

火災加熱を受けるコンクリートの変形挙動解析

河村 圭亮*¹・福浦 尚之*¹・鈴木 三馨*¹・服部 佳文*²

Keywords : fire, heat transfer analysis, thermal stress analysis, load induced thermal strain, tunnel

火災, 熱伝導解析, 熱応力解析, 過渡ひずみ, トンネル

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²⁾。

火災加熱を受けるトンネル構造物の構造性能を評価するためには、有限要素法を用いた熱伝導解析および熱応力解析が有益な手法であると考えられるが、解析的に検討された研究は少ない³⁾。特に3次元解析を行った研究や、トンネル全体系を対象とした解析事例は数少ない^{4),5)}。

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い、実大試験体を用いたコンクリートの載荷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。さらに、トンネル構造物を対象とした解析を行い、本解析手法の有用性について検討を行った。

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向連成解析を行った。本解析では、既往の知見に基づいてコンクリートおよび鉄筋の温度上昇に伴う強度低下や熱膨張ひずみおよび過渡ひずみの発生についてモデル化を行った。解析には汎用非線形有限要素プログラム ABAQUS を使用し、コ

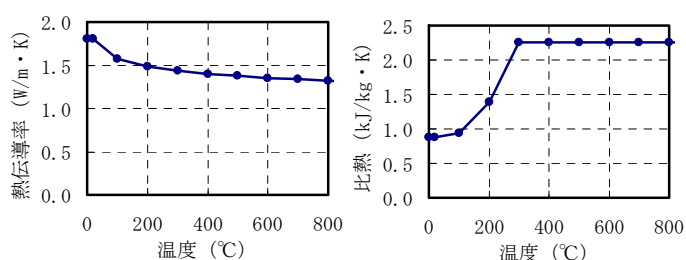


図-1 熱伝導率および比熱の温度変化

Fig.1 Variation in temperature of heat conductivity and specific heat

クリートの応力ひずみおよび過渡ひずみのモデルについては、ユーザーサブルーチンを用いて取り入れた。

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および比熱の温度依存性を考慮した。本解析で用いた熱伝導率と比熱の温度に対する変化を図-1に示す⁶⁾。また、水の潜熱を 127.4J/kg として、100~120°Cの範囲で蒸発潜熱を奪うものとした。

2.2 熱応力解析

2.2.1 コンクリートの力学特性

熱応力解析に用いたコンクリートの力学特性を以下に示す。本解析では全ひずみを式(1)とし、応力に対応して生じるひずみ(応力ひずみ)、熱膨張ひずみおよび文献7)中に示されている圧縮応力作用下において昇温時に生じる不可逆的な収縮ひずみ(過渡ひずみ)を考慮した。

$${}_{c}\epsilon_{\text{total}} = {}_{c}\epsilon_{\text{c}} + {}_{c}\epsilon_{\text{th}} + {}_{c}\epsilon_{\text{tr}} \quad (1)$$

ここで、 ${}_{c}\epsilon_{\text{total}}$ はコンクリートの全ひずみ、 ${}_{c}\epsilon_{\text{c}}$ はコンクリートの応力ひずみ、 ${}_{c}\epsilon_{\text{th}}$ はコンクリートの熱膨張ひずみ、 ${}_{c}\epsilon_{\text{tr}}$ はコンクリートの過渡ひずみを表す。

a) 応力ひずみ

コンクリートの圧縮応力ひずみ関係には、Eurocode2⁸⁾で採用されている式(2)に示す Popovics 式を用いた。

*1 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室

*2 土木本部土木設計部

$$\sigma(T) = \sigma_b(T) \times \frac{\varepsilon_c(T)}{\varepsilon_{cl}(T)} \times \frac{n}{(n-1) + (\varepsilon_c(T) / \varepsilon_{cl}(T))^n} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma(T)$ は T°Cにおけるコンクリート応力(N/mm²)、 $\sigma_b(T)$ は T°Cにおける圧縮強度(N/mm²)、 $\varepsilon_c(T)$ は T°Cにおけるコンクリートの応力ひずみ、 $\varepsilon_{cl}(T)$ は T°Cにおける最大荷重時のひずみ、nは係数を表す。

式中の係数は Eurocode2⁸⁾に従い n=3 とした。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、それぞれ図-2および図-3中に示す高温下における圧縮強度試験結果⁹⁾を、常温時に対する比で表した関係を元にした近似式により定めた。得られた応力ひずみ関係を実験結果と併せて図-4に示す。なお、除荷経路については図-4中の20°Cのケースに示すように、初期剛性で応力0まで線形除荷する簡易なモデルとした。

引張強度の低減率についても、圧縮強度と同じ図-2中の近似式により定めた。引張域の応力ひずみ関係については、引張強度以降の軟化域には式(3)より算出した引張破壊エネルギーを考慮した1/4モデルを用いた¹⁰⁾。

$$G_F(T) = 10(d_{max})^{1/3} \{\sigma_b(T)\}^{1/3} \quad (3)$$

ここで、 $G_F(T)$ は T°Cにおける引張破壊エネルギー(N/m)、 d_{max} は粗骨材の最大寸法(mm)、 $\sigma_b(T)$ は T°Cにおける圧縮強度(N/mm²)を表す。

なお、引張側の除荷経路については原点指向型の線形除荷モデルとして簡易に考慮している。

圧縮・引張ともにコンクリート温度が低下する場合には、強度の復帰は期待できない¹¹⁾ため、過去の最大受熱温度での応力ひずみ関係を用いる。

b) 熱膨張ひずみおよび過渡ひずみ

本解析では、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、それぞれ図-5に示す常温圧縮強度 53N/mm²のコンクリートの高温圧縮試験結果⁷⁾に従うものとした。熱膨張ひずみ、過渡ひずみともに実験データがない800°C以上については800°Cの時点の勾配を使用し、各ひずみが線形的に増加していくものとして定めた。

2.2.2 鉄筋の力学特性

熱応力解析に用いた鉄筋の力学特性を以下に示す。本解析では全ひずみを式(4)とし、応力ひずみおよび熱膨張ひずみを考慮した。

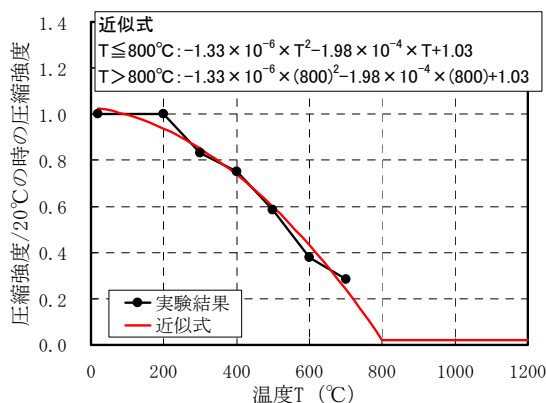


図-2 圧縮強度の温度依存性⁹⁾

Fig.2 Temperature dependence of compressive strength

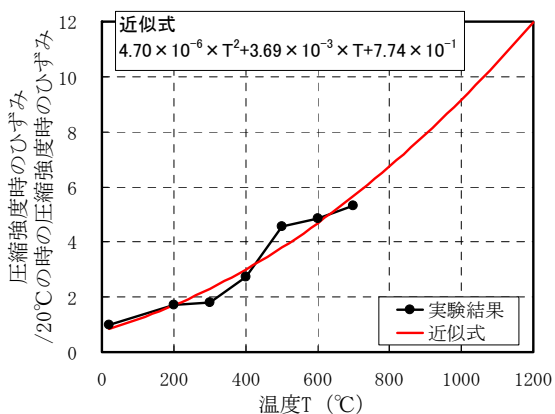


図-3 圧縮強度時のひずみの温度依存性⁹⁾

Fig.3 Temperature dependence of strain in compressive strength

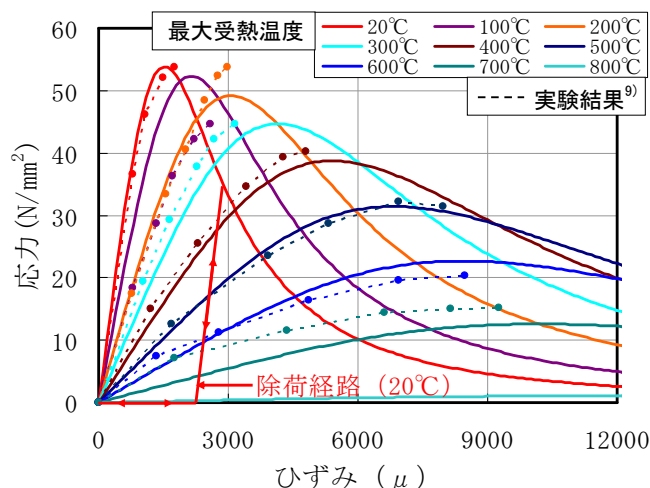


図-4 コンクリートの圧縮応力ひずみ関係

Fig.4 Compressive stress-strain relationship of concrete

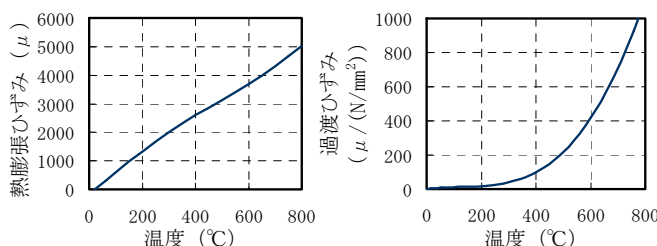


図-5 熱膨張ひずみおよび過渡ひずみの温度変化

Fig.5 Variation in temperature of thermal expansion strain and load induced strain

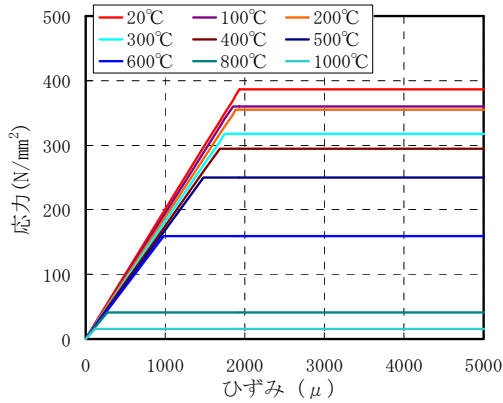


図-6 鉄筋の応力ひずみ関係 (SD345)
Fig.6 Stress-strain relationship of rebar (SD345)

$${}_s \epsilon_{total} = {}_s \epsilon_c + {}_s \epsilon_{th} \quad (4)$$

ここで、 ${}_s \epsilon_{total}$ は鉄筋の全ひずみ、 ${}_s \epsilon_c$ は鉄筋の応力ひずみ、 ${}_s \epsilon_{th}$ は鉄筋の熱膨張ひずみを表す。

a) 応力ひずみ

鉄筋の応力ひずみ関係は図-6 に示すバイリニア型のモデルとし、降伏強度は文献 12) 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。

b) 熱膨張ひずみ

鉄筋の熱膨張ひずみについては、熱膨張係数を Eurocode2⁸⁾ に従い、 $13 \mu / ^\circ C$ で一定とした。

3. RSF 実大試験体を用いた荷重加熱実験のシミュレーション解析

3.1 解析対象の実験概要

本章では、鋼繊維補強鉄筋コンクリート (RSF) を用いた実大試験体の荷重加熱実験を対象としたシミュレーション解析を行い、解析手法の妥当性について検討を行った。

実験は RSF を用いたシールドセグメントの火災に対する構造安定性を把握するために行われたものである。試験体の寸法は図-7 の実験概要に示すように幅 2,000mm、長さ 4,480mm、厚さ 350mm である。主鉄筋として加熱面側は芯かぶり 90mm、裏面側は芯かぶり 85mm で D16 が 12 本ずつ埋設されている。試験日前日 (材齢 27 日) におけるコンクリートの圧縮強度は $62.7N/mm^2$ 、ヤング係数は $33.5kN/mm^2$ 、含水率は 4.75wt% であった。

実験では加熱前に、長期荷重 (土圧、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

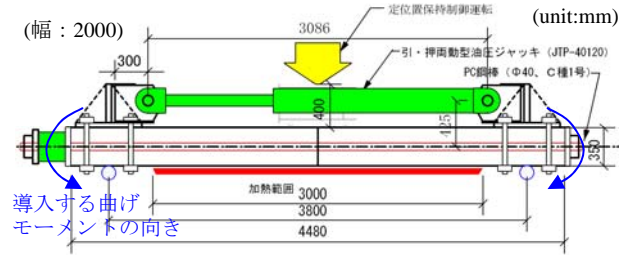


図-7 実験概要

Fig.7 Experimental outline

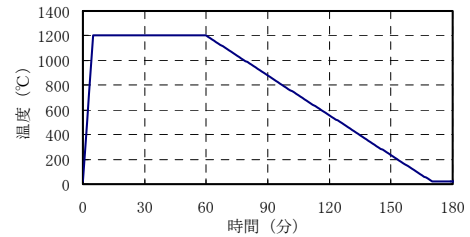


図-8 RABT 曲線

Fig.8 RABT curve

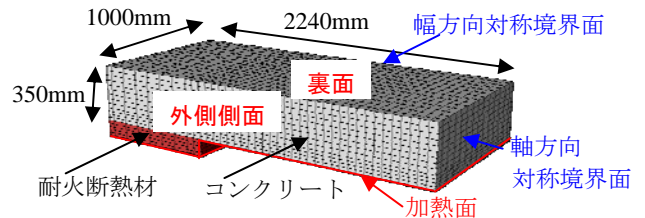


図-9 熱伝導解析モデル

Fig.9 Heat transfer analysis model

裏面側への変形が生じないように鉛直変位を拘束した。支点は、片側ピン支持、他方をローラー支持とし、熱が伝わらないように、支点と加熱炉の間には断熱材を設けた。

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図-8 に示す RABT 曲線¹⁾ に従って行った。加熱範囲は試験体幅方向全体 (2,000mm)、軸方向は中央部 3,000mm である。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。その後、加熱開始から 12 時間後まで試験体を静置した。

3.2 熱伝導解析

熱伝導解析に用いた解析モデルは図-9 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 モデルとして、コンクリートおよび耐火断熱材をモデル化した。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。

図-10 に試験体内部温度の経時変化を実験結果と併せて示す。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。

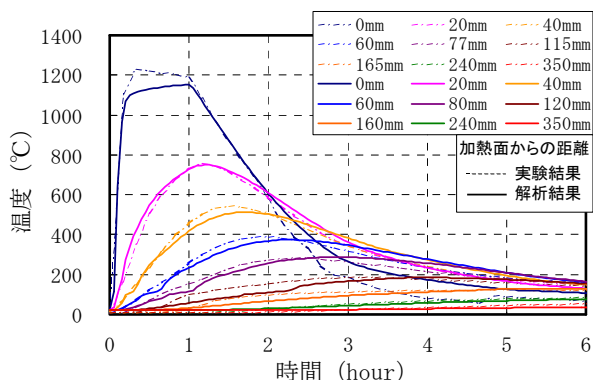


図-10 コンクリート内部温度の経時変化
Fig.10 Time histories of temperature in concrete

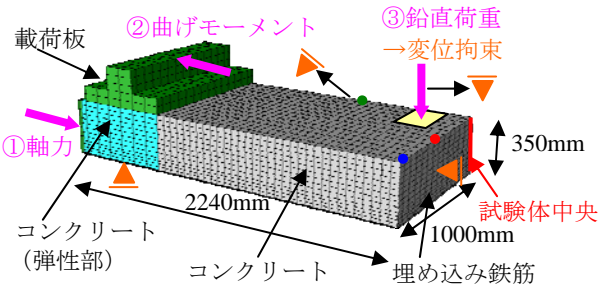


図-11 熱応力解析モデル
Fig.11 Thermal stress analysis model

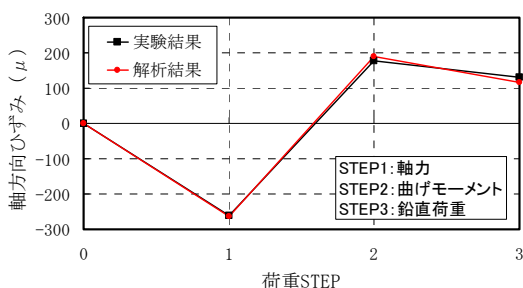


図-12 初期外力導入時のコンクリートひずみ変化
Fig.12 Concrete strain variation when applied initial external force

3.3 熱応力解析

熱応力解析に用いた解析モデルも図-11に示すように熱伝導解析と同様の1/4モデルとして、コンクリート、鉄筋および載荷板をモデル化した。なお、曲げモーメント導入時に載荷板とコンクリートが界面で離れないようにするため、載荷板直下のコンクリート要素については弾性とした。また、本解析では鋼繊維の効果については考慮していない。

3.3.1 初期外力の導入

実験同様に初期外力として軸力、曲げモーメント、鉛直力の順に荷重を導入した。外力導入時の裏面(図-11中の赤丸位置)における軸方向のコンクリートひずみの変化を実験結果と併せて図-12に示す。実験同様のひずみが生じていることから、簡易な載荷板要素を用いてモデル化を行ったが、所定の外力が導入できていることが確認された。

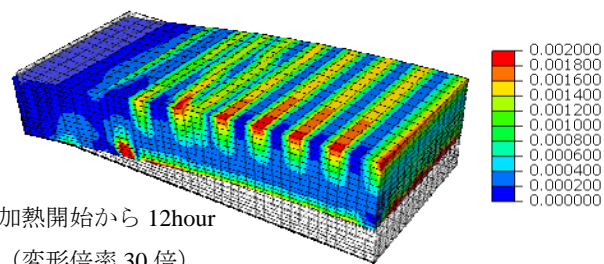


図-13 最大主ひずみ分布および変形図
Fig.13 Max principal strain distribution and deformation diagram



写真-1 試験体裏面のひび割れ状況
Photo. 1 Crack on back side of specimen

3.3.2 加熱に伴う変形挙動

図-13に加熱開始から12時間後の最大主ひずみ分布を変形挙動と併せて示す。また、写真-1に実験における加熱開始から12時間後の試験体裏面の様子を示す。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試験体中央部が裏面側に反り上がり、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。このような挙動については、後述する応力分布およびひずみの経時変化と併せて考察する。

試験体裏面(図-11中の青丸位置)における鉛直変位および裏面中央部における鉛直方向反力の経時変化を図-14および図-15に示す。加熱開始直後は加熱側コンクリートが温度上昇に伴って膨張することに起因して、中央部の反力は低下する(①)。その後、裏面側に反り上がる挙動に転じるが、この時の反力を解析では過大評価している(②)。実験では加熱開始から2~3時間の段階で鉛直変位が戻り、反力が大きく増加している(③)ことから、中央部の鉛直方向変位が正しく制御できていなかった可能性が考えられ、解析結果と異なる挙動を呈した要因の1つとして挙げられる。

除荷時の挙動については、中央部の鉛直方向の拘束を解放した時点で鉛直変位が大きく増加し、外力を除荷した時点で鉛直変位が戻る挙動を再現できているが、加熱面側に大きくたわむ結果となった。これは、本解

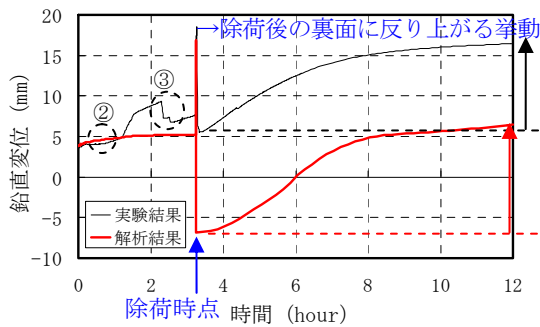


図-14 鉛直変位の経時変化
Fig.14 Time histories of vertical displacement

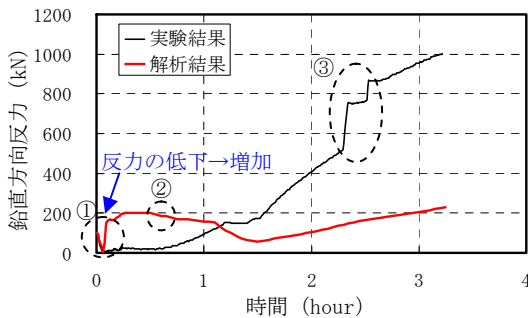


図-15 鉛直方向反力の経時変化
Fig.15 Time histories of vertical reactive force

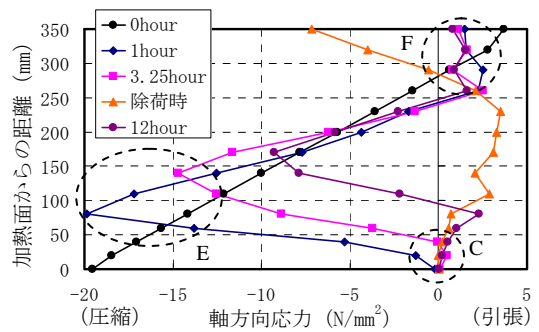


図-16 断面内の応力分布
Fig.16 Stress distribution in cross-section surface

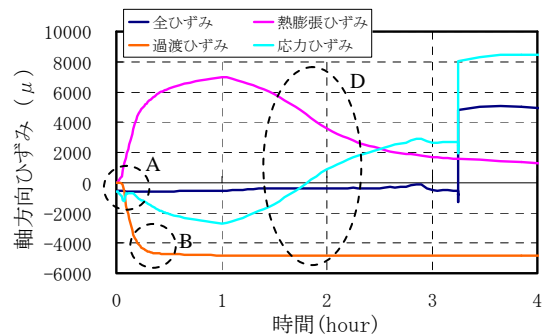


図-17 加熱面における各ひずみ成分の経時変化
Fig.17 Time histories of strain in heat surface

析では引張側の除荷時にひび割れが閉じる時のすべり挙動等を考慮していないことや、使用した過渡ひずみのデータが本実験に用いたコンクリートよりも小さかった可能性があることが一因として考えられる。なお、除荷後の加熱開始から 3.25~12 時間における裏面に反り上がる変位増分については実験結果とほぼ一致しており、拘束がない条件下の挙動については概ね評価できている。

3.3.3 各ひずみ成分の経時変化と断面内の応力分布

加熱区間内で、試験体軸方向：中央から 750mm、幅方向：試験体中央（図-11中の緑丸位置）の断面内における軸方向の応力分布の解析結果を図-16に示す。また、同位置の加熱面における、軸方向の各ひずみ成分（全ひずみ、応力ひずみ、熱膨張ひずみ、過渡ひずみ）の経時変化を図-17に示す。

加熱開始直後は温度上昇に伴って、加熱面付近で熱膨張ひずみが生じ、試験体の拘束状態による影響で圧縮応力が増加する。その後、温度上昇に伴う強度低下によって圧縮応力は減少する（A）。この圧縮応力下で温度上昇する加熱開始から約 0.5 時間以内に、加熱面付近で過渡ひずみが生じて残留することになる（B）。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（C）。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（D）。一方、図-10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（E）。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（F）。この引張応力によって裏面側にひび割れが生じる。

3.3.4 シミュレーション解析のまとめ

本解析では、加熱に伴うコンクリートの温度変化および外力の変化に伴う変形挙動を評価することができている。従って、本解析手法を用いることで、火災加熱を受けるコンクリート構造物の温度変化および変形挙動について、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。

4. 火災時におけるトンネル全体系の変形挙動解析

4.1 解析概要

本解析手法を用いて、図-18に示すような外径 12 m、覆工厚さ 700mm のトンネルを想定して、トンネル内で火災が生じた時の覆工の変形挙動について検討を

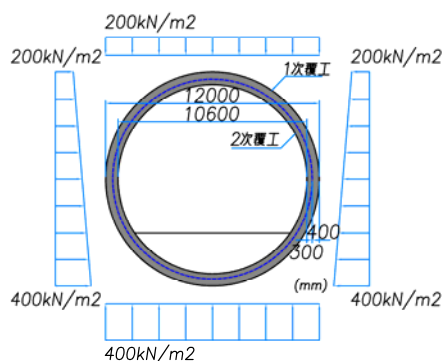


図-18 想定したトンネル概要および外力条件
Fig.18 Assumed tunnel outline and external force condition

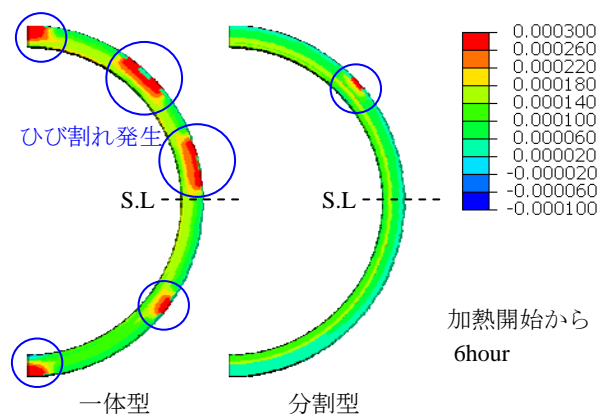


図-19 円周方向ひずみ分布
Fig.19 Circumferential direction strain distribution

行った。

ここでは構造形式の違いが解析結果に及ぼす影響を比較するため、覆工を1次覆工(厚さ400mm)と2次覆工(厚さ300mm)に分割したケースを想定した解析も行った。以下では、分割していないケースを一体型、分割したケースを分割型とする。

解析モデルは対称性を考慮して1/2モデルとした。奥行きは厚さ100mmとして、内側外側ともに芯かぶり60mmの位置にD19の鉄筋を1本ずつ配置した。

熱的境界条件は、内空側の雰囲気温度として図-8に示すRABT加熱を与えた。地山側の雰囲気温度は20℃とした。

コンクリートの圧縮強度は、一体型は54N/mm²、分割型は1次覆工が54N/mm²、2次覆工は現場打ちを想定して24N/mm²と設定した。1次覆工と2次覆工の界面には厚さ2mmの層状要素を設けた。分割型では、この層のヤング係数を≒0とし、圧縮に変位した時のみ作用するバネを設けることにより、界面のすべり挙動をモデル化した。また、構造体は周辺地盤を模擬した地盤バネによって支持され、地盤反力は地盤バネが圧縮に変位した時のみ作用するものとした。地盤反力係数はk=50,000kN/m³を設定した。

長期荷重として土水圧を想定して図-18に示す外力およびコンクリートの自重を導入した。なお、外力は一体型では覆工全体に、分割型では1次覆工のみに作用させた。なお、水平方向の外力と対称面における水平方向の反力の差は約0.1%であり、外力を地盤バネが受け持つ影響については無視できるものと考えられる。

4.2 解析結果

各ケースの加熱開始から6時間後の時点における円周方向のひずみ分布を図-19に、スプリングライン(S.L)での断面内の円周方向応力分布を図-20に示す。長期荷重載荷時の応力分布は、一体型では全断面圧

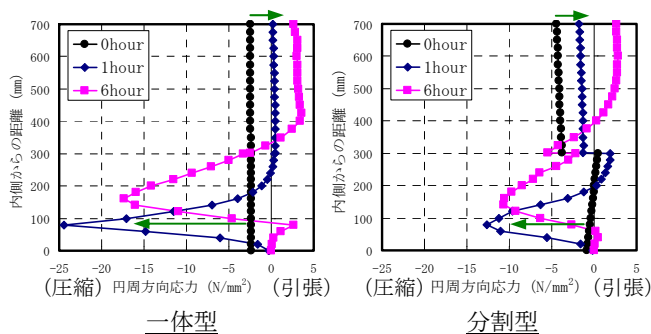


図-20 S.L断面内の応力分布
Fig.20 Stress distribution in S.L cross-section surface

縮状態であるが、分割型では1次覆工部分のみで圧縮を受けることになる。

加熱開始から1時間後では、3章の解析結果と同様に熱膨張ひずみが過渡ひずみよりも卓越するため、加熱面付近では応力状態が圧縮側へ移行し、断面内の釣り合いを保つため外側では引張側へ移行する。分割型では2次覆工部分に圧縮応力がほとんど作用していないことから、加熱面から200~300mm付近で引張応力が生じることになる。しかし、この領域でひび割れの発生には至らず、温度の上昇に伴って応力状態は圧縮側へ移行する。加熱開始から6時間後では、外側の引張応力が增加する。このような応力分布は円周方向にほぼ一様であり、図-19中に示すようなひび割れが生じる。外側に生じる引張応力の程度は長期荷重時の分布形状に依存しており、1次覆工部分により大きな圧縮応力を受けていた分割型の方が、ひび割れが生じにくい結果となった。

以上の結果から、トンネル構造物が内部で火災加熱を受ける時、内部で温度上昇に伴って劣化するとともに、覆工の外側にもひび割れが生じる可能性が考えられる。また、トンネル構造物の耐火解析を行う際に、本解析手法を用いることで構造形式の違いに起因する

変形挙動の差を評価可能なことが示された。よって、本解析手法は今後、複雑な構造形式の構造物にも適用可能な手法となる発展性を有しているものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、3次元有限要素法を用いて高温加熱を受けるコンクリートの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。得られた知見を以下に示す。

- (1)コンクリートおよび鉄筋の温度上昇に伴う強度低下、熱膨張ひずみおよび過渡ひずみの発生までモデル化した耐火解析を行った。本解析手法を用いて、実大試験体を用いた載荷加熱実験を対象としてシミュレーション解析を行うことで、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、本解析手法の妥当性を示した。
- (2)熱膨張ひずみおよび過渡ひずみの影響により、断面内の応力分布が変化することで、加熱面に対して裏面側に引張応力が生じ、ひび割れを誘発することがシミュレーション解析より示された。
- (3)トンネル構造物を対象とした耐火解析を行い、3次元ソリッド要素を用いた本解析手法を用いることで、構造形式の違いに起因する挙動の差を評価可能なことを示した。従って、本解析手法の有用性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, p.25, p.55, 2004
- 2) 野口貴文ほか：コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能研究委員会，コンクリート工学年次論文集，Vol.32, No1, pp.45-52, 2010
- 3) 市原三馨，水野敬三，道越真太郎，丸屋剛：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集，Vol.30, No3, pp.73-78, 2008
- 4) 中島浩亮，中村光，国枝稔，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, No1, pp.937-942, 2009
- 5) 田嶋仁志，岸田政彦，神田亨，森田武：火災高温時におけるシールドトンネルRC覆工断面の変形挙動解析，土木学会論文集E，Vol.62, No.3, pp.606-618, 2006
- 6) 道越真太郎，小林裕：高強度コンクリートの高温時における力学的性質，日本建築学会大会学術講演梗概集A-2, pp.79-80, 2004
- 7) 道越真太郎，小林裕，黒岩秀介：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，pp.169-174, 2007
- 8) Eurocode2: Design of concrete structures Part1,2 General rules-Structural fire design, BS EN 1992-1-2, 2004.
- 9) 安部武雄，古村福次郎，戸祭邦之，黒羽健嗣，小久保勲：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，pp.163-168, 1999
- 10) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.42-43, 2007
- 11) 常世田昌寿，山下平祐：拘束力を伴って700℃まで加熱されるコンクリートの熱間および冷間圧縮試験，日本建築学会大会学術梗概集A-2, pp.5-6, 2006
- 12) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp.160-162, 2009