

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360171

研究課題名(和文) コンクリートの火災時爆裂シミュレーションを含む耐火構造性能解析手法の開発

研究課題名(英文) Development of explosive behavior and structural performance evaluation method of concrete in fire

研究代表者

中村 光 (NAKAMURA, HIKARU)

名古屋大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60242616

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート構造物の火災のような高温加熱化の挙動と構造性能に与える影響を評価可能な耐火構造性能照査法を開発を行った。開発した手法は、コンクリートの構造解析を行う3次元剛体バネモデルと、物質移動解析を行うトラスネットワークモデルを組み合わせた手法であり、連続的な爆裂挙動、温度履歴を考慮した力学モデル、鉄筋の熱影響も考慮可能なものである。開発した手法を用い、爆裂挙動や爆裂挙動に及ぼす各種要因の影響、火災時および火災後の構造性能が評価可能なことを示した。

研究成果の概要(英文)：The verification method of explosive behavior and structural safety under high temperature such as fire was developed. The method is integrated method of 3-dimensional Rigid Body Spring Method based on dynamic equation of motion as structural analysis and TRUSS network model as mass transfer analysis. Moreover, the method was extended to consider continuous explosive behavior, mechanical properties change with temperature history and thermal effect to reinforcing bar. It was confirmed that the method can evaluate explosive behavior, the effects of several factors on explosive behavior and structural performance in and after fire.

研究分野：コンクリート構造

キーワード：火災 爆裂 材料劣化 剛体バネモデル トラスネットワーク シート補強 鉄筋 数値解析

1. 研究開始当初の背景

土木分野におけるコンクリート構造物の火災については、道路・鉄道のトンネルや高架橋などの火災による被害が国内外で多数報告されている。特に、近年、高強度コンクリートの利用により、コンクリートの爆裂を伴う深刻な火災事故が世界各国で発生し、その現象解明と爆裂防止対策の検討が世界中の機関で行われている。

コンクリートの火災時爆裂に対する検討は、建築分野では社会的な問題としてマスコミにもしばしば取り上げられ、研究成果の蓄積も精力的に行われているが、土木分野においての取り組みは建築分野ほど進んでいないのが現状である。しかしながら、ユーロトンネルの火災事故のように輸送量の増大とトンネルの長大化により、火災による被災確率は大きくなっており、その詳細な検討の重要性はますます大きくなっている。特に、日本においては、都市の有効利用のための都市地下トンネル、河川・海岸域での沈埋トンネル、中央リニア新幹線計画のような長大かつ大土被りトンネル、などの建設が今後も考えられるが、このような構造に一度火災被害があれば、修復は非常に困難であるとともに、社会的・経済的損失は計り知れないものがある。さらに、予想を超える火災により大規模な被害が生じた場合には、火災時の構造安全性や、火災後の安全性や復旧性を判定するためのコンクリート構造物の耐荷性能を知る必要があるが、精度のよい解析的な手法は存在していないのが現状である。

このように、世界的にコンクリート構造物の火災被害に対する安全性評価のニーズが高まっていることから、火災時安全性をより高めて合理的かつ経済的な構造物を構築し、被害が生じた場合でも早期復旧が可能なように、爆裂シミュレーションが可能であり、トンネル火災に対するコンクリート構造物の安全性・復旧性の評価に利用できる耐火構造性能照査手法の確立を早急に目指す必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、実験的な照査が主であるコンクリート構造物の耐火性能照査の現状に対し、コンクリートの火災時爆裂挙動をシミュレートできる構造解析手法の開発を行うとともに、安全性や復旧性に関する火災時および火災後の耐荷性能評価までを可能とする耐火構造性能照査手法の開発を行う。また、上記目的を達成するために、温度履歴を考慮した材料モデル、鉄筋の熱伝導と熱膨張、補強後挙動などの性能照査手法の高度化を図るために必要な要素モデルの構築を行う。

3. 研究の方法

本研究の方法は、大きくは以下の3つに分類される。

(1) 火災時および火災後の耐火構造性

能評価が可能な数値解析プラットフォームを開発する。数値解析手法は、ひび割れなどの不連続挙動も精度よく評価可能で申請者らが開発を進めている剛体パネモデル(RBSM)を用いる。

(2) 構造解析モデルに導入する各種構成モデルを作成するための実験とモデル化を行う。実験は高温加熱が可能な電気炉を用いて行う。

(3) 開発した解析手法を用い、高温過熱下の各種現象を数値解析的に再現し、爆裂現象のメカニズムの検討を始め、各種要因の影響を検討する。

4. 研究成果

(1) 耐火構造性能照査手法の開発

数値解析プラットフォームの概要

数値解析プラットフォームとして、申請者が開発を進めているコンクリートの構造解析を行う剛体パネモデルと、物質移動解析を行うトラスネットワークモデルを組み合わせた手法を用いた(Nakamura(2009), 吉田(2011))。プラットフォームは、図1に示すように熱と蒸気圧の移動が考慮可能である。また、ひび割れが生じた後は、ひび割れ部にもトラス(境界面トラス)を配置し、コンクリート中とは別にひび割れ部での蒸気圧移動が考慮可能なことが特徴である。

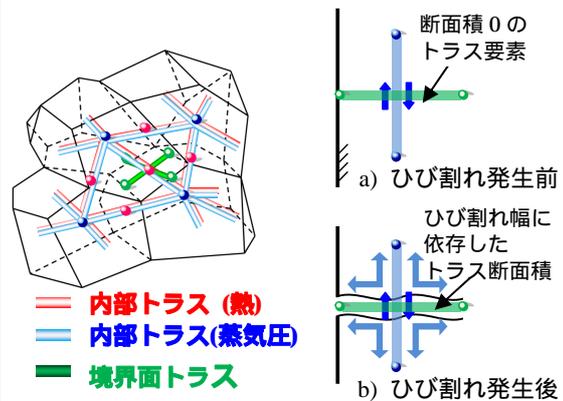


図1 数値解析プラットフォーム

図2に開発した手法の解析フロー図を示す。解析ではトラスネットワークモデルを用い、一次元の拡散方程式を解くことにより温度および蒸気圧分布の算定がまず、行われる。熱伝導解析では、熱伝導方程式を解くことにより温度分布が算定される。得られた温度分布を用いて、飽和蒸気圧を求め、蒸気圧移動解析を行う。蒸気圧移動解析では、湿気移動方程式を解くことで蒸気圧分布を算定する。前ステップにおける構造解析でコンクリート中にひび割れが発生した場合は、蒸気圧移動パラメータが異なる境界面トラスによりひび割れ部の影響が考慮される。

次に、構造解析では、熱伝導解析により得られた温度分布を用いて算出した熱膨張ひずみ、および、蒸気圧移動解析により得られ

た蒸気圧を考慮した複合問題として RBSM により内力計算を行う。熱膨張ひずみは、初期ひずみとして、蒸気圧は、初期応力として与えられる。また、爆裂後のコンクリートの変形挙動までも再現することを目的としているため、運動方程式により構造解析手法を構築した。内力を計算した後、収束判定を行い、条件を満たさない場合は、繰返し計算を行い、条件を満たす場合は次のステップへ進む。

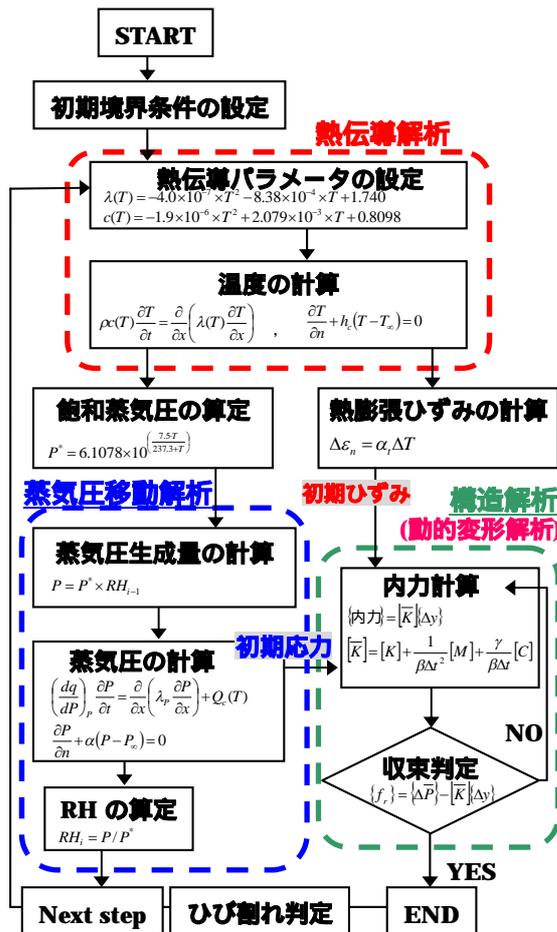


図2 解析フロー図

連続的な爆裂への拡張

トンネル火災のように長期間に渡って高温環境下に曝されると、コンクリートには連続的に爆裂現象が生じることが知られている。提案手法では、図2のフロー図に示した構造解析を行った後に、以降で示すように爆裂の有無を判定し、爆裂が発生していない場合は、通常通り熱伝導解析から次ステップの計算が行った。爆裂が発生した場合には、解析モデルの境界条件を変更した。爆裂発生判定方法は、各 RBSM 要素に対して以下の2ケースの基準を適用した。すなわち、1)全境界面の垂直バネの応力が引張軟化した後に0まで低下した要素、2)要素の鉛直方向の変位量が加熱面より10mm以上となった要素を爆裂した要素と判定した。爆裂したものと判定された要素は、次ステップから境界条件を変更した。具体的には、爆裂により加熱表面部

で剥き出しとなった全 RBSM 要素境界面に対流境界条件を新たに構築し、表面熱伝達による外部からの熱収支、加熱面からの蒸気の逸脱を考慮し、境界条件を変更した要素に対する相対湿度は簡単のために0とした。また、爆裂した要素が構造解析の収束計算に及ぼす影響を排除するため、境界面上の垂直バネ、せん断バネおよび要素に関係するトラス要素の断面積を0とした。

鉄筋モデルの導入

鉄筋は、RBSM を用いた一般的な構造解析時と同様、リンク要素でコンクリートと結合する、はり要素でモデル化した(図3)。ただし、鉄筋はコンクリートより熱伝導率が高く、またその熱膨張はコンクリートに影響を与える可能性がある。そこで、はり要素に鉄筋の熱伝導を表すトラス要素を重ねたモデル化を行った。また、熱膨張を考慮し鉄筋温度にしたがってコンクリートに膨張力が作用するようにモデル化を行った。

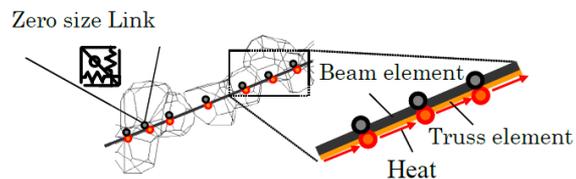


図3 鉄筋のモデル化

(2) 高温加熱を受けたコンクリートの性能評価

加熱履歴を受けるコンクリートモデル

高温加熱履歴を受けたコンクリートは、圧縮強度、弾性係数、破壊エネルギー等の材料特性が変化し、またその変化は、加熱時(熱間)と加熱冷却後(冷間)で異なることが知られている。本研究では、任意の高温加熱履歴を受けるコンクリートの材料特性の変化を図4に示すようにモデル化した。すなわち、図中のモデルを用いて各要素の加熱履歴に応じた材料特性の残存率を計算した。各材料特性の最大加熱温度履歴に応じた残存率は本研究で実施した加熱冷却後のコンクリート円柱の1軸圧縮実験および既往の実験結果(一瀬(2003), 松沢ら(2012), 渡辺ら(2012))

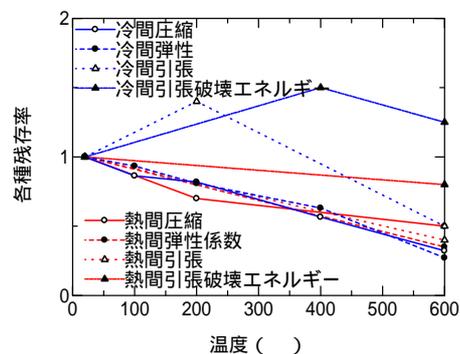


図4 コンクリートの材劣化モデル

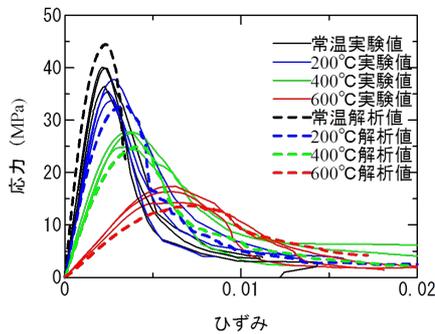


図 5 1 軸圧縮応答（冷却後）

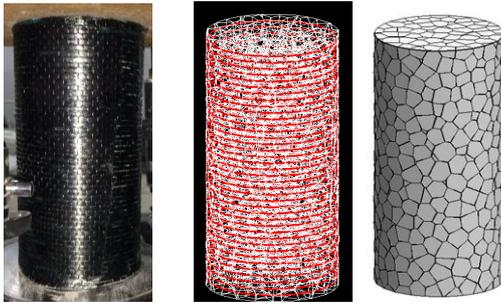


写真 1 実験供試体

図 6 解析モデル

を、線形近似により補間してモデル化した。なお、加熱冷却履歴は、供試体内部の温度分布が一樣になるよう十分遅い速度で与えている。図 5 に、提案モデルの妥当性検証解析の一例として、冷間時の 1 軸圧縮解析結果を示す。対象実験は、申請者らによる冷間実験である。図に示すように提案モデルは加熱履歴に応じた力学特性の変化を妥当に再現していることが分かる。また、実験では、既往の実験的研究では評価されていない、圧縮破壊エネルギーも評価している。高温加熱履歴が圧縮破壊エネルギーに与える影響は小さいことを明らかにしているが、提案モデルはその挙動を再現していることが分かった。

高温加熱後の繊維補強効果の評価

高温加熱試験終了後、炭素繊維シートの巻き立てにより補強した円柱供試体（写真 1）の 1 軸圧縮試験を行い、高温加熱後のコンクリートの補強効果を実験的に評価した。さらに、同実験を対象として提案モデルを用いて解析を行い提案モデルの妥当性の検証を行った。炭素繊維シートの材料特性値は、引張強度 3400MPa、弾性係数 230GPa でありシートの厚さは 0.111mm である。実験は、繊維シートを 1.5 周および 3 周巻き立てたケースおよび最大加熱温度を常温(20)、200、400 および 600 まで与えたケースを実施している。解析では、繊維シートを図 6 に示すようなトラス要素を用いてモデル化した。この要素は、引張にのみ抵抗し、繊維シートと等価な剛性を与えている。構成モデルは引張強度に達するまでは線形弾性挙動をとるものとし、引張強度に達すると、応力を受け持たなくなるものと仮定した。図 7 に、解析結果の一例として、繊維シートを 1.5 周巻き立てた

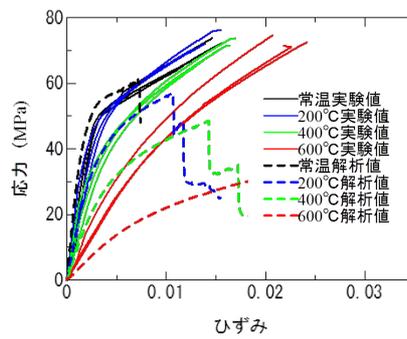


図 7 繊維シートの補強効果

ケースの解析結果を示す。まず、常温時の実験結果に着目すると繊維シートを巻き立てることにより 65MPa 程度まで強度が増加した。解析は、終局時のひずみを小さく評価しているものの、強度の増加は妥当に再現していることが分かった。一方、最大加熱温度が増加するに従い、解析は繊維シート補強後の強度増加は表現できているものの、実験の初期弾性係数、強度を小さく評価していることが分かる。なお、実験において初期弾性係数は常温、200 ににおいて拘束によらずほぼ同程度の弾性係数を示す傾向にあるが、400 以降では弾性係数の増加が確認できる。これは 400 以降の供試体に炭素繊維巻き立てに使用した樹脂の含浸により増加したと考えられる。以上の検討により、提案モデルは定性的には繊維シートによる補強効果を再現できることが分かった。

(3) 爆裂現象への影響メカニズムの評価 連続爆裂現象の評価

谷辺ら(2013)によって行われた実験を解析対象とし、高温加熱下における拘束力が爆裂挙動に及ぼす影響評価を行った。実験は、鋼製のリングをコンクリート供試体の周囲に配置することによってコンクリートの熱膨張を拘束している。解析では鋼製リングによる拘束を簡単に、円柱型コンクリートの側部表面に位置する RBSM 要素を全自由度拘束することによってモデル化した。図 8 に解析モデルを示す。谷辺ら(2013)の実験では、コンクリートが加熱面から連続的に爆裂し、爆裂による損傷が深さ方向に進展する様子が観察されている。図 9 に示すように提案モデルは、実験で観察された連続的な爆裂現象を再現していることが分かる。すなわち、供試体表面で爆裂が生じると、爆裂した要素の下部の要素で温度上昇および蒸気圧の上昇

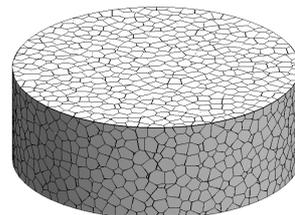
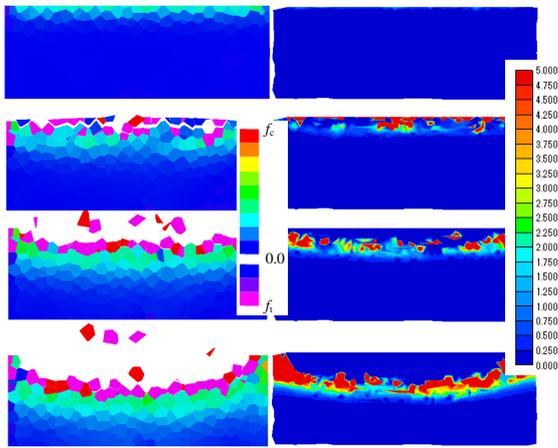
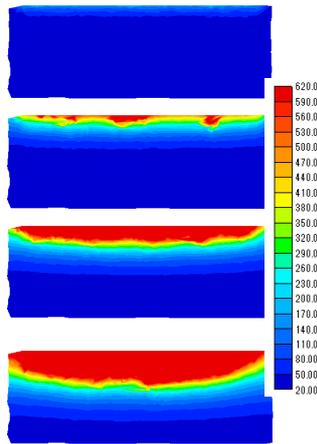


図 8 解析モデル



(a) 水平方向垂直応力 (b) 蒸気圧分布



(c) 温度分布

図9 連続的な爆裂挙動

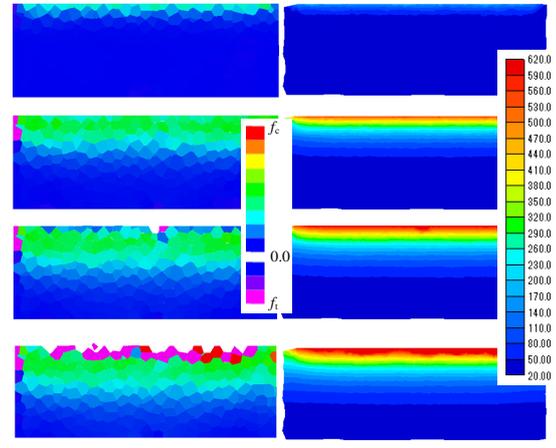
が生じ再び爆裂が生じる。この現象を繰り返すことによって、徐々に爆裂深さが大きくなっていく。

熱応力による爆裂現象の評価

ここでは、図2における蒸気圧移動を無視した解析、すなわち、爆裂の要因として温度応力のみを考慮した解析を行い、温度応力のみによる爆裂現象の再現性の検証を行った。図10に示すように、解析は、温度解析のみを評価した場合においても爆裂現象を評価可能であることが分かった。一方、前述の蒸気圧と熱応力の両方を考慮した解析では、爆裂発生時間が4分であったのに対し、熱応力のみを考慮した解析では、爆裂発生時間が16分と遅くなった。したがって、本研究では、熱応力と蒸気圧両者の複合効果により爆裂が生じたものと考えられる。ただし、上述のように、本解析条件にはリングの拘束を境界条件によりモデル化するなどの簡略化が見られるため、より詳細の検討が必要である。

鉄筋配置の影響評価

解析モデルを図11に示す。解析対象は本研究で実施した高温負荷を受けるRC角柱の実験である。加熱は毎分5で昇温し、500まで加熱を行った。鉄筋の影響を評価するため無筋のモデルに対しても解析を行った。図12に爆裂時における変形図および断面ひび割れ図を示す。配筋モデルでは、鉄筋位置に



(a) 水平方向垂直応力 (b) 温度分布

図10 熱応力による爆裂挙動

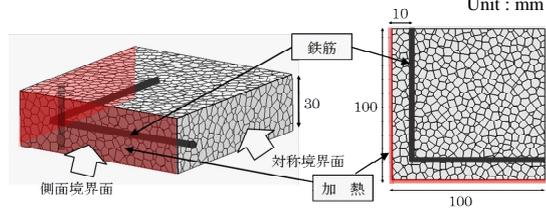


図11 解析モデル

において、かぶり剥落する形で爆裂現象が生じている。無筋モデルでは、隅角部が吹き飛ぶような形で爆裂現象が生じており、コーナーエフェクトが発生していることがわかる。配筋モデルの損傷が鉄筋に沿うように進展していることから、損傷形態が鉄筋によって大きく影響を受けていることがわかる。図13に鉄筋配置断面における配筋モデルおよび無筋モデルの断面の温度、蒸気圧、および湿度分布を示す。無筋モデルでは隅角部から同心円状に温度が分布しているのに対し、配筋モデルでは鉄筋に沿うような形で温度が分布している。また、爆裂現象が生じる80分において鉄筋温度は200度以上となり、熱応力が発生していることが推測できる。また、相対湿度は配筋モデル、無筋モデルの両ケースで加熱面から低下していくものの、蒸気圧は温度と相対湿度の作用によって配筋モデルでは、鉄筋位置において高くなっている。無筋モデルでは、爆裂現象が発生した位置と蒸気圧が高い値で分布する位置が同位置であるため、蒸気圧によって爆裂現象が発生したと考えられる。以上の結果から、鉄筋が配筋されている場合、鉄筋位置における熱膨張ならびに熱伝導による温度分布の変化により、鉄筋位置近傍において熱応力が生じ、これに加えて、蒸気圧が上昇することにより、鉄筋位置においてそれらの複合作用が生じたことが損傷要因であると推察される。

参考文献

- ・一瀬 賢一(2003): 高温加熱下の高強度コンクリートの力学的性質に関する研究, 名古屋工業大学博士論文

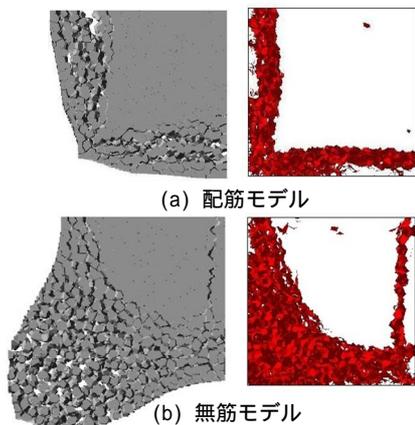


図 12 変形およびひび割れ性状(加熱後 80 分)

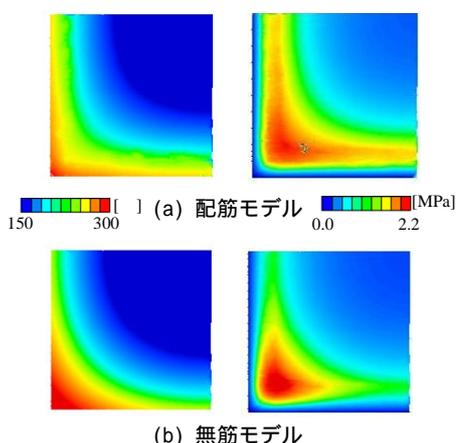


図 13 鉄筋配置が温度分布(左)および蒸気圧分布(右)に与える影響(加熱後 80 分時)

・ H. Nakamura, M. Kunieda, K. Nakashima, N. Ueda and Y. Yamamoto(2009) : Development of Fire Explosion Simulation Method Based on Rigid Body Spring Method, 1st International workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure, pp.499-509

・ 吉田敬司, 中村光, 国枝稔, 小澤満津雄(2011) : 高温加熱環境下でのコンクリートの内部損傷および爆裂現象の評価手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1193-1198

・ 松沢 晃一, 橋高 義典(2012) : 高温加熱の影響を受けたコンクリートの破壊特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol77, No680

・ 渡辺 一郎, 堀口 敬(2012) : 高温下におけるハイブリッド繊維補強高強度コンクリートの破壊特性に対する研究, 土木学会論文集 E2(材料・コンクリート構造), Vol 68, No4

・ 谷辺 徹, 小澤 満津雄, 鎌田 亮太, 六郷 恵哲(2013) : 拘束リング試験法を適用した爆裂評価手法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

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 0 件)

[学会発表](計 3 件)

海野貴裕, 中村光, 国枝稔, 上田尚史, RBSM-TRUSS Network モデルによる爆裂挙動への鉄筋の影響評価, 土木学会年次学術講演会, 平成 24 年 9 月 6 日, 名古屋(日本)

T. Unno, H. Nakamura, Y. Yamamoto, M. Kunieda, N. Ueda, Damage evaluation of RC members under high temperature by using RBSM-TRUSS network model, V international conference on computational methods for coupled problems in science and engineering COUPLED PROBLEMS, 2013.7.18, Ibiza(Spain)

T. Unno, H. Nakamura, Y. Yamamoto, M. Kunieda, N. Ueda, Evaluation of effect of heat conduction of rebar by using RBSM-TRUSS network model, The thirteen east asia pacific conference on structural engineering and construction, 2013.9.12, Hokkaido(Japan)

[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]

ホームページ等

<http://concrete-lab.civil.nagoya-u.ac.jp/homepage/j/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 光 (NAKAMURA, Hikaru)
名古屋大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 60242616

(2) 研究分担者

山本 佳士 (YAMAMOTO, Yoshihito)
名古屋大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 70532802

上田 尚史 (UEDA, Naoshi)
関西大学・環境都市工学部・准教授
研究者番号: 20422785

(3) 連携研究者 なし