

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 14 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420459

研究課題名(和文) 火災時におけるコンクリートの爆裂メカニズムの解明と爆裂評価手法の提案

研究課題名(英文) Thermal stress estimation in relation to spalling of high strength concrete restrained with steel rings at high temperatures

研究代表者

小澤 満津雄(Ozawa, Mitsuo)

群馬大学・大学院理工学府・准教授

研究者番号：80313906

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋コンクリート構造物が火災を受けると、表層部が爆発的に剥離・剥落するいわゆる爆裂現象が生じる。コンクリートが剥落すると内部鉄筋は露出し高温により品質は大きく低下する。このことから、爆裂はコンクリート工学における重要な研究テーマとなっている。本研究では、コンクリートの火災時の爆裂試験としてリング拘束試験を提案した。本手法は拘束環境下におけるコンクリートの爆裂性状を評価できる。併せて、蒸気圧と熱応力を測定し爆裂のメカニズムを検討した。その結果、爆裂が発生時期の蒸気圧が急激に上昇し熱応力も上昇することが確認できた。

研究成果の概要(英文)：This paper reports on an experimental study regarding the behavior of restrained High Performance Concrete (HPC) in response to the type of extreme heating associated with fire. The study was intended to support estimation of thermal stress from the strain in a restraining steel ring and vapour pressure in restrained concrete under the conditions of a RABT 30 rapid heating curve. Thermal stress calculation was based on the thin-walled cylinder model theory. A spalling failure model based on a tensile strain failure model was also proposed. The results indicated that such modeling enables estimation of the point at which spalling initiates during heating and the consequent spalling depth.

研究分野：建設材料

キーワード：コンクリート リング拘束試験 爆裂 耐火性

1. 研究開始当初の背景

鉄筋コンクリート構造物が火災を受けると、表層部が爆発的に剥離・剥落するいわゆる爆裂現象が生じる。コンクリートが剥落すると内部鉄筋は露出し高温により品質は大きく低下する。その結果、構造物の耐荷性能は著しく損なわれ、極めて危険な状態となる。鎮火後の構造物の復旧に際しても、費用の増大は避けることができず、社会的な損失は大きなものとなる。これらのことから、爆裂はコンクリート工学における重要な研究テーマとなっている。既往の研究により、爆裂は熱応力説 1)と蒸気圧応力説 2)によって生じるとされている(図-1,2)。また、爆裂の抑制方法は蒸気圧低減効果を期待して合成繊維であるポリプロピレン繊維(PP 繊維)を混入する方法が一般的に用いられている。しかしながら、①熱応力説と蒸気圧説のどちらが支配的であるのか？②PP 繊維を混入しても爆裂が抑制できない状況ではどうするのか？など、まだ、未解明の課題がある。土木学会や日本建築学会において耐火性に関する基準はあるが、高温環境下におけるセメント系材料の爆裂判定手法の標準化は未だになされていない。

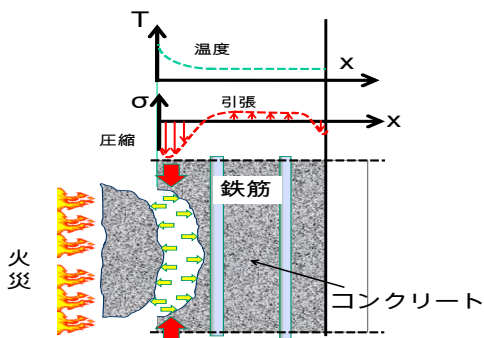


図-1 熱応力説

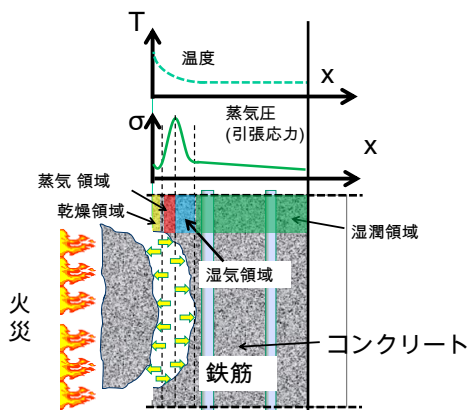


図-2 蒸気圧説

2. 研究の目的

そこで、本研究では高温環境下におけるセメント系材料の爆裂判定手法を提案することを目的とする。

3. 研究の方法

図-3 にリング拘束試験方法の概要を示す。この方法は熱応力と蒸気圧とを合わせて考慮したコンクリートの耐爆裂性を評価できるという特徴がある。すなわち、拘束鋼管の内部にコンクリートを打設し供試体を作製する。供試体下面のコンクリート部分のみを加熱する。加熱には水平炉を用いる(図-4)。加熱によるコンクリートの膨張を拘束鋼管が拘束することにより、熱応力(圧縮応力)が生じる。コンクリートの膨張により生じる拘束鋼管のひずみを計測し、熱応力を算出できる。併せてコンクリート内部の蒸気圧を計測し、熱応力および蒸気圧を定量的に検討し、爆裂の有無と併せて爆裂判定手法を開発した。

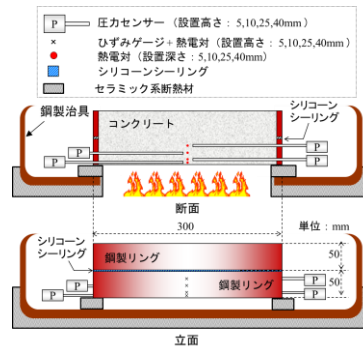


図-3 リング試験の概要

4. 研究成果

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:HSC-2)および長期(12ヶ月:HSC-12)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(HSSC+PP-2, HSC+PP-12)。

1) 供試体の内部温度

図-4.5 に RABT30 加熱曲線で加熱した際の HSC-2 と HSC+PP-2 の内部温度の経時変化の例を示す。HSC-2 の 5~40mm の内部温度は、加熱開始 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°C 程度であることが確認された。一方、HSC+PP-2 は急激な温度上昇は確認されなかった。

2) 爆裂現象観察および爆裂深さ

図-6 に爆裂深さ測定結果を示す。また、写真-1 に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6mm、HSC+PP-12は2mm程度の剥離が認められた。

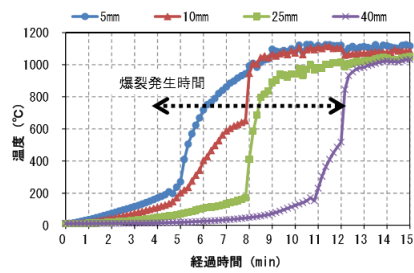


図-4 内部温度 (HSC-2)

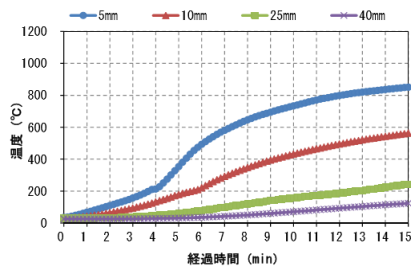


図-5 内部温度 (HSC+PP-2)

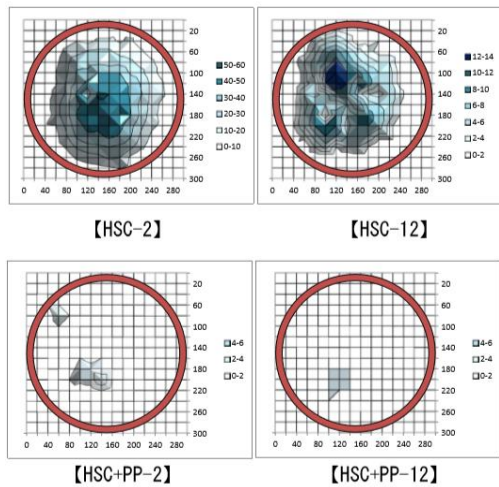


図-6 爆裂深さ

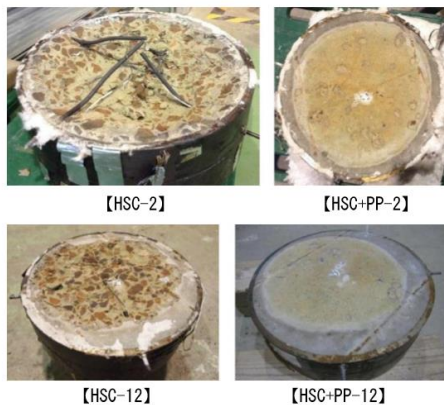


写真-1 爆裂状況

### 3) 拘束応力の経時変化

図-7~10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°C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。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。

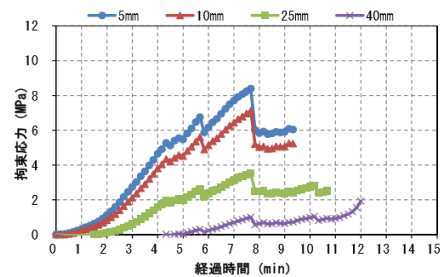


図-7 拘束応力 (HSC-2)

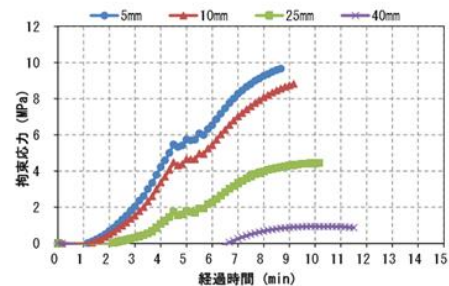


図-8 拘束応力 (HSC-12)

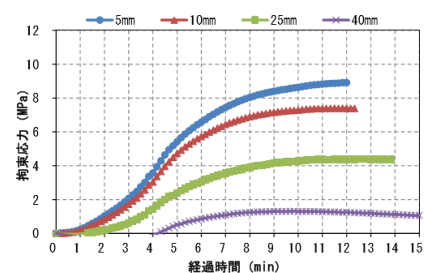


図-9 拘束応力 (HSC+PP-2)

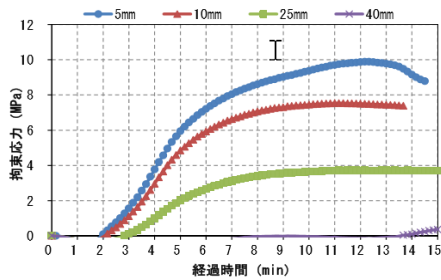


図-10 拘束応力 (HSC+PP-12)

#### 4) 水蒸気圧の経時変化

図-11～14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。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-15にHSCシリーズにおける含水率と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、蒸気圧の最大値も低下しており、HSC-2においては、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。

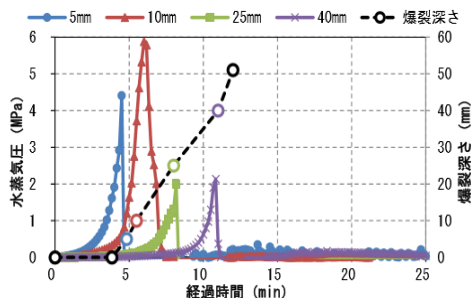


図-11 蒸気圧 (HSC-2)

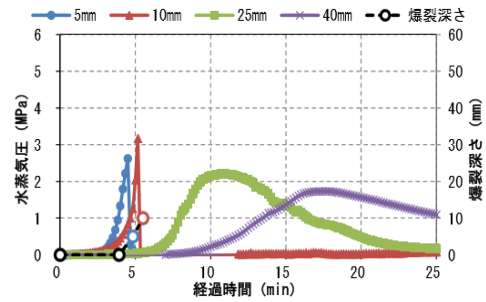


図-12 蒸気圧 (HSC-12)

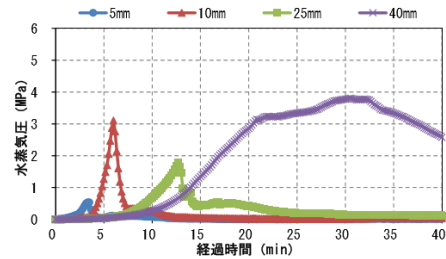


図-13 蒸気圧 (HSC+PP-2)

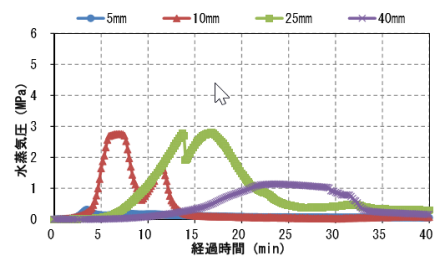


図-14 蒸気圧 (HSC+PP-12)

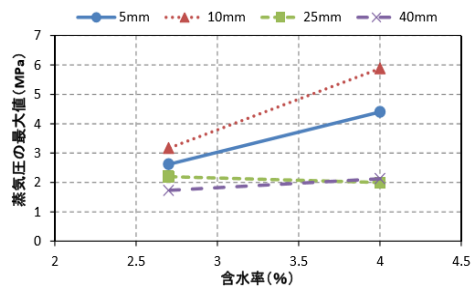


図-15 含水率と蒸気圧の最大値

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 18 件)

- 1) 明石孝太, 小澤満津雄, 藤本謙太郎, 鎌田亮太: 引張ひずみ破壊モデルを適用した火災時のコンクリートの爆裂解析, コンクリート工学年次論文集, 2016(採択決定) 査読有
- 2) 鉄羅健太, 小澤満津雄, 迫井裕樹, 藤本謙太郎: 火害損傷を受けたコンクリートの塩化物イオンの見かけの拡散係数による耐久性評価, コンクリート工学年次



- 論文集, 2016(採択決定) 査読有り
- 3) 山本哲, 小澤満津雄, 鎌田亮太, 谷辺徹: 火害を受けたコンクリートのけい酸塩系表面含浸材による補修効果, コンクリート工学年次論文集, 2016(採択決定) 査読有
  - 4) 鎌田 亮太, 小澤 満津雄, 明石 孝太, 谷辺 徹: 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, コンクリート工学年次論文集, 2016(採択決定) 査読有
  - 5) 小澤満津雄, 川崎佑磨, 内田慎哉, 谷辺徹: 三次元 AE 計測による高強度コンクリートの爆裂プロセス評価, コンクリート構造物の造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 15 巻, pp.173-178,2015,10 査読有
  - 6) 明石孝太, 小澤満津雄, 周波, 内田裕市: 内部養生を施した超高強度コンクリートの爆裂抑制効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.985-990, 2015 査読有
  - 7) 鉄羅健太, 小澤満津雄, 竹渕貴博, 谷辺徹: リング拘束試験方法によるコンクリートの爆裂評価と引張ひずみ破壊モデルの解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1015-1020, 2015 査読有
  - 8) 鎌田亮太, 坂本撰, 谷辺徹, 小澤満津雄: P P 繊維及び耐火被覆が高温履歴を受けたコンクリートの物質侵入抵抗性に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1021-1026, 2015 査読有
  - 9) Y. Kawasaki, M. Ozawa, S. Uchida & T. Tanibe: Basic study on evaluation for explosive spalling process in concrete by acoustic emission methods, Proceedings of the 4th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, pp. 188-193, 2015 査読有
  - 10) M. Ozawa, T. Tanibe, R. Kamata, Y. Uchida: Development of a model for fire-related spalling failure of UHPC, Proceedings of the 4th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, pp. 364-371, 2015 査読有
  - 11) 川崎 佑磨, 小澤 満津雄, 内田 慎哉, 谷辺 徹, 岡本 亨久: AE 法に基づくコンクリートの爆裂発生過程の評価に関する基礎的研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第 14 巻, pp.101-106, 2014, 10 査読有
  - 12) M. Ozawa, H. Morimoto: Effects of various fibres on high-temperature spalling in high-performance concrete, Construction and Building Materials, No.71, pp.83-92, 2014 査読有
  - 13) Munkhtsatsral Davaajav, 小澤 満津雄, 周波, 内田 裕市: 天然繊維を適用した超高強度コンクリートの爆裂抑制効果, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.36, No.1, pp.1330-1335, 2014 査読有
  - 14) 谷辺 徹, 小澤 満津雄, 鎌田 亮太, 内田裕市: 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, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.36, No.1, pp.1336-1341, 2014 査読有
  - 15) 石塚 遼, 小澤 満津雄, 谷辺 徹, 鎌田亮太: 拘束リング試験方法によるコンクリートの爆裂性状の解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1342-1347, 2014 査読有
  - 16) 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 p. 104-117, 2014 査読有
  - 17) T. Tanibe, M. Ozawa, R. Kamata and K. Rokugo: Steel Ring-Based Restraint Of HSC Explosive Spalling In High Temperature Environments, Journal of Structural Fire Engineering, Volume 5, Number 3, pp.239-250, 2014 査読有
  - 18) 小澤 満津雄, 森本 博昭: 高温環境下における天然繊維を添加した高強度コンクリートの爆裂抑制効果, 土木学会論文集, E2, Vol. 69, No. 3, pp. 324-336, 2013
- [学会発表](件数: 16 件)  
 主要なものを記す。
- 1) M. Ozawa: Development of a model for fire-related spalling failure of UHPC, The RILEM 4th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, 09 October 2015, Germany Leipzig,
  - 2) Y. Kawasaki (M. Ozawa): Basic study on evaluation for explosive spalling process in concrete by acoustic emission methods, The RILEM 4th International Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, 09 October 2015, Germany Leipzig,
  - 3) 小澤満津雄: 三次元 AE 計測による高強度コンクリートの爆裂プロセス評価, コンクリート構造物の造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム, 10/16, 2015, 京都
6. 研究組織  
 (1) 研究代表者:  
 小澤 満津雄 (Ozawa Mitsuo)  
 群馬大学・大学院理工学府・准教授  
 研究者番号: 80313906