(5) サンドイッチ合成構造部材の 車両火災への耐火設計と有限要素解析

清宮 理1・中井 章裕2・工藤 健一3・山本 邦夫3

¹フェロー会員 早稲田大学社会環境工学科(〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1) E-mail:k9036@waseda.jp

2学生会員 早稲田大学社会環境工学科(〒169-8555東京都新宿区大久保3-4-1) 3正会員 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 兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

トンネルが火災を受けた場合の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等により十分に議論されてこなかった.したがっ て、現状での耐火設計は部材レベルの許容温度の検討が大半となっているが、近年はトンネルを構造系と して扱い熱応力の問題をも考慮した設計方法が提案されるようになってきている.本論文は現在提案され ている設計方法を鋼・コンクリートサンドイッチ部材に適用した場合についての紹介を行う.また、サン ドイッチ部材を対象にした耐火実験では、鋼材に大きな変形が生じ内部コンクリートにひび割れが発生す ることが確認された.この実験を対象にFEM解析によるシミュレーションを試みた結果の報告を行う.

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

1. はじめに

トンネル火災の事故例が各国より報告・分析¹¹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、人命の危険も非常 に高い.近年は車両火災への対策として、耐火材を設置 することによって火災温度のトンネル構造体への伝達を 防ぐという手法⁹が広く使われるようになったが、トン ネル耐火設計の歴史は浅く設計手順が明確に定まってい ないのが現状である.そこで、本論文では現在提案され ている耐火設計のフローを紹介し、また、実際に行われ た耐火実験に対して、有限要素法による解析を実施し、 耐火設計に対する解析の適用性を検討する.

2. 耐火設計

本論文で取り上げるトンネル耐火設計のフロー³を図-1に示す.現在主に用いられている設計方法は、フロー 内の①において、構造部材の許容温度と想定される火災 曲線、使用する耐火材等を決定し、②の熱伝導解析によ って各構造部材が許容温度内に収まるかについて照査を





行う手順である.耐火設計を行うにあたっては、トンネ ル構造体の要求性能に基づき、施工性、経済性も考慮し た上で必要な耐火被覆厚を設定するが、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 細について十分に明らかになっていない.また、熱伝導 解析を耐火設計に適用する場合には、各材料の熱特性を 把握した上で、空気層の存在、コンクリートのひび割れ、 爆裂、水蒸気圧の発生の影響度等を加味して計算精度を 向上させる必要がある.③の熱応力解析については、近 年多く議論されている問題である。トンネルが火災によ る加熱を受けた場合には、まず各部材が温度変化による 直接的な影響を受ける。例えば、コンクリートにはひび 割れや爆裂現象が生じ、鋼材は変形し耐力も低下する.

従来の耐火設計は主にこのような熱による直接的な影響 を避けることを目的とした設計方法であった.しかしな がら、火災時には前記に加えて、熱ひずみに伴う曲げモ ーメントや軸力、内部拘束力により、トンネルが構造系 として損傷を受けることが懸念される.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.トンネルの耐火設計において熱応力解析を実施する 場合には、これらの現象を十分反映させる必要がある.

3. 熱伝導解析

(1) 解析概要

論文(4)における供試体type-2を対象として,有限要素 法による熱伝導解析を実施しその適用性を検討する.ト ンネル耐火設計における熱伝導解析については,一般に トンネル構造は断面方向に同一形状を有することから1 次元問題として扱われることが多い.本解析では,熱伝 導解析後に熱応力解析も実施するので2次元問題として 扱った.

(2) 解析モデル

解析モデルを図-2に示す.解析対象は全長3m,厚さ 0.5mの耐火実験用の供試体である.解析では端部の0.6m の範囲はモデルから除外し、対称性を考慮して1/2の解 析モデルとした.各部材の熱伝導率・比熱の温度依存性 は表-1に示す値を設定した.なお、これら諸値は既往の 研究や部材レベルの実験に基づいたものである⁵⁰.一般 にサンドイッチ部材では、鋼板とコンクリートは形鋼に より連結されているが、両者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.空隙には空気 が存在し、火災時にはこれが断熱層として作用するため、 熱伝導解析を行う際には空気層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、鋼板-コンクリート間および鋼 板-耐火材間である.鋼板-コンクリート間の空隙は実 験で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影響によって変動するが、 これを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を参考4として、空気層 厚を1mmでモデル化した. 鋼板-耐火材間については, 実験で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、鋼板一耐火 材間に大きな空隙が発生しないと考えられている. しか しながら、耐火実験においては鋼板の変形が非常に大き かったことより、多少の空隙が発生したと考えた、そこ で、解析では空気層の影響を確認する目的もあり、表-2 に示すような3ケースの解析を行った.加熱-時間曲線 は、耐火試験と同様に加熱開始後5分~90分が1200度と なる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を設定して外気温 を15度に固定した、解析の時間方向の分割ピッチは等間 隔で10秒とし、加熱開始後10時間までの解析を行った.



図-2 解析モデル図

+ -		111
无-1		小江
1X-1	111/211/17/1/	1-1-

	鋼材		コンクリート		耐火板	
温度 ℃	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

表-2 解析ケース

ケース名称	空気層のモデル化
Case-h1	空気層なし
Case-h2	鋼板-コンクリート間
Case-h3	鋼板-コンクリート・耐火材間

(3) 解析結果

図-3に空気層を考慮していないCase-hlの部材内の各位 置における温度履歴を示す.また,併せて図中に熱電対 の配置図を示す.鋼板表面は加熱開始後110分に最高温 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 に170℃であったことより、両測定箇所について、最高 温度および温度履歴ともに実験結果と一致していない. コンクリートと鋼板の温度が近くなったのは、空気層が ない場合,鋼板と背面のコンクリートは同一節点を共有 しているので、この節点の前後間は連続性を有する温度 分布性状となることが理由である.図-4にCase-h2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 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-hl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理由であると考える. 図-5 に鋼板と耐火材・コンクリート両面に空気層を考慮した Case-h3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℃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190℃とな った. 多少の誤差があるものの, 最高温度および温度履 歴とも実験値とよく一致した. なお, 内部コンクリート 温度が100度を超える範囲は形鋼(高さ15cm)の上端部 分付近までであり、深部には温度が伝達しなかった.

(4) 耐火材厚の影響

本解析では、鋼板-コンクリート間および鋼板-耐火 材間に空気層を設置したCase-h3で良好な結果を得ること ができた. そこで更に, Case-h3モデルを用いて耐火材厚 を変更した熱伝導解析を行った.実験における耐火材厚 は20mmであったが、10mm~30mmの厚みで解析を行い、 鋼材表面と内部コンクリート20mm位置での最高温度を 整理したものが図-6である.この図からわかるように、 供試体をRABT90分曲線によって加熱した場合、鋼材の 目標温度を400℃とした場合は25mm程度, 350℃とした 場合は30mm程度の耐火材厚が必要なことがわかる。ま た、コンクリートに関しては水蒸気の発生する100度以 内を目標とした場合、耐火材の厚さを相当厚くしなけれ ばならないことが予想される. しかしながら, トンネル 内の狭隘な空間での施工性、内空断面の確保などの観点 から、耐火材の増厚によってコンクリート中の水分の水 蒸気化を抑制することは困難であると考える.



図-3 Case-h1 内部温度-時間曲線











3. 熱応力解析

(1) 解析概要

論文(4)における供試体type-2の耐火実験では、①最大 0.27Mpa程度の内部圧力が計測された. ②鋼板のひずみ は降伏ひずみを超える値が計測された. ③試験終了後、 供試体を切断して内部コンクリートを観察すると多数の ひび割れ(図-7)が観察された. ①の内部圧力発生の理 由としてはコンクリート中の水分の水蒸気化が原因であ るが、鋼板のひずみの発生理由とコンクリートのひび割 れの理由は特定できていなかった. そこで、実験供試体 を対象として熱応力解析を実施し、これらの現象の発生 理由の検討を行った.



図-7 type-2ひび割れ状況

(2) 解析モデル

解析で使用するメッシュは基本的には熱伝導解析と同 様とした.物理特性としては、鋼材及びコンクリートに ついては通常の部材として扱うが、耐火材については構 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 とした. 空気層についても図-8に示すようにヤング係数 を微小値とするが、形鋼位置で鋼材とコンクリートが接 触し鋼材の水平変位を伝達すると考えられる為、図-9に 示すような圧縮には抵抗し、引張には抵抗しないバネを 追加した. なお、このバネはせん断方向には抵抗しない ものとした、水蒸気圧の入力については、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.

コンクリートのひび割れのモデル化については分散ひ び割れモデル(Smeared Crack model)を用いた⁶.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 力方向の応力を開放し、コンクリートの剛性を低減させ るものとする、引張軟化特性ついては、コンクリート標 準示方書[構造性能照査編]⁹を参考に設定した.この 引張軟化特性は、図-10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



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

ここで、dmaxは粗骨材の最大寸法(mm)である.

実験供試体は耐火被覆で保護されており、内部コンク リートの最大温度も 200℃程度であり、コンクリートの 爆裂現象は確認されなかった.したがって、解析では圧 縮側の材料非線形性の影響は少ないと考え、弾性体とし 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 1/100 になるように設定した.解析ケースは、表-3 に示すよ うに3ケースとする.ここで、水蒸気圧と温度入力を分 けたのは、コンクリートのひび割れ及び鋼材の降伏ひず み発生の理由を特定する為である.なお、温度入力は熱 伝導解析 Case-h3 で得られた温度履歴を全要素に時刻歴 で入力することによって行う.したがってコンクリート のひび割れ、鋼材の剥離等の構造の変化については、熱 伝導解析にフィードバックしていないものを利用する.

表-3 解析ケース

E1 = 3 1 (1)		
ケース名称	入力荷重	
Case-S1	水蒸気圧	
Case-S2	温度	
Case-S3	水蒸気圧+温度	





(b) 鋼板応力履歴図

(3) 解析結果

各ケースにおけるひび割れコンター図および鋼板の 応力履歴図を図-11~図-13に示す.水蒸気圧のみ入力 のCase-S1では、図-11より形鋼の引き抜きに伴う形鋼先 端からのひび割れが発生するものの、コンクリートの 損傷は限定的であることが確認できた.一方,鋼板の 発生応力値は降伏応力を超える値となっており、水蒸 気圧のみでも鋼板は降伏することがわかった. 温度の み入力したCase-S2では、図-12より温度応力によって実 験で観察されたひび割れと同様のものが発生している

ことが確認できた.但し,解析では形鋼中間位置にか なり大きな鉛直ひび割れが発生しているが,このひび 割れは実験では観察されていない.鋼板の応力につい ては,鋼板の熱膨張へ対するコンクリートの拘束によ って圧縮応力が発生しているが,鋼板を降伏させるレ ベルのものではないことが確認できる.水蒸気圧およ び温度を入力したCase-S3では,図-13よりCase-S2と同様 に実験で観察されたひび割れと同程度のものが発生す ることが確認できた.一方,鋼板の応力履歴について は概ねCase-S1と同様となっている.以上,今回実施し たFEM解析は,試験において発生したコンクリートの ひび割れの大半は熱応力によるものであり,鋼板の降 伏については水蒸気圧による鋼板の曲げに起因すると いう傾向となった.

4. 結論および今後の課題

耐火材を設置した鋼コンクリートサンドイッチ構造 の耐火実験を対象に,有限要素法による熱伝導解析お よび熱応力解析を実施した結果,以下の知見が得られ た.

1)熱伝導解析では、鋼材とコンクリートや耐火材間に 若干の空気層をモデル化することによって、実験値と 解析値が一致した.

2) 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 ルとして計算したところ,耐火実験でのひび割れの発 生状況を比較的良く再現できた.

3)本検討におけるFEM解析では、耐火実験で観測された

コンクリートのひび割れは主に熱応力に起因し、鋼材 の降伏レベルの応力は水蒸気に起因しているという傾 向となった.

これらの結果について今後継続して耐火実験を実施 し、ひび割れの発生時期及び鋼材の降伏理由について 更に詳細な検討をおこなっていきたい.

参考文献

- 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
- 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
- 3) 松尾幸久,清宮理,今田徹:各種覆工に対する耐 火板を用いた耐火設計,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,2004.10, pp.227~232
- 4) 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(2005年11月に掲載予定)
- 松田貴之,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,第3回 DIANA 国際会議論文集,2002.10, pp. 1–10
- 6) TNO-Diana BV : DIANA User's manual Material, 2002. 9
- コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], pp.19-29 土木学会,平成14年3月

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

Osamu Kiyomiya , Akihiro Nakai, Kenichi KUDO and Kunio YAMAMOTO

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.