# 鉄道開削トンネルの性能照査型設計法適用に 関する一考察

坂田 智基1・室谷 耕輔1・仲山 貴司2・柳川 一心2・焼田 真司2

 <sup>1</sup>正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 東京本社鉄道系部門地下鉄グループ (〒102-0083 東京都千代田区麹町2-10-13) E-mail:sakata\_t@cfk.co.jp

<sup>2</sup>正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部トンネル (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38) E-mail:nakayama@rtri.or.jp

鉄道開削トンネルの性能照査型設計体系への移行にあたり,現行の限界状態設計法で設計された1層2径 間の鉄道開削トンネルを対象に,新しい設計技術や維持管理における調査事例等を参考に設計条件を再設 定して,性能照査型設計法による試計算結果(常時)と比較した.調査事例については,既存鉄道トンネ ルの調査から得られた中性化かぶりや曲げひび割れ幅の評価方法について考慮した.

その結果,性能照査型設計法においても,設計断面力の増加やそれに伴う部材安全率の増加はみられる が,限界状態設計法と同等の構造スペックとなることが確認できた.

Key Words : railway opencut tunnel, performance-based design, durability, flexural crack width

## 1. はじめに

現在,鉄道開削トンネルの設計では,平成13年に発刊 された「鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル」 <sup>1)</sup>(以後,開削標準とする)に基づいて限界状態設計法 が用いられている.この間,国土交通省の「鉄道に関す る技術上の基準を定める省令」(国土交通省151号)の 発令に伴って,技術基準の性能規定化への移行が必要と なり,トンネル以外の鉄道構造物の設計標準については, 既に性能照査型設計体系に改訂されている.そのため, 開削トンネルについても,性能照査型設計体系に移行す ることが検討されている.鉄道開削トンネルの設計を性 能照査型設計体系に移行するにあたり,建設コスト縮減 や設計自由度の向上が期待されるとともに,地中構造物 としての環境条件や維持管理の実状等に配慮した特有の 性能を定めることが課題となっている.

本検討では、1層2径間の鉄道開削トンネルを対象とし て、他の鉄道構造物の設計標準<sup>2</sup>や土木学会のコンクリ ート標準示方書<sup>3</sup>で改訂されている設計諸元や既設鉄道 開削トンネルの維持管理における調査事例(中性化かぶ り深さ、曲げひび割れ幅の評価)等を参考に設計条件を 再設定して、2次元の梁-ばね計算により常時の性能照査 型設計法を試行した。

本稿では、限界状態設計法で床版および側壁の部材ス

ペックの決定ケースとなることが多い使用限界状態と, 性能照査型設計法でそれに該当する耐久性の検討と照査 の前提の設計結果を比較したので報告する.

## 2. 試計算条件

#### (1) 一般条件

対象構造物モデルは、1層2径間の鉄道RC開削トンネル(幅9.5m×高さ5.62m,土被り6.0m)とし、支持地盤はN値が3程度の粘性土地盤である(図-1).

設計耐用年数は100年とし、環境条件は現行開削標準 における「一般の環境」とする.



## (2) 荷重条件

各設計荷重は,限界状態設計法での設計計算例<sup>4</sup>での 適用値を参考にして設定する.そのうち,永久荷重とし ての鉛直土圧算定時の埋戻土の単位体積重量は,H24鉄 道基礎標準<sup>9</sup>の値を参考に設定する.

表-1に各設計法で用いる埋戻し土の単位体積重量の値 を示す.

表-1	埋戻し土の単位体積重量 γ	$(kN/m^3)$
-----	---------------	------------

	限界状態	性能照查型
地下水位以上	16	18
地下水位以下	20	20

#### (3) 荷重の組合せと荷重係数

表-2に荷重の組合せと荷重係数を示す.現行の開削標準と同様とし、永久作用としての側圧に対する作用係数は、全部材の検討で1.0、上下床版の検討で0.7とする.

<b>我</b> 2 周垂9月11日已已周垂所数
--------------------------

性能		耐久性									
検討の目的		全部材の検討 (水平土圧100%)			上下床版の検討 (水平土圧70%)						
Case		1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
固定死荷重	D <sub>1</sub>	1.0	1.0	1.0	-	-	1.0	1.0	1.0	-	
付加死荷重	$D_2$	1.0	1.0	1.0	Ι	Ι	1.0	1.0	1.0		Ι
永久作用としての 鉛直土圧	$E_{DV}$	1.0	1.0	1.0	1	-	1.0	1.0	1.0	-	Ι
永久作用としての 側圧	E <sub>DH</sub>	1.0	1.0	1.0	١	-	0.7	0.7	0.7	١	١
地表面上の変動 荷重による土圧	$G_{L}$	1	1.0	1.0	1.0	1.0		1.0	1.0	1.0	1.0
トンネル内部の 列車荷重	L	_	_	1.0	_	1.0	_	_	1.0	_	1.0
衝撃の影響	I	_	_	1.0	_	1.0	_	_	1.0	_	1.0

#### (4) 安全係数

表-3に安全係数(材料係数)を示す.耐久性の照査と 照査の前提は、使用限界状態に該当する照査であること から、設計法によらずに材料係数 γ c, γ sは1.0とする.

表-3 安全係数(材料係数)

		限界状態	性能照查型
材料	コンクリート γ с	1.0	1.0
係数	鉄筋γs	1.0	1.0

## (5) 設計かぶり

性能照査型設計における設計かぶりは、全国の既設鉄 道開削トンネルで実施された中性化深さの調査結果<sup>®</sup>よ り設定した表-4に示す数値を用いる.設計かぶりについ て、床版と側壁は現行開削標準と同値とし、中柱は現行 の開削標準の値に5mm増厚した45mmとする.

表-4 設計かか	わぶり
----------	-----

部材	限界状態	性能照查型
中柱	40	45
上下床版、側壁	50	50

## (6) 配筋略図

図-2に配筋略図を示す. 使用材料について、コンクリ ートは設計基準強度f<sub>d</sub>=24N/mm<sup>2</sup>,鉄筋はSD345とする.

本検討では設計法による部材安全率の違いを確認する ため,設計法により部材諸元(寸法,配筋,かぶり)は 変更しないものとする.



## (7) 鉛直地盤反力係数

鉄道開削トンネル設計で用いる鉛直地盤反力係数について、現行開削標準では鉄道基礎標準で定める直接基礎のフーチング底面の鉛直地盤反力係数の算定方法に準じて算定することされている.ここで、H24年の鉄道基礎標準の改訂により、直接基礎の地盤反力係数の算出方法が見直されているため、それに準じた算出方法により設定する.

図-3に開削トンネル幅Bvを10mと仮定する場合の現行 開削標準とH24鉄道基礎標準のN値と鉛直地盤反力係数 k,の比較結果を示す.現行開削標準とH24鉄道基礎標準

(砂質土、粘性土の互層)で同程度の値となることから, k<sub>v</sub>, k<sub>s</sub>はH24鉄道基礎標準(砂質土、粘性土の互層)の算 定式を用いて設定する(式(1a),式(1b)参照).



図-3 鉛直地盤反力係数とN値の関係(Bv=10m(仮定))

下床版の設計鉛直地盤反力係数k,

$$k_{\rm v} = 5.1 \rho_{\rm gk} E_{\rm d} B_{\rm v}^{-3/4}$$
 (1a)

 ここに、k<sub>v</sub>:設計鉛直地盤反力係数(kN/m<sup>3</sup>)
 ρ<sub>g</sub>:地盤反力係数に関する地盤修正係数 (=短期:1.0,長期:0.5)
 F.:地盤の変形係数の設計用値(-4000N N<4)</li>

$$E_{\rm d}$$
. 地盤の変形保数の設計用値(=40001、N<4) $E_{\rm d}$ =  $\rho_{
m ge}E_{\rm x}/\gamma_{
m ge}$ 

 $\rho_{gE}$ : 地盤反力係数に関する地盤修正係数(=1.0)  $E_x$ : 地盤の変形係数の試験値( $kN/m^2$ )

・下床版の設計せん断地盤反力係数k。

$$k_{\rm s} = \lambda \cdot k_{\rm v}$$
 (1b)

- ここに,  $k_{\rm s}$ : 設計せん断地盤反力係数 (kN/m<sup>3</sup>)  $\lambda$ : 換算係数 (=1/3)
  - k<sub>v</sub>:設計鉛直地盤反力係数(kN/m<sup>3</sup>)

表-5に計算に用いる設計地盤反力係数を示す. 地盤の 変形係数 $E_a$ は支持地盤のN値から設定するが, N<4であ るため $E_N$ =4000Nから算定する<sup>5</sup>. その際, 地盤の変形係 数に関する地盤の修正係数 $\rho_{gE}$ =1.0, 地盤の変形係数に 関する地盤調査係数 $\gamma_{gE}$ =1.7を考慮する.

表-5	設計地盤反力係数	(長期)
-----	----------	------

	限界状態	性能照查型
$k_v$ (kN/m <sup>3</sup> )	2,360	3,330
$k_{\rm s}$ (kN/m <sup>3</sup> )	787	1,110

## 3. 性能照查

表-6に性能照査方法を示す.限界状態設計法において, 床版および側壁の部材スペックの決定ケースとなる使用 限界状態に該当する耐久性の検討(鋼材の腐食)と照査 の前提(応力度の制限)について検討する.

表-6 性能照查方法

州台町日	昭木世博	照正	查式
1111111月日	职重相杀	限界状態	性能照查型
APH+か	コンクリートの 縁引張応力度	$\sigma_{a} < f_{bl}$	$\sigma_{d} < f_{bd}$
動100 腐食	鉄筋の 引張応力度	σ s< 140N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_{ m s} < 120  m N/mm^2$
	曲げひび割れ幅	w/0.005c	w/0.005c
応力度の 制限	コンクリートの 圧縮応力度	σ d.4f'cd	σ c/0.4f cd

※oc:コンクリートの圧縮応力度、fd:コンクリート設計圧縮強度 oc:コンクリートの縁引張応力度、fd:部材寸法の影響を考慮した設計曲げ強度

σst:鉄筋の引張応力度、w:曲げひひ割れ幅、c:かぶり

ここで、曲げひび割れ幅の照査の省略条件である鉄筋 の引張応力度の制限値は、土木学会のコンクリート標準 示方書<sup>3</sup>が改訂された際に変更されているため、これに 合わせて乾湿繰返し環境に相当する120N/mm<sup>2</sup>とする.

また,曲げひび割れ幅は式(2a)により算定し,地上構 造物(例えば高架橋)では,地上環境と施工過程を考慮 して**表-7**が定められている<sup>2</sup>.

一方,従来の開削トンネルでは $\epsilon'_{ost}=150\times10^{6}$ が用いられることが多いが,地中構造物においては地下環境を考慮した値が明示されていないのが現状である。そこで、本検討では、開削トンネルにおいて現場で計測した曲げひび割れ幅の逆解析等<sup>7),8</sup>から得られた $\epsilon'_{ost}=300\times10^{6}$ を用いて検討する.

$$w_{\rm d} = 1.1k_1k_2k_3k_4 \left\{ 4c + 0.7 \left( c_{\rm s} \cdot \phi \right) \right\} \left[ \frac{\sigma_{\rm se}}{E_{\rm s}} + \varepsilon_{\rm csd}^{\prime} \right]$$
(2a)

- ここに, k<sub>1</sub>:鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響 を表す係数(一般に,異形鉄筋の場合に1.0, 普通丸鋼の場合には1.3)
  - k2:コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす

影響を表す係数= $\frac{15}{f_{cd}+20}$ +0.7

 $k_3: 引張鋼材の段数の影響を表す係数=\frac{5(n+2)}{7n+8}$ 

#### n:引張鋼材の段数

- k4:曲げひび割れ幅の変動を考慮する係数(一般に0.85とする)
- $c_{\rm s}$ :鋼材の中心間隔(mm), c:引張鋼材のか ぶり(mm),  $\phi$ :鉄筋径(mm)
- ε'<sub>cd</sub>: コンクリートの収縮およびクリープの影響 等にひび割れ幅の増加を考慮するための値
- σ<sub>se</sub>:鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの鉄筋応力度の増加量(N/mm<sup>2</sup>)
- *E*<sub>s</sub>:鋼材のヤング係数 (=200kN/mm<sup>2</sup>)

表-7 地上構造物に用いる ε'csd (×10<sup>6</sup>)

ひび割れ 発生材齢	٤°csd	備考
30日	450	部材自重により曲げひび割れが発生する場合 (RC構造の桁または梁等)
100日	350	永久作用により曲げひび割れが発生する場合 (外ケーブル方式による PRC 構造の桁,ス ラブ等)
200日以上	300	永久作用および変動作用により曲げひび割れ が発生する場合(内ケーブル方式による PRC構造の桁,ラーメン高架橋の柱部材等)

## 4. 設計結果の比較

#### (1) 断面力

図-4にCase1-3とCase2-3の曲げモーメントの比較結果を 示す. 側壁端部(③)では,設計法によらず曲げモーメ ントは 同程度となる. 一方,床版(①・④,②・⑤) では,トンネル上載土(埋戻し土)の単位体積重量の変 更により,性能照査型設計のほうが1~4割程度大きくな る傾向がみられる.また,中柱(⑥)では左右対称の開 削トンネルであるため,曲げモーメントは生じない.



#### (2) 部材安全率

図-5に各部位で曲げモーメントが大きくなる端部と径間中央における部材安全率の比較結果を示す.

曲げひび割れについて、限界状態設計法ではコンクリート設計曲げ強度 $f_{tst}$ や鉄筋応力度の制限値 $\sigma_{sl}$ を超過しないためひび割れ幅の検討に至らない.しかし、性能照 査型設計ではすべての部材がそれらを超過するが、発生 曲げひび割れ幅は許容値以下(部材安全率は約1割増加) となる.また、コンクリート圧縮応力度 $\sigma_{c}$ について、 上下床版と中柱で部材安全率が約1~2割増加する.

以上より,性能照査型設計では発生曲げモーメントが 大きくなるほか, ε'sst や設計かぶりを大きく(有効高さ を小さく)設定しているため,限界状態設計法に比べて 部材安全率は大きくなる傾向にあるものの1~2 割程度 の増加であり,今回対象とした開削トンネルでは,すべ ての位置で照査を満足する結果となる.









図-5 部材安全率の比較結果

## (3) ε'csdが曲げひび割れ幅に与える影響

図-6に②上床版(端部)において、 $\varepsilon'_{csl} \geq 150 \sim 450 \times 10^6$ とする場合の曲げひび割れ幅を示す. 一般的に地上 構造物のRC構造(桁または梁等)の設計に用いられて いる  $\varepsilon'_{csl}=450 \times 10^6$ の場合,曲げひび割れ幅の許容値を 約1割超過する. 一方,従来の開削トンネルの設計で用 いられてきた  $\varepsilon'_{csl}=150 \times 10^6$ の場合,曲げひび割れ幅の 許容値に対して約2割の安全率の余裕度がある.

以上より, ε' ad の設定により部材安全率が4割程度変 化するため,これが部材決定ケースとなる場合には,部 材形状等にも大きく影響する可能性があると考えられる.



図-6 ε' αの違いによる曲げひび割れ幅(上床版(端部))

## 5. まとめ

本検討では、1層2径間の鉄道開削トンネルを対象に、 新しい設計技術や維持管理の調査事例等を参考に設計条件を再設定して、常時の性能照査型設計法を試行した。

その中で,限界状態設計法で床版および側壁の部材スペックの決定ケースとなることが多い使用限界状態と, 性能照査型設計法でそれに該当する耐久性の検討と照査 の前提の設計結果を比較した.

その結果,次の知見が得られた.

1) 今回対象とした鉄道開削トンネル(1層2径間)では、

性能照査型設計法でもすべての部材位置で耐久性の 照査と照査の前提を満足し,限界状態設計法と同等 の構造スペックとできることが確認できた.

- 2) ただし、限界状態設計法よりも性能照査型設計法の ほうが、構造物の設計断面力や部材安全率が大きく なる傾向がある。
- 3) 曲げひび割れ幅の照査において、 ε' colの設定により 部材安全率が4割程度変化するため、これが部材決 定ケースとなる場合には、部材形状等にも大きく影 響する可能性がある.

今後の課題として, ε' cutや σ ∞の設定について検討す るとともに,様々な状態や部材寸法・形状を考慮して, これらの妥当性を検証していく必要があると考えられる.

#### 参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解 説 開削トンネル, 2001.
- 例えば、鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、2003.
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書 設計編, 2012.
- 4) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解 説 開削トンネル 設計計算例 開削トンネル(1層 2径間),2002.
- 5) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解 説 基礎構造物, 2012.
- 6) 牛田貴士,柳川一心,仲山貴司,津野究,焼田真司:維持管理データを反映した鉄道開削トンネルの性能設計に関する一考察,土木学会年次学術講演会概要集,Vol.69, pp.421-422, 2014.
- 7) 田辺将樹、大石敬司、山本努、本間実、松川俊介: 開削トンネルの形状寸法および荷重条件と曲げひび 割れの発生状況に関する一考察、トンネル工学報告 集第16巻/pp.455-460, 2006.11.
- 柳川一心,牛田貴士,仲山貴司,焼田真司:開削トンネルの曲げひび割れの検討における一考察,土木学会年次学術講演会概要集,Vol.69, pp.395-396,2014.

(2014.9.15受付)

# A STUDY ON PERFORMANCE-BASED DESIGN OF A RAILWAY OPENCUT TUNNEL

# Tomoki SAKATA, Kosuke MUROYA, Takashi NAKAYAMA, Kazushi YANAGAWA and Shinji YAKITA

In this report, we carried out a trial calculation of a railway opencut tunnel(one level of two traves) according to performance-based design, and compared it with a result that applied limit-state design method. As a result, in performance-based design, as sectional forces increased, the safety factors increased. On

the other hand, we confirmed that became the same structure specifications, compared with applied limitstate design method. In addition, we evaluated the influence of  $\varepsilon'_{csd}$ , examination of the flexural crack width that often becomes the material decision case of a slab.