

高速鉄道トンネル内の圧力変動の繰り返し回数と覆工コンクリートの疲労特性

東海旅客鉄道 正会員 山崎幹男
 正会員 加藤 覚
 正会員○岡崎真人

大崎総合研究所 正会員 鈴木 誠
 正会員 若原 敏裕
 正会員 野澤剛二郎

1. はじめに

高速鉄道車両がトンネル内を走行する際には、列車の突入に伴う圧力波(=突入波)、通過やすれ違いに伴う圧力低下、あるいは、退出に伴う圧力波(=退出波)などが生じ、これらの圧力変動は音速(突入波と退出波)もしくは列車走行速度(列車通過の場合)で伝播、坑口で反射し、トンネル内で複雑に重ね合わされる¹⁾。本報告では、超高速鉄道のトンネル覆工構造の合理的な耐風圧設計を実現する目的から、高速車両のトンネル走行に伴う圧力変動によって生じる繰り返し応力度を算定し、覆工コンクリートの疲労特性について考察を行った。

2. トンネル内の圧力変動と繰り返し回数

覆工コンクリートの疲労特性について検討する目的から、列車の走行形態に応じて発生するトンネル内の圧力現象(表-1中の(a)~(f)参照)に対し、数値流体解析を用いて、その圧力変動(正圧・負圧)を推定した¹⁾。表-1は疲労の検討に用いた圧力現象とトンネル内の圧力変動(大気圧 P_0 に対する比)を示したものである。表-1に示した圧力変動は、列車長400mの列車が時速500kmで突入・通過・退出する際のトンネル内の圧力変動を示している。したがって、表-1のトンネル内の列車すれ違いの相対速度は1000km/hである。

著者らの既往の研究から^{1)~4)}、表-1に示した圧力現象は列車の走行条件によりトンネル内で重ね合わされ、その結果、トンネル内の圧力変動とその繰り返しの回数が決定される。そのため、圧力現象の重畳のパターンや回数(以下、重複度と定義する)により、各々の圧力変動とその繰り返し回数を算定する必要がある。図-1は、トンネル内1列車単独走行時の圧力現象の重ね合わせパターンの一例を示したものである。本報告では、以下に示す条件に基づき、圧力現象の重複度と圧力変動および繰り返し回数を定めた。

- ・列車の運行本数は1時間あたり上下 $10 \times 2 = 20$ 本
- ・運行間隔は上下線それぞれ6分間隔
- ・運行時間は6時から22時まで16時間(320本/日)
- ・列車長は400m
- ・トンネル内の通過は等速500km/h走行
- ・トンネルの供用期間は100年
- ・圧力波の距離減衰は考慮せず反射は2回まで
- ・検討の対象とするトンネル長は4.0km

表-2および表-3は、長さ4.0kmのトンネルを想定し、トンネル内に生じる全ての圧力現象の重畳パターンを想定し、重複度1~3に応じて正圧および負圧の圧力変動と繰り返し回数を算定したものである。

3. 圧力変動に対する覆工コンクリートの累積損傷度

表-2および表-3に示したトンネル内の圧力変動に対し、図-2に示した応力解析モデル²⁾を用いて、覆工コンクリートの応力解

表-1 疲労の検討に用いる個々の圧力現象とその圧力変動

圧力現象	正 圧	負 圧
(a) 突入波 $\frac{\Delta P_A}{P_0}$	+0.055	-
(b) 退出波 $\frac{\Delta P_B}{P_0}$	+0.055	-
(c) 反射波 $\frac{\Delta P_{A \pm}}{P_0}$	+0.055	-0.055
(d) 列車通過 $\frac{\Delta P_R}{P_0}$	-	-0.066
(e) すれ違い $\frac{\Delta P_{R2}}{P_0}$	-	-0.098
(f) 粘性効果 $\frac{\Delta P_V}{P_0}$	+0.019	-0.019

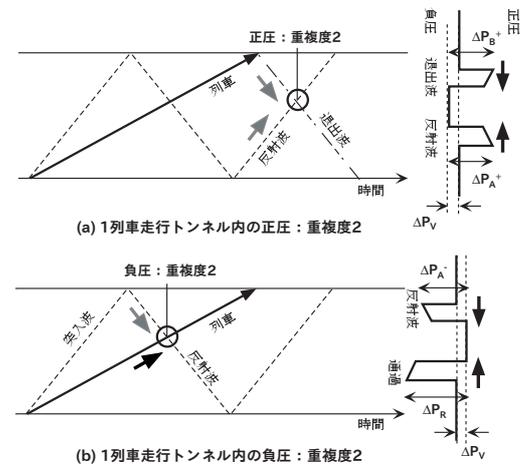


図-1 トンネル内の圧力現象の重ね合わせパターン

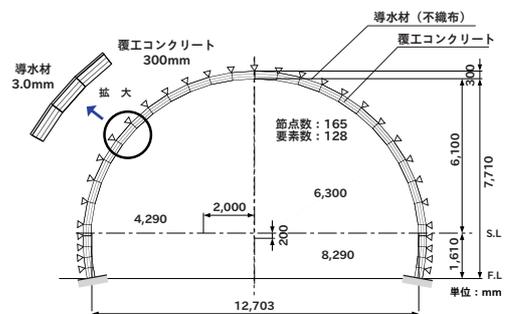


図-2 圧力変動に対する覆工コンクリートの応力解析モデル

キーワード：高速鉄道，トンネル，覆工コンクリート，圧力変動，繰り返し，数値流体解析，疲労

連絡先：〒103-8288 東京都中央区八重洲1-6-6 八重洲センタービル8F TEL：03-(3274)-9545, FAX：03-(3274)-9550

析を実施した。応力解析から求められるコンクリート応力度とその繰返し回数から、覆工コンクリートの累積損傷度を評価する。

1) 正圧作用時：トンネル内に正圧を生じる場合は、覆工コンクリートの応力は圧縮応力 ($=\sigma_{min}<0$) から引張応力 ($=\sigma_{max}>0$) の状態となる。そのため、ここでは、無筋コンクリートの破壊回数を表す式として、以下の実験式⁵⁾

$$\log N = 9.36 - 7.93 \frac{\sigma_{max}}{f_{ctm}} - 2.59 \frac{|\sigma_{min}|}{f'_{cm}} \quad (1)$$

を用いた。ここに、 f_{ctm} はコンクリートの引張強度の平均値であり、 f'_{cm} は同じく圧縮強度の平均値である。

2) 負圧作用時：トンネル内に負圧を生じる場合は、覆工コンクリートの応力は常に圧縮応力 ($=\sigma_{min}<0$) にあるため、コンクリート標準示方書で示されている以下の式で破壊回数を求める。

$$\log N = 17 \times \frac{1 - \sigma_{max}/f'_{ck}}{1 - \sigma_{min}/f'_{ck}} \quad (2)$$

なお、 f'_{ck} はコンクリートの圧縮強度である。

上述の式(1)(2)を用いて覆工コンクリートの累積損傷度の解析を行った。その結果を表-4に示す。表-4に示すように、繰返し作用する圧力変動に対する累積損傷度は、最大でも0.034であり1.0に比べてはるかに小さく、覆工コンクリートの疲労特性の観点から言えば、設計上十分な耐力を有することを確認した。

表-2 正圧の圧力変動と繰返し回数

圧力現象	圧力変動 $\frac{\Delta P_+}{P_0}$	回数
重複度 3	+0.146	374,000
重複度 2	+0.110 +0.091	6,588,000
重複度 1	+0.055	32,424,000

表-3 負圧の圧力変動と繰返し回数

圧力現象	圧力変動 $\frac{\Delta P_-}{P_0}$	回数
重複度 3	-0.138 -0.134	281,000
重複度 2	-0.102 -0.098 -0.091	5,840,000
重複度 1	-0.066 -0.055	22,520,000

表-4 トンネル内の圧力変動による覆工コンクリートの累積疲労損傷度

	重複度	$\Delta P/P_0$	n_i	断面内の位置 90 度				断面内の位置 45 度 (=135 度)			
				σ_{max}	σ_{min}	N_i	n_i/N_i	σ_{max}	σ_{min}	N_i	n_i/N_i
正圧	3	+0.146	374,000	0.15	-0.01	3.894E+09	9.6E-04	0.11	-0.19	5.856E+09	6.4E-04
	2	+0.110	6,588,000	0.09	-0.01	8.105E+09	8.1E-03	0.00	-0.19	2.140E+10	3.1E-03
	1	+0.055	32,424,000	0.05	-0.01	1.304E+10	2.5E-02	-0.07	-0.19	4.988E+10	6.5E-03
負圧	3	-0.138	281,000	-0.01	-0.20	6.785E+16	4.1E-12	-0.19	-0.50	5.087E+16	5.5E-12
	2	-0.102	5,840,000	-0.01	-0.13	7.774E+16	7.5E-11	-0.19	-0.39	6.427E+16	9.1E-11
	1	-0.066	22,520,000	-0.01	-0.09	8.488E+16	2.7E-10	-0.19	-0.32	7.506E+16	3.0E-10
累積疲労損傷度 $\sum \frac{n_i}{N_i}$				0.034				0.010			

σ_{max} および σ_{min} の単位は N/mm²

4. まとめ

高速車両のトンネル走行に伴う圧力変動によって生じる繰返し応力度を算定し、覆工コンクリートの疲労特性について考察を行った。その結果、繰返し作用する圧力変動に対する覆工コンクリートの累積損傷度は、最大でも0.034であり、疲労特性の観点から言えば、設計上十分な耐力を有することを確認した。

参考文献

- 1) 渡瀬, 山崎, 梶川, 前田, 梶山, 上野; 高速鉄道のトンネル内圧力変動に対する覆工の挙動把握 - 圧力変動解析 -, 土木学会第55回年次学術講演会, 平成12年9月.
- 2) 新美, 若原, 野澤, 梶川, 渡瀬, 宮本; 高速鉄道のトンネル内圧力変動に対する覆工の挙動把握 - 応力解析モデルの構築 -, 土木学会第55回年次学術講演会, 平成12年9月.
- 3) 山崎, 若原, 永長, 上野, 藤野; 超高速鉄道トンネル内に生じる圧力変動評価, 土木学会論文集 (投稿中)
- 4) 山崎, 加藤, 若原, 岡崎, 上野, 藤野; 超高速鉄道トンネル内の圧力変動に対する覆工構造の設計, 土木学会論文集 (投稿中)
- 5) Cornelissen, H.A.W. and Reinhardt, H.W.: Uniaxial tensile fatigue failure of concrete under constant-amplitude and programme loading, Magazine of Concrete Research, Vol. 36, No. 129, pp.216-226, 1984.