

P&PC セグメントの耐火性能試験

Fireproof Performance Tests of P&PC-Segments

三上 博 HIROSHI MIKAMI

土木技術部 金子 正士 MASASHI KANEKO

土木技術部 鈴木 明彦 AKIHIKO SUZUKI

SMC コンクリート(株) 松井 崇 TAKASHI MATSUI

シールドセグメントを道路トンネルに使用する場合には、トンネル内での自動車火災に対してセグメントが十分な耐火性能を有する必要がある。P&PCセグメントは、本体はコンクリート製セグメントと基本的に同等なものであるが、組み立てたセグメントにアンボンドPC鋼より線を挿入し緊張することによって一体化を図る構造的特徴を有する。今回、P&PCセグメントに対する耐火性能試験およびそのシミュレーション解析を行い、火災によるPC鋼より線に対する影響について調べた。その結果、セグメント表面に耐火被覆を設けることにより、十分な耐火性能が得られることが確認された。

キーワード：シールドトンネル、セグメント、火災、耐火性能、PC鋼より線

Shield segments in a road tunnel must have sufficient fireproofing against a vehicle fire within a tunnel. P&PC-segments are concrete segments in which prestressing is applied by unbounded steel strands, and the segments are integrated. In order to verify the effect of fire on the steel strands, fireproof performance tests and simulation analyses were conducted. As a result, it was confirmed that the segments with fireproof coating at surface have enough performance against a fire.

Key Words: Shield-Tunnel, Segment, Fire, Fireproof, Steel Strands

1. はじめに

P&PC（Prestressed & Precast Concrete）セグメントは、あらかじめシースを埋め込んだコンクリート製セグメントを組み立てた後に、セグメントのひとつに設けた切り欠き部からPC鋼より線を挿入し、緊張定着することによって、プレストレスを導入する新しいタイプのシールド用セグメントである。内面が平滑であり、止水性に優れ、二次覆工を省略することができるため、経済性にも優れ、上下水道、電力、通信、ガスをはじめとして、鉄道、共同溝、道路まで広範に適用できる¹⁾。

本セグメントを道路トンネルに用いる場合には、他の覆工構造と同様に、トンネル内での火災に対する構造的な安全性の確保が要求される。具体的には、トンネル内の火災に対して、部材が温度上昇によって、著しい強度低下を起こさないことや、コンクリート表面が爆裂によって剥がれ落ちないことなどが求められる。P&PCセグメントは、主要部材が鉄筋コンクリートからなるため、

基本的な耐火性能は、RCセグメントと同等であると判断される。しかし、PC鋼より線の緊張によって導入されるプレストレス力によって、セグメントの一体化を行う構造的な特徴を有している。したがって、構造的な安全性を考えるうえでは、火災時においてPC鋼より線がおかれる熱環境条件の把握が重要となっている。

今回、大断面の道路トンネルに対応するP&PCセグメントを模した試験体に対して加熱試験を行い、各部の温度変化挙動を調べた。また二次元有限要素法による熱伝導解析により加熱試験のシミュレーションを行い、各部温度の詳細な経時変化の把握を行った。本報では、これらの諸試験および解析検討結果について示す。

2. 耐火性能試験概要

(1) 試験対象セグメントと加熱試験体

道路トンネルでの使用が想定される内径11,300mm、厚さ400mmのセグメントを試験対象モデルとした。表-1

にその概要を示す。また、加熱試験に用いた試験体は、幅600mm、長さ2,000mmの切り出し平板モデルとした(図-1参照)。後述の試験ケースに示すように、セグメントの本体部分を模した試験体2体および継手を模した試験体2体を用意した。また、試験体には土水圧の作用による軸圧縮力状態を再現するため、試験体中心位置に配置したアンボンドPC鋼より線(φ21.8mm)1本および、軸力を補うための4本のPC鋼棒(φ32mm)の緊張によって、断面に均等な軸圧縮力10N/mm²を導入した。試験体のコンクリートは、設計基準強度50N/mm²とし、加熱試験時の含水率は4.0%程度であった。

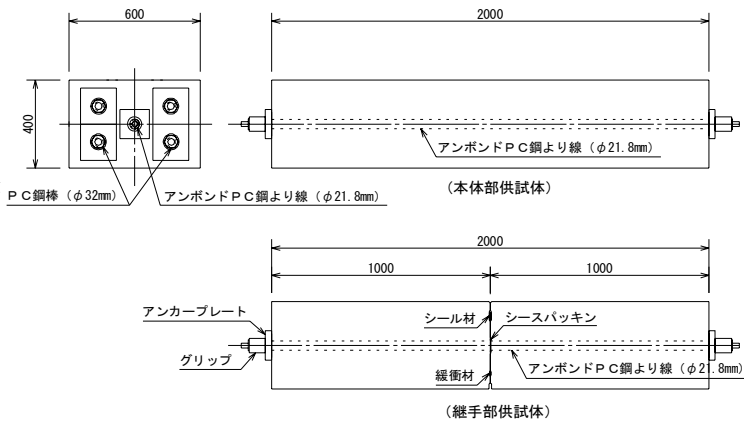


図-1 加熱試験用供試体概要

表-1 試験対象としたP&PCセグメントの概要

項目	単位	寸法・数量
セグメント	内径	mm 11,300
	厚さ	mm 400
	幅	mm 1,500
	分割数	9
円周方向PC鋼材	mm	φ21.8 × 4本
埋め込みシース		内径φ42mm、外径φ48mmのCD管
リング継手		ワンタッチジョイント

表-2 アンボンドPC鋼より線の規格

項目	単位	寸法・数値
外径	mm	26.5
素線径	mm	6.15
断面積	mm ²	312.9
引張荷重(Pu)	kN	573
降伏点荷重(Py)	kN	495

(2) 耐火被覆材および継手の処理

道路シールドトンネルで一般的に用いられている耐火被覆として、吹き付け式耐火被覆方式(表-3)および新規材料を使用したパネル方式(表-4)を用いた。

セグメント継手に相当する試験体の継手部には、以下のシール材およびパッキンによる処理を施した。なお、これらの材料は、本来防水を主目的として設置されるものである。

a) シール材

材質：複合型水膨張性シール材(ビノンハイドロタイト)

形状：内側：下幅15×上幅10×厚さ4.0(mm)

外側：下幅20×上幅15×厚さ5.5(mm)

b) シースパッキング材

材質：水膨張性クロロプレングム

形状：□66×66mm、中抜き部φ46mm、厚さ5mm

表-3 吹き付け式耐火被覆材の仕様

品名	タイカモルタル(富士川建材工業)	
吹付厚	(mm)	35
組成(質量%)	普通ポルトランドセメント	25
	無機質系混和材	70
	有機質系混和材	5
密度	(kg/m ³)	900
固定方法	メッシュ筋+アンカーピン	

表-4 パネル方式耐火被覆材の仕様

品名	パーミスライト(エレホン・化成工業)	
パネル厚	(mm)	30
組成(質量%)	早強ポルトランドセメント	55
	パーライト	39
	有機質系混和材	6
密度	(kg/m ³)	450
固定方法	アンカーピン+接着剤	

(3) 試験ケース

準備した試験体4体に対して、表-5に示す試験ケースの設定を行った。道路トンネルで一般的に用いられている吹き付け式耐火被覆方式を基本ケースとして、セグメント位置が本体部であるCase2、同じ耐火被覆条件でセグメント継手を模したCase3を設定した。比較のため、新規材料のパネル方式Case1および、表面耐火被覆を全く設けない場合Case4(継手位置)を同時に実施した。

表-5 試験ケース一覧

試験ケース	耐火被覆	セグメント位置	緊張力
Case1	パネル方式	本体	あり
Case2	吹き付け方式	本体	あり
Case3	吹き付け方式	継手	あり
Case4	なし	継手	あり

(4) 加熱試験方法

a) 加熱方法

水平炉の上に試験体4体を並べ、トンネルの内面に相当する試験体の下面のみを加熱した。試験装置は、独立行政法人建築研究所の水平部材加熱試験装置（炉内寸法：4,000mm×4,000mm，深さ2,000mm）を用いた。

b) 時間温度曲線

トンネル内での火災に対する検討に、我が国において現在一般的に用いられている RABT 加熱曲線を用いた。図-2に加熱曲線を示す。本曲線はドイツの交通省が道路路・トンネルの設備と運用に関する指針で規定しているものであり、木製家具などを満載した大型トラックが火災を起こした場合の、トンネル内での温度変化を想定したものである。最初の5分間で1,200℃までの急激な温度上昇を設定している。

c) 計測項目

あらかじめ試験体コンクリート中に埋設した7点の熱電対 (TC1 ~ TC7) によりコンクリート内部の温度を測定した。また PC 鋼より線の表面に貼り付けた5点の熱電対 (TS1 ~ TS5) により、鋼線の温度変化を測った。さらに加熱による PC 鋼より線の緊張力の変化を確認するため、鋼線固定端にセンターホール型ロードセルを設置し、軸力の測定を行った。図-3に各計測位置を示す。



写真-1 加熱試験状況

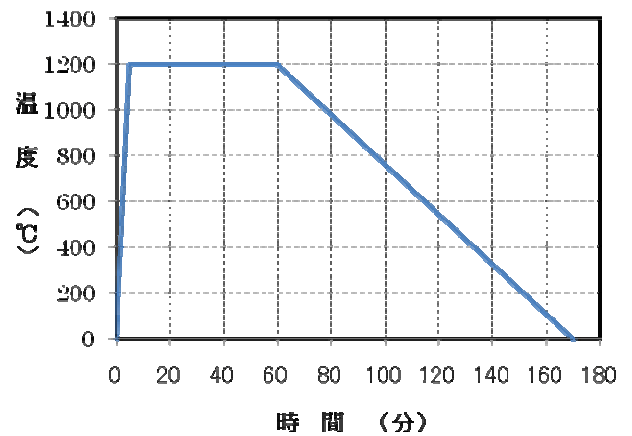


図-2 加熱曲線 (RABT)

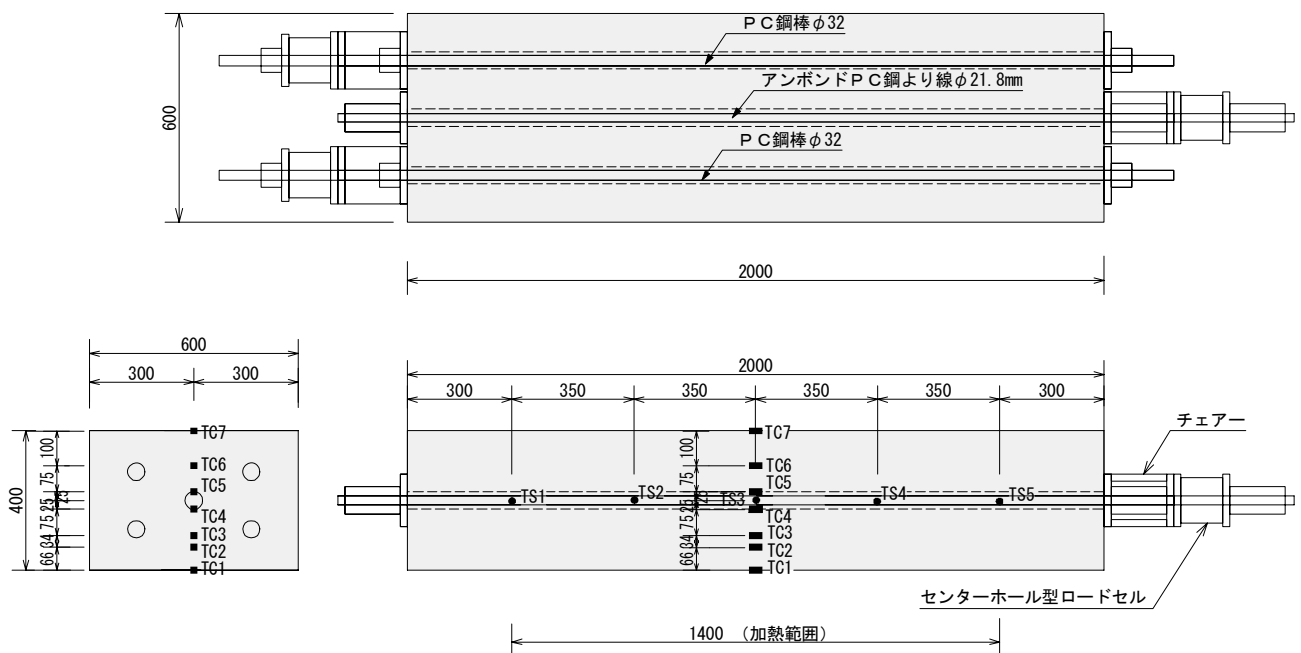


図-3 計測位置図

3. 耐火性能試験結果

(1) コンクリート内部の温度

加熱はRABT曲線に従って規定の170分間行い、その後非加熱の状態ですべて300分まで各種計測を継続した。

図-4に各試験ケースのコンクリート内部温度計測結果を示す。耐火被覆背面のコンクリート表面での最高温度は、Case1（パネル方式）で221℃、Case2およびCase3（吹き付け方式）で100℃であり、首都高速道路のトンネルの基準²⁾で定められるコンクリート温度350℃以内におさまっている。Case2およびCase3で、コンクリート表面位置の温度が100℃で頭打ちとなったことが認められる。これは、吹き付け耐火被覆材に含まれる水分の気化が加熱中に終わらなかったことによるものとうかがえる。また、Case2とCase3の試験結果を比較すると、本体部と継手部の温度分布に有意な差は認められず、両者はほぼ同等の熱伝達特性を有するものと判断される。

(2) PC鋼より線の温度

各ケースのPC鋼より線の温度変化を図-5に示す。

Case1（パネル方式）の試験計測期間中の最高温度は

50.4℃、Case2およびCase3（吹き付け方式）で36.8℃である。しかしながら、計測終了時点（300分）では、加熱側面高温部からの熱伝導によってわずかながら上昇段階にあり、最終的な最高温度は加熱試験のみからは確認されていない。この点については、後述で、耐火性能試験のシミュレーション解析結果を含めた考察を行う。

(3) PC鋼より線の緊張力変化

加熱試験中のPC鋼より線の緊張力の変化を図-6に示す。各ケースともに加熱の初期段階においては、わずかに緊張力が増加し、その後一転して減少傾向を示す。これは、加熱の初期においては、試験体下面コンクリートが熱膨張を起こすが、この段階においてはPC鋼より線の温度はまだ上昇していないこと、その後、PC鋼より線の温度上昇が始まると、鋼より線に熱膨張が生じて、緊張力が低下することを示している。

耐火被覆を設けたCase1～Case3では、RABT曲線による加熱中の緊張力の変化はわずかな範囲にとどまっている。例えばCase1（パネル方式）においては、加熱初期段階における緊張力の増加は、最大で2.2%程度である。

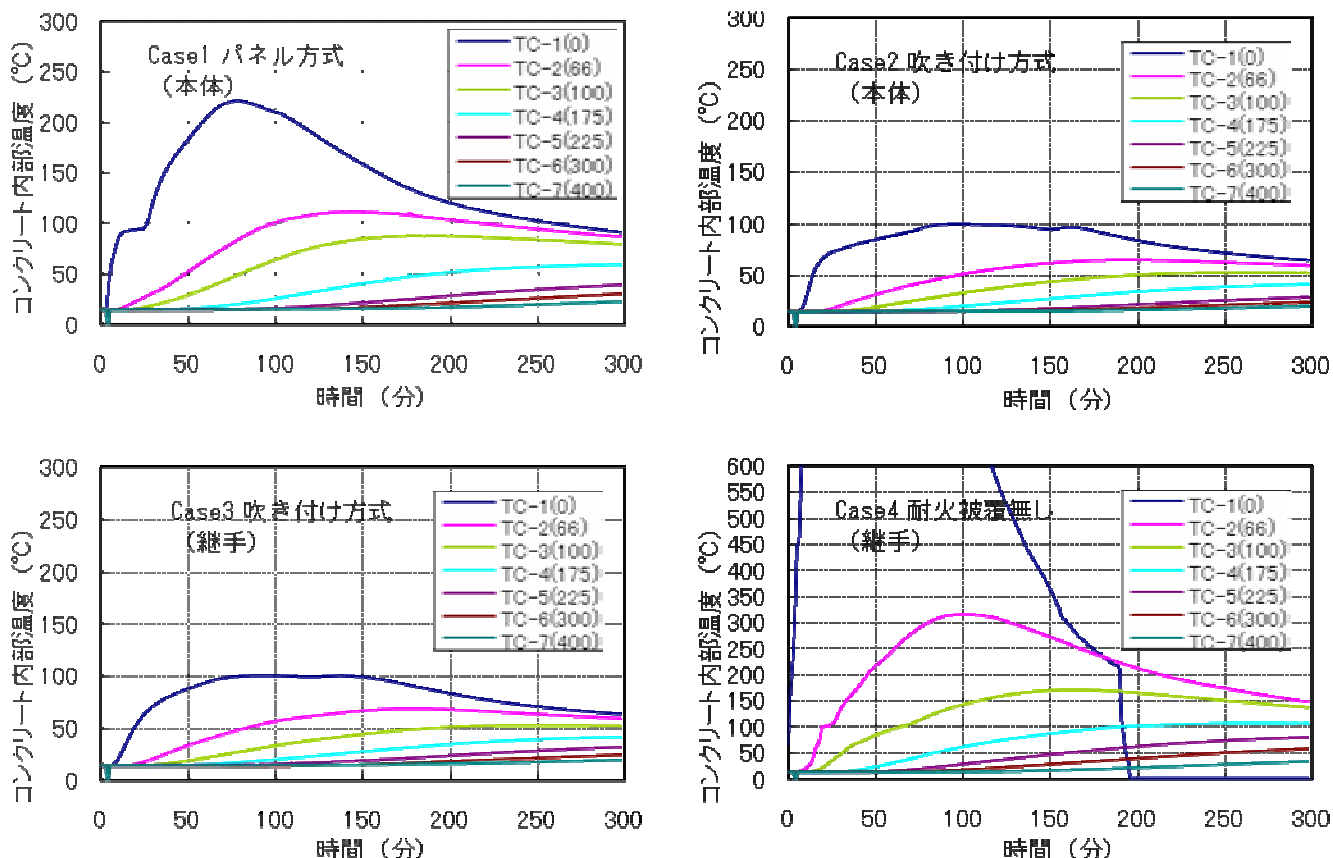


図-4 コンクリート内部温度計測結果

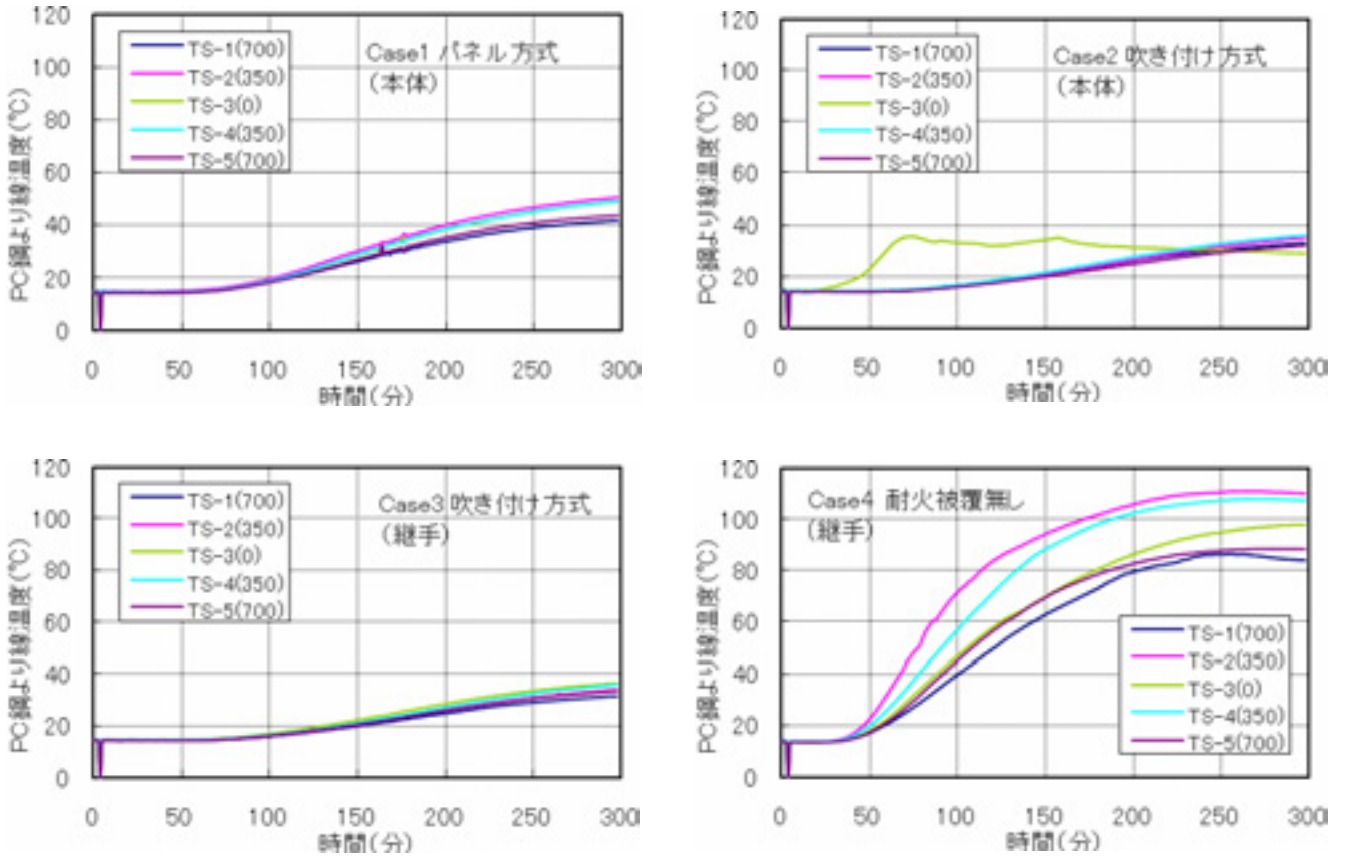


図-5 PC鋼より線温度計測結果

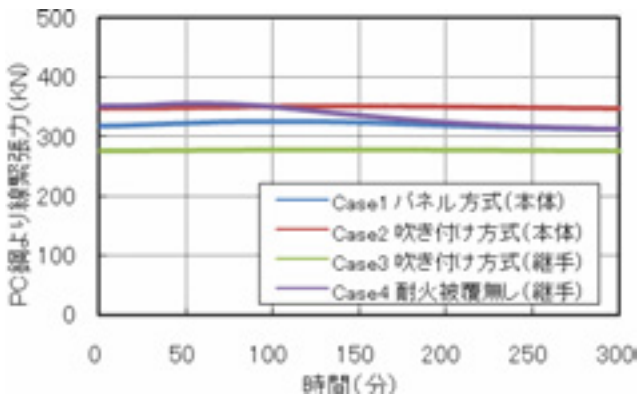


図-6 PC鋼より線の緊張力変化

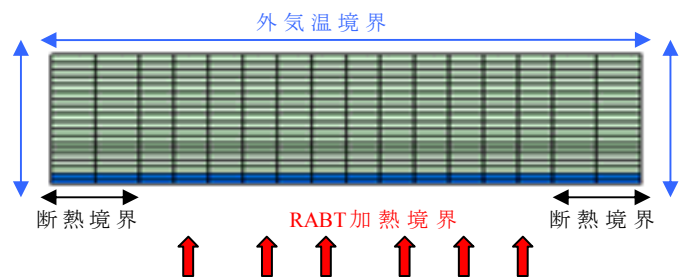


図-7 熱伝導解析要素分割図 (Case2 の例)

4. 耐火性能試験のシミュレーション解析

(1) 解析概要

火災発生後の長時間にわたる PC 鋼より線の温度変化推移の把握 (最高到達温度の推定), および平板試験体と実トンネル環境での熱伝達境界条件差異の影響確認などを目的として, 加熱試験のシミュレーション解析を実施した。解析方法は, 2次元有限要素法による非定常熱伝導解析とし, 試験体を図-7に示すような要素分割によってモデル化を行い, 加熱試験時の状況にあわせた境界

条件を設定した。表-6に解析ケース一覧を示す。

Case1-2 は, 実際のトンネル位置での熱伝達境界条件を模擬するために, Case1 試験体の外気境界側に連続して 5m の地盤層を付加した。表-7に解析に用いた要素物性値, 表-8に熱伝達境界物性値を示す。

(2) 解析結果

コンクリート内部温度変化の解析結果の一例として, Case2 (吹き付け方式) の結果について図-8に示す。比較のために, 加熱試験時の実測温度をあわせて図中に示

表-6 解析ケース一覧

解析ケース名	耐火被覆条件	その他条件
Case1-1	パネル方式 t=30mm	
Case1-2	パネル方式 t=30mm	トンネル背面地盤 5m 考慮
Case2	タイカモルタル t=35mm	
Case4	耐火被覆なし	

表-7 解析に用いた要素物性値

	コンクリート	耐火パネル	耐火モルタル	背面地盤
熱伝導率 (W/m°C)	2.8	0.27	0.14	1.2
密度 (kg/m ³)	2,400	600	600	1,800
比熱 (kJ/kg°C)	1.15	0.8	0.84	0.8
初期温度 (°C)	14.8	14.8	14.8	14.8

表-8 解析に用いた熱伝達境界物性値

	供試体上端・側面	炉側加熱面
熱伝達率 (W/m ² °C)	12.0	24.0
外気温度 (°C)	16.0	加熱時炉内実測温度

した。加熱試験計測時間 300 分までの各部の温度変化は、実測と解析結果でおおむね良好に一致した結果が得られた。なお、他の解析ケースについても同様の結果が得られている。解析結果から、300 分以降のコンクリート内部各部の温度は、熱伝導によって均等化に向かって緩やかに変化して行くことが分かる。

図-9に PC 鋼より線位置の温度変化解析結果を示す。Case1-1 (パネル方式) および Case1-2 (パネル方式でトンネル位置境界条件考慮) の最高到達温度は、両者とも 53°C 程度 (経過時間 375 分) で、トンネル背面地盤側の境界条件は、火災時の PC 鋼線温度の評価においてはほとんど影響しないことが分かった。また、Case2 (吹き付け方式) の PC 鋼線の最高到達温度は 37°C 程度 (経過時間 444 分) である。トンネルで一般的に用いられている耐火被覆を用いることによって、火災時において PC 鋼より線は物理特性が大きく変化するような熱環境状態には至らないことが確認された。

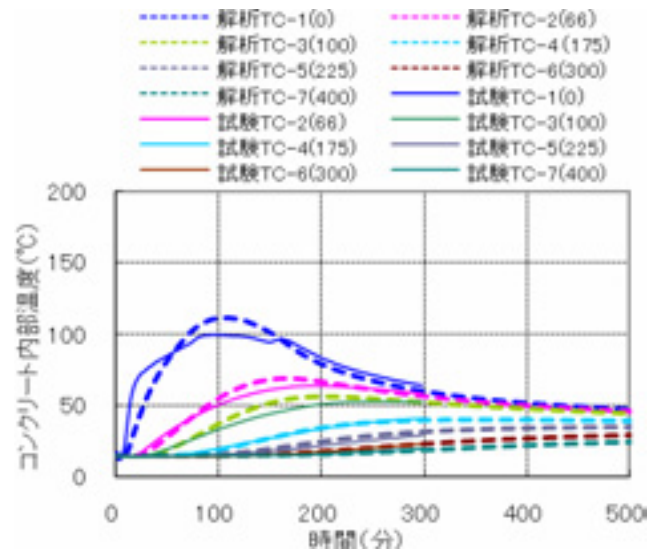


図-8 コンクリート内部温度解析結果一例 (Case2)

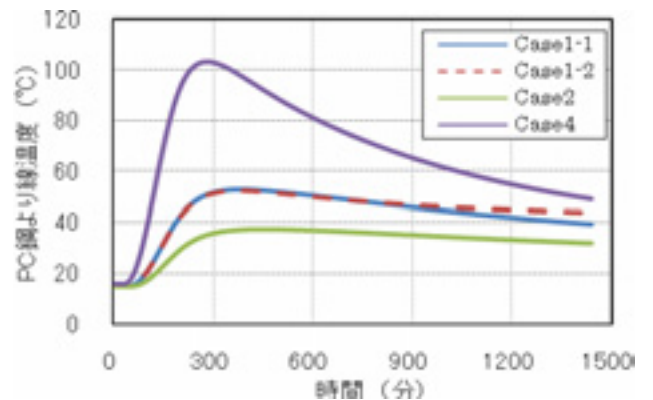


図-9 PC鋼より線温度解析結果 (各ケース)

5. まとめ

加熱試験およびシミュレーション解析より、トンネル火災時における P&PC セグメントの基本的な耐火性能について把握することができた。その結果、適切な耐火被覆材を設ければ、道路トンネル用セグメントに要求される耐火基準を十分満足することが確認された。現在、PC 鋼より線の物理的特性を詳細に把握するために、高温時のリラクゼーション試験を別途実施中である。これらの試験結果をもとに、経済的かつ耐火性に優れた覆工構造の提案を実施して行く所存である。

参考文献

- 1) シールド工法技術協会：P&PC セグメント技術資料, 2007.6
- 2) 首都高速道路株式会社：トンネル構造物設計要領 (シールドトンネル耐火設計編), 2007.7