

高温加熱環境下におけるコンクリートの爆裂発生メカニズム解明に関する研究

名古屋大学大学院 学生会員 ○吉田 敬司

名古屋大学大学院 正会員 中村 光, 国枝 稔, 上田 尚史

1. はじめに

コンクリートの火災時の挙動に対して、化学的、力学的変化に関する研究は数多く行われている¹⁾が、それらを総合的に評価した事例はほとんどない。特に爆裂現象に関しては、爆裂発生メカニズムから、爆裂主現象まで、必ずしも明らかとされていない。本研究では、ひび割れなどの不連続挙動を扱うのに適している剛体バネモデルと、ひび割れ間の物質移動も表現可能なトラスネットワークモデルを統合したモデルを用いて、コンクリートの爆裂現象に対する熱応力や蒸気圧の影響を総合的に評価し、爆裂発生メカニズムの解明を試みた。

2. 解析手法

本研究では、高温加熱時におけるコンクリートのひび割れ進展および爆裂現象を直接的に表現できる構造解析手法として3次元-RBSMを用いた。各要素は図-1に示すように6自由度を持つ剛体と仮定し、要素間の境界面重心と境界面頂点からなる三角形の重心に、垂直バネおよびせん断バネを配置した²⁾。また、本研究では、爆裂後のコンクリートの変形挙動まで評価することを目的としているため、Newmark β 法による動的解析を行った。

高温加熱時におけるコンクリート中の物質移動は、図-2に示すように各母点間を結ぶトラスネットワークを用いて、熱および蒸気圧の移動を評価した。また、この際、蒸気圧の生成は温度依存性を考慮した。ひび割れ発生後は、要素境界面に存在する境界面トラスが開口し、ひび割れ面での蒸気圧移動パラメータをコンクリート中のトラスより高く設定することで、ひび割れ部において増加すると考えられる蒸気圧の移動を表現した。なお、各種パラメータの設定および算定式は参考文献³⁾を参照されたい。

3. 解析概要

解析は、北村ら⁴⁾により行われたコンクリートスラブの耐火実験を対象とした。実験は、 $400 \times 150 \times 400(\text{mm})$ の試験体を、炉内の昇温速度 $2000(^{\circ}\text{C}/\text{hour})$ で加熱したものである。表-1にコンクリートの材料特性を示す。なお、実験では図-3に示す測定点(加熱面から10,50,100(mm)の位置)で温度が測定されており、爆裂は、加熱開始から28分後に発生したと報告されている。

解析は、供試体境界と対流境界の対称性を考慮して、実験供試体の1/4モデル($200 \times 150 \times 200(\text{mm})$)とした。解析モデルは、加熱面付近の平均要素寸法が深さ方向に2.0(mm)、幅、奥行き方向に3.5(mm)とし、Voronoi要素によって分割を行った。境界条件は、4点単純支持を仮定し、対称境界面では図-4のように対称性を考慮した境界条件を設定した。

4. 解析結果および考察

図-5に解析および実験で得られた温度履歴を示す。解析での爆裂発生時間は、加熱開始から26.8分後であり、実験における爆裂発生時間を概ね評価できている。図-6に、爆裂直前の温度、蒸気圧、相対湿度分布と爆裂後の爆裂深さの関係を示す。温度は表面位置で最大となるが、表面付近は相対湿度が低いため、蒸気圧の

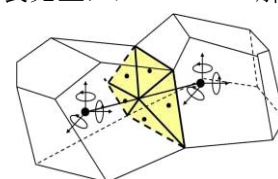


図-1 剛体要素の自由度と要素境界面上の評価点

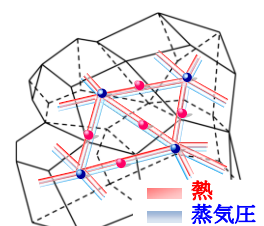


図-2 トラスネットワークモデル

表-1 材料特性

圧縮強度 (MPa)	41.9
引張強度 (MPa)	2.77
弾性係数 (GPa)	30.1

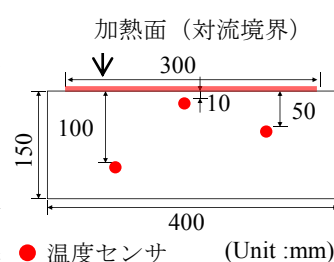


図-3 実験供試体

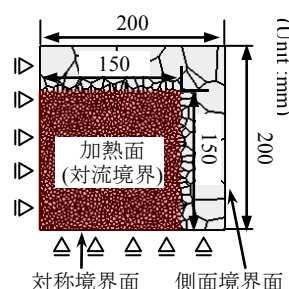


図-4 解析モデル

最大値は深さ約 1~2(mm)の位置となっている。爆裂深さは約 2(mm)であり、蒸気圧が最大となる位置に対応している。また、図-7 にはコンクリート表面付近の蒸気圧履歴を示したが、蒸気圧は 15 分後以降急激に増加していき、25 分後に表面から 1mm の位置で引張強度を超えた。したがって、コンクリートの爆裂現象は、内部の蒸気圧が増加し、引張強度を超えることで発生することが推測できる。図-8 に対称境界におけるひび割れ図を示す。図-8(a)より、表面部では圧縮力、内部では曲げ変形によるひび割れが発生しており、内部拘束により発生する熱応力の影響を妥当に評価できている。なお、図-8 中の青色は垂直バネの応力が引張強度に達した面、緑色は応力が引張強度の 1/4 まで低下した面を表している。図-9 に爆裂後の変形挙動を示す。本解析では、動的解析を行うことで、爆裂現象そのものを再現できることが分かる。

本研究では、前述の実験を対象とした解析（以下複合解析）に加え、作用する外力を熱応力のみとした解析（以下熱応力解析）、および、蒸気圧のみとした解析（以下蒸気圧解析）を行った。熱応力解析では、図-8(b)に示したように、内部にひび割れが確認されたが、コンクリート表面部に作用する圧縮力は、圧縮強度の 1/2 程度であり、熱応力説のような爆裂は発生しなかった。一方、蒸気圧解析では、炉内温度が最大となる 28 分後を超えた直後に爆裂が発生した。したがって、蒸気圧のみでコンクリートに爆裂現象が生じる可能性が解析的に示された。しかしながら、図-8(c)に示したように、蒸気圧解析では爆裂直前までに内部のひび割れが確認されず、図-6 中の灰色の実線で示したように爆裂発生には複合解析よりもさらに高い蒸気圧が内部で作用することを必要とした。したがって、熱応力は爆裂の主要因ではないが、コンクリートの内部組織を損傷させ、爆裂を引き起こし易くしている一要因であるといえる。

6. まとめ

既往の実験との比較により、本解析手法はコンクリートの爆裂現象を具体的に再現でき、爆裂メカニズム解明に有効な評価手法であることを示した。コンクリートの爆裂現象に対して、蒸気圧が爆裂の主要因であるのに対し、熱応力は爆裂発生を促進させていることが本研究により示された。

参考文献

- 1) 構造材料の耐火性ガイドブック, 日本建築学会, 2004
- 2) 山本佳士, 中村光, 黒田一郎, 古屋信明: 3 次元剛体バネモデルによるコンクリート供試体の圧縮破壊解析, 土木学会論文集, Vol. 64, No.4, pp. 612-630, 2008.11
- 3) 中島浩亮, 中村光, 国枝稔, 上田尚史, 山本佳士: 3 次元 RBSM を用いたコンクリートの耐火性能評価手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.937-942. 2009.6
- 4) 北村ら: コンクリートの耐火性に関する研究, <http://www.cive.gifu-u.ac.jp/lab/st1/works/2>

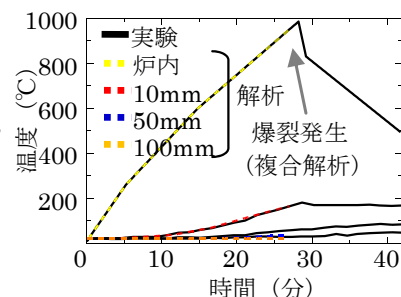


図-5 温度履歴

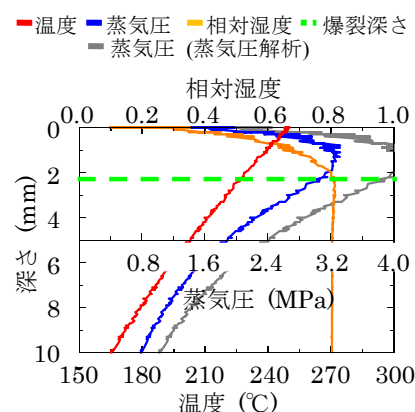


図-6 温度, 蒸気圧, 相対湿度, 爆裂深さの関係

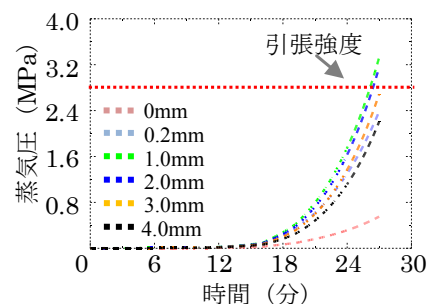


図-7 蒸気圧履歴

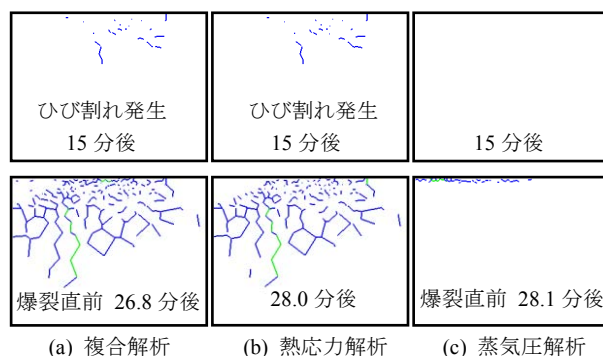


図-8 対称境界面のひび割れ図

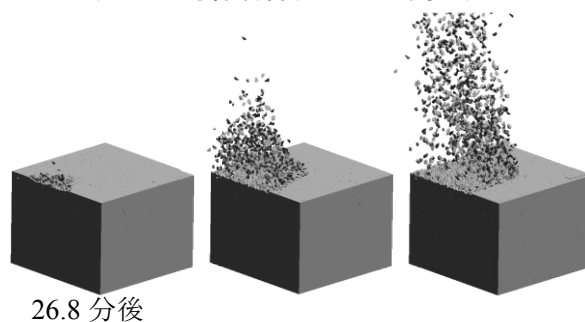


図-9 変形図 (爆裂時)