

夢洲トンネルにおける耐火被覆の検討

Examination of Fireproofing Protection for Yumeshima Tunnel

森 玄*・金子義勝**・成瀬英治***

MORI Gen, KANEKO Yoshikatsu and NARUSE Eiji

* 前 (財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

** (財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

*** (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹兼第二調査部長

The present paper reports the result of review of the fireproof protection for the submerged Yumeshima Tunnel. The design method that had been examined in the past was reviewed again in consideration of an advance in technology and the recent situation. Experiments have been conducted on fireproof for the main part and the joint part of the tunnel. An enough performance of the fireproof material was confirmed for the joint part.

Key Words : test, fireproofing, protection, submerged tunnel

1. はじめに

大阪港夢洲トンネルは、夢洲と咲洲を結ぶトンネルであり、スーパー中樞港湾として指定された大阪港の物流機能強化等のために不可欠なインフラである(写真-1)。鉄道と道路を併設したトンネルで、海底部(沈埋工法)と陸上部(開削工法)からなり、トンネル延長は約2.1kmである。早期供用を目指し、現在は陸上アプローチ部の工事が進められており、沈埋函の製作も進行中である。

海底部沈埋函は8函で構成され、それぞれの延長は約100mである。沈埋函の構造は鋼殻セミフルサンドイッチ構造で、上床版および側壁はフルサンドイッチ構造、下床版はオープンサンドイッチ構造となっている。8~9mmの鋼板で覆われる空間は密閉構造となり、高流動コンクリートが充填される。沈埋函の可とう継手は、クラウンシールもしくはゴムガスケットでシールされる。

本稿では、海底部(沈埋函)の耐火被覆の検討結果について報告を行う。過年度より大阪港夢洲トンネル技術検討調査が実施されており、今回は当時の検討結果につ



写真-1 夢洲トンネル上空

いて、再度現状の技術レベルや社会情勢を考慮した耐火条件の確認を行い、また耐火実験を実施して沈埋函鋼殻構造を対象とした耐火被覆材の適用検討を行った。

2. 検討項目

沈埋函の耐火被覆材の選定については、過年度より検討されてきたが、いくつかの課題が残されたため、今年度は、以下の項目に絞って検討を行った。

2.1 熱膨張性と水蒸気圧による鋼板への影響検討

沈埋函車道部の上床版および側壁はフルサンドイッチ構造であり、隔室(3×3×1m)はせん断補強鋼板によって区切られ、完全に密閉された構造となっている。

コンクリートの温度が100℃を超えると、コンクリート内の水分が水蒸気化して各隔室内部の圧力を高め、それが鋼板に作用することが考えられる。さらに、鋼板は熱膨張によりたわむことが考えられるため、加熱時の鋼板の変形状況を確認することとした。また、現在設定している鋼、コンクリートの許容温度350℃の妥当性について、再度検証することとした。

2.2 鋼板の熱膨張による耐火被覆材への影響検討

鋼・コンクリート構造の沈埋函を対象とした耐火被覆材には、ボード系、吹き付け系、ブランケット系がある。中でも、これまで使用実績が最も多いのはボード系耐火被覆材であった。一方で、吹き付け系は剥離の可能性等があり、採用については慎重に扱われてきたが、経済性に優れ、また形状の自由度が高く施工性の点でも優位で

あるため、技術開発が進められてきた。その結果、大幅な性能向上が期待できるが、一方で吹き付け系の鋼殻構造への適用は、鋼殻の熱膨張や内部水蒸気圧によるたわみに対し、鋼板に固着した吹き付け系耐火被覆材の変形追従性が懸念されるため、今回耐火実験によって検証することとした。同時に、同条件下での比較検証を行うため、ボード系についてもあわせて実験を実施した。

2.3 クラウンシール継手部の耐火性能の確認

夢洲トンネルにおける沈埋函間の継手構造は、不等地盤沈下を考慮し、せん断方向に可動な構造であるクラウンシール継手を採用した。クラウンシール継手の実構造物への採用は、本トンネルが初めてとなる。継手の可動部は軸方向に250mm程度の開き、せん断方向に100mm程度の変位に追従可能となっており、耐火材も継手に対して同様の追従性能が要求される。そこで、軸方向とせん断方向の両変位に対応可能な、ブラケット系耐火被覆材について、変形追従性を含めた耐火性能を確認することとした。

3. 加熱曲線の設定

夢洲トンネルでは、H12年度に行われた耐火被覆の検討により、危険物車両の通行を禁止とすることから、耐火設計では火災最高温度1000℃以上、想定火災温度時間の曲線はハイドロカーボン曲線を採用している。ただし、本トンネルでは火災から30分後に消防隊が到着し、消火活動により冷却されると仮定し、30分後110分間の徐冷とした。一方、国内の耐火実験ではRABT曲線を採用していることが多い。他の実験事例との比較検証がしやすく、本実験で得られる成果の適用性が広がること、また、近年では危険物車両の火災に限らずトンネル内温度は1200℃以上に達する可能性があるとの議論が行われており、将来的にはRABT曲線に見直されていく可能性があるため、今回の耐火実験における加熱曲線は、最高温度1200℃、60分後徐冷とするRABT曲線を採用した。ハイドロカーボン曲線、RABT曲線を含めた、各種加熱曲線を図-1に示す。

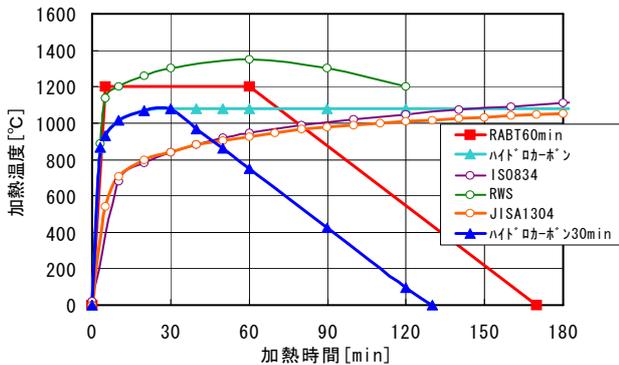


図-1 各種加熱曲線の比較

4. 耐火試験概要

耐火実験は、構造の違いから鋼殻一般部と継手部分に分けて各々試験体を製作し実験を行うこととした。

4.1 鋼殻一般部試験体

夢洲トンネルの沈埋函は、上床版と側壁部が約3mおきにせん断補強鋼板で仕切られているため、1ブロックの鋼殻構造を再現した試験体とし、スケール効果をなくすため、ほぼ実物大のものとした。耐火被覆材は、吹き付け系耐火材とボード系耐火材を採用し、各々1体ずつ、計2体とした。実構造物の挙動を再現するため、試験体は完全な密閉構造とし、各溶接部、計測器のケーブル取り出し口等には特に留意し、あらかじめ気密性試験により密閉状態を確認した。一般部試験体の概要を表-1に示す。

表-1 一般部試験体概要

数量	2体
寸法	縦3m×横2.9m×高0.5m
鋼殻材質	SM490Y
充填材	高流動コンクリート
耐火被覆材	試験体1 吹き付け系 試験体2 ボード系
許容温度	鋼材 350℃ コンクリート 350℃



写真-2 耐火試験状況
(中央が加熱炉、手前は一般部試験体2)

試験体下面(3m×2.9m)に耐火被覆材を装備して燃焼面とし、加熱炉においてRABT曲線による耐火実験を行った(写真-2)。耐火被覆材の厚みは、鋼殻およびコンクリートが許容温度350℃となるように設定した。想定した耐火被覆材の厚みに対して、RABT加熱曲線に従い60分間加熱しても管理温度が350℃に達しない場合は、燃焼時間を延長して鋼殻およびコンクリートが350℃に達するまで加熱を続けることとした。加熱開始後は、炉内平均温

度、耐火材裏面温度、鋼殻内温度、鋼板の熱膨張量およびたわみ量、鋼殻内圧力等の計測を行った。

4.2 継手部試験体

せん断方向、軸方向に100~250mm可動なクラウンシール継手に採用される耐火被覆材は、継手部と同様の变形追従性が要求される。吹き付け系耐火材では変形の追従は困難であり、ボード系耐火材にも限界があるため、継手部にはブランケット系の耐火被覆材を採用した。耐火試験は、継手部においてせん断方向に100mmのずれが生じた状態の試験体を用いて実施した。試験体断面図、試験体概要をそれぞれ図-2、表-2に示す。

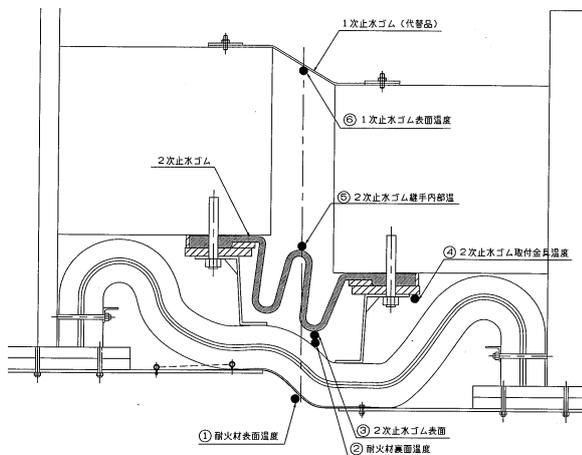


図-2 継手部試験体断面

表-2 継手部試験体概要

数量	1体
寸法	縦3m×横2.9m×高0.5m
鋼殻材質	SM490Y
充填材	高流動コンクリート
耐火被覆材	ブランケット系
許容温度	ゴム 75℃

試験方法は、一般部試験体と同様、試験体下面に耐火材を設置して加熱炉にて燃焼させた。加熱曲線はRABT曲線によることとし、継手部内部の2次止水ゴムが許容温度75℃を上回らないかどうかを確認した。

5. 試験結果と考察

耐火試験の結果とその考察について、以下の3項目について述べる。

5.1 一般部鋼殻試験体の挙動について

内部圧力の変化を図-3に示す。鋼殻内圧力は、加熱初

期は負圧となり、その後、試験体2では最大0.27MPaまで上昇した。初期圧力の負圧は、鋼板が熱膨張し密閉状態にある鋼殻の容積増大によるものと考えられる。また、その後の圧力の上昇は、鋼殻試験体密閉空間内で鋼殻内コンクリートの水分が加熱により蒸気化し、その水蒸気圧によるものと考えられる。なお、試験体1では鋼殻が損傷し蒸気漏れが発生している様子が観察された。

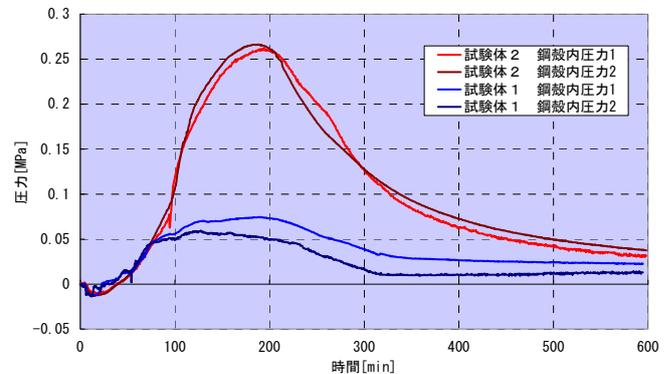


図-3 内部圧力の変化

試験体1と試験体2では、燃焼面鋼板のひずみ値に大きな差がみられた。試験体1および試験体2の内圧の最大値は、それぞれ0.07MPaおよび0.27MPaであり、蒸気が漏れたことによる内圧の違いが、鋼板のひずみ量に影響していると考えられる。密閉状態を確保できた試験体2では、-3,350~5,150μのひずみ値が記録され、鋼材の降伏ひずみ値(1,700μ)を超過している。加熱停止後の試験体における残留ひずみは、鋼板裏面で-2,250μ、鋼板表面で3,000μであった(図-4)。

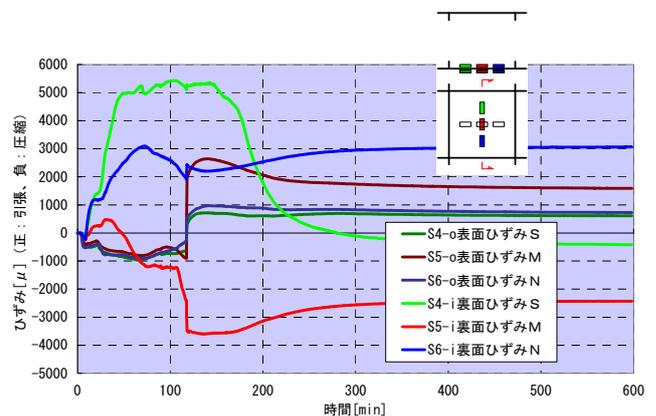


図-4 燃焼面ひずみ量の変化(試験体2)

今回の耐火実験では、鋼殻構造体の爆裂等の異常はみられなかった。しかし、実験終了後に試験体を切断し、断面を観察したところ、内部コンクリートに水平方向のひび割れが確認された(写真-3)。ひび割れの発生要因として、鋼・コンクリート合成構造における材料ごとの温度分布の差異による影響に加えて、内部圧力による影響が考えられる。



写真-3 ひび割れ発生状況 (試験体2)

また、両試験体において、一部、鋼板とコンクリート間に7mm程度の間隙が観察された(写真-4)。隙間は加熱面だけでなく、非加熱面である上部鋼板においても発生し、鋼板にはたわみが生じていた。



写真-4 鋼コンクリート間の剥離

5.2 耐火被覆材の変形追従性について

ひずみゲージおよび変位計、実験後の観察結果や打音調査により、熱膨張による鋼殻の変形が確認されたが、鋼殻の変形による耐火材の追従性や耐火性能に対する影響はみられなかった。すなわち、鋼殻の熱膨張に伴う変形追従性について、吹き付け系耐火材では、剥落や耐火性能の低下などは見られず、十分な変形追従性を有していた。また、ボード系耐火材についても、加熱後の冷却収縮によりひび割れが生じるものの、燃焼中の鋼板の熱膨張等変形による剥落等はなく、変形追従性については十分な機能を有していた。

5.3 クラウンシール部での耐火被覆性能

2次止水ゴムの表面温度は、ゴムの管理温度の目標値を下回り、65°C程度に抑えられた(図-5)。

継手部において、本耐火仕様は2次止水ゴムの耐火防護が可能であることを確認した。ただし、耐火材裏面温度は管理温度を超えて110°Cに達した。その原因は、耐火材と2次止水ゴムの裏面が接し、両者間で熱伝導があったと考えられる。したがって、耐火材は2次止水ゴムに極力接することのないよう設置することが重要であることが分かった。

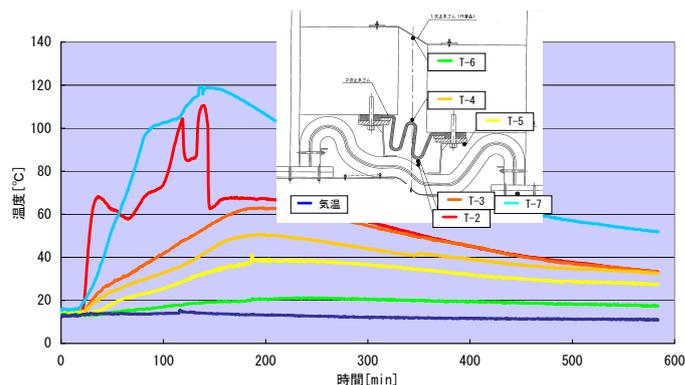


図-5 継手部試験結果

6. 今後の課題

今回の耐火実験結果より、今後の課題として以下の項目が挙げられる。

6.1 ひび割れの発生要因の検討

試験体切断後の観察により、内部コンクリートにひび割れを確認した。その発生要因として、鋼コンクリート合成構造の熱膨張による影響、内部圧力による影響、あるいはその両者の影響などが考えられるが、ひび割れ発生メカニズムについてはさらに詳細な検証が必要である。

6.2 管理温度の妥当性の検証

内部コンクリートに発生したひび割れや、鋼板に生じたひずみ等を考慮し、現状の管理温度である350°Cの妥当性について検討する必要がある。

6.3 耐火被覆材の施工方法の検討

今回、継手部試験体に使用したブラケット系耐火被覆材はそのボリュームが多く、表面のSUS板で抑えるなど、内部に収めるのに苦労した。側壁部への耐火材の設置方法や、作業効率を考慮した施工方法などについて、今後工夫する必要がある。

謝辞

耐火被覆材の検討について、「大阪港夢洲トンネル構造専門部会(委員長:清宮 理 早稲田大学教授)」が設置され、本稿は同委員会委員方々のご助言およびご指導を踏まえて取り纏めさせて頂いた。また神戸港湾空港技術調査事務所技術開発課の方々にも多大なるご協力を頂いた。ここに記して厚く御礼申し上げます。