

報告 耐火被覆を施した鋼及びコンクリート土木構造物の耐火性能に関する一考察

鍛冶 秀樹^{*1}・春日井 敦詞^{*2}・荒鹿 忠義^{*3}・関 雅樹^{*4}

要旨: 土木分野での火災被災事例は建築と比較すると少なく、同分野の耐火構造・耐火材料に関する研究発表は少ない。過去に土木構造物が火災に被災した事例としては、1979年の東名日本坂トンネル火災、2008年の首都高速5号線の高架橋火災があげられる。既存の重要構造物の火災被害を軽減し、長期不通を防止するためには、耐火性能の向上を図る必要がある。本報告では、建築分野で実績のある発泡性耐火塗料に着目し、鋼部材、コンクリート部材に発泡性耐火塗料を塗布して加熱試験を実施し、土木構造物への有効性を定性的に確認した。また、自由空間の土木構造物における加熱曲線が確立されていないためRABT曲線を適用した。

キーワード: 耐火材料, 耐火性能, 発泡性耐火塗料, 加熱試験, 膜厚, 加熱曲線

1. はじめに

近年、土木構造物のトンネル、高架橋において車両火災による被害が報告されている(写真-1)。このため、重要度の高い土木構造物に対しては耐火性能が要求されている。新設構造物に対しては、新規材料が開発され適用される事例が多くなっている。しかしながら、土木構造物の火災事例は少なく、耐火の検討はほとんどなされてこなかったのが現状である。

ここでは、既設土木構造物の耐火性能を向上させることを目的として、鋼部材、コンクリート部材試験体に発泡性耐火塗料を塗布し、加熱実験を行った。発泡性耐火塗料の耐火性能を評価したので報告する。



写真-1 首都高速5号線 (www.shutoko.jp/(2008.8))

2. 既往の研究

近年、トンネルの耐火設計ではRABT曲線を用いられることがある¹⁾。RABT曲線はドイツにおける道路トン

ネル設備と運用に関する指針²⁾である。発火後5分で1200℃に達し継続時間は30分~60分と定義されている。

発泡性耐火塗料については、建築火災を想定したISO834の加熱曲線に基づいて耐火試験が行なわれており、数多く施工実績がある³⁾。ISO834の加熱温度は加熱時間30分で841℃まで上昇し3時間で1110℃まで緩やかに上昇する加熱温度曲線となっている。

ここでは、高架橋のような自由空間にある土木構造物に適用すべき温度曲線については確立されていないのが現状である。このため、自由空間における加熱条件を設定するために、車両の燃焼実験データや火災統計データなど既往の研究を調査した。

2.1 高速道路上で発生した車両火災

高速道路での車両火災リスクを検討するために、池島ら⁴⁾は、全国の高速道路上で1995年から2004年までの10年間に発生した車両火災について、新聞記事などを調査した。新聞記事等に記載された情報に基づいているため、比較的小規模の火災は除外され、大規模な火災事故が収集されていると考えられる。

図-1は、高速道路上で発生した車両火災における焼損車種と火災継続時間の関係を示したものである。同図によれば、乗用車、バス、トラックの順で火災継続時間が長くなる傾向が認められる。1995年から2004年の10年間に、高速道路上で発生した1時間を越える火災は、約15件(=37件×約40%)発生し、いずれもトラックが関与した火災であった。

2.2 火災温度と火災時間

自由空間中における火災温度の高さ方向の分布は、式(1)⁵⁾に示すように、床面からの高さ $z(m)$ と発熱速度 Q

*1 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 主幹研究員 (正会員)

*2 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 グループリーダー (正会員)

*3 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部 チームマネージャー (正会員)

*4 東海旅客鉄道(株) 総合技術本部技術開発部長 博(工) (正会員)

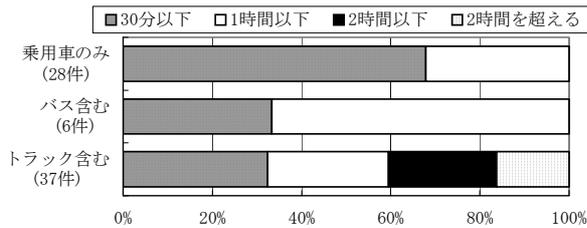


図-1 高速道路で発生した車両火災⁴⁾

(kW)に依存し、火炎に包まれる連続火炎領域の温度は900°C、間歇火炎域では360~900°C、プルーム域では360°C以下になることが知られている。つまり、車両火災の火災温度は、車両と積荷の発熱速度と床面からの高さに依存する。

$$\Delta T(z) = \begin{cases} 900 & \left(\frac{z}{Q^{2/5}} < 0.08 \right) & \text{: 連続火炎領域} \\ 72 \left(\frac{z}{Q^{2/5}} \right)^{-1} & \left(0.08 \leq \frac{z}{Q^{2/5}} < 0.2 \right) & \text{: 間歇火炎領域 (1)} \\ 24.6 \left(\frac{z}{Q^{2/5}} \right)^{-5/3} & \left(0.2 \leq \frac{z}{Q^{2/5}} \right) & \text{: プルーム領域} \end{cases}$$

文献6),7)には様々な車両の燃焼実験データは、収集され、発熱速度や総発熱量が記載されている。車両火災の代表例として、ワンボックス車(8人乗り)の発熱速度の経時変化を図-2、上式に発熱速度を代入して求めた高さ5mの位置の火災温度を図-3に示した。

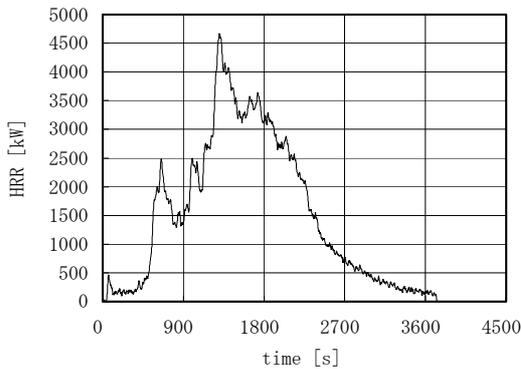


図-2 車両燃焼発熱速度⁶⁾

同図より、ワンボックス車が火災に遭うと、消火しなければ燃焼は約1時間継続し、床面から5mの高さでは最高443°Cに達することがわかる。ただし、最高温度がピークを示すのはほんの一瞬であることがわかる。

3. 加熱実験

3.1 加熱曲線の設定

車両の燃焼性状を単純化して加熱試験で再現するための、加熱温度と加熱時間について検討する。例えば、

総発熱量5,000MJ、発熱速度1,000kWで燃焼すると、高

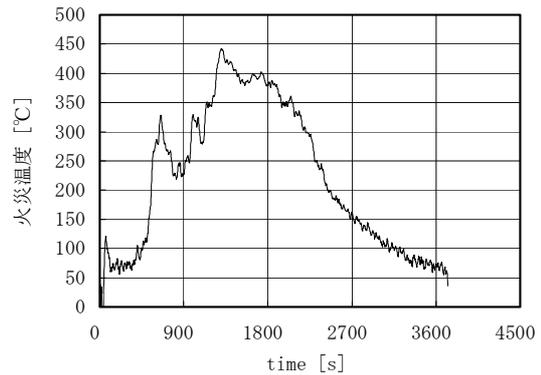


図-3 車両燃焼火災温度

さ5mの位置の温度は188°C、火災継続時間は5,000秒になる。一方、発熱速度のみを変えて、発熱速度5,000kWとすると、高さ5mの位置の温度は454°C、火災継続時間は1,000秒になる。

以上、2つのパターンの比較から、高い発熱速度を採用したほうが、火災温度が高くなり、鋼材、コンクリート部材にとっては、過酷な加熱を受けることになる。

図-3を例にとると、このワンボックス車の総発熱量は5,629MJ、最大発熱速度は4,664kWであった。燃焼開始から鎮火まで最大発熱速度一定で燃焼したとすると、火災継続時間は20分(=1,207秒=5,629×1,000/4,664)となる。つまり、このワンボックス車の燃焼を単純化して危険側の評価を与えるように加熱試験で再現するには、443°Cで20分加熱すればよい。同様に他の車両燃焼データより単純化して求めた火災継続時間と加熱温度との関係を図-4に示す。

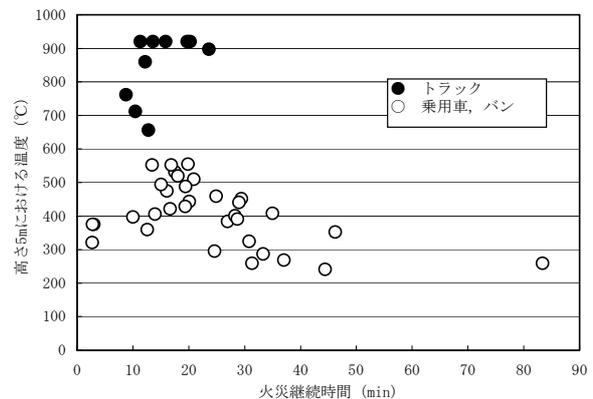


図-4 火災継続時間と加熱温度^{6), 7)}

これにより、乗用車火災が発生すると、高さ5mの位置の火災温度は600°C未満で火災継続時間はほとんど50分以下である。トラックの場合はほとんど920°Cに達し、継続時間は30分を下回っている。

以上に述べた高速道路上で発生した車両火災事例、および車両の燃焼試験データ等より、高さ 5m の位置にある高架橋が受ける火災温度を設定した。具体的には、図-5 の通りで、加熱時間は 30 分とした。加熱温度は図-4 に示した高さ 5m における温度を安全側に包含するよう RABT 曲線と同じく加熱開始から 5 分で 1200℃ に到達し、以降 1200℃ が継続するものとした。試験体が許容温度に達した後は、RABT 曲線と同じく、110 分かけて直線的に温度を低下させた。

また、構造物の性能を保持する許容温度は、鋼部材は、

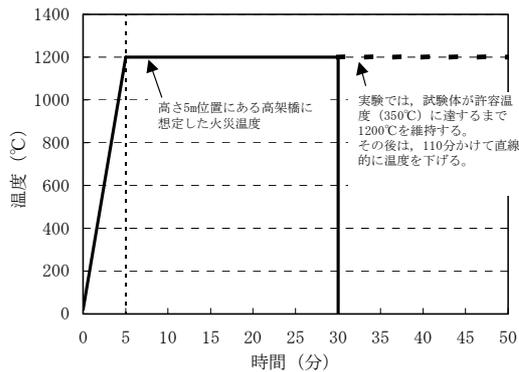


図-5 加熱曲線



写真-2 壁炉の状況

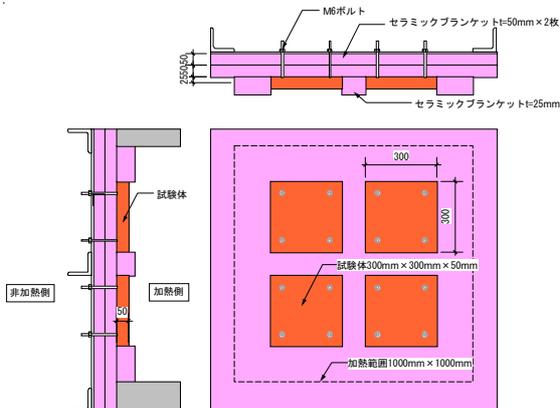


図-6 加熱試験用壁炉内部

高力ボルトの摩擦が切れ始める温度⁸⁾、コンクリートは強度が低下する温度⁹⁾とし、鋼部材、コンクリート部材とも 350℃ とした。

加熱実験は壁炉(写真-2、図-6)に示すように、一回の加熱試験で 4 体の試験体を同時に加熱した。

3.2 鋼部材試験体

加熱を受ける鉄骨部材の温度は、耐火塗料の膜厚、鉄骨部材の単位体積あたりの加熱表面積に影響を受ける。たとえば、耐火塗料の膜厚が薄いほど、鋼材温度は高くなる。また、鉄骨部材の単位体積あたりの加熱表面積が大きいほど、鋼材温度は高くなる。単位体積あたりの加熱表面積は H_p/A と呼ばれている。 H_p/A が大きいとは、肉厚が薄い材料で熱容量が小さいため温度上昇が大きくなり、 H_p/A が小さい材料は肉厚が厚く、熱容量が大きいため、温度上昇が遅くなる。よって、鋼材温度を 350℃ 以下に抑えるために必要な耐火塗料の膜厚を、 H_p/A に応じて決定すれば、工学的、コスト的に合理的なものとなる。今回の対象となる鋼橋の H_p/A は、ボックスタイプの場合は $38\sim 64\text{ m}^{-1}$ 、I タイプでは $72\sim 188\text{ m}^{-1}$ の範囲にある。

H_p/A と膜厚をパラメータとした実験を断面形状ごとに実施し、 H_p/A と必要膜厚の関係が得られると、最も合理的な膜厚設計が可能となる。試験体寸法は高さ 300mm × 幅 300mm 一定とし、板厚は 2 水準の 4.5mm、13mm とした。結果、 H_p/A は、 $H_p/A = 167\text{ m}^{-1}$ (鋼板板厚 4.5mm, 加熱面積 $260\text{ mm} \times 260\text{ mm}$)、および $H_p/A = 58\text{ m}^{-1}$ (鋼板板厚 13mm, 加熱面積 $260\text{ mm} \times 260\text{ mm}$) の 2 水準である。

耐火塗料の膜厚も試験変数とし、膜厚は 0.5mm、1mm、3mm、5mm の 4 水準とした。加熱試験は板厚ごとに実施し、膜厚の異なる 4 体の試験体を同時に加熱した。

鋼板試験体の温度は、非加熱面側に K 型熱電対を中央部 1 点と端部 1 点を設置し、鋼板温度を計測した。

3.3 コンクリート部材試験体

コンクリート試験体は土木構造物として標準的な圧縮強度の試験体(表-1)とした。また、コンクリート試験体は打設後 10 年が経過し、乾燥が十分に進んでいるものを使用した。

表-1 コンクリート配合表

材齢28日 調査強度 N/mm ²	スランプ cm	空気量 %	水セメント比 %	骨材最大 寸法 mm	細骨材率 %
24	18	4.5	56.5	20	48.5

試験体は 300mm × 300mm × 50mm とし、耐火塗料はメーカーの異なる 2 種類とし、膜厚は何れも 1.5mm とした。既にトンネルにおいて施工実績のある耐火材料についても加熱試験を実施し、発泡性耐火塗料の断熱性能と比較した。被覆材料は T 社製吹付けモルタル(厚さ 30mm)、

F社製吹付けモルタル（厚さ 30mm）、A社製珪酸カルシウム板（厚さ 27.5mm）である。

温度測定はコンクリート表面、内部熱伝導を確認するため表面から 25mm 深さの内部、非加熱面側の 3 点を K 型熱電対で測定した。

4. 実験結果

4.1 鋼部材

一例として、鋼板厚 13mm の加熱試験における炉内温度と時間の関係を図-7 に示す。設定した加熱曲線（図-5）によく近似して温度の上昇下降されていることがわかる。鋼板厚 13mm の加熱試験における鋼板温度と時間の結果を図-8 に示す。加熱試験後の試験体を（写真-3）に示す。図-8 より、膜厚が厚いほど鋼板温度は低く抑えられていることがわかる。

耐火塗料の膜厚と Hp/A と鋼材がある温度に到達する時間は式 (2) ¹⁰⁾ に示す実験式で表せることが知られている。実験結果より、式 (2) の実験定数を最小二乗法で求めた。

鋼材が許容温度 (350°C) に達する時間と膜厚と Hp/A の関係、実験式の精度を図-9、図-10 に示す。実験式の精度は高く、図-9 に示した関係を用いることで鋼材の断面寸法に応じた最適な膜厚を設定することができる。

$$FR = k_0 \left(\frac{1}{Hp/A} + k_1 \right) (DFT + k_2) + k_3 \quad (2)$$

FR : 350°C到達時間(min)

DFT : 膜厚(mm)

k0~k3 : 定数

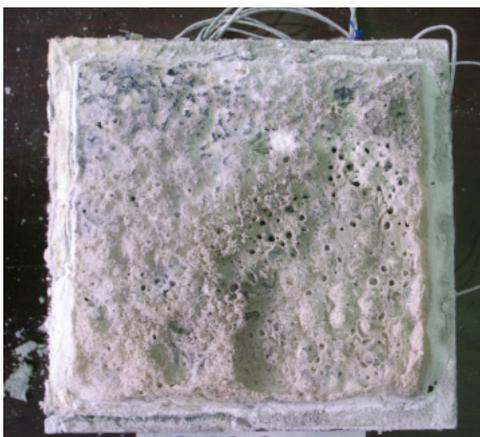


写真-3 耐火塗料材試験後の状態

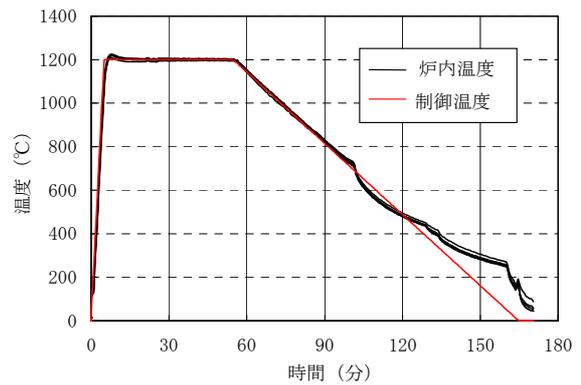


図-7 炉内温度と時間

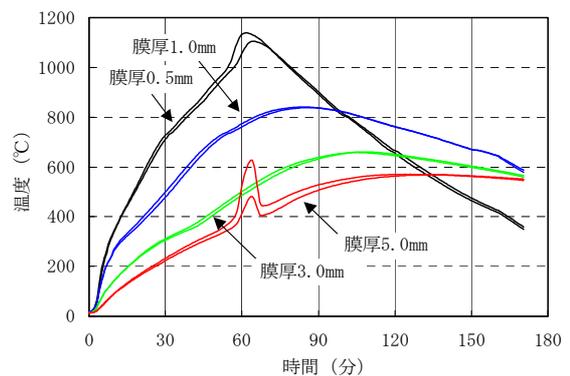


図-8 鋼板温度と時間

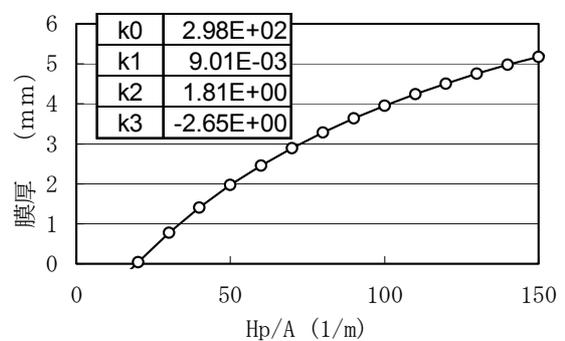


図-9 鋼板 350°C到達時間と Hp/A と膜厚の関係

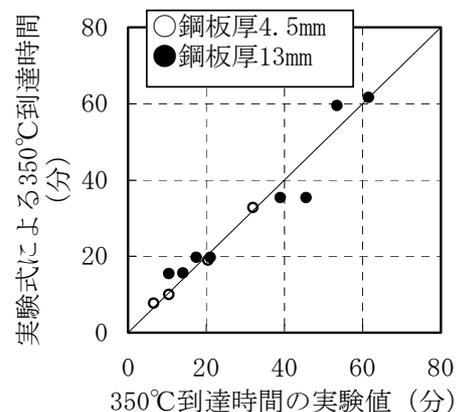


図-10 実験式の精度

4.2 コンクリート部材

炉内温度と時間の関係を図-11 に示す。設定した加熱曲線(図-5)と近似した炉内温度となっていることがわかる。コンクリート表面温度の経時変化を図-12 に示す。図-12 の試験結果は、メーカーの異なる2種類の耐火塗料(膜厚1.5mm)を示している。設定条件であるRABT加熱による炉内温度1200℃に対しても加熱30分間はコンクリート表面温度350℃以下に抑えることができることを確認した。試験後のコンクリート表面の塗料状態を写真-4,5 に示す。コンクリート表面の塗料が発泡し耐火性能を発揮していることがわかる。

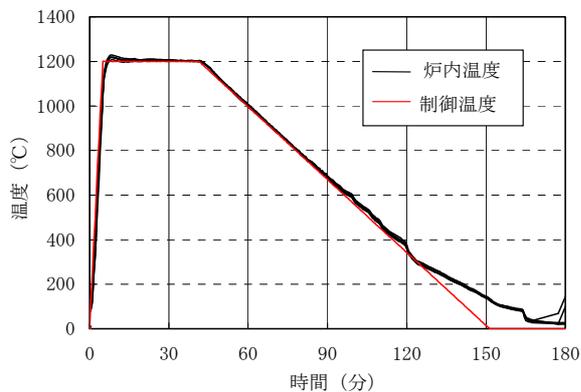


図-11 炉内温度と時間

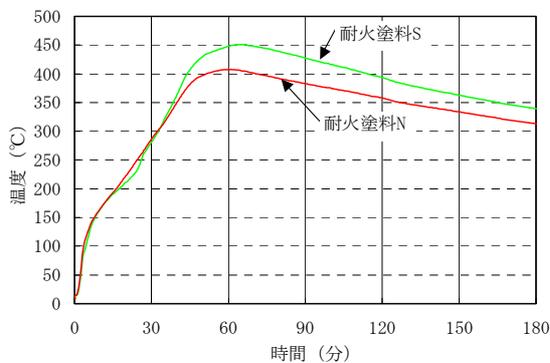


図-12 コンクリート温度と時間

4.3 コンクリート部材耐火材料比較

既にトンネルにおいて施工実績のある耐火材料と発泡性耐火塗料の断熱性能を比較した。T社製吹付けモルタル(厚さ30mm), F社製吹付けモルタル(厚さ30mm), A社製珪酸カルシウム板(厚さ27.5mm)で被覆したコンクリートの加熱試験も実施した。コンクリート表面の温度を図-13 に示す。

コンクリートの表面温度が上昇を開始した時間は、耐火塗料では加熱約1分、吹付けモルタル、珪酸カルシウム板では約6分で、耐火塗料の方が早かった。その後の昇温速度も耐火塗料の方が大きい結果となった。吹付けモルタル、珪酸カルシウム板では、コンクリート表面温

度が100℃で停滞したが、耐火塗料ではこの停滞現象は認められなかった。この停滞は、吹付けモルタル、珪酸カルシウム板中の水分が蒸発する際に潜熱を奪ったためと考えられる。

耐火塗料に比べてモルタル系、ボード系の耐火性能が高いことがわかる。一方で被覆厚は耐火塗料の10倍程度増加する。このことから、施工環境により耐火材料を適切に選定することが重要であると考えられる。

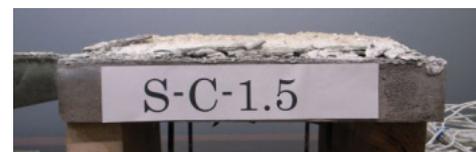
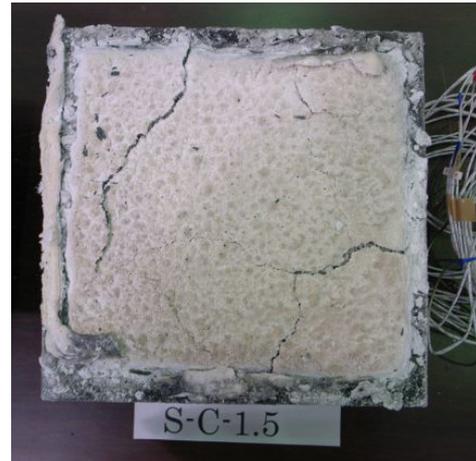


写真-4 耐火塗料材試験後の状態

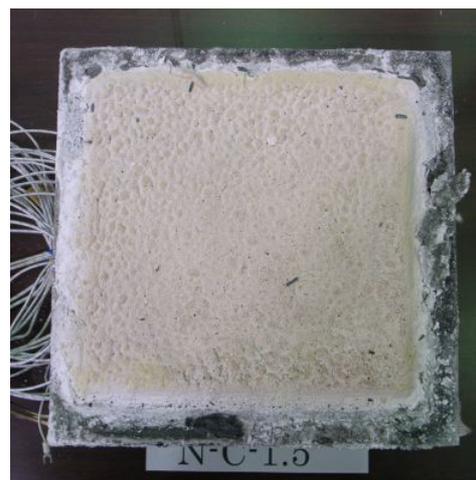


写真-5 耐火塗料材試験後の状態

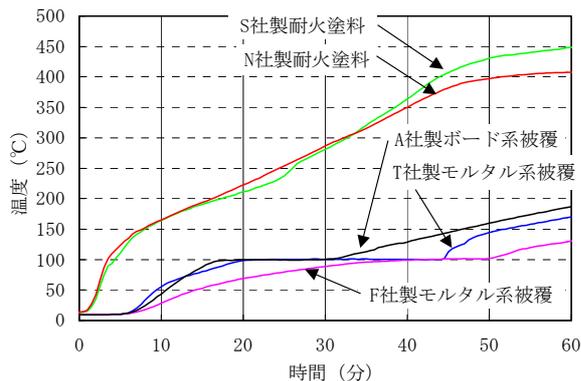


図-13 コンクリート温度と時間

5. まとめ

本研究の目的は自由空間での既存土木構造物の耐火性能を向上させることである。これに対して施工性やメンテナンス性に最も優れた材料として発泡性耐火塗料を選定しその有効性を確認した。また、自由空間における土木構造物の耐火実験に用いる加熱温度曲線をトンネルに用いられている RABT 曲線とした。以下に本研究で得られた知見を示す。

- ・鋼部材を RABT 曲線により加熱試験した結果から、膜厚を十分確保することで表面温度を 350°C以下に抑えることができることを確認した。
- ・RABT 曲線における鋼部材の加熱表面積 H_p/A から発泡性塗料の最適膜厚を推定できることを確認した
- ・コンクリート部材を RABT 曲線により加熱試験した結果から、膜厚を十分確保することで表面温度を 350°C以下に抑えることができることを確認した。
- ・発泡性耐火塗料と比較してモルタル系、ボード系は耐火性能が高いものの厚さが 10 倍以上となるため制約条件により材料の選定を要することを確認した。

コンクリート部材においても塗料系耐火材による耐火性能向上の可能性があることがわかった。しかしながら、発泡性耐火塗料は主成分であるポリリン酸アンモニウムが水分に弱いことが知られている。コンクリート部材内には水蒸気等水分が存在していることから、乾燥収縮によるひび割れからの水分流出等「水」に対する対処方

法について課題があると考えられる。

幾つかの材料についても同様の加熱試験を実施したが性能が発揮できなかった。今後、これらの結果を踏まえてコンクリート部材に適する耐火材料の研究を実施し報告していく。

謝辞

本論文の実験の計画、実施においては、大成建設技術センター道越氏に協力いただきました。ここに記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 清宮理：耐火技術とコンクリートー土木ー，コンクリート工学，Vol.45，No9，pp.8-13，2007.9
- 2) ZTV-TUNNEL : Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien fuer den Bau von Strassentunneln1 1995
- 3) 岡義則：耐火塗料を用いた鋼構造耐火被覆，日本火災学会誌，Vol.57，No3，pp.24-26，2007.6
- 4) 池島由華，中村昌宏：道路トンネルの避難安全評価に関する研究 その 3 メディア情報等を活用した事例調査，日本建築学会学術講演梗概集 A2，pp311-312，2006
- 5) 田中孝義：改訂版 建築火災安全工学入門 p171，日本建築センター，2002
- 6) 日本建築学会局所火災に対する耐火設計WG：耐火設計のための局所火源を考える -魅力ある耐火設計に向けて- 2005.2.24
- 7) Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires , p33, Nov. 2003
- 8) 藤本盛久 他：高力ボルト摩擦接合継手の耐火性能に関する研究，日本建築学会論文報告集，第 184 号，pp17-28，1971.1
- 9) 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書，pp222-223，2002.6
- 10) 近藤英之 他：耐火塗料の耐火性能評価（その 2）鋼材断面寸法に応じた膜厚算定のための計算法，日本建築学会大会梗概，A2.pp263-264，2008