

火災時におけるシールドトンネル覆工の力学的挙動に関する研究

京都大学大学院工学研究科 正会員 小野紘一 京都大学大学院工学研究科 正会員 杉浦邦征
 京都大学大学院工学研究科 正会員 大島義信 京都大学工学部 学生員 ○後藤宗平

1. はじめに

シールドトンネル内で火災が発生すると、爆裂によって覆工からコンクリートが崩落し、覆工の断面が減少して耐荷力の低下が考えられる。またセグメントに耐火コンクリートを用いてトンネル覆工の爆裂が防止できたとしても、高熱によるコンクリートの強度低下やトンネルの熱膨張による荷重も加算されてトンネルが崩壊する恐れがある。そこで本研究では、火災時におけるシールドトンネルの耐荷力を簡易モデル(リングモデル)により評価する。

2. 検討対象トンネルと荷重条件

TBM シールド工法により施工され、内径が 10.1m であり、長さ 2.5m, 幅 1.5m, 厚みおよび桁高 250mm の合成セグメントを使用した土被り約 23m のトンネルを検討対象トンネルとする。水圧・土圧は土水分離とし、地盤反力係数は全方向一様とする(表 1)。鉛直土圧の算定には Terzaghi の緩み土圧式を用いる。

トンネル覆工の断面力の算定には、算定された土水圧荷重を用いて、修正慣用計算法によるセグメント断面力の算定式を用いる。また、曲げ剛性の有効率 η について3種類($\eta=1.0, 0.8, 0.6$)を想定し、それぞれの有効率について3種類の曲げモーメントの割増率 ζ ($\zeta=0.2, 0.3, 0.4$)を想定した。

3. 火災による耐荷力への影響

3.1 断面欠損と材料劣化

断面欠損と材料劣化の状態として、以下の3つを想定する(図 1)。

状態1:健全(火災前)

状態2:セグメント内表面から5cmの範

囲でコンクリートおよび鋼に材料劣化が発生した場合

状態3:内表面から5cmの範囲で爆裂による断面欠損し、さらにそこから10cmの範囲で材料劣化が生じた場合

セグメントの断面積、断面二次モーメントは火災前のコンクリートのヤング係数に換算して算出した。高温を受けた材料の劣化部分のコンクリートの圧縮強度は受ける前の1/2、ヤング率は1/4に減少するとし、鋼材の各強度は受ける前の1/2に減少するものとする(表 2)。

3.2 温度膨張による追加荷重

火災によりトンネル覆工が熱膨張し、地盤による拘束の結果断面力が発生する可能性がある。よってリングモデルにおける熱膨張の結果発生する断面力を、FE モデル熱応力解析にて検討する。検討に用いる FE モデルは、トンネルの対称条件を考慮して、図 2 に示すモデルとする。火災時のセグメントコンクリート内の深さ方向への温度分布は、火災実験結果を元に仮定した。また火災時にはトンネル内表面の全面が 1200℃の状態を保つと仮定する。トンネル覆工の地盤による拘束は、完全拘束および地盤ばね拘束の2つの場合を想定する。これら2つの場合について、節点に温度分布を与えることで発生する断面力を、修正慣用計算法

表 1 土圧係数および地盤反力係数

側方土圧係数	0.4
地盤反力係数	6090kN/m ³

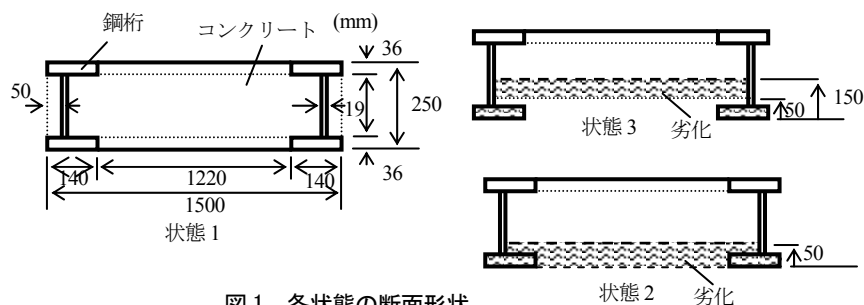


図 1 各状態の断面形状

表 2 セグメント部材の強度およびヤング率

		火災前	火災後
コンクリート	圧縮強度	42.0 MPa	21.0 MPa
	ヤング率	33.0 GPa	8.25 GPa
鋼桁 (SM 490)	引張強度	322.5 MPa	161.3 MPa
	圧縮強度	322.5 MPa	161.3 MPa
	せん断強度	187.5 MPa	93.8 MPa
	ヤング率	210.0 GPa	210.0 GPa

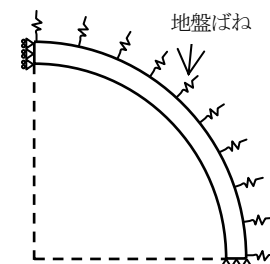


図 2 熱応力解析モデル

キーワード：火災、シールドトンネル

〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科 TEL・FAX 075-753-4791

によって算定された断面力に加えることで火災時の覆工の断面力とした。

4. 解析結果および考察

セグメントのコンクリートおよび鋼材の安全率 s を、発生応力 σ と強度 f をもとに式(1)によって定義した。

$$s = \frac{f}{\sigma} \quad (1)$$

表3 検討ケース

ケース	火災劣化状態	温度膨張の影響
1	状態1	なし
2	状態2	
3	状態3	
4	状態2	完全拘束
5		地盤ばね拘束
6	状態3	完全拘束
7		地盤ばね拘束

表4 η, ζ の組合せ

η		ζ
A	1.0	0.2
B		0.3
C		0.4
D	0.8	0.2
E		0.3
F		0.4
G	0.6	0.2
H		0.3
I		0.4

表3に示す7つの検討ケースを、曲げ剛性の有効率 η と曲げモーメントの割増率 ζ の9つの組合せ(表4)についてコンクリートおよび鋼材の安全率を示したものが図3、図4である。材料劣化による断面力の変化は小さいが、材料強度が低下するために安全率が低下する。またコンクリートに比べて、鋼材の安全率のほうが全体として小さい。また曲げ剛性の有効率 η および曲げモーメントの割増率 ζ の値が大きいほど、安全率は小さい。さらに熱膨張を考慮すれば、発生する断面力が大きくなり安全率は極端に低下し1を大きく下回る。また地盤から完全拘束された場合の断面力増加が著しい。これらより火災が発生した場合、材料劣化による強度低下を考慮し、熱膨張による追加荷重を考慮する必要があることが明らかとなった。

5. 結論および今後の課題

本研究によって得られた知見を以下にまとめる。

- 火災時には、高温による材料劣化による断面力の増加よりも、材料強度の低下による安全率の低下が著しい。さらに覆工の温度膨張による断面力の増加により、セグメントの安全率が著しく低下する。
- トンネル覆工が地盤によって完全に拘束されている場合、温度膨張によって非常に大きな軸力・せん断力が発生し、その結果、安全率の著しい低下を示す結果となった。このため温度膨張による耐力力の低下の程度は、実際の地盤の地盤 反力係数の値によるところが大きいと考えられる。

また今後の課題として以下が挙げられる。

- 断面力の算定において、より精度の高いと思われるはりばねモデル等による解析を行い、修正慣用計算法による解析の結果と比較する必要がある。
- トンネル覆工内の温度分布は、実験結果から大まかに仮定した。温度膨張の影響をより正確に表現するために、熱応力解析を伝熱解析に基づいた温度分布を用いて行う必要がある。

[参考文献]

[1] (社)土木学会編,「トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説書」, 1996
[2] (社)日本コンクリート工学協会編,「コンクリート構造物の火災安全性研究委員会(委員長小野絢一)」, 2002

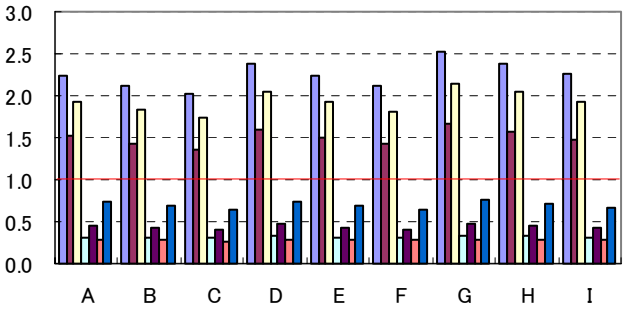


図3 コンクリートの安全率

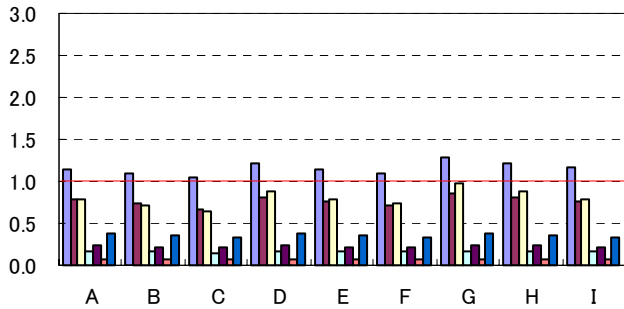


図4 鋼材の安全率