

論文 実大 RC セグメントの耐火試験と同配合で作製したリング拘束供試体加熱試験結果の比較

山本 哲^{*1}・小澤 満津雄^{*2}・谷辺 徹^{*3}・古市 耕輔^{*4}

要旨：本研究では、コンクリートの強度レベルにおける爆裂性を評価するスクリーニング試験法としてリング拘束試験法を提案する基礎的資料を得る目的で、以下の試験を行った。すなわち、実大 RC トンネルセグメントの耐火試験実績があるコンクリート配合を対象として、リング拘束供試体を作製し、耐火試験を実施し爆裂性状を比較した。加えて、熱応力と蒸気圧の性状も確認し、引張りずみ破壊モデルを用いて爆裂深さの経時変化を推定した。

キーワード：RC セグメント、拘束リング、耐火試験、RABT 加熱曲線、爆裂

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下、RC)構造物が、火災などで急激な高温作用に曝された場合、爆裂現象を生じることがある(図-1)。この爆裂現象はコンクリートの強度が大きい場合や含水率が高いほど発生しやすいと言われている¹⁾。また、爆裂メカニズム(図-2)として水蒸気圧説と熱応力説およびその複合説があるが、未だに確たる結論に至っていない¹⁾。加えて、コンクリートの耐爆裂性を評価する、基準化された試験方法の提案はなされておらず、実務者が独自の判断で試験を実施しているのが現状である。このような状況下において、日本コンクリート工学会では、高温環境下におけるコンクリートの性能評価委員会が設置され、コンクリートの耐爆裂性試験方法の提案を目指して活動を実施している。一方、谷辺ら²⁾は、拘束下において熱応力と水蒸気圧を測定し、コンクリートの耐爆裂性を評価可能なリング拘束供試体加熱試験法を提案し、一定の成果を挙げている。しかし、実大 RC 部材の耐火試験とリング拘束供試体の耐火試験の結

果比較を実施するまでには至っていない。そこで本研究では、コンクリートの配合レベルにおける爆裂性を評価するスクリーニング試験法を提案する基礎的資料を得る目的として、以下の試験を行った。すなわち、実大 RC トンネルセグメントの耐火試験実績があるコンクリート配合を対象として、リング拘束供試体を作製し、耐火試験を実施し爆裂性状を比較した。加えて、熱応力と蒸気圧の性状も確認し、引張りずみ破壊モデルを用いて爆裂深さの経時変化を推定した。

2. リング拘束供試体の加熱試験概要

2.1 供試体概要

図-3 にリング拘束供試体の概要を示す。拘束リングは外径 300×高さ 50×肉厚 8mm の鋼製リングを 2 段重ねとして、コンクリートを充填した。拘束リングの内部には温度測定用の熱電対を底面から 5, 10, 25, 40mm の位置に設置した。コンクリート内部の水蒸気圧計測用にステンレスパイプ(内径 2mm, 外径 5mm, 長さ 180mm)を

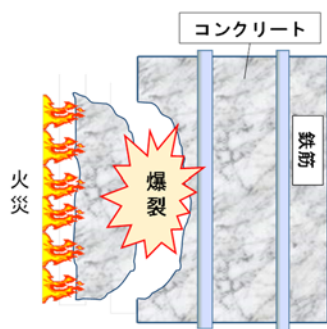
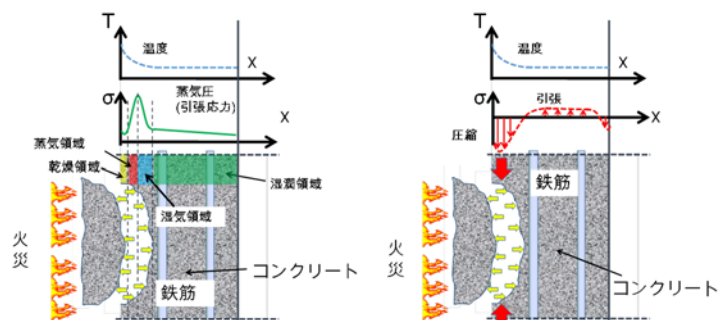


図-1 コンクリートの爆裂



a) 水蒸気圧説

b) 熱応力説

図-2 爆裂発生メカニズム

*1 群馬大学理工学部環境創生理工学科 4 年生 (学生会員)

*2 群馬大学大学院理工学府 環境創生部門 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 博士(工学) (正会員)

*4 鹿島建設(株) 土木管理本部土木技術部 博士(工学) (正会員)

加熱面から 5, 10, 25, 40mm の位置に設置した。加熱試験時には、水蒸気圧を測定するため、ステンレスパイプ内にシリコンオイルを充填し、圧力センサー（許容値：10MPa）を接続した。コンクリートの拘束応力を算出するため、拘束リングにひずみゲージを設置した。測定位置は、リングの外周で対極に 2 か所、加熱面から 5, 10, 25, 40mm の位置とした。ひずみゲージは常温用(耐熱温度 80℃)を使用した。別途、拘束リング側面の温度を熱電対で計測し、80℃以下におけるひずみデータを使用し、式(1)より拘束応力を求めた。

2.2 コンクリートの配合

表－1～3 に本実験で使用したコンクリートの配合と使用材料およびフレッシュ性状を示す。配合は 2 種類とし、HSC と HSC+PP とした。HSC+PP は実構造物のトンネル RC セグメントとして使用されている配合を用いた。W/C は 0.32 とした。セメントの種類は普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm³)とした。粗骨材の種類は硬質砂岩とし、最大寸法は 20mm とした。

2.3 コンクリートの配合

図－4 に本試験で使用した加熱曲線を示す。本試験では、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）を用いた。図－5 に加熱で使用したガス水平炉を示す。ガス炉の上面に試験治具を設置し、その上に供試体を設置した。供試体下面を一面加熱した。供試体下面のリング部分は、断熱材ブランケットを設置して、リングの温度上昇を防いだ。爆裂状況の観察は、爆裂音の確認と、ガス炉の小窓から炉内を観察し爆裂時に飛散するコンクリートを確認し、爆裂開始時間と終了時間を記録した。また、コンクリート内部に設置してある熱電対の温度より急激な温度変化が生じる点を確認し、爆裂深さを測定した。

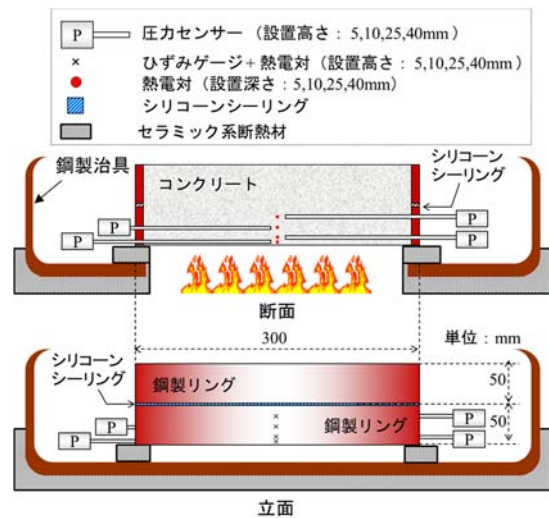
3. 爆裂深さの評価方法

3.1 引張ひずみ破壊モデル²⁾

コンクリートの爆裂モデルとして、谷辺ら²⁾が提案した引張ひずみ破壊による破壊基準を用いた。図－6 に引張ひずみ破壊モデルの概要を示す。まず、拘束リング供試体が二軸応力状態にある時を考える。段階 1 で示すように加熱によるコンクリートの熱膨張をリングが拘束することで、コンクリートの中心に向けて外側から拘束応力($\sigma_{r\theta}$ (= σ_x))が加熱面に平行に作用する。その時に発生する x 軸方向のひずみ(ϵ_x)から面外方向のひずみ(ϵ_z)を算出し、面外方向ひずみ(ϵ_z)が引張破壊ひずみ(ϵ_{t-f})を超えることで爆裂が生じると仮定するモデルである。

3.2 拘束応力の算出方法

拘束応力は、拘束リングに発生した周方向のひずみより式(1)を用いることで算出した。



図－3 リング供試体の概要

表－1 コンクリートの配合

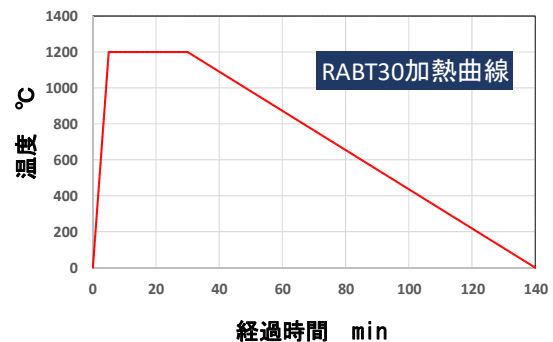
	W/C	単位量(kg/m ³)					
		W	C	S	G	ad	PP
HSC	0.32	145	450	872	962	3.8	0
HSC+PP							1.8

表－2 使用材料

C	普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm ³)
S	硬質砂岩砕砂(吸水率:1.04%, 絶乾密度:2.65g/cm ³)
G	硬質砂岩砕石(吸水率:1.39%, 絶乾密度:2.59g/cm ³)
Ad	高性能減水剤
PP	PP繊維(繊維長12mm, 密度0.9g/cm ³)

表－3 フレッシュ性状

	スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (℃)
HSC	5.0	1.8	21
HSC+PP	2.4	1.9	21



図－4 RABT30 加熱曲線

$$\sigma_{r\theta} = \varepsilon_{\theta} \cdot E_s \cdot t/R \quad (1)$$

$\sigma_{r\theta}$: 拘束応力(N/mm²)

ε_{θ} : リング円周方向ひずみ

E_s : リング材弾性係数(N/mm²)

t : リング材厚さ(mm)

R : リング内半径(mm)

3.3 引張ひずみ破壊指数 ($I_{\varepsilon-f}$)

ここでは、引張ひずみ破壊指数について説明する。拘束応力は加熱面に平行に作用するが、見かけのポアソン効果により面外方向に引張ひずみ(ε_z)が生じる。この引張ひずみが引張破壊ひずみ(ε_{t-f})を超えると爆裂が生じると仮定した。引張ひずみの算出式を式(2)～(4)に示す。見かけのポアソン比と引張破壊時のひずみは道越らの研究を参考にした⁴⁾。

$$\varepsilon_x = \sigma_{r\theta}/E_s \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = 2\varepsilon_x \cdot \nu_c \quad (3)$$

$$I_{\varepsilon-f} = \varepsilon_z/\varepsilon_{t-f} \geq 1.0 \quad (4)$$

ε_x : 面内直ひずみ

E_s : 残存弾性係数(建築学会式)(N/mm²)

ε_z : 面外直ひずみ

ν_c : 見かけのポアソン比

ε_{t-f} : 引張破壊ひずみ

$I_{\varepsilon-f}$: 引張ひずみ破壊指数

4. 実験結果おとび考察

4.1 加熱試験後の加熱面の損傷状況

図-7、8にHSCとHSC+PP供試体における加熱面の損傷状況およびHSCの爆裂コンター図を示す。図-7a)と図-8より、HSCは加熱面全体で爆裂が生じ、最大爆裂深さは21mmであった。供試体中央付近ほど、爆裂深さが大きいことがわかる。爆裂の様子は、加熱炉の小窓から観察した。加熱開始後4.3minから爆裂が開始し、10minまで継続していることが確認された。本研究ではこの4.3minから10minまでの間の爆裂現象を議論することとした。一方、図-7b)よりHSC+PPに微細なひび割れが確認できるが爆裂は生じなかった。

4.2 コンクリート内部温度の経時変化

図-9、10にHSCおよびHSC+PP配合におけるコンクリート内部温度の測定結果を示す。爆裂観察から、爆裂開始時間は加熱後4.3minであり、終了時間は10minであった。図-9より、供試体の下面からの深さ5mm、10mm、これは、爆裂によって、コンクリートのかぶり剥落し、熱電対が炉内に露出することで、急激な温度変化が生じたものと考えられる。図-10より、HSC+PPのコンクリート内部温度は加熱面に近いほど、温度が高いが、爆裂が生じていないため、急激な温度変化は確認できなかった。25mmにおいて急激な温度変化を示す時間が確認で

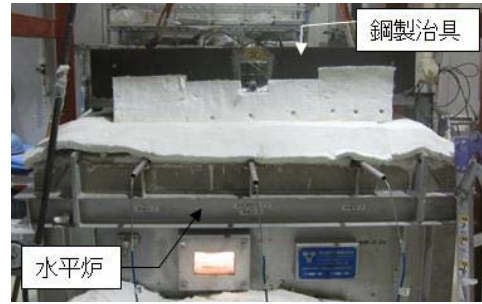


図-5 水平炉

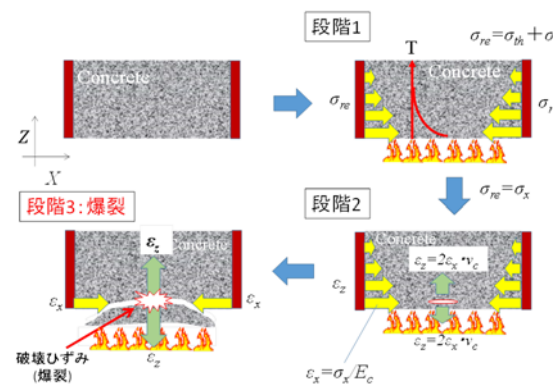


図-6 引張ひずみ破壊モデル



a) HSC

b) HSC+PP

図-7 加熱面の損傷状況 (リング拘束供試体)

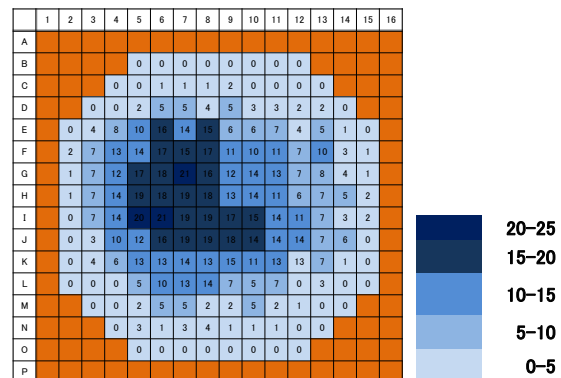


図-8 爆裂深さコンター図 (HSC, 単位 mm)

きる。

4.3 コンクリート内部温度の経時変化

図-11, 12に HSC と HSC+PP 供試体それぞれにおける拘束応力の経時変化を示す。図-11 より, 拘束応力は加熱に伴い上昇していることがわかる。加熱面から 10mm の拘束応力の最大値は 9min で 7.7MPa であった。また, 拘束応力が増減をしている時間は, 爆裂が生じている時間と考えられる。図-12 より, HSC+PP 供試体においても, 加熱に伴い拘束応力は増加している。加熱面から 5mm の拘束応力は 11.5min で約 8MPa であった。HSC+PP 供試体は, 爆裂が生じなかったため, 拘束応力の増減は確認できなかった。HSC は HSC+PP より拘束応力の最大値が小さくなった。この原因としては, HSC は爆裂により加熱表面から断面欠損が生じたためであると考えられる。

4.4 水蒸気圧の経時変化

図-13, 14に HSC と HSC+PP 供試体それぞれにおける水蒸気圧の経時変化を示す。図-13 より, HSC 供試体の水蒸気圧は, 加熱面から 5mm 位置において加熱から 4.6min で急上昇している。これは爆裂が始まった時間とほぼ一致した。水蒸気の最大圧力は 5mm と 10mm および 25mm と 40mm でそれぞれ約 4.5MPa と約 1MPa および 2.5MPa と 3.5MPa 程度であった。5mm と 10mm 位置の水蒸気圧は, 急激に上昇し爆裂が生じるとともに, 低下した。25mm 位置と 40mm 位置は, 蒸気圧の上昇は見られるが, 急激な低下は見られなかった。爆裂の最大値が 10min で 21mm であったことより, 25mm と 40mm 位置の水蒸気圧の上昇は爆裂に影響しなかったと考えられる。25, 40mm 位置の水蒸気圧の低下状況も 5, 10mm 位置と比較して, 緩やかであった。図-14 より, HSC+PP 供試体の水蒸気圧は, 加熱面から 5mm 位置において加熱から 4.6min で急上昇しているが, 爆裂は生じなかった。HSC+PP 供試体は PP 繊維を混入しているため, 水蒸気圧が上昇しても, PP 繊維が 170°C 付近で熔融するため, 爆裂が生じなかったと考えられる。水蒸気の最大圧力は 5mm と 10mm および 25mm と 40mm でそれぞれ 1.8MPa と約 2.1MPa および 3.3MPa と 0.03MPa 程度であった。

4.5 爆裂深さの推定

コンクリートの爆裂深さを引張ひずみ破壊モデルにより推定した。式(1)~(4)により, 引張ひずみ破壊指数を算出した。コンクリートの弾性係数は, 既往の研究より弾性係数 45GPa²⁾と仮定し, 加熱による弾性係数残存比は建築学会式³⁾を用いた。温度変化を考慮した見掛けのポアソン比は, 道越らのデータ⁴⁾より 0.3 とした。引張破壊ひずみも同文献⁴⁾より, 200~500 μ の範囲で設定した。図

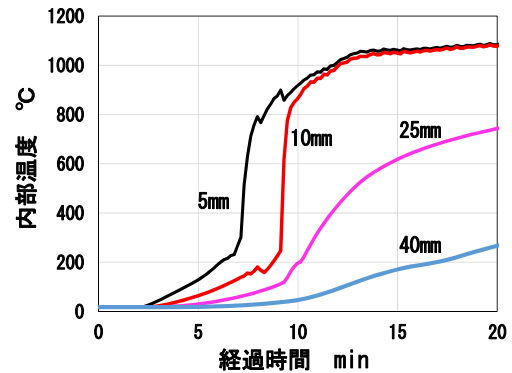


図-9 コンクリート内部温度 (HSC)

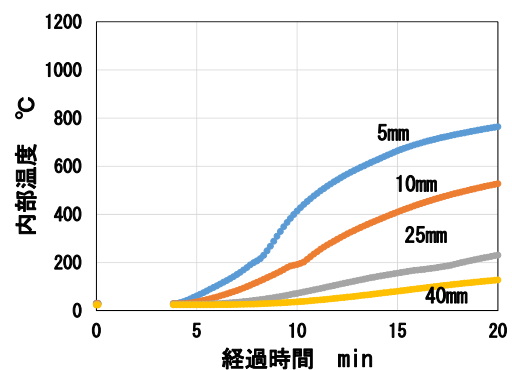


図-10 コンクリートの内部温度 (HSC+PP)

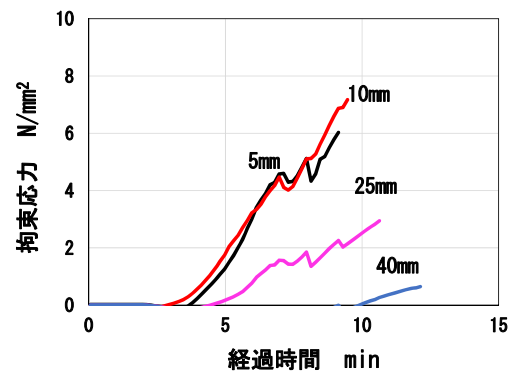


図-11 拘束応力 (HSC)

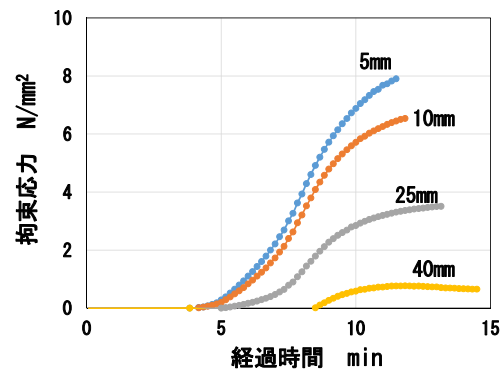


図-12 拘束応力 (HSC+PP)

ー15 に、爆裂深さの経時変化の実験値と推定値を比較したものを示す。引張りずみ破壊モデルの推定値は、実測値を深さ 10mm までよく推定できていることがわかる。25mm 以降は、いずれも引張破壊ひずみを超えなった。この原因は、コンクリートの弾性係数の設定方法と使用したひずみゲージが常温用であることが考えられる。推定精度については、今後さらに検討を進めていく予定である。

5. 実大 RC セグメント耐火試験結果との比較

新井ら⁵⁾は、実大耐火セグメントの耐火試験結果を報告している。本研究で実施したリング供試体の加熱試験で用いたコンクリート配合について、新井らが実施した配合は、高炉スラグ混入の有無において、差異はあるが、強度レベル、その他は同等であると判断した。新井らが実施した Case1:PP 繊維無しと Case2:PP 繊維を 1.82kg/m³ 混入した配合と HSC と HSC+PP が同等のものであるとして以下の議論を行う。ここでは、新井らが実施した耐火セグメントの耐火試験結果とリング拘束供試体の耐火試験結果の爆裂深さを比較する。

5.1 耐火セグメントの耐火試験概要⁵⁾

図-16 に耐火セグメントの寸法形状を示す。供試体は幅 500×長さ 1000×高さ 300mm で、D10 の鉄筋を格子状に 100mm ピッチで配置された供試体である。加熱面は幅 550×810mm の一面加熱とし、RABT60 で加熱試験を実施した。

5.2 爆裂性状の比較

表-4 に爆裂性状の比較を示す。リング拘束供試体は HSC_R と HSC+PP_R とした。耐火セグメントは Case1 を HSC_Seg、Case2 を HSC+PP_Seg と併記し、試験時の圧縮強度と含水率を記載した。図-17 に耐火セグメントの加熱面の状況を示す。また図-18, 19 に最大爆裂深さと、最大爆裂深さを供試体の高さ H で除した爆裂深さ比を示す。最大爆裂深さは、HSC_R と HSC_Seg で 21mm と 83mm であった。PP 繊維を混入したものは軽微な損傷が生じたのみであった。最大爆裂深さ比は HSC_R と HSC_Seg で 0.21 と 0.28 であった。リング拘束試験は拘束条件下における配合レベルのスクリーニング試験を行うことを主目的に開発している。今回の結果では PP 繊維混入の有無による爆裂の有無を評価できた。一方、実大 RC セグメントの加熱試験と比較すると爆裂深さはリング供試体の方が小さい結果となった。実大 RC セグメントでは供試体の寸法、鉄筋の拘束や加熱曲線の違いによって爆裂深さが大きくなったと考えられる。一方、爆裂深さ比は、リング供試体と実大 RC セグメントでほぼ同等の結果が得られた。以上より、高さで爆裂深さの比

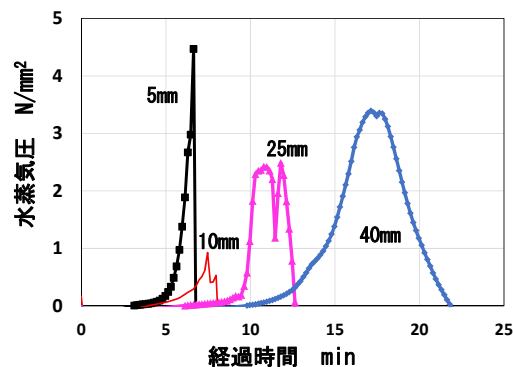


図-13 水蒸気圧 (HSC)

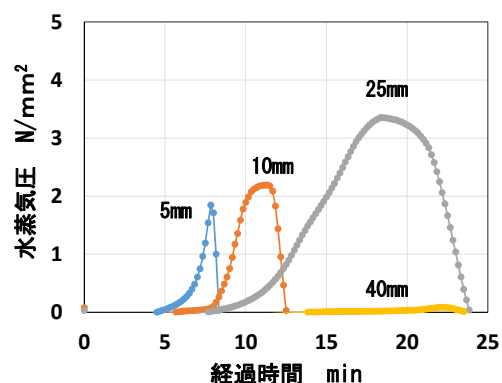


図-14 水蒸気圧 (HSC+PP)

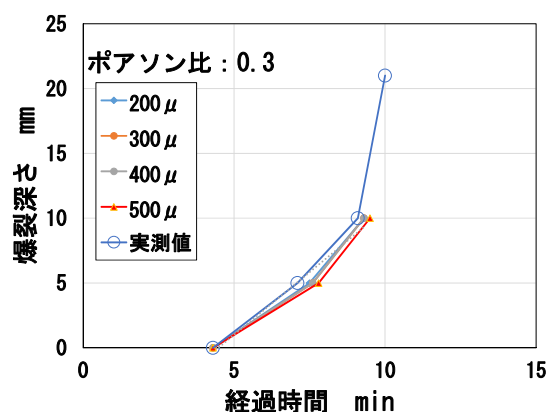


図-15 爆裂深さ

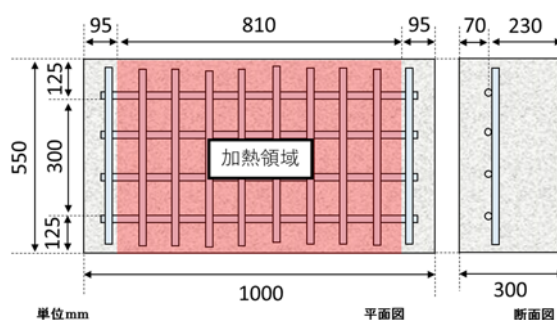


図-16 耐火セグメントの寸法形状

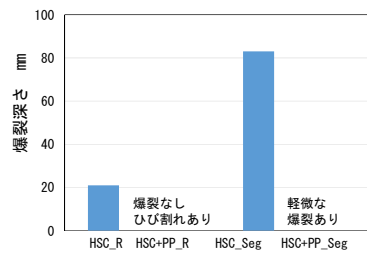
表－4 爆裂性状の比較（リング拘束供試体と耐火セグメント）

記号	PP繊維混入量	圧縮強度	含水率	開始時間	終了時間	供試体高さ(H)	爆裂深さ(SP depth)	爆裂深さ比(SP depth/H)	加熱面の性状
	kg/m ³	MPA	%wet	min	min	mm	mm		
HSC_R	/	72.3	4.1	4.3	10	100	21	0.21	爆裂
HSC+PP_R	1.82	75.9	4.1	/	/	100	0	/	亀甲状ひび割れ
HSC_Seg	/	73.7	4.5	不明	不明	300	83	0.28	爆裂、鉄筋露出
HSC+PP_Seg	1.82	75.6	4.9	/	/	300	0	/	軽微な爆裂、亀甲状ひび割れ

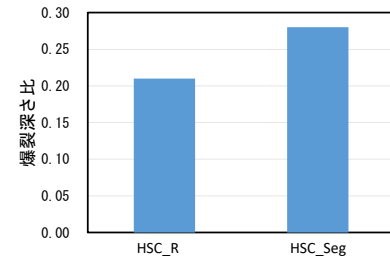


a) HSC_Seg b) HSC+PP_Seg

図－17 耐火セグメントの加熱面状況



図－18 爆裂深さの比較



図－19 爆裂深さ比の比較

が爆裂性を評価する指標になる可能性があることが分かった。今後は鉄筋による拘束の影響について検討する必要があると考えられる。

6. まとめ

リング拘束供試体を対象とした加熱試験を用いることで、拘束下のコンクリートの爆裂性状を評価した。

- 1) PP 繊維無混入の HSC は爆裂を生じ、PP 繊維を混入した HSC+PP は爆裂を生じなかった。実大 RC セグメントの耐火試験の結果でも爆裂の有無の判定では同様な結果が得られたことから、リング拘束供試体の有効性が示された。
- 2) 引張ひずみ破壊モデルを用いて、爆裂深さの経時変化を推定した結果、10min 程度まで爆裂深さを評価できることがわかった。

今後、更に実大 RC 部材の耐火試験との比較を行い、リング拘束供試体の爆裂性評価試験の有効性検討する予定である。

謝辞

本研究で使用した供試体の作製に対して(株)ジオスターの倉形徹氏と秋元寛生氏にご協力を頂いた。本研究

は、科学技術研究補助金(基盤研究 C:代表 小澤 満津雄)および大林財団より支援を受けた。加熱試験の実施に際し、豊清工業 小泉伸洋氏の支援を受けた。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) 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，Vol. 70，No.1，pp.104-117，2014
- 3) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp.63-65，2009.3
- 4) 道越慎太郎，小林裕，黒岩秀介：圧縮力を受けるコンクリートの高温時におけるひずみ挙動，日本建築学会構造系論文集，No.621，pp.169-174，2007.11
- 5) 新井崇裕，平石剛紀，宮本圭一，横井伸昭：剥落防止機能を有する有機系短繊維補強コンクリートの耐火性能，コンクリート工学年次論文集，vol.29，No.1，pp.381-386，2007