されているが^{2),3)}、熱応力測定結果と併せて爆裂現象を評価した報告例は少ない。

そこで筆者らは、水蒸気圧の測定に加え、熱応力を測定し、爆裂現象の発生原因とされている両要因からそのメカニズムを検証することを目的に、拘束リングを用いて熱応力を発生させ、その熱応力を測定して爆裂現象を評価する拘束リング試験法に関する研究を進め、その結果の概要を報告している^{4),5)}。

本報では、拘束リングの試験の結果を加熱後のコンクリートの劣化状況の評価も含めて詳細に報告する。

2. 拘束リング試験による熱応力評価方法

2.1 熱応力測定方法の概要

図-1に熱応力測定方法の概要図を示す。コンクリートが充填された2段重ねの鋼製拘束リング供試体のリング表面にひずみゲージと熱電対を設置して供試体とする。本供試体の下面コンクリート部の1面を加熱することでコンクリートの熱膨張が拘束リングにより拘束され、コンクリートに熱応力が発生する。この熱応力は、拘束リングがコンクリートを拘束する応力として、拘束リングのひずみ値から内圧を受ける円筒モデルに基づき算出することが可能である。

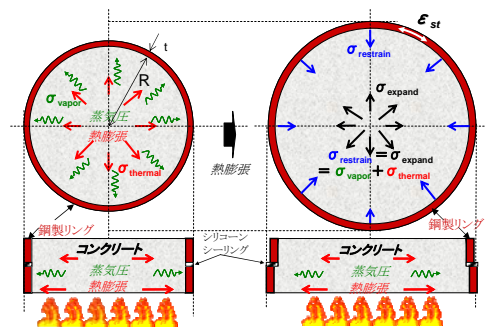


図-1 熱応力測定方法の概要図

$$\sigma_{\text{expand}} = \frac{(\epsilon_{\theta} + \nu \epsilon_z)}{1 - \nu^2} E \left(\frac{t}{R} + \frac{t^2}{2R^2} \right) \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{expand}} = \frac{(\epsilon_{\theta} + \nu \epsilon_z)}{1 - \nu^2} E \frac{t}{R} \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{expand}} = \epsilon_{\theta} E \frac{t}{R} \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{expand}} = \sigma_{\text{restrain}} = \sigma_{\text{vapor}} + \sigma_{\text{thermal}} \quad (4)$$

σ_{restrain} : 拘束応力	ϵ_z : 軸方向ひずみ
σ_{expand} : 熱膨張圧	t : リング肉厚
σ_{vapor} : 水蒸気圧	E : リング材ヤング係数
σ_{thermal} : 熱応力	ν : リング材ポアソン比
ϵ_{θ} : 円周方向ひずみ	R : リング内径

2.2 円筒モデル

円筒モデルでは、厚肉の円筒については式(1)、薄肉の円筒については式(2)が成立し、膨張セメントや静的破砕剤の膨張圧測定に厚肉円筒モデル^{6),7)}、膨張コンクリートの膨張圧測定に薄肉円筒モデル⁸⁾の適用例が報告されている。何れの報告も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だけでなく軸方向ひずみも付加して膨張圧を求めている。

*1 太平洋マテリアル (株) 開発研究所 (正会員)

*2 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 助教 博士(工学) (正会員)

*3 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 工学博士 (正会員)

2.3 軸方向ひずみ

円筒モデルでは、円筒に生じる内圧は等分布であるが、本試験法では軸方向に温度勾配が生じるため、圧力勾配や内部拘束など軸方向の挙動を考慮する必要がある。しかし、本報では加熱時のコンクリートの熱応力を測定し、水蒸気圧や爆裂現象との関係を把握する簡易法の検討と位置付け、水平方向の挙動のみで熱応力を評価することを試みることにした。

なお、本供試体はリングの肉厚が内径に対し十分に薄いため薄肉円筒モデルを適用し、熱応力は過小評価となるが軸方向ひずみの影響を考慮しない式(3)を用いて熱応力を算出することとした。

また本報では、式(4)に示す通りコンクリートの膨張圧を熱応力と水蒸気圧の合力として、拘束リングによる拘束応力と等しいとし、拘束応力と水蒸気圧を測定することで熱応力を算出することとした。

部および拘束リング外周面に設置して計測した。なお、測定位置は加熱面から 5,10,20,30,40,50mm のコンクリート内部と加熱面から 25,75mm の上段、下段リングそれぞれの中心位置の拘束リング外周側面部とした。

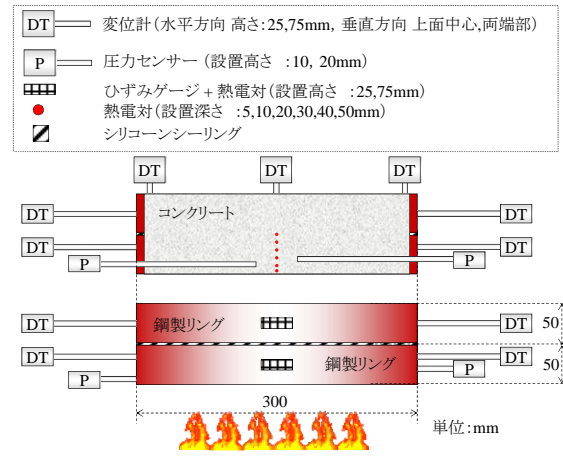


図-2 供試体概要図

3. 加熱試験概要

3.1 供試体

図-2 に供試体の概要を示す。拘束リングの内部に蒸気圧測定用のステンレスパイプ（外径 5mm，内径 2mm）を 2 箇所，温度測定用の熱電対を 6 箇所に設置し、コンクリートを充填して供試体とした。供試体仕様の詳細を以下に示す。なお、供試体数は 2 体とした。

(1) 拘束リング

外径 300×高さ 50×肉厚 8mm の鋼製リングを 2 段重ねにして、外径 300×高さ 100×肉厚 8mm の拘束リングとした。

(2) コンクリート

充填したコンクリートの配合を表-1 に示す。また、加熱試験時（材齢約 2 ヶ月）の強度特性および含水率を表-2 に示す。なお、供試体の養生は、試験に供するまで 20℃の封緘養生とした。

3.2 加熱条件

加熱条件はコンクリートの爆裂現象に大きく影響するが、本研究では急速加熱条件での性状を評価するため、我国の土木分野のトンネル構造物の耐火性評価に一般的に適用されている RABT 加熱曲線（5 分間で 1200℃昇温，1200℃を 30 分まで保持，その後 110 分間で常温まで徐冷）を採用した。

3.3 測定項目

(1) 供試体温度

供試体の各部温度は、K 型熱電対をコンクリート内

表-2 コンクリートの強度特性および含水率

圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	含水率 (%)
90	42	5.5	3.1

(2) 水蒸気圧

コンクリート内部の水蒸気圧はコンクリート内部に設置したステンレスパイプにジャッキオイルを充填した後、圧力センサー（許容値：10MPa）を接続して測定を行った。なお、測定位置は加熱面から 10mm と 20mm の 2 箇所とした。

(3) 拘束リングのひずみ

コンクリートの熱応力を算出するため、拘束リングに自己温度補償型ひずみゲージを設置し、拘束リングのひずみを測定した。測定位置は加熱面から 25,75mm の上段、下段リングそれぞれの中心位置とした。

(4) 供試体水平変位

加熱試験中の供試体の外径寸法の変化を測定するため、供試体水平変位を変位計（感度：1000 μ/mm）にて測定した。なお、測定位置は加熱面から 25,75mm 位置の上段、下段リングそれぞれの中心位置とした。

(5) 供試体垂直変位

加熱試験中の供試体の垂直方向の変形を把握するため、供試体垂直変位を変位計にて測定した。なお、測定位置は、供試体上面（非加熱面）の中心を通る直線上に 3 点（中心および両端部付近）とした。

表-1 コンクリートの配合 (kg/m³)

W/C	水	セメント	細骨材	粗骨材 1 (<15mm)	粗骨材 2 (<25mm)	SP.
0.3	132	440	814	524	524	8.8

細骨材（木曽川水系，吸水率：1.64%，絶乾密度：2.56t/m³），SP.（ポリカルボン酸系）
粗骨材 1（木曽川水系，吸水率：1.42%，絶乾密度：2.58t/m³），粗骨材 2（木曽川水系，吸水率：1.34%，絶乾密度：2.52t/m³）

4. 加熱試験結果

2 供試体の加熱試験を実施した。2 体とも各測定項目において同様な結果となったため、本報では代表する 1 供試体の結果について記載することとする。

4.1 爆裂現象観察

加熱開始後 4 分程度から爆裂が開始し、10 分程度まで継続していることが確認された。本報ではこの 4 分から 10 分までの間の現象を議論することとした。

4.2 温度、水蒸気圧およびひずみ測定結果

(1)各部温度

図-3 に炉内温度測定結果を示す。炉内温度はバラツキも小さく、RABT 加熱曲線を良く再現できていることが確認された。

図-4 にコンクリート温度測定結果を示す。コンクリートは爆裂現象の影響を受けて深さ方向に徐々に測定不能になり、試験終了まで計測できたのは深さ 50mm 位置のみで、1000℃程度まで上昇していることが確認された。

図-5 に拘束リング温度測定結果を示す。拘束リング温度は、爆裂現象が発生している 10 分までであれば、下段の 25mm 位置は 75℃、上段の 75mm 位置は 25℃程度で、80℃以下であることが確認された。これより自己温度補償型ひずみゲージの使用温度範囲であることが確認された。なお、最高温度は 25mm 位置で 350℃、75mm 位置で 250℃程度まで上昇していることが確認された。

(2)水蒸気圧

図-6 に水蒸気圧測定結果を示す。深さ 10mm および 20mm 位置の水蒸気圧は爆裂現象の開始とほぼ同時に上昇し、最大圧力は 10mm 位置が約 0.2MPa、20mm 位置が約 0.3MPa を示した。また、20mm 位置は 10mm 位置より 1 分程度遅れて圧力が上昇していることが確認された。

ここで、図-7 に水蒸気圧とコンクリート温度の関係と飽和水蒸気曲線との比較を示す。Kalifa らも水蒸気圧について、飽和蒸気圧曲線や気体の状態方程式の観点から整理した結果を報告し⁹⁾、その関連性に注目しているが、本結果も爆裂現象の途中までは測定された水蒸気圧は飽和蒸気圧曲線に良く整合していることが確認された。

これは爆裂現象や熱劣化によるマイクロクラックの影響を受けるまでは、細孔内の自由水は飽和状態を保ち、その後、マイクロクラックの形成により水蒸気が加熱面から放出、もしくは非加熱面側の低温部の細孔へ拡散することにより、圧力低下が生じたと考えられる。よって、水蒸気圧の大きさには温度と自由水量に加え、マイクロクラックの発生時期が大きく影響していると推察される。

(3)拘束リングひずみ

図-8 に拘束リングひずみの測定結果を示す。深さ 25mm 位置は加熱開始と同時に膨張ひずみが計測され、加熱開始後 10 分では 500μ を示した。また、75mm 位置

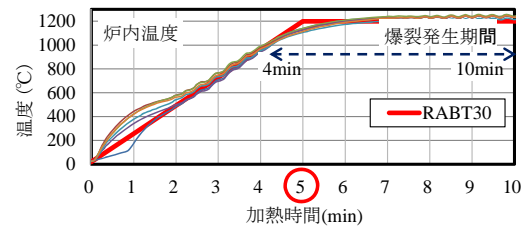


図-3 炉内温度測定結果

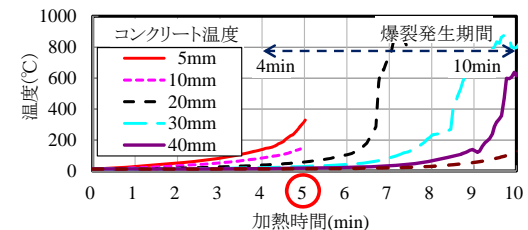


図-4 コンクリート温度測定結果

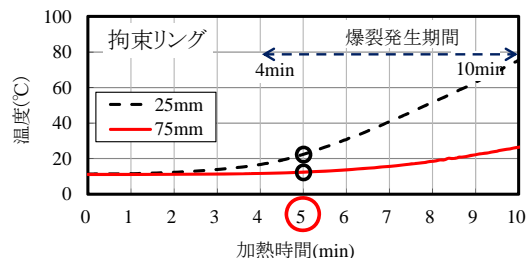


図-5 拘束リング温度測定結果

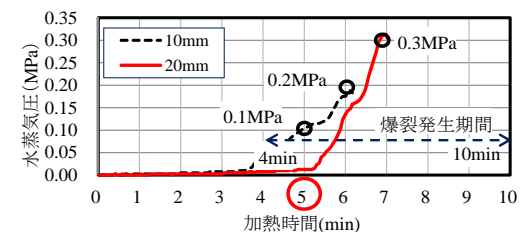


図-6 水蒸気圧測定結果

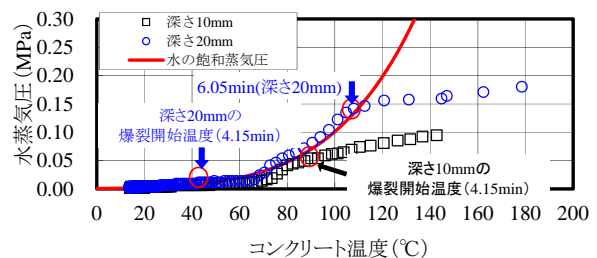


図-7 水蒸気圧とコンクリート温度の関係

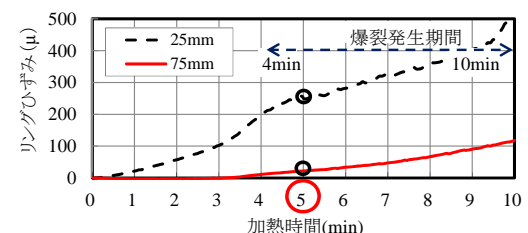


図-8 拘束リングひずみ測定結果

では加熱開始後 3 分程度から膨張ひずみが計測され、加熱開始後 10 分では 100 μ を示した。

(4)供試体変位

図-9(a)に水平変位測定結果を示す。加熱により供試体の 25mm 位置の水平方向の外径は徐々に増大し、5 分時点で 0.06mm 程度の増大量を示した。これより、コンクリートの熱膨張を拘束リングが拘束し、コンクリートに拘束応力（熱応力）が生じていることが確認された。

図-9(b)に垂直変位測定結果を示す。爆裂現象が激しくなる 6 分程度までは、コンクリートの熱膨張をリングが拘束し、曲げ変形していることが確認された。

4. 熱応力の算出

4.1 拘束応力の算出

拘束リングひずみ測定結果から式(3)を用いて算出した拘束応力と加熱時間の関係を図-10 に示す。なお、計算には、メーカー添付の温度補正データを用いて温度補正を行ったひずみ値を適用した。その結果、加熱開始後 10 分で、深さ 25mm は約 6MPa、深さ 75mm は 1.5MPa の拘束応力が算出された。

4.2 熱応力の算出

計測された拘束応力および水蒸気圧から式(4)を用いて熱応力を算出する。ここで、爆裂現象開始付近の応力状態を把握するため、加熱開始後 5 分のポイントで評価することとした。

この 5 分時点では拘束応力が深さ 25mm 位置で 3MPa を示しているのに対し、水蒸気圧は深さ 10mm 位置 0.1MPa、20mm 位置ではほぼゼロであり、水蒸気圧は拘束応力に対して十分に小さいことが確認された。このため本報では、式(3)より熱応力は拘束応力と等しいとして扱うこととした。また、拘束リングの拘束応力によりこの爆裂現象が発生しているとするとその主要因は、コンクリートの熱膨張が拘束リングに拘束されて生じた熱応力であることも確認された。

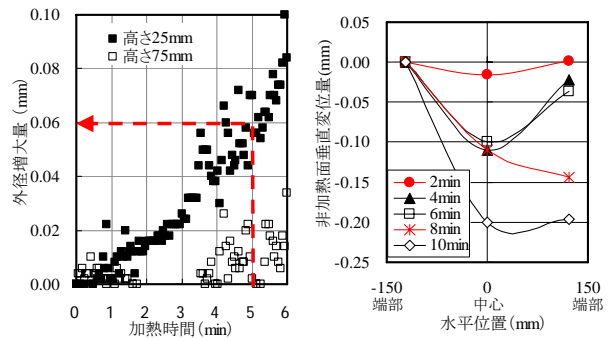
4.3 最大熱応力の推定

本加熱試験で計測した熱応力は、爆裂現象開始時点の加熱開始後 5 分、深さ 25mm 位置で 3MPa となった。しかし、より高い応力状態になっていると推察される加熱表面付近の熱応力を把握することは爆裂現象への熱応力の影響を確認するためにも重要である。そこで、加熱表面付近のコンクリート温度を熱伝導解析にて求め、コンクリート温度と熱応力は比例関係にあると仮定して加熱表面付近の熱応力を推定することとした。また更にはそのコンクリート温度からコンクリートの残存強度を推定し、熱応力との比較を試みた。

(1)温度推定

市販の解析ソフト(ADINA)にて 2 次元熱伝導解析を実

施し、加熱開始後 5 分での供試体のコンクリート温度の推定を行い、コンクリート深さと温度の関係を計測値と比較した。解析条件を表-3、解析モデルを図-11、そして解析結果を図-12(a)に示す。5 から 50mm 深さの解析値は計測値に良く一致し、加熱表面のコンクリート温度は 520 $^{\circ}$ C程度と推定された。なお、解析にはコンクリートおよび鋼材の熱特性にそれぞれ、ユーロコード 4¹⁰⁾と日本建築学会鋼構造設計指針¹¹⁾の値を適用した。



(a)外径増大量の推移 (b)垂直変位の推移

図-9 供試体変位測定結果

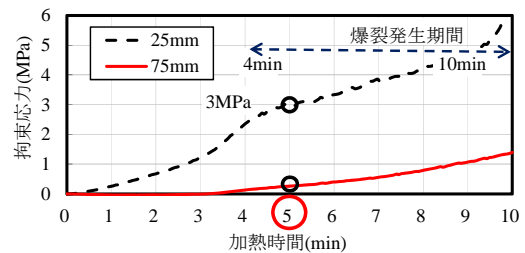


図-10 拘束応力と加熱時間の関係

表-3 解析条件

加熱条件		RABT30
鋼材	熱伝導率 W/m \cdot K	51.91-5.03 \cdot 10 ⁻⁵ \cdot T ²
	熱容量 J/m ³ \cdot K	7.85(0.482 + 7.995 \cdot 10 ⁻⁷ \cdot T ²)
コンクリート	含水率%	3.1 (測定値)
	熱伝導率 W/m \cdot K	2-0.24(T/120)+0.012(T/120) ²
	熱容量 J/m ³ \cdot K	2300(900+80(T/120)-4(T/120) ²)
境界条件	熱伝達係数 W/m ² \cdot K	150 (加熱面)
		断熱条件 (その他)

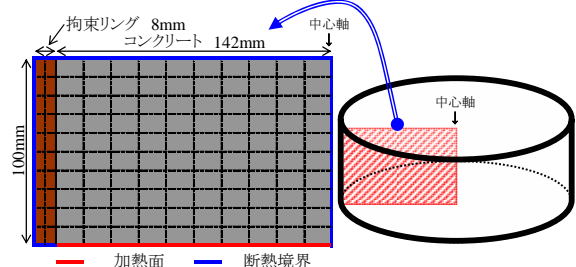


図-11 解析モデル

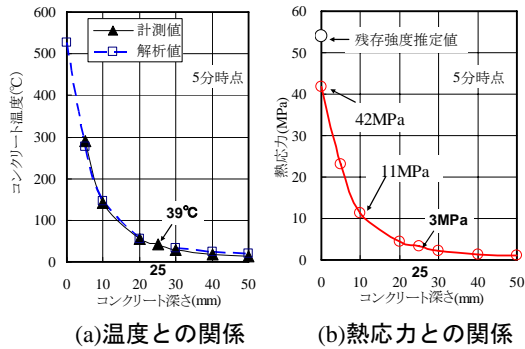


図-12 コンクリート深さと温度，熱応力の関係

(2)熱応力推定および残存強度との比較

コンクリート温度と熱応力は比例すると仮定し，加熱開始後 5 分でのコンクリート深さと熱応力の関係を 25mm 位置の 3MPa, 39°C 条件を基に推定した結果を図-12(b)に示す。また，ユーロコードの受熱温度と残存強度の関係から推定した加熱表面のコンクリート残存強度も図-12(b)に示す。これより，加熱開始後 5 分で水蒸気圧測定の高さ 10mm 位置で発生している熱応力は 11MPa, 加熱表面は 42MPa と推定され，推定されたコンクリート残存強度の 54MPa (500°C, 常温強度×0.6) に近い値を示すことが確認された。熱応力や残存強度の推定精度は議論の余地があるが，本検証から高温に加熱されたコンクリートの爆裂現象が熱応力による圧壊が主要因である可能性が高いことが確認された。

5. 加熱後の劣化状況の評価

5.1 劣化状況評価の概要

高温に曝されるコンクリートの耐爆裂性の評価方法においては，加熱時の応力状態の把握の他に加熱後の残存強度特性と劣化状況の評価方法の検討も重要である。そこで，加熱試験に供したコンクリートの劣化状況の評価方法として以下の検討を行った。

5.2 爆裂規模評価

コンクリートの爆裂規模を評価するため，加熱冷却後の最大爆裂深さおよび爆裂深さ分布を測定した。図-12に爆裂深さ分布，写真-1に爆裂状況を示す。加熱後供試体の加熱面に 20mm 角のグリッド線を描き，その交点の非爆裂面からの欠損深さ（爆裂深さ）を厚み計にて計測した結果，最大爆裂深さは 62mm となり供試体厚みの 6 割もの断面欠損が確認された。爆裂状況や爆裂深さ分布から供試体中央部ほど爆裂深さが大きく中央部の熱応力が高いことが推察された。

5.3 残存強度評価

加熱後のコンクリートの残存強度特性を評価するため，φ25mm の小径コアを垂直方向（加熱面に垂直）に中心付近から 3 本，外周部付近から 3 本，合計 6 本採取

り，同じ深さ位置となる様，非加熱面側から高さ 40mm 程度に切断して強度特性評価用のコア供試体とした。写真-2 に超音波伝播速度および圧縮試験測定状況を示す。なお，超音波伝播速度は東横エルメス社製のエルソニック II を用いて超音波伝播時間を測定し，供試体高さで除して速度を求めた。

含水率管理用 φ50×100mm 非加熱円柱供試体を基準として評価した結果を図-13 に示す。コア供試体は基準供試体に対して超音波伝播速度が 10%，圧縮強度が 20% 程度の低下であった。また，中央部と外周部に顕著な差がなく，爆裂深さ分布から推察される中央部の高い熱応力や受熱温度の影響も残存強度からは認められなかった。

本コア試験では，深さ方向の影響などを考慮できていないことが課題として挙げられる。

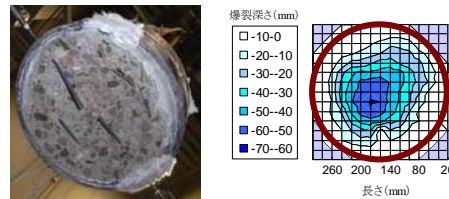


写真-1 爆裂状況 図-12 爆裂深さ分布

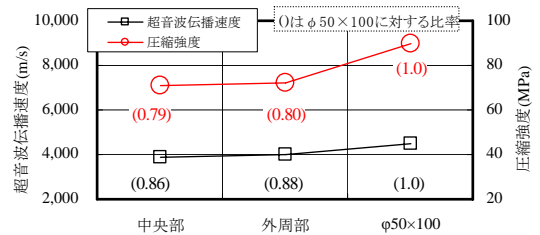


図-13 強度特性評価結果

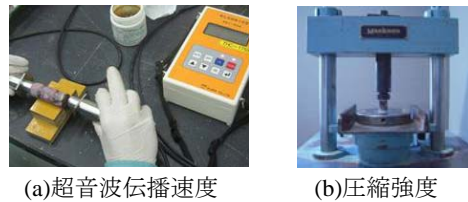


写真-2 強度特性試験状況

表-4 受熱温度評価結果

フェノールフタレイン		示差熱分析	
NO.	非発色深さ	試料採取位置	ピーク
NO.1 ~ NO.6	側面，破断面 すべて 0mm	露出面	無
		露出面から 25mm	若干有
		非加熱面	有



(側面) (断面)

写真-3 フェノールフタレイン噴霧状況

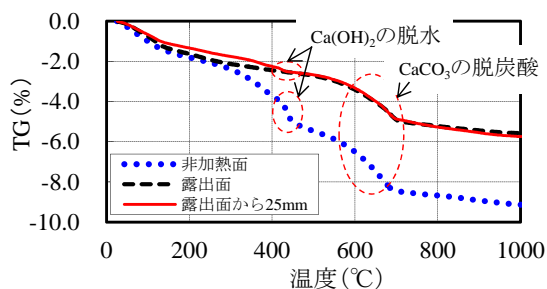


図-14 示差熱分析結果

5.4 受熱温度評価

フェノールフタレイン法と示差熱分析にてポルトランド石 ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) の分解深さにより供試体コンクリートの 450°C から 500°C 以上の受熱温度領域の測定を行った。強度特性評価用の小径コア 6 供試体を用い、側面および強度試験後の断面にフェノールフタレイン 1% アルコール溶液を噴霧し、ポルトランド石分解深さを測定した。また、示差熱分析では、供試体の爆裂後の露出面、露出面から 25mm 位置および非加熱面から試料を採取して示差熱分析を行いポルトランド石分解ピークの有無にて評価を行った。測定結果を表-4 および図-14、フェノールフタレイン法の試験状況を写真-3 に示す。

フェノールフタレイン法では、中性化領域は認められなかったため受熱温度は 500°C 以下と推察されるが、示差熱分析では、露出面から 25mm 付近まではポルトランド石の分解が進み、500°C 程度以上の受熱温度であることが推察され、評価方法による差が確認された。田嶋らの研究¹²⁾においても、フェノールフタレイン法での加熱後のコンクリートの中性化深さ測定でコンクリートの最高温度が 600°C 以下の領域では中性化が認められていないことが報告され、分解に要する時間の影響と考察している。一般的に火災加熱を受けるコンクリートの簡易的な受熱温度推定方法として広く適用されているフェノールフタレイン法であるが、より詳細な受熱温度推定による劣化評価を行う場合には示差熱分析などの併用が必要と思われる。

6. まとめ

- (1) 拘束リング試験方法を適用することで、拘束応力による爆裂現象を発生させながら水蒸気圧と熱応力を実測し、爆裂現象を評価できる可能性を見出すことができた。
- (2) 水蒸気圧の大きさには、温度およびコンクリート中に存在する水量に加えマイクロクラックの発生時期が大きく影響していると推察された。
- (3) 本試験の範囲では、計測された熱応力は水蒸気圧に比べて十分大きく爆裂の主要因であり、加熱表面付近は残存強度と同等の熱応力が発生していることが確認できた。
- (4) 更には、爆裂評価と合わせて熱劣化状況の評価として、

爆裂深さ分布、残存強度特性および受熱温度評価を実施し、熱応力の劣化状況への影響を評価するためには、断面欠損や深さ方向の温度分布の考慮など課題が多いことも確認できた。

今後は拘束リング仕様の影響、コンクリート強度や合成繊維添加の影響などのデータを蓄積し、熱応力が爆裂に及ぼす影響のメカニズムの検証を進める予定である。

謝辞

本研究は、平成 23 年度前田記念工学振興財団の補助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止対策，コンクリート工学，Vol.45，No.9，pp.87-91，2007.9
- 2) 長尾覚博，中根淳：高強度コンクリートの爆裂に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.657-662，1996
- 3) 小澤満津雄，王若平，坂昇，森本博昭：高温加熱によるコンクリートの爆裂現象に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.753-758，2007
- 4) 谷辺徹，菊地弘悦，鎌田亮太，小澤満津雄：熱応力測定によるコンクリートの爆裂評価方法に関する実験的検証，第 66 回土木学会年次学術講演会講演概要集，第 5 部門，pp.155-156，2011
- 5) Tanibe, T, et al : Explosive spalling behavior of restrained concrete in the event of fire, Proceedings of the 2nd International Rilem Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, Netherlands, Delft, pp.319-326, 2011
- 6) 小林一輔，伊藤利治：膨張セメントの膨張圧に影響をおよぼす諸要因，土木学会論文報告集，第 226 号，pp.67-72，1974.6
- 7) 原田哲夫，副田孝一，出光隆，渡辺明：静的破砕剤の膨張圧測定法と膨張圧の諸性質，土木学会論文集，No.478 号/V-21，pp.91-100，1993.11
- 8) 辻埜真人，橋田浩，湯浅竜貴，高橋圭一：膨張コンクリートの簡易拘束膨張試験方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.437-442，2011
- 9) Kalifa, P, Menneteau, F.D, Quenard, D : Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures, Cement and Concrete Research, 30, 1915-1927, 2000
- 10) CEN : Eurocode 4 Design of Composite Steel and Concrete Structure - Part1.2 Structural Fire Design, Oct.1994
- 11) 日本建築学会：鋼構造耐火設計指針，2008
- 12) 田嶋仁志，岸田政彦，神田亨：火災高温時における RC セグメントの変形挙動に関する部分模型実験，土木学会論文集 E，Vol.62 No.4，pp.844-854，2006