

拘束条件を考慮した爆裂評価に関する実験的および解析的検討 —その2 解析的検討

正会員
同
同
同

○鎌田 亮太*¹
谷辺 徹*¹
小澤 満津雄*²
六郷 恵哲*²

コンクリート
拘束

爆裂
RABT 加熱曲線

熱応力
熱応力解析

1 はじめに

火災時におけるコンクリートの爆裂発生原因に関しては、コンクリート中の水分により生じる水蒸気圧と熱膨張の拘束や温度分布に起因する熱応力が影響していると報告されている¹⁾が、熱応力測定結果から爆裂を評価した例は少ない。

これまで、筆者らは拘束リングを用いて熱応力を測定するコンクリートの爆裂評価方法を提案した。その結果、実験的に熱応力と爆裂の関係を評価できる可能性を見出すことができた^{2), 3)}。

本報では、熱応力解析を実施し、前報の拘束条件が異なるコンクリートの加熱試験結果と比較することで、拘束条件の爆裂に対する影響を検証することとした。

2 解析条件

2.1 解析の流れ

解析手順を図-1 に示す。まず、加熱開始 5 分時の実験時のコンクリート内部温度を再現するため、加熱面の熱伝達率を調整した。その後、モデルの各要素に力学的特性を与え、熱応力解析により内部応力を算出することとした。

2.2 解析モデル

解析モデルは図-2 に示す通り、供試体 1/4 断面の 3 次元モデルとし、拘束リングは全拘束 2 段 (タイプ 1)、全拘束 5 段 (タイプ 2)、無拘束 (タイプ 3) の 3 水準とした。また、解析に取り入れる材料特性は全タイプ統一することとし、前報使用供試体タイプ 2 (全拘束-5 段リング) の材料特性を物性値として入力した。なお、タイプ 1 および 2 の拘束リング間には、ボンド要素とし、弾性係数を 1MPa に設定し、他の要素の影響を受けない材料とした。

表-1 材料の熱特性

熱特性	初期温度	℃	20	
			含水率	%
コンクリート	熱伝導率	W/m・K	$2-0.24 \cdot (T/120)+0.012 \cdot (T/120)^2$	
		J/kg・K	$900+80 \cdot (T/120)-4 \cdot (T/120)^2$	
	比熱	W/m・K	$51.91-5.03 \cdot 10^{-5} \cdot T^2$	
		J/kg・K	$482+7995 \cdot 10^{-7} \cdot T^2$	
鋼材	熱伝導率	W/m・K	1	
	比熱	J/kg・K	1.7	
ボンド	熱伝導率	W/m・K	1	
	比熱	J/kg・K	1.7	

3 熱伝導解析

各材料の熱特性を表-1 に示す。鋼材ならびにコンクリートは、Eurocode4⁴⁾ と日本建築学会鋼構造設計指針⁵⁾ に準じ、温度依存性を与えるとともに、コンクリートにおいては、試験に使用したコンクリートの含水率 3.8% を潜熱として 95~100℃間の比熱に取り入れた。また、熱伝導解析における加熱条件は、コンクリート下面に熱伝達境界を設定し、前報と同様、RABT 加熱曲線 (5 分間で 1200℃まで昇温 - 30 分保持) を入力温度とした。また、モデル上面ならびに円周部においては、熱伝達境界 (熱伝達率 14W/m²・K) を設定し、外気温度は 20℃に固定した。解析ケースは加熱面の熱伝達率を 150~350W/m²・K の範囲で入力し、5 分時のコンクリート中心部温度において、実験値と差を検証した。その結果、図-3 に示すように、熱伝達率を 300W/m²・K とした際に、実測値と近い値を示したため、以下の熱応力解析において、加熱面の熱伝達率は 300W/m²・K とした。

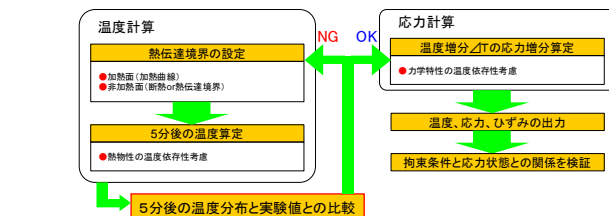


図-1 解析手順

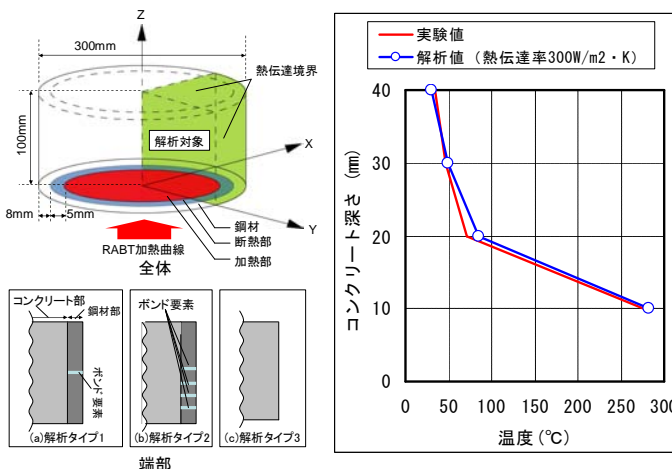


図-2 解析モデル

図-3 熱伝導解析結果

Experimental and analytical examination on explosive spalling under restrained condition ó Part2. Analytical examination

KAMATA Ryouta, TANIBE Toru
OZAWA Mitsuo, ROKUGO Keitetsu

4 熱応力解析

4.1 解析条件

熱応力解析において、供試体モデルに与える熱履歴は熱伝導解析で得られた各要素の時系列の温度履歴とする。また、各材料の力学特性については、温度上昇に伴う強度低下を示すことから、前報試験に使用したコンクリート強度（圧縮強度:76.8MPa、引張強度:6.6MPa、弾性係数:43100MPa）と Eurocode4⁴⁾ 記載の残存強度率を参考に、図-4 に示す特性値を入力した。

なお、実際には爆裂により断面欠損が生ずるが、本検討においては、爆裂が発生し始める 4～5 分時における応力状態を検証するため、考慮しないこととした。

4.2 熱応力解析結果

5 分時における各供試体モデルの断面深さとコンクリート内部半径方向応力平均値の関係を図-5 に示す。これより、加熱面における応力平均値は、タイプ 1 が最も高く 143MPa、タイプ 3 が最も低く 123MPa となり、爆裂規模と同じ傾向を示した。なお、実験時の拘束応力と比較し、解析値はかなり高い値を示したが、これは、遷移クリープ等を考慮していないためだと推察される。

また、断面深さ 20～60mm 位置において、各供試体タイプに引張応力が発生しており、実験時にリングひずみより算出した拘束応力とは異なる傾向となった（図-6 参照）。これは、図-7 に示す通り、矩形断面は加熱面ほど供試体温度が高くなる非線形温度分布を示し、解析モデルの各要素は温度分布に比例して、仮想の自由ひずみを生じる。しかし、平面保持によりひずみは平均化され、自由ひずみと実際のひずみとの間に差が生じる。そのため、加熱面より 0～10mm においては自由ひずみが拘束されることによる圧縮応力が生じ、これに釣り合うように、加熱面 20～40mm においては、引張応力が生じたと推察される。

しかし、実験では図-8 に示す通り、加熱面より 30mm 位置でも、コンクリートの熱膨張が拘束リングにより拘束されていると推察され、実際の応力分布の把握には、更なる検討が必要と思われる。

5 まとめ

拘束条件が異なるコンクリートの加熱試験結果を解析的に検討した結果、加熱面の熱伝達率を $300\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ とすることで実験値と良く整合することが確認された。

しかし、異なる拘束条件による拘束応力の差は確認されたものの、その絶対値ならびに応力分布については、実験値と異なる傾向を示したため、更なる検討が必要であることが確認された。

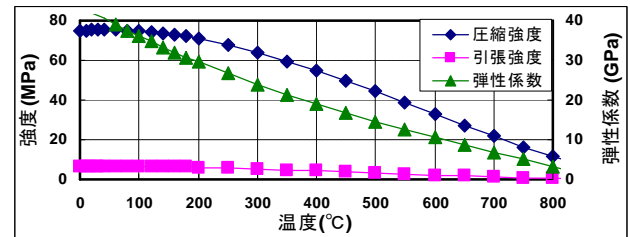


図-4 コンクリートの力学特性

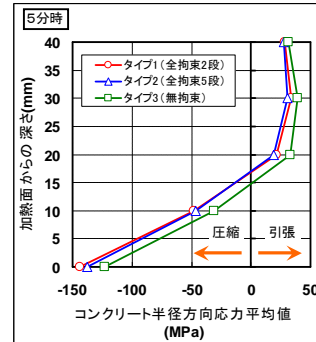


図-5 コンクリート半径方向応力平均値

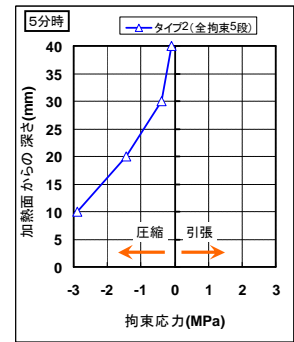


図-6 拘束応力算出結果（実験値ひずみより算出）

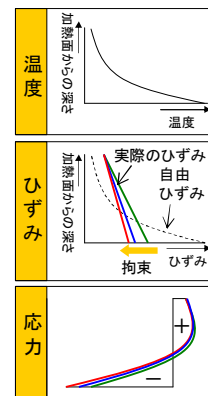


図-7 矩形断面の応力状態イメージ

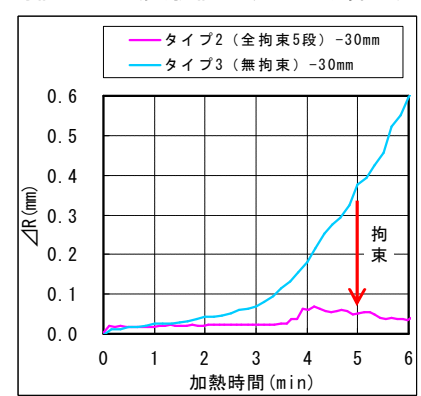


図-8 供試体外径変化量（実験値）

謝辞

本研究は、平成 23 年度前田記念工学振興財団の補助を受けた。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止対策，コンクリート工学，vol.45，No.9，pp.87-91，2007.9
- 2) 鎌田ら：熱応力測定によるコンクリート爆裂メカニズムに関する研究 その 1 熱応力を考慮した爆裂評価方法の検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.1-2，2011.8
- 3) 谷辺ら：熱応力測定によるコンクリート爆裂メカニズムに関する研究 その 1 熱応力を考慮した爆裂評価結果，日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2，pp.3-4，2011.8
- 4) CEN：Eurocode4 Design of Composite Steel and Concrete Structure 6 Part1.2 Structural Fire Design，Ocr.1994
- 5) 日本建築学会：鋼構造耐火設計指針，2008

*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所

*2 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科

*1 Research & Development Laboratory, Taiheiyo Materials Corporation

*2 Gifu University, Department of Civil Engineering