

合成構造トンネル部材の耐火性評価

黒崎播磨 正会員 ○松尾幸久
 黒崎播磨 溝部有人

早稲田大学 フェロー 清宮 理
 新日本製鐵 正会員 木村秀雄

1. はじめに

沈埋トンネルの構造としては近年、鋼・コンクリートサンドイッチ部材が採用されつつある。この構造は、鋼殻がコンクリートと一体化しているため剛性が高いという特徴を有しているが、鋼殻がトンネル内空側に露出した構造であるため車両火災に対する耐火対策が必要と考えられている。そこで今回、このトンネルをモデル化した供試体を作製し、セラミック系の耐火板で保護した場合の耐火性能を評価すると共に、熱伝導解析の適用方法について検討したので以下に報告する。

2. 耐火試験

1)耐火試験方法 鋼・コンクリートサンドイッチ試験体（以下、合成構造試験体）の耐火構造を図1に示す。鋼殻は、材質をSM490Y、厚さを8mmとした。コンクリートの厚さは200mmとした。コンクリート配合のW/Cは43%、単位水量は184kg、呼び強度は30N/mm²で、施工翌日密閉した後、28日間以上養生した。合成構造試験体に、かさ比重1.0、熱伝導率0.17W/mK、長さ600×幅500×厚さ20mmのセラミック系耐火板を二枚突き合わせ、これを特殊六角ボルトで固定し耐火構造とした。

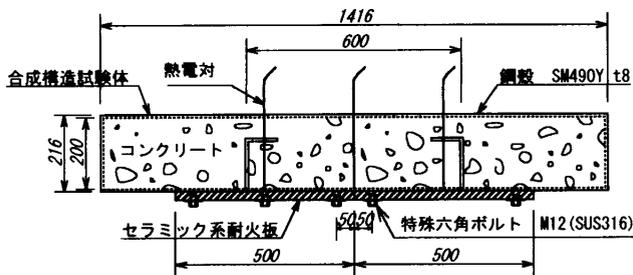


図1 鋼・コンクリートサンドイッチ試験体の耐火構造

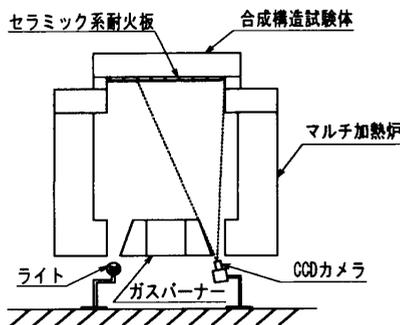


図2 マルチ加熱炉概要

耐火試験には高速昇温、炉温均一という特徴を有すマルチ加熱炉を用いた(図2)。耐火試験の想定火災は、RABT曲線を参考に、4分で1000℃まで昇温、その後30分後まで1000℃を継続し、110分後に常温に戻る曲

線とした。この温度曲線は、実際の沈埋トンネルの耐火設計に用いられたものである。測温位置は、耐火板の一般部(以下、一般部)、耐火板の目地部(以下、目地部)およびボルト部の3箇所において、各々鋼殻裏面およびコンクリート0、25、50mm深さとした。従って、耐火試験前においては、鋼殻裏面とコンクリート表面(0mm)は同一深さであることを意味し、境界面となっている。

2)耐火試験結果 合成構造試験体の一般部における測温結果を図3に示す。鋼殻の最高温度は215℃であった。一方、コンクリート表面温度は、鋼殻と同一深さの測温位置であったにも拘わらず加熱初期から低く、最高温度も137℃であった。これは、何らかの理由で鋼殻が膨れ、この界面に生じた隙間が断熱層として機能したため鋼殻温度が高くなる一方、コンクリート表面温度は低くなったと推察された。

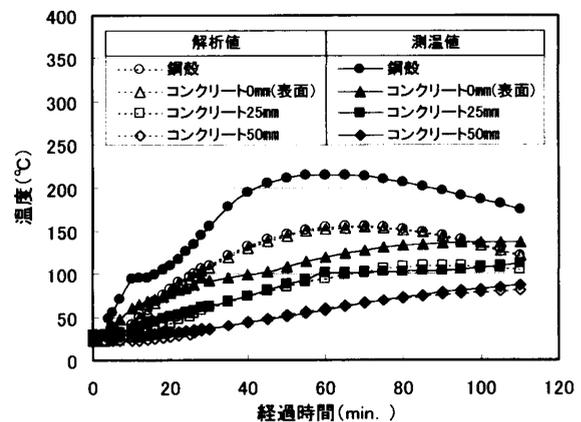


図3 合成構造試験体の一般部における測温値と解析値比較(コンクリートの水分:8%)

一般部、目地部およびボルト部における温度比較を図4に示す。鋼殻温度については、一般部に比べ目地部やボルト部の方が高かった。一方、コンクリート表面

キーワード: 合成構造、沈埋トンネル、耐火板、耐火試験、トンネル

〒292-0835 千葉県木更津市築地 7-1 TEL 0438-37-0121 FAX 0438-37-3625

温度はどの部位でも概ね同じ(130℃前後)であった。

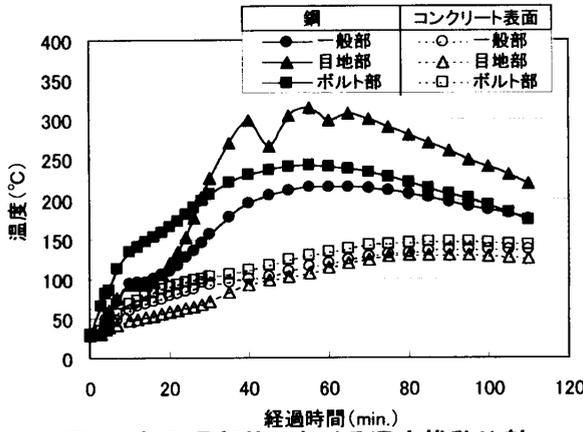


図 4 各測温部位における温度推移比較

3. 熱伝導解析の適用方法

1)熱伝導解析条件 フーリエの熱伝導方程式を式(1)として示す。ここに、 $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ はx, y, z方向の熱伝導率、cは比熱、 ρ はかさ比重、Tは温度、tは時間を表す。

$$\lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

合成構造の熱解析を正確に行うには、式(1)より、コンクリートが含む水の比熱の取り扱いが重要と言える。ところが、この式は温度依存性であるため、100℃における比熱をそのまま取り扱うことができず、また熱計算の時間間隔との関係も相まって、この比熱が計算に正確に反映されないことがある。そこで、測温結果を参考に、温度を変数とした値になるように比熱を 90~100℃の間で振り分けた。加熱時におけるコンクリート中の水の蒸発量は、W/C=43%の内、理論水和に必要な 28%に相当する水分以外とした。

鋼殻の膨れ(隙間)については、熱解析上、式(1)から空気の熱伝導率の取り扱いが重要と言える。この隙間と空気の熱伝導率の関係は、簡易的には式(2)で表すことができる。 λ_a は空気の熱伝導率、Hはコンクリートの熱伝達係数、wは鋼殻とコンクリートとの隙間である。

$$\lambda_a = Hw \quad (2)$$

コンクリートの熱伝達係数は、11.6W/m² Kとした。隙間の幅は、耐火試験後の測定結果である平均隙間 0.8 mmを参考に、0.4、0.8、1.5 および 3.0 mmと仮定した。

熱解析に用いた材料の物理的性質を表1に示す。

表 1 材料の物理的性質

| | 鋼材 | コンクリート | セラミック系耐火板 |
|------------------------|------|----------|-----------|
| 密度(kg/m ³) | 7800 | 2300 | 1000 |
| 比熱(kJ/kgK) | 0.46 | 0.63~5.9 | 0.84 |
| 熱伝導率(W/mK) | 35 | 2.5~1.2 | 0.17 |

2) 熱伝導解析結果 図3に示すように、コンクリート中の水分8%の蒸発熱を加味するだけでは解析値は測温値と乖離しており、他の影響を更に考慮する必要がある。

そこで、この結果を元に、鋼殻とコンクリートの隙間を0.4、0.8、1.5 および 3.0 mmとして計算した結果、鋼殻の最高温度は、各々187、218、263 および 323℃と、隙間の増大に伴い大きくなるのが分かった(図示なし)。一方、コンクリート表面温度は、この結果とは逆の傾向を示した(各々145、135、121 および 102℃)。これらのことから、この隙間が断熱層の役割を果たすため、鋼殻温度が上昇する一方、コンクリート表面温度の上昇が抑制されたと考える。図5に示すように、今回の計算の中で解析値が測温値に良く合致したケースは、実測値と同様隙間が0.8 mmの場合であった。

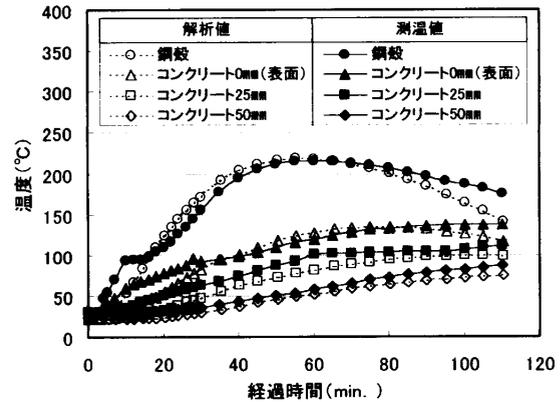


図 5 解析値と測温値の比較(一般部。隙間 0.8 mm)

4. まとめ

鋼・コンクリートサンドイッチ部材について耐火試験を行い、得られた温度特性を熱伝導解析により検討した結果、以下の知見を得た。

- 20 mm厚のセラミック系耐火板を取り付けることで、鋼殻を通常許容温度とされる350℃以下に保護できた。
- 熱伝導解析に際し、コンクリート中の水分や鋼殻とコンクリート界面の隙間の影響を加味すれば、合成構造特有の挙動を良くシミュレートできるということが分かった。
- 鋼殻の許容温度については、大きな隙間を生じさせないことも含めて、構造上問題とならない温度になるよう設定することが将来重要と考えられる。

(謝辞)

(株)ケー・エフ・シー殿には、特殊六角ボルト等をご提供頂いた。ここに感謝の意を表します。