

サンドイッチ合成構造部材の耐火実験への有限要素解析の適用

Finite Element Analysis for Fire Test Result to Steel-Concrete Composite Member

中井 章裕*, 清宮 理**, 工藤 健一***, 山本 邦夫****

Akihiro Nakai, Osamu Kiyomiya, Kenichi Kudou, Kunio Yamamoto

*早稲田大学大学院理工学研究科, 建設工学専攻 (〒160-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

**工博, 早稲田大学教授, 社会環境工学科 (〒160-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

***国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所 (〒651-0082 神戸市中央区小野浜町 7-31)

****国土交通省近畿地方整備局神戸港湾空港技術調査事務所 (〒651-0082 神戸市中央区小野浜町 7-31)

Composite members made of steel and concrete are adopted for tunnels. Since steel plates are exposed to the internal side of the road, vehicle fire countermeasures are required. Validity of anti-fire shotcrete concrete method is investigated by the furnace test. For the test results as to concrete cracks, temperatures, strains of the member, finite element method by heat analysis and stress analysis are applied to confirm the design procedure by finite element method.

Key Words: Composite member, F.E.M., fire performance, tunnel, shotcrete concrete

キーワード: サンドイッチ部材, 有限要素法解析, 耐火性能, トンネル, 耐火板

1. はじめに

トンネル火災の事故例が各国より報告・分析¹⁾²⁾されている。特に水底トンネルでは、車両火災による構造部材の損傷が、水や土砂のトンネル内への流入を招くことによって施設全体の機能不全をきたし、人命が危険にさらされる可能性もある。このような観点からトンネル構造部材への耐火対策として、水底トンネルである神戸港島トンネル³⁾、東京港第二航路トンネル、東京港臨海道路沈埋トンネルなど多くの水底トンネルでは耐火材が設置されるに至っている。

水底トンネルの一形式である沈埋トンネルにおいて、図-1に示すような鋼殻と充填コンクリートによるサンドイッチ合成構造が最近広く採用されている。この構造は、格子状の鋼製枠の中に高流動コンクリートなどを充填した合成構造であり、形鋼(L字型のずれ止め)が鋼板に溶接されていることから、鋼殻とコンクリートが一体化しており剛性が高いという特徴を有している。しかしながら、主部材である鋼板がトンネル内空側に露出しているため、車両火災に対する対策が不可欠である。従来から火災による構造物の損傷については、部材の耐火性能の評価や、火災曲線の検討、耐火材の開発、熱解析など総合的な研究が行われており、トンネル構成部材は高温になると強度が大幅に低下することが確認されている。この対策⁴⁾として、耐火板などを鋼板表面に取り付けることによって部材に対する熱の伝達を抑制し、鋼材・コンクリートの温度を許容

温度内に収める設計方法が現在広く用いられている。しかしながら、部材が火災による加熱を受けた場合には温度変化による直接的な影響だけではなく、構造系として力学的な損傷を受けることは明らかであるが、まだこのことに対する議論は少ない。例えば、トンネル火災時には加熱面が限定的なことより、熱分布が不均一となることによって相当量の熱応力が発生する。また、沈埋トンネルにサンドイッチ構造を用いた場合は、水密性の確保のために完全な密閉構造となっている特性上、内部コンクリートが100℃以上になると、コンクリート中の水分の水蒸気化によって内部圧力が発生することが考えられる。

本論文では、現在沈埋トンネルで検討されている耐火設計法の手順を示すとともに、実物大模型を対象にした耐火試験結果に対する有限要素法による熱伝導・熱応力解析方法の適用性について検討する。

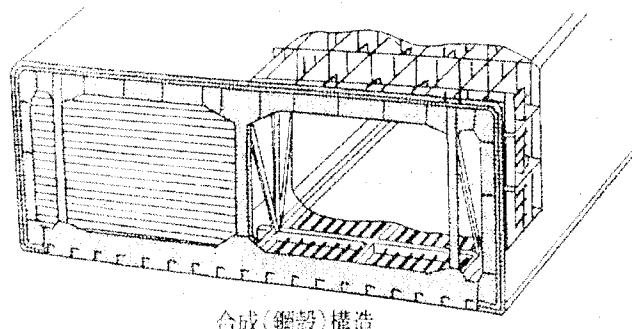


図-1 合成式沈埋トンネルの構造

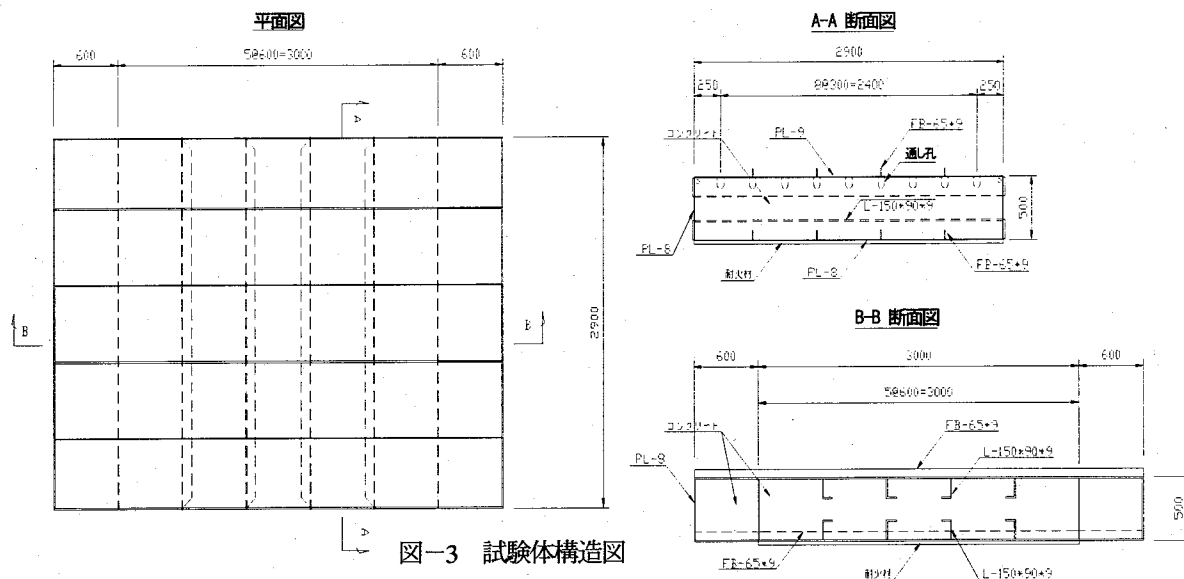


図-3 試験体構造図

2. 耐火設計および試験結果

2.1 耐火設計のフロー

本研究で取り上げる耐火設計のフロー⁹⁾を図-2に示す。トンネルにおける耐火設計の歴史は浅く、国内外においても明確に体系づけられているものは少ないが、近年は基礎的研究の成果もあり、徐々に整備されつつある段階であるといえる。

現状ではフロー図内の①および②、必要に応じて④の手順を用いて、耐火被覆を設計し、構造部材の受熱温度が許容温度を超過しないことを確認する耐火設計法が多く採用されている。耐火設計を行うにあたっては、トンネル構造体の特徴や要求性能に基づき、各課題に対し経済性も考慮した適切な耐火設計を行うことが重要であるが、構造部材の許容温度や耐火性能は材質により決定される部分もあり、詳細については今のところ十分に明らかになっていない。

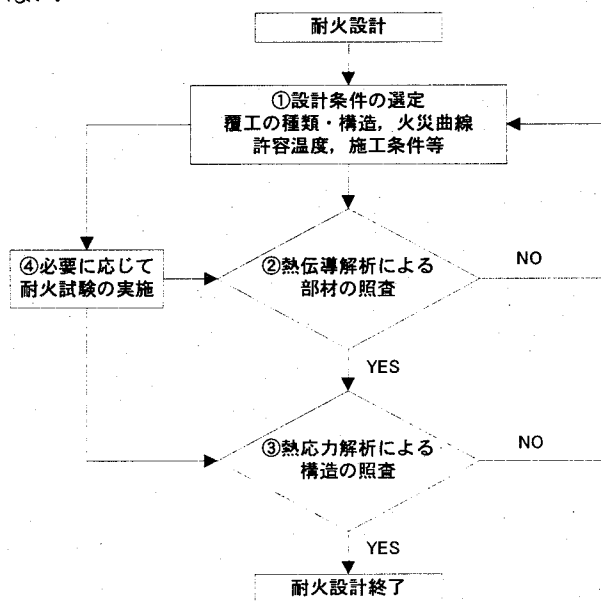


図-2 耐火設計のフロー

2.2 耐火試験方法と設計条件⁹⁾

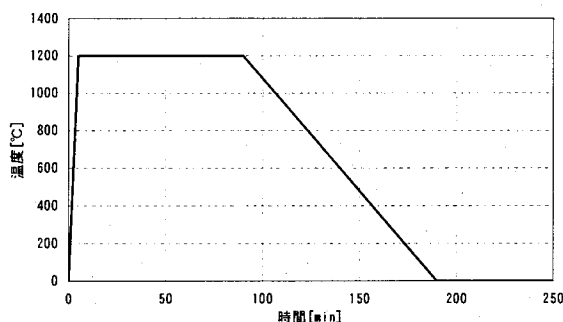
耐火試験における供試体の寸法は図-3に示すように幅4200mm、奥行き2900mm、高さ500mmとし、コンクリートの周囲を鋼板で囲うサンドイッチ構造とした。鋼板と内部コンクリートの一体化のために、150mm×90mmの型鋼を600mm間隔で設置し鋼板と溶接した。本試験は、鋼板によりコンクリートが密閉された状況におけるサンドイッチ構造の局部的な挙動に着目しているため、供試体は無応力状態とし、支持条件は単純支持とした。

供試体の設計温度は表-1に示す条件とする。現状ではコンクリートの許容温度についての明確な指標はないが、例えば、高温時の圧縮強度残存率を常温時の圧縮強度毎に整理した結果⁷⁾によると、300~400℃程度から圧縮強度の残存率が低下することが確認できる。その他既往の研究を参考とし、コンクリートの設計温度を350℃と設定した。一方、高温における鋼材の性質は規格や製造方法によって大きく異なるが、受熱温度400~500℃程度から強度の低下が見られ、一般に受熱温度600℃程度までは冷却後にその材料特性が回復と言われている⁹⁾。本検討に用いた沈埋トンネルのような鋼殻構造では、鋼材は主部材であり、鋼材の性質の変化による常時荷重に対する耐力の低下を避ける為、コンクリートと同様である350℃を設計温度とした。耐火被覆厚については別途計算を行い20mmとした。なお、本試験で用いた吹き付け系耐火材は吹き付けコンクリートと同様の手法で施工することが可能な耐火材であり、施工性が非常に良いという優れた特徴を有する。

表-1 設計条件

種類	使用材料	設計温度	備考
鋼板	SM490Y	350℃	t=9mm
L型鋼, FB材	SS400		t=9mm
コンクリート	高流動		f'ck=30N/mm ²
吹付け系耐火材	セメント, バーキュライト	—	施工厚20mm, メッシュ筋付

加熱温度－時間曲線は図－4に示すRABT90分曲線を使用した。温度測定は、鋼板の表裏面、鋼板裏面から20mm、50mm、90mm、140mm、190mm、290mm位置で行った。鋼板の挙動を確認するため、鋼板表面に3箇所、裏面に3箇所ひずみゲージを設置した。また、加熱中に内部圧力が発生することが想定されたため、供試体中心部付近の鋼板下面に穴をあけて連通管を接続し、水蒸気圧を圧力計によって計測した。



図－4 加熱温度－時間曲線（RABT90分）

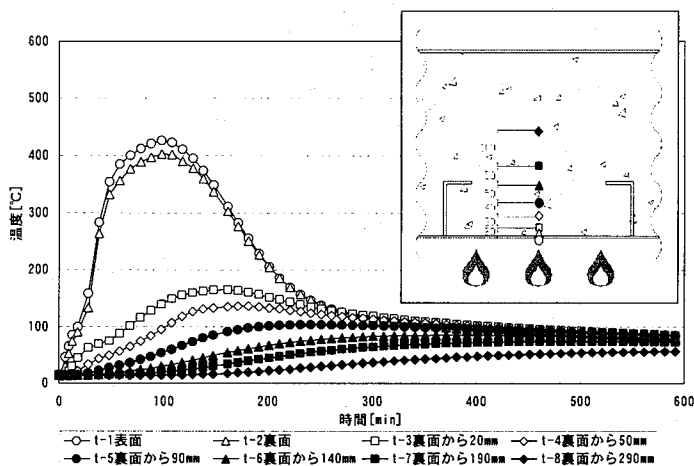
2. 3 試験結果

図－5に供試体の内部温度－時間曲線を示す。鋼板の温度ピークは燃焼開始100分で表面が425℃、裏面が400℃となった。一方、コンクリートの温度ピークは、鋼板裏面から20mm位置において燃焼開始150分で170℃となった。コンクリート内部の温度ピークは、鋼板から離れるほど低くなり、ピーク時刻は遅くなる傾向となった。鋼殻構造に火災温度を与えた場合、加熱が進むと加熱側の鋼板とコンクリートとの間に隙間ができ、この空間が熱の遮断層となって温度分布に影響を与えることが報告されている⁹⁾。本試験でも、この現象は確認され、加熱側鋼板とコンクリート間の温度差はかなり大きくなっている。

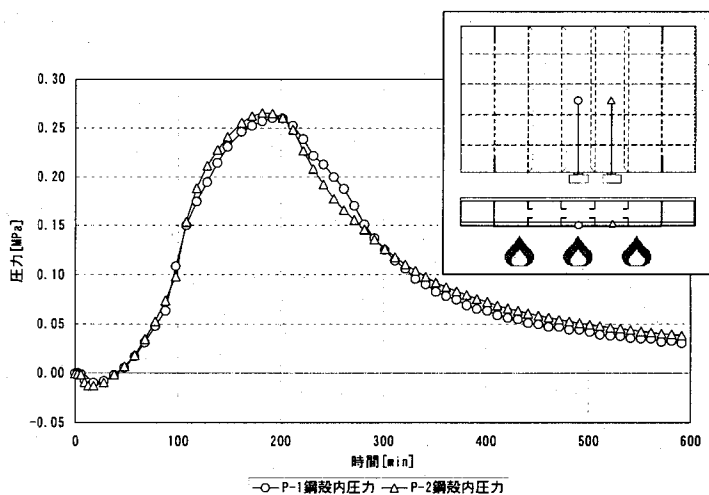
図－6に内部圧力－時間曲線を示す。圧力のピークは燃焼開始190分程度で0.27Mpaとなった。これは100℃以上になるコンクリートの領域が最大となる時刻と概ね一致しており、このことからコンクリート中の水分の水蒸気化によって内部圧力が発生したことが確認できた。

図－7に加熱側鋼板のひずみ－時間関係を示す。鋼板のひずみ履歴はばらつきが多かったが、鋼材温度が上昇する期間では圧縮側になり、鋼材温度が下降する期間では引張側になるような傾向となった。また、加熱側のひずみは引張側に、内面側のひずみは圧縮側にシフトしており、観測された圧力値が大きいほどこの傾向が強くみられたことから、水蒸気圧によって形鋼間の鋼板に正の曲げモーメントが発生していたことが推測できる。なお、発生ひずみは降伏ひずみを超えるレベルのものであり、温度分布が比較的平坦になり、かつ、内部圧力も減少した実験終了時付近でも大きな値のひずみが残留した。

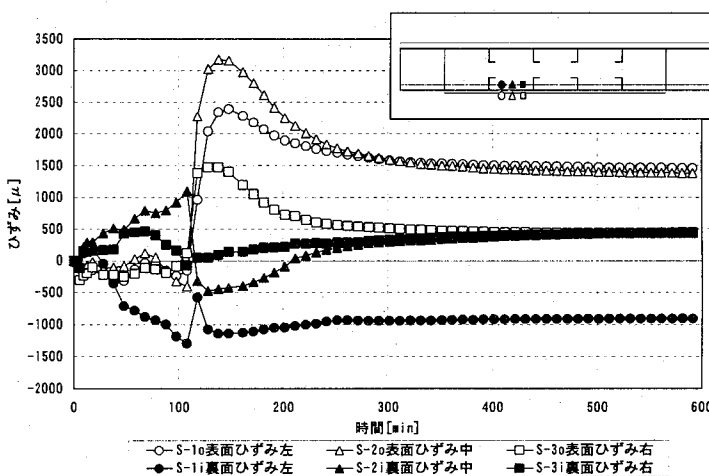
加熱試験後、供試体を切断しコンクリートのひび割れ状況を観察した。図－8に示すのは代表的な断面であるが、



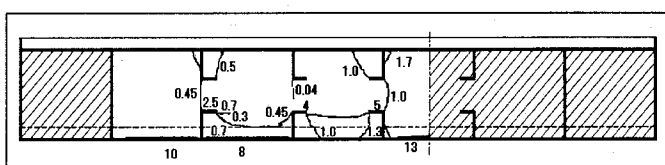
図－5 内部温度－時間曲線



図－6 内部圧力－時間曲線



図－7 加熱側鋼板のひずみ－時間関係



図－8 内部コンクリートのひび割れ状況

①上下形鋼間の鉛直ひび割れ、②加熱側形鋼間の水平ひび割れ、③形鋼先端からの斜めひび割れ、④形鋼背面からの斜めひび割れ、が確認されている。ただし、本試験では事前にコンクリートのひび割れを想定しておらず、コンクリートひずみ計は未設置であった。よって、ひび割れの発生時期や順序に関する情報は得ていない

3. 熱伝導解析

3. 1 熱伝導方程式⁸⁾⁹⁾

一般に2次元の熱伝導方程式はフーリエの法則より求められ、以下のように与えられている。

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

ここで、

$$\alpha = \lambda / (\rho \cdot c) \quad [\text{m}^2/\text{S}] \quad (2)$$

α [m^2/S] は熱拡散率または温度伝導率と呼ばれており、この値が大きいほど温度が早く伝わる。各材料の熱特性を温度依存とする場合は、熱伝導率 λ および比熱 c を変動させることによってこの効果を解析に取り入れるることになる。

3. 2 解析モデル

実験供試体を対象に非定常熱伝導解析を行った。解析モデルを図-9に示す。供試体はトンネル長手方向に同一断面を有することから、2次元問題として扱った。また、供試体端部の600mmの範囲は解析対象から除外し、モデルの対称性を考慮し1/2の解析モデルとした。解析では表-2に示すように各部材の熱伝導率・比熱の温度依存性を設定した。なお、本解析では潜熱の影響については考慮しなかった。

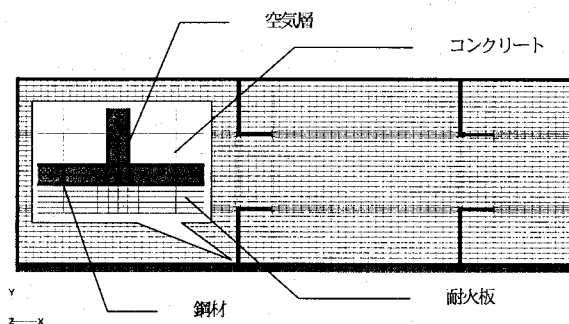


図-9 解析モデル図

一般に、サンドイッチ部材で鋼材とコンクリートとを完全に密着させることは不可能であり、部材間に空隙を生じやすい。この空隙には空気が存在するので、これが断熱層として作用することから、熱伝導解析を行う際にはこれをモ

デル化しないと良好な結果が得られない。実験供試体において空隙が存在すると考えられる箇所は、鋼材-コンクリート間および鋼材-耐火材間である。鋼材-コンクリート間の空隙の発生は実験により確認されているので、これを要素としてモデル化する。但し、空隙幅は内部圧力の作用によって時々刻々と変動するので、これを熱伝導解析に取り入れることは非常に困難である。そこで、本解析では従来の解析事例⁹⁾を参考として、空気層厚を1mmの熱伝導体としてモデル化し、常温時の空気の熱伝導率・比熱を設定した。鋼材-耐火材間については、今回用いた耐火材が吹き付け系耐火材であり、鋼板に追従して変形できる特性を有することから、鋼材-耐火材間に大きな空隙が発生しないと言われている。このことより、熱伝導解析時には鋼材-耐火材間に空気層を設定しなくても良いとも考えられているが、試験では大きい鋼材の変形が観察されており、鋼材-耐火材間にも空隙が発生していると想定することができた。そこで、解析では、空気層の存在を確認する目的もあり、3ケースの解析（空気層なし、コンクリートと鋼材間のみに空気層、耐火材と鋼材間にも空気層）を行った。加熱-時間曲線は、耐火試験と同様にRABT90分曲線をモデル下面全体に入力し、モデル側面および上面については熱伝達境界（14W/m²℃）を設定した¹⁰⁾。時間方向の分割ピッチは10秒とし、加熱開始後10時間までの解析を行った。

表-2 温度依存物性

温度 ℃	鋼材		コンクリート		耐火板	
	熱伝導率 W/m℃	比熱 J/kg℃	熱伝導率 W/m℃	比熱 J/kg℃	熱伝導率 W/m℃	比熱 J/kg℃
0	55.01	482	2.866	699	0.187	1300
100	51.84	490	2.414	815	0.193	1300
200	48.46	514	2.014	918	0.200	890
300	44.99	554	1.686	1007	0.207	890
400	41.57	610	1.431	1082	0.214	890
500	38.32	681	1.248	1144	0.221	890
600	35.37	769	1.138	1193	0.228	890
700	32.84	873	1.100	1228	0.235	890
800	30.87	993	1.134	1249	0.242	890
900	29.57	1129	1.241	1257	0.249	890
1000	29.08	1281	1.420	1252	0.256	890
1100	29.52	1449	1.671	1233	0.256	890
1200	31.02	1633	1.995	1201	0.256	890

3. 3 温度分布状況

図-10にCase-h1（空気層なし）の部材内の温度変化履歴を示す。鋼板表面は加熱開始後110分後に最高温度380℃となり、コンクリート内部20mm位置では加熱開始後120分に最高温度300℃となった。耐火試験における鋼板表面の最高温度は加熱開始後100分後に425℃で、コンクリート内部20mm位置での最高温度は加熱開始後150分後に170℃であったことより、両測定箇所について、最高温度到達時刻および温度ともに実験を模擬できていない。図-11にCase-h2（コンクリートと鋼板間のみ空気層）の部材内の温度変化履歴を示す。鋼板表面は加熱開始後

110分後に最高温度525℃となり、コンクリート内部20mm位置では加熱開始後150分に最高温度235℃となった。Case-h1に比べて、コンクリート内部の温度は低下したものの、鋼板表面の温度が大きく上昇して実験値を上回る結果となった。これは、断熱層として作用する空気層と加熱面間に熱の滞留が発生したことが原因であると考えられる。図-12にCase-h3（耐火材と鋼板間にも空気層）の部材内の温度変化履歴を示す。鋼板表面は加熱開始後110分後に最高温度420℃、コンクリート内部20mm位置では加熱開始後150分に最高温度190℃となり、実験値と概ね等しい結果となった。本検討より、鋼板に追従して変形することが可能な吹き付け系耐火材においても、鋼材-コンクリート間に加えて、鋼材-耐火材間の空気層のモデル化が必要である事が確認できた。

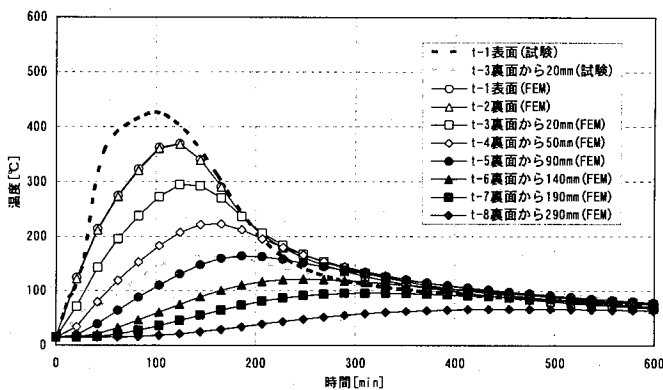


図-10 Case-h1 内部温度-時間曲線

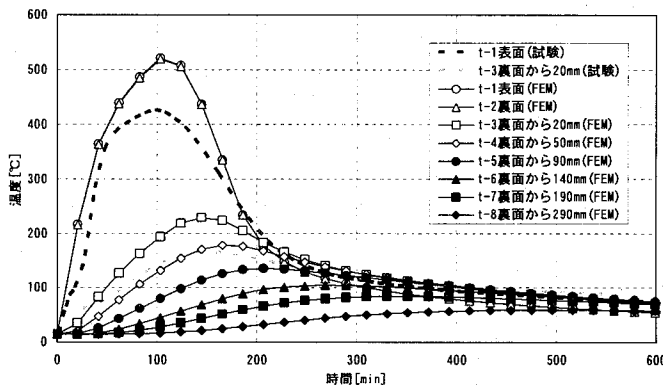


図-11 Case-h2 内部温度-時間曲線

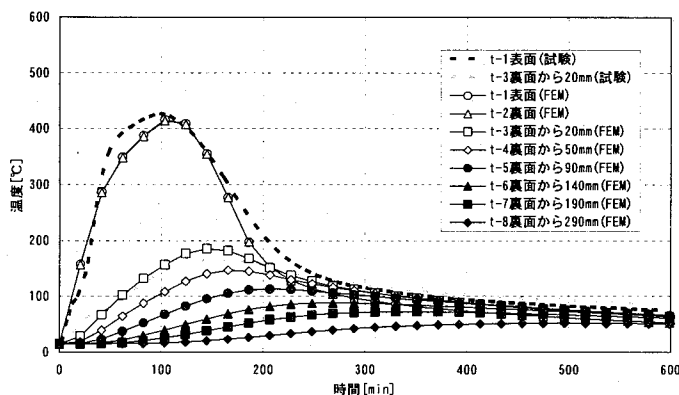


図-12 Case-h3 内部温度-時間曲線

4. 熱応力解析

4.1 熱ひずみ

熱応力解析において、弾性挙動を仮定したときの応力とひずみの関係式は、

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\} \quad (3)$$

である。ここで、

$\{\varepsilon\}$: 全ひずみ, $\{\varepsilon_0\}$: 初期ひずみ, $[D]$: 弾性行列

初期ひずみは、以下の3成分で構成される。

$$\{\varepsilon_0\} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{x0} \\ \varepsilon_{y0} \\ \varepsilon_{xy0} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

平面ひずみ場では、熱膨張によってx-y平面に垂直な応力 σ_z を生じることより、

$$\varepsilon_{x0} = \alpha T - \nu \sigma_z / E$$

$$\varepsilon_{y0} = \alpha T - \nu \sigma_z / E \quad (5)$$

$$\varepsilon_{z0} = \alpha T + \sigma_z / E = 0$$

ここで、 ν はポアソン比である。

式(5)から σ_z を消去し、熱膨張によってせん断ひずみが生じないとすれば、平面ひずみ場における以下の式を得ることができる。

$$\{\varepsilon_0\} = (1 + \nu) \begin{Bmatrix} \alpha T \\ \alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

4.2 解析モデル

実験供試体でひび割れが発生した原因を特定するために材料非線形を考慮した熱応力解析を行った。解析に使用するメッシュは熱伝導解析と同様とする。但し、耐火材の剛性は小さく構造部材として期待できないことからヤング係数を微小値とし、空気層についても同様に設定した。形鋼-コンクリート間の接合条件は完全に切り離すのではなく、図-13に示すように、圧縮については力を伝達し、引張りについては剥離する挙動を示す界面要素（インターフェース）を追加した。なお、このときせん断方向については力を伝達せず自由に滑ることができるモデルとした。

コンクリートのひび割れのモデル化については分散ひびわれモデル（Smeared Crack Model）を用いた。本解析におけるひび割れの判定はコンクリートの最大主応力が引張強度を超えた場合とし、ひび割れ発生と同時に主応力方向の応力を解放し、コンクリートの剛性を低減させるもの

とする。引張軟化特性については、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕¹¹⁾を参考に設定した。この引張軟化特性は、図-14に示すようにコンクリートの破壊エネルギー G_F をパラメータとした引張応力とひび割れ幅で定義されている。このとき、コンクリートの破壊エネルギー G_F は下記の式から求めた。

$$G_F = 10(d_{\max})^{1/3} \cdot f_{ck}^{1/3} \quad (N/m) \quad (7)$$

ここで、 $d_{\max}$ は粗骨材の最大寸法 (mm) である。

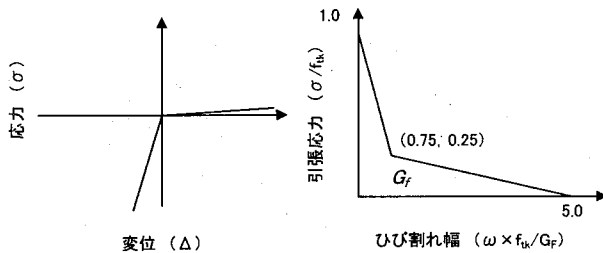


図-13 剥離モデル 図-14 引張応力ひび割れ幅関係

火災による高温に曝されたコンクリートは表面の剥離・飛散を伴う爆裂現象 (Explosive Spalling) によって致命的な損傷を受けると考えており、原因として内部の水蒸気圧の上昇もしくは圧縮側の熱応力であると考えられている。しかしながら、本供試体は耐火被覆で保護されており、内部コンクリートの最高温度も 200℃程度であって、試験でもこのような異常な現象は確認されていない。よって、本解析ではモデルの簡素化の為に圧縮側の材料非線形性は考慮せずに、弾性として扱った。鋼材の構成則については、Von-Mises の降伏基準を適用し、降伏後のヤング係数は初期剛性の 1/100¹²⁾となるように設定した。なお、コンクリートと鋼材のヤング率や強度、線膨張係数等の温度依存性については、供試体の設計温度を物性値が大きく変化しない範囲に設定したため考慮しない。解析で用いた温度履歴については、最も実験と近い結果が得られた Case-h3 の結果を入力する。またこのとき、圧力の影響を無視できないため、実験で得られた最大圧力 0.27MPa から等価な節点力を算出し加熱側の鋼板内面に下向き方向、内部コンクリート表面に上向き方向に載荷した。時間方向の圧力の変動量については、実際の計測値を利用して変動させた。応力解析時の拘束条件については、実験と同様な条件になるように支点を鉛直拘束し、対称面については水平方向を拘束した。

4. 3 水蒸気圧による検討解析

耐火試験におけるひび割れの発生理由の一つとして、水蒸気圧によって形鋼に引き抜き力が作用したことが推測される。そこで、熱応力解析に先立ち、水蒸気圧のみを載

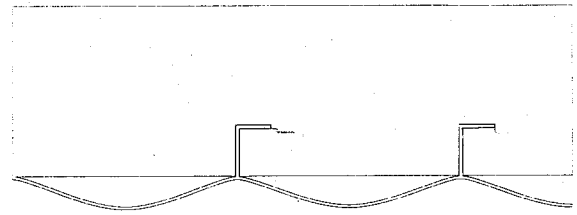
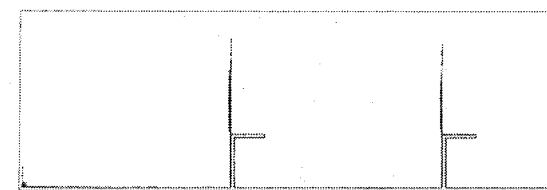


図-15 ひび割れコンター図

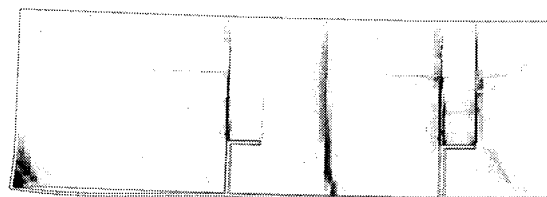
荷したモデルで形鋼の引き抜きに対する検討解析を行った。解析は試験で確認された最大水蒸気圧 0.27MPa までを 100 ステップに分割し漸増載荷をおこなった。最終ステップのひび割れコンター図を図-15に示す。引き抜き力により形鋼先端から斜めひび割れが発生しているものの、内部コンクリートを通ずるレベルには至っていない。形鋼の引き抜きに対する内部コンクリートの耐力は、少なくとも実測値である 0.27MPa 以上のものを有しており、水蒸気圧によって内部コンクリートが損傷を受けるものの、せん断破壊を起こすレベルの力は働いていなかったことが確認できた。

4. 4 熱応力解析

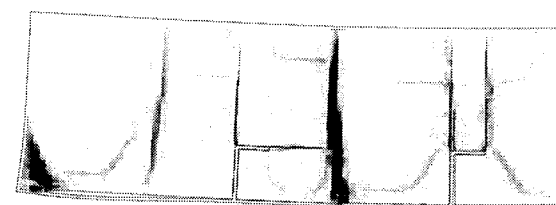
試験において発生したひび割れの理由を把握することを目的として、熱伝導解析によって得られた温度履歴を入力した応力解析 (Case-S1) と、温度に加えて実測された水蒸気圧を入力した応力解析 (Case-S2) を実施した。両ケースにおけるひび割れコンター図を図-16 および図-17に示す。両ケースとも燃焼開始 10 分以前の早い時刻で上下形鋼間に鉛直ひび割れが発生した。鉛直ひび割れについては、供試体全体に温度による曲げモーメントが作用していたことが理由として考えられる。供試体を一本の梁と見立てると、加熱面側は上面側に比べて高温となっており、構造がこのような不均一な温度状態にある場合、全体に正の曲げモーメントが作用する。形鋼が存在する箇所のコンクリートは断面が少ないので、曲げモーメントによる損傷は形鋼位置から始まるはずである。また、燃焼開始初期において加熱面側の鋼板の温度が内部コンクリートに比べてかなり高いことを実験および熱伝導解析で確認している。加熱初期段階では、鋼板が急速に熱膨張しているにも関わらず、コンクリートはまだ殆ど熱膨張していないので、コンクリートが形鋼位置で鋼材の水平変形を拘束する。よって、形鋼の背面側を介して鋼材の膨張による水平力が内部コンクリートに働き、これが、コンクリートに鉛直ひび割れを発生させる力として作用したと考える。加熱面側形鋼中間位置における鋼板の水平応力履歴を図-18に示す。この図より内部コンクリートの損傷が少ない初期段階における加熱面側鋼板の応力値が、構造が正の曲げモーメント状態になっているにも関わらず、全圧縮となっていることが確認できる。なお、圧縮応力は変動しており安定しない結果となったが、これはコンクリートのひび割れの進



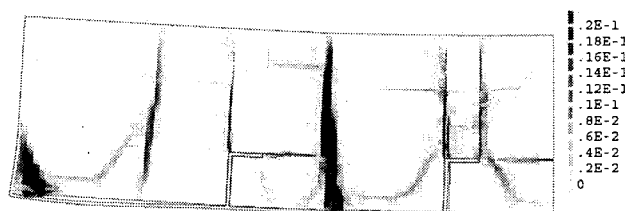
(a) 加熱開始 10 分



(b) 加熱開始 40 分

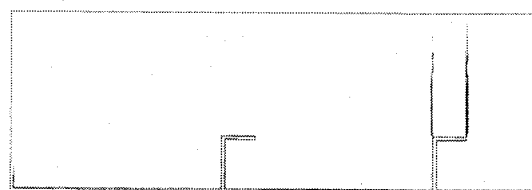


(c) 加熱開始 70 分

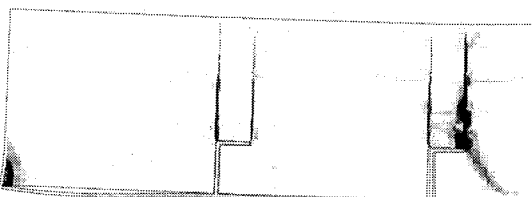


(d) 加熱開始 100 分

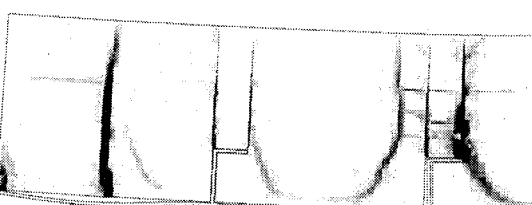
図-16 Case-S1 におけるひび割れコンター図



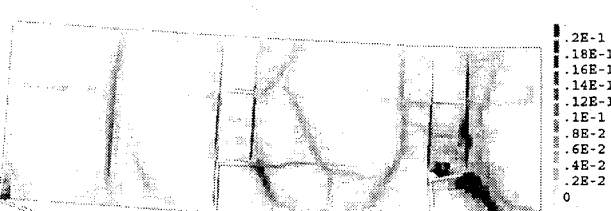
(a) 加熱開始 10 分



(b) 加熱開始 40 分



(c) 加熱開始 70 分



(d) 加熱開始 100 分

図-17 Case-S2 におけるひび割れコンター図

展により、内部拘束力が変化していることが理由だと考える。

両ケースとも燃焼開始 40 分程度において、形鋼先端から構造中心方向に向かって斜めひび割れが発生した。これは、鋼板の熱膨張に伴う形鋼の支点方向への水平変位によるひび割れだと考えられる。このようなひび割れは、水蒸気圧のみを入力した検討解析でも確認しているが、水蒸気圧を入力しない Case-S1 においても同様の時刻に発生しているため、温度に起因しているものと推測できる。燃焼開始 70 分程度においては、同様の理由により形鋼背面から支点方向に向う斜めせん断ひび割れが発生した。Case-S1 では燃焼開始 100 分に、Case-S2 では燃焼開始 120 分に加熱面側の形鋼間に水平ひび割れが発生した。この時刻になると、形鋼とコンクリートはひび割れの進展によって完全に分断されており、ひび割れの発生が形鋼の変形によるものだと考えづらい。燃焼開始 100 分付近では、内部コン

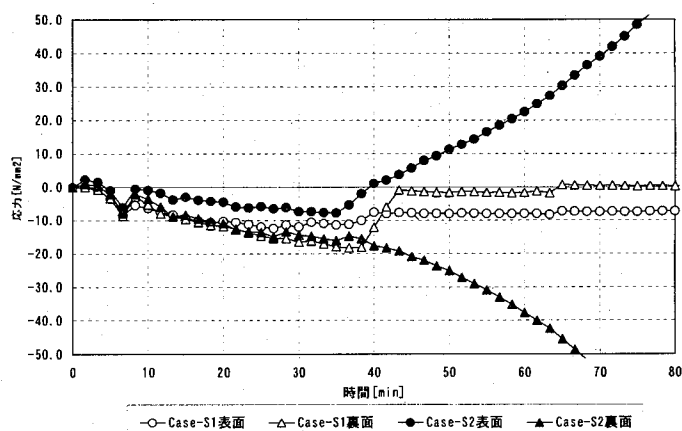


図-18 形鋼中間位置における鋼板の水平応力履歴

クリートの温度上昇量が最大値近くになっていることから、コンクリートの熱膨張に対する内部拘束力に起因するひび割れだと考えられる。実験によって確認された主要なひび割れは、FEM 解析では燃焼による温度上昇期間中に全て発生した。

参考として、鋼殻構造における形鋼の水平変位によるせん断ひび割れの発生パターンを図-19に示す。本試験で観察されたひび割れと同様の形状となっていることより、本試験におけるひび割れの大半は、形鋼の水平変位によるひび割れと同様のメカニズムで発生したものだと考える。

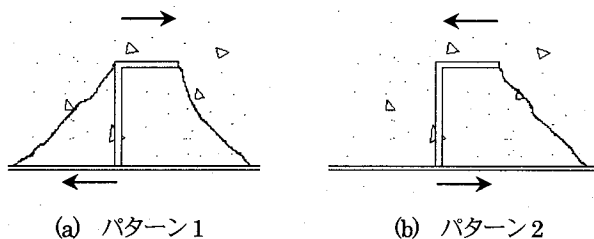


図-19 形鋼の変位方向によるひび割れパターン

5. まとめ

トンネルが火災を受けた場合における構造系としての損傷程度の検討については、以前からその必要性が指摘されていたものの、耐火実験の実施例が少なかったことより、議論されることはあまりなかった。したがって、現状での耐火設計は部材レベルの問題に留まるものが大半である。本研究はトンネル用のサンドイッチ部材を対象に耐火実験を行い、火災を受ける構造体としての挙動を確認した後、FEM 解析によるシミュレーションを試みたものである。本研究において、現状で得られている知見を以下にまとめる。

(1) 吹付材付きのサンドイッチ部材に RABT 曲線による温度履歴を耐火実験で与えたところ、温度分布は事前に予想したとおりのものを得られたが、内部コンクリートには予期し得ないひび割れが発生した。ひび割れの発生原因を追求することを目的として、有限要素法による熱伝導解析と熱応力解析を実施した。

(2) 温度分布性状に関しては、鋼材-コンクリート間に加えて鋼材-耐火材間に空気層を設定することによって、実験値と概ね等しい結果を得ることができた。このことより、熱伝導解析では吹付け系の耐火材においても、パネル系の耐火材と同様に鋼材-耐火材間に空気層を設定する必要があることがわかった。本検討では、空気層厚を 1mm とした場合に良好な結果を得ることができたが、空気層厚の設定については、より多くの耐火実験データを集め、更に検討する必要があるといえる。

(3) コンクリートのひび割れを分散型モデルとし、引張軟化をコンクリート標準示方書に示される二直線モデルで模擬したところ、耐火実験でのひび割れの発生状況を再現できた。本検討では、材料強度やヤング係数等の温度依

存性を無視して解析を行ったが、より詳細な検討を行う場合は、これらを考慮する必要があると考える。

(4) 本解析では、コンクリート中の水分の蒸発による圧力は鋼材には大きなひずみを与えるが、コンクリートのひび割れの大半は、鋼鉄の熱膨張に伴う型鋼の水平変位に起因するという結果となった。

今回は鋼板によってコンクリートが密閉された状況でのサンドイッチ部材の局部的な挙動に着目した試験であったため、供試体は無応力状態としたが、今後は供用時の断面力を考慮した耐火試験を実施する予定である。また、併せてひび割れの発生時期の確認と鋼材の発生ひずみを許容値以内に抑える温度の設定を行いたい。FEM 解析については実験で得られたデータを利用して使用パラメータの整理や、構成則の検討をおこない、より精緻なサンドイッチ部材の耐火設計の手法を整備していきたい。

参考文献

- 1) Haack, A. : Fire Protection in Traffic Tunnels Initial Findings from Large-scale Tests, *Tunnelling and GroundSpace Technology*, Vol.7, No.4, pp.363-375, 1992
- 2) Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. : Fires in Transport Tunnels, Report on Full-Scale Tests, EUREKA-Project EU 499 : FIRETUN, November, 1995
- 3) 運輸省第三港湾建設局 : 神戸港港島トンネル工事誌, pp.4-202~4-211, 平成 11 年 3 月
- 4) 清宮理, 飯田博光, 滝本孝哉 : 沈埋トンネル内の車両火災への対策の現状, *トンネルと地下* 4 月号, pp.63-70, 2000 年 4 月
- 5) 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.227-pp.232, 平成 16 年 10 月
- 6) 松尾幸久, 溝部有人, 清宮理 : トンネル内の車両火災への耐火被覆材の効果に関する熱伝導解析, *土木学会論文集* No.802/V, 2005 年 11 月
- 7) 徳田弘 : コンクリートの熱的性質, *コンクリート工学* Vol.22, No.3, 1984
- 8) 矢川元基 : 流れと熱伝導の有限要素法入門, pp.103-121, 培風館, 1994
- 9) 相原利雄 : 伝熱工学, pp.7-17, 裳華房, 1994.
- 10) コンクリート標準示方書 [施工編], pp.46, 土木学会, 平成 14 年 3 月
- 11) コンクリート標準示方書 [構造成能照査編], pp.19-29 土木学会, 平成 14 年 3 月
- 12) 道路橋示方書・同解説 V [耐震設計編], pp.200, 日本道路協会, 平成 14 年 3 月

(2005 年 9 月 10 日受付)