

耐火板を取付けたトンネルの車両火災による構造部材の損傷に関する一考察

早稲田大学 学生会員 ○小林 康之
早稲田大学 フェロー 清宮 理

1. まえがき トンネルの耐火設計は現在コンクリート、鋼材などの構成材料の許容温度以内になるように行われ、必要に応じて耐火板の取付けなどの耐火対策が行われている。各種の耐火実験から耐火対策の妥当性は確認されているが、筆者らは耐火実験より現行の許容温度以内に設計したとしてもコンクリートひび割れが生じ鋼材が降伏応力度を越す可能性がある場合があることを確認してきた。今回図-1に示すシールドトンネルを対象に全面に耐火板を取り付けた場合と一部分取り付けた場合に3種類の車両火災規模により構造部材が損傷を受ける可能性があるかを、有限要素法による簡易な熱伝導解析と熱応力解析で検討を行った。

2. 計算条件 トンネル内に車両火災が生じたとして、そのときの温度上昇の時間的経過を図-2に示すように大規模火災（タンクローリー車など危険物積載車両）、中規模火災（バスなど）及び小規模火災（乗用車レベル）に分類した。このとき、覆工部分全体に耐火板を設置しているものと、上部1/3のみ耐火板を設置している2種類の取付け範囲を想定した。トンネルセグメントは鉄筋コンクリート製で通常使用されるタイプである。今回の解析においては、車両火災では車道上側の表面部を加熱し、熱伝導解析より得られた部材内の温度分布より温度応力度を計算し、この部材内の応力度に常時荷重を考慮して部材断面に与えられる曲げモーメントを計算した。これよりコンクリート部材にひび割れや部材が

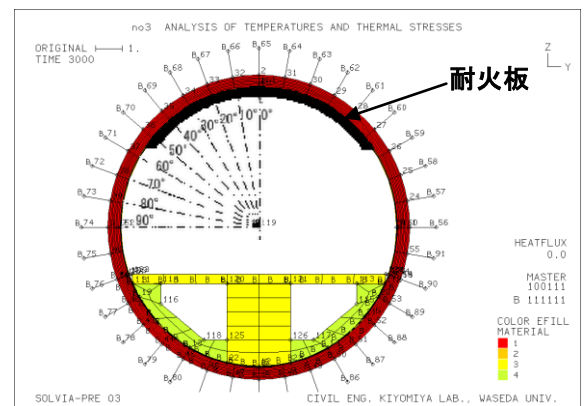


図-1 シールドトンネルのモデル

降伏するかを調べる。熱伝導及び熱応力解析使用した有限要素法プログラムはSOLVIAである。トンネルの直径は11.9m、一次覆工厚0.45mで耐火板厚5cmである。耐火板の密度は 950kg/m^3 、比熱 994175J/kgK 、熱伝導率は1200度までの温度依存性を考慮して $0.217\sim 0.342\text{W/mK}$ である。コンクリートの諸物性も1200度までの温度依存性を考慮してある。ただコンクリートの爆裂と鋼材の温度依存性は考慮していない。

3. 計算結果 3.1 部材内の温度分布 図-3にトンネル上部での部材内の温度分布の経時変化を示す。耐火板表面は高温となっているが、内部には温度の上昇があまり見られない。また耐火板の設置により、数時間経過後の内部の温度上昇が押さえられている。一方耐火板が設置されていない個所ではコンクリート部材内の温度上昇は大きく長時間たつと内部まで温度がかなり上昇していった。なお耐火板が設置されていても火災終了後でも内部温度は上昇しており4時間後でも深さ10cmで110度、20cmで80度と高温状態となっていた。この熱伝導解析で得られた温度分布の結果を利用してシールドトンネルのモデルに入力し、各部位で熱応力解析を行った。

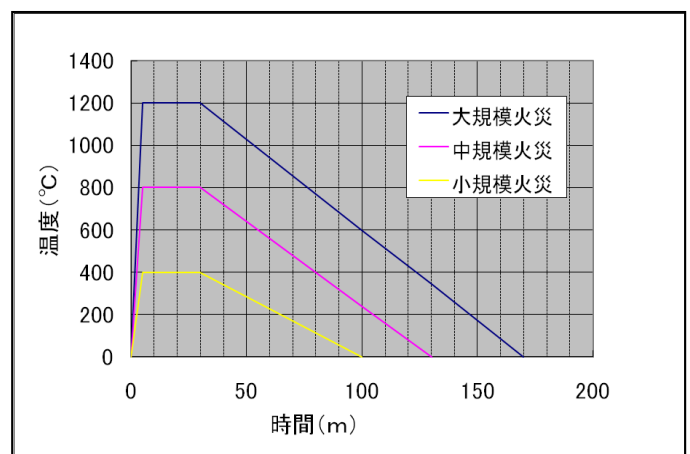


図-2 RABT 曲線

キーワード 熱応力, トンネル, 車両火災, 有限要素法

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学創造理工学研究科清宮研究室 TEL 03-5286-3852

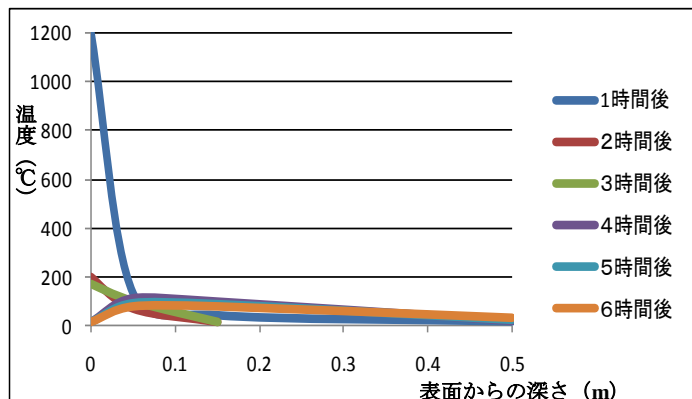


図 - 3 部材内の温度分布曲線 (耐火板あり)

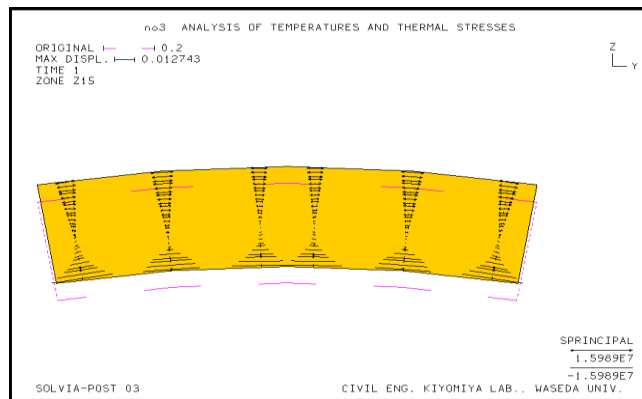


図 - 4 断面内主応力度分布 (耐火板あり)

3.2 部材内の応力度分布 大規模火災で耐火板有りの条件で熱応力解析を行い、1 時間後におけるトンネルの頂点 (クラウン) での応力の矢線図を図-4 に示す。この応力分布には土圧、水圧の常時荷重は加えていない。この応力度分布を見ると、一次覆工内側表面側に大きな応力勾配が生じていた。トンネル内側には圧縮応力が、外側にはひび割れ発生応力度以上の引張応力が生じていた。これらの結果から常時荷重分を加えて一次覆工部分に生じるモーメントを計算し、鉄筋コンクリート部材のひび割れ、降伏及び破壊モーメントとの比較を行った。

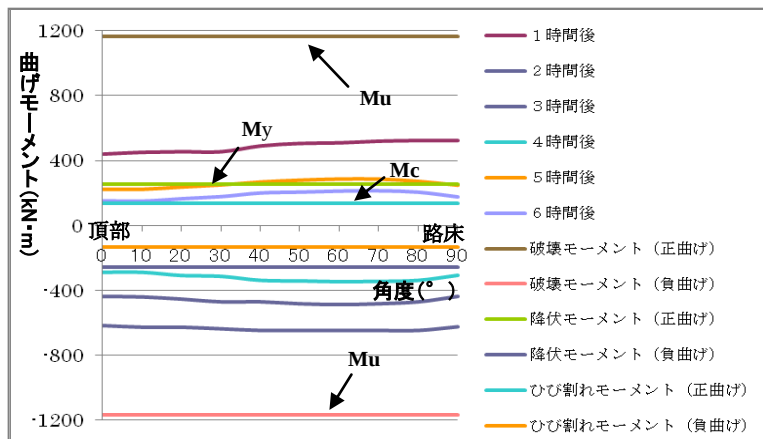


図 - 5 曲げモーメント分布 (全面耐火板, 大規模火災)

4. 考察 大規模火災時では、トンネル内全体に耐火板を付けている場合と、トンネル上部 1/3 に耐火板を付けている場合とでは、1 時間後で安全性が大きく変わってきた。図 - 5 に示すように耐火板を全体に付けている場合はひび割れが生じ、鉄筋は降伏するものの、破壊モーメントを上回ることはなかった。図 - 6 に示すようにト

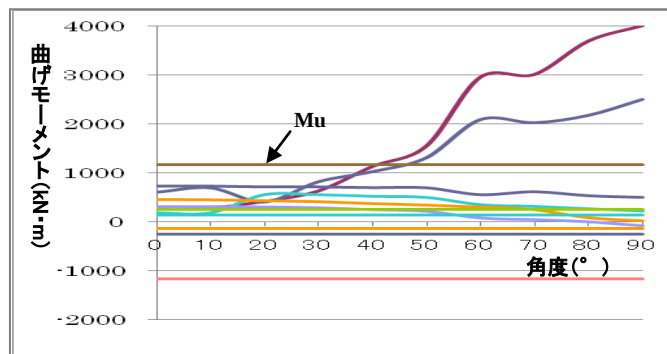


図 - 6 曲げモーメント分布 (耐火板 1/3, 大規模火災)

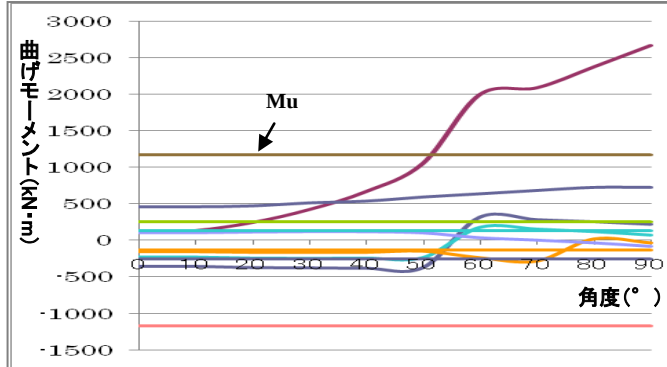


図 - 7 曲げモーメント分布 (耐火板 1/3, 中規模火災)

ンネル上部 1/3 に耐火板を設置している場合は、破壊モーメントを上回る部分が耐火板を取り付けた境界部から下方に計算された。設計許容温度応力以内でも火災発生後 2, 3 時間後に内部温度の上昇と共に大きな温度応力が計算され、部材内にひび割れの発生や鋼材の降伏が計算された。すなわち火災終了後に最高温度が低下しても温度が内部に伝達されて部材内の温度勾配が大きくなり、構造部材が損傷する可能性があることを示している。部分的に耐火板を取り付けた場合は、図 - 7 に示すように中規模と小規模の車両火災でも構造部材が温度応力の部材内での不均一により、トンネル崩壊に至らないまでもかなりの損傷を受けると計算された。

5. 結論 今回の計算結果によると火災時の材料の温度を許容値以内に押さえるだけの耐火設計では不十分である。トンネルでの火災損傷は検査が困難なこと、修復に長期間かかることなどから、車両火災が終了したあとの部材内部への温度上昇や部分的な耐火板の配置にも設計時に注意が必要と考えている。