

沈埋トンネル接合部の耐火被覆材の性能実験と数値解析

Test and Numerical Simulation of Fire Protection Material of Immersed Tunnel

飯田 博光*, 小林 亨**, 近 信明***, 清宮 理****

Hiromitsu Iida and Toru Kobayashi and Nobuaki Kon and Osamu Kiyomiya

*正会員 日本シールドコンサルタント株式会社 技術部 (〒116 東京都荒川区西日暮里 2-26-2)

**正会員 日本シールドコンサルタント株式会社 技術部次長 (〒116 東京都荒川区西日暮里 2-26-2)

***正会員 株式会社 竹中土木 技術開発部 (〒104 東京都中央区銀座 8-21-1)

****正会員 工博 早稲田大学教授 土木工学科 (〒169 東京都新宿区大久保 3-4-1)

Recently some fire accidents in tunnels due to vehicles are reported and demand of fire protection has been increased. Joint part of the immersed tunnel is possibly damaged by vehicle fire, therefore fire test of prototype joint part and numerical simulation are carried out to confirm the validity of the fire protection materials. When the protection plate attached at the joint surface was damaged during the test, the fire invaded into the joint part to flame the rubber materials and glass fibers. Perfect protection is insured by the good quality materials and connection details at the fire protection plates.

Key words: vehicle fire, immersed tunnel, rubber gasket, heat transfer analysis, fire test.

1. はじめに

現在、国内の沈埋トンネルにおいて耐火構造に関する明確な基準がないのが現状である。沈埋トンネル内で万一車両事故等により火災が発生した場合、トンネル内面は直接炎にさらされることになり、特に、図-1 に示す沈埋トンネル接合部の近傍で火災が発生すると、柔継手構造（可撓構造）と止水機能を持つゴムガスケットおよび二次止水ゴムは、火災による炎を直接受けることになる。この場合、部材が焼失し所定の機能を発揮できずトンネルは甚大な被害を受けることが考えられる。もしくは、周辺の部材から伝達された熱により、ゴム部材の品質を保証できる温度を超え物性が変化しゴム部材としての性能を著しく低下させてしまうことも考えられる。沈埋トンネルのゴムガスケットは、供用後ほとんど交換不可能であり、耐火被覆無しでは致命的なダメージを受ける可能性がある。

以上のことから、沈埋トンネルにおいて、火災時に最も被害を受けやすい部位である接合部近傍に耐火構造を施すことで、沈埋トンネル接合部および本体部の耐火性能がどの程度維持できるかを、実物大接合部形状をモデル化し耐火実験を行い、その実験結果を基に耐火構造の妥当性の評価をした。さらに、有限要素法による熱伝導

解析を実施し、実験値¹⁾と解析値²⁾との比較を行い適正な接合部での耐火構造の確認をした。

本論文は、こうした沈埋トンネルの耐火構造に関する実験および解析から得た一連の研究結果をとりまとめたものである。

ゴムガスケット

2 次止水ゴム

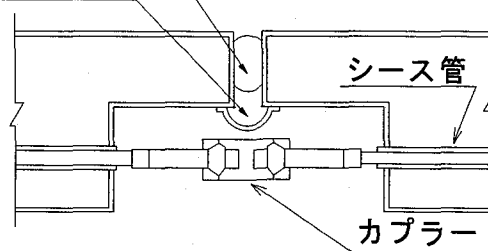


図-1 沈埋トンネル接合部概念図

2. 耐火実験

2.1 実験供試体

2.1.1 供試体形状

実験供試体は、縦 2250mm×横 2250mm×厚さ 1025mm で重量が約 10t の実物大接合部をモデル化した。

また、本実験では、ゴムガasketで止水性能の確認を行うことが目的ではないので実施工時のように圧縮力を加えずに矩形ゴム材を使用した。

また、カプラーおよび連結ケーブルは、実験供試体から省略した。

実験供試体の基本構造は、図-2 に示す通りであり、以下の理由により実物大を用いることとした。

- ①建築で行われている耐火実験は、製品として使用する実物大の部材・部位について行うのが一般的である。
- ②縮小モデルで行った場合、実験供試体の温度上昇が実物大より早くなるため、部材の物性変化も早く起こる。そのため、温度履歴等の結果は実物大と異なり、縮小モデルの結果を用いて実物大の温度履歴等を推定する評価方法が不明確である。
- ③縮小モデルの実験結果を解析的に評価する際、補強鋼板によるヒートブリッジ等が結果に影響すると考えられる。したがって、縮小モデルで解析的に評価しても、実際の構造物での評価になるか不明である。

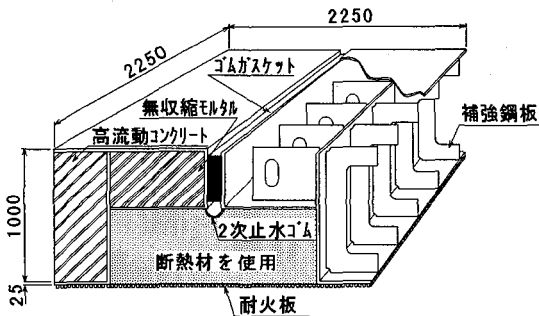


図-2 実験供試体の基本構造概念図

2.1.2 実験供試体使用材料

実験供試体の各部材に使用した材料を、表-1 に示す。

表-1 各部材に使用する材料

材料名	内 容
鋼 材	構造部材および補強部材は SM490A を使用
コンクリート※ ₁	高流動コンクリート（粉体系）を使用
モルタル	無収縮モルタルを使用
ゴムガasket	天然ゴム系矩形型ゴム材
二次止水ゴム	天然ゴム系（実断面寸法）厚さ 12mm
耐火板※ ₂	ケイ酸カルシウム系耐火板を使用
グラスウール	一般に市販されているグラスウールを使用
セミックグラサケット	一般に市販されているセミックグラサケットを使用

※₁ 使用材料および配合表を表-2 および表-3 に示す。

※₂ 本実験に使用した耐火板は、海外製で高温対応（耐火温度 1350℃）の耐火板である。海外での実施工実績が、かなり多くある。

表-2 使用材料

材 料	高流動コンクリート
セメント	高炉セメント B 種：比重 3.04
粗骨材	碎石：5～20mm・表乾比重：2.65 吸水率 1.08%
細骨材	陸砂：0.15～2.5mm・表乾比重 2.55 吸水率 1.73% 砕砂：0.15～5.0mm・表乾比重 2.62 吸水率 1.53% 陸砂：砕砂＝6：4
混和剤	高性能 A E 減水剤

表-3 コンクリート配合表

水セメント比 W / C %		細骨材率 S / a %		粗骨材容積 G V m ³ /m ³
35		4.94		0.52
単位量(kgf/cm ²)				高性能 A E 減水剤
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
170.0	485.7	791.2	815.3	C×1.3%

2.2 実験方法

2.2.1 加熱温度曲線

建築物火災等を想定した場合、国内では JIS 規格の加熱温度曲線を用いて実験を行うのが一般的である。

しかし、本実験は、沈埋トンネル内で危険物積載車両事故により火災が発生した場合を想定している。沈埋トンネル内で危険物積載車両が火災を起こした場合、危険物の燃焼により強い炎と急激な温度上昇が起きると推測されることから、JIS 規格以上の加熱温度曲線が要求される。

耐火実験では、沈埋トンネル内で危険物積載車両が火災を起こした場合の状況を再現することとしたが、現在、国内においてこれに準拠した加熱温度曲線が存在しないため、海外で採用されている加熱温度曲線で検討した。

ここでは、ドイツで採用されている「道路トンネルの構築と管理に関する基準（RABT）」での加熱温度曲線を基本とし、実験での加熱温度曲線は、耐火炉の性能が 1200℃に十分対応できないため RABT の加熱温度曲線をそのまま用いることができない。そのため、耐火炉の性能を考慮して以下の①～⑥に示すように設定した。

- ①実験開始 5 分間で 1050℃まで耐火炉内温度を上昇
- ②耐火炉内温度 1050℃を 60 分間保持
- ③保持後 5 分間で 1200℃まで炉内温度を上昇
- ④耐火炉内温度 1200℃を 10 分間保持し実験終了
- ⑤実験終了後耐火炉および実験供試体は自然除冷

RABT および実験での加熱温度曲線は、図-3 に示す。

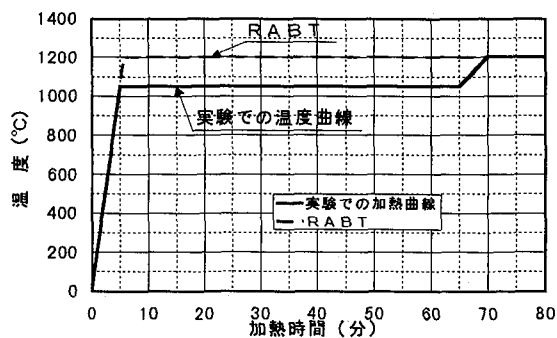


図-3 実験時の温度加熱曲線

2.2.2 加熱方法

本来、沈埋トンネル内で発生した火災での温度分布は、側壁部に比べ天井部が高温となることから再現性を考慮した場合、実験供試体を水平に設置して実験を行うことが好ましい。しかし、今回の実験供試体重量が約10tと重量物であることと寸法の関係から実験供試体を水平にした状態で水平式耐火炉に設置することができなかったため、実験供試体を立てた状態で設置する壁式耐火炉で実験を行った。実験供試体が、耐火炉の受熱面の大きさより小さいため供試体が耐火炉と一体になるような加工を施し、外部に炎が吹き出さないように補助仕切を設置した。

図-4 および図-5に実験供試体の設置状況を示す。

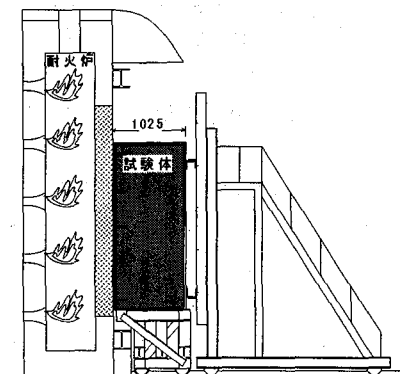


図-4 実験供試体の設置状況（側面図）

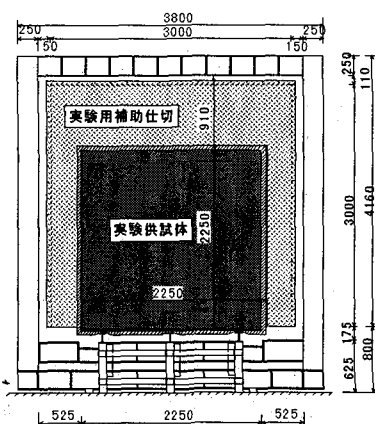


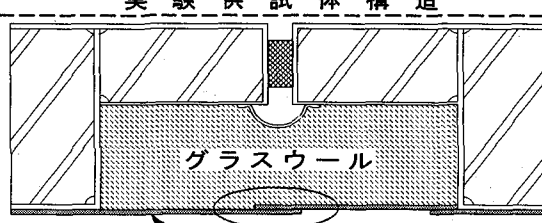
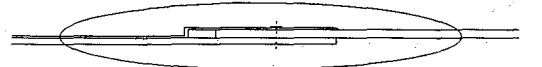
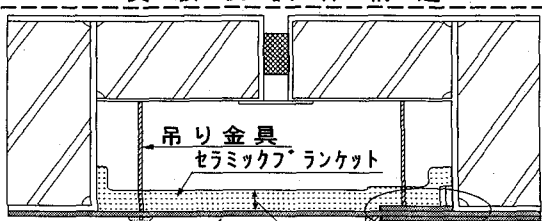
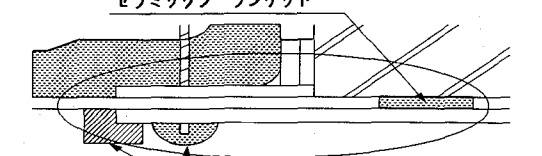
図-5 実験供試体の設置状況（平面図）

2.3 実験ケース

沈埋トンネルは、火災時に最悪でもゴムガスケットの焼失もしくは品質を保証できる温度を超えない耐火構造にしなければならないことと、接合部は柔継手機能を有していることから可撓構造を接合部耐火構造に装備しなければならない。実験での可撓構造は、横断方向の変形については、沈埋函せん断キーの効果期待できると判断し、縦断方向のみについて変形を±10cm考慮した可撓構造とした。このことから、表-4に示す2ケースについて実験を行い、沈埋トンネルに対する耐火構造の有効性を確認した。

各ケースの可撓構造位置は表-4に示すように、ケース1が接合部の中央に耐火板を突き合わせて設置し、ケース2は本体部側に耐火板をはさみ込む構造として設置した。

表-4 実験ケース

ケース1	
耐火被覆 ケイ酸カルシウム系耐火板+グラスウール	
実験供試体構造	
	
厚さ25mm	
可撓構造（実験供試体構造楕円部）	
	
ケース2	
耐火被覆 ケイ酸カルシウム系耐火板+セラミックブランケット	
実験供試体構造	
	
厚さ25mm 厚さ100mm	
可撓構造（実験供試体構造楕円部）	
セラミックブランケット	
	
ハッチ加工	

ケース2の接合部可撓構造では、ケース1のように耐火板を接合部中央で突き合わせる耐火構造とは違い、接合部全体を1枚の耐火板で覆い可撓構造を本体部側に設

ける仕様としたことから、耐火板を自立させることが困難であると考え、取り付けの補強としてM12のネジバーを吊り金具として耐火板を固定した。また、受熱面の可撓部および取り付け金具からの伝熱を軽減するためセラミックブランケットによるパッチ加工を施した。

2.4 測定項目

測定項目および測定器は、表-5 に示す。

表-5 測定項目および測定器	
測定項目	測定器
・ 耐火炉内温度	熱電対 (141 点)
・ 外気温度 (実験棟内温度)	静歪み測定器 (1 台)
・ 実験供試体部材温度	スイッチボックス (3 台)
	パソコン (1 台)

2.5 測定間隔

測定は、実験開始から1分毎とした。

2.6 各材料の品質保証温度

各材料の品質を保証できる温度を、表-6 に示すように設定し、実験結果が品質保証温度以下であれば適正な耐火構造として評価できることとした。

表-6 各材料の品質保証温度	
材料名	品質保証温度 (°C)
ゴム部材 ③	100
鋼板 ④	350
コンクリート ④	500

2.7 実験結果

2.7.1 実験加熱温度曲線と耐火炉内温度

図-6 は、実験中の耐火炉内温度と想定した加熱温度曲線との関係と比較したものである。図中に示す炉内温度代表値は供試体耐火板から 5cm 炉内側の供試体最上部での値である。これより、耐火炉内温度は想定した加熱温度曲線とほぼ一致した履歴となっており計画通りの温度が再現できた。

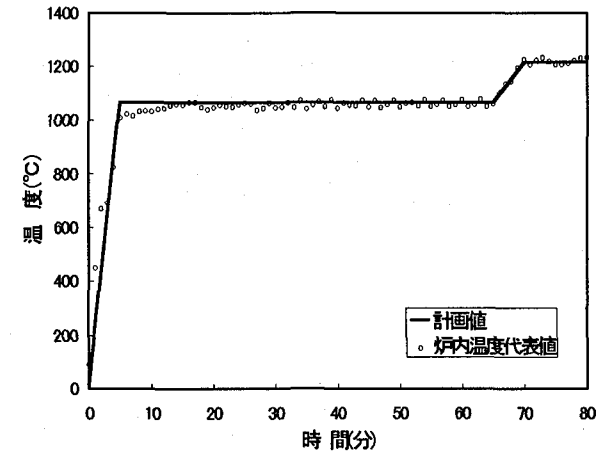


図-6 加熱温度曲線と耐火炉内温度の関係

2.7.2 温度履歴

各ケース沈埋函の本体部と接合部に区別し、各部材の温度履歴について整理した。

(1)実験ケース 1

実験ケース 1 での各部材の温度測定位置を図-7 に示す。

A-A断面は本体部断面を示し、B-B断面は接合部断面を示す。図-7 中に示す番号の説明を以下に示す。

- ① : 耐火板裏面温度
- ② : 鋼板裏面温度
- ③-1~7 : コンクリート温度
- ④ : グラスウール温度
- ⑤ : 二次止水ゴム表面温度
- ⑥ : ゴムガasket表面温度

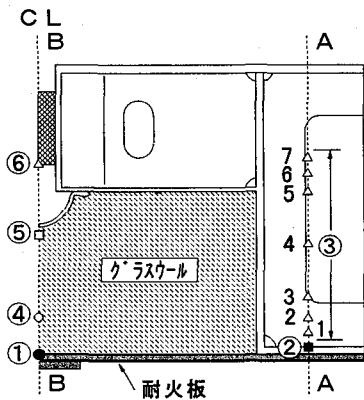


図-7 温度測定位置 (ケース 1)

図-8 に本体部の実験結果を加熱時間で 10 分, 35 分, 65 分, 80 分後の温度と加熱面からの距離の関係で示し、図-9 に本体部の各部位の温度履歴を集計したものを示す。

図-8 および図-9 より、実験開始 80 分後の鋼板裏面温度は 157°C、鋼板裏面から 25mm 離れたコンクリート部温度は 55°C であった。以上のことから、鋼材およびコンクリートに影響を及ぼすような温度上昇は見られず、本体部を想定した耐火構造で、十分な耐火性能を得ることが確認できた。

図-10 に接合部の実験結果を加熱時間で 10 分, 35 分, 65 分, 80 分後の温度と加熱面からの距離の関係で示し、図-11 に接合部各部位の温度履歴を集計したものを示す。

図-11 より、耐火板裏面温度は実験開始 20 分後から温度上昇を確認し、実験開始 35 分後から一段と急激な温度上昇が確認できた。グラスウールについても実験開始 30 分後から急激な温度上昇を確認し、実験開始 45 分後には 700°C を超える温度となり可撓構造部より炎の吹き出す様子が目視で確認され、同時に耐火板のひび割れも確認された。ケース 1 のような突き合わせによる構造は、耐火板が本体側だけで固定された片持ち構造のため、

加熱中に耐火板端部が容易に変形し、突き合わせ部が開いて、炎が接合部内部に入り込みグラスウールの急激な温度上昇をしたと推測できる。このことにより、ゴム部材についても、二次止水ゴムが完全に焼失し、ゴムガスケット部の一部表面も焼失した。

実験終了時の耐火板裏面温度は、1037℃であった。

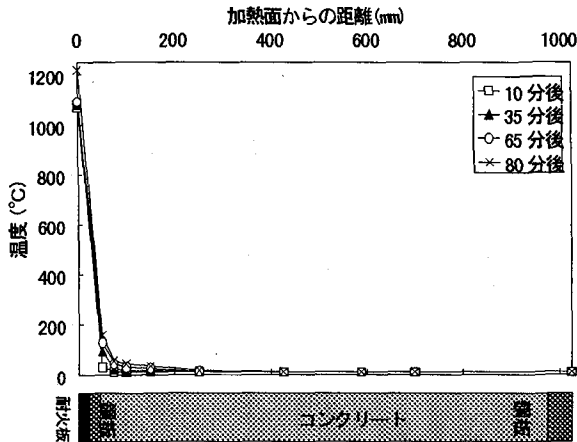


図-8 本体部温度分布 (ケース 1)

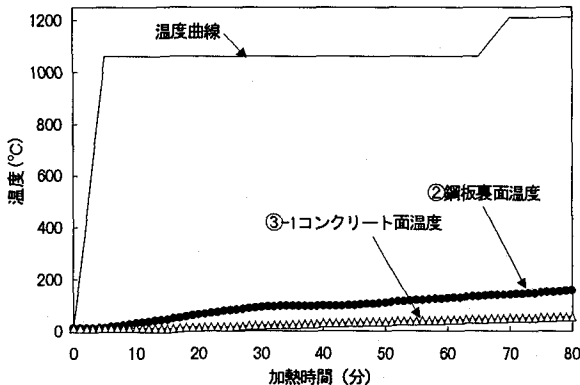


図-9 本体部温度履歴 (ケース 1)

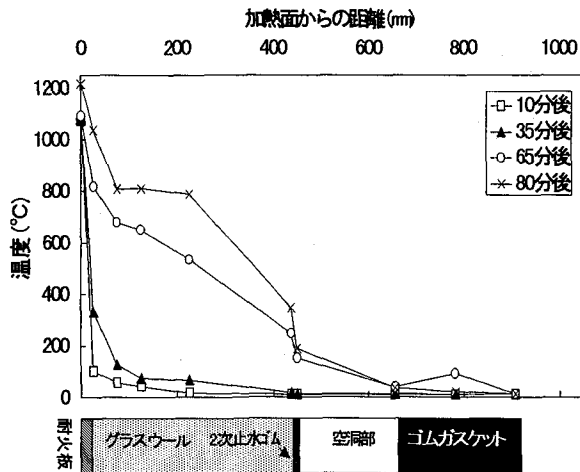


図-10 接合部温度分析 (ケース 1)

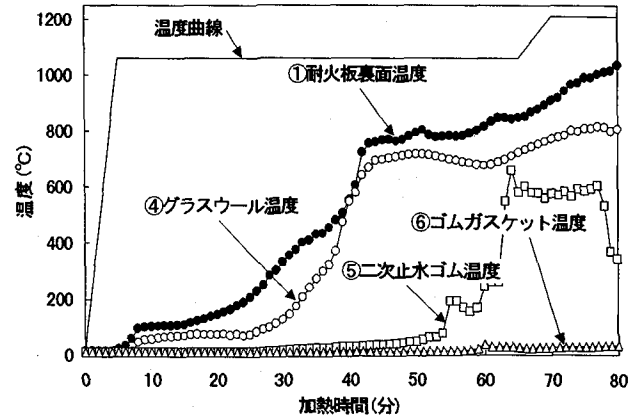


図-11 接合部温度履歴 (ケース 1)

(2)実験ケース 2

実験ケース2での各部材の温度測定位置を図-12に示す。

A-A断面は本体部断面を示し、B-B断面は接合部断面を示す。図-12中に示す番号の説明を以下に示す。

- ① : 耐火板裏面温度
- ② : 鋼板裏面温度
- ③-1~7 : コンクリート温度
- ④ : グラスウール温度
- ⑤ : 二次止水ゴム表面温度
- ⑥ : ゴムガスケット表面温度

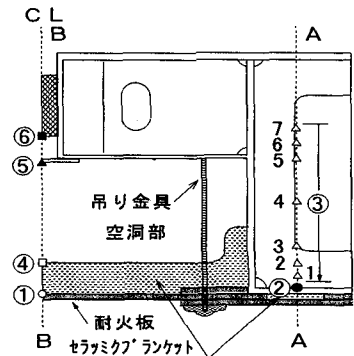


図-12 温度測定位置 (ケース 2)

図-13に本体部の実験結果を加熱時間で10分、35分、65分、80分後の温度と加熱面からの距離の関係で示し、図-14に本体部の各部位の温度履歴を集計したものを示す。

なお、二次止水ゴムは、実験ケース1で焼失してしまったことから厚さ12mmの板ゴムで代用した。

図-13および図-14より、実験開始80分後の鋼板裏面温度は96℃、加熱面から25mm離れたコンクリート部温度は41℃であった。ケース1同様、本体部を想定した耐火構造で、十分な耐火性能を得ることが確認できた。また、耐火板裏面温度がケース1より低い温度になった理由として、ケース2の測定位置が可撓部に位置し、耐火板とセラミックブランケットの複合構造としているた

め、耐火被覆としての厚さがケース1より25mm厚くなっているためと考えられる。

図-15に接合部の実験結果を加熱時間で10分、35分、65分、80分後の温度と加熱面からの距離の関係で示し、図-16に接合部の各部位の温度履歴を集計したものを示す。

図-16より、耐火板裏面温度は、実験開始20分後から上昇し、実験開始80分後で937℃まで上昇したが、耐火板裏面に設置したセラミックブランケットの裏面温度は、実験開始10分後から温度上昇をし70℃程度で保持されていることが確認された。二次止水ゴムおよびゴムガスケットは、顕著な温度上昇は確認されず実験開始80分後で、二次止水ゴムが41℃、ゴムガスケットが19℃とゴム部材に影響を及ぼす品質保証温度100℃を超える上昇は確認されなかった。

また、耐火板を固定するために配置したM12ネジバーの吊り金具は、耐火板外側で厚さ25mmのセラミックブランケットによりパッチ加工を施した。ネジバーは耐火板を貫通しているため、ヒートブリッジの影響により内部の温度上昇が懸念されたが、セラミックブランケットの裏面温度とその位置における吊り金具の温度を比較すると、ほぼ似た温度履歴を示し、ネジバーの80分後の温度は80℃であった。

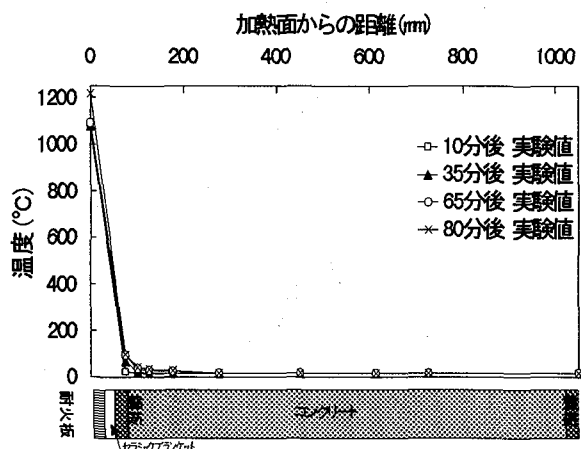


図-13 本体部温度分布 (ケース2)

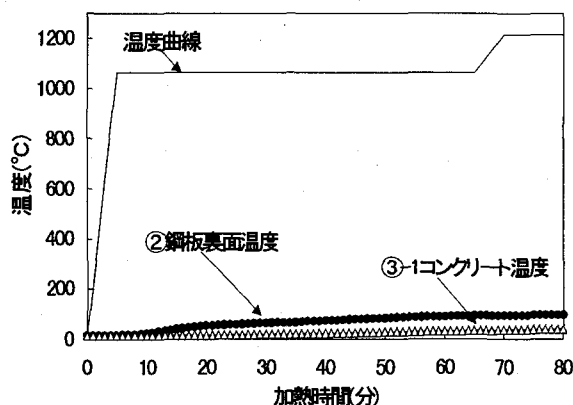


図-14 本体部温度履歴 (ケース2)

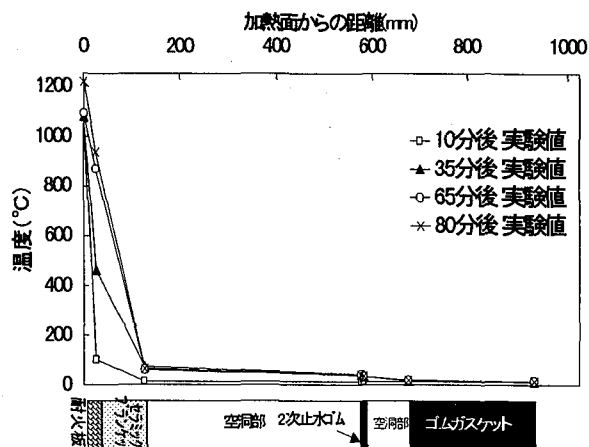


図-15 接合部温度分布 (ケース2)

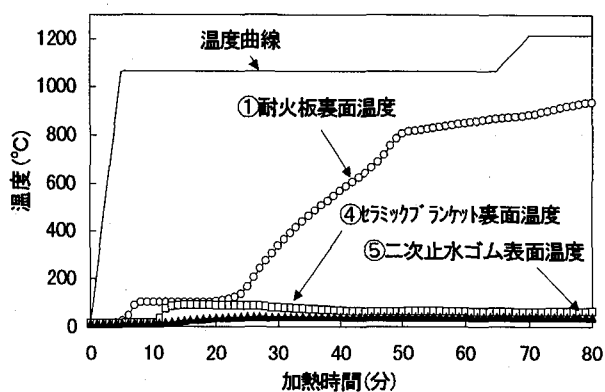


図-16 接合部温度履歴 (ケース2)

3. 熱伝導解析

耐火実験では、耐火板とセラミックブランケットによる耐火構造の有効性を確認することができた。ここでは、有限要素法による熱伝導解析を実施し解析値と実験値との比較を行い、本解析による適用性を確認した。解析は、実験ケース2の構造をモデル化し、ゴムガスケット部のある接合部と本体部の2ケースについてそれぞれ行った。

3.1 解析条件

解析条件は、以下の項目に示す通りとする。

①図-17に解析モデルを示す。解析は本体部、接合部をそれぞれモデル化した1次元の有限要素法によって行った。

モデルの要素数は、本体部が120要素、接合部が93要素とした。解析時間ステップは1分毎とした。

②材料の熱伝導率と比熱は、温度依存性を考慮した非線形材料として扱った。

表-7に使用した熱伝導率と比熱の非線形性を表す回帰式と密度を示す。

図-18に代表的な材料の熱伝導率を示し、図-19に比熱を示す。

③材料に含まれる水分の蒸発潜熱の影響は無視した。

- ④初期温度は実験時の初期温度 15℃の一様とした。
 ⑤加熱条件は想定した加熱温度曲線として、加熱終了の 80 分まで解析を実行した。
 ⑥非加熱面側は熱伝達境界として雰囲気温度は 15℃の一定とした。
 ⑦非加熱面側の熱伝達率は、 $\alpha=8.0(\text{kcal}/\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})^5$ とした。
 ⑧空洞部における熱伝達は、自然対流と伝導を無視し、部材間の平行輻射だけを考慮した。セラミックブランケットと 2 次止水ゴムの合成輻射率を $\epsilon=0.68$, 2 次止水ゴムとゴムガスケットの合成輻射率は $\epsilon=0.95$ とした。
 ⑨部材の熱による変形はしないものとし、各部材は一体であるとした。

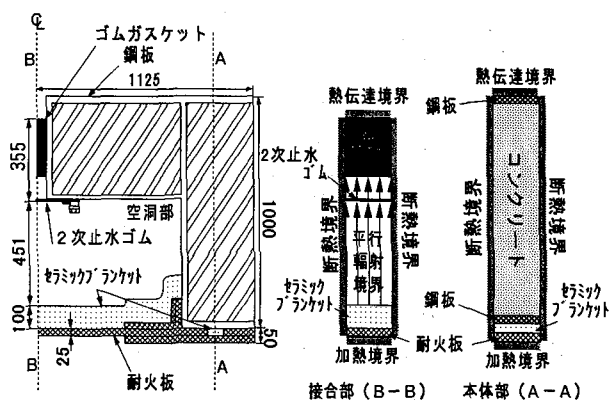


図-17 解析モデル図

表-7 解析に使用した物理定数^{6) 7)}

※表中の T は温度 (°C)

	λ 熱伝導率 (kcal/mh°C)	C 比熱 (kcal/kg°C)	ρ 密度 (kg/m ³)
耐火板	$0.146 + (4.95 \times 10^{-6})T + (9.83 \times 10^{-8})T^2$	$0.172 + (3.68 \times 10^{-4})T - (7.88 \times 10^{-7})T^2 + (8.40 \times 10^{-10})T^3$	870
コンクリート	$2.48 - (4.37 \times 10^{-3})T + (3.11 \times 10^{-6})T^2$	$0.167 + (2.93 \times 10^{-4})T - (1.61 \times 10^{-7})T^2$	2300
鋼材	$47.30 - (2.60 \times 10^{-2})T - (1.45 \times 10^{-5})T^2 + (1.82 \times 10^{-8})T^3$	$0.115 + (1.91 \times 10^{-7})T^2$	7850
ゴム材	0.166	0.52	1290
ガラスウール	0.034	0.16	24
セラミックブランケット	$2.40 \times 10^{-2} + (2.79 \times 10^{-5})T + (1.61 \times 10^{-7})T^2$	0.21	130

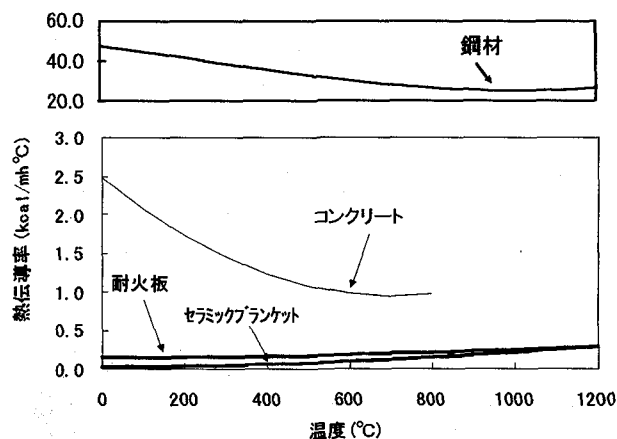


図-18 材料の熱伝導率

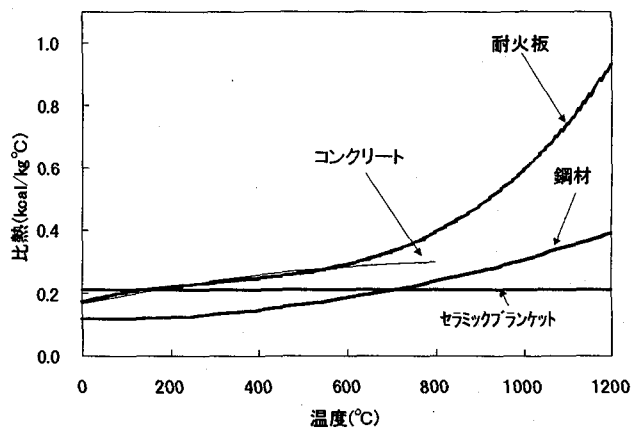


図-19 材料の比熱

3.2 解析結果と実験との比較

(1) 本体部

表-8 は、耐火板裏面温度と鋼板裏面温度について実験値と解析値で整理する。

図-20 は、実験値と解析値で比較した 35 分, 65 分, 80 分後の温度分布を加熱面からの距離で整理したものを示す。

鋼板の裏面温度の解析値は実験値に比べていずれの経過時間でも 40℃程度低い値となっている。また、実験値

と解析値ともに、加熱面より 200 mm 程度離れると温度はほとんど上昇していない。

図-21 に解析結果と実験結果を加熱時間履歴で比較した。鋼板の裏面温度実験値は、加熱開始 10 分後より緩やかな温度上昇を示したが、解析値は実験値ほどの温度上昇は見られない。また、コンクリート内部は、蒸発潜熱の影響をうける 100℃に達していないため、表-8 のように実験値をよく再現できた。

表-8 本体部温度分布の比較 (ケース 2 解析) (°C)

		35 分後	65 分後	80 分後
鋼板裏面	実験値	68	93	96
	解析値	24	45	55
コンクリート*1	実験値	22	35	41
	解析値	19	34	42

*1 鋼板裏面より 25mm 離れた位置

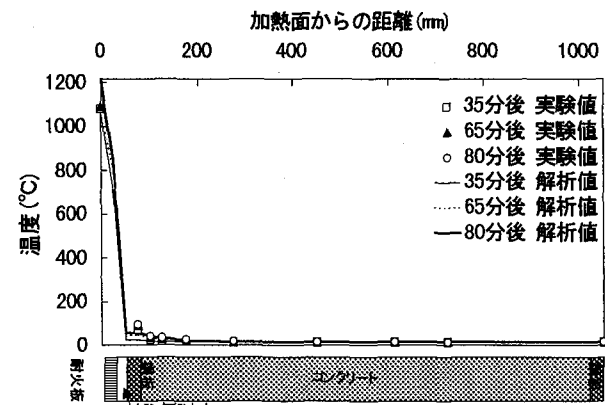


図-20 本体部温度分布 (ケース 2 解析)

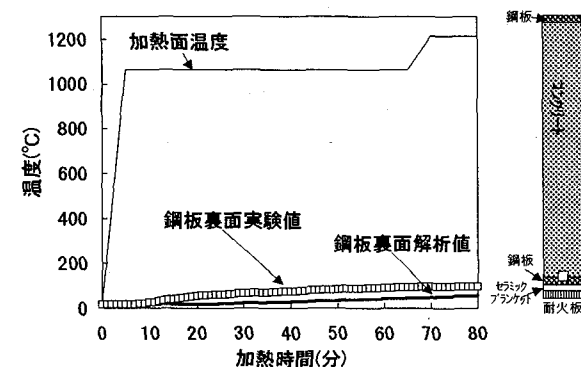


図-21 本体部温度履歴 (ケース 2 解析)

(2) 接合部

表-9 は、耐火板裏面温度と鋼板裏面温度について実験値と解析値で整理する。

図-22 は、実験値と解析値で比較した 35 分、65 分、80 分後の温度分布を加熱面からの距離で整理したものを示す。

図-23 に接合部の結果を加熱時間で、35 分、65 分、80 分後の温度と加熱面からの距離で示す。耐火板の裏面温度は、35 分後では、実験値の 462°C に対して、解析値が 717°C と約 250°C 高い結果となった。また、セラミックブランケットの裏面温度は解析値の 80 分後は、90°C 程度であるが実験値ではいずれの時間においても温度が 70°C 程度と一定である。図-23 に加熱時間履歴と比較した。耐火板の裏面温度は 100°C までは実験値と解析値はほぼ一致しているものの実験値は 100°C で約 15 分間の停滞があるが、解析値ではそれが見られない。これは、耐火板に

含まれる水分の蒸発潜熱の影響を解析では考慮していないためと考えられる。図の傾きに相当する温度上昇速度はほぼ一致している。また、80 分後の温度についてもほぼ一致している。一方、セラミックブランケットの裏面温度は、実験値が 10 分後から 90°C 近くまで温度上昇し、その後、ほぼ 70°C と一定になるが、解析値は 60 分後よりゆるやかに温度上昇し始め、最終的に実験値より約 20°C 高い結果となった。80 分後の 2 次止水ゴム実験値は、41°C に対して、解析値が 25°C であった。また、ゴムガスケット実験値は 19°C に対して、解析値が 15°C であった。いずれも実験値がやや高い傾向にあるが、ゴムの品質保証温度 100°C 以下を満足している。ゴムガスケットの温度が解析においても安全であることが確認できた。

表-9 接合部温度分布比較 (ケース 2 解析) (°C)

		35 分後	65 分後	80 分後
耐火板裏面	実験値	462	868	937
	解析値	717	874	931
セラミックブランケット裏面	実験値	73	62	65
	解析値	15	43	87
二次止水ゴム表面	実験値	43	41	41
	解析値	15	18	25
ガスケット表面	実験値	17	19	19
	解析値	15	15	15

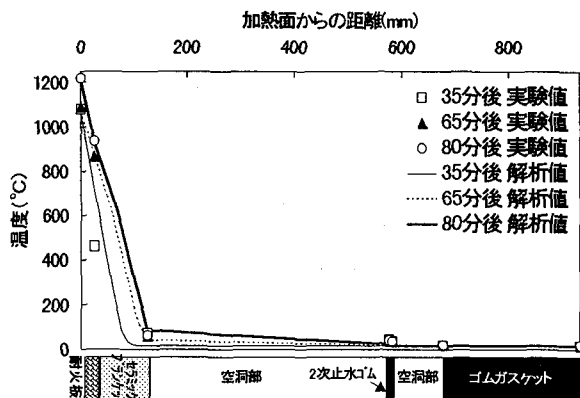


図-22 接合部温度分布 (ケース 2 解析)

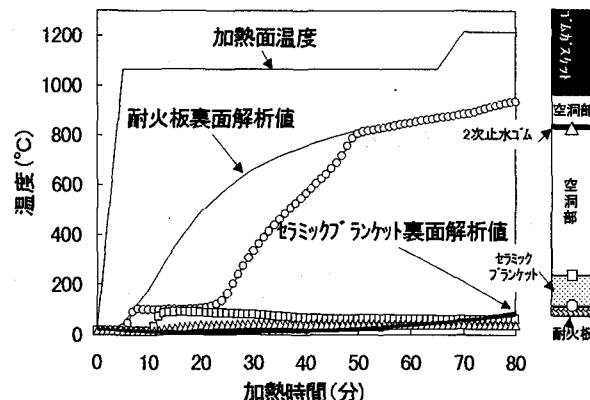


図-23 接合部温度履歴 (ケース 2 解析)

4. 結 論

- (1) 沈埋函本体に耐火材を被覆することにより RABT「ドイツ道路トンネルの構築を管理に関する基準」に準じた温度履歴に対して本体部となる鋼板とコンクリート材料の温度は、初期温度 15℃が 80 分後には、ケース 1 で 160℃程度であり十分品質保証温度を満足する耐火被覆であると判断できた。特に、本体部は、熱容量の大きいコンクリートが耐火板の背面に位置するため、本体自体の温度は上昇しにくいので、今回使用したような厚さ 25mm の耐火板だけによる耐火構造で十分であった。
- (2) 接合部に耐火材を被覆する方法として、中央部あるいは端部に可撓部を設けた。ケース 1 では、可撓構造を中央部に設けたことから、突き合わせ部より炎が浸入しやすくなったことと、断熱性は高いが可燃性材料であるグラスウールを使用したことが二次止水ゴムを燃焼させてしまった。ケース 2 は、耐火構造上弱点となる可撓構造部を本体側の端部に設け、断熱材に 1200℃でも燃えない材料のセラミックブランケットを配置した。耐火被覆材料および構造では、実験中にひび割れ等の損傷が生じなかったことから十分な耐火性能を保有していた。以上のことから、接合部は耐火被覆材の構造や材質の選定に注意することが重要である。
- (3) 有限要素法による熱伝導解析を行ったところ、温度上昇および温度分布等の実験値を比較的良好に再現できた。ただし、この場合、耐火被覆材の火災時の損傷等を考慮していないので、FEMのみでは十分な材料選定は難しいと考えるが、耐火実験と併せることにより種々の条件下での検討が出来、有益な情報を得ることが出来る。

参考文献

- 1) 飯田博光, 他 3 名: 沈埋トンネル接合部の耐火性能実験, 土木学会第 52 回年次学術講演会, PP. 582~583, 1997 年 9 月
- 2) 近信明, 他 2 名: 車両火災を想定した沈埋トンネル接合部の熱伝導解析, 土木学会第 52 回年次学術講演会, PP. 584~585, 1997 年 9 月
- 3) 西田善孝, 他 2 名: 沈埋トンネル接合部の止水ゴムの耐火特性について, 土木学会第 52 回年次学術講演会, PP. 486~487, 1997 年 9 月
- 4) 日本建築学会: 建築材料実験用教材, 1989 年 4 月
- 5) 日本コンクリート学会: コンクリート工学, VOL. 22, No. 3, 1984 年 3 月
- 6) 建設省: 建築物の防火設計法の開発報告書第 4 巻耐火設計法, 昭和 1988 年 12 月
- 7) 丸善: 伝熱工学 (上) 理工学海外名著シリーズ 37 (1997 年 9 月 26 日受付)