

火災時におけるコンクリートの変形挙動に関する解析的研究

大成建設(株) 正会員 ○河村 圭亮, 正会員 福浦 尚之, 正会員 鈴木 三馨, 正会員 服部 佳文

1. はじめに

土木分野においても、コンクリート構造物の火災事例が国内外で数多く報告されており、トンネル構造物の事例がその大半を占めている¹⁾。しかし、加熱を受けたトンネル構造物の力学性状を評価することは容易ではない。そのため、加熱を受けるコンクリートの変形挙動を精度良く評価可能な解析手法の確立が望まれている。

そこで、本研究では3次元有限要素法を用いて火災加熱を受けるコンクリートの変形挙動解析を行った。実大試験体を用いたコンクリートの荷重加熱実験を対象とした解析により、解析手法の妥当性について検討した。

2. 解析概要

本研究では、3次元ソリッド要素を用いて熱伝導解析および熱応力解析の一方方向連成解析を行った。

2.1 熱伝導解析

熱伝導解析では、コンクリートの熱伝導率、比熱の温度依存性および蒸発潜熱を考慮した²⁾。

2.2 熱応力解析

本解析ではコンクリートの全ひずみを式(1)とし、応力ひずみ、熱膨張ひずみおよび過渡ひずみ³⁾を考慮した。

$$c\varepsilon_{total} = c\varepsilon_c + c\varepsilon_{th} + c\varepsilon_r \quad (1)$$

ここに、 $c\varepsilon_{total}$ ：コンクリートの全ひずみ、 $c\varepsilon_c$ ：コンクリートの応力ひずみ、 $c\varepsilon_{th}$ ：コンクリートの熱膨張ひずみ、 $c\varepsilon_r$ ：コンクリートの過渡ひずみ

コンクリートの圧縮応力ひずみ関係には、Eurocode2⁴⁾で採用されているPopovics式を用いた。各温度における圧縮強度および最大荷重時のひずみについては、高温下における圧縮強度試験結果⁵⁾を基にして定めており、得られた応力ひずみ関係を実験結果と併せて図-1に示す。

引張強度の低減率は圧縮強度と同じとして、引張域の応力ひずみ関係については、軟化域に引張破壊エネルギーを考慮した1/4モデルを用いた。

圧縮・引張ともに過去の最大受熱温度での応力ひずみ関係を用いる。

コンクリートの熱膨張ひずみおよび過渡ひずみについては、それぞれ常温圧縮強度53N/mm²のコンクリートの高温圧縮試験結果³⁾に従うものとした。

鉄筋の応力ひずみ関係はバイリニア型とし、降伏強度は文献6)のデータ、ヤング係数の温度依存性については文献1)の式をそれぞれ引用した。鉄筋の熱膨張係数は13μ/°Cで一定とした⁴⁾。

3. 解析対象の実験概要

試験体の寸法は図-2の実験概要に示す通りである。実験では加熱前に、長期荷重(土水圧)を想定して軸力7,200kN、曲げモーメント570kN・mを導入した。さらに、試験体中央部に鉛直荷重100kNを作用させた状態で保持した後、定ストローク制御運転により裏面側への変形が生じないように鉛直変位を拘束した。

加熱は、火災時に想定される時間温度曲線として採用したRABT曲線¹⁾に従って行った。加熱開始から3.25時間の時点で、中央部鉛直方向の拘束を解放し、軸力および曲げモーメントで導入した荷重を除荷した。

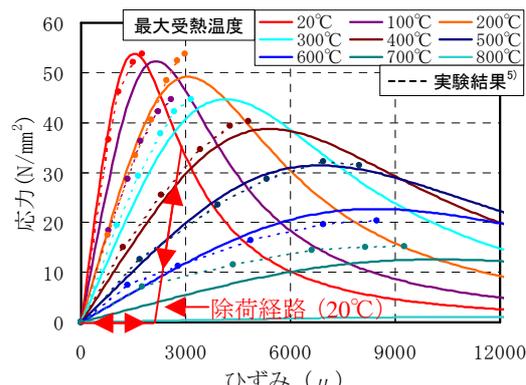


図-1 コンクリートの圧縮応力ひずみ関係

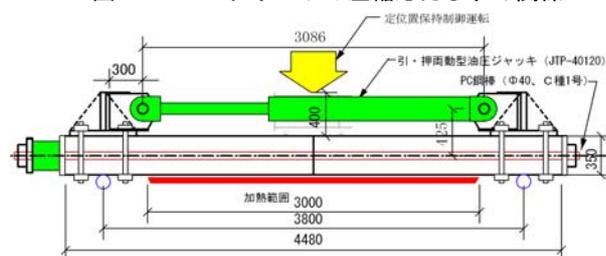


図-2 実験概要

キーワード 火災, 熱伝導解析, 熱応力解析, 過渡ひずみ

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター TEL 045-814-7230

4. 熱伝導解析

解析モデルは図-3 に示すように、試験体形状の幅方向および軸方向の対称性を考慮した 1/4 モデルとした。裏面側および外側側面の雰囲気温度は 20°C一定とし、対称境界面については断熱とした。

試験体内部温度の経時変化を実験結果と併せて図-4 に示す。加熱面における温度上昇を若干過小評価してはいるものの、いずれの測定地点においても解析結果は実験結果と良く一致している。

5. 熱応力解析

加熱開始から 12 時間後の最大主ひずみ分布を変形挙動と併せて図-5 に示す。また、実験における加熱終了後の試験体裏面の様子を図-6 に示す。なお、試験体表面の白線は目視で観察されたひび割れを示している。解析では加熱に伴って裏面に試験体幅方向の分散した複数のひび割れが生じる挙動が再現できている。

加熱区間内で、試験体軸方向の中央から 750mm、幅方向は試験体中央(図-3 中の赤丸位置)の断面内における軸方向の応力分布を図-7 に示す。コンクリート温度の上昇に伴い、加熱面付近で剛性や強度が低下するため、応力を負担する領域が裏面側に移動している(A)。このことより、試験体は裏面側へ反り上がる変形挙動を示す。加熱開始から 1 時間以上経過すると、温度低下により熱膨張ひずみが小さくなり、過渡ひずみの方が卓越するようになることで、強度低下のため値は小さいが引張応力が生じる(B)。一方、図-4 に示すように内部の温度が上昇する領域では熱膨張ひずみの発生に伴って圧縮応力が増加する(C)。そのため時間の経過に伴い、加熱面付近では引張、内部では圧縮応力状態となり、断面内での釣り合いを保つため裏面側には引張応力が生じる(D)。この引張応力によって裏面側にひび割れが生じる。

6. まとめ

本研究では 3 次元有限要素法を用いて载荷加熱実験のシミュレーション解析を行った。その結果、加熱に伴うコンクリートの温度変化および変形挙動を概ね評価することができ、本解析手法を用いることで、概ね妥当な解析結果が得られることが示されたものと考えられる。

参考文献 1)土木学会：コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，pp.3-12, pp.25, pp.55, 2004. 2)市原三馨他：耐火セグメント継手部の火災時の挙動に関する実験的および解析的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol30, No3, pp.73-78, 2008. 3)道越真太郎 他：圧縮力を受けるコンクリートの高温時におけるひずみ挙動，日本建築学会構造系論文集，第 621 号，pp169-174, 2007.11. 4)Eurocode2: Design of concrete structures Part1,2 General rules-Structural fire design, BS EN 1992-1-2, 2004. 5)安部武雄 他：高温度における高強度コンクリートの力学的特性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第 515 号，pp163-168, 1999.1. 6)日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp.160-162, 2009.

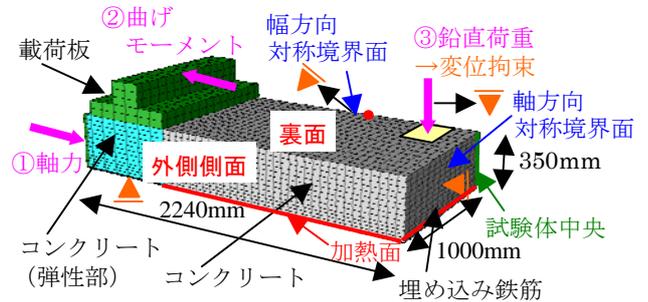


図-3 解析モデル

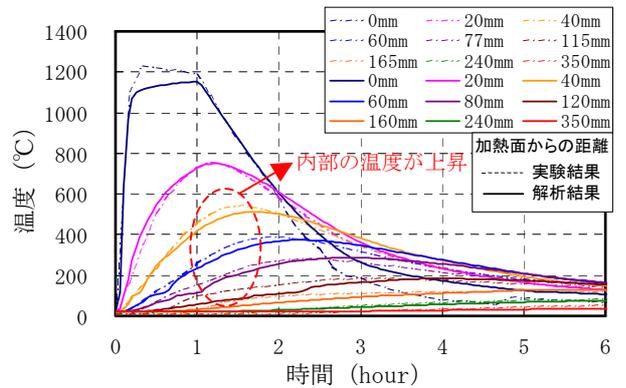


図-4 コンクリート内部温度の経時変化

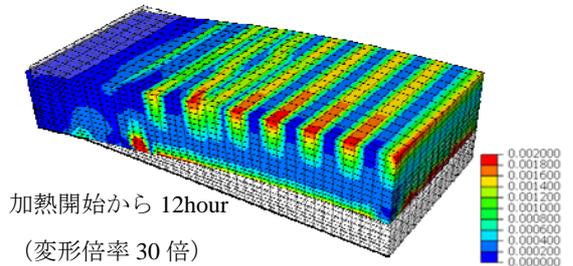


図-5 最大主ひずみ分布および変形図



図-6 試験体裏面のひび割れ状況(加熱終了後)

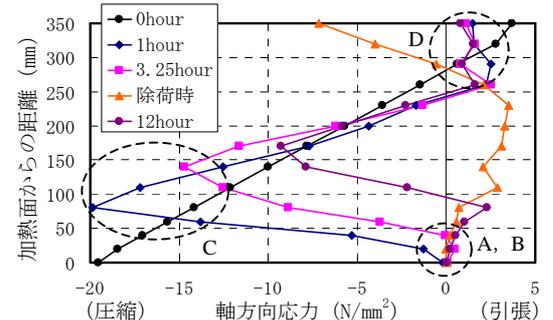


図-7 断面内の応力分布