

鉄道における開削トンネルの設計技術に関する動向

岡野 法之* 神田 政幸**

Recent Trends of Design Technology of Cut and Cover Tunnel for Railway

Noriyuki OKANO Masayuki KODA

Cut and cover tunnels for railway are designed by Design Standards for Railway Structures and Commentary (Cut and Cover Tunnel). The standard was published about 15 years ago. Afterwards, the designs for railway structures except tunnels were transferred to the performance-based design system. Therefore, a committee was established for revising the Design Standards for Railway Structures and Commentary (Cut and Cover Tunnel) in 2014. Then the committee was completed the draft in 2017. This paper discusses the recent trends on the design technology of cut and cover tunnels for railway, with a focus on the contents of the committee revision version.

キーワード：開削トンネル，設計標準，性能照査型設計

1. はじめに

鉄道の開削トンネルの設計は、「鉄道構造物等設計標準・同解説（開削トンネル）（以下、開削標準）」¹⁾に基づく限界状態設計法によりなされているが²⁾、2001（平成13）年3月に発刊されてから15年以上が経過している。この間、「鉄道に関する技術上の基準を定める省令（国土交通省令151号）」³⁾による性能規定化に伴い、他の鉄道構造物の設計標準は性能照査型設計体系へ移行し、関連する手引き、設計計算例の整備もなされてきた。また、（公社）土木学会でも、トンネル標準示方書〔開削工法編〕の性能規定化が、2012（平成24）年度より進められ、2016（平成28）年度に改訂された⁴⁾。

鉄道構造物等設計標準の中で、トンネルに関する設計標準は現時点で性能照査型設計体系への移行がなされておらず、性能規定化とともに維持管理への配慮、最新技術の導入などが急務となっていた。

このような状況下、トンネル3工法（開削工法、シールド工法および山岳工法）のうち、性能照査型設計体系に移行しやすい開削標準の改訂を他の2工法に先行して着手することとし、国土交通省の指導のもと2014（平成26）年1月に「鉄道構造物等設計標準（開削トンネル）に関する委員会（委員長：小山幸則 立命館大学総合科学技術研究機構 客員教授，幹事長：赤木寛一 早稲田大学理工学術院教授）」が設立された。その後、3年間の審議を経て、2017（平成29）年1月の最終委員会において改訂原案を得るに至った。

本展望解説では「鉄道構造物等設計標準（開削トンネル）に関する委員会」での議論を中心に、鉄道開削トンネルの性能照査型体系における設計技術の動向を述べる。

* 構造物技術研究部 トンネル研究室長

** 構造物技術研究部長

2. 鉄道における開削トンネルの設計技術

「鉄道構造物等設計標準（開削トンネル）に関する委員会」では、(1)性能照査型設計体系への移行、(2)維持管理性の充実、(3)大規模地下駅への適用拡大、(4)地下連続壁を本体利用する場合の性能照査を、開削標準改訂の主な柱として審議を行った。

2.1 性能照査型設計体系への移行

性能照査型設計体系は、建設コストの縮減や設計の自由度を向上するものとして注目されるが、これに加えて既設トンネルで生じている変状に対応する性能項目を、数値的または経験的に直接検討することができる（例えば、漏水→水密性、材料劣化→耐久性、内空変位→空間保持など）。したがって、性能照査型設計体系への移行は、上記の観点から、より安全かつ長寿命な構造物の設計に寄与できると考え、維持管理に配慮した開削トンネル特有の性能項目を整理し定めた。構造物の要求性能ごとの開削トンネルの性能項目とその照査の必要性を表1に示す。

また、地上の列車を支持する開削トンネルの場合について、列車を支持しない一般の開削トンネルの要求性能に加えて必要となる要求性能についても整理した。特に土被りが小さい場合には、以下の性能を照査することとした。

- ・地上の列車に対する走行安全性
- ・上床版の疲労破壊に関する安全性
- ・地上の列車に対する乗り心地に関する使用性

なお、線路下横断構造物のうちボックスカルバート形式のものについては、この考え方を準用できることとした。

表1 構造物の要求性能ごとの開削トンネルの性能項目とその照査の必要性

要求性能	性能項目	地震時以外	地震時	備考	
安全性	破壊		○	照査は、構成する部材に応じて関連する設計標準に示す方法による	
	疲労破壊 ^{※1}	○	—		
	安定（浮き上がり）	○	△ ^{※2}	地震時以外の照査は、以下の式による $\gamma_i \frac{U_s}{W_s + W_B + 2Q_s + 2Q_B} \leq 1.0$ W_B ：開削トンネルの死荷重の特性値 W_s ：鉛直土圧の特性値 Q_s ：地盤中のせん断抵抗 Q_B ：開削トンネルと地盤の側面抵抗 U_s ：地下構造物底面の静水圧による揚圧力の設計用値 γ_i ：構造物係数	
	走行安全性（内空の列車）	内空の変位・変形	△ ^{※3}	○	地震時の照査は、L1地震動に対して部材が降伏しないことを確認する
		軌道面の不同変位（目地の不同変位）	△ ^{※4}	△ ^{※5}	
公衆安全性		△ ^{※6}	—		
使用性	外観	— ^{※7}	△ ^{※12}	照査を行う場合は、構成する部材に応じて関連する設計標準に示す方法による	
	水密性	△ ^{※8}			
	支持性能	△ ^{※9}			
	乗り心地	軌道面の不同変位			△ ^{※10}
	騒音・振動	△ ^{※11}			
復旧性	損傷	軌道面	△ ^{※10}	○	照査は、構成する部材に応じて関連する設計標準に示す方法による
		部材			
	残留変位（浮き上がり）		△ ^{※13}		

○：照査が必要となる項目，△：前提条件を満足することで照査が省略できる項目，—：照査が省略できる項目
 ※1 地盤に支持されている下床版を除く ※2 液状化が生じない地盤では、地震時以外の安定の照査を満足することで省略可
 ※3 部材の損傷の照査を満足することで省略可 ※4 支持性能の照査を満足することで省略可
 ※5 土構造物と同様の考え方から、満足するものと判断できる（「変位制限標準」⁵⁾7.3.2地震時の横方向の振動変位の照査）
 ※6 コンクリート構造物と同様の考え方から、耐久性の検討を満足することで省略可
 ※7 駅部等で外観に対する性能が必要な場合には、性能項目として設定する
 ※8 要求水準を満足する防水工を用いることで省略可
 ※9 トンネルの自重と内部荷重はその排土量よりも一般に軽く、地盤の支持力が設計上問題となることはまれなので省略可
 ※10 安全性（安定）の照査を満足することで省略可 ※11 構造計画で検討
 ※12 液状化が生じない地盤では、地震時以外の安定の照査を満足することで省略可
 ※13 安全性（安定）、復旧性（損傷）の照査を満足することで省略可

2.2 維持管理性の充実

開削トンネルにおける変状の多くは材料劣化であり、図1に示すような漏水が主要原因となっている。特に、感潮域などの塩分や有害物質を含む漏水箇所では、一度補修しても再劣化が生じ、繰返し補修が必要となる事例が多い。そのため、材料劣化やひび割れの抑止を考えるとともに、新設時からの漏水量を減らすことが、長寿命化を図るために非常に重要であると考えられる。そこで、耐久性、水密性について、維持管理実績データの事例分析を実施し、耐久性および構造細目の設計手法に反映した。特に、塩化物イオンに関する検討においては、以下のことを把握した。

- ・ 漏水箇所やその近傍においてコンクリート表面やコンクリート内部の塩化物イオン濃度が高くなり、塩化物イオン濃度の制限値（1.2kg/m³）を大きく上回る場合がある
 - ・ この場合、漏水箇所の近傍は、漏水による乾湿繰返しにより、塩化物イオン濃度がさらに高くなる
- ドイツの水質成分濃度の評価基準（DIN：ドイツ工業規格）や水道水の水質基準を参考にすると、一般に建設地点における地下水の塩化物イオン濃度がその基準値である200mg/L（0.2kg/m³）以下であれば、鋼材腐食に及ぼす塩化物イオンの影響がほとんどないと考えられるため、その検討を省略してもよいとした。そして、実構造



図1 開削トンネルにおける漏水の例

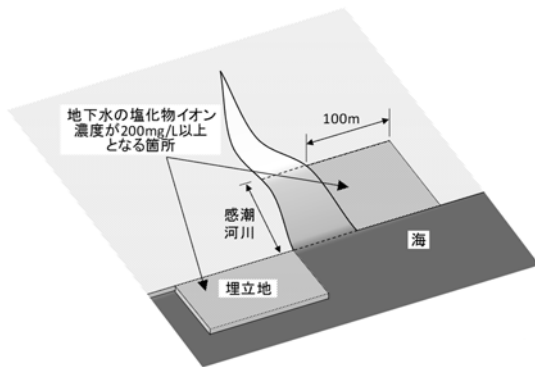


図2 塩化物イオンに関する検討が必要な範囲

物の変状調査および浸透流解析結果等から、地下水の塩化物イオン濃度が200mg/L (0.2kg/m³)以上となる箇所として、図2に示す埋立地や感潮河川から100m以内の範囲が想定されることを示した⁶⁾。

2.3 大規模地下駅への適用拡大

開削トンネルの設計では、一般に地盤をばねでモデル化するが、その地盤反力係数の算出においては、载荷幅に対する依存性を考慮した式が用いられる。例えば、下床版下面の鉛直地盤反力係数の算定式は式(1)、式(2)で、換算幅(開削トンネルの規模)が大きくなると地盤反力係数は小さくなる。

$$k_v = 5.1 \rho_{gk} E_d B_v^{-3/4} \quad (1)$$

ここに、 k_v ：鉛直地盤反力係数 (kN/m³)

ρ_{gk} ：地盤反力係数に関する地盤修正係数

E_d ：地盤の変形係数の設計用値 (kN/m²)

B_v ：換算幅 (m)

$$B_v = (B \cdot L)^{1/2} \quad (2)$$

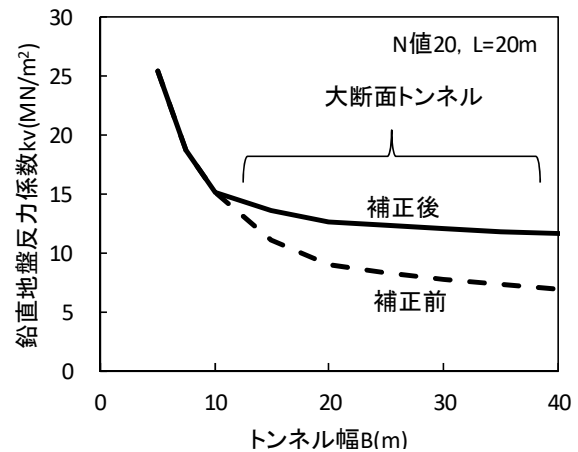


図3 鉛直地盤反力係数の補正の例⁷⁾

ここに、 B ：下床版の幅 (m)

L ：トンネル軸方向の長さ (m) *

* L を打継目または目地間隔として式(2)から求まる値と下床版の幅のうち、小さいほうの値としてよい

近年、開削工法は大規模な地下駅の建設に利用されることが増加しているが、上記の式により地盤反力係数を算出すると、その規模が大きくなるほど地盤反力係数は小さくなる。しかし、実際の地盤は変位レベルに応じて地盤反力係数の大きさが変化する変位レベル依存性を有しており、一般的な開削トンネルは掘削土重量よりも軽量であることから変位レベルは小さく、開削トンネルの規模が大きくなっても対象とする変位レベルに変化がないことを考慮すると、上記の場合には地盤反力係数を過小に評価してしまうと考えられる。

このため、一般的な駅間の開削トンネルの幅が10m程度であることから補正の基準となる換算幅を10mとし、それを超える大断面開削トンネルを対象に、変位レベル依存性を考慮した地盤反力係数に関する地盤修正係数 ρ_{gk} を補正する式(3)、式(4)を提案した⁷⁾。N値が20、トンネル延長 L が20mの場合の算出結果を図3に示す。

短期の場合(変動作用)：

$$\rho_{gk} = 1.0 \times \max \left\{ \left(\frac{B_v}{B_s} \right)^{1/2}, 1.0 \right\} \quad (3)$$

長期の場合(永久作用)：

$$\rho_{gk} = 0.5 \times \max \left\{ \left(\frac{B_v}{B_s} \right)^{1/2}, 1.0 \right\} \quad (4)$$

ここに、 B_s ：基準となる換算幅、 B_v ：換算幅

特集：開削トンネルの設計技術

2.4 地下連続壁を本体利用する場合の性能照査

地下連続壁を本体利用する開削トンネルの設計では、その簡便性から仮土留め壁とトンネル本体の設計とを個別に行う分離計算法の適用例が多い。しかし、仮設時の応力を受けたまま本体構造物として構築される実態を考慮すると、分離設計法は必ずしも適切な手法であるとはいえない。

一方、一体計算法は、施工時から完成まで一連で解析を行うものですべての施工過程を考慮できるが、計算が煩雑で、設計時に設定した施工手順に制約されるなどの短所を有する。そこで、施工時の残留応力を考慮することができ、一体計算法と概ね一致した結果が得られるが、一体解析法ほど計算が煩雑とならない疑似一体解析（表2）について検証し、その適用性を確認した⁸⁾。

新技術の観点では、開削標準制定以後、表3に示すソイルセメント鋼製地下連続壁が開発された。これは2006（平成18）年以降実績が増加しており、鉄道でも採用事例がみられるようになった。そこで、ソイルセメント鋼製地下連続壁の剛性、耐力および非線形特性、止水性について整理し、具体的かつ標準的な性能照査の手法を示すこととした。

表2 疑似一体解析の概念⁸⁾

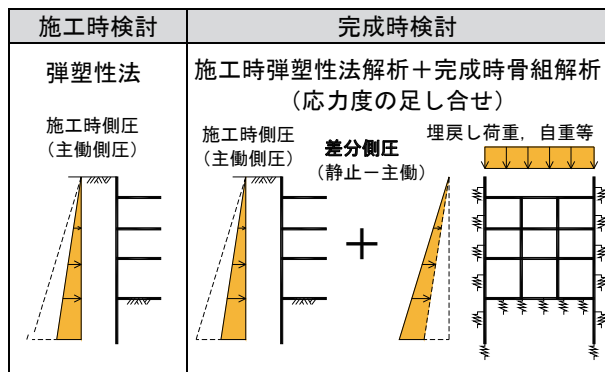


表3 鋼製地下連続壁の種類

タイプ	コンクリート充填タイプ	ソイルセメントタイプ
施工法	①安定液掘削 ⇒ ②鋼製壁部材建て込み ⇒ ③コンクリート充填	①ソイルセメント壁造成 ⇒ ②鋼製壁部材建て込み
概要	<p>鋼製壁部材</p> <p>コンクリート充</p> <p>鋼製壁部材の例</p>	<p>鋼製壁部材</p> <p>ソイルセメン</p> <p>鋼製壁部材の例</p>

3. おわりに

本展望解説では、「鉄道構造物等設計標準（開削トンネル）に関する委員会」での議論を中心に、鉄道における開削トンネルの設計技術の動向について述べた。開削トンネルの設計が性能照査型設計体系に移行することにより、新技術の導入が促進されるとともに、耐久性を有し、かつ維持管理のしやすい開削トンネルが建設されることを期待したい。

なお、現在改訂中のシールド工法編および山岳工法編についても、一連の作業が終了した段階でご紹介する予定である。

謝辞

本検討を実施するにあたり、「鉄道構造物等設計標準（開削トンネル）に関する委員会」において委員・幹事の方々に審議を重ねていただいた。末筆ながら、ここに深甚なる謝意を表する次第である。なお、これら一連の検討は、国土交通省委託による鉄道の技術基準整備のための調査研究の一環として実施されたものである。

文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（開削トンネル），丸善，2001
- 2) 棚村史郎：開削トンネル設計標準の概要，鉄道総研報告，Vol.14, No.8, pp.1-6, 2008
- 3) 国土交通省：鉄道に関する技術上の基準を定める省令，平成13年国土交通省令第151号，2001
- 4) 公益社団法人土木学会：トンネル標準示方書[開削工法編]・同解説，2016
- 5) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2006
- 6) 牛田貴士，仁平達也，仲山貴司：開削トンネルの維持管理データに基づく耐久性に関する設計法，鉄道総研報告，Vol.33, No.4, pp.5-10, 2019
- 7) 仲山貴司，西山和宜，小林克哉，西岡英俊：特殊な設計条件における開削トンネルの構造解析手法，鉄道総研報告，Vol.33, No.4, pp.23-28, 2019
- 8) 中島卓也，小林克哉，戸田和秀，小島謙一：地下連続壁を本体利用する開削トンネルの疑似一体解析手法，鉄道総研報告，Vol.33, No.4, pp.17-22, 2019