

拘束下におけるコンクリートの爆裂挙動のRBSM-TRUSS Network モデルによる評価

名古屋大学

学生会員 海野 貴裕

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爆裂挙動の評価は、トンネル構造や高強度コンクリートを用いた建造物の安全性を確保するために重要な項目である。爆裂挙動に与える要因については、主に実験的にさまざま検討されているが、要因の一つとして、拘束応力が挙げられる。拘束応力の影響に関しては、爆裂挙動には多くの場合蒸気圧応力が主要因とされているが、拘束応力下では、蒸気圧応力よりも温度応力の方が支配的になることが指摘されている¹⁾。そこで、本研究では、蒸気圧応力および温度応力の影響を考慮できる解析手法を用い爆裂挙動に対する拘束応力の影響を解析的に評価することを試みた。

2. 解析手法

解析には、3次元剛体バネモデル(3D-RBSM)とトラスネットワークモデルを用いた²⁾。図-1に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、温度依存性のパラメータとして考慮された比熱、熱伝導率を用いて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。

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、熱伝導解析によって得られた温度勾配と熱膨張ひずみが線形関係にあると仮定して計算され、RBSMにおける垂直バネの初期ひずみとして与えられる。蒸気圧は、蒸気圧移動解析により得られた蒸気圧分布を用い、RBSMにおける初期応力として与えられる。本研究では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。その際、動的応答に対する数値積分法としてNewmark β法(β=0.25)を用い、陰的に解を求めた。

3. 解析概要

本研究ではTanibe et. al. によって行われた実験¹⁾を評価対象として解析を行った。実験ではコンクリート円柱に厚さ8mmの鋼板を巻き、鋼板によってコンクリートを拘束したφ300×100mmの供試体に加熱を行い拘束応力の影響を評価している。コンクリートの材料定数は表-1のとおりである。加熱は片面コンクリート部分のみ行い、温度はRABT曲線に従って与え、供試体中央の深さ方向に温度計、蒸気圧計を設置している。実験結果では、加熱4分後に爆裂現象が生じた。爆裂時には加熱深さ25mmの位置で3MPaの拘束応力が発生したとされている。

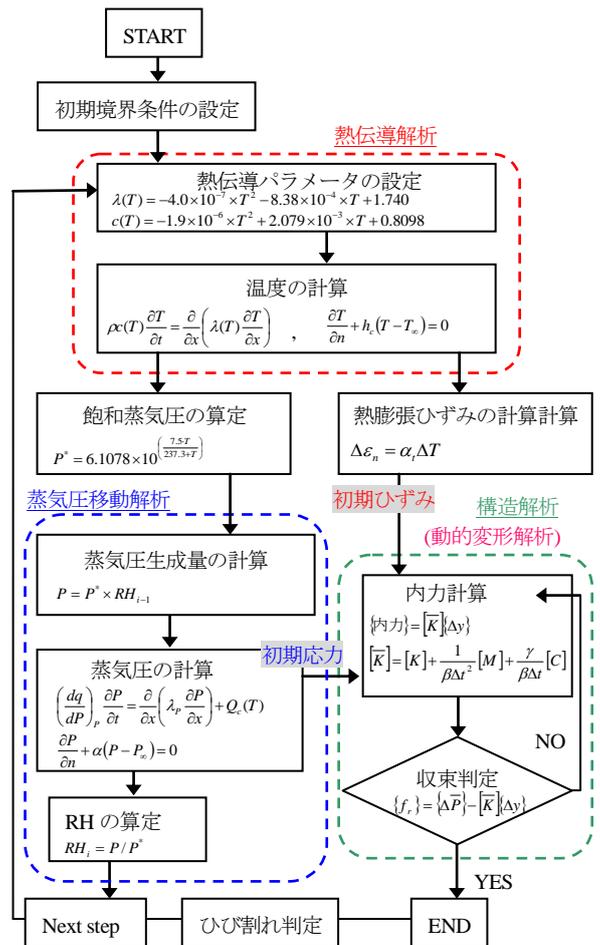


図-1 解析フロー図

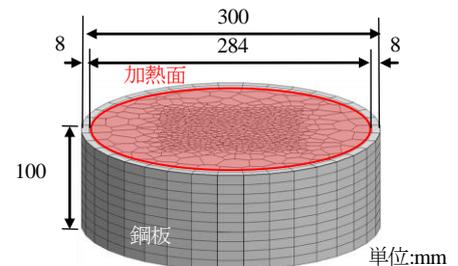


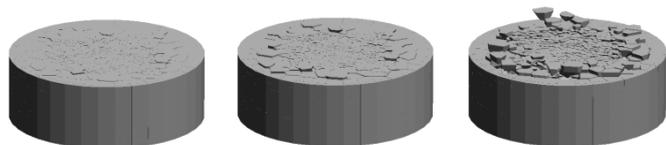
図-2 解析モデル

表-1 コンクリートの材料諸元

圧縮応力 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張応力 (MPa)
90.0	42.0	5.5

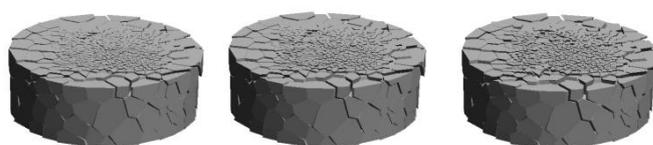
表-2 解析パラメータ

熱伝達係数 ($W/m^2 \cdot K$)	線膨張係数 ($1/^\circ C$)	湿気容量 ($g/m^3 \cdot h \cdot mmHg$)	透湿率 ($g/m \cdot h \cdot mmHg$)	蒸発率 ($g/m^2 \cdot h \cdot mmHg$)
6.16×10^{-6}	10×10^{-6}	1.9×10^{-3}	2.5×10^{-3}	5.0



(a) 6分30秒 (b) 7分30秒 (c) 9分00秒

図-3 拘束供試体 (倍率 1 倍)



(a) 6分30秒 (b) 7分30秒 (c) 9分00秒

図-4 非拘束供試体 (倍率 50 倍)

解析モデルを図-2 に示す. 解析モデルは, コンクリートは Voronoi 多角形分割を用い, 加熱面近傍深さ 10mm の範囲では, 2.5mm の平均要素寸法を用いた. また, 要素数を低減するため, 供試体外周側および供試体下面側に行くほど要素寸法を大きくした. またコンクリート要素の外周には実験同様鋼板をモデル化した. 境界条件として, 上面コンクリート部分のみを加熱面とし, 温度は実験同様 RABT 曲線に従って与えた. 解析に用いたパラメータを表-2 に示す. これらのパラメータは, 実験で計測された, 供試体内部の温度履歴及び蒸気圧履歴を妥当に評価できるように決定した. 鉄の熱伝達係数は $6.0 \times 10^{-4} (W/m^2 \cdot K)$, 熱伝導率 $0.2 (W/m \cdot K)$ とした.

また, 拘束応力の影響の有無を比較検討するため, 鋼板を取り去った $\phi 284 \times 100mm$ の非拘束供試体モデルを作成し, 同様の解析を行った.

4. 解析結果

図-3 に拘束供試体の爆裂発生時の変形挙動を示す. 拘束供試体では, 加熱後 9 分において加熱面のコンクリートが急激に変形することで爆裂が生じた. 一方, 図-4 に図-3 と同時刻での非拘束供試体の変形挙動を示すが, 拘束供試体とは異なり, 供試体全体が膨張する変形が生じ爆裂は生じなかった.

図-5, 6 に, 深さ 10, 20mm 位置での実験と解析での温度履歴, 蒸気圧履歴を示す. 蒸気圧は局所な性状を捉える解析値の方が実験値に比べ若干早期に増加する傾向を示しているが, 適切な解析パラメータを設定することで, トラスネットワークモデルを用いて, コンクリート温度, 蒸気圧を妥当に評価できることが分かる. また, 鋼板による拘束の有無に関わらず, 蒸気圧履歴は同様の傾向を示しており, どちらも実験と同様に 0.1MPa 程度生じていることが分かる. このことは, 蒸気圧の大きさはコンクリートの爆裂現象の直接的な要因ではなく, 拘束により生じた温度応力の影響が爆裂に対して支配的な要因であったことを示唆するものである.

5. まとめ

本研究では, RBSM-TRUSS Network モデルを用いて, 鋼板拘束下のコンクリートの爆裂挙動の評価を行った. その結果, コンクリートの爆裂挙動を解析的に評価できること, ならびに今回対象とした供試体では爆裂発生要因として温度応力の影響が支配的であることを示した. 今後は, 拘束の有無による供試体内部の応力状態やひび割れ性状の違いを評価していくことで爆裂発生メカニズムについてより詳細な検討を行う予定である.

参考文献

- 1) T. Tanibe et. al. : Explosive spalling behavior of restrained concrete in the event of fire, *Proceedings of 2nd International RILEM Workshop on Concrete Spalling due to Fire Exposure*, pp.319-326, 2011.
- 2) 吉田ら : 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.1347-4111, 2011.

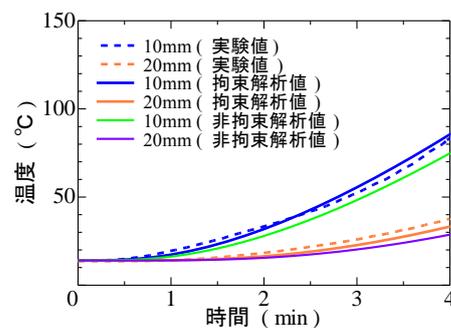


図-5 温度履歴

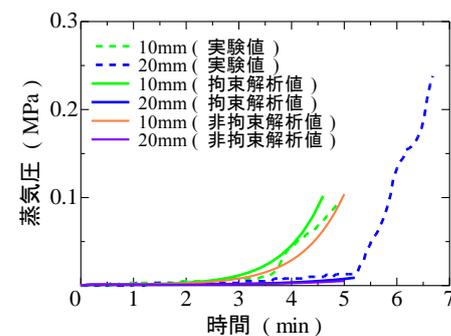


図-6 蒸気圧履歴