

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630263

研究課題名(和文) 繊維混入による高強度コンクリートの爆裂防止機構の解明

研究課題名(英文) Investigation on the mechanism of reducing fire spalling by fibre mixing to high-strength concrete

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000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危険な現象であり、表層部のコンクリートが爆裂で失われて鉄筋が露出すると崩壊する危険がある。爆裂抑制には、ポリプロピレン等の短繊維を混入することが有効であるが、爆裂発生の原因を踏まえたものではなく、対策の普遍性が求められている。本研究では、熱水分移動と空隙圧力上昇を考慮した熱応力解析を行い、爆裂発生メカニズムとして、コンクリート内部の空隙圧力上昇と表層部に生じる圧縮熱応力の2つを考え、短繊維混入の効果を調べた。その結果、高強度コンクリートで空隙飽和度が高いものは、空隙圧力上昇が引張強度を超えることを明らかにした。

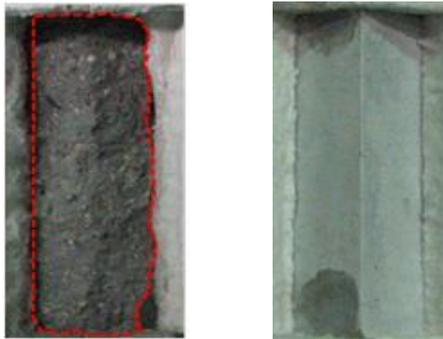
研究成果の概要(英文)：Spalling of high strength concrete is a dangerous phenomenon. The occurrence mechanism is not well understood. If surface layer of concrete is lost by spalling, reinforcing bars may be exposed to fire directly. Then the possibility of failure would be increased. To reduce the degree of spalling, inclusion of polypropylene fiber is effective. However, the measure is not based on the mechanism of spalling. The universality is still in question. In this study, heat and mass transfer analysis and hygro-thermal analysis were carried out to calculate pore pressure rise inside material and compressive stress at heated surface. The effect of fiber was considered through changes in material properties. As a result, pore pressure exceeds the tensile stress if both concrete strength and pore saturation are high.

研究分野：火災安全工学

キーワード：高強度コンクリート 爆裂 空隙圧力 熱応力 繊維補強

1. 研究開始当初の背景

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危険な現象である。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。図1に示すように、爆裂抑制には、ポリプロピレン等の短繊維を混入することが有効であるが、繊維混入量は経験的に決められており、爆裂発生機構を踏まえたものではない。そのため、対策の普遍性に疑問がある。



(繊維混入無し) (繊維混入有り)  
図1 高強度コンクリートの爆裂における繊維混入の影響

2. 研究の目的

爆裂の発生機構としては、空隙圧力と熱応力が複合した応力発生が考えられる。そのため本研究では、材料内の水分蒸発による空隙内圧力上昇を熱水分移動解析により定量化し、温度分布により発生する熱応力と併せて、材料内に生じる応力を推定した。繊維混入の効果としては、1) 高温時には繊維が熔融して透気率が大きくなることにより、空隙圧力の上昇を緩和する、2) 繊維混入により弾性係数が小さくなり熱応力が緩和する、3) 繊維が熔融していない状態においては引張応力に抵抗することなどがある、このうち、主として1) の効果を検討した。

3. 研究の方法

3.1 熱水分移動および熱応力解析による材料内応力分布

爆裂発生原因を、水分蒸発による空隙内の水蒸気圧力上昇と表面からの温度分布により生じる熱応力の2つと想定して熱水分移動および応力解析を行った。

熱水分移動解析では、図2に示すように実質部の熱伝導、空隙内の空気および水蒸気の流動、物理吸着水の蒸発、結晶水の熱分解を考慮して、温度分布、空隙圧力分布および含水率分布の時間的変化を予測した。

さらに、熱水分移動解析の結果を用いて空

隙圧力を考慮した熱応力解析を行った。熱応力解析モデルは、図3に示すように、温度上昇に伴う熱膨張に加えて、空隙内の圧力上昇に伴って生じる内力を考慮して材料に生じる応力を計算するものである。

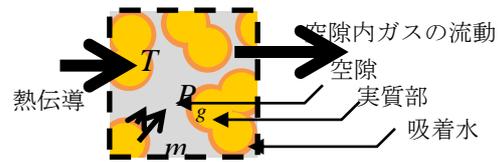


図2 熱水分移動モデルの概要



図3 熱応力解析モデルの概要

モデルで使用する物性値は、既往の測定結果および文献データを収集してモデル化を行った。このとき、コンクリートの設計基準強度に応じて、図4に示すように、水/セメント比などの調合が異なることを考慮した。図5に比透気率(圧力勾配に対する空隙内での気体流動速度の比)を示す。高強度コンクリートは密実なため、普通強度コンクリートよりも2~3桁小さな値となる。

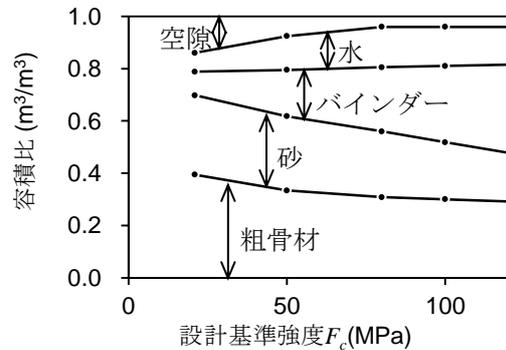


図4 設計基準強度と調合の関係

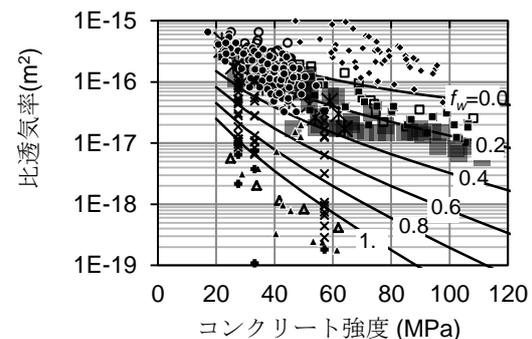


図5 圧縮強度と比透気率の関係 (f\_w : 空隙飽和度)

図6に各種圧縮強度のコンクリートの弾性係数の温度依存性を示す。

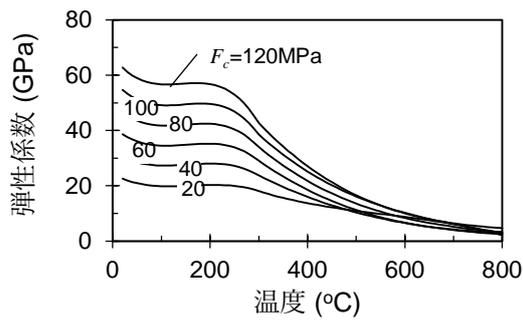


図6 各種圧縮強度のコンクリートの弾性係数の温度依存性

### 3. 2 繊維混入効果の検討方法

高強度コンクリートの爆裂発生メカニズムとその制御に関して、ポリプロピレン繊維を混入した高強度コンクリートについて、繊維の熔融と焼失が力学的性質と透気係数に及ぼす影響を考察した。

試験体は、水/結合材比 20%で造られた120MPaの高強度コンクリートで、繊維以外の組成が等しい2種類の調合である。1つは1.5kg/m<sup>3</sup>の繊維を含み、もう一つは繊維を含まないものである。

この調合のコンクリート円筒を図7に示す温度パターンで加熱し、冷却した後に圧縮試験を行った結果をモデル化して、繊維が圧縮強度と弾性係数に及ぼす影響を定量化した。また、圧縮試験後の破片および別途用意した試験片からサンプルを採取して、常温から400℃の範囲での細孔径分布を測定し、透気係数への影響を調べた。加熱温度は、常温、120、200、300、400℃とし、融点(175℃)および焼失温度(350℃)を含む範囲を設定した。

これらの結果から、繊維混入による空隙径分布への影響、高温加熱による繊維溶融による影響を考察した。

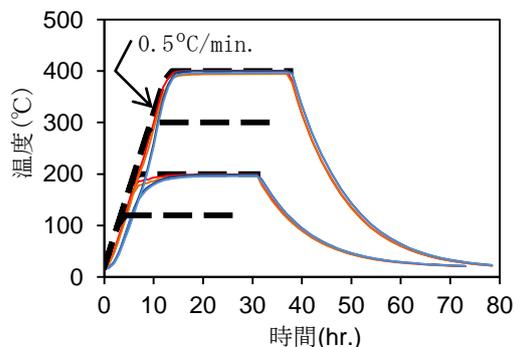


図7 加熱温度パターン

### 3. 3 熱膨張と乾燥収縮ひずみの測定とモデル化

コンクリートの温度が上昇すると熱膨張

が生じるが、100~250℃の温度範囲では水分が蒸発する。そのため、この温度範囲では、熱膨張と乾燥収縮が同時に起きている。そのため、表面から加熱を受けて材料の温度が上昇していく段階では、内部のひずみは温度分布のみでなく含水率分布にも依存して複雑な分布となる。

現状の計測および定式化では、図8に示すように熱膨張と乾燥収縮を合せたものを温度の関数として扱っている。しかし、熱膨張ひずみと乾燥収縮ひずみに分離して与えるのが現象の理解としては正しいので、そのための測定方法について検討を行った。

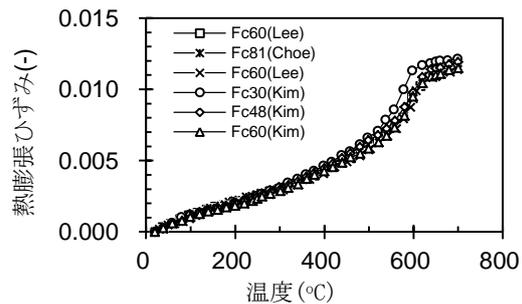


図8 既往研究における熱膨張ひずみの測定例(花崗岩コンクリート)

## 4. 研究成果

### 4. 1 熱水分移動および熱応力解析による材料内応力分布

図9に示すように直径100mmのコンクリート円柱が側面から周囲からISO834の標準加熱を受ける場合を解析した。数値計算に当たっては、対称性を考慮して中央部の厚さ5mm部分の円盤を抽出し、さらに中心角1/6ラジアン(約30度)の扇形部分を対象として三角柱要素で分割した。

熱応力解析については、熱水分移動解析の結果として得られる温度分布、水蒸気圧分布、含水率分布を利用するため、同じメッシュ分割とした。ただし、境界条件を設定するため、円筒の1/8部分を解析領域とした。

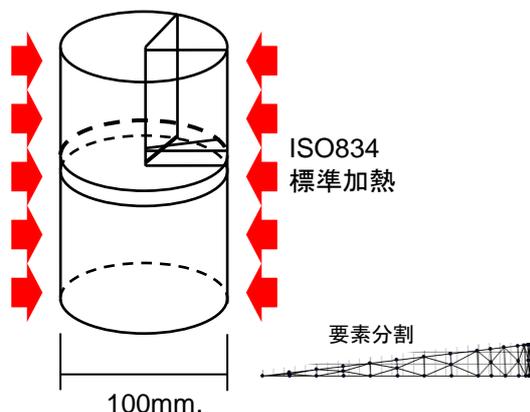


図9 解析対象と要素分割

圧縮強度が 100MPa、空隙飽和度が 60%の場合の解析結果を図 10~12 に示す。5 分時には、加熱側表面の温度は約 200°C に達しており、表層部の水分はすでに蒸発して含水率は零となっている。蒸発した水分は水蒸気として空隙内を移動した後に再吸着するため、内部の空隙圧力と含水率は上昇している。その後も、表層部からの温度上昇と乾燥が進みながら、内部の含水率および空隙圧力が上昇している。

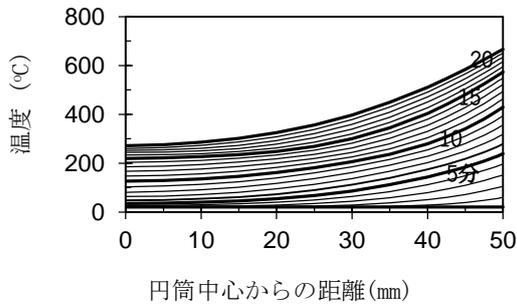


図 10 温度分布

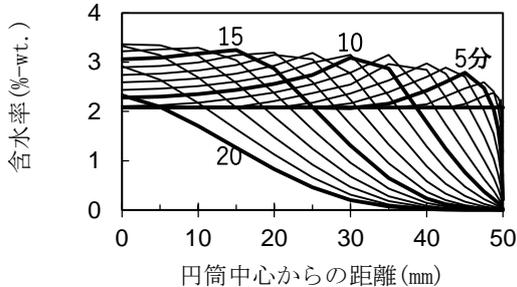


図 11 含水率分布

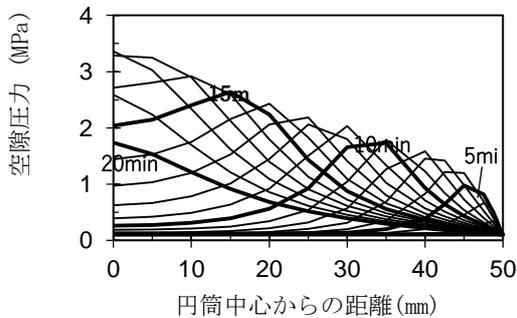


図 12 空隙圧力分布

熱水分移動解析で得られた温度と空隙圧力を用いて、熱応力を計算した結果を図 13~14 に示す。ここで、爆裂の破片厚さは 5mm 程度のことが多いので、表面から 5mm 位置での応力に通目する。半径方向の応力は、全て引張となり、加熱面から 5mm の位置で引張強度を超えるのは 6 分であった。一方、軸方向応力は表層部が圧縮、内部が引張となった。加熱面から 5mm の位置では 16 分でその時刻の温度における圧縮強度を超えた。

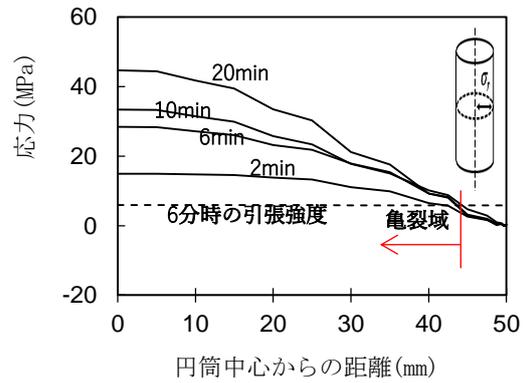


図 13 半径方向応力分布

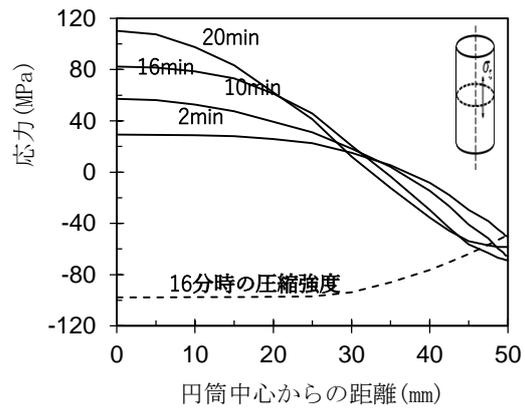


図 14 軸方向応力分布

同様の計算を、種々の圧縮強度と空隙飽和度（空隙体積のうち水分が占める体積の割合）の組み合わせに対して行なった。その一連の結果より、加熱面から 5mm 位置での空隙圧力の最大値を同時刻における引張強度で割った比率として図 15 に等高線で表示している。この値が 1 を超える領域では、空隙圧力による爆裂が発生すると考えられるが、その範囲は圧縮強度が 100MPa 以上で空隙飽和度が殆ど 1 に近い場合に限られる。同図中には、既往のシリンダー加熱実験で観察された爆裂の有無（○=爆裂なし、×=爆裂あり）もプロットしている。実験により爆裂が観察された範囲は、圧縮強度が約 60MPa 以上、空隙飽和度が約 80% 以上であり、解析で示した範囲よりも広い。そのため、実験と解析の定量的な一致は不十分である。しかし、圧縮強度と空隙飽和度の両方が高いものが爆裂しやすいという傾向は解析で再現した。

表層部に生じた軸方向圧縮応力の最大値をそれが生じた時刻での圧縮強度で割って無次元化した結果を図 16 に示す。圧縮強度が 110MPa 超えるものでは、空隙飽和度にほぼ関係なく 1 を超えており、超高強度コンクリートでは表層部が圧縮破壊する可能性がある。しかし、実験で観察された爆裂範囲の傾向とは一致しない。

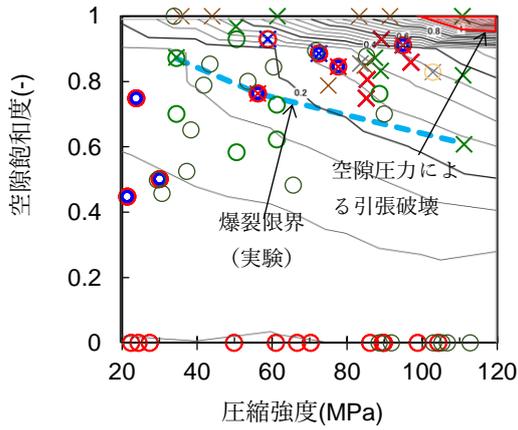


図 15 圧縮強度および空隙飽和度と最大空隙圧力の関係

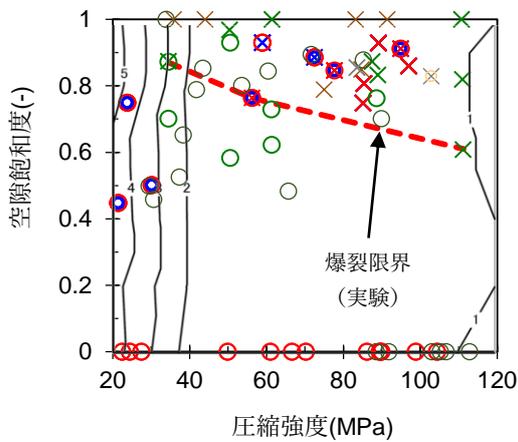


図 16 圧縮強度および空隙飽和度と軸方向最大圧縮応力との関係

#### 4. 2 繊維混入効果のモデル化

爆裂発生に関与するコンクリートの物性値に関しては、細孔径分布等の測定結果や既往の文献調査結果を集約して、圧縮強度依存性を考慮した推定式を作成した。そのうちポリプロピレン繊維混入の効果については、加熱冷却後の圧縮試験片を用いて水銀圧入法により細孔径分布を測定した。

細孔径分布の測定結果を図 17 (繊維混入無し) および図 18 (繊維混入あり) に示す。透気性に関係する  $0.132\mu\text{m}$  以上の空隙量は、常温においては繊維混入により若干の増加が見られるが、繊維が熔融する  $170^\circ\text{C}$  から繊維が焼失する  $350^\circ\text{C}$  までの温度では、ペーストの熱分解が卓越し、繊維混入の有無による違いは明確には認められなかった。

細孔径分布の測定結果を氏家らによる推定式に用いて比透気率を推定した結果を図 19 に示す。常温の値は、ばらつきが大きく、繊維を混入したもの (PP1.5) が上限と下限になっている。しかし、温度上昇とともに比透気率は全般的に増大し、繊維による影響は消滅する。繊維混入は、調合時に混入される空気量のため、常温での透気率を増加させる

可能性はあるが、高温時に熔融あるいは焼失して比透気率を増加させる効果は顕著には見られない。

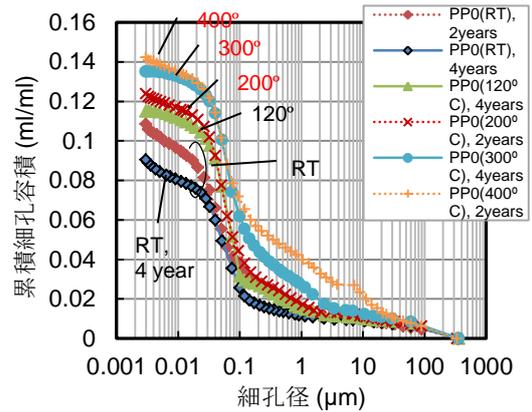


図 17 細孔径分布の測定結果 (繊維混入なし)

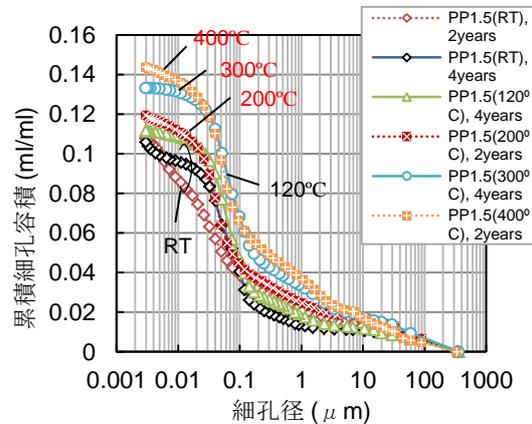


図 18 細孔径分布の測定結果 (繊維混入あり)

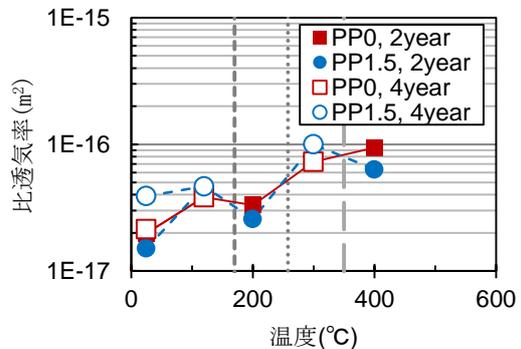


図 19 温度による比透気率の変化

#### 4. 3 含水蒸発時の乾燥収縮の測定

温度上昇時には、熱膨張ひずみと含水蒸発による収縮ひずみが同時に発生する。これらを分離して測定する装置を図 20 のように考案し、ひずみを分離する方法を検討している。

初回の昇温時には、熱膨張と同時に水分蒸発が起こるので、熱膨張ひずみ (正) と乾燥収縮ひずみ (負) の合計が計測される。常温に冷却した後に、熱膨張ひずみが元に戻るとすれば、実験前の試験体長さよりも短くなる。この分が乾燥収縮ひずみに相当する。加熱温度並びに保持時間を適宜設定することによ

り、乾燥収縮ひずみのモデル化を行うことができる。

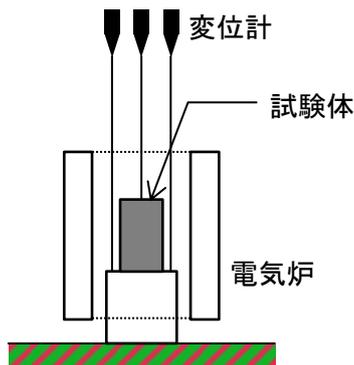


図 20 熱膨張ひずみと乾燥収縮ひずみの測定装置

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

① Jaeyoung Lee, Keisuke Terada, Masahiro Yamazaki, Kazunori Harada, Impact of melting and burnout of polypropylene fibre on air permeability and mechanical properties of high-strength concrete, Fire Safety Journal, accepted for publication, 2017

[学会発表] (計 12 件)

① Keisuke Terada, Jaeyoung Lee, Kazunori Harada and Youngjin Kwon, Experiments on the Effect of PP Fiber Reinforcement on Pore Size Distribution and Permeability of High Strength Concrete after Heating, 10th Asia-Oceania Symp. on Fire Science and Technology, Tsukuba, book of poster abstract, pp. 93-94, 2015/10/

② Keisuke Terada, Jaeyoung Lee, Masahiro Yamazaki and Kazunori Harada, An Analysis of Heat and Mass Transfer and Thermal Stress in Relation to the Mechanism of Spalling of High-Strength Concrete, poster presentation, No.71, 12th Int. Symposium on Fire Safety Science, Lund, 2017/6

③ Raouffard, M. M., and Nishiyama, M., Fire resistance and residual strength of RC frames, Proceedings of the 11th fib International PhD Symposium in Civil Engineering, Tokyo, Japan, Sep. 2016.

④ 李在永, 權寧璉, 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, 2014/5

⑤ 李在永, 原田和典, 權寧璉, 繊維混入が高強度コンクリートの加熱後の細孔径分布、空隙率および透気係数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(近畿)、防火, pp. 389-390, 2014/9

⑥ 李在永, 原田和典, 權寧璉, コンクリートの強度による爆裂性状と比透気率との関係、平成 27 年度日本火災学会研究発表会概要集, pp. 126-127、日本火災学会、2015/5

⑦ 寺田啓介, 李在永, 原田和典, 繊維混入が高強度コンクリートの加熱後の細孔構造・透気性に及ぼす影響に関する実験、pp. 128-129、平成 27 年度日本火災学会研究発表会概要集、日本火災学会、2015/5

⑧ 寺田啓介, 李在永, 山崎雅弘, 原田和典, 高強度コンクリートの爆裂発生機構に関する解析的研究、日本建築学会近畿支部研究報告集<環境系>, pp. 117-120, 2016/6

⑨ その他の国内学会発表 4 件

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

なし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

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

山崎 雅弘 (YAMAZKI, Masahiro)  
岡山理科大学・工学部・教授  
研究者番号：60240826

李 在永 (LEE, Jaeyoung)  
東京理科大学・理工学部・助教  
研究者番号：20778625

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし