

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656350

研究課題名(和文) 材料内の熱水分応力伝達を考慮した火災時の高強度コンクリートの爆裂発生機構の解明

研究課題名(英文) Investigation of the mechanism of spalling of high-strength concrete during fire considering heat, moisture and stress transfer

研究代表者

原田 和典 (Harada, Kazunori)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90198911

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円、(間接経費) 900,000円

研究成果の概要(和文)：火災時の高強度コンクリートの爆裂は、発生機構が未解明の厄介な現象である。本研究では、空隙圧力と熱応力が複合して発生する応力が爆裂発生の原因であるとの仮説を立て、これを検証することを目的とした。外周圧縮実験と耐火加熱実験を行い、部分加熱時のように不均一な温度分布下で爆裂が起こりやすいこと、また爆裂に先立って亀裂が生じて空隙圧力が低下しても爆裂が生じることを示し、空隙圧力よりも熱応力の方が影響が大きいことを実験的に明らかにした。並行して熱伝導解析と弾性熱応力解析を行い、爆裂が生じた部分における熱応力の集中傾向を考察した。

研究成果の概要(英文)：In this study, a hypothesis was adopted that the thermal spalling will take place under the effect of pore pressure rise and thermal stress. Pore pressure is created by the evaporation of moisture, while the thermal stress is created by non-uniform temperature profile. To verify the hypothesis, experiments were carried out. Ring compression test is to compress cylinder specimen only at the perimeter region. The compression stress is to simulate the thermal stress during early stage of heating. Fire resistance test is to heat the cylinders and prism rapidly. From the experiments, it was concluded that the spalling takes place where temperature gradient is large. The effect of pore pressure is marginal, because the spalling could take place even after the specimen is cracked. In connection with experiments, numerical simulations on heat conduction and stress distribution were carried out. The results showed the tendency of concentration of thermal stress to the region of spalling.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学 建築環境・設備

キーワード：高強度コンクリート 火災 爆裂 破壊面形状 熱応力 部分加熱 空隙径分布

### 1. 研究開始当初の背景

高強度コンクリートは、強度や剛性のみならず、耐久性にも優れた材料である。また、コンクリート材料としての一般的な優れた性質を持ち、遮音性にも優れることから超高層マンション等を中心にして利用が進んでいる。しかし、火災時の加熱に対する性能は、必ずしも十分ではない。特に強度が高いほど、表層部が爆裂しやすくなり、甚だしい時には、鉄筋が露出することもある。爆裂が火災初期に起こると、鉄筋が露出した状態で長時間の加熱を受けることになりコンクリート構造物は崩壊する可能性がある。

現在建設されるコンクリート構造物では、ポリプロピレン繊維を混入して、爆裂を抑制している。しかし、爆裂発生メカニズムに関しては、合理的な説明がされておらず、爆裂防止対策としては経験的であり、加熱条件や部材の拘束条件によっては爆裂の可能性を否定できない。高強度コンクリートでは、弾性係数が大きく塑性変形能力が小さいので、熱応力による破壊が起こりやすくなること、材料として密実なため熱伝導率が大きく、水分移動係数が小さいので加熱時の断面内部の温度分布と空隙圧力分布が普通コンクリートとは異なる可能性がある。

### 2. 研究の目的

火災時の高強度コンクリートの爆裂は、発生機構が未解明の厄介な現象である。特に、火災初期に爆裂が発生すると、かぶりコンクリートが失われて鉄筋が露出する。この状態で長時間の加熱を受けるとコンクリート構造物は崩壊する危険がある。現状では繊維補強等の対策を経験的に行っているが、爆裂発生機構の考察に基づくものではなく、普遍性に疑問が残る。

本研究では、空隙圧力と熱応力が複合して発生する応力が爆裂発生の原因であるとの仮説を立て、これを検証するために実験と解析を行う。

### 3. 研究の方法

爆裂機構解明のため、円筒試験体を用いた2種類の小規模実験（外周圧縮実験、耐火加熱実験）を行い、これらに対応した解析を行う。

耐火加熱実験は、ISO 834 標準火災試験の方法により試験体（100φ×200mm）を加熱して、爆裂の程度と破壊面の形状を調べるものである。試験体形状は、既往の研究では円筒形を用いてきた。本研究でも円筒形を踏襲するが、出隅がある形状の方が爆裂が生じやすいと考えて、角柱試験体も併用した。

外周圧縮実験は、外周部に発生する熱応力を模擬するために独自に考案するものである。耐火加熱実験と同じ調合で作成した円筒試験体を、常温で外周部のみ圧縮して破壊させ、このときの破壊面の形状を調べる。

外周圧縮試験における破壊形態が耐火加

熱実験と類似であれば、爆裂発生の主たるメカニズムは外周部に発生する熱応力であると推論される。

上記2種類の実験を模擬して一般化を試みるため、材料内の熱水分同時移動解析と熱応力解析を行ない、爆裂発生機構の考察を行う。

### 4. 研究成果

円筒試験体を用いた外周圧縮実験と角柱試験体を用いた耐火加熱実験を行った結果を分析し、加熱中に生じる熱応力と空隙内の水蒸気圧力の影響を考察した。

#### 1) 外周圧縮実験

外周圧縮実験は、常温で行うものであるが、加熱初期の熱応力を外部からの圧縮力に置き換えて、円筒試験体の外周部のみを軸方向に圧縮して表層部を破壊させるものである。

直径100mm×高さ50mm（または高さ85mm）の円筒形試験体を使用し、図1に示すようにリング状の治具を介して外周部のみを圧縮表層に圧縮力を加えて表層部を破壊した。破壊状況を図2に示す。飛散した破片の幅と軸方向長さを測定した結果を図3、4に示す。破片の幅の範囲は、加熱実験と外周圧縮実験で明確な違いがみられないが、アスペクト比（軸方向長さ／幅）は外周圧縮実験の方が大きい。外周圧縮実験では、軸方向に発生する熱応力を模擬しているが、円周方向の熱応力に相当する外力を加えることができないことがその一因と考えた。

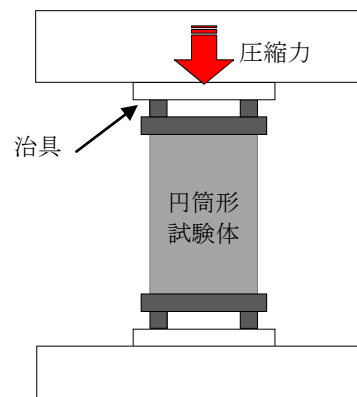


図1 外周圧縮実験の概要



図2 外周圧縮実験における破壊状況の例

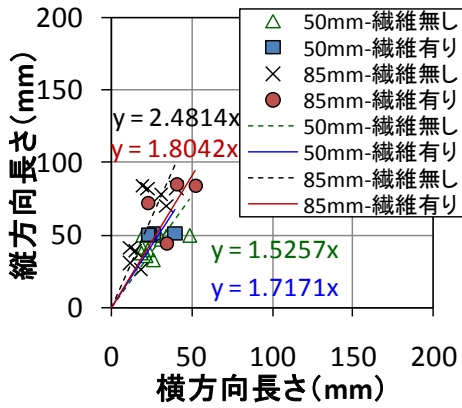


図3 破片のアスペクト比 (外周圧縮実験)

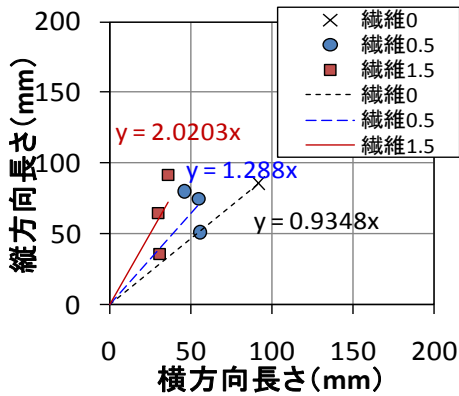


図4 破片のアスペクト比 (加熱実験)

## 2) 角柱試験体の耐火加熱実験

ISO 834 標準耐火試験の方法により、角柱試験体 (100mm×100mm×高さ 400mm) を2面または4面から30分間加熱し、図5に示す加熱実験後の試験体において破壊面の形状および破片の幅厚比を測定した。破壊面の形状については、2面加熱では加熱面と非加熱面の境界付近で破壊して断面が欠損しているもの多く見られた。すなわち、温度勾配が大きな部分で破壊が起こることを意味しており、熱応力の関与が大きいことが示唆された。また、非加熱面には材軸と直交する方向に大きな亀裂が一定の間隔で発生し、亀裂部から水分が滲み出た跡が観察された。亀裂発生後は内部の水蒸気圧力が低下するので、爆裂と亀裂発生順序によって水蒸気圧力の関与の有無が推定できる。亀裂が爆裂に先行して起こるのであれば、空隙圧力が爆裂の原因とする説は棄却される。



図5 加熱後の角柱試験体の損傷状況

## 3) 角柱試験体の部分加熱実験

亀裂と爆裂の順序を知るため、小型試験炉を用いて図6に示す2面加熱実験を追加で行った。加熱面および非加熱面の変化をビデオで撮影して、爆裂発生時刻を記録した。非加熱面にはひずみゲージを貼り付けて、曲率の時刻歴を記録した。

実験は全部で4条件 (5回) 行った。そのうち実験1 (含水状態、繊維補強なし) の結果を図7に示す。加熱側に凸に試験体が湾曲し、非加熱面の亀裂が先行して起こり、その後に爆裂が発生することが分かった。このことから、水蒸気圧力そのもので材料が破裂して爆裂が発生するという既往の説では爆裂発生の説明が難しい。



図6 2面加熱実験の状況

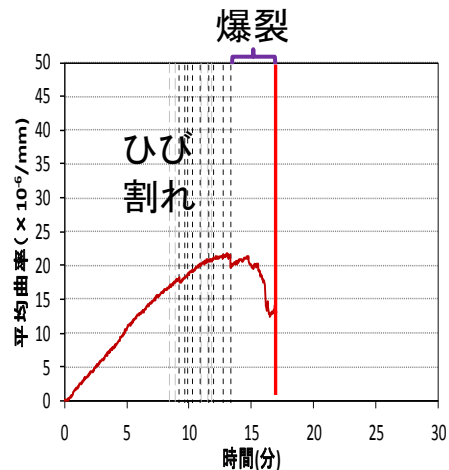


図7 曲率の変化とひび割れ, 爆裂の発生時刻

実験 1～4 における加熱後の状況を図 8 に示す。繊維混入がなく含水状態のものだけが出隅部を中心に爆裂した。繊維混入したものと絶乾状態のものは爆裂が無く、目立った損傷は生じなかった。この比較からは、水分が爆裂に関与していることは明白であるが、その理由は実験だけでは判らない。そのため、次項の解析を併用して考察を行う。

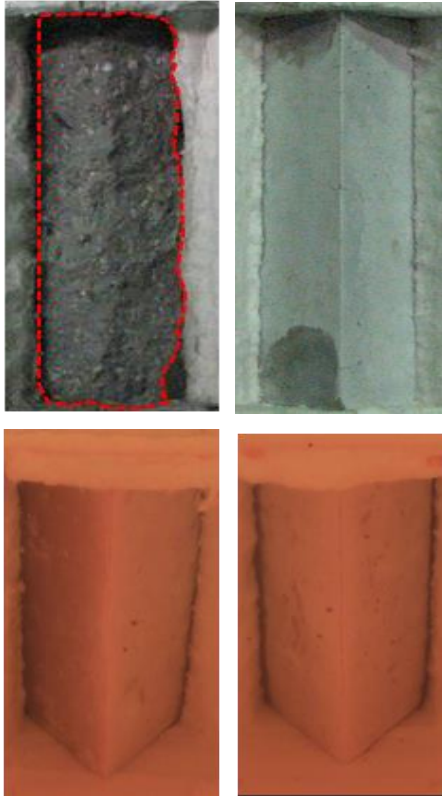


図 8 角柱の部分加熱実験の結果 (左上: 含水状態・繊維補強なし、右上: 含水状態・繊維補強あり、左下: 絶乾状態・繊維補強なし、右下: 絶乾状態・繊維補強あり)

#### 4) 熱応力解析による考察

角柱試験体の 2 面加熱実験の条件を入力して熱伝導解析および熱応力解析を行った。実験 5 (含水状態, 繊維なし) において最初の爆裂が生じた時刻での圧縮主応力比と最大せん断応力比を図 9, 10 に示す。左面と上面を加熱を受ける面に設定した。実験においては、これら 2 つの面に挟まれた出隅部で最初の爆裂が生じ、破線部分が飛散した。計算結果では、飛散部分で圧縮応力比とせん断応力比が大きくなっており、熱応力が出隅部に集中している傾向が表れている。

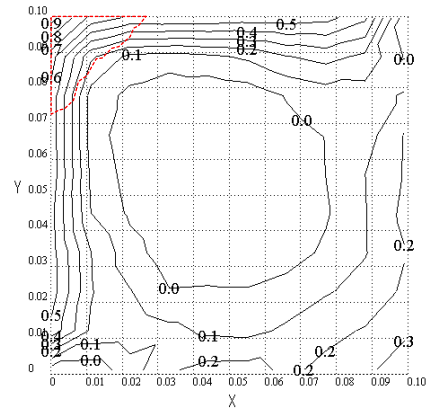


図 9 熱応力解析結果 (圧縮応力比)

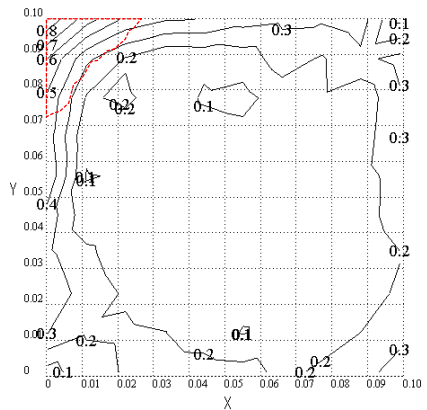


図 10 熱応力解析結果 (最大せん断応力比)

#### 5) 繊維補強の効果

加熱による材料素材の特性変化を把握するため、200℃ (繊維融点以上) および 400℃ (繊維焼失点付近) に加熱した後に徐冷したシリンダー試験体の圧縮試験を行い、応力-ひずみ曲線ならびにポアソン比の温度依存性を調べた。また、圧縮試験後の破片を採取して空隙径分布を測定し、加熱による変化を調べた。

応力-ひずみ曲線およびポアソン比には繊維の効果は認められなかった。しかし、空隙径分布では 0.1 ミクロンオーダーの空隙が加熱により増加し、図 11 に示す透気係数では常温に比べて 400℃ 加熱ではおよそ 1 桁増加した。

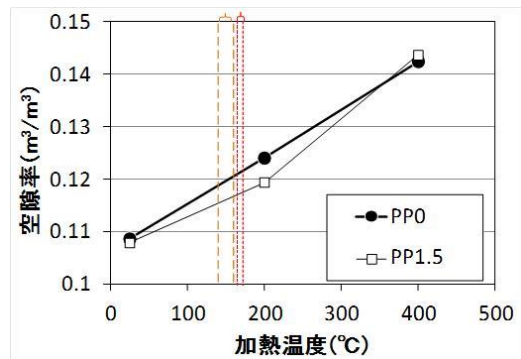


図 11 加熱冷却後の空隙率 (PP0: 繊維なし、PP1.5: 繊維あり)

## 6) 含水率測定法の開発

水蒸気圧により爆裂の発生を説明できないが、水分が爆裂に関与していることは3)項の結果から明らかである。水分が爆裂に及ぼす影響を調べるためには、加熱中のコンクリート部材中の含水率の時間的変化を測定して、分析を行う必要がある。

そのため、図 12 に示す小型含水率センサーを試作した。図中の2本の導線の間の電気抵抗を測定することにより、体積含水率を得るものである。体積含水率が8%~20%の範囲について較正を行ない、温度依存性は既往の類似のセンサーを参照して校正曲線を作成した。

試作したセンサーをコンクリート壁試験体に埋め込み、耐火試験に供した。この結果から、含水率の連続測定が可能なことを確かめている。

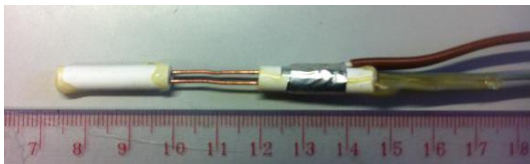


図 13 火災実験用小型含水率センサー

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① Jaeyoung Lee, Kaunori Harada, Sunggoo Kang, Young Jin Kwon, Mashiro Yamazaki, “Entire and partial heating tests of high strength concrete small columns”, *Procedia Engineering*, 62, pp. 804-812, 2013

[学会発表] (計14件)

- ① 李在永, 姜昇具, 權寧璠, 原田和典, 「高強度コンクリート短柱の全周および部分加熱実験」, 平成24年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 42-43, 2012年5月21日
- ② 李在永, 姜昇具, 權寧璠, 原田和典, 山崎雅弘, 「高強度コンクリートの短柱の全周および部分加熱実験」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第52号・環境系, pp. 93-96, 日本建築学会近畿支部, 2012年6月16日
- ③ Young Jin Kwon, Seung Goo Kang, Dong Jun Kim, Byung Chan Han, 李在永, 原田和典, 「高強度コンクリートの熱水分移動モデルの構築のため統計分析」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 201-202, 2012年9月12日
- ④ 李在永, 姜昇具, Yong Jin Kwon, 原田和典, 山崎雅弘, 「高強度コンクリート短柱の全周および部分加熱実験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 205-206, 2012年9月12日

- ⑤ 原田和典, 李在永, 山崎雅弘, 「高強度コンクリートの部分加熱における爆裂性状(その1)」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 74-75, 2013年6月8日
- ⑥ 李在永, 原田和典, 山崎雅弘, 權寧璠, 「高強度コンクリートの部分加熱における爆裂性状(その2)」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 76-77, 2013年6月8日
- ⑦ 寺田啓介, 李在永, 山崎雅弘, 權寧璠, 原田和典, 「高強度コンクリートの部分加熱における爆裂性状(その3)」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 78-79, 2013年6月8日
- ⑧ 寺田啓介, 李在永, 山崎雅弘, 權寧璠, 原田和典, 「高強度コンクリート角柱の爆裂発生時の温度分布と空隙圧力の推定」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第53号・環境系, pp. 209-121, 日本建築学会近畿支部, 2013年6月16日
- ⑨ 李在永, 山崎雅弘, 權寧璠, 原田和典, 「高強度コンクリート角柱の部分加熱実験における爆裂性状」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第53号・環境系, pp. 365-368, 日本建築学会近畿支部, 2013年6月16日
- ⑩ 李在永, 原田和典, 山崎雅弘, 權寧璠, 「繊維混入が高強度コンクリートの加熱後の圧縮強度、弾性係数とポアソン比に及ぼす影響に関する実験」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 防火, pp. 105-106, 2013年8月31日
- ⑪ 寺田啓介, 李在永, 山崎雅弘, 權寧璠, 原田和典, 「高強度コンクリート角柱の爆裂発生時の温度分布と空隙圧力の推定」, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), 環境工学 II, pp. 1-2, 2013年8月30日
- ⑫ 寺田啓介, 李在永, 山崎雅弘, 權寧璠, 原田和典, 「高強度コンクリートの爆裂発生時の応力分布の推定」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 120-121, 2014年5月27~28日
- ⑬ 李在永, 權寧璠, 原田和典, 「高強度コンクリートのシリカ・フェームと繊維が爆裂形状に及ぼす影響」, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 122-123, 2014年5月27日
- ⑭ 李在永, 姜昇具, 權寧璠, 原田和典, 「軟銅線を電極に用いるモルタル用含水率センサーの試作」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第54号<環境系>, pp. 333-336, 2014年6月22日 (発表決定)

[図書] (計0件)

該当なし

[産業財産権]

該当なし

[その他]  
該当なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

原田和典 (HARADA, Kazunori)  
京都大学・工学研究科・教授  
研究者番号：90198911

(2) 研究分担者

西山峰広 (NISHIYAMA, Minehiro)  
京都大学・工学研究科・教授  
研究者番号：50183900

山崎雅弘 (YAMAZAKI, Masahiro)  
研究者番号：60240826

(3) 研究協力者

權寧璠 (KWON, Young Jin)  
韓国 湖西大学・消防防災学科・教授