

論文 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

市原 三馨^{*1}・水野 敬三^{*2}・道越 真太郎^{*2}・丸屋 剛^{*3}

要旨：耐火セグメント継手部の火災時における挙動を把握することを目的として、継手部荷重加熱実験と残存耐力把握実験、熱伝導および熱応力解析の一方方向連成解析を行った。実験では、長期荷重下における継手部試験体の耐火性能を確認し、残存耐力把握試験により継手部の残存耐力を把握した。解析は、コンクリートと鉄筋の応力ひずみ、熱膨張ひずみ、コンクリートの過渡ひずみを考慮した熱応力解析を行った。解析と実験の比較検討により、解析は実験結果を精度良く表すことができることを確認し、解析手法の妥当性を検証した。

キーワード：耐火セグメント, 荷重加熱実験, 温度応力解析, 継手部, 過渡ひずみ

1. はじめに

シールドトンネルの二次覆工の省略化に伴い、セグメント自体に耐火性が要求されており、これまでに有機繊維を混入することで耐火性を持たせたセグメントが開発されている^{1),2)}。しかし、セグメント継手部では加熱による挙動が判明されておらず、変形性や爆裂に対する検証が必要である。そこで、耐火セグメント継手部の火災時の挙動を適正に評価するために耐火試験を行い、残存耐力の把握と変形を測定するとともに、熱伝導および熱応力解析の一方方向連成解析を実施し、解析と実験の比較検討を行い、解析手法の妥当性を検証した。

2. 耐火セグメント継手部の耐火実験

2.1 実験の概要

実験的検討では、耐火セグメント継手部を想定した試験体に対して、長期荷重下（土圧、水圧を想定）における荷重加熱を行い、部材内部温度、変形性状およびコンクリートの爆裂性状を確認した。また、加熱後の試験体の残存耐力を確認するため、残存耐力把握実験を行った。

2.2 試験体の製作

試験体に用いたコンクリートの使用材料および配合を表-1 および表-2 に示す。鉄筋はSD345を、継手金物はSM490Aを使用した。コンクリートの材料試験結果は、試験日（材齢187日）で、圧縮強度85.6N/mm²、ヤング係数43.1kN/mm²、含水率4.65%であった。

試験体は、幅1,200mm、長さ2,000mm、厚さ400mmのセグメント2個をシール材を介し、ボルトレス式継手金物により接合した実大の平板模型である。試験体は縦に設置し、加熱は継手部を中心に上下に1,000mmずつを露出させて行い、他の部分は耐火断熱材で被覆した。試験体の上端部には球座、下端部には回転支承を設置し、上部部に20MN荷重装置（以下、鉛直荷重装置）を、試験体背面継手部に1,000kNジャッキ（以下、水平ジャッキ）を設置した。実験の概要を図-1 に示す。試験体の配筋および温度と変位の測定位置を図-2 に示す。

表-1 コンクリートの使用材料

材料名	種類
セメントC	普通ポルトランドセメント
混和材S1	高炉スラグ微粉末 (ブレン値=4350cm ² /g, 密度=2.89g/cm ³)
細骨材S	神栖産山砂 (表乾密度=2.60g/cm ³ , 吸水率=0.86%)
粗骨材G	岩瀬産硬質砂岩 (表乾密度=2.65g/cm ³ , 吸水率=0.85%)
混和剤SP	高性能減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系)
有機繊維	ポリプロピレン (Φ18μm×10mm)

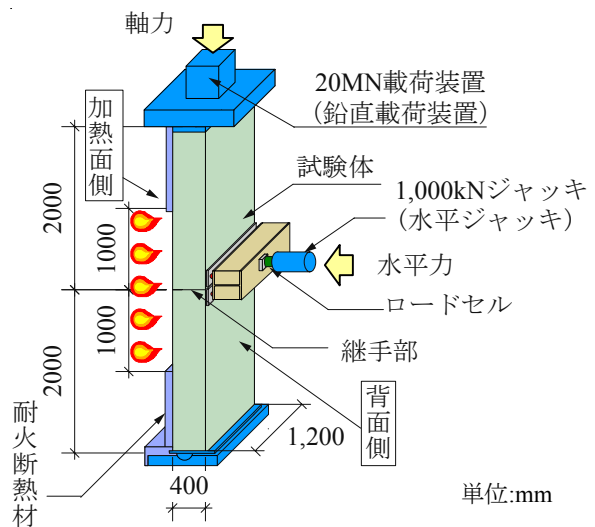


図-1 実験の概要

*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土木構造チーム 工修（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター建築技術研究所防災研究室火災チーム 工修

*3 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土木材工チーム 工博（正会員）

表-2 コンクリートの配合

設計基準強度 (N/mm ²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水結合材比 W/(C+S1) (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)						
						水 W	セメント C	混和材 S1	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP	有機繊維
60	20	3.0	31.0	1.0	38	150	242	242	670	1114	3.87	2.0

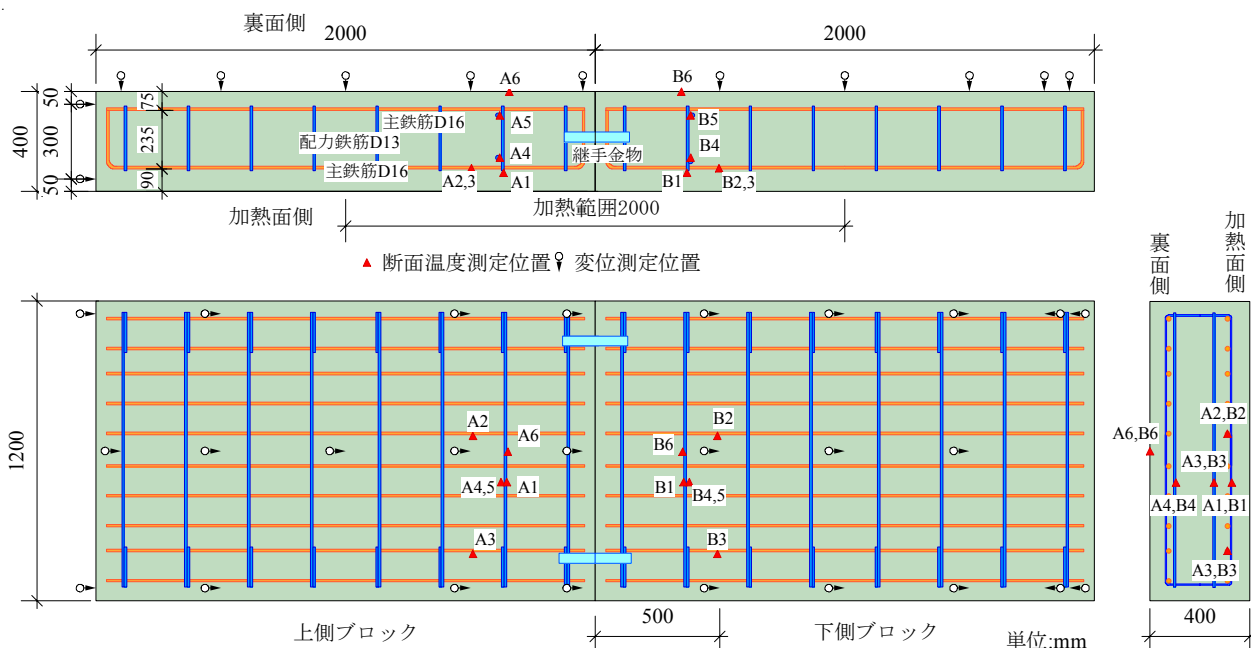


図-2 試験体の配筋および温度と変位の測定位置

2.3 実験の方法

(1) 荷重加熱実験方法

実験の荷重荷重は、長期荷重を想定し、継手面に断面力（軸力 4,800kN、曲げモーメント 290.25kN・m）を加えた後、加熱を開始した（図-3）。軸力は加熱面側に 80mm 偏心した位置で与え、加熱中は 4,800kN 一定に保持した。水平力に関しては、加熱前に 100kN の水平力を継手部に与えた後、加熱を開始した。加熱中の水平力は、継手部が水平変位しないように変形制御した。変形制御した理由は、シールドトンネル内で火災が発生しても、地盤によってセグメントの面外変形が拘束されるためである³⁾。加熱中の継手部に作用した水平力の時間変化を記録することで、同部の火災時におけるモーメント推移が得られる。火災時に想定される時間温度曲線には、図-4 に示す RABT 曲線を採用した。

(2) 残存耐力把握実験方法

残存耐力把握実験は、加熱開始 173 分後に行った。鉛直荷重を一定に保持した状態で水平ジャッキによる試験体背面の水平荷重を除荷することで、試験体が破壊するまで負曲げモーメントを漸増させた。

2.4 実験結果と考察

(1) 荷重加熱実験結果

試験体内部温度の経時変化を図-5 に示す。主鉄筋の最高温度は上側ブロック（A2）で加熱開始 159 分後に 229℃、下側ブロック（B2）で加熱開始 156 分後に 248℃

であった。また、加熱中にコンクリートの爆裂は確認されなかった。

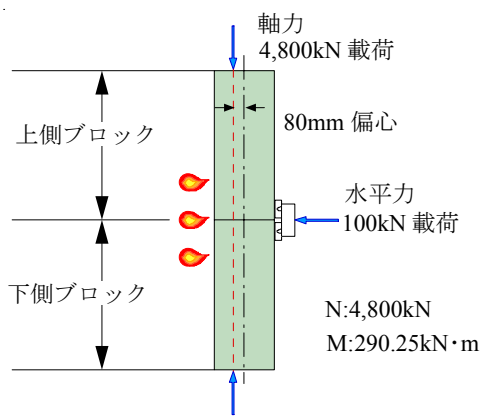


図-3 導入断面力

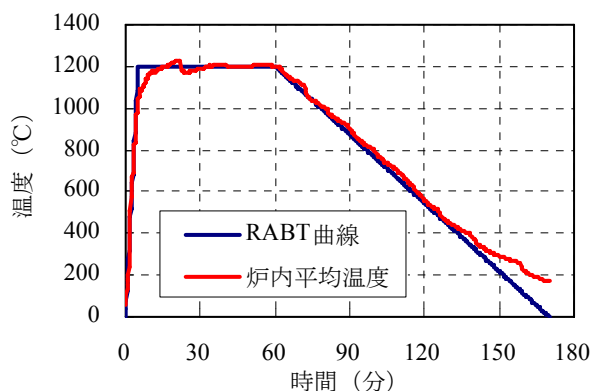


図-4 時間温度曲線

水平ジャッキによる試験体背面反力・曲げモーメントと時間の関係を図-6 に示す。試験体は、RABT 曲線による加熱を受けても、長期荷重を想定した荷重を支持することができた。継手部の水平変位拘束に要した水平ジャッキ荷重(背面反力)は、载荷加熱により 100kN から、加熱開始 15 分後では 70kN と最小になり、加熱開始 170 分では最大時 313kN に漸増した。

加熱 5 分から 26 分の間に背面反力が減少した理由は、加熱側コンクリートが温度上昇により膨張したため、加熱面側に正のたわみが生じたためと考えられる。

加熱 26 分以降に背面の反力が増加した理由は、温度上昇により加熱側コンクリートのヤング係数と圧縮強度が低下し、これにより荷重を負担する領域が背面側に移動したため、セグメントに生じる負の曲げモーメントが減少し、背面の反力も大きくなったものと推定できる。

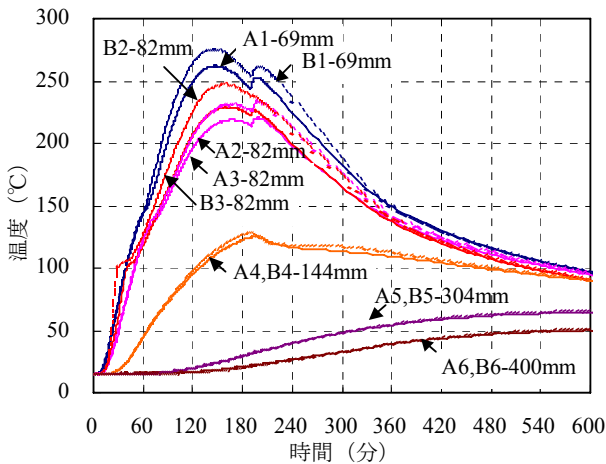


図-5 内部温度の経時変化

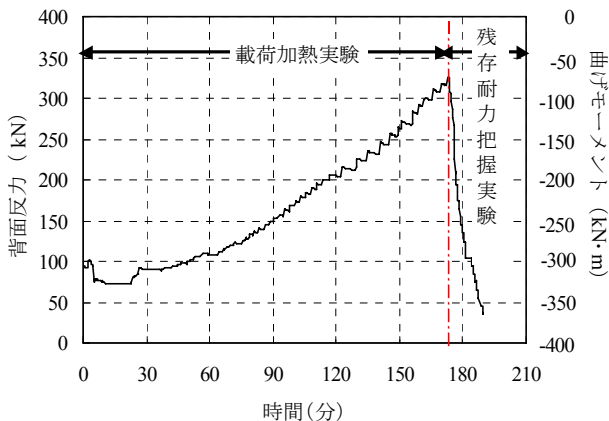


図-6 試験体背面反力・曲げモーメントと時間の関係

(2) 残存耐力把握実験結果

所定の鉛直荷重を保持したまま水平ジャッキによる試験体背面の水平荷重を除荷すると、39kN の時点で加熱側のコンクリートが圧壊により破壊した。このときの試験体継手部の曲げモーメントは-348kN・m であった。破壊後の試験体の加熱面を図-7 に示す。

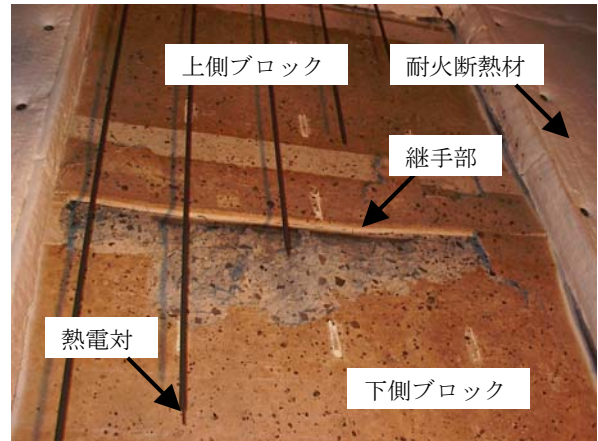


図-7 破壊後の試験体の加熱面

3. 実験結果の解析的検討

解析的検討では、载荷加熱実験を対象とし熱伝導および熱応力解析の一方向連成解析によりシミュレートした。

3.1 熱伝導解析手法

熱伝導解析では、セグメントの幅方向 (1,200mm) における温度分布は一樣であるものと仮定した。熱伝導解析モデルでは、幅は実際の長さの 1/60 とし、形状の対称性を考慮してセグメント 1 個を解析対象として 3 次元でモデル化した。熱伝導解析モデルを図-8 に示す。コンクリート、耐火断熱材を 8 節点ソリッド要素でモデル化し、鉄筋はセグメント内の温度分布に与える影響が小さいことから、熱伝導解析モデルでは無視した。

熱伝導解析には、汎用 FEM プログラム ABAQUS を用いた。コンクリートの熱伝導率および比熱の温度依存性、ならびにコンクリート中に含まれる水分の蒸発潜熱を考慮した。熱伝導率と比熱の温度変化を図-9 に示す⁴⁾。

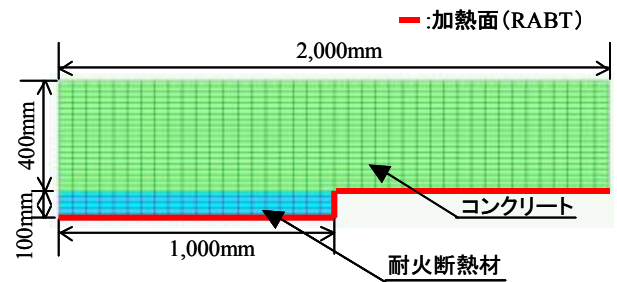


図-8 熱伝導解析モデル

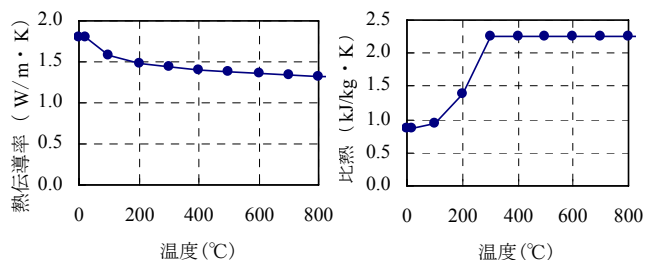


図-9 熱伝導率と比熱の温度変化

3.2 熱伝導解析結果

熱伝導解析の結果を図-10に示す。内部温度は加熱面側から70~80mmでは実験値よりも解析値が50℃程度高いが、加熱面から140mmから400mmの位置では比較的良く一致している。

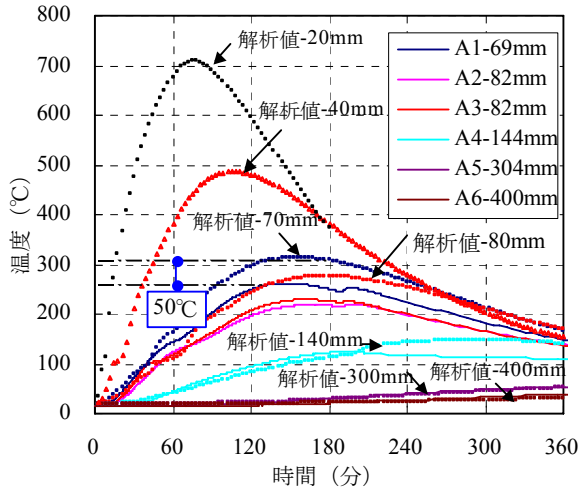


図-10 内部温度の経時変化比較

3.3 熱応力解析手法

熱応力解析では、熱伝導解析と同様に対称性を考慮し、3次元でモデル化した。コンクリートは8節点ソリッド要素、鉄筋は埋め込み要素、継手部は引張テンションカットのバネ要素を用いてモデル化した。解析モデルを図-11に示す。

熱応力解析でも、汎用FEMプログラムABAQUSを用いた。

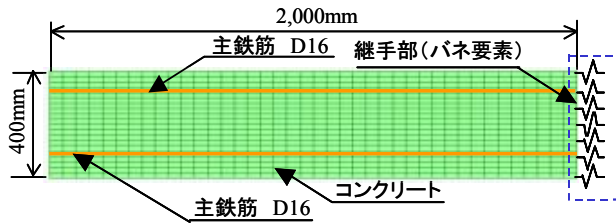


図-11 熱応力モデル

3.4 解析条件

(1) コンクリートの力学物性

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。本解析においては、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を考慮した。

$${}_c \epsilon_{total} = {}_c \epsilon_c + {}_c \epsilon_{th} + {}_c \epsilon_{tr} \quad (1)$$

ここに、 ${}_c \epsilon_{total}$: コンクリートの全ひずみ
 ${}_c \epsilon_c$: コンクリートの応力ひずみ
 ${}_c \epsilon_{th}$: コンクリートの熱膨張ひずみ
 ${}_c \epsilon_{tr}$: コンクリートの過渡ひずみ

a) 応力ひずみ

常温から800℃までは、試験体に用いたコンクリートの高温圧縮試験結果を用い、800℃を越える場合は800℃から1100℃で常温の1/10の圧縮強度とし、1200℃でほぼ零になるように直線的に強度低下させた。ひずみの軟化域については Popovics 式を高温まで拡張させた式(2)を用いた⁵⁾。

$$\sigma(T) = \sigma_b(T) \times \frac{{}_c \epsilon_c(T)}{\epsilon_{c1}(T)} \times \frac{n}{(n-1) + ({}_c \epsilon_c(T) / \epsilon_{c1}(T))^n} \quad (2)$$

ここに、 $\sigma(T)$: T℃におけるコンクリート応力(N/mm²)
 $\sigma_b(T)$: T℃における圧縮強度(N/mm²)
 ${}_c \epsilon_c(T)$: T℃におけるコンクリート応力ひずみ
 $\epsilon_{c1}(T)$: T℃における最大荷重時のひずみ
 n : $(0.057 \times \sigma_b(20)) + 1$

コンクリートの応力(σ)と応力ひずみ(${}_c \epsilon_c$)の関係は図-12に示すものとした。ポアソン比、流れ則については、文献6)のW/B=30%の値を用いた。コンクリートの破壊基準は DRUCKER-PRAGER 基準を用い、材料摩擦角には文献7)を用いた。

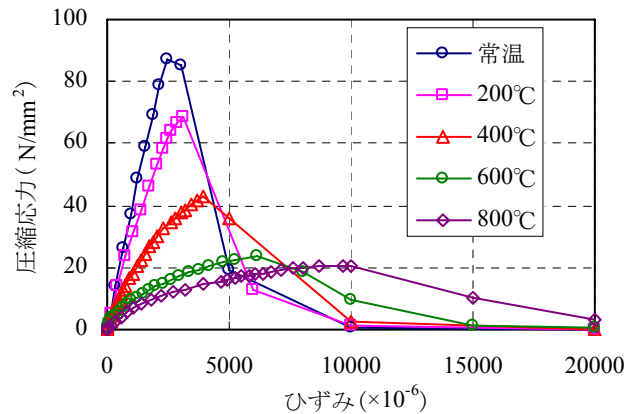


図-12 高温圧縮試験結果

b) 熱膨張ひずみ

熱膨張ひずみは図-13に示す、無載荷状態の昇温試験データを用いた。800℃以上については800℃のデータを使用した。

c) 過渡ひずみ

過渡ひずみは、圧縮応力作用下において昇温時に発生する不可逆的な収縮ひずみで、応力と温度に依存し、全ひずみから応力ひずみと熱膨張ひずみを差し引いた残りのひずみ成分である。試験体に用いたコンクリートの昇温時の材軸方向ひずみと表面温度を図-13に示す。高温圧縮試験結果から過渡ひずみの算出に与える応力ひずみの影響は小さいと考え(図-13)、自由膨張ひずみと各応力下のひずみの差をその応力で除したもので、つまり、単位応力当たりの過渡ひずみを図-14に示す⁴⁾。

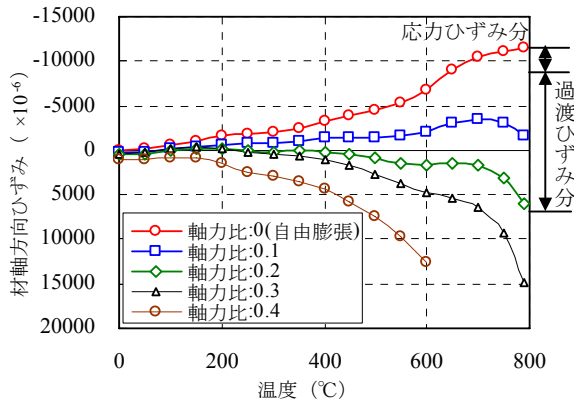


図-13 昇温時の材軸方向ひずみと表面温度

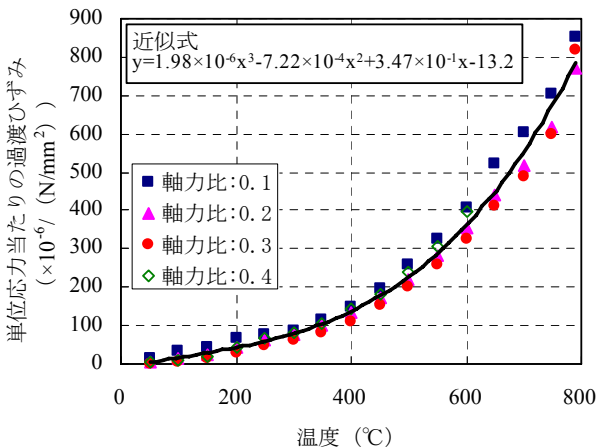


図-14 単位応力当たりの過渡ひずみ

(2) 鉄筋の力学物性

熱応力解析に用いた鉄筋の力学特性を以下に示す。本解析においては、各要素に応力ひずみ、熱膨張ひずみを考慮した。鉄筋の全ひずみを式(3)に示す。

$${}_s \epsilon_{total} = {}_s \epsilon_c + {}_s \epsilon_{th} \quad (3)$$

- ここに、 ${}_s \epsilon_{total}$: 鉄筋の全ひずみ
- ${}_s \epsilon_c$: 鉄筋の応力ひずみ
- ${}_s \epsilon_{th}$: 鉄筋の熱膨張ひずみ

a) 応力ひずみ

SD390 の比例限⁸⁾を SD345 の 0.2% オフセット強度に修正した。鉄筋の応力 (${}_s \sigma_c$) と応力ひずみ (${}_s \epsilon_c$) の関係は図-15 に示すものとした。

b) 熱膨張ひずみ

鉄筋の熱膨張ひずみについては EUROCODE2 のモデルを用いた⁹⁾。

3.5 熱応力解析結果

試験体背面反力と時間の関係を図-16 に、継手部断面の軸方向の応力度分布を図-17 に示す。加熱前と加熱 20 分後の応力度分布より、加熱側コンクリートが温度上昇により膨張し、加熱面の応力が加熱前より増え背面反力が減少していることが再現されている。また、加熱 20

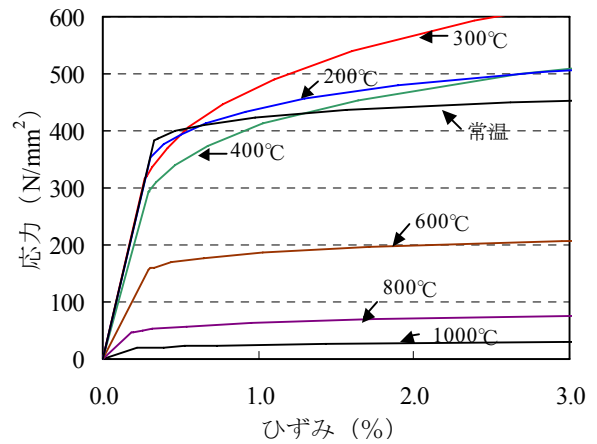


図-15 鉄筋の応力ひずみ関係

分以降の応力度分布より、加熱側コンクリートの剛性や強度が低下し荷重を負担する領域が背面側に移動していることがわかる。

加熱 20~30 分後にかけて、実験結果からも解析結果からも背面反力が急激に増えている(図-16)。これは、加熱面から 60~80mm 付近の内部温度が潜熱のため 100°C で停滞し熱膨張ひずみが小さくなり背面反力が増加したと考えられる(図-5)。

各時間における軸方向ひずみのコンター図を図-18 に示す。加熱前(図-18 a)と加熱 30 分後(図-18 b)のコンター図を比較すると、加熱 30 分後の継手部付近の加熱面側に局所的に 1,000 μ 以上の収縮ひずみが発生し、背面側に押し上げようとする変形となっている。この変形挙動も背面反力が増えた一要因と考えられる。また、図-18 の矢印で示した加熱面側の継手部から 1,000mm の位置に局所的に膨張ひずみが生じている。これは、加熱範囲外のコンクリートの膨張ひずみが小さいため、加熱範囲境界部の加熱されたコンクリート側が膨張したと考えられる。

加熱 60~70 分後に背面反力が実験では一定となり解析では一旦減少している。これは加熱温度が 1,200°C から減少していくことから加熱側コンクリートの熱膨張ひずみが減少することによって考えられる。加熱 58 分後のコンター図(図-18 c)と加熱 72 分後のコンター図(図-18 d)を比較すると、72 分後には加熱側のコンクリートの収縮ひずみが断続的になっていることがわかる。

4. おわりに

耐火セグメント継手部の挙動について、载荷加熱実験と残存耐力実験とを行い、解析的に検討した結果、以下の結論を得た。

1) 耐火セグメント継手部は長期荷重時において、火災が発生しても崩壊しなかった。また、幅 1,200mm、長さ

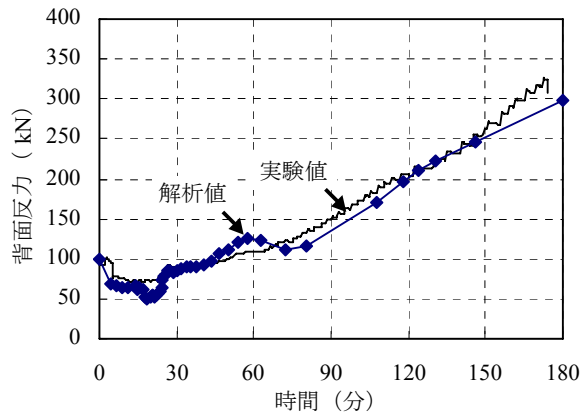


図-16 背面反力と時間の関係比較

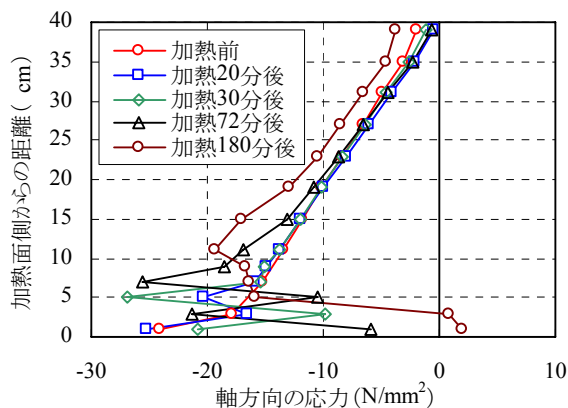


図-17 継手部断面の軸方向の応力度分布

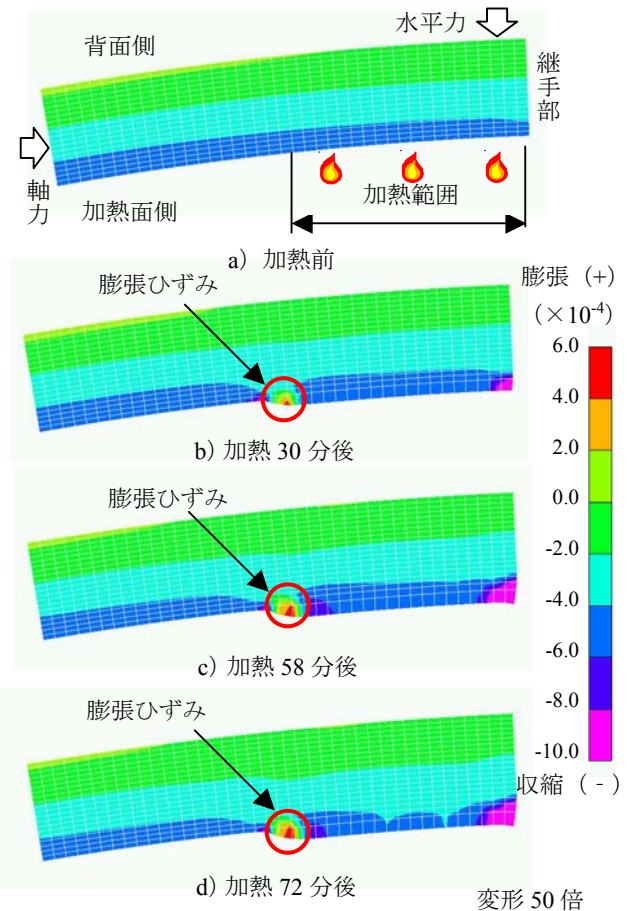


図-18 軸方向ひずみのカウンター図

2,000mm, 厚さ 400mm の RC セグメントで RABT 加熱条件下においては, 加熱後の残存耐力として破壊時の継手部の軸力は 4,800kN, 曲げモーメントは -348kN・m であった。

2) 高温時の温度依存性を考慮したコンクリートと鉄筋の応力ひずみ, 熱膨張ひずみおよびコンクリートの過渡ひずみを考慮した熱応力変形解析を用いて, 耐火セグメント継手部の火災時の挙動を適正に評価できた。

3) 高温時の温度依存性を考慮した解析結果である応力とひずみ分布により, 耐火セグメントの火災時の挙動のメカニズムを推定することができた。

今後は, 土圧, 水圧, 地盤反力等を考慮した覆工リング全体の解析を実施し, 火災時の覆工の安全性をより詳細に検討する予定である。

参考文献

- 1) 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, 2006.9
- 2) 田嶋仁志, 岸田政彦, 神田亨: 火災高温時における RC セグメントの変形挙動に関する部分模型実験, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.844-854, 2006.12

- 3) 足立幸郎, 藤井康男, 青山哲也, 川村彰誉: 耐火型合成セグメントの火災時構造安定性に関する研究, トンネルと地下, Vol.38, No.8, pp.41-49, 2007.8
- 4) 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, 2004.8
- 5) 西垣太郎, 黒羽健嗣, 水野敬三, 黒岩秀介, 道越真太郎, 谷田貝健: 高温時におけるコンクリートの力学特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道), pp.71-72, 1995.8
- 6) 道越真太郎, 小林裕, 黒岩秀介: 横拘束されたコンクリートの高温時における圧縮強度に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 623 号, pp.143-147, 2008.1
- 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, 2007.11
- 8) 日本建築学会: 構造材料の耐火性ガイドブック, pp.119, 2004.11
- 9) Eurocode2: Design of concrete structures Part1,2 General rules-Structural fire design, BS EN 1992-1-2: 2004