

鋼コンクリート合成構造を用いた沈埋函の耐火被覆の検討

Examination for Fire performance of Immersed Tunnel using Steel -Concrete Composit structure

庄田明弘*・成瀬英治**

SHOUDA Akihiro and MARUSE Eiji

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 前 (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹兼第二調査部長

Steel- Concrete composit structure is adopted in the Naha Immersed tunnel. However, there is little knowledge about damage in a tunnel fire. In recent years, the design method in consideration of the heat stress in case of a fire is proposed. This paper reports some examination results on fireproof coating of steel-concrete composit structure.

Key Words : steel- concrete composition structure, fire performance

1. はじめに

那覇港沈埋トンネルは、那覇空港と波の上地区を結ぶ臨港道路の那覇ふ頭港口部に位置する海底トンネルであり、沈埋函を8函を直結させる延長 1.1km の自動車専用トンネルである。このトンネルの完成により、那覇港と那覇市内と那覇空港間の慢性的な交通渋滞の解消が期待されている (図-1)。¹⁾



図-1 那覇沈埋トンネル位置図

海底部の沈埋函は、鋼コンクリート合成構造が採用されている。この構造は鋼板とコンクリートを一体化したもので、鉄筋の使用を省略できることから製作期間の短縮、コストの縮減が図れる。那覇沈埋トンネルではすべての構造部材を合成構造とするフルサンドイッチ構造を国内で初めて採用した (図-2 参照)。

本報告は、フルサンドイッチ構造における火災時の鋼板表面の許容温度と耐火被覆仕様の概略について、現状の国内外の耐火技術動向や近年発生したトンネル火災事故及び大阪夢洲トンネルで実施された大規模加熱試験の結果を踏まえて検討するものである。但し、本報告では耐火被覆施工箇所のうち上床版を対象とした。

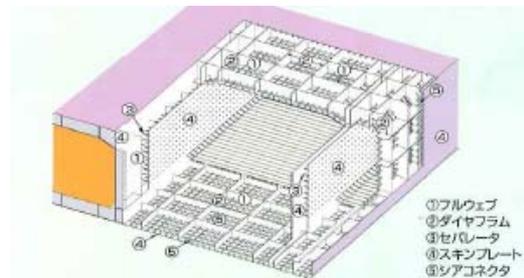


図-2 沈埋構造概念図²⁾

2. 沈埋函耐火被覆検討

2.1 検討フロー

本検討のフローは、図-3 のとおりである。

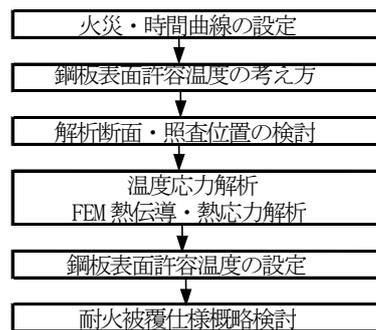


図-3 検討フロー図

2.2 火災・時間曲線の設定

那覇沈埋トンネルでは、平成 10 年に行われた耐火被覆の検討では、危険物車輛の通行を禁止することから、火災最高温度を 1000℃ と設定した。また消防署へのヒアリング結果から火災発生後、30 分以内で消火活動を開始することから、火災発生後 30 分で徐冷すると設定し、RABT 曲線を修正したものを採用した。近年の国内外の耐火技

術動向を調査した結果、RABT 曲線で最高温度 1200°C、30～60 分後 110 分間の徐冷を採用している例がある。EU 統一基準 (2006) 設定のための大規模燃焼実験では、木材とプラスチックを燃焼させたところ 1200°C 程度の温度が計測された³⁾。以上のことから本トンネルでの最高温度は、1200°C に変更した。徐冷開始までの燃焼時間は、ヒアリング結果を踏襲し 30 分とした。

ただし、リスク評価のため危険物車輛の進入を想定した場合は徐冷開始までの時間は 60 分とした。根拠としては、那覇市内を走行する危険物車輛のうち道路交通法の通行許可申請不要な最大車輛は、16KL 級のタンクローリーであり、この車輛に対する火災継続時間を 60 分と想定した。この火災時の発生応力に対しては沈埋函の実強度以内に抑えるようにした。

検討に使用する火災温度・時間曲線を図-4 に示す。

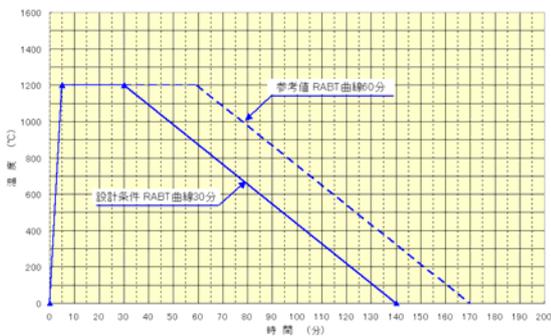


図-4 火災温度・時間曲線

2.3 鋼板許容表面温度の考え方

RC 構造のトンネル耐火被覆構造と異なり鋼コンクリート構造沈埋函は、内部ひび割れの検査と補修が困難なことから、耐火被覆構造に要求される性能は、鋼殻内コンクリートに発生する有害なひび割れの抑制及びコンクリート強度と鋼材強度の低下を生じさせないこととした。

(1) 有害なひび割れ発生に対する照査

平成 17 年度大阪港夢洲トンネル耐火被覆実験結果より鋼殻内コンクリートの圧縮領域のシアコネクタ間に水平に結ぶひび割れ (写真-1) ③が発生しなければ終局耐力に与える影響が少ないことが確認されている⁴⁾。

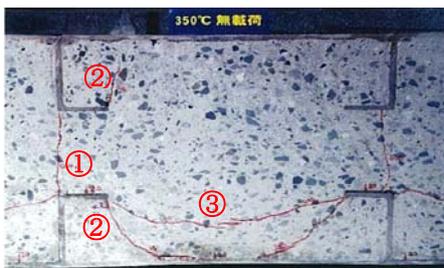


写真-1 燃焼実験結果

熱伝道応力解析を実施し、このひび割れが発生しないことを確認した。

(2) 火災時に発生する応力に対する照査

火災時には加熱により部材の内外の温度差で付加断面力が発生する。この付加断面力を温度応力解析により算出し、常時荷重による断面力を加算した断面力に対して終局状態での照査を行う。

沈埋函の断面力の模式図を図-5 に示す。

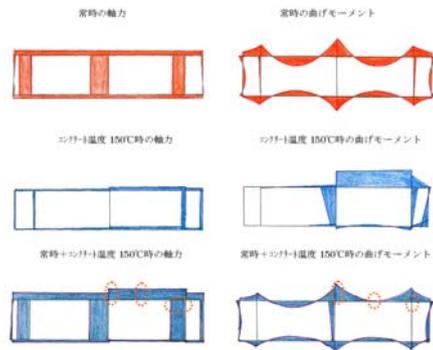


図-5 発生断面力模式図

設計部材強度の特性としては、以下の値を採用する。

- ① RABT30 分曲線 (一般車両の火災に対して)

鋼材 ; 降伏強度

$$f_{sy} = 355\text{N/mm}^2 \text{ (SM490Y)}$$

コンクリート ; $k_1 \cdot f'_{cd}$

ここで k_1 ; 強度の低減係数 (0.85)

f'_{cd} ; コンクリートの設計基準強度 (23 N/mm²)

$$k_1 \cdot f'_{cd} = 0.85 \times 23 = 19.6\text{N/mm}^2$$

- ② RABT60 分曲線 (危険物車輛の火災に対して)

鋼材 ; 降伏強度 $f_{sy} = 355\text{N/mm}^2$

コンクリートについては、充填コンクリートに高流動コンクリートを使用していることから、設計基準強度以上の実強度が期待できることから、施工済である 1～5 号函の圧縮試験結果を整理し基準強度を 36N/mm² として許容値を算出した。

$$\text{よって ; } k_1 \cdot f'_{cd} = 0.85 \times 36 = 30.7\text{N/mm}^2$$

2.4 検討断面の設定及び照査位置

火災時における部材応力の照査においては、(上載荷重が最も大きい) 常時の応力状態が最も厳しい第 8 号函の空港側立坑側を対象とする (図-6 参照)。

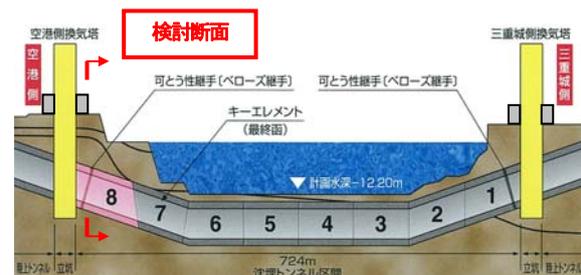


図-6 検討断面位置図

尚、照査位置は、図-5 の発生断面力模式図から、火災

時付加曲げモーメントは、床版に対して上側引張で様に作用する為、上床版隅角部で実施した。

2.5 熱伝導・熱応力解析

(1) 解析モデル

有限要素法(MAC.MARK)による熱伝導・応力解析を実施し、部材内部のひび割れの発生を調べる。

解析のモデルとしては、同様のモデル解析を実施した夢洲トンネルの結果を参考に、ずれ止め鋼板と周辺コンクリートの接触部は、温度上昇に伴う変形やひび割れの発生状況から直ぐに剥離すると考え、解析当初から附着していないモデルとする(図-7)。

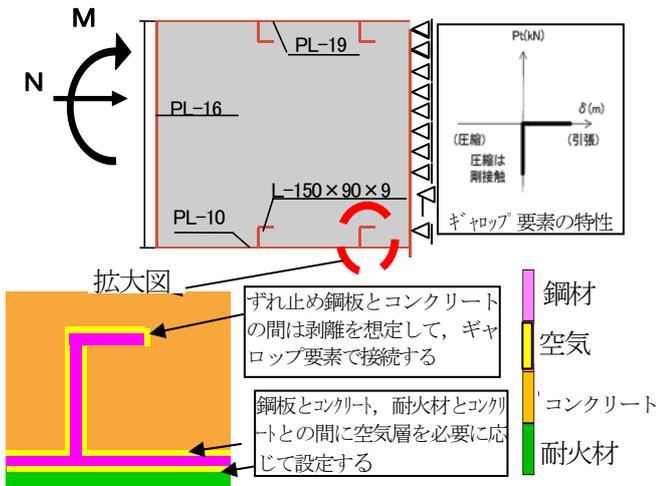


図-7 熱伝導・応力解析モデル図

(2) 物質特性の設定

①熱伝導解析

熱伝導解析で使用した物性値を表-1に示す、物性値は温度依存性を考慮している。

表-1 熱伝導解析の物性値

材 料	熱伝導率λ (W/mK)	比熱 (J/kgK)	密度 (kg/m ³)	設定根拠
鋼 材	51.91-5.03×10 ⁻⁵ T ²	482+7.995×10 ⁻⁴ T ²	7800	建築学会鋼構造耐火設計指針
コンクリート	2-0.24(T/120)+0.012(T/120) ²	900+80(T/120)-4(T/120) ²	2300	EUROCODE
耐火材 (セフィア系)	3×10 ⁻⁴ T ² +0.0903	1000	350	メーカー設定値
空気	0.0257 (20℃)	1005 (20℃)	1.166 (20℃)	熱伝導の基礎と演習

②熱応力解析

鋼材は弾塑性としてモデル化する。コンクリート材料は、引張応力の発生に伴うひび割れに着目し、引張軟化係数を考慮したモデル化を行い、圧縮方向を弾性として設定する。解析に用いる物性値を表-2に示す。

表-2 熱応力解析の物性値

材 料	E (kN/m ²)	ν	α (1/℃)	備 考
鋼 材	2.0×10 ⁸	0.3	1.2×10 ⁻⁵	f _{sy} =355N/mm ² f _b =490N/mm ² (引張強度-伸び17%)
コンクリート	2.8×10 ⁷	0.2	1.0×10 ⁻⁵	f' _{ck} =30N/mm ²

2.6 鋼板表面許容表面温度の設定

(1) 設定手順

常時における断面照査位置での断面力及び応力度比を表-3に示す。

表-3 発生断面力及び応力度比

発生断面力	軸力	1280	kN
	曲げモーメント	-6400	kN・m
応力度比	σ _c /σ _{ca}	0.95	コンクリート
	σ _s /σ _{sa}	0.97	鋼板

表より、常時における応力度比は許容値にほぼ等しく、余裕の無い状態である。鋼板許容表面温度の設定に際しては、ひび割れの発生よりも、部材の応力度に支配されると考えられる。表面温度の設定に際しては、断面力の照査を行い、部材内外の温度差を求めた上で、熱伝導・応力解析により有害なひび割れの確認を行う。

(2) 部材応力度の照査結果

部材内外の鋼板表面温度を変化させた場合の部材応力度の照査結果を図-8に示す。

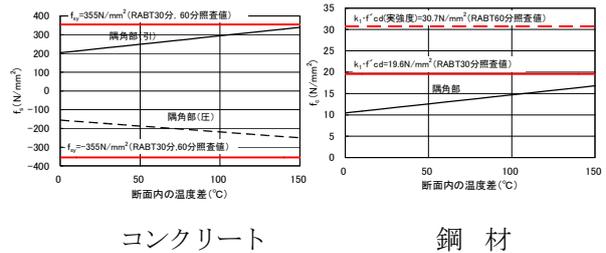
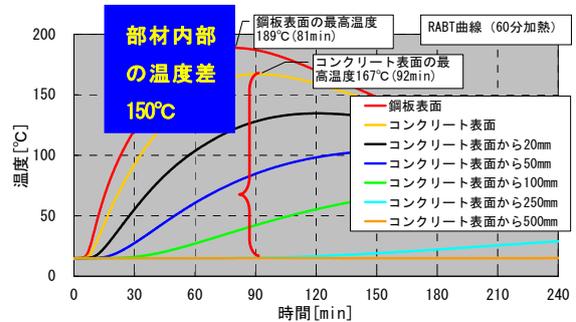


図-8 応力度照査結果

図より、部材内部の温度差が150℃で鋼板の降伏強度にほぼ等しくなる。(RAPT 30分、60分)

(3) ひび割れの照査

部材応力度の照査結果よりRABT60分曲線において部材内部の温度差が150℃となるように熱伝導・応力解析を行いコンクリート圧縮縁側にひび割れが発生するかどうかの検証を実施した。熱伝導の解析結果を図-9に示す。

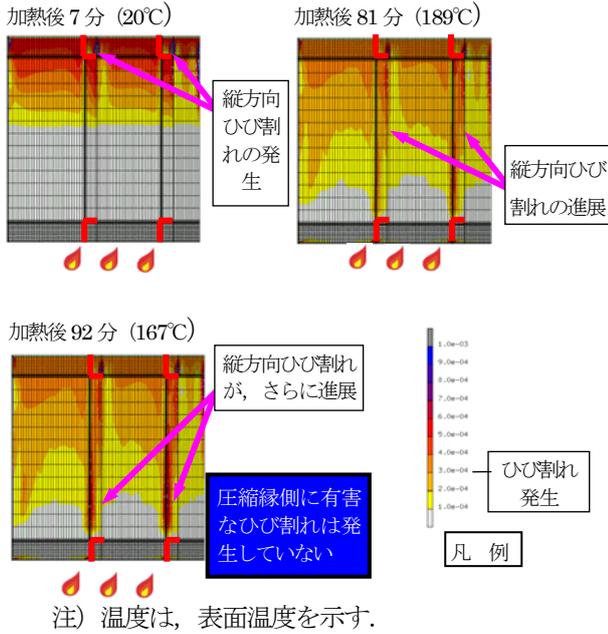


注) 初期温度(外気温)は15℃とした

図-9 熱伝導解析結果

検討結果より鋼板の最大表面の最大温度は、189℃となる。

熱応力解析結果のひび割れを図-10 に示す。



注) 温度は、表面温度を示す。

図-10 ひび割れ結果 (熱応力解析結果より)

図-10 より、部材内部の温度差を 150°C (鋼板最大表面温度 189°C) とした場合には圧縮縁側にひび割れと認められるひずみ (3.0E-4) は発生していない。

以上の結果より、上床版における鋼板表面許容温度を 180°C に設定した。

2.7 耐火被覆仕様の検討

沈埋トンネル施工実績及び沈埋トンネルを対象とした高温燃焼実験を実施している耐火被覆材の種類は、主にボードタイプ (セラミック系、ケイ酸カルシウム系)、ブランケットタイプ、吹き付けタイプの 3 種類がある。本検討では、RABT60 分 (1200°C) 曲線に対する一次元熱伝導解析により各材質の鋼板表面温度と耐火被覆厚の概略の関係を求めた。検討結果を図-11 に示す。

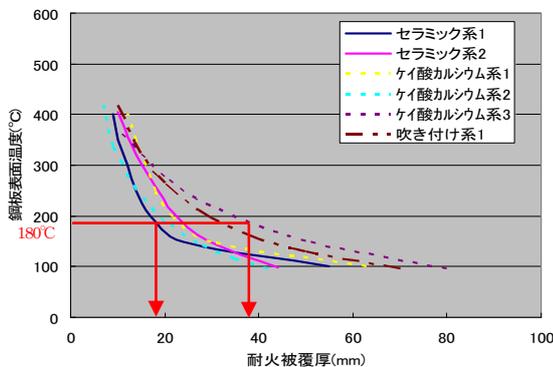


図-11 一次元熱伝導解析結果

検討結果より、耐火被覆材の厚さは 19mm から 39mm 程度になった。

3. 今後の課題

本報告では、護岸直下 8 号函の上床版を対象として FEM 解析等により鋼板表面許容温度を算出した。沈埋トンネル全体の耐火被覆仕様を決定するには今後以下の検討を進める必要がある。

3.1 航路中央部の検討

上床版の鋼板表面許容温度は、部材応力度によって決定されている。上載荷重の小さい航路中央部においては、耐火被覆材の仕様を落とせる可能性がある。航路中央部において同様の解析を行う必要がある。

3.2 隔壁部の検討

耐火被覆材の施工箇所は、隔壁部も対象としている。隔壁は、鋼板を圧縮部材として考慮した高圧縮部材であり、破壊モードは鋼板が剥離し、局部的に降伏・破壊すると考えられる。現状では、高圧縮+加熱条件における鋼コンクリート合成構造の局部的破壊の実験や解析に関する知見が少ないため、隔壁部を床版部と同様に解析することは困難である。従って高圧縮状態での大規模加熱試験を実施した上で解析する必要がある。

3.3 最終仕様の決定

今回の耐火被覆材の検討は、8 号函の上床版を対象として検討を行ない、RABT60 分を基本とした耐火被覆材の仕様を選定した。今後、前述の航路部、隔壁部の検討を行い、火災時のリスクを総合的に評価した上で徐冷開始時間 (30 分、60 分) を再検討し、耐火被覆材の施工性、経済性を考慮し、最終仕様 (材質・厚さ) を決定する必要がある。

謝辞

本報告は沖縄総合事務局那覇港湾空港整備事務所発注による業務の調査結果に基づいております。調査にあたっては、早稲田大学工学部・清宮教授を初めとする「函内耐火被覆検討分科会」のメンバーから多大なご指導を頂きました。ここに記し、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 沖縄総合事務局那覇港湾・空港整備事務所：那覇港臨港道路空港線沈埋トンネル (パンフレット), 2000
- 2) 東亜建設工業・日立造船・佐伯建設工業特定建設企業体；那覇港臨港道路空港線沈埋トンネル沈埋函 (5 号函) 製作工事 (パンフレット)
- 3) Jan Brekelmans :Researching heart release rates at Runehamar : Tunnels & Tunnelling International : June 2004
- 4) (財) 沿岸技術研究センター：平成 17 年度大阪夢洲トンネル技術検討調査報告書, 2006