

(4) 沈埋トンネルでの車両火災を想定した 合成構造部材の耐火実験

工藤 健一¹・山本 邦夫²・清宮 理³

¹正会員 国交省近畿地整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)
E-mail:kudou-k86s3@pa.kkr.mlit.go.jp

²正会員 国交省近畿地整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)
E-mail:yamamoto-k86s4@pa.kkr.mlit.go.jp

³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

大阪港において鋼・コンクリートイッチ構造の沈埋トンネルの整備が進められている。サンドイッチ構造は車道面に鋼板が露出することから、車両火災に対する耐火被覆が必要であるが、この構造の加熱時の力学特性は十分に解明されていない。本報告は、沈埋トンネルの上床版部材を珪化した供試体(3m×2.9m×0.5m)で、車両火災を想定したRABT曲線による加熱実験を実施したものである。耐火材としてボード系と吹付系を取り上げた。結論は以下の通りである。1)鋼殻内部に比較的大きな水蒸気圧力が発生する。2)充填コンクリートにひびわれが発生する。3)耐火材は加熱後大きな損傷は見られなかった。4)鋼板に比較的大きな応力が発生し、残留ひずみが発生する。これらの実験結果からサンドイッチ部材内の充填コンクリートのひびわれを抑制し、鋼板の応力を抑えられる耐火設計の考え方が必要と考えられる。

Key Words : immersed tunnel, composite member, fire test, deformation properties

1. 序論

沈埋トンネルは、陸上で製作した延長100m程度の沈埋函を海底で連結し構築される。近年、沈埋函の構造形式として、函体外面・内面とも鋼板で構成した鋼殻を製作し、鋼殻内に高流動コンクリートを充填して合成構造とするサンドイッチ構造を採用する事例が増えており、現在、大阪港において本構造を採用した水底トンネルの整備を進めている。

サンドイッチ部材の構造上の特徴は、60cmピッチで配置したずれ止め(L型鋼)で鋼板とコンクリートとの一体性を確保し曲げモーメントに抵抗させていること、せん断力に対して3m間隔で縦横に配置したせん断補強鋼板で抵抗させていることである。

また、図-1に示すように、鋼板が道路面に露出することになる。したがって、トンネル内で発生する恐れのある車両火災から函体を守るため、道路面の鋼板表面に耐火材を施工する必要がある。この耐火設計を行う際に

議論となることのひとつに、鋼板表面の設定許容温度があげられる。従来、道路トンネルにおいて、強度部材として扱う鋼材の設定許容温度は、材料強度の低下を考慮し、300~350とされる事例が多かった¹⁾。しかしながら、ずれ止めに配置した沈埋函の場合には、熱を受ける鋼板と充填コンクリート間の温度の違いによる変形差が、ずれ止めに応力として集中する可能性がある。

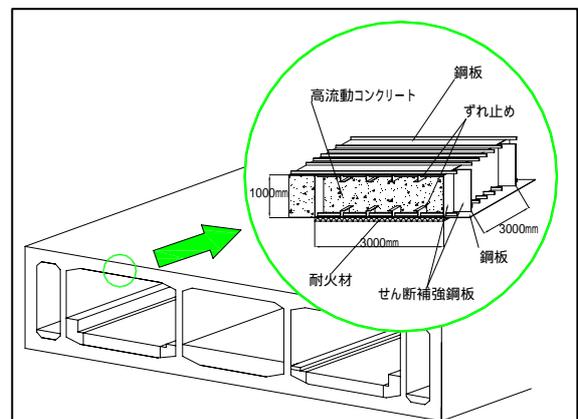


図-1 沈埋函の構造

また、部材内部にせん断補強鋼板が配置され、完全に密閉された構造（以下、密閉された部位を隔室と呼ぶ）となっており、コンクリートの温度上昇によってコンクリート中の水分が水蒸気化し、内部圧力として部材に作用する可能性がある。しかし現状では、こうした沈埋函構造特有の加熱変形特性について、十分な知見が得られておらず、実物に近いモデルでの耐火実験による検証が必要と考えられた。このため鋼材、コンクリートが当初設定していた許容温度程度になるように耐火材の厚さを調整し耐火実験を行った。

本報告は、実際の隔室とほぼ同形状（部材厚さのみ実寸の半分）の供試体で車両火災を想定した耐火実験を行い、高温作用時の力学特性を確認したものである。

2. 試験方法

供試体の種類を表 - 1 に示す。また、形状寸法および使用材料を図 - 2 および表 - 2 に示す。同形状の2体の供試体にボード系、吹付系の2種類の耐火材を施工し、それぞれ加熱炉で耐火実験を行った。

測定項目は、供試体内部圧力（加熱側鋼板裏面の圧力）、供試体内部温度、加熱側鋼板のひずみ、コンクリートのひびわれ状況とした。

本実験では鋼板表面温度が設計許容温度の350 に達するまでの部材の性能を確認することとした。炉内の加熱温度 - 時間曲線は、図 - 3 に示すRABT曲線とし、加熱時間60分で鋼板表面温度が350 となるよう耐火材の厚さを設定した。ただし、実際には燃焼時間60分で鋼板表面温度が350 に達しなかったため、type-1では80分、type-2では90分の加熱時間となった。

表 - 1 供試体の種類

type	供試体寸法 (mm)	耐火材
1	4200 × 2900 × 500	ボード系 1、2
2	4200 × 2900 × 500	吹付系

表 - 2 使用材料

種類	使用材料	備考
鋼板	SM490Y	t = 8 ~ 9mm
L 型鋼、F B 材	SS400	ずれ止め用
コンクリート	高流動 コンクリート	f'ck = 30N/mm ² フロー = 650 ± 50mm G _{max} = 20mm
ボード系耐火材 1	珪酸カルシウム、バルブ	t = 15mm
ボード系耐火材 2	アルミナ - シリカ	t = 10mm
吹付系耐火材	セメント、パーキュライト	t = 20mm メッシュ筋付き

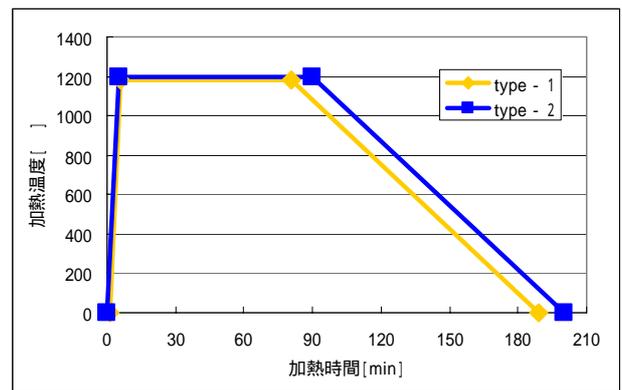


図 - 3 加熱温度 - 時間曲線

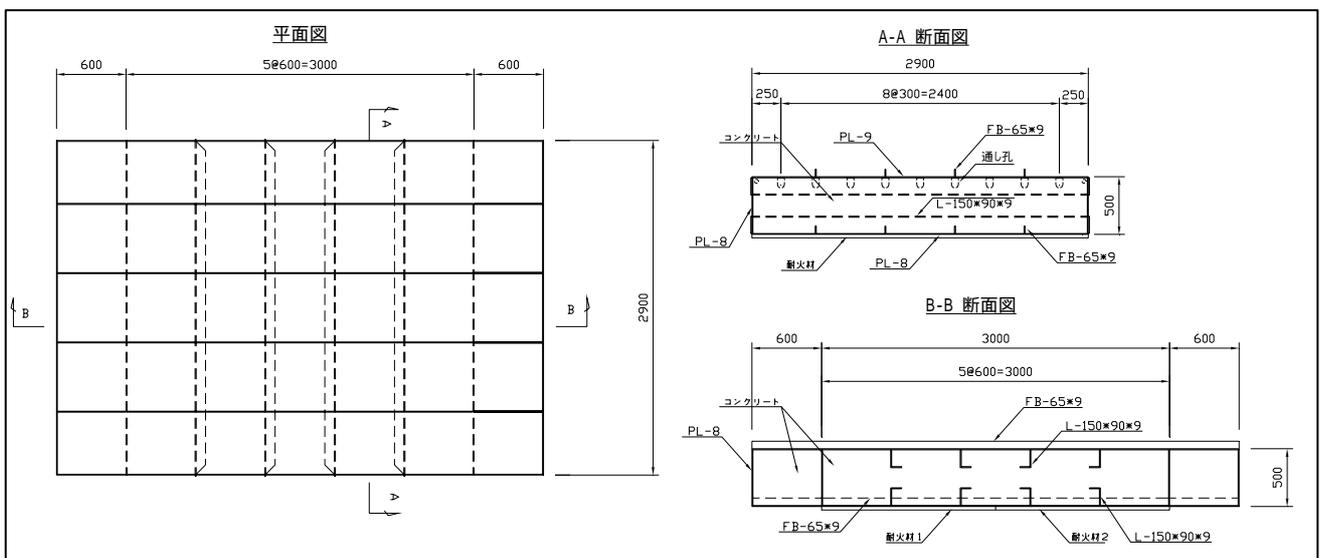


図 - 2 供試体の形状寸法

3. 実験結果および考察

(1) 耐火材の状況

耐火実験後の耐火材の状況を写真 - 1 および写真 - 2 に示す。ボード系、吹付系ともひび割れ、剥落など大きな損傷は見られなかった。



写真 - 1 ボード系耐火材燃焼後 (type-1)



写真 - 2 吹付系耐火材燃焼後 (type-2)

(2) 供試体内部圧力

図 - 4 に供試体の内部圧力 - 時間曲線を、図 - 5 に内部圧力計測位置図を示す。type-1では開始20分程度からずれ止め付近から水蒸気漏れが発生した。そのため圧力が小さくなっている。水蒸気漏れのなかったtype-2が真の圧力を示していると考えられる。圧力のピークは開始200分程度に現れた。ピーク時間は100 以上になるコンクリートの領域が最大となる時間とほぼ一致している。ピーク時の圧力は0.27MPaであった。ずれ止め間60cmの鋼板に内側からこの圧力が等分布荷重として作用するとすれば、鋼板には降伏強度を越える応力が発生することになる。したがって、内部圧力は鋼板の変形に少なくない影響を与えていると推察される。

(3) 供試体内部温度

図 - 6 および図 - 7 に供試体の内部温度 - 時間曲線を示す。両供試体ともコンクリートの温度ピークは鋼板の温度ピークより遅れている。

鋼板表面の最高温度とかぶり20mm位置のコンクリート

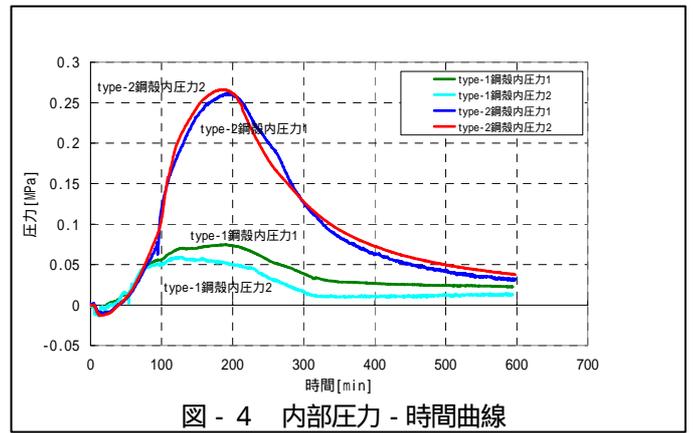


図 - 4 内部圧力 - 時間曲線

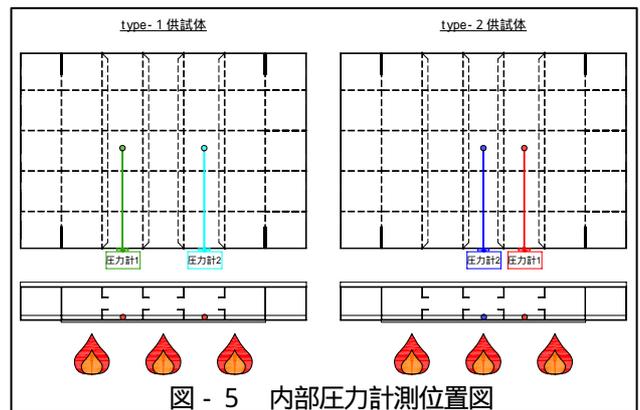


図 - 5 内部圧力計測位置図

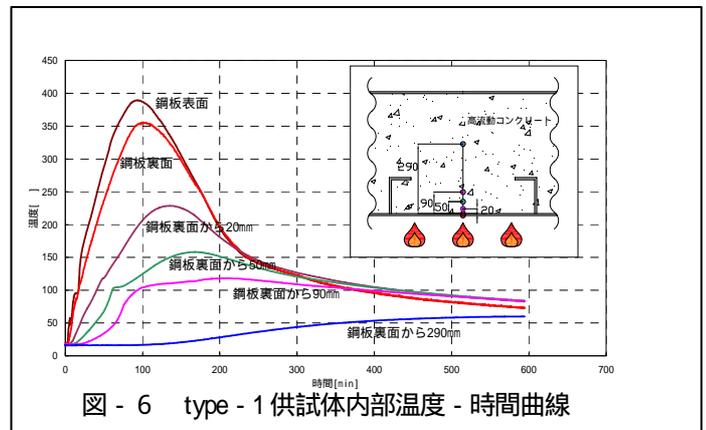


図 - 6 type - 1 供試体内部温度 - 時間曲線

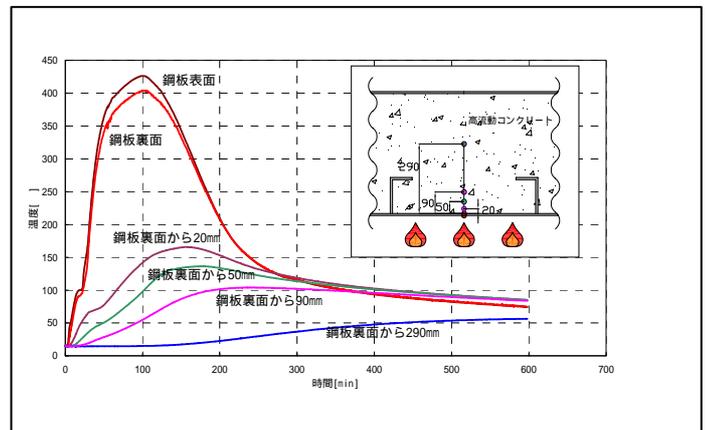


図 - 7 type - 2 供試体内部温度 - 時間曲線

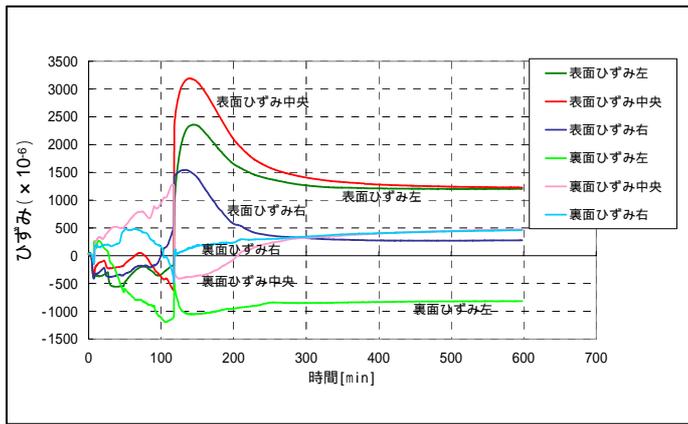


図 - 8 加熱側鋼板ひずみ - 時間曲線 (type-2)

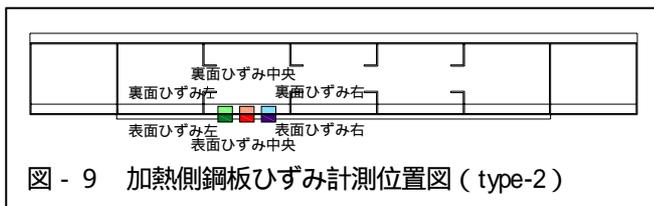


図 - 9 加熱側鋼板ひずみ計測位置図 (type-2)

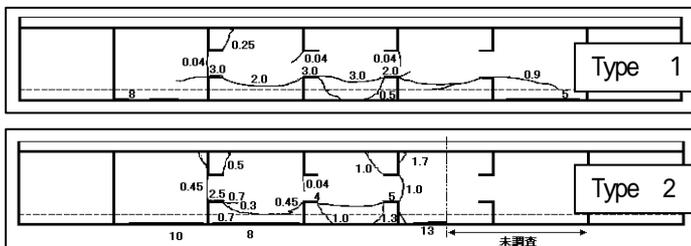


図 - 10 コンクリートひびわれ状況

の最高温度との差は、type-1 で 120 、type-2 で 230 と 2 つの供試体に違いがみられた。

type-1 の温度差が小さいのは、水蒸気漏れに起因していると考えられる。鋼殻構造の場合、加熱が進むと加熱側鋼板とコンクリートとの間に隙間ができ、隙間が熱の遮断層となり、コンクリートの温度が上昇しにくくなる事が報告されている²⁾。本実験によって、内部圧力の違いが遮断層の厚さに影響を与え、結果として内部の温度分布にも大きな影響を与えたと推察される。

(4) 加熱側鋼板のひずみ

図 - 8 に加熱側鋼板ひずみ - 時間曲線を図 - 9 に計測位置を示す。ひずみ履歴にばらつきがあるものの、鋼板の表面ひずみは、加熱時に圧縮側に推移し、除冷によって鋼板温度が下降する 120 分程度に急激に引張側に転じ

鋼板の降伏ひずみである $1,700 \times 10^{-6}$ を超えるひずみが発生していることがわかる。この引張ひずみは、内部圧力の影響だけでなく、除熱に伴う鋼板の収縮をコンクリートが拘束するためであろうと推察される。なお、温度分布が比較的平坦になり、内部圧力が減少した実験終了時においても比較的大きな値のひずみが残留した。

(5) コンクリートのひびわれ状況

耐火試験後、供試体を切断しコンクリートのひびわれ状況を観察した。図 - 10 に示すように、type-1,2 とほぼ同様のひびわれが観察され、上下ずれ止め間の鉛直ひびわれ、上下のずれ止め先端からのアーチ状ひびわれ、加熱側ずれ止め間の水平ひびわれ、の 3 種類が観察された。なお、ひびわれの発生時間、順序に関するデータは本実験では得ていない。

4. 結論および今後の課題

沈埋トンネルの上床版部材をモデル化した供試体で、車両火災を想定した耐火実験を実施した結果、次の結論が得られた。

- 1) 鋼殻内部に比較的大きな水蒸気圧力が発生する。
 - 2) 充填コンクリートには内部圧力と温度変化に起因する 3 種類のひびわれが発生する。
 - 3) 2 種類の耐火被覆材 (ボード系、吹付系) とともに加熱後大きな損傷は見られず、鋼殻の加熱変形に追従できることを確認した。
 - 4) 除冷時、加熱側鋼板に比較的大きな応力が発生し、残留ひずみも発生する。
 - 5) 車両火災からトンネル構造体を守るため、充填コンクリートのひびわれを抑制し、鋼板の応力を抑えられる耐火設計が必要と考えられる。
- 今後、追加の耐火実験を実施し、ひびわれ発生時期の確認、応力作用下での変形特性などについて確認する予定である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告, p.174, 2002.
- 2) 松尾、清宮、溝部、木村：合成構造トンネル部材の耐火性評価、土木学会第 57 回年次学術講演会、2002.

A FIRE MODEL TEST ON COMPOSITE MEMBER OF IMMERSSED TUNNEL

Kenichi KUDO, Kunio YAMAMOTO and Osamu KIYOMIYA

Fire mode test for the composite members was carried out to know their mechanical properties for design temperature-time curve. Concrete cracks were observed after tests and strains of the steel plate were fairly large beyond design values due to high temperature and vapor pressure. Further research works are required to cope with these phenomena.