

# 論文 火災加熱を受けるコンクリート構造物の3次元熱伝導・熱応力解析

河村 圭亮\*1・福浦 尚之\*2・服部 佳文\*3

**要旨:** 本研究では、コンクリート構造物を対象として、3次元有限要素法による熱伝導解析および熱応力解析の一方向連成解析を実施した。始めに、コンクリート一体型鋼製セグメントの耐火実験を対象とした解析を行い、複合構造物に対しても内部の温度変化および全体の変形挙動を概ね評価できることを示した。また、加熱に伴う材料強度の低下によって構造物の剛性や耐力が低下する挙動についても評価可能なことを示した。さらに、トンネル構造物を対象とした耐火解析を行い、火災加熱による3次元的な変形挙動について、定性的ではあるが、その性状を明らかにした。

**キーワード:** 火災, 熱伝導解析, 熱応力解析, セグメント, トンネル

## 1. はじめに

火災加熱を受けるコンクリート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。そこで、著者らはこれまでに3次元有限要素法を用いた耐火解析手法を構築してきた<sup>1)</sup>。しかし、除荷時の挙動評価については十分な精度が確認できていない。そこで、除荷経路を考慮した鉄筋の履歴モデルを取り入れることで、解析手法の高精度化を図った。

シールドトンネルでは、鋼殻とコンクリートが一体となった複合構造のセグメントが採用されている事例<sup>2)</sup>がある。そのため、複雑な構造形式を有する構造物に対しても適用可能な耐火解析手法が求められる。そこで、本解析手法を用いて、コンクリート一体型鋼製セグメント(以下、HB(ハイブリッド)セグメント)の耐火実験を対象としたシミュレーション解析を行い、複合構造物を対象とした耐火解析への適用性について検討した。さらに、加熱後の試験体を用いた載荷試験を対象とした解析を行い、温度上昇に伴って材料強度が低下するモデルの有用性について検討を行った。

耐火解析手法の実構造物への適用事例として、トンネル全体系の解析は、既往の研究で実施された例<sup>1),3)</sup>がある。しかし、いずれもトンネル軸方向への影響については検討されていない。そこで、本研究では火災加熱によって生じるトンネル構造物の変形が軸方向に及ぼす影響も考慮し

た3次元的な変形挙動について解析的に検討した。

## 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向連成解析を行った。コンクリートの比熱、熱伝導率、応力ひずみ(応力に対応して生じるひずみ)、熱膨張ひずみ、過渡ひずみおよび鉄筋の熱膨張ひずみについては既報<sup>1)</sup>と同様のモデルを用いた。鉄筋の応力ひずみのモデルについては解析手法の高精度化を図るため、除荷経路を考慮したモデル化を行った。解析には汎用非線形有限要素プログラムABAQUSを使用し、コンクリートの応力ひずみ、過渡ひずみおよび鉄筋の応力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、コンクリートおよび鋼材の比熱と熱伝導率の温度依存性<sup>1),4)</sup>を考慮し、図-1に示すモデルを用いた。また、水の蒸発潜熱を127.4J/kgとして、100~120°Cの範囲で蒸発が生じるものとした。

### 2.2 熱応力解析

熱応力解析に用いたコンクリート、鉄筋および鋼材の力学特性を以下に示す。

#### (1) コンクリートの力学特性<sup>1)</sup>

コンクリートの全ひずみを式(1)とし、力学特性として応力ひずみ、熱膨張ひずみおよび過渡ひずみを考慮した。

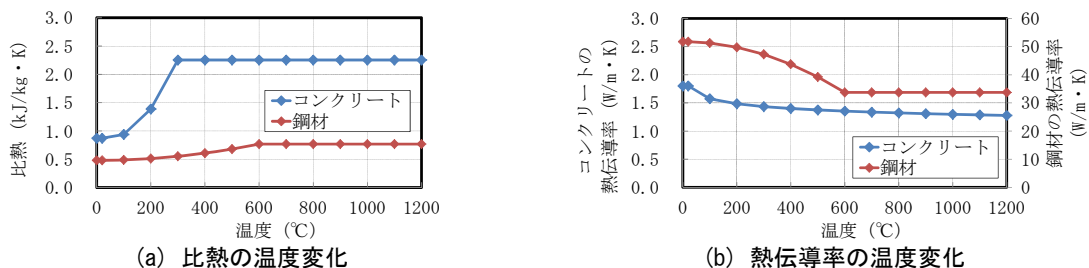


図-1 比熱および熱伝導率の温度変化

\*1 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室 修士(工) (正会員)

\*2 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室次長 博士(工) (正会員)

\*3 大成建設(株) 土木本部土木設計部陸上第二設計室室長

$${}_c \varepsilon_{total} = {}_c \varepsilon_c + {}_c \varepsilon_{th} + {}_c \varepsilon_{tr} \quad (1)$$

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

### a) 応力ひずみ

コンクリートの応力ひずみについては、温度上昇に伴う材料強度の低下を考慮してモデル化を行った。

圧縮域については、Eurocode2 に従い係数  $n=3$  とした Popovics 式を用いて、図-2 に示すような圧縮応力ひずみ関係のモデル化を行った。これより、ピーク点までの挙動が比較的実験結果と合っていることが分かる。軟化域の実験結果との整合性までは考慮していないが、温度上昇による軟化勾配の低下が定性的に表現できている。除荷経路は実際には除荷剛性が変化するが、すべての温度について、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。引張域については、引張強度以降の軟化域に引張破壊エネルギーを考慮した 1/4 モデルを用いて応力ひずみ関係のモデル化を行った。

### b) 熱膨張ひずみおよび過渡ひずみ

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、図-3 に示すようにモデル化を行った。

## (2) 鉄筋および鋼材の力学特性

鉄筋および鋼材の全ひずみを式(2)とし、力学特性として、応力ひずみおよび熱膨張ひずみを考慮した。

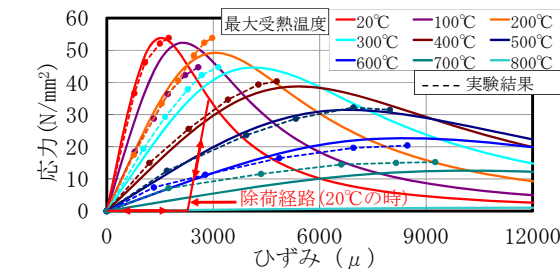


図-2 コンクリートの圧縮応力ひずみ関係

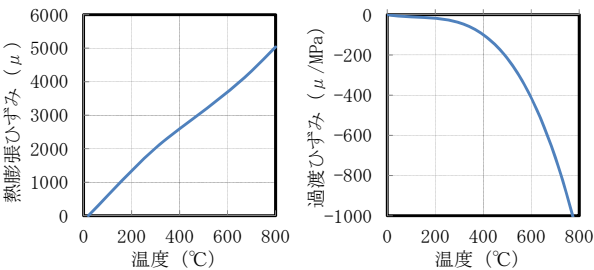


図-3 熱膨張ひずみおよび過渡ひずみの温度変化

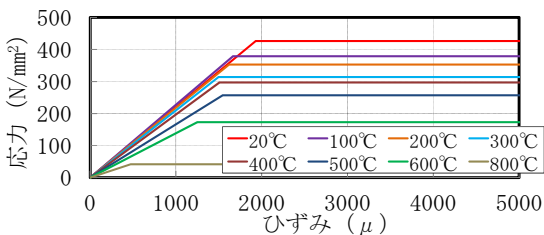


図-4 鋼材の応力ひずみ関係 (SM490)

$${}_s \varepsilon_{total} = {}_s \varepsilon_c + {}_s \varepsilon_{th} \quad (2)$$

ここで、 ${}_s \varepsilon_{total}$  は鉄筋および鋼材の全ひずみ、 ${}_s \varepsilon_c$  は鉄筋および鋼材の応力ひずみ、 ${}_s \varepsilon_{th}$  は鉄筋および鋼材の熱膨張ひずみを表す。

### a) 鉄筋の応力ひずみ

鉄筋の応力ひずみについては次節にて述べる。

### b) 鋼材の応力ひずみ

鋼材の応力ひずみ関係は図-4 に示すバイリニア型とし、ヤング係数および降伏強度の温度依存性については文献5)のデータを引用した。なお、本論文の解析では鋼材が降伏しないため、除荷経路はモデル化していない。

### c) 鉄筋および鋼材の熱膨張ひずみ<sup>1)</sup>

鉄筋および鋼材の熱膨張ひずみについては、熱膨張係数を  $13 \mu / ^\circ C$  で一定とした。

なお、いずれの材料についても過去の最大受熱温度での応力ひずみ関係を用いることとした。

## 2.4 除荷経路を考慮した鉄筋の応力ひずみ関係

### (1) 応力ひずみ関係のモデル化

既報<sup>1)</sup>にて実施した 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では、除荷時における試験体の鉛直変位量を過大評価する結果となった。解析モデルの概要を図-5 に、図中青丸位置における鉛直変位の経時変化を Case-1 として図-6 に示す。解析に用いた鉄筋の応力ひずみ関係は、ヤング係数および降伏強度の温度依存性を考慮したバイリニア型のモデルで、除荷経路は荷重経路と同様としていた。このモデルを用いた熱応力解析結果では、加熱面側で軸方向に配置された鉄筋が圧縮域において降伏強度に達していた。これは、外力作用下で温度上昇により加熱面付近の材料強度が低下する

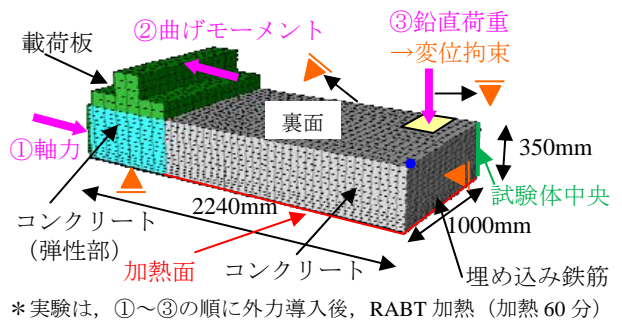


図-5 解析モデル概要

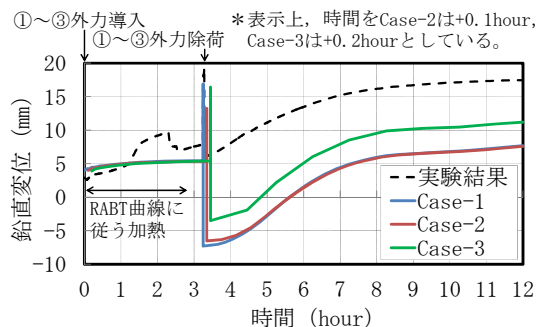


図-6 鉛直変位の経時変化

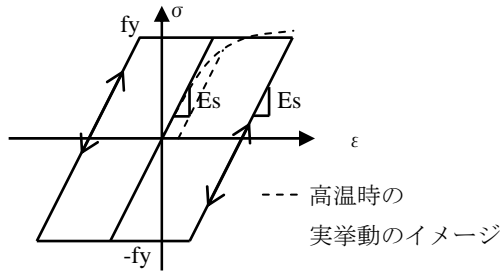


図-7 除荷経路を考慮した鉄筋の応力ひずみ関係

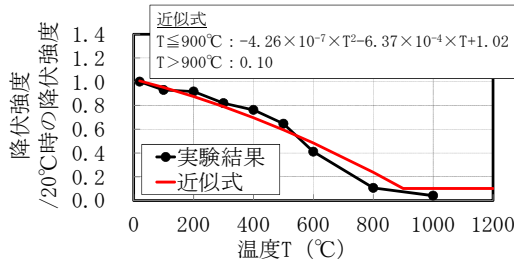


図-8 降伏強度の温度依存性

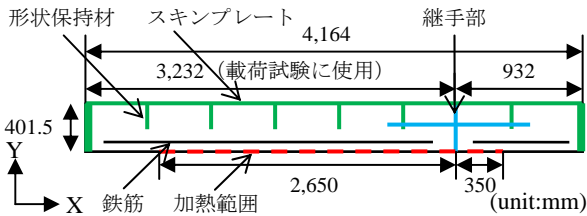


図-9 加熱実験に用いた試験体の概要

と、中立軸が裏面側へ移動し、偏心モーメントが生じることや、厚さ方向や異種材料間で熱膨張ひずみ量に差が生じることによって圧縮応力が増加したためである。なお、コンクリートは圧縮軟化域には入っていない。

そこで、圧縮降伏した状態で、外力の低下や温度低下に伴う熱膨張ひずみの減少により除荷が生じた際の残留ひずみを考慮した鉄筋の除荷経路のモデルが、全体挙動に及ぼす影響について明らかにするため、本論文では鉄筋の応力ひずみ関係を図-7に示すように、初期剛性で線形除荷するものとした。なお、降伏強度は、図-8に示す既往の実験結果<sup>5)</sup>に基づいた近似式により定めた。

## (2) モデル化した応力ひずみ関係を用いた解析

除荷経路を考慮した履歴モデルを用いて行った同様の解析を Case-2 とし、鉛直変位の経時変化を図-6に併せて示す。本ケースでの除荷時の鉛直変位量は Case-1 とほぼ同様の結果となった。

本解析ではバイリニア型のモデルとして簡易にモデル化を行っているが、高温時には図-7中に破線で示すように明瞭な降伏点が見られなくなる<sup>5)</sup>ことが明らかになっている。本モデルの降伏強度は0.2%残留ひずみに対応するものであり、実際にはモデル化した降伏点に達する以前でも残留ひずみが生じているものと考えられ、本解析では残留ひずみを過小評価している可能性がある。

そこで、鉄筋が大きく塑性化した場合の全体挙動の変化について確認するため、除荷経路を考慮したモデルで、降伏強度を80%に低減させて同様の解析を行った。これ

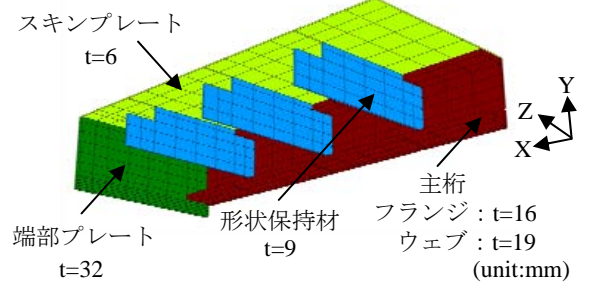
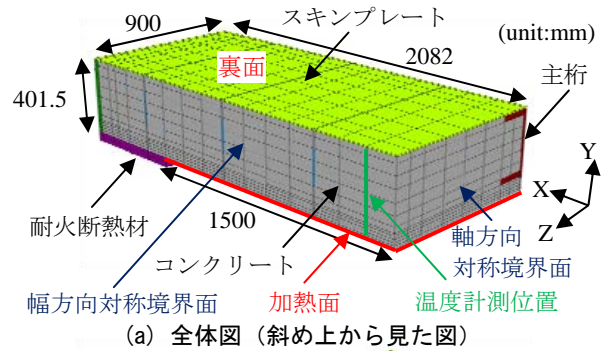


図-10 熱伝導解析モデル

を Case-3 として、解析結果を図-6に併せて示す。圧縮降伏後のひずみが大きくなると除荷後の圧縮ひずみが大きくなるため、Case-1と比較すると鉛直変位量は小さくなっている。よって、この残留ひずみの大きさが実験結果との差が生じた要因の1つとして考えられる。

以降(3章、4章)の解析では、すべて除荷経路を考慮した鉄筋の応力ひずみ関係のモデルを用いている。

## 3. コンクリート一体型鋼製セグメント(HBセグメント)を用いた耐火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、堀口らにより行われたHBセグメントを用いた耐火実験<sup>2)</sup>を対象としたシミュレーション解析を行い、解析手法の複合構造物への適用性について検討した。

実験はHBセグメントの火災時における耐火性および加熱後の残存耐力を把握するために行われたものである。加熱実験時の試験体は図-9に示すように継手部を有しており、寸法は幅1,800mm、長さ4,164mm、厚さ401.5mmである。加熱面側にはひび割れ抑止用の鉄筋としてかぶり40mmで軸方向にD13が10本、配力鉄筋としてD10が202mmピッチで配置されている。加熱実験時におけるコンクリートの圧縮強度は71.8N/mm<sup>2</sup>、鋼材の降伏強度は426N/mm<sup>2</sup>であった。

加熱は、RABT曲線(加熱60分)<sup>6)</sup>に従って行われた。加熱範囲は試験体幅方向全体(1,800mm)、軸方向は中央部3,000mmである。

加熱試験実施から15日経過後、図-9に示す長い方のピース(長さ3,232mm)を用いて曲げ載荷試験を行っている。載荷は4点曲げで行っており、等曲げ区間600mm、せん断スパン1,200mmである。なお、実験では載荷装置

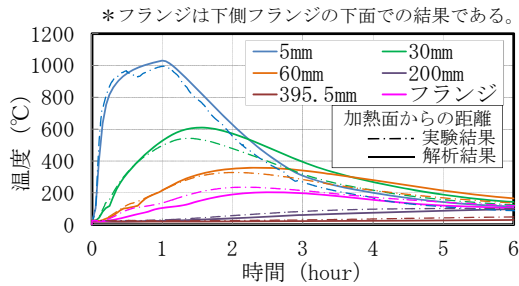


図-11 内部温度の経時変化

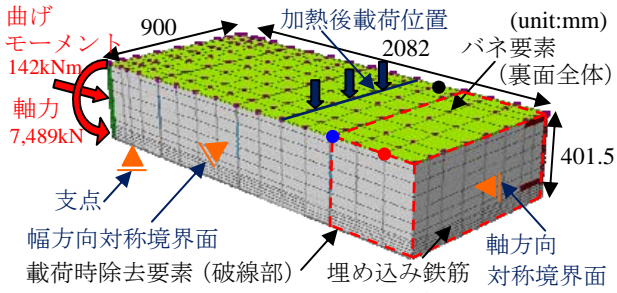


図-12 熱応力解析モデル

の安全性から、完全に破壊する前に実験を終了している。

### 3.2 熱伝導解析

熱伝導解析に用いた解析モデルは図-10 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、鋼材および耐火断熱材をモデル化した。外気と接する面の雰囲気温度は 20℃で一定とし、対称境界面については断熱とした。

図-10(a)中に緑線で示す位置(鋼材は同じ断面内の下側フランジ)での、コンクリートおよび鋼材の試験体内部における温度の経時変化を実験結果と併せて図-11 に示す。コンクリートおよび鋼材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。

### 3.3 熱応力解析

熱応力解析に用いた解析モデルも図-12 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、鋼材および鉄筋をモデル化した。実験に用いた試験体は図-9 に示すように片側に継手部が設けられているため、左右非対称の構造となっている。しかし、試験体中央で軸方向に対称位置で計測された鉛直変位に差が見られなかったことから、継手部が全体の变形挙動に及ぼす影響は小さいと考え、1/4 モデルとした。実験では裏面側に地盤バネ(地盤反力係数:  $k=50,000\text{kN/m}^3$ )を想定した H 型鋼材を設置しているが、解析では圧縮に変位した時のみ作用するバネ要素を配置することでモデル化を行った。

解析では実験同様に初期外力として軸力および曲げモーメントを導入した後、熱応力解析を実施した。加熱時の試験体裏面中央付近(図-12 中の赤丸位置)における鉛直変位の経時変化を実験結果と併せて図-13 に示す。加熱すると試験体は加熱面側にたわみ(①)、加熱終了前からたわみが元に戻る変形に移行する(②)挙動を再現することができている。ただし、最大の鉛直変位量や変形が元に戻り始める時間は若干異なっている。

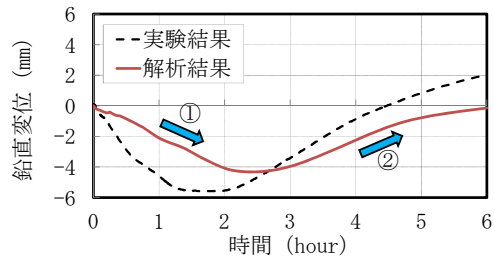


図-13 鉛直変位の経時変化

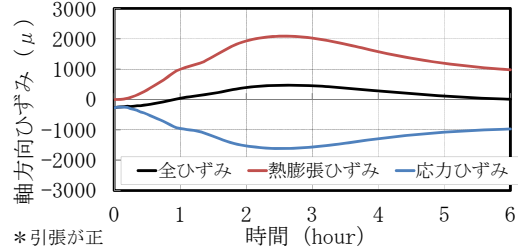


図-14 フランジにおける各ひずみ成分の経時変化

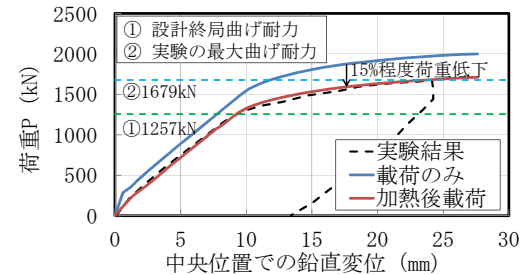


図-15 荷重-変位関係

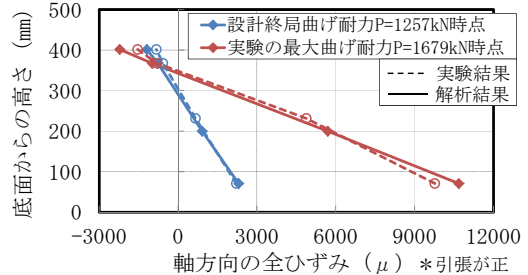


図-16 鋼材の軸方向ひずみ分布

下側のフランジの温度計測位置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)の経時変化を図-14 に示す。これより、鋼材の挙動は熱膨張ひずみの影響を大きく受けて、温度上昇に伴って膨張し、温度が低下するとともに元に戻る挙動となっている。一方、鋼材がない RC の場合、試験体は 2 章の解析結果(図-6)のように加熱に伴って裏面側へ反り上がる挙動となる。本試験体では、RC 部分よりも鋼材の挙動の影響の方が大きく、構造全体が図-13 に示すような変形挙動を呈している。

### 3.4 加熱後における荷重試験の解析

実験は加熱試験実施から 15 日経過後に行っているが、加熱開始から 6 時間の熱伝導・熱応力解析を実施後、荷重解析を行った。この時点では変位やひずみの変化が小さいことや、これ以降温度が低下しても材料強度は変化しないことより、時間は実験と異なるが、解析結果に及ぼす影響は小さいと考えた。解析モデルは、実験と同様の条件とするため、熱応力解析後に軸力を除荷し、図-

12 中に破線で示す要素および地盤バネ要素を除去することで、荷重試験時の試験体に対して 1/4 モデルとした。

荷重と試験体中央位置 (図-12 中の青丸位置) における鉛直変位の関係を図-15 に赤線で示す。なお、図中には加熱を行わず、荷重のみを行った場合の解析結果を青線で示す。加熱後に荷重を行った解析結果は実験結果と良く一致している。荷重のみの解析結果と比較すると、初期剛性が低下し、部材が降伏した後は、変位が同じ時点での荷重が 15% 程度低下していることが分かる。また、図中に破線で示す①設計終局曲げ耐力 ( $P=1,257\text{kN}$ ) および②実験の最大曲げ耐力 ( $P=1,679\text{kN}$ ) 時点における、図-12 中の黒丸位置での主桁の高さ方向のひずみ分布を実験結果と併せて図-16 に示す。図よりひずみ分布についても実験結果と良く一致していることが分かる。

### 3.5 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および鋼材の温度変化を再現でき、変形挙動を定性的に捉えることができています。よって、本解析手法を用いることで、複合構造物に対しても火災加熱を受ける時の温度変化や変形挙動について、概ね妥当な結果が得られることが示されたものと考えられる。

また、温度上昇に伴い、構造物の剛性や耐力が低下する現象を捉えることができています。従って、温度上昇によって材料強度が低下するモデルを用いた本解析手法の有用性が示されたものと考えられる。

## 4. 火災加熱を受けるトンネル構造物の 3 次元的な変形挙動に関する解析的検討

### 4.1 解析概要

著者らは既報<sup>1)</sup>にてトンネル全体系を対象とした耐火解析を行い、内側から火災加熱を受ける際に、外側で円周方向の引張りひずみが卓越する変形が生じることを示している。本章では、このような火災加熱に伴う変形挙動がトンネル構造物の軸方向へ及ぼす影響も考慮した 3 次元的な変形挙動について、解析的に検討を行った。

本解析では図-17 に示す外径 12m、覆工厚さ 400mm のトンネルを想定して解析を行った。軸方向 (奥行き方向) の長さは、外径  $D$  に対して  $1D$  となる 12m でモデル化した。

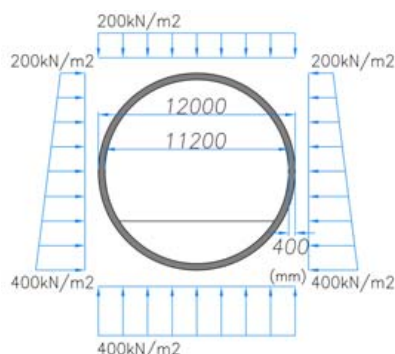


図-17 想定したトンネル概要および外力条件

解析モデルは軸方向および水平方向の対称性を考慮して 1/4 モデルとした。なお、軸方向の端部は拘束した。円周方向には内側外側ともに芯かぶり 90mm の位置に D19 の鉄筋を 200mm ピッチで配置した。また、配力筋として軸方向に D16 の鉄筋を 200mm ピッチで配置した。

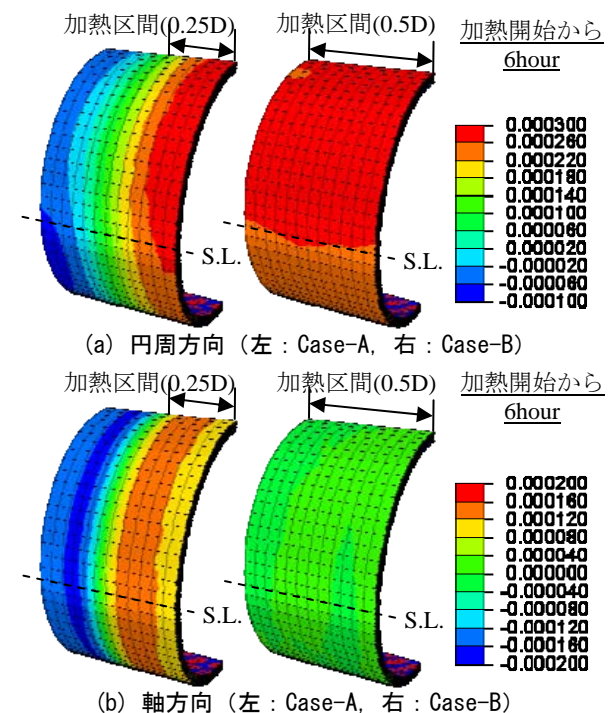
熱的境界条件は、内空側の雰囲気温度として RABT 曲線 (加熱 60 分)<sup>9)</sup> に従う加熱を与えた。加熱範囲は、円周方向には全体として、軸方向には中央の 6m 区間を加熱区間として解析を行った (Case-A とする)。加熱区間外については内空側の雰囲気温度を  $20^\circ\text{C}$  で一定とした。加熱温度条件については、厳密には、CFD 等の熱流体解析<sup>9)</sup> によって温度分布および履歴を算定すると、より正確な条件となる。しかし、本検討では基本的な変形挙動について把握することを目的としているため、熱的境界条件については簡易に設定した。また、比較ケースとして軸方向全体 (12m) を加熱区間とした場合についても同様に解析を行った (Case-B とする)。地山側の雰囲気温度はいずれのケースも  $20^\circ\text{C}$  で一定とした。

コンクリートの圧縮強度は  $54\text{N/mm}^2$  とした。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るものとした。地盤バネは圧縮に変位した時のみ作用するものとし、地盤反力係数は  $k=50,000\text{kN/m}^3$  とした。

長期荷重として、土水圧を想定して図-17 に示す外力およびコンクリートの自重を導入した後、熱応力解析を実施し、加熱開始から 6 時間後で計算を終了している。

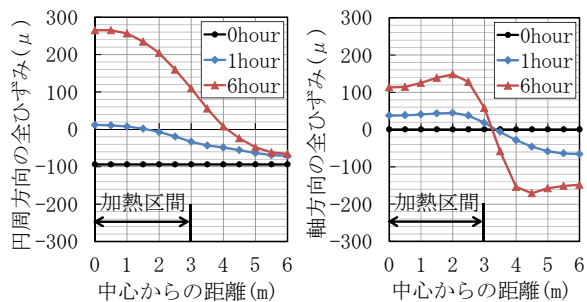
### 4.2 解析結果

各ケースの加熱開始から 6 時間後における円周方向および軸方向のひずみ分布を図-18 に示す。また、Case-A のス



\*いずれも図中右側が軸方向対称境界面、引張が正

図-18 全ひずみ分布のコンター図



左：円周方向，右：軸方向 \*引張が正  
図-19 S.L. 最外縁のひずみ分布 (Case-A)

プリングライン（以下，S.L.）の最外縁におけるひずみ分布の変化を図-19に示す。

円周方向のひずみ分布を見ると，Case-Bは奥行き1要素でモデル化した既報<sup>1)</sup>の解析結果と同様に外側で引張ひずみが約300 $\mu$ となる結果が得られている。Case-Aは，加熱区間中央部では外側で引張ひずみが約300 $\mu$ となっており，Case-Bと同様の結果が得られた。加熱に伴うひずみ増分は中心から離れるほど小さくなる分布を示している。なお，本解析条件では温度差が非常に大きくなる加熱区間内外の境界付近でもひずみが急変することはない。よって，厳密に算定した温度分布を与えた場合には，よりなだらかな分布になることが考えられる。

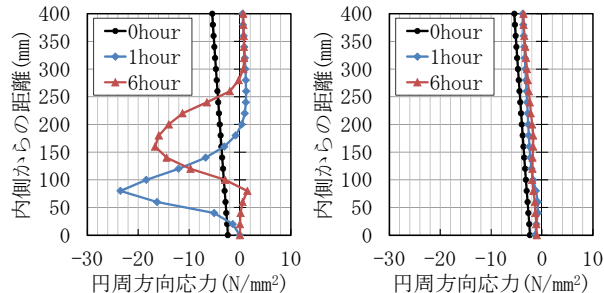
Case-Aの，加熱区間内および区間外のS.L.位置における断面内の円周方向応力分布の変化を図-20に示す。加熱区間内では，コンクリート内部の温度が上昇する位置で，熱膨張ひずみの影響により圧縮応力が増加し，断面内の釣り合いを保つため外側では応力が引張側へ移行する分布となる。一方，加熱区間外では，温度変化が小さく，長期荷重載荷時の応力分布からほとんど変化しない。

軸方向のひずみ分布を見ると，Case-Bは全体でほとんどひずみが生じていない。一方，Case-Aは，加熱区間では熱膨張ひずみの影響により外側で約150 $\mu$ の引張ひずみが生じ，それに伴って加熱区間外で約150 $\mu$ の圧縮ひずみが生じている。断面内では内側（加熱面）に近づくほど値は小さくなるが，同様に加熱区間では引張，加熱区間外では圧縮ひずみが生じる分布となっている。

以上より，トンネル構造物が火災加熱を受ける時，円周方向のひずみは加熱区間内外で同様の傾向を示し，加熱区間から離れるほどひずみ量は小さくなった。一方，軸方向のひずみは加熱区間では引張ひずみ，加熱区間外では圧縮ひずみが生じる挙動となった。また，本解析結果より，加熱区間内でのひずみ変化によって，加熱区間外では大きなひずみの変化が生じることはないことが示された。

## 5. まとめ

本研究では，コンクリート構造物を対象として，3次元有限要素法による熱伝導解析および熱応力解析の一方



左：加熱区間内（中心から1.5m）  
右：加熱区間外（中心から4.5m） \*引張が正  
図-20 S.L. 断面内の円周方向応力分布 (Case-A)

向連成解析を実施した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 除荷経路を考慮した鉄筋の応力ひずみ関係のモデル化を行った。RSF実大試験体を用いた耐火実験を対象とした解析では，実験結果との差が大きく改善されなかったが，残留ひずみの大きさが全体の変形挙動に及ぼす影響が大きいことが考えられる。
- (2) HBセグメントを用いた耐火実験を対象としたシミュレーション解析より，本解析手法を用いて，複合構造物に対しても内部の温度変化を再現でき，変形挙動を定性的に捉えられることが示された。
- (3) HBセグメントの加熱後の試験体を用いた載荷試験を対象とした解析より，温度上昇に伴う材料強度の低下によって，構造物の耐力が低下する現象を捉えられることが示された。
- (4) 火災加熱を受けるトンネル構造物の3次元変形挙動について解析的に検討し，円周方向のひずみは加熱区間内外でひずみ量は異なるが同様の傾向を示し，軸方向のひずみは加熱区間内外で異なる傾向を示すことを明らかにした。

## 参考文献

- 1) 河村圭亮，福浦尚之，鈴木三馨，服部佳文：火災加熱を受けるコンクリートの変形挙動に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.1187-1192，2011。
- 2) 堀口賢一ほか：大口径用コンクリート一体型鋼製セグメントの開発，大成建設技術センター報，第43号，pp.37-1-7，2010。
- 3) 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。
- 4) 日本建築センター：建築物の総合防火設計法 第4巻 耐火設計法，p.124，1989。
- 5) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，pp.123-130,pp.158-162，2009。
- 6) 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，p.25，pp.95-112，2004。