

論文 リング拘束試験方法における高強度コンクリートの爆裂性状に及ぼす養生期間の影響

鎌田 亮太*1・小澤 満洋雄*2・明石 孝太*3・谷辺 徹*4

要旨: 本研究では、養生期間の異なるコンクリートについて、含水率が爆裂性状に及ぼす影響を拘束リング試験により評価した。あわせて、筆者らのグループで提案している爆裂発生指標の適用性を本条件にて検証した。その結果、長期間の養生によって含水率が低下することで、加熱時に発生する水蒸気圧が低下し、爆裂規模が小さくなる傾向を示した。また、養生期間を2ヶ月とした高強度コンクリートにおいては、爆裂発生指標の引張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。

キーワード: 高強度コンクリート, 爆裂, 拘束リング試験, 含水率, 水蒸気圧, 熱応力, 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を生じることがある。この爆裂は、コンクリートの強度が大きい場合や含水率が高いほど生じやすいと言われている。この爆裂の発生原因としては、図-1に示すようにコンクリート中の水分の水蒸気圧と熱膨張の拘束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^{1,2)}。高温時の爆裂現象や熱損傷を抑制する方法としては、ポリプロピレン (PP) 繊維などを添加する方法と耐火被覆材を設置する方法が一般的である。しかし、水蒸気圧と熱応力のどちらが支配的か、確たる結論が得られていない現状がある。

筆者らは、これまでに耐爆裂評価手法を提案している^{3,4)}。この手法は、鋼製リングにコンクリートを打設した供試体を一面加熱する拘束リング試験法を用いて、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(図-2参照)。

本研究では高強度コンクリートの爆裂性状に及ぼす養生期間の影響を確認するため、材齢を短期(2ヶ月)および長期(12ヶ月)とした供試体の拘束リング試験を実施し、爆裂性状を確認するとともに、本条件における爆裂発生指標の適用の可能性を検証した結果を報告する。また、PP繊維の添加効果についてもあわせて確認した。

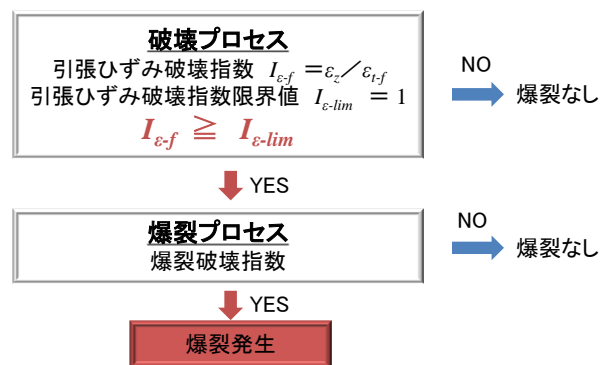


図-2 爆裂発生指標

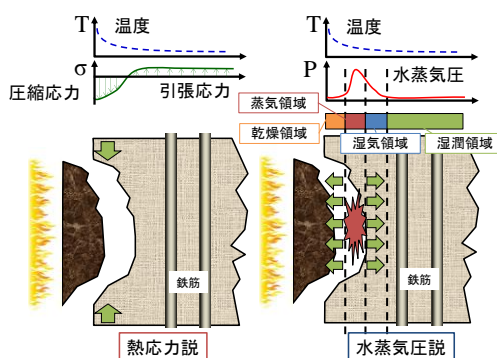


図-1 爆裂メカニズム

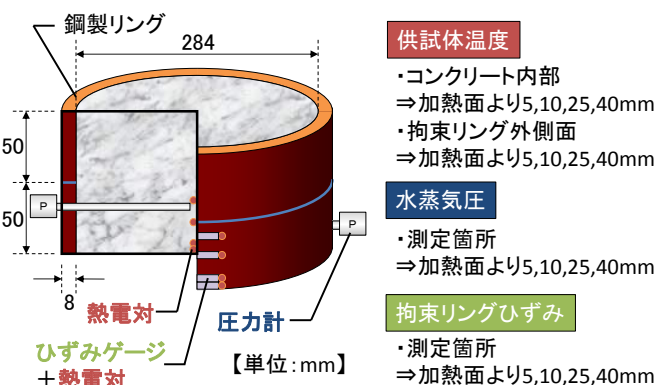


図-3 供試体概要

*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 修士 (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 群馬大学 工学部 社会環境デザイン工学科 (学生会員)

*4 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 博士 (工学) (正会員)

2. 実験概要

2.1 供試体

図-3 に本研究で用いた拘束リング供試体の概要を示す。供試体は鋼製リングにコンクリートを充填し、打設後1日で脱型し、試験に供するまで(2ヶ月、12ヶ月)封かん養生を行った。なお、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。供試体の内部温度および拘束リング表面温度測定用にK型熱電対を設置した。設置は、加熱面から5、10、25、40mmとした。水蒸気圧測定用に外径5mm×内径3mm×長さ170mmのステンレスパイプを4本設置した。設置位置は加熱面から5、10、25、40mmとした。ステンレスパイプにシリコンオイルを充填した後、圧力センサー(許容値:10MPa)を接続して測定を行った。拘束応力を推定するために、拘束リングの円周方向に自己温度補償型ひずみゲージを貼付した。ひずみゲージは常温用(耐熱温度:80℃)を用いた。位置は加熱面から5、10、25、40mmとした。ひずみゲージは2枚使用し、拘束リングの対極に貼付した。各供試体は、材齢2ヶ月のものを1条件につき2体作製し、材齢12ヶ月のものを1条件につき1体作製した。

2.2 コンクリート

表-1、2にコンクリートの配合表および使用材料を示す。また、表-3、4にコンクリートのフレッシュ性状と強度特性および含水率を示す。HSCシリーズの含水率はHSC-2が4.5%、HSC-12が2.7%であった。強度試験および含水率試験にはφ100×200mmの円柱供試体を用い

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、拘束リング供試体と同様に、試験に供するまで封かん養生とした。

2.3 加熱試験

加熱試験における加熱曲線は、急速加熱条件での性状を評価するため、加熱速度が速いドイツ規格のRABT30の加熱曲線⁵⁾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分とした。その後、110分間で常温まで徐冷した。

2.4 爆裂状況

コンクリートの爆裂状況(開始時間、終了時間)を確認するため、試験炉の観察用窓から飛散物を目視にて観察した。また、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間隔で測定した。

2.5 円筒モデルによる拘束応力の算出方法

拘束応力は、拘束リングの円周方向ひずみを用いて算出した。式(1)に計算式を示す。

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

σ_{re} : 拘束応力

ε_{θ} : 円周方向ひずみ

E_S : 拘束リングの弾性係数

t : 拘束リングの厚み

R : 拘束リングの内半径

表-1 コンクリートの配合

記号	W/C	単位量 (kg/m ³)						
		水 W	セメント C	細骨材 S1	細骨材 S2	粗骨材 G	混和剤 A	PP 繊維 PPF
HSC	0.3	150	500	359	372	1169	4	—
HSC+PP	0.3	150	500	359	372	1169	4	1.82

表-2 使用材料

記号	詳細
C	早強ポルトランドセメント (密度 3.15g/cm ³)
S1	細目砕砂 (吸水率 1.06%, 絶乾密度 2.60g/cm ³)
S2	砕砂 (吸水率 1.93%, 絶乾密度 2.68g/cm ³)
G	砕石 2005 輝緑凝灰岩 (吸水率 0.94%, 絶乾密度 2.83g/cm ³)
A	ポリカルボン酸系高性能減水剤
PPF	ポリプロピレン繊維 (繊維長 12mm, 繊維径 43μm, 密度 0.91g/cm ³)

表-3 コンクリートのフレッシュ性状

記号	Air (%)	SL (cm)	FL (mm)			Tc (°C)
			長径	短径	平均	
HSC	0.6	—	635	650	643	29.0
HSC+PP	0.8	18	—	—	—	29.5

表-4 コンクリートの強度特性および含水率

記号	材齢 (ヶ月)	圧縮強度 (MPa)	静弾性係数 (GPa)	含水率 (%)
HSC-2	2	80	45	4.5
HSC-12	12	79	48	2.7
HSC+PP-2	2	83	45	4.3
HSC+PP-12	12	76	52	2.5

2.6 引張ひずみ破壊指数 ($I_{\epsilon-f}$)

本指数では、加熱面に平行な拘束応力がポアソン効果により面外方向に引張ひずみ (ϵ_z) が生じ、この引張ひずみが引張破壊ひずみ (ϵ_{t-f}) を超えると破壊が生ずるとしている。計測された拘束応力を式(2)~式(5)に適用して、引張ひずみ破壊指数を算出し、爆裂深さと経過時間の関係を求めた。なお、既報⁶⁾のデータを参考に、見掛けのポアソン比を 0.3 とした。また、引張破壊ひずみは道越ら⁷⁾のデータを用いた。すなわち、高温時の圧縮応力とひずみの関係から弾性範囲の最大値を適用し、本検討では 100, 150, 200 μ とした。高温時の弾性係数の残存率は日本建築学会の提案値⁷⁾を適用して評価を行った。

$$\epsilon = \sigma / E_c \quad (2)$$

$$\epsilon_z = 2\epsilon \cdot \nu_c \quad (3)$$

$$I_{\epsilon-f} = \epsilon_z / \epsilon_{t-f} \quad (4)$$

$$I_{\epsilon-lim} = \epsilon_z / \epsilon_{t-f} = 1 \quad (5)$$

σ : 面内直応力

ϵ : 面内直ひずみ

ϵ_z : 面外直ひずみ

ϵ_{t-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⁸⁾)

ν_c : 見掛けのポアソン比 (0.3)

$I_{\epsilon-f}$: 引張ひずみ破壊指数

$I_{\epsilon-lim}$: 引張ひずみ破壊限界値

3. 実験結果および考察

3.1 炉内温度および供試体内部温度

図-4 に炉内温度の経時変化の一例を示す。これより、設定温度をよく再現できていることが確認された。

図-5~8 に供試体内部温度の経時変化を示す。HSC-2 の 5~40mm および HSC-12 の 5, 10mm は経過時間 5 分以降に急激に上昇し始めていることが確認された。これは、各々の経過時間に当該深さまで爆裂が到達しているためと推察される。なお、各深さの爆裂発生温度は今回の供試体条件では 200 $^{\circ}\text{C}$ 程度であることが確認された。一方、PP 繊維を添加した供試体においては急激な温度上昇は確認されなかった。

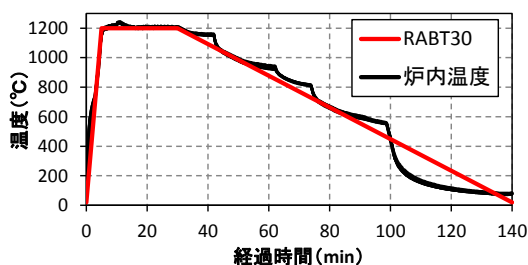


図-4 炉内温度 (HSC-12)

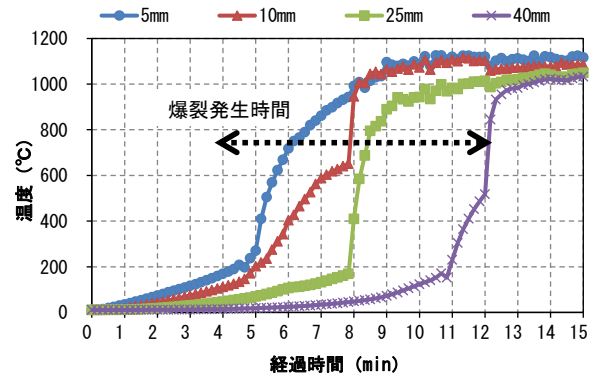


図-5 供試体内部温度測定結果 (HSC-2)

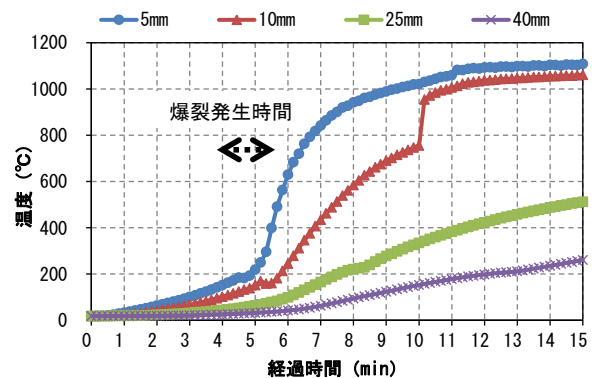


図-6 供試体内部温度測定結果 (HSC-12)

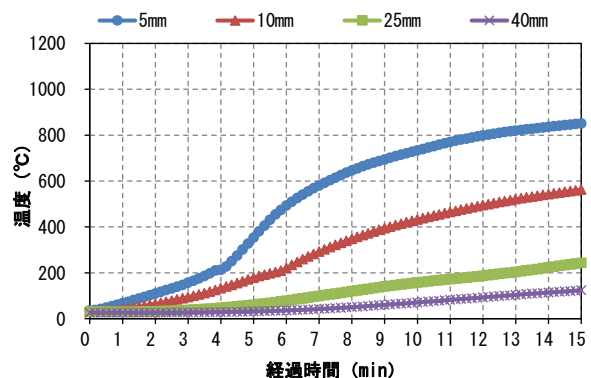


図-7 供試体内部温度測定結果 (HSC+PP-2)

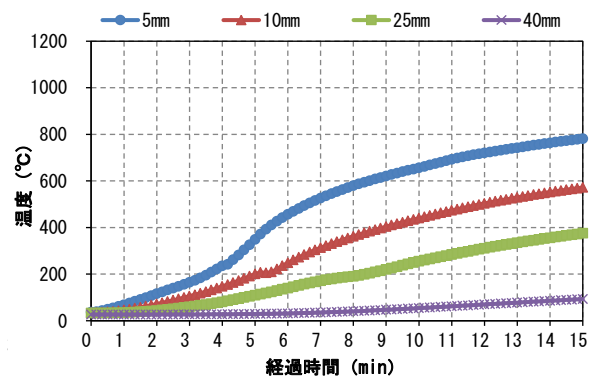
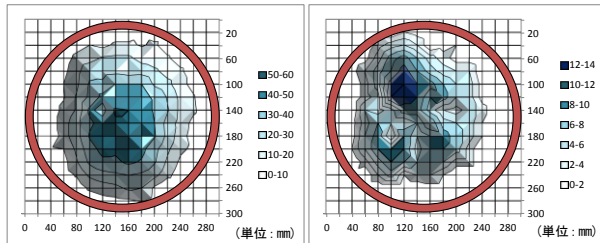


図-8 供試体内部温度測定結果 (HSC+PP-12)

加熱表面状況を示す。HSC-2において、爆裂深さは最大で51mmとなった。HSC-12において、爆裂深さは最大で14mmとなった。一方、HSC+PPシリーズについては、目視観察において、いずれの供試体も爆裂片の落下が観測できなかった。しかし、爆裂深さを測定した結果、HSC+PP-2は最大6mm、HSC+PP-12は最大2mm程度の剥離が認められた。

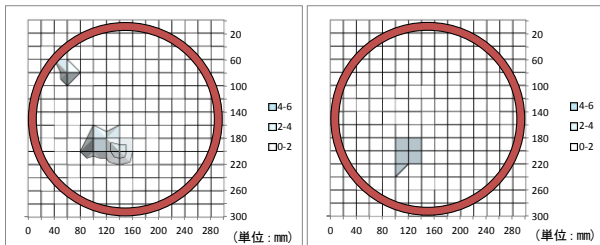
3.3 拘束応力の経時変化

図-10~13に拘束リングのひずみ計測結果から式(1)を用いて算出した拘束応力の経時変化を示す。なお、値は歪ゲージの耐熱温度である80℃までとしている。これより、HSC-2において、5mmの拘束応力は、加熱開始2分で急上昇し、4.3分で5.3MPaになった時、爆裂により若干低下した。その後、再び上昇し、5.6分で6.8MPaとなった際、2回目の低下が見られた。更に7.6分で8.6MPaを示した際、大きな爆裂が生じ、6.2MPaまで低下した。



【HSC-2】

【HSC-12】



【HSC+PP-2】

【HSC+PP-12】

図-9 爆裂深さ測定結果



【HSC-2】

【HSC+PP-2】



【HSC-12】

【HSC+PP-12】

写真-1 加熱表面の状況

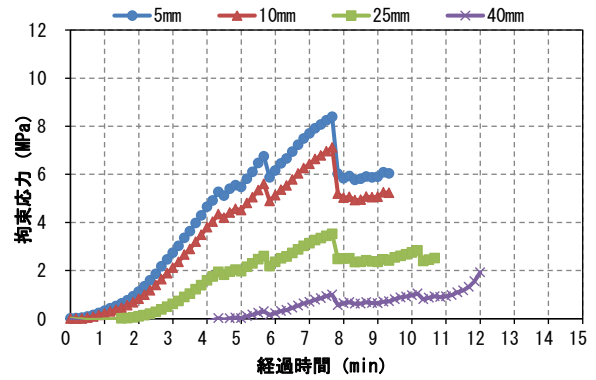


図-10 拘束応力計測結果 (HSC-2)

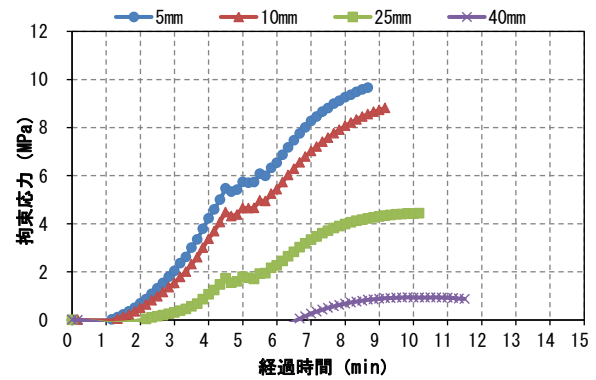


図-11 拘束応力計測結果 (HSC-12)

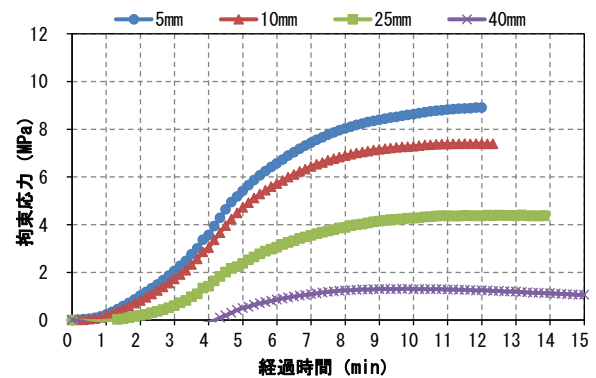


図-12 拘束応力計測結果 (HSC+PP-2)

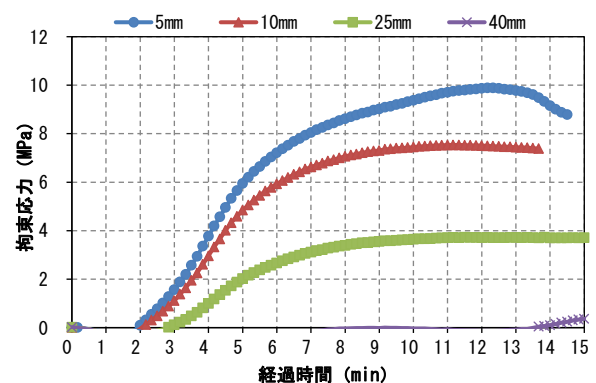


図-13 拘束応力計測結果 (HSC+PP-12)

10mm ならびに 25mm 位置においても、爆裂によって拘束応力の低下が見られた。HSC-12 においては、4.5 分まで HSC-2 と同様の挙動を示し、5mm の拘束応力は、4.7 分で 5.5MPa となった時、爆裂が生じた。その後、爆裂が終了する 5.4 分まで急激な上昇は見られず、その後再び上昇した。10mm ならびに 25mm 位置においても、爆裂の影響によって同様の傾向となった。

一方、HSC+PP シリーズにおいては、HSC シリーズで観測されたような拘束応力の低下は生じず上昇し続けた。これは、10mm 以深において、爆裂の影響を受けなかったためであると推察される。

3.4 水蒸気圧の経時変化

図-14~17 に水蒸気圧の経時変化を示す。なお、爆裂が生じた HSC シリーズについては、観察結果とコンクリート温度の変曲点から求めた爆裂深さの経時変化も併せて示した。HSC-2 において、爆裂は加熱開始 3 分から 12 分程度まで継続した。なお、各深さの爆裂発生時の水蒸気圧が大きく異なっているが、これは、引張ひずみ破壊に達した時点での各深さの水蒸気圧が異なったためだと推察される。HSC-12 において、爆裂は加熱開始 4 分から 1 分半程度継続した。水蒸気圧は加熱面に近い位置から徐々に上昇する傾向を示した。また、各深さまで爆裂が到達した時刻に水蒸気圧のピークが確認された。25mm および 40mm 位置において、同深さに爆裂が発生した HSC-2 は圧力が解放され、ピーク後に急激に低下した。しかし、同深さにて爆裂が発生していない HSC-12 は、水蒸気圧は 2.0Ma 程度と同様の値を示したが、その

後緩やかに低下した。これは、爆裂による圧力解放が発生しなかったことが影響していると推察される。HSC-PP シリーズは水蒸気圧にピークを示すが、爆裂が発生していないことも確認された。図-18 に HSC シリーズにおける含水率と水蒸気圧の最大値との関係を示す。5mm および 10mm 位置では含水率の低下に伴い、水蒸気圧の最大値も低下しており、HSC-2 においては、水蒸気圧の最大値は、4.4MPa および 5.9MPa と高い値を示したのに対し、コンクリートの含水率が低い HSC-12 においては、それぞれ 2.5MPa および 3.2MPa となった。

3.5 引張ひずみ破壊指標による爆裂深さ推定

図-19, 20 に HSC シリーズの爆裂深さを引張ひずみ破壊指数を用いて推定した結果を示す。なお、観察結果とコンクリート温度の変曲点から求めた爆裂深さの経時変化も併せて示した。HSC-2 は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。一方で、HSC-12 は 10mm 位置までは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が、25mm 以深においては、実際には爆裂が生じていないにもかかわらず、推定値では爆裂が生じる結果となっていた。これより、含水率の影響も含めて最大爆裂深さを精度よく推定することは、引張ひずみ破壊指数のみでは不十分であることが確認された。すなわち、拘束応力により発生する面外方向への引張ひずみにより、引張ひずみ破壊指数が限界値を超え、コンクリートが破壊条件に達する際、水蒸気圧により破壊片を面外へ弾き出す圧力条件を考慮する必要があることが確認された。

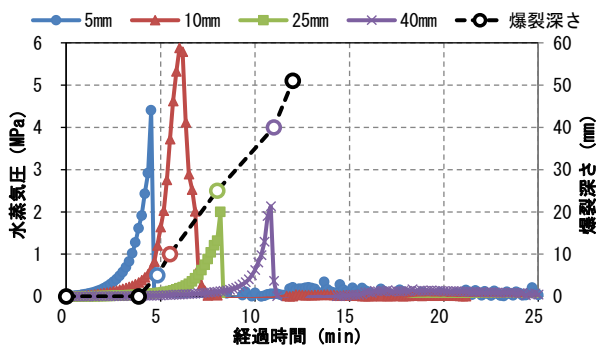


図-14 水蒸気圧測定結果 (HSC-2)

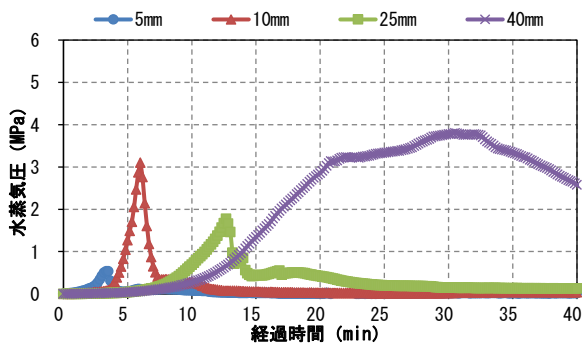


図-16 水蒸気圧測定結果 (HSC+PP-2)

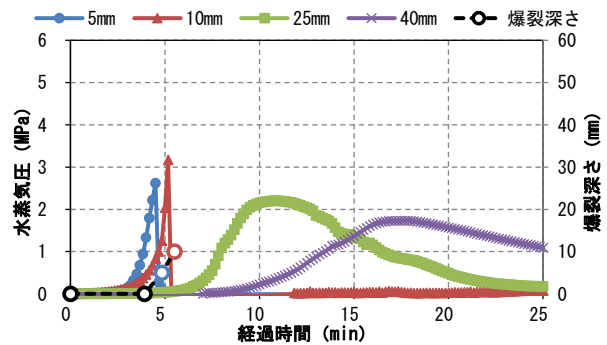


図-15 水蒸気圧測定結果 (HSC-12)

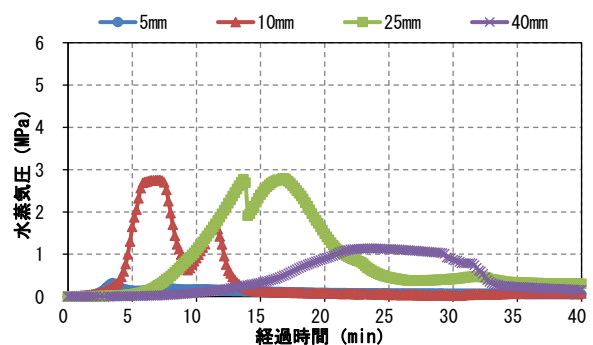


図-17 水蒸気圧測定結果 (HSC+PP-12)

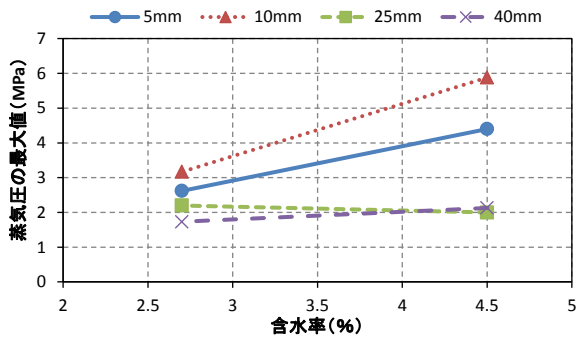


図-18 含水率と水蒸気圧の最大値との関係 (HSC)

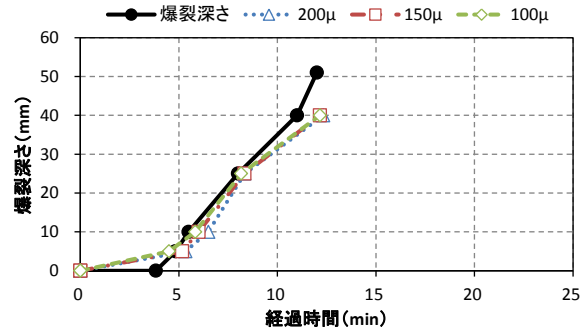


図-19 爆裂深さ推定結果 (HSC-2)

4. 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、養生期間の異なる供試体において、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。以下に結果をまとめる。

(1)養生期間を 2 ヶ月および 12 ヶ月とした HSC シリーズにおいては、長期間の養生によって含水率が低下することで、加熱時に発生する水蒸気圧が低下し、爆裂規模が小さくなる傾向を示した。

(2)HSC+PP シリーズにおいては、養生期間の差による各種評価結果への大きな影響は認められず、養生期間が 2 ヶ月の供試体の爆裂規模は、6mm 程度表層部が剥離している程度であった。

(3)含水率が 4.5% の HSC シリーズにおいては、爆裂発生指標の引張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。

(4)長期養生を行った含水率が 2.7% の HSC シリーズにおいては、実際には爆裂が生じていないにもかかわらず、推定値では爆裂が生じる結果となっていた。含水率の影響も含めて最大爆裂深さを精度よく推定することは、引張ひずみ破壊指数のみでは不十分であることが確認された。

謝辞

本研究は NEXCO 東日本研究助成および科学技術研究補助金(基盤研究(C), 課題番号: 25420459, 代表: 小澤満津雄)の補助を受けて行った。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) 王若平, 川上寛正, 小澤満津雄, 森本博昭: コンクリートの爆裂現象に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1703-1708, 2006

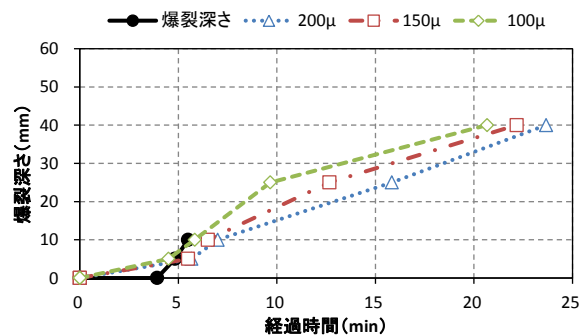


図-20 爆裂深さ推定結果 (HSC-12)

- 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
- 4) 谷辺徹, 小澤満津雄, 鎌田亮太, 内田裕一, 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
- 5) ZTV-TUNNEL Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien fuer den Bau von Strassen-tunneln Teil 1 Geschlossene Bauweise, Bundesministerium fuer Verkehr, 1995
- 6) 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, 2013.8
- 7) 道越真太郎, 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, 第 621 号, pp.169-174, 2007
- 8) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, pp.63-65, 2009