論文　拘束リング試験法を適用した超高強度繊維補強コンクリートの爆裂深さの推定

谷辺　徹[*1]・小澤　満津雄[*2]・鎌田　亮太[*3]・内田　裕市[*4]

要旨：熱応力と水蒸気圧の複合作用による爆裂メカニズムを考慮した爆裂発生指標の適用性評価のため，圧縮強度が100MPa級の高強度コンクリートと200MPa級の超高強度繊維補強コンクリートの拘束リング試験を実施した。あわせて，ポリプロピレン繊維の添加効果の評価も実施した。その結果，強度レベルに限らず爆裂発生指標としてひずみ破壊指数を用いることで爆裂深さを精度よく推定可能であることが確認できた。また，加熱後の供試体断面に平行なひび割れが観察され，筆者らが提案している破壊プロセスにおける引張ひずみ破壊を確認することができた。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート，爆裂，熱応力，拘束，水蒸気圧，引張破壊ひずみ

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る。日本建築学会や土木学会では高強度コンクリートの適用の際には，耐火性能の照査を求めている。しかしながら，コンクリートの爆裂を考慮した耐火性能の具体的な照査方法は，未だ提案されていない。爆裂現象の主な発生原因は，熱応力と水蒸気圧と報告されている[1)]。しかし，具体的な爆裂メカニズムは，未だ解明されていない状況である。

そこで筆者らは，熱応力と水蒸気圧の実測による定量的なコンクリートの耐爆裂性評価手法の構築を目的に，拘束リング試験法の研究を進めている[2), 3)]。これまで，熱応力（拘束応力）による引張ひずみ破壊が生じる破壊プロセスとその破壊面に水蒸気圧が負荷されることで破壊片が弾け飛ぶ爆裂プロセスからなる複合作用の爆裂発生指標を提案している[4)]。本報では，本爆裂発生指標の適用性を確認するため，圧縮強度が 100MPa 級の高強度コンクリート（HSC）と 200MPa 級の超高強度繊維補強コンクリート（UFC）による強度レベルの影響とポリプロピレン繊維添加の影響の評価を行った結果を報告する。

2. 爆裂メカニズムと爆裂発生指標

（1）爆裂メカニズム

図-1 に筆者らが提案している複合作用による爆裂メカニズムの概要を示す。温度上昇に伴い，水分の蒸発と熱膨張の拘束が生じる。水蒸気圧（P）の上昇により引張応力（σ_t）が発生するが，引張強度（f_t）を超える場合は少ない。加熱面に平行な拘束応力による面外方向への引張ひずみ（ε_Z）が破壊ひずみ（$\varepsilon_{t\text{-}f}$）を超えると微細ひび割れが発生し，破壊に至る。この引張ひずみ破壊条件と水蒸気圧の圧力条件の両方を満たす場合に爆裂が発生する。

（2）爆裂発生指標

図-2 に筆者らが提案している爆裂発生指標の概要を示す。ここで，爆裂の発生を評価するため，ひずみ破壊指数（$I_{\varepsilon\text{-}f}$）と爆裂破壊指数を定義した。ひずみ破壊指数が限界値（$I_{\varepsilon\text{-}lim}$）を超え，かつ爆裂破壊指数も限界値を超えた場合に爆裂が発生するとした。

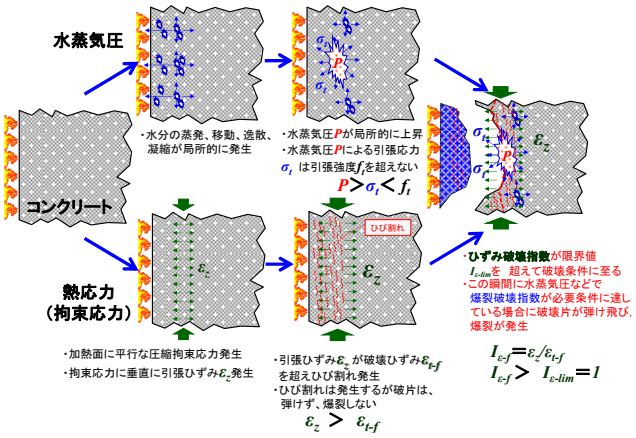


図-1　複合作用による爆裂メカニズムの概略図

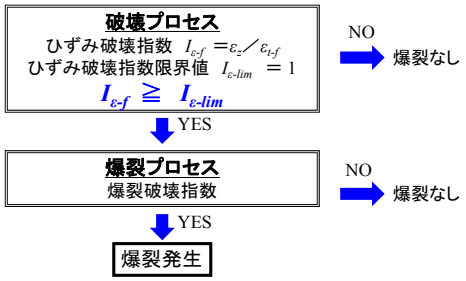


図-2　爆裂発生指標

*1 太平洋マテリアル（株）開発研究所　（正会員）
*2 群馬大学　理工学研究院 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 修士（工学）
*4 岐阜大学 総合情報メディアセンター 教授 博士（工学）（正会員）

3. 実験概要

（1）供試体

図-3 に本試験に用いた拘束リング供試体の概要を示す。鋼製リングにコンクリートを充填して供試体とした。鋼製リング（外径 300×高さ 50×厚さ 8mm）を 2 段重ねにして拘束リング（外径 300×高さ 100×厚さ 8mm）とした。拘束リングの中央部に水蒸気圧計測用のステンレスパイプ（外径 5mm，内径 2mm）と温度計測用の熱電対を高さ 5,10,25,40mm の 4 箇所に設置した。なお，各供試体は，1 条件に付き 2 体作製した。

（2）コンクリート

コンクリートは，HSC と UFC に対してそれぞれ PP 繊維を添加したものとしないものの 4 種類とした。**表-1**，**表-2** にコンクリートの配合，**表-3** に使用材料を示す。また，**表-4**，**表-5** にコンクリートのフレッシュ特性と硬化体特性（強度特性および含水率）を示す。HSC の強度試験にはφ100×200mm の円柱供試体，UFC の強度試験および含水率試験にはφ50×100mm 円柱供試体を用いた。なお，強度試験および含水率試験用供試体は，鋼製型枠に充填した状態で，リング供試体と同様に，試験に供するまで 20℃の湿布養生とした。なお，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。

（3）加熱条件

加熱曲線は，加熱速度が速いドイツ規格のRABT加熱曲線を用いることとした。5分間で1200℃まで昇温し，1200℃の保持時間は25分とし，その後110分間で常温まで徐冷した。

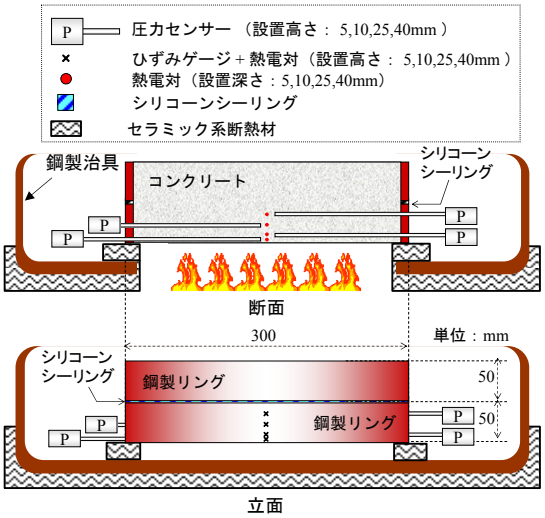


図-3　供試体概要

表-1　コンクリートの配合（HSC）

NO.	W/C	単位量(kg／m³)						PP 繊維 (kg／m³)
		水	セメント	細骨材 1	粗骨材 1	粗骨材 2	高性能減水剤 1	
HSC	0.3	145	500	718	418	626	5	－
HSC-PP	0.3	145	500	718	418	626	5	1.82

表-2　コンクリートの配合（UFC）

NO.	単位量(kg／m³)					PP 繊維 (kg／m³)
	水	プレミックス	細骨材 2	高性能減水剤 2	鋼繊維	
UFC	158	1322	932	22	157	－
UFC-PP	158	1322	932	22	157	4.55

表-3　コンクリートの使用材料

セメント	早強ポルトランドセメント（密度 3.15g/cm³）
プレミックス	UFC 専用プレミックス
細骨材 1	長良川水系（吸水率 1.64%，絶乾密度 2.60 g/cm³）
細骨材 2	UFC 専用細骨材
粗骨材 1	砕石 2010 硬質砂岩 （吸水率 0.98%，絶乾密度 2.61 g/cm³）
粗骨材 2	砕石 1505 硬質砂岩 （吸水率 1.64%，絶乾密度 2.61 g/cm³）
高性能減水剤 1	ポリカルボン酸系高性能減水剤
高性能減水剤 2	UFC 専用高性能減水剤
PP 繊維	ポリプロピレン繊維 （繊維長 12mm，繊維径 43μm，密度 0.91g/m³）
鋼繊維	（繊維長 15mm，繊維径 0.2mm）

表-4　コンクリートのフレッシュ特性

NO.	Air (%)	SL (mm)	FL*(mm)			Tc (℃)
			長径	短径	平均	
HSC	1.8	－	745	670	708	13.4
HSC-PP	1.8	14.1	－	－	－	15.6
UFC	－	－	310	300	305	12.7
UFC-PP	－	－	180	150	165	14.6

*HSC はスランプフロー（長径，短径の差が大きいが分離は無），UFC は 0 打モルタルフロー

表-5　コンクリートの硬化体特性

NO.	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	静弾性係数(GPa)	含水率 (%)
HSC	93	4.2	－	43.9	3.8
HSC-PP	96	6.0	－	43.8	3.7
UFC	209	－	35	56.3	0.6
UFC-PP	189	－	37	56.1	0.6

4. 爆裂現象の観察結果

（1）爆裂深さ

コンクリートの爆裂現象（開始時間，継続時間，終了時間）を試験炉の観察用窓から目視にて観察した。さらに，コンクリートの爆裂規模を評価するため，加熱試験後に供試体の加熱表面からの欠損深さ（爆裂深さ）を20mm間隔で計測した。爆裂深さの計測結果から最大，平均爆裂深さおよび爆裂深さ分布を求めた。

表-6に爆裂時間および爆裂深さなどの観察結果を，**図-4～図-7**に爆裂深さ分布と状況写真を示す。

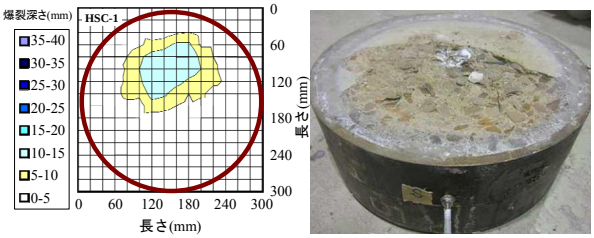
図表より，PP 繊維添加配合においても爆裂が発生することが確認された。HSC は，PP 繊維の添加により爆裂深さと爆裂時間が若干低減されていることが確認された。しかし UFC においては，PP 繊維の爆裂抑止効果は認められず，PP 繊維を添加すると爆裂深さおよび爆裂時間が増加する傾向が認められた。また UFC は，PP 繊維の添加の有無にかかわらず，HSC と比較して爆裂継続時間が 40 分以上と長時間であることが確認された。UFC-PP は，最も爆裂深さが大きく，最大で 35mm 程度であった。

（2）断面観察

加熱試験後にリングを切断してから内部コンクリートの損傷が進展しないように慎重に切断し，断面観察を行った。**写真-1～写真-4** に PP 繊維添加配合の供試体断面写真を示す。写真より HSC-PP は，加熱面に平行なひび割れが爆裂面より 5mm 程度の間隔で確認された。UFC-PP は，加熱面に平行なひび割れが 1mm 程度の間隔で深さ 50mm 程度まで幾重にも発生していることが確認された。PP 繊維無添加の HSC および UFC においても同様のひび割れが確認された。この加熱面に平行なひび割れは，拘束応力に起因する引張ひずみ破壊によるものと推察される。また，ひび割れが幾重にも発生していることから破壊プロセスにおける破壊条件だけでは爆裂は発生せず，水蒸気圧などを考慮した爆裂プロセスを考える必要がある。

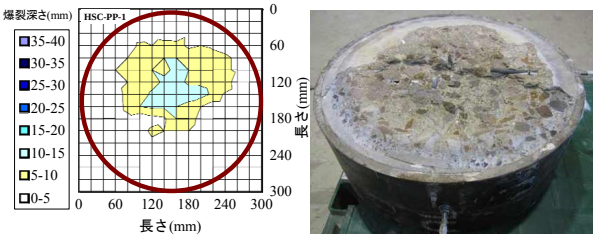
表－6　爆裂観察結果

		HSC	HSC-PP	UFC	UFC-PP
開始時間 (min)	1	4.7	4.3	2.3	3.2
	2	4.3	3.8	3.3	3.2
	平均	4.5	4.1	2.8	3.2
終了時間 (min)	1	6.9	5.8	48.2	67.0
	2	11.9	6.5	40.2	62.5
	平均	9.4	6.2	44.2	64.8
継続時間 (min)	1	2.2	1.5	45.8	63.8
	2	7.6	2.7	36.9	59.3
	平均	4.9	2.1	41.4	61.6
最大深さ (mm)	1	15.0	14.0	15.0	38.0
	2	17.0	13.0	20.0	33.0
	平均	16.0	13.5	17.5	35.5
平均深さ (mm)	1	2.8	3.4	4.6	10.8
	2	5.5	3.6	4.1	9.0
	平均	4.2	3.5	4.3	9.9



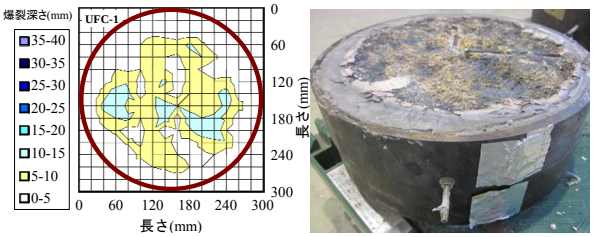
【深さ分布図】　【状況写真】

図-4　爆裂深さ（HSC-1）



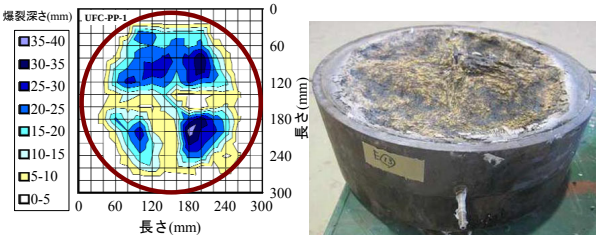
【深さ分布図】　【状況写真】

図-5　爆裂深さ（HSC-PP-1）



【深さ分布図】　【状況写真】

図-6　爆裂深さ（UFC-1）



【深さ分布図】　【状況写真】

図-7　爆裂深さ（UFC-PP-1）

写真-1　断面写真（HSC-PP-1）

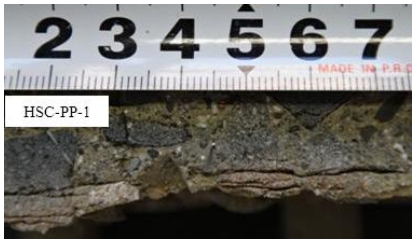


写真-2　断面拡大写真（HSC-PP-1）

写真-3　断面写真（UFC-PP-1）

写真-4　断面拡大写真（UFC-PP-1）

5. 拘束応力計測結果

拘束リング外周面に自己温度補償型ひずみゲージ（耐熱温度：80℃）を設置し，拘束リングの円周方向ひずみを計測した。計測位置は**図-3**に示すとおり，加熱面から5,10,25,40mmとした。ひずみ計測結果より，薄肉円筒を仮定した式（1）を用いてコンクリートに生じる拘束応力を算出した。

$$\sigma_{restrain} = \varepsilon_{\theta} \cdot E_s \cdot \frac{t}{R} \qquad (1)$$

ここに，

$\sigma_{restrain}$　：コンクリートに生じる拘束応力
ε_{θ}　：リング材円周方向ひずみ
t　：リング材厚み
E_s　：リング材弾性係数
R　：リング内半径

図-8～図-11に拘束応力計測結果を示す。図より，爆裂が発生している深さ5,10mm位置では，ひずみゲージの耐熱温度に達する経過時間10分過ぎまでは，いずれの供試体においても，最大10～12MPa程度の拘束応力が発生していることが確認された。25mm位置は，6MPa程度，40mm位置は，2MPa程度であった。拘束応力にコンクリートの種類による顕著な差は認められなかった。

6. 水蒸気圧計測結果

コンクリート内部に設置したステンレスパイプにシリコーンオイルを充填した後，圧力センサー（許容値：10MPa）を接続して計測を行った。爆裂発生初期の表層部分の圧力状態を把握するため，計測位置は**図-3** に示すとおり，加熱面から 5,10,25,40mm のとした。

図-12～図-15 に水蒸気圧ならびに爆裂観察結果から

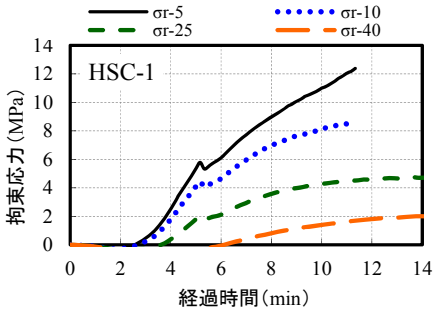


図-8　拘束応力計測結果

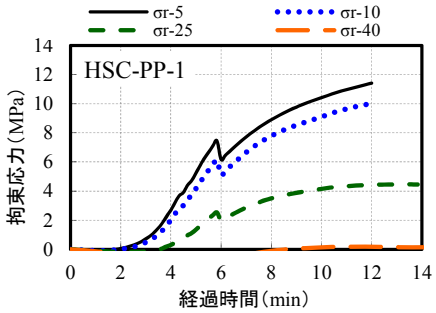


図-9　拘束応力計測結果

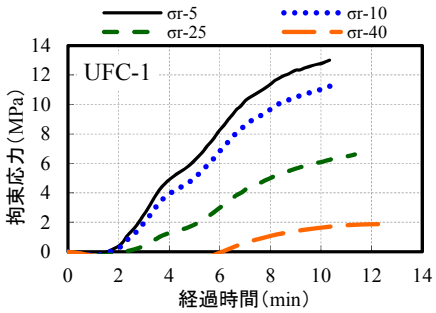


図-10　拘束応力計測結果

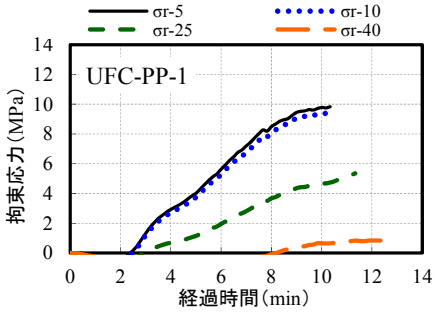


図-11　拘束応力計測結果

得られた爆裂深さの経時変化の関係を示す。全体の傾向は以下のとおりである。すなわち，計測された各供試体の水蒸気圧の最大値は，2～7MPa の高い値を示した。深さ 5,10mm 位置は，爆裂が開始する経過時間 4 分程度から上昇する傾向が認められた。深さ 25,40mm 位置は，経過時間 10 分程度から上昇する傾向が認められた。HSC シリーズは，爆裂が進展している加熱初期に水蒸気圧が

最大値を示すことが確認された。しかし，爆裂が終了している経過時間 10 分以降に深さ 40mm 位置の水蒸気圧が最大値に近い値まで上昇していることも確認された。深さ 40mm 位置で，蒸気圧が高くなったにも関わらず，爆裂が生じなかった点について，引張ひずみ破壊の条件を満たしていなかったことが考えられる。

UFC シリーズでは，深さ 25,40mm 位置の水蒸気圧が 5,10mm 位置より高い値を示すことが確認された。これは，硬化体が緻密であることと，鋼繊維を混入しているため一度の爆裂規模が小さく，爆裂による水蒸気圧の逃げ道が発生しにくいことが影響していると推察される。

7. ひずみ破壊指数による評価

計測された拘束応力を式（2）～式（5）に適用してひずみ破壊指数を算出し，破壊深さ（爆裂深さ）と経過時間の関係を求めた。なお，既報[4]のデータを参考に，ポアソン比を 0.3，引張破壊ひずみを 100,150,200 μ と仮定し，高温時の弾性係数残存比は日本建築学会の提案値[5]を適用して評価を行った。**図-16～図-19** に爆裂深さの推定値を示す。なお，図中凡例は，「引張破壊ひずみ－ポアソン比」を示している。

$$\varepsilon = \sigma / E_c \tag{2}$$

$$\varepsilon_z = 2\varepsilon \cdot \nu_c \tag{3}$$

$$I_{\varepsilon\text{-}f} = \varepsilon_z / \varepsilon_{t\text{-}f} \tag{4}$$

$$I_{\varepsilon\text{-}lim} = 1 \tag{5}$$

ここに，

σ ：面内直応力
ε ：面内直ひずみ
ε_z ：面外直ひずみ
$\varepsilon_{t\text{-}f}$ ：引張破壊ひずみ（100,150,200 μ）
E_c ：弾性係数（残存比：日本建築学会提案値[5]）
ν_c ：ポアソン比（0.3）
$I_{\varepsilon\text{-}f}$ ：ひずみ破壊指数
$I_{\varepsilon\text{-}lim}$ ：ひずみ破壊限界値

図より，ひずみ破壊指数より推定した爆裂深さは，特に爆裂初期において，爆裂開始時間および爆裂の進行を精度よく捉えられていることが確認された。中でも引張破壊ひずみが 100 μ の時に最も推定精度が高くなった。

UFC シリーズでは，拘束リングの計測に使用したひずみゲージの耐熱温度が低かった点と爆裂が HSC に比べて長時間継続したことにより，拘束応力を用いたひずみ破壊指数の適用が難しかった。今後は，高温用ひずみゲージを使用するなどの検討が必要である。

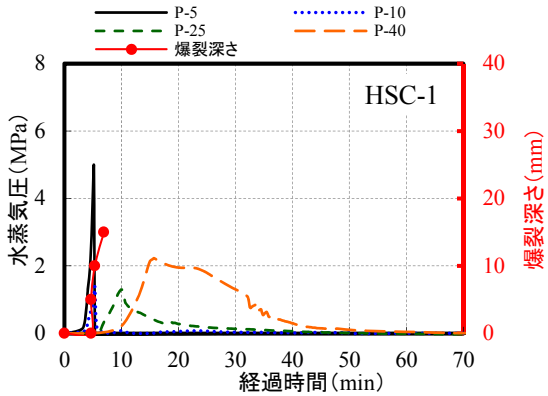


図-12　水蒸気圧と爆裂深さの経時変化（HSC-1）

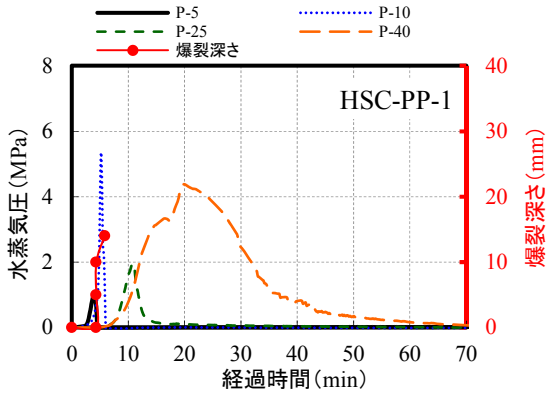


図-13　水蒸気圧と爆裂深さの経時変化（HSC-PP-1）

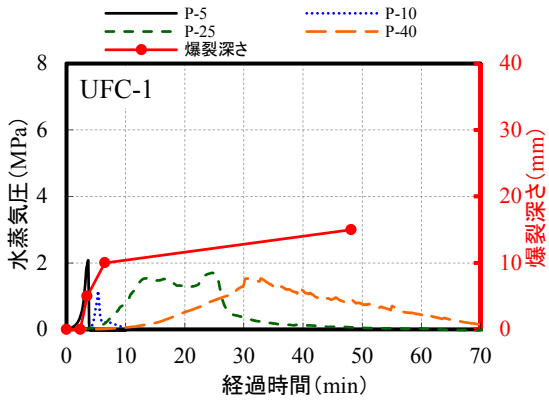


図-14　水蒸気圧と爆裂深さの経時変化（UFC-1）

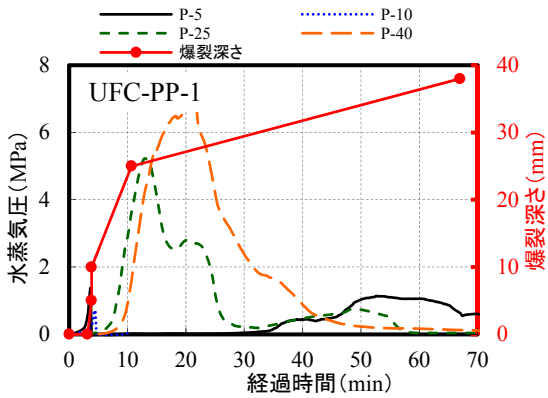


図-15　水蒸気圧と爆裂深さの経時変化（UFC-PP-1）

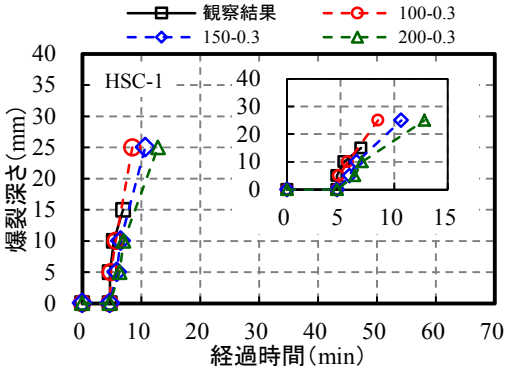


図-16　爆裂深さの推定値（HSC-1）

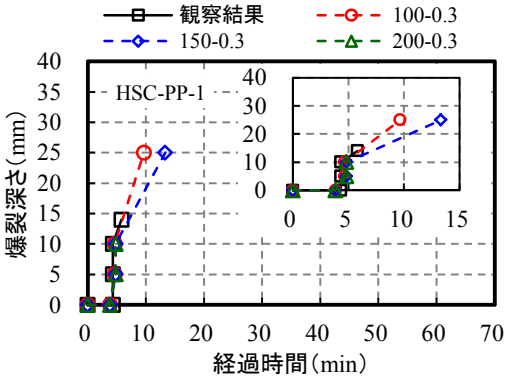


図-17　爆裂深さの推定値（HSC-PP-1）

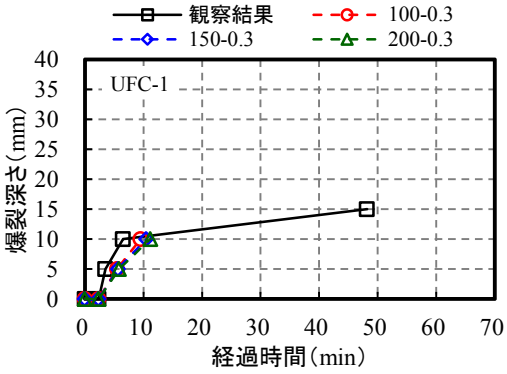


図-18　爆裂深さの推定値（UFC-1）

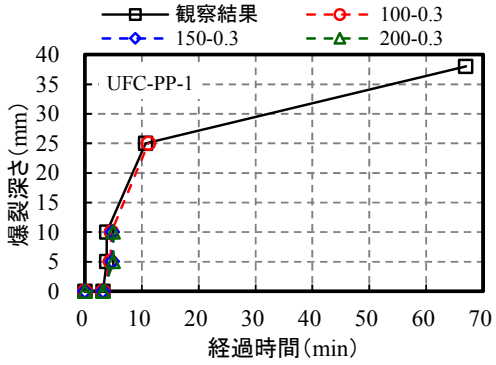


図-19　爆裂深さの推定値（UFC-PP-1）

8. まとめ

筆者らが提案している爆裂発生指標の適用性評価のため，HSC と UFC にて，PP 繊維の添加効果も含めて拘束リング試験法にて評価した。結果を以下にまとめる。

(1) 加熱後の供試体断面に平行なひび割れが観察され，筆者らが提案している爆裂メカニズムの破壊プロセスにおける引張ひずみ破壊を確認することができた。

(2) 強度レベルの異なる HSC と UFC どちらのシリーズも，爆裂発生指標のひずみ破壊指数を用いて定量的に爆裂深さを精度よく推定可能であることが確認できた。特に引張破壊ひずみを 100 μ とした時に実験結果と最もよく一致した。

(3) UFC シリーズは爆裂が長時間継続する傾向を示し，計測方法に課題があることが確認された。

(4) PP 繊維を HSC は 1.82kg/m^3，UFC は 4.55kg/m^3 添加したが，顕著な爆裂抑制効果は認められなかった。特に UFC の場合は，逆に PP 繊維を添加した場合に爆裂規模が大きくなる傾向を示した。これは，UFC シリーズの終盤の爆裂発生プロセスがひずみ破壊した薄片の座屈破壊であるために，高温強度がより低いと思われる UFC-PP の爆裂規模が大きくなったと推察している。

謝辞

本研究は，平成 23 年度鹿島学術振興財団の研究助成ならびに平成 23 年度科学技術研究補助金基盤研究(C)研究課題番号：25420459(代表：小澤満津雄)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.

2) 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高温環境下における耐爆裂性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.

3) 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爆裂評価手法のリング標準化に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 35，No. 1，pp. 1135-1140，2013.

4) 谷辺徹，鎌田亮太，小澤満津雄，六郷恵哲：拘束リング試験による高温環境下でのコンクリートの爆裂発生指標の検討，日本建築学会学術講演梗概集（北海道）,pp.103-104，2103.8

5) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp.63-65，2009.