

# 論文 拘束リング試験法を適用した爆裂評価手法のリング標準化に関する実験的研究

谷辺 徹<sup>\*1</sup>・小澤 満津雄<sup>\*2</sup>・鎌田 亮太<sup>\*1</sup>・六郷 恵哲<sup>\*3</sup>

**要旨：**拘束リング試験を適用した爆裂評価手法のリング標準化を目的に、リング厚みの爆裂規模への影響を確認するとともに、定量的な評価のための拘束度の検討を行った。その結果、リング厚みを大きくすると爆裂深さや爆裂継続時間は増加すること、無拘束供試体と拘束供試体の半径増加量の差から求めた拘束度は、爆裂深さと高い相関を示し、供試体の拘束度合を定量的に評価可能であることが確認された。更には、リング厚みと拘束度の関係から、リング厚み 8mm とすることで拘束度が完全拘束の 1 に近い 0.8 から 0.9 の値を示すことから、本拘束リング試験におけるリングの寸法は、 $\phi 300 \times t 8 \text{mm}$  で標準化が可能と判断した。

**キーワード：**円筒モデル、高強度コンクリート、爆裂、熱応力、拘束、RABT加熱曲線、水蒸気圧

## 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(図-1)、高強度、高含水なほど発生しやすいとされている<sup>1)</sup>。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、そしてその相互作用の影響との説(図-2)が報告されている<sup>1)</sup>。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<sup>2),3)</sup>、熱応力については、解析的手法による研究が殆どであり、実験的に熱応力の影響を評価した報告例は少ない。

そこで筆者らは、熱応力の影響に着目し、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、図-3に示す本研究のフロー図に基づき、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<sup>4),5)</sup>。

本報では、フロー図に示した拘束リングの標準化(A-2)に関して、リング厚みの影響を確認するとともに標準厚みを設定したので以下に詳細を報告する。

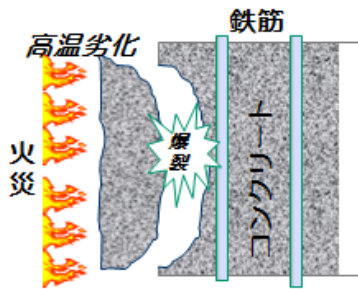


図-1 コンクリートの爆裂現象

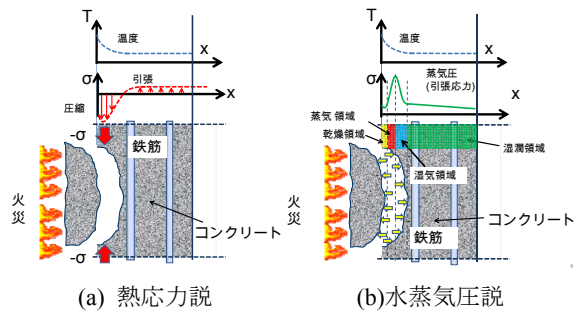


図-2 爆裂メカニズム模式図

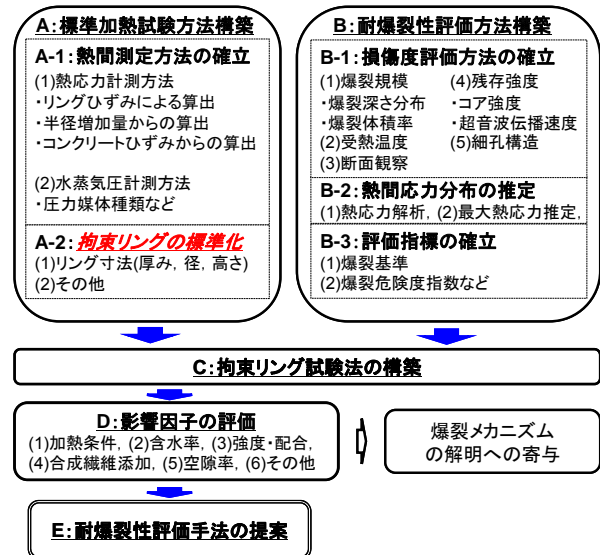


図-3 本研究のフロー図

## 2. 拘束リング試験による熱応力評価方法

図-4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下面を、リング部分を断熱しながらコンクリート部の

\*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)

み加熱することでコンクリートの熱膨張をリングが拘束し、コンクリートに拘束応力(熱応力)が発生する。この熱応力は、リングがコンクリートを拘束する応力として、拘束リング表面の円周方向ひずみから、式(1)に示す内圧を受ける円筒モデル<sup>6)~8)</sup>に基づき算出することが可能である。

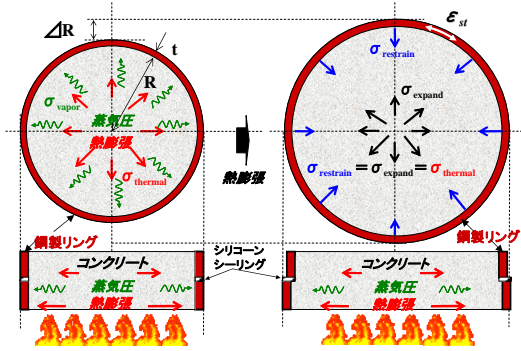


図-4 熱応力測定方法の概要図

$$\sigma_{\text{expand}} = \sigma_{\text{restrain}} = \sigma_{\text{thermal}} = \varepsilon_{\theta} E \frac{t}{R} \quad (1)$$

- $\sigma_{\text{restrain}}$  : 拘束応力
- $\sigma_{\text{expand}}$  : 熱膨張圧
- $\sigma_{\text{vapor}}$  : 水蒸気圧
- $\sigma_{\text{thermal}}$  : 熱応力
- $\varepsilon_{\theta}$  : 円周方向ひずみ
- $t$  : リング厚み
- $E$  : リング材弾性係数
- $R$  : リング内半径

### 3. 実験概要

#### 3.1 実験水準

表-1 に実験水準を示す。拘束リングの厚みの影響を確認するため、リング厚みを無拘束条件の 0mm と拘束条件の 0.5, 8, 18mm の 4 水準とした。

#### 3.2 供試体

図-5 および図-6 に供試体の概要を示す。温度測定用の熱電対を設置し、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。

##### (1) 形状寸法

無拘束供試体は、外径 284×高さ 100mm のコンクリート供試体とした。拘束供試体は、外径 300×高さ 50×厚み 0.5, 8, 18mm の鋼製リングを 2 段重ねにした、外径 300×高さ 100mm の拘束リングにコンクリートを

充填した供試体とした。

#### (2) コンクリート

コンクリートの配合を表-2 に、使用材料を表-3 に示す。また、フレッシュ性状ならびに硬化体性状を表-4 に示す。圧縮強度は、JIS A 1108 のコンクリートの圧縮試験方法、弾性係数は、JIS A 1149 のコンクリートの静弾性係数試験方法、引張強度は、JIS A 1113 のコンクリートの割裂引張強度試験方法、そして含水率は、JIS A 1476 の建築材料の含水率測定方法に準じて測定した。リング供試体を含む全ての供試体の養生は、試験に供するまで 20℃の湿布養生とした。なお、硬化体性状の試験は、表-1、表-4 に示した通り、加熱試験終了に合わせて実施した。

表-1 実験水準

NO.	リング寸法(mm)			コンクリート		加熱試験材齢(ヶ月)
	厚み	外径	高さ	外径(mm)	種類	
300-NR	0	—	—	284	A	1~2
300-0.5	0.5	300	50×2 段	299	B	3~4
300-8	8	300	50×2 段	284	B	
300-18	18	300	50×2 段	264	B	

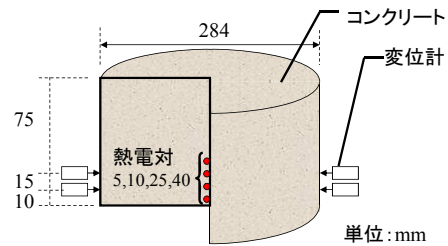


図-5 供試体概要図 (無拘束供試体)

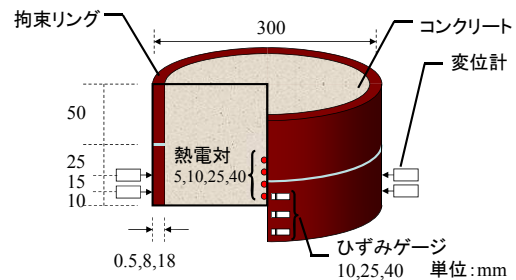


図-6 供試体概要図 (拘束供試体)

表-2 コンクリートの配合

種類	W/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
		水	セメント	細骨材	粗骨材 1	粗骨材 2	高性能減水剤
A,B	0.3	150	500	744	406	611.6	4.0 (A), 3.5 (B)

表-4 コンクリートの性状

種類	フレッシュ性状						硬化体性状				
	スランブ mm	スランブフロー(mm)			空気量 (%)	温度 (°C)	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	含水率 (%)	試験材齢 (ヶ月)
		長径	短径	平均							
A	22.5	525	490	508	0.9	23.0	76.8	43.2	6.6	3.8	2
B	—	780	700	740	1.9	15.0	91.2	42.6	5.6	4.4	4

表-3 使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm <sup>3</sup> )
細骨材	長良川水系(吸水率 1.64%, 絶乾密度 2.60 g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材 1	碎石 2010 硬質砂岩 (吸水率 0.98%, 絶乾密度 2.61 g/cm <sup>3</sup> )
粗骨材 2	碎石 1505 硬質砂岩 (吸水率 1.64%, 絶乾密度 2.61 g/cm <sup>3</sup> )
高性能減水剤	ポリカルボン酸系

### 3.3 測定項目

#### (1) 供試体温度

供試体の各部温度は、クラス 2 の K 型ガラス被覆熱電対をコンクリート内部および拘束リング外周面に設置して計測した。なお、測定位置はコンクリート円柱の軸心部の加熱面から 5,10,25,40mm と拘束リング外周側面部の加熱面から 10,25,40mm とした。

#### (2) 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 10,25,40mm の拘束リング外周側面部とした。

#### (3) 水平方向変位

加熱中の供試体の外形寸法の変化を測定するため、変位計（感度：1000 μ/mm）にて供試体の加熱面から 10,25mm の水平法変位を測定した。

#### (4) 爆裂深さの経時変化および爆裂規模

爆裂開始時間および終了時間などの爆裂の経時変化を把握するため、加熱試験中に観察窓から爆裂状況の観察を行った。また、爆裂規模を把握するため、加熱冷却後の供試体の爆裂深さを 20mm 間隔で厚み計を用いて測定した。

### 3.4 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、本実験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図-7 に示す RABT30 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。

## 4. 実験結果

### 4.1 温度測定結果

#### (1) 炉内温度

加熱面からおよそ 10cm 離れた 6 点にて測定した炉内温度の測定結果の一例を図-7 に示す。十分に RABT30 分加熱曲線を再現できていることが確認できた。

#### (2) コンクリート温度

経過時間 10 分までのコンクリート温度の測定結果を図-8 の a), b) に示す。10mm 位置の温度変化から 300-8 供試体と 300-18 供試体は、5 分から 7 分程度で爆裂深さが 10mm まで到達しているが 300NR 供試体と 300-0.5 供試体は拘束が弱いため、爆裂が深さ 10mm まで進んでいないことが推察される。

#### (3) 拘束リング温度

鋼製の拘束リングの温度測定結果を図-9 に示す。高さ 10mm 位置は 10 分程度まではひずみゲージの耐熱温度 80℃以下で測定できていることが確認された。

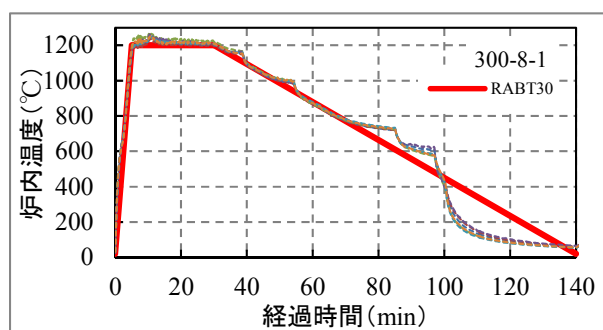
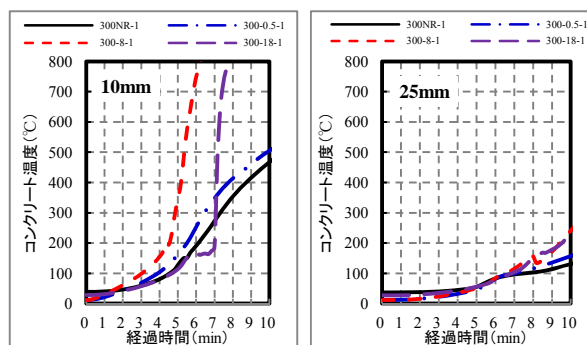


図-7 炉内温度測定結果 (300-8-1)



a) 10mm 位置

b) 25mm 位置

図-8 コンクリート温度測定結果

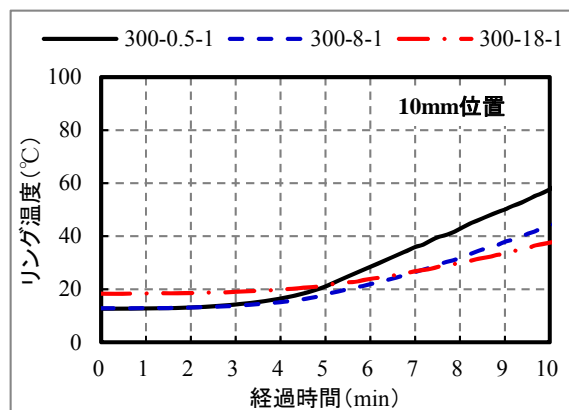


図-9 拘束リング温度測定結果 (10mm 位置)

## 4.2 爆裂規模測定結果

### (1) 爆裂時間

加熱試験中に耐火炉の観察窓から爆裂状況の経時変化を観察した結果を表-5に示す。爆裂加熱開始時間は4分程度、終了時間は5分から8分程度、継続時間は2分から6分間程度を示した。

### (2) 爆裂深さおよび深さ分布

爆裂深さを測定した結果を表-5、図-10のa)からd)および写真-1のa)からd)に示す。最大深さは8mmから26mm程度、平均深さは2mmから8mm程度を示し、リング厚さが大きい方が爆裂深さも大きくなる傾向を示した。また、深さ分布もリング厚さが大きいと、より中央部の爆裂が深まる傾向を示した。

しかし、リング厚みが8mmの300-8拘束供試体と18mmの300-18拘束供試体を比較すると、爆裂深さおよび深さ分布において、厚みの差ほど顕著の差が認められなかった。

表-5 爆裂観察結果

		300-NR	300-0.5	300-8	300-18
開始時間 (min)	1	3.43	4.00	2.18	3.83
	2	3.65	3.57		4.33
	平均	3.54	3.78		4.08
終了時間 (min)	1	5.00	5.50	8.18	7.50
	2	7.33	5.00		7.33
	平均	6.17	5.25		7.42
継続時間 (min)	1	1.57	1.50	6.00	3.67
	2	3.68	1.43		3.00
	平均	2.62	1.47		3.33
最大深さ (mm)	1	11.0	5.0	24.0	25.0
	2	11.0	11.0		27.0
	平均	11.0	8.0		26.0
平均深さ (mm)	1	3.1	0.7	7.4	7.4
	2	2.6	2.5		6.8
	平均	2.8	1.7		7.1

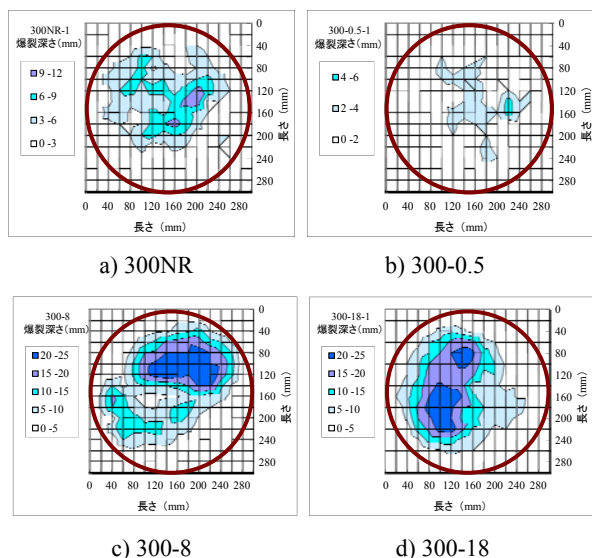


図-10 爆裂深さ分布測定結果

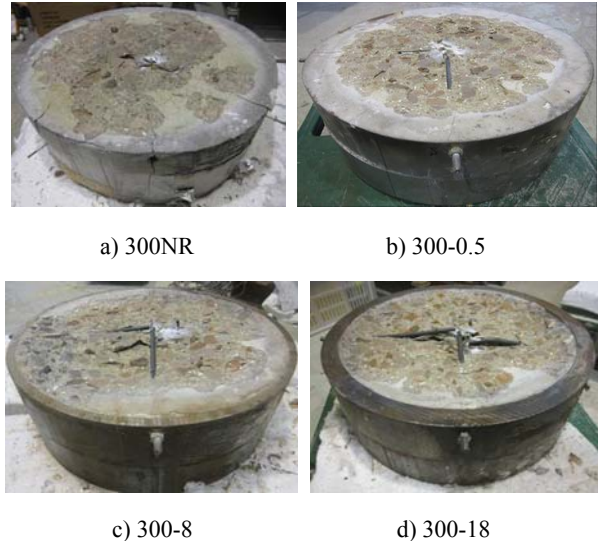


写真-1 爆裂状況

### (3) 爆裂深さの経時変化

爆裂深さが各深さに設置した熱電対に達すると、その位置の熱電対が計測不能となる、もしくは炉内温度に曝され、急激な温度変化が生じる。この深さと時間の関係と目視観察による爆裂開始と終了時間から爆裂深さの経時変化を求めた。その結果を図-11のa)からd)に示す。

無拘束、拘束の全ての供試体で、経過時間4分程度の爆裂初期において、5mmから10mm深さの爆裂が発生していることが確認された。その後の爆裂現象は、リング厚みが8mmと18mmと大きい拘束供試体のみが深さ25mm程度まで進展していることが確認された。

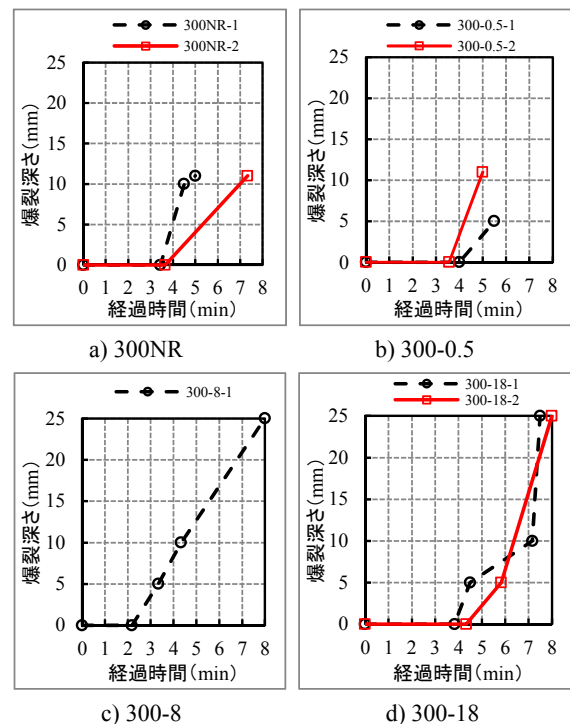
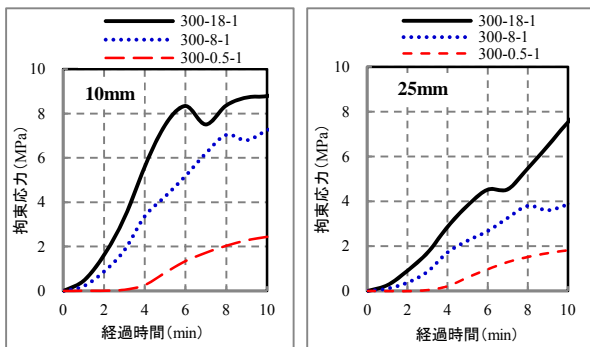


図-11 爆裂深さの経時変化

### 4.3 円筒モデルによる熱応力の評価

円筒モデルの式(1)を適用し、拘束リングの円周方向ひずみからコンクリートの拘束応力（熱応力）を算出した結果を図-12のa), b)に示す。リング厚みが大きいほど拘束応力の立ち上がりが早く、最大値も大きくなる傾向を示した。また、深さ10mmでは経過時間4分以降で拘束応力が高まり、爆裂発生状況と同様の傾向を示した。更には、爆裂規模が大きかった300-8, 300-18拘束供試体は、経過時間6分から8分の爆裂発生時に爆裂による断面欠損の影響で応力が一度下がる傾向も認められた。



a) 10mm 位置  
b) 25mm 位置  
図-12 円筒モデルによる熱応力測定結果

### 5. 拘束リングの標準化の検討

これまでの測定結果から、リング厚みが大きいほど爆裂時間が長く、爆裂深さが大きくなる傾向が認められている。しかし、リング厚み8mmの300-8拘束供試体と18mmの300-18拘束供試体には、厚みの違いほどの爆裂規模に顕著な差が認められていない。そこで、拘束リングの仕様を標準化することを目的に、リング厚みによるコンクリートの拘束効果の差を定量的に評価するための拘束度の検討を行った。

ここで、拘束度は、加熱による無拘束供試体の自由膨張による半径増大量と拘束供試体の半径増加量の差の無拘束供試体の半径増加量に対する比として、式(2)を用いて求めた。

無拘束供試体のコンクリート半径増加量は、10, 25mm高さに設置した変位計から、拘束供試体のコンクリート半径増加量は10, 25mm高さに設置したひずみゲージにて計測したひずみ量から計算にて求めた。なお、拘束供試体のコンクリート半径増加量は、リングの温度上昇による熱膨張量を考慮して求めた。

$$I_r = \frac{(\Delta R_0 - \Delta R_{rest})}{\Delta R_0} \quad (2)$$

$I_r$  : 拘束度 (0: 自由膨張~1.0: 完全拘束)

$\Delta R_0$  : 無拘束供試体コンクリート半径増加量 (mm)

$\Delta R_{rest}$  : 拘束供試体コンクリート半径増加量 (mm)

式(2)を用いて、10mmおよび25mm位置の爆裂発生時間である経過時間3分から10分までのリング厚みと拘束度の関係を求めた結果を図-13および図-14に示す。なお、300NR無拘束供試体の25mm位置の半径増加量は、経過時間3分までは、ほぼゼロで膨張を示さなかったため、5分と10分の拘束度のみを図示した。

図-13および図-14から、300-0.5拘束試験体の拘束度は、0.3から0.4と小さい値を示すのに対して、300-8および300-18拘束供試体の拘束度は、完全拘束の1に近い0.8から0.9程度の高い値を示した。これは、10mm, 25mm位置において、同様の傾向を示した。更に、爆裂発生前の経過時間3分での10mm位置の拘束度は、いずれの拘束供試体においても0.6以下と小さい値を示すことが確認された。

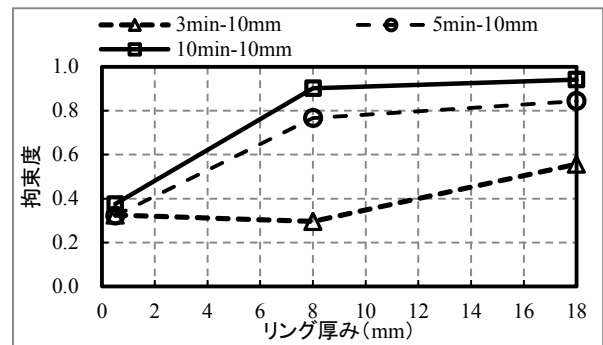


図-13 リング厚みと拘束度の関係 (10mm 位置)

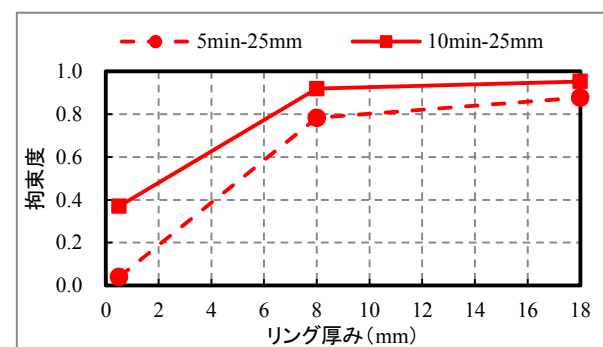


図-14 リング厚みと拘束度の関係 (25mm 位置)

また、式(2)にて求めた経過時間5分、10分の10mmおよび25mm位置の拘束度と最大爆裂深さ、平均爆裂深さの関係を図-15のa)からd)に示す。

図-15から、今回の拘束度を求めた範囲では、拘束度と爆裂深さは高い相関が認められ、拘束度が高いほど爆裂深さが、最大深さも平均深さも大きくなることが確認された。これより、リング厚8mmと18mmの300-8および

び 300-18 拘束供試体の拘束度に大きな差がないため、爆裂深さにも顕著な差が認められなかったと推察される。

更には、リング厚 8mm でも拘束度が完全拘束の 1 に近い 0.8 から 0.9 程度を示し、18mm まで厚みを増大させても拘束度は大きく変化しないことから、本拘束リング試験における拘束リングの寸法を  $\phi 300 \times t8\text{mm}$  で標準化が可能と判断した。

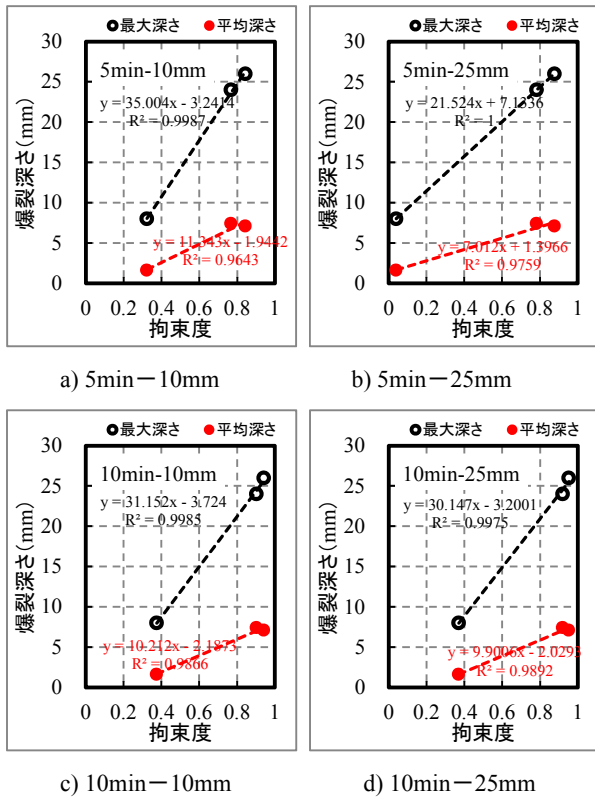


図-15 拘束度と爆裂深さの関係

## 6. まとめ

本報では、図-3 に示す本研究のフロー図における拘束リングの標準化 (A-2) を目的に、リング厚みの爆裂規模への影響を確認するとともに、定量的な評価のための拘束度の検討を行った。その結果、以下のことが確認された。

- (1) リング厚みを大きくすると爆裂深さ、爆裂継続時間は増加する傾向を示す。
- (2) 無拘束供試体と拘束供試体の半径増加量の差から求めた拘束度は、爆裂深さと高い相関を示し、供試体の

拘束の程度を定量的に評価が可能である。

- (3) リング厚みと拘束度の関係から、リング厚み 8mm で拘束度が完全拘束の 1 に近い 0.8 から 0.9 程度の値を示すことから、本拘束リング試験における拘束リングの寸法を  $\phi 300 \times t8\text{mm}$  で標準化が可能である。

今後は、図-3 に示す本研究フローに基づき、標準化した拘束リングを適用して、各種爆裂影響因子の評価を進める予定である。

## 謝辞

本研究は、平成 23 年度鹿島学術振興財団の研究助成を受けた。ここに謝意を表す。

## 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) 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
- 5) 谷辺徹，小澤満津雄，鎌田亮太，六郷恵哲：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1138-1143，2012
- 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