

サンドイッチ合成構造部材耐火実験への熱伝導及び熱応力解析

Heat analysis and Stress analysis for fire test result to Steel-Concrete composite member

中井 章裕*, 清宮 理**, 工藤 健一***
Akihiro Nakai, Osamu Kiyomiya, and Kenichi Kudou,

*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)

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. After fire tests, concrete cracks were observed and strains of the steel plate were fairly large beyond design values due to high temperature and vapor pressure. To be aimed at clarifying these phenomena, heat analysis considering the air and stress analysis considering the sectional forces of tunnel were performed.

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, 耐火被覆

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被覆が設置されるに至っている。

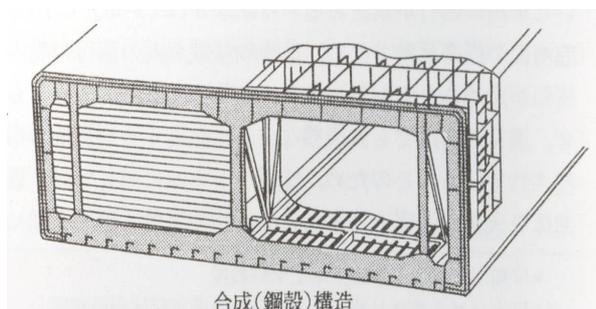


図-1 合成式沈埋トンネルの構造

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、耐火被覆の開発、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、耐火被覆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から、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。

これらの問題に対して、筆者らは以前に耐火被覆で保護された沈埋トンネルの実物大模型を作成して耐火実験を行い、供試体の挙動を確認している。また、併せて熱伝導および熱応力解析を行い、耐火実験をFEM解析により模擬できる事を確認した(文献5)を参照。しかしながら、前回の検討は以下の課題を残すものであった。第1

に熱伝導解析で設定した空気層の厚みについて更なる検討が必要であった。前回実施した熱伝導解析においては、耐火被覆—鋼板間および鋼板—コンクリート間に 1mm の空気層厚を設定したところ、各着目点における温度履歴は実験値と良好に一致したが、空気層厚の厚みは既往の研究を参考として設定したものであり、1mm 以外のものをを用いた場合、部材着目位置の熱履歴にどのような結果をもたらすのか確認できていなかった。第 2 に前回実施した熱応力解析では、コンクリートの損傷は熱ひずみによるものだと結論づけたが、鋼板の挙動については着目しておらず、耐火実験において鋼板に降伏レベルのひずみが発生した理由については未解明であった。第 3 に耐火実験では局部的な挙動に着目する為、供試体を無応力状態としていたが、供用時の沈埋トンネルは水圧等により高軸力状態となっている場合が多い。今後、断面力を再現した追加の実験を行うにあたっては、解析等により各応力状態における供試体の損傷程度を把握しておく必要がある。これらの課題を克服する事を目的として、本論文では解析的な観点からいくつかの検討を行った。

2. 耐火実験⁵⁾

2.1 耐火実験方法と設計条件⁶⁾

耐火実験における供試体の寸法は図-2 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 の形鋼を 600mm 間隔で設置し鋼板と溶接した。本実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

整理した結果によると、300~400°C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⁷⁾。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°C 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°C程度から強度の低下が見られ、一般に受熱温度 600°C程度までは冷却後にその材料特性が回復すると言われている。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°C を設計温度とした。耐火被覆は、近年使用実績が増えている吹き付け系耐火被覆を使用し、厚みについては別途計算を行い 20mm とした。加熱温度—時間曲線は図-3 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。

表-1 設計条件

種類	使用材料	設計温度	備考
鋼板	SM490Y	350°C	t=8mm
L形鋼, FB材	SS400		t=9mm
コンクリート	高流動		f _{ck} =30N/mm ²
吹付け系耐火被覆	セメント, パーキュライト	—	施工厚 20mm, メッシュ筋付

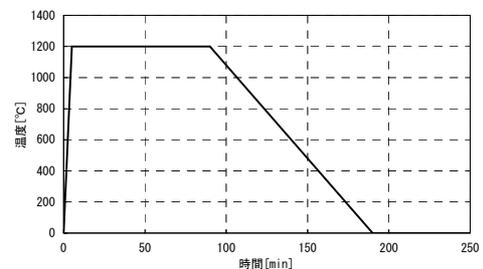


図-3 加熱温度—時間曲線 (RABT90 分)

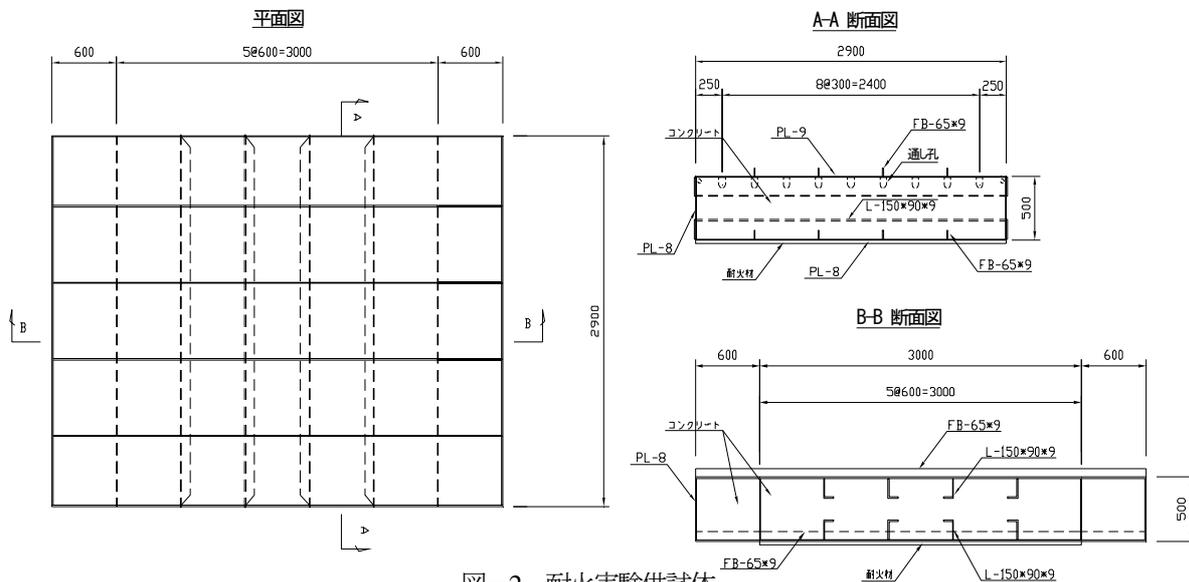


図-2 耐火実験供試体

2. 2 耐火実験結果

図-4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⁶⁾。本実験でも、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-5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-6に加熱側鋼板のひずみ-時間関係を示す(なお、図に示したひずみ履歴は温度上昇に伴うひずみを補正したものである)。各測定位置のひずみ履歴はばらつきが多かったが、鋼板温度が上昇する期間では圧縮側になり、鋼板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(加熱側引張・内部コンクリート側圧縮)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、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。

加熱実験後、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-7に示すのが代表的な断面であるが、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、本実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ため、ひび割れの発生時期や順次に関する情報は得ていない。

3. 1次元熱伝導解析⁸⁾による検討

本検討では、耐火実験の熱挙動について、空気層厚をパラメータとした熱伝導解析によってシミュレーションする。単一材料から構成された構造体の火災に対する熱伝導解析手法は既に確立されているが、サンドイッチ構造のような異種材から構成された複合構造物では、異なる材料間に断熱材として作用する空気層が存在することから、解析を行う際には空気層の取り扱いを慎重に設定する必要がある。空気層の厚みが非常に大きい場合は、空

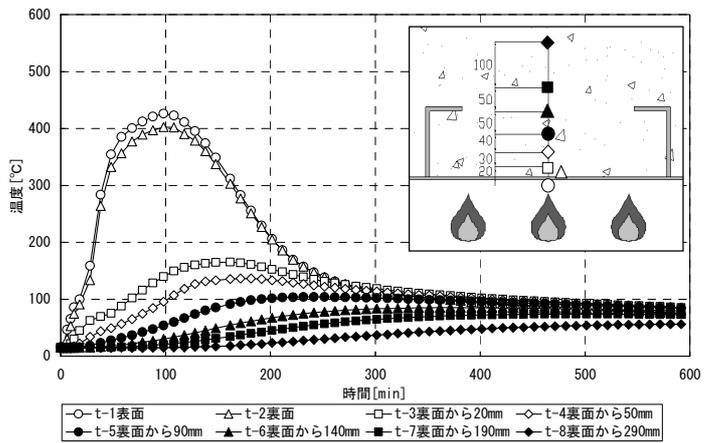


図-4 内部温度-時間曲線

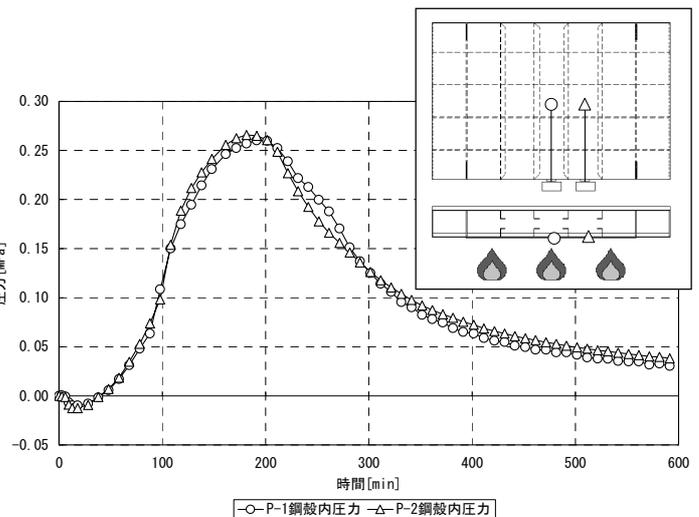


図-5 内部圧力-時間曲線

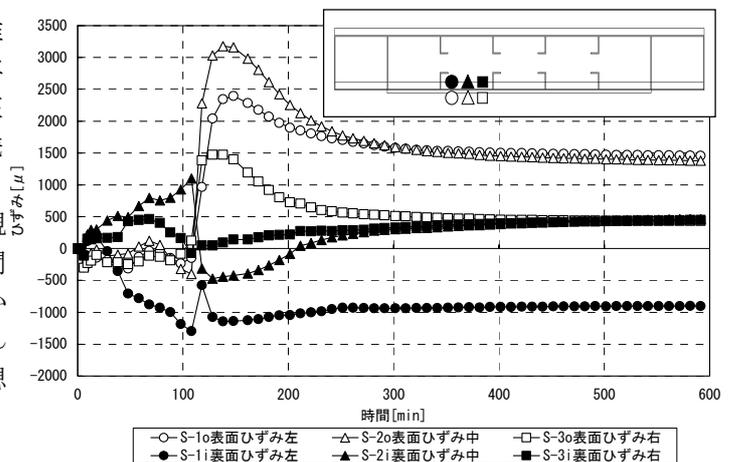


図-6 加熱側鋼板のひずみ-時間関係

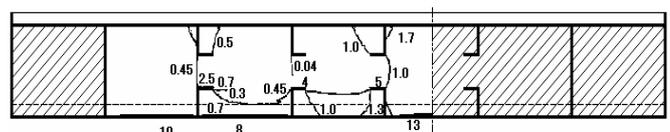


図-7 内部コンクリートのひび割れ状況

気層内の熱の移動は対流が支配的となり、有限体積法のような流体解析を行う必要が生じてくる。更に、解析対象が熱伝導体一流体から構成される場合は双方を連続させて解析しなければならない、これは非常に難易度の高い解析となる。また、複合部材間に存在

する空気層程度の微小な領域に対して流体解析が適用可能かという問題点もある。そこで、本検討では空気層を構造体と同様な熱伝導体としてとり扱うこととする。異種材料間の熱の移動方法は、①対流熱伝達 ②熱伝導 ③熱ふく射であると考えられるが、これらをマクロ的に取り扱い、見かけ上等価な熱伝導率と板厚を設定することができるならば、簡易的に解析することが可能となる。

トンネルは水平方向および長手方向に同一断面を有することから、構造を1次元でモデル化する(図-8)。各部材の熱伝導率・比熱の温度依存性については、表-2に示すような値に設定した。潜熱の影響については、さほど温度分布に影響を及ぼさないと考えられる為、考慮しなかった。実験供試体において空気層が存在すると考えられる箇所は、鋼板-コンクリート間および鋼板-耐火被覆間である。鋼板-コンクリート間の空隙の発生はコンクリート中の水分の水蒸気化により発生し、この現象は実験でも確認されているが、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、これを熱伝導率に取り入れることは非常に困難である。そこで、本解析では空気層厚は変動しないと仮定して要素サイズを一定に固定した。なお、このとき用いた空気層の物性値は熱伝導率 $0.0241\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ 、比熱 $1006\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$ 、密度 1.293kg/m^3 とした。解析ケースは表-3に示すような、空気層厚をパラメータとした5ケースの解析を行った。加熱-時間曲線は、耐火実験と同様にRABT曲線をモデル下面全体にを入力し、モデル上面には熱伝達境界($14\text{W/m}^2\text{C}$)を設定した¹⁰⁾。時間方向の分割ピッチは60秒とし、加熱開始後6時間までの解析を行った。

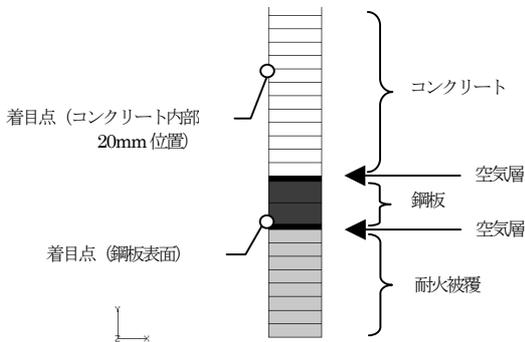


図-8 1次元熱伝導解析モデル

表-2 温度依存物性

温度 °C	鋼板		コンクリート		耐火被覆	
	熱伝導率 W/m°C	比熱 J/kg°C	熱伝導率 W/m°C	比熱 J/kg°C	熱伝導率 W/m°C	比熱 J/kg°C
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

表-3 解析ケース

ケース名称	空気層厚
Case-H1	0mm
Case-H2	0.2mm
Case-H3	0.5mm
Case-H4	1.0mm
Case-H5	2.0mm

図-9に空気層厚毎の鋼板表面および内部コンクリート20mm位置における各ケースの最高温度を示す。空気層厚の増加に伴い、内部コンクリートの温度は下降する一方で、鋼板表面の最高温度は上昇する傾向となった。断熱効果をもつ空気層を熱伝導率を取り入れた場合、必ずしも全ての部材の温度が低下するわけではなく、合成構造における鋼板のように背面に空気層を有する部材の温度は空気層厚の増加に伴いむしろ上昇することが確認できた。また、空気層厚を1mmと設定したCase-H4では、鋼板表面およびコンクリート内部20mm位置共に実験結果とよく適合した結果となっている。

ところで、筆者らの以前の検討では内部コンクリートのひび割れは、鋼板-コンクリートの温度差が起因するものだと結論づけていた。ひび割れの発生が両者の温度差に依存するならば、熱伝達解析において供試体の損傷過程を模擬する場合は、鋼板-コンクリート間の温度差を熱伝導率により正確に求める必要がある。そこで、各ケースの鋼板-コンクリート内部20mm位置の最高温度差について、実験値と比較した結果を図-10に示した。解析では空気層厚の設定幅の増加に伴い、両者の相対差が増加する傾向にあることがわかった。また、本観点においても空気層厚を1mm程度とすると解析値が実験値とよく適合するという結果となった。

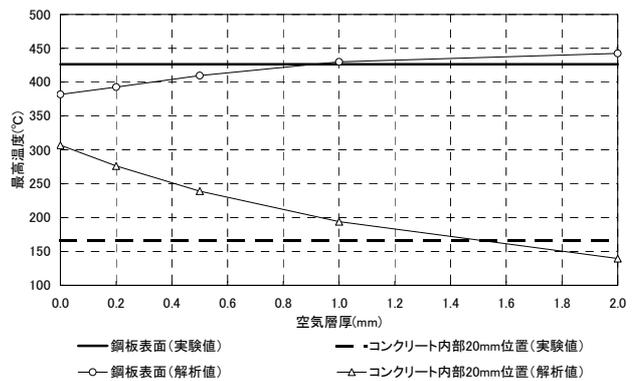


図-9 着目点の最高温度への空気層厚の影響

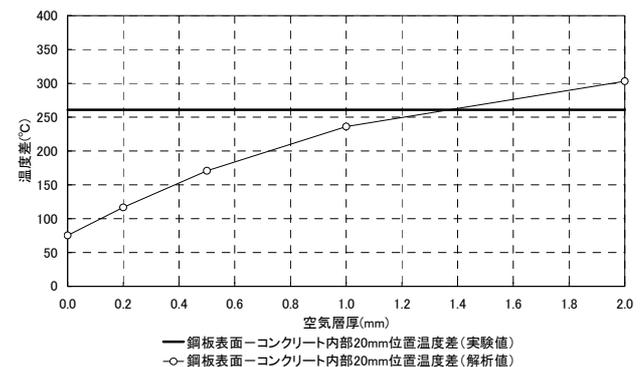


図-10 鋼板-コンクリートの最高温度への空気層厚の影響

4. 2次元熱応力解析による検討

4.1 解析条件

本検討では、コンクリートのひび割れ及び鋼材の降伏を考慮した非線形熱応力解析により、耐火実験を模擬する。解析モデル図を図-11に示す。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て1/2の解析モデルとした。熱応力解析に先立ち実施する2次元熱伝導解析のモデル化は、1次元熱伝導解析で空気層厚を1mmとすると良好な結果の得られた事から、同様の厚みに設定した。また、各構造部材の熱特性についても1次元熱伝導解析と同様のものを用いた。熱伝導解析-熱応力解析で使用するメッシュは基本的に同一とするが、耐火被覆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に設定し、空気層についても同様に微小値を設定して熱応力解析に影響を及ぼさないダミー部材として取り扱った。供試体下面側の形鋼-コンクリート間については、空気層をダミー要素（力が伝達されない）としているものの、図-12に示すような圧縮については力を伝達し、引張りについては力を伝達しない挙動を示す界面要素（インターフェース）を二重要素として追加する事により、鋼材の剥離を考慮できる接合条件とした。なお、せん断方向については界面の摩擦を無視し、自由に滑るモデルとした。

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-13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。

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

ここで、 d_{max} は粗骨材の最大寸法 (mm) である。

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°C程度であって、実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

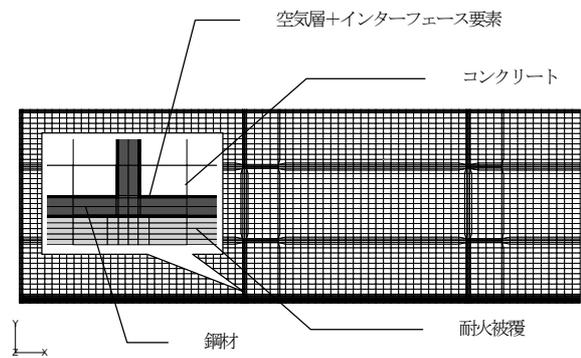


図-11 解析モデル図

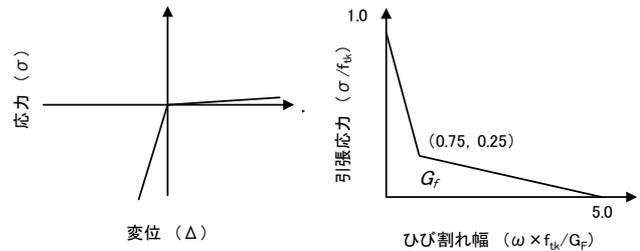


図-12 剥離モデル 図-13 引張応力ひび割れ幅関係

ヤング係数は初期剛性の1/100となるように設定した¹²⁾。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、今回は考慮しなかった。応力解析で用いた主な物性値の一覧を表-4に示す。水蒸気圧力のモデル化については、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。

表-4 応力解析で用いた主な物性値

材料	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	線膨張係数 (°C)	備考
鋼材	2.0×10 ⁵	0.3	12×10 ⁻⁶	降伏応力度 315 N/mm ²
コンクリート	3.1×10 ⁴	0.2	10×10 ⁻⁶	引張強度 4.5 N/mm ²
空気層	ヤング係数をコンクリートの10×10 ¹⁰ 倍程度に設定			
耐火被覆				

4.2 2次元熱伝導解析結果

応力解析に先立ち、図-11に示す2次元モデルを用いた熱伝導解析を実施した。図-14に部材内の温度変化履歴を示す。鋼板表面が加熱開始110分後に最高温度420°C、コンクリート内部20mm位置で加熱開始後150分に最高温度190°Cとなり、実験値と概ね等しい結果となった。

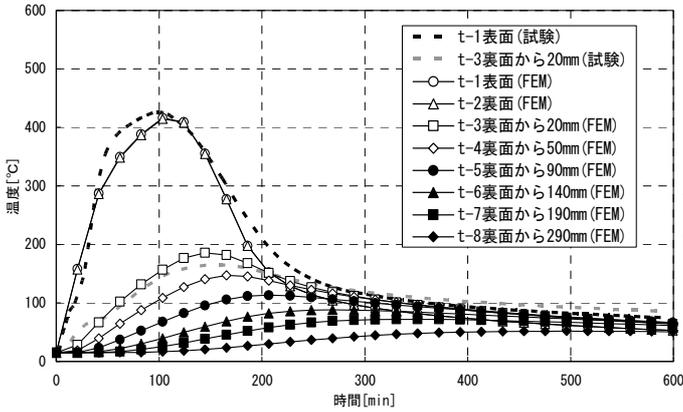


図-14 各着目点の温度変化履歴

4.3 鋼板の損傷に対する検討

本検討では、実験で観察された鋼板の損傷について、その原因を特定する事を目的として熱応力解析を実施する。熱応力解析で温度を入力するケースについては、2次元熱伝導解析で得られた結果を利用する。水蒸気圧力を入力するケースについては、実験で得られた測定値を利用する。解析ケースは、表-5に示すように水蒸気圧力を入力したCase-L1、温度のみを入力したCase-L2、水蒸気圧力と温度を同時載荷したCase-L3の3ケースとした。

表-5 解析ケース

ケース名称	入力荷重
Case-L1	水蒸気圧力
Case-L2	温度
Case-L3	水蒸気圧力+温度

各ケースにおける鋼板の水平応力履歴図を図-15～図-17に示す。水蒸気圧力のみ入力したCase-L1では、鋼板の発生応力値は降伏応力を超えるレベルとなっており、水蒸気圧力のみでも鋼板が損傷するという結果となった。同一の着目位置においては、上面側は圧縮応力状態であり、下面側は引張り応力状態であることから、板曲げに起因する水平応力が発生していることが分かる。また、本構造の特徴より板曲げ発生時の支点は形鋼位置となる事は明らかであるが、解析でも最大の応力発生箇所は形鋼の中間位置となり、その他の位置では応力が低減していることから、構造的に考えても矛盾のない結果となった。温度のみ入力したCase-L2は、加熱開始後40分程度まで鋼板上下面とも若干の圧縮応力状態となっており、その後圧縮応力が減少した。鋼板の熱膨張に対する拘束応力は形鋼位置におけるコンクリートの拘束力によって決定されると考えられるが、形鋼位置近傍のコンクリートの損傷が進捗すると拘束力が弱くなり、鋼板は無応力状態で自由変形することが可能となる。前回の検討では、コンクリートの鉛直ひび割れが加熱開始後40分程度で発生するとしたが、応力の解析初期段階におけるコンクリートのひび割れによってもたらされるものであったと考えられる。水蒸気圧力および温度を入力したCase-L3の鋼板の応力履歴は、概ねCase-L1とCase-L2を加えたものと同様となった。以上の結果より、耐火実験で観察された鋼板の損傷は、水蒸気圧力による鋼板の曲げに

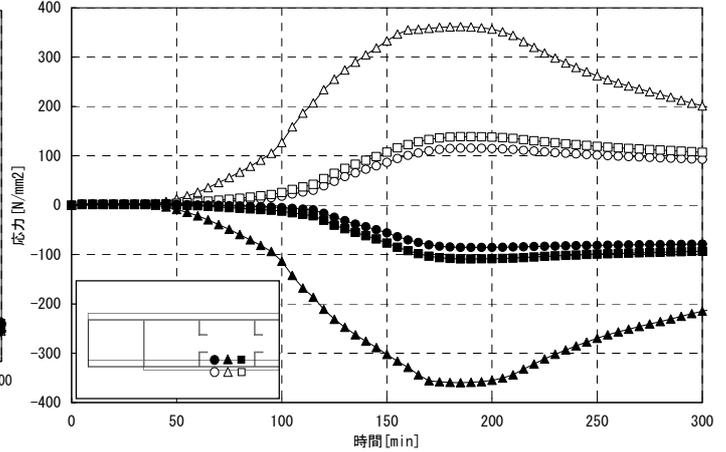


図-15 鋼板の水平応力履歴 (Case-L1)

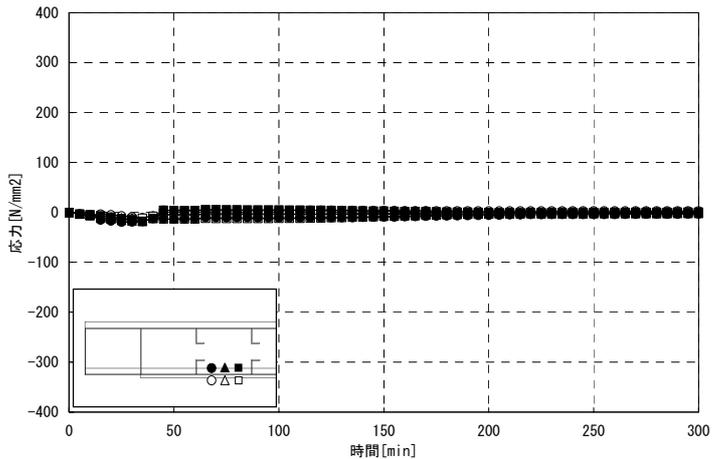


図-16 鋼板の水平応力履歴 (Case-L2)

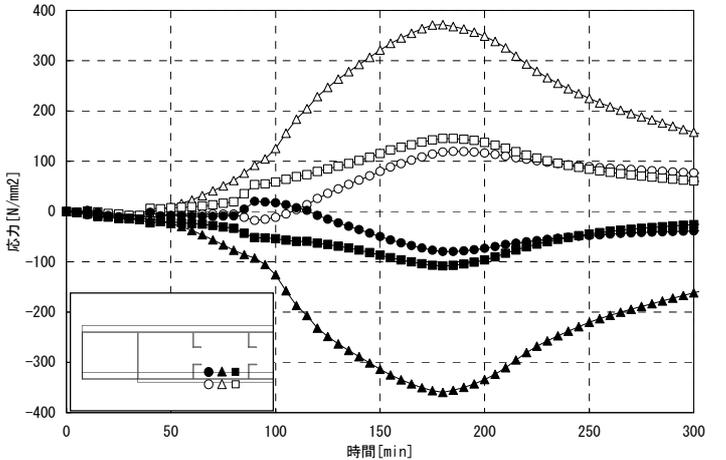


図-17 鋼板の水平応力履歴 (Case-L3)

起因しており、熱応力に影響によるものではないと推測することができた。

4.4 供用時の断面力状態に対する検討

今回実施した実験及びそれに対する解析は、沈埋トンネルの火災時における局所的な挙動を把握する事を目的としていた。しかしながら、供用時においては水圧等によりトンネル構造体には軸力や曲げモーメントが作用している状態となっていることが想定される。そこで、供用時におけるいくつかの断面力状態下での火災によるコンクリートの損傷の有無についての検討解析を行った。沈埋トンネルの設計に

おいては、使用限界状態の照査許容応力度法に基づいて行われるのが一般的であり、その際に用いられる材料の許容応力度の一例を表-6に示す¹³⁾。

表-6 許容応力度の一例

材料	種別	許容応力度
コンクリート ($f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$)	許容曲げ 圧縮応力度	10N/mm^2
鋼板 (SM490Y)	許容 引張応力度	210N/mm^2
形鋼 (SS400)	許容 引張応力度	140N/mm^2

本例より、沈埋トンネルの設計時には内部コンクリートの圧縮力が 10N/mm^2 程度となるような断面力で設計される事が多いと考えられるが、検討対象である沈埋トンネル頂版の断面力状態は軸力と曲げモーメントの組み合わせによるいくつかのパターンが想定できる。そこで、解析で用いる断面力状態については表-7に示すような7ケースを採用した。Case-F1は耐火実験と同様な状態である無力状態、Case-F2~Case-F3は純圧縮状態、Case-F4~Case-F5は圧縮+負曲げ状態、Case-F6~Case-F7は圧縮+正曲げ状態を想定している。載荷荷重については、供用時の断面力を保持した状態で、2次元熱伝導解析で得られた熱履歴と、実験で得られた水蒸気圧力を入力を行った。

表-7 解析ケース

	荷重図	応力状態
Case-F1		上縁 0N/mm^2 下縁 0N/mm^2
Case-F2		上縁 5N/mm^2 下縁 5N/mm^2
Case-F3		上縁 10N/mm^2 下縁 10N/mm^2
Case-F4		上縁 5N/mm^2 下縁 10N/mm^2
Case-F5		上縁 0N/mm^2 下縁 10N/mm^2
Case-F6		上縁 10N/mm^2 下縁 5N/mm^2
Case-F7		上縁 10N/mm^2 下縁 0N/mm^2

各ケースの加熱開始後 120 分におけるひび割れコンター図を図-18(a)~(g)に示す。耐火実験と同条件である無応力状態の Case-F1 では、形鋼上縁からの鉛直、水平ひび割れ、および背面、背面からの斜めひび割れの観察され、耐火実験と同様な性状を示

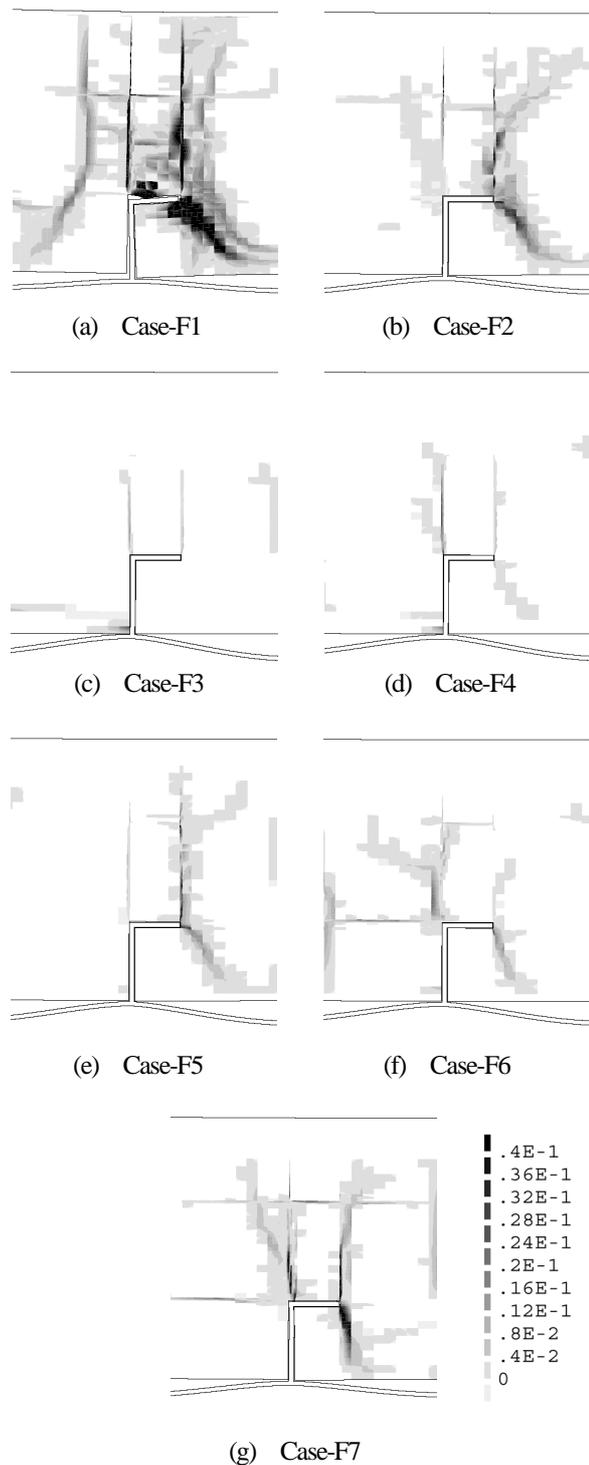


図-18 加熱開始後 120 分におけるひび割れコンター図

している。純圧縮状態を想定した Case-F2~Case-F3 は水平方向の圧縮力の増加に伴い、ひび割れが低減していることが分かる。

圧縮+曲げ状態を想定した Case-F4~Case-F7 については、いずれも水平圧縮応力度の増加箇所でのひび割れが低減する傾向となった。しかしながら、Case-F4 および Case-F5 の下縁側の初期応力状態は Case-F3 の下縁側と等しく、Case-F6 と Case-F7 の初期応力状態は Case-F3 の上縁側と等しくなるように設定しているが、いずれについても、ひび割れの低減度は Case-F3 のレベルには達していないことが分かる。これは、熱応力により形鋼近傍の局部ひび割れが発生した場合、供試体内部で応力の再分配が行

われるが、その結果コンクリート内部の応力状態は初期状態で想定したものと異なる分布性状となった事が理由だと考えられる。

無応力状態で実施した耐火実験では、予期し得ない程度のコンクリートのひび割れが発生したが、供用時の断面力を考慮した本解析によると水平圧縮応力の増加に伴いコンクリートのひび割れは大きく低減しており、火災時のトンネル構造体の検討においては、供用時の断面力再現が極めて重要である事を示唆した結果となった。

5. まとめ

耐火被覆を行った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、議論されることはなかった。特に、複合構造における熱伝導解析方法、ひび割れを考慮した熱応力解析方法の事例は少なく、解析手法が確立されていない。本論文は、筆者らが以前に行った耐火実験に対して、いくつかの解析的検討をおこなったものである。本検討によって得られた知見は以下のとおりである。

(1) 複合構造に対して熱伝導解析を行う際には、異種材料接続部に適切な空気層厚を設定する必要があるが、耐火被覆で保護されたサンドイッチ構造についての実験値と解析値を比較したところ、鋼板-コンクリート間に加えて鋼板-耐火被覆間に空気層を設定し、設定厚を1mm程度とすれば良好な結果が得られることがわかった。

(2) 筆者らが以前に実施した耐火実験では、鋼板に降伏レベルのひずみが発生したが、その原因は不明であった。そこで、荷重を水蒸気圧力と温度に分離载荷して熱応力解析を実施したところ、水蒸気圧力を入力したケースでは鋼板に過大な応力が発生し、温度を入力したケースでは鋼板の応力は無視しても良い程度のものであった。この結果より、鋼板の降伏ひずみの主原因はコンクリート中の水分の蒸発による水蒸気圧力である事が推測できた。

(3) 供用時の断面力を想定したパラメータ解析では、外力がプレストレスと同様な作用をすることから、コンクリートの損傷（ひび割れ）に大きな影響を与える事がわかった。特に水平圧縮応力度がひび割れの低減の支配的要因であった為、今後耐火実験を行う際には供用時の断面力状態の再現が重要である事が解析的に確認された。

今回実施した解析的検討により、車両火災時のトンネル構造体の挙動を確認する為には、供用時の断面力を再現した上で耐火実験を行う必要がある事が判明した。よって、今後は追加の実験を行い、供用状態での各構造部材の損傷程度を確認したいと考えている。また、実験結果が得られた後に、FEM解析結果との比較を行い、解析の妥当性の判定と適切なモデル化方法を更に検討してい

きたい。なお、本研究は(社)日本鉄鋼連盟の研究助成を得て実施したものである。

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) 中井章裕, 清宮理, 工藤健一, 山本邦夫：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, 構造工学論文集 Vol.52A, pp.1131-1138, 2006.3
- 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, pp.97-108, 2005年11月
- 7) 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.29-62, 平成16年10月
- 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, 2002.
- 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, 2002.
- 12) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V [耐震設計編], pp.200, 平成14年3月
- 13) 清宮理, 園田恵一郎, 高橋正忠：沈埋トンネルの設計と施工, pp.72, 技報堂出版, 2002.

(2006年9月11日受付)