

特集：鉄道トンネルの設計技術

# 鉄道トンネルの設計技術の動向と 鉄道構造物等設計標準（トンネル）改訂の要旨

野城 一栄\*

Recent Trends of Design Technology of Railway Tunnel  
and Summary of Revision of Design Standards for Railway Tunnels

Kazuhide YASHIRO

More than 20 years have passed since the three design standards for railway tunnels were published. In the meantime, design methods for structures other than tunnels have shifted to performance-verification design methods. Since 2014, a committee consisting of academic experts, railway operators has been set up to study the introduction of performance-based design, and as a result, in April 2022, the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism issued the design standards for railway structures as a notification. This outlook commentary introduces trends in tunnel design technology for railways and an overview of new railway tunnel design standards based on performance-verification design methods.

キーワード：トンネル，設計標準，性能照査型設計法

## 1. はじめに

「鉄道に関する技術上の基準を定める省令（国土交通省令第151号）」が2001年に仕様規定から性能規定に移行したことを受け、解釈基準としての鉄道構造物等設計標準（以下、設計標準）についても性能照査型設計法への移行が進められている。鉄道トンネルに係る設計標準については、2014年以降、学識経験者、鉄道事業者等からなる委員会が設置され、性能照査型設計法の導入について検討が進められ、2021年4月に、国土交通省鉄道局から鉄道事業者に対して通達として示されたところである。本展望解説では、鉄道におけるトンネルの設計技術の動向と、性能照査型設計法が導入された新しい鉄道トンネルの設計標準の概要を紹介する。

## 2. 鉄道におけるトンネルの設計技術の動向

性能照査型設計法は、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ている。具体的には、①新技術、個別事情への柔軟な対応が可能である、②性能に関する情報が開示され、構造物の性能が数値的に明示されることにより、一般ユーザーにも理解しやすいものとなる、③建設時だけでなく、その後の性能を評価することにより、ライフサイクルコストの評価への展開が期待できる、などのメリットが一般に知られているが、これら以外にも、構造物に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（例えば、

沈下→安定性、材料劣化→耐久性、内空変位→空間保持など）ことにより、より安全かつ長寿命な構造物の設計に寄与するというメリットもある。

図1に設計標準の性能照査型設計法への移行の状況を示す。橋梁に係る標準については2017年度の複合標準の移行をもって、地盤に係る標準については2012年度の基礎・土留め標準の移行をもって完了している。一方、トンネルに係る標準については、開削トンネルは、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）、シールドトンネルは、同（シールドトンネル）（以下、シールド標準）、山岳トンネルは、都市部の山岳トンネルについて、同（都市部山岳工法トンネル）（以下、都市部山岳標準）が刊行されているが、最も刊行時期が遅い開削標準でも発刊されてから20年以上が経過しており、移行が急務となっていた。

このような背景の下、トンネル3工法のうち、比較的移行しやすいと考えられた開削標準の改訂から着手する

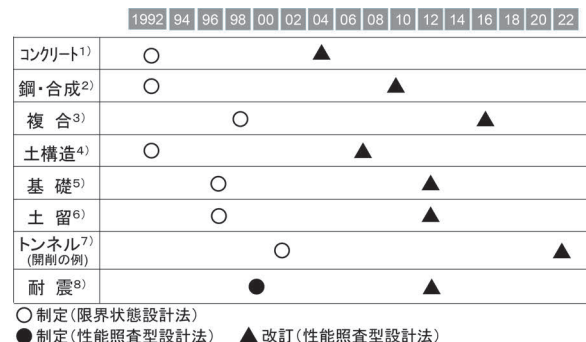


図1 設計標準の性能照査型設計法への移行の状況

\* 構造物技術研究部 トンネル研究室長

こととし、国土交通省の監修のもと、2014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 客員教授）」が設立された。その後、2016年1月に「鉄道構造物等設計標準（シールドトンネル）に関する委員会（委員長：赤木寛一 早稲田大学 教授）」と「鉄道構造物等設計標準（山岳トンネル）に関する委員会（委員長：朝倉俊弘 京都大学 名誉教授）」が設立された。これらについて、各委員会3年間の審議を経て、それぞれの最終委員会において改訂原案を得るに至った。

### 3. 新しい設計標準の概要

新たに制定された、鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル）（以下、トンネル標準）が対象とする鉄道トンネルを図2に示す。鉄道トンネルとは「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」で対象としている鉄道構造物のうち、図2(a)に例示した内空を列車が走行する地中構造物をいい、これに該当する駅間のトンネルや地下駅のほか、トンネルと一体の立坑等も含まれる。一方、図2(b)に例示した地上の列車を支持するがその内空には列車が走行しない地中構造物は鉄道トンネルに含まれないとしたが、地上の列車が安全かつ快適に走行する必要があることから、これを設計する際には、トンネル標準を準用してよい。

トンネル標準は図3のように4編構成とし、第I編で、施工法や形状等によらず、すべての鉄道トンネルを包括する調査、構造計画および性能照査の原則を定め、第II編～第IV編で、第I編を満足する具体的な方法のうち標準的な方法を示している。なお、設計標準の冊子としての構成は、ユーザーが使いやすいよう、図3に示すように、代表的な3工法について、第I編と対応する第II編～第IV編のそれぞれとからなる構成とした。

鉄道土木構造物に係る設計標準としては、コンクリート標準、鋼・合成標準、複合標準などがある。図4にトンネル標準と他の設計標準との関連を、コンクリート標準、鋼・合成標準、複合標準を例にとり示す。これらの設計標準は、材料レベル、部材レベル、構造物レベルのすべてのレベルについて記述しているが、トンネル標準では、構造物レベルについて、トンネル固有の事項（照査項目、作用の組み合わせ、応答値の算定等）を記述することとし、材料レベル、部材レベルについては、引用元の標準と同じ事項は原則記述せず、関連標準を参照するものとした。同様に、調査や地盤については基礎標準によるものとした。これは、関連する設計標準が改訂された時に不整合が生じないようにするためである。

鉄道構造物としての要求性能と、これに基づき定める

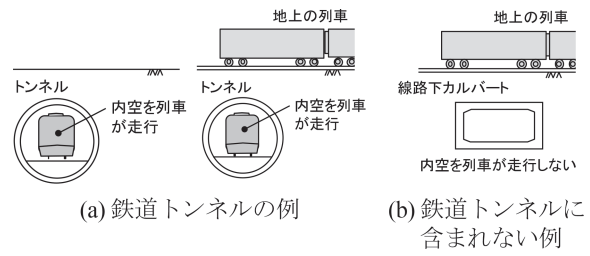


図2 対象とする鉄道トンネル

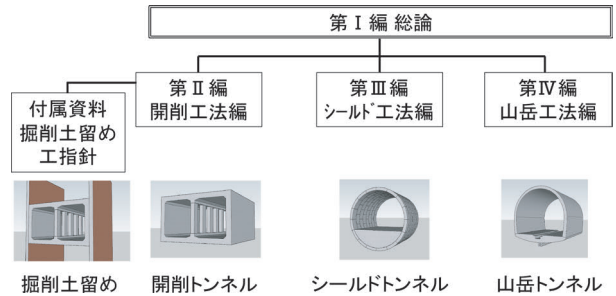


図3 トンネル標準の編構成

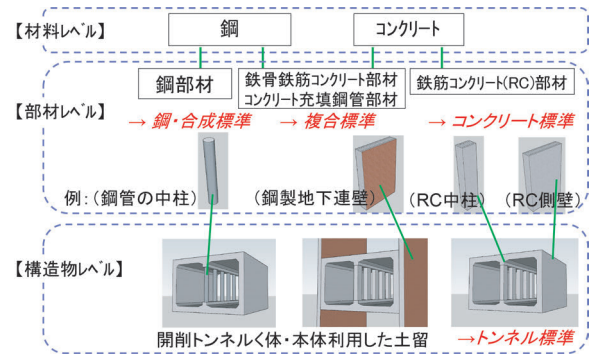


図4 トンネル標準と他設計標準との関連

鉄道トンネルに係る性能項目は、構造物種別はもとより、構造形式や施工法によらず線区ごとに同一とする必要がある。表1に、要求性能と性能項目・照査指標の例を示す。鉄道トンネルでは、内空保持の観点が必要であり、走行安全性において内空の変位・変形等を、また、水密性に関する使用性において漏水等を照査指標として挙げている。

性能照査では、他の設計標準と同様、要求性能および性能項目に対して、これと等価な限界状態を設定し、鉄道トンネルが限界状態に達しないことを照査することとし、一般には、式(1)を満足することを確認することとした。

$$\gamma_i \cdot I_{Rd} / I_{Ld} \leq 1.0 \quad (1)$$

$I_{Rd}$ ：設計応答値、 $I_{Ld}$ ：設計限界値、 $\gamma_i$ ：構造物係数  
 適合みなし仕様による設計を用いることや、前提条件

表1 要求性能と性能項目・照査指標の例

要求性能	性能項目	照査指標の例
安全性	破壊	力, 変位・変形
	疲労破壊	応力度, 力
	安定	力, 変位・変形
	走行安全性	内空の変位・変形, 軌道面の不同変位, 横方向の振動変位
	公衆安全性	中性化深さ, 塩化物イオン濃度, ボルトの種類
使用性	外観	ひび割れ幅, 応力度
	水密性	ひび割れ幅, 応力度, 漏水
	支持性能	力, 変位・変形
	乗り心地	軌道面の不同変位
	騒音・振動	騒音レベル, 振動レベル
復旧性	損傷	部材 変位・変形, 力, 応力度 軌道 不同変位, 横方向の振動変位
	残留変位	力, 変位・変形

が明確になっている場合については、これを確認することをもって性能項目を満足したものとみなすことができるとし、これらの性能項目の具体的な取り扱いについては、第Ⅱ編～第Ⅳ編に示している。表2に各編の目次構成を示す。

#### 4. 開削トンネルの改訂の要旨<sup>9)</sup>

改訂後の開削トンネルの設計標準の冊子体（鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル・開削編））は、図3に示すように第Ⅰ編と第Ⅱ編とから構成される。トンネル標準・開削編には、鉄道構造物の建設等に用いる掘削土留め工設計指針が付属する。

前述したように、開削トンネル本体の設計に性能照査型設計法を導入して、より柔軟な設計を可能とすることを改訂の柱とし、性能項目ごとの具体的な取り扱いのほか、具体的な応答値の算定や限界値の設定について、開削トンネル特有の施工・環境条件を考慮できる方法や、様々な構造・地盤条件に対応できる方法を充実させた。

以下、開削トンネルの改訂の要旨を紹介する。

#### 4.1 維持管理を踏まえた記述の充実

鉄筋コンクリート部材の設計曲げひび割れ幅、設計かぶりなどについて、他の設計標準に準じて設定できるようにするとともに、事例分析を踏まえて具体的な設定方法を例示した。

例えば、開削トンネルに発生する曲げひび割れは、コンクリートの収縮とクリープの影響だけでなく、供用中の土水圧の変動の影響を受ける。これらの影響については前述したように開削トンネルの施工条件や地下環境を考慮して「コンクリート標準」に準じて算定することとし、合わせて曲げひび割れ幅の変動を考慮する係数 $k_4$ で考慮してもよいこととした。また、鉄筋コンクリート部材のかぶりについても、直接土に打ち込む場合を除き、「コンクリート標準」に準じて設定することとした。

鋼材腐食の原因となる塩化物イオンについては、開削トンネルの場合、施工時の初期塩化物イオンの影響を除くと、主として地下水に含まれる塩化物イオンに起因すると考えられる。そこで、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、建設地点における地下水の塩化物イオン濃度が200mg/L以下の場合、一般に、その検討を省略してよいこととした。なお、実構造物の調査結果および浸透流解析結果から、地下水の塩化物イオン濃度が200mg/L以上となる箇所として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（図5）<sup>10)</sup>。このような箇所においては、必要に応じてエポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる等の別途の対策も考慮して検討するのがよいとした。

#### 4.2 大規模地下駅における応答値の算定法の見直し

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、地盤反力係数の算出においては、載荷幅の依存性を考慮し、載荷幅が大きくなると係数を低減することになっている。近年、大規模な地下駅が増加しているが、この場合、計算される地盤反力係数が小さくなる。ここで、実際の地盤は、変位レベルが大きくなるに従い

表2 各編の目次構成

第Ⅰ編 トンネル総論	第Ⅱ編 開削工法編	第Ⅲ編 シールド工法編	第Ⅳ編 山岳工法編
第1章 総則 第2章 設計の基本 第3章 調査および構造計画 第4章 要求性能と性能照査	第1章 総則 第2章 設計の基本 第3章 調査および構造計画 第4章 要求性能と性能照査 第5章 作用 第6章 材料および地盤 第7章 開削トンネルの性能照査 第8章 土留め壁を本体利用する開削トンネルの性能照査 第9章 立坑の性能照査 第10章 特殊な設計条件の開削トンネル	第1章 総則 第2章 設計の基本 第3章 調査および構造計画 第4章 要求性能と性能照査 第5章 作用 第6章 材料および地盤 第7章 シールドトンネルの性能照査 第8章 特殊な設計条件のシールドトンネル 第9章 セグメントの構造細目および製作	第1章 総則 第2章 設計の基本 第3章 調査および構造計画 第4章 地山の安定に関する検討 第5章 要求性能と性能照査 第6章 作用 第7章 材料および地盤 第8章 覆工およびインバートの性能照査 第9章 坑門の性能照査 第10章 特殊な設計条件の山岳トンネル

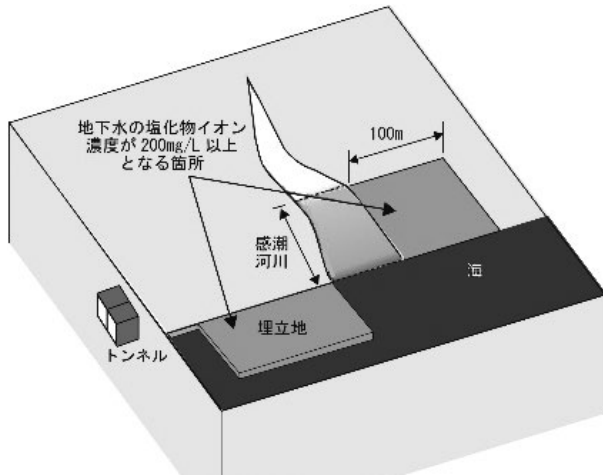


図5 漏水調査において高い塩化物イオン濃度が確認された範囲

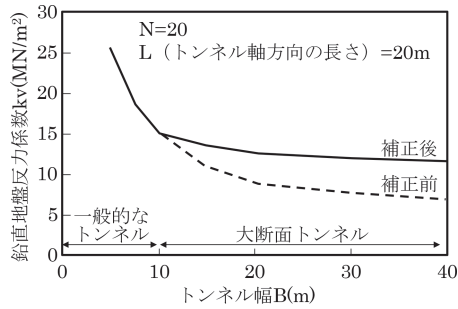


図6 地盤反力係数の補正の例<sup>11)</sup>

地盤反力係数が小さくなる傾向があるが、一般的な開削トンネルではく体の重量は掘削土の重量よりも小さいこと、く体の部材剛性はく体寸法に応じて相応に確保されることを鑑み、変位レベルが小さいときに地盤反力係数が過小評価されないように、一般的な開削トンネルの幅である10mを超える大断面開削トンネルでは、地盤修正係数 $\rho_{gk}$ を導入して地盤反力係数を補正することにした。補正の例を図6に示す。

#### 4.3 地下連続壁を本体利用する場合の性能照査法

地下連続壁を本体利用する開削トンネルの設計では、施工時の設計と本体構造物の設計を個別に行う分離計算法の適用例が多い。しかし、本体利用時は施工時の応力を受けたまま構造物として構築される実態を考慮すると、本計算法は必ずしも実情に即した手法であるとはいえない。一方で、施工時から完成まで一連で解析を行う方法である一体計算法は、施工過程を考慮できるが、計算が煩雑である、施工手順に沿って計算を行う必要があるなどの短所を有していた。そこで、施工時の残留応力を考慮することができ、一体計算法に近い計算結果が得られ、かつ、計算が煩雑になりすぎない擬似一体解析(図7)を適用できるようにした<sup>12)</sup>。あわせて、最近鉄道で

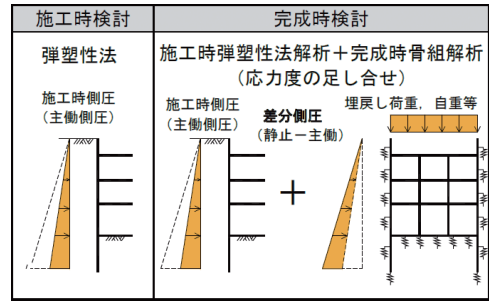


図7 擬似一体解析の概念<sup>12)</sup>

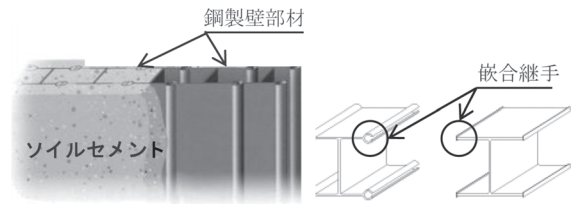


図8 ソイルセメントタイプの鋼製地下連続壁<sup>10)</sup>

も採用事例が見られるようになったソイルセメントタイプの鋼製地下連続壁(図8)に対して、具体的かつ標準的な性能照査の手法を示した。

### 5. シールドトンネルの改訂の要旨

改訂後のシールドトンネルの設計標準の冊子体(鉄道構造物等設計標準・同解説(トンネル・シールド編))は、図3の第I編と第III編とから構成される。

現在、シールドトンネルの本体の設計は、1997年に制定されたシールド標準により行われている。シールド標準では、セグメントをはり、周方向継手を回転ばね、軸方向継手をせん断ばね、地盤を地盤ばねでモデル化する、はりばねモデル(図9)が新たに導入された。ここで、周方向継手の回転ばね特性(継手回転角—モーメント)

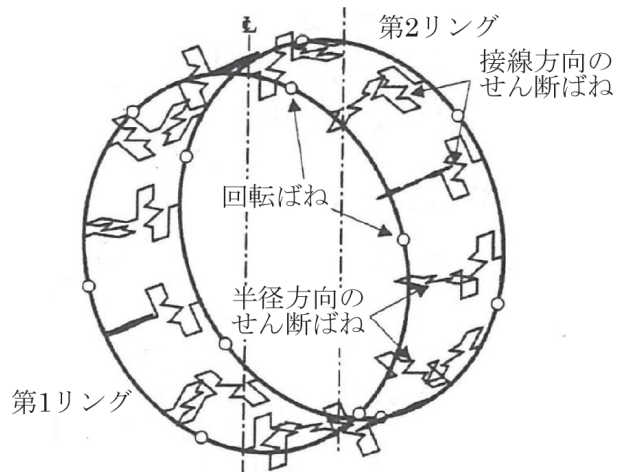


図9 2リングはりばねモデル

ントの関係)について、バイリニアモデルやトリリニアモデル等が提案され、構造モデルや有限要素法、継手曲げ試験により継手ばね定数を算出する方法が示されている。その他、土水圧、地盤反力係数等の作用の算定の考え方も全周ばねモデルに即したものが定められた。

今回、シールドトンネルの設計に性能照査型設計法を導入するにあたり、上記したような構造モデルについてはシールド標準から引き継ぐこととし、性能照査型設計法の導入にあたり必要な追加検討を行った。性能項目ごとの具体的な取り扱いのほか、具体的な応答値の算定や限界値の設定について、シールドトンネル特有の施工・環境条件を考慮したうえで、様々な構造・地盤条件に対応できる方法に関する記述を充実させた。以下、シールドトンネルの改訂の要旨を紹介する。

### 5.1 側方土圧係数の見直し

シールドトンネルの設計においては、鉛直土圧（緩み土圧／全土圧等）や、側方土圧、水圧等の作用を考慮することになっている（図10）。ここで、側方土圧については鉛直土圧に、地盤のN値により定まる側方土圧係数 $\lambda$ を乗じることにより求めるが、側方土圧係数に関して、これまでの設計事例や施工結果をふまえ、一部見直しを行った。さらに、硬質で良好な粘性土においては、これまで側方土圧係数の目安が示されていなかったが、今回新たに目安（表3）を示し、側方土圧が適切に設定できるようにした。これにより、覆工の設計の適正化が図られることが期待される。

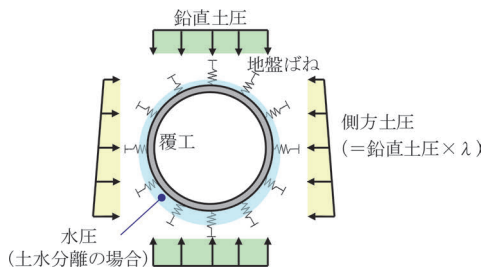


図10 シールドトンネルの設計における一般的な作用

表3 側方土圧係数（ $\lambda$ ）の比較

土質の評価		N 値の 目安	シールド標準		トンネル標準・シールド編	
			側方土圧 係数 $\lambda$	土水の 扱い	側方土圧 係数 $\lambda$	土水の 扱い
砂質土	非常に密な	$30 \leq N$	0.45	分離	0.45	分離
	密な	$15 \leq N < 30$	0.45~0.50		0.45~0.50	
	中位・緩い	$N < 15$	0.50~0.60		0.50~0.60	
粘性土	固結した	$25 \leq N$	—	一体	0.45	一体
	硬い	$8 \leq N < 25$	0.40~0.50		0.45~0.50	
	中位	$4 \leq N < 8$	0.50~0.60		0.50~0.60	
	軟らかい	$2 \leq N < 4$	0.60~0.70		0.60~0.65	
	非常に軟らかい	$N < 2$	0.70~0.80		0.65~0.70	
					0.70	

赤字：変更箇所

### 5.2 大断面トンネルにおける応答値の算定法の見直し

シールドトンネルの設計では、地盤とトンネルとの相互作用を地盤ばねでモデル化する。シールドトンネルにおける半径方向の地盤反力係数は、変形係数の異なる裏込め注入と周辺地盤の2層系の変形特性を考慮して、トンネルの半径に反比例するとする、Muir Woodの理論解式を用いて算出することになっている。近年、大断面のシールドトンネルが増加しているが、この場合、計算される地盤反力係数が小さくなる。一方で、覆工の存在により、大断面シールドトンネル等においても変形が抑制されると考えられることから、変位レベルが小さいときに地盤反力係数が過小評価されないように、一般的なシールドトンネルの幅である10m（半径5m）を超える大断面シールドトンネル等では、地盤修正係数 $\rho_{ek}$ を導入して地盤反力係数を補正できるようにした。補正の例を図11に示す。地盤反力係数の補正により応答値の適正化が図られ、RCセグメントの適用範囲が広がることが期待される。

## 6. 山岳トンネルの改訂の要旨

改訂後の山岳トンネルの設計標準の冊子体（鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル・山岳編））は、図3の第I編と第IV編とから構成される。以下、山岳トンネルの改訂の要旨を紹介する。

### 6.1 設計標準の適用範囲の拡大

現在、山岳トンネルの覆工およびインバートの設計は、都市部に建設されるトンネルについてのみ、2002年3月に制定された都市部山岳標準により行われている。

都市部のトンネルについては、土被りの比較的小さい未固結または低固結度の土砂地山中に建設されることが多いこと、トンネルに近接した工事による影響が考えられることなどを踏まえ、覆工およびインバートは防水型のRC構造として設計することとなっている。

一方、山岳部のトンネルについては、設計標準が整備されておらず、トンネルの覆工およびインバートは、

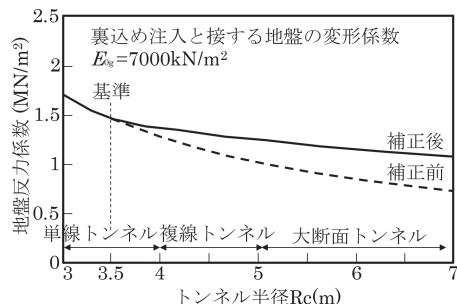


図11 地盤反力係数の補正の例<sup>13)</sup>

RC 構造として設計計算を行う坑口部や、それが適用できない特殊地山の場合等を除き、あらかじめ定められた仕様である標準設計を適用することにより行われている。

鉄道システムは、いろいろな種類の構造物から構成される線状のシステムであり、構造物の性能は定量的に明示されるとともに、性能を評価する基準も同一であるべきと考えられる。今回の改訂にあたり、山岳部のトンネルについても、鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル）第Ⅳ編の適用範囲に含めるものとした。

現在、ほとんどの山岳トンネルは、NATMにより施工されている。NATMは、鋼製支保工、吹付けコンクリート、ロックボルトからなる支保工を用い、地山の支保能力を積極的に活用してトンネルを建設することに特色がある。掘削工法、支保工は、トンネルの安定に必要な不可欠なものであるが、一方で、地山を直接照査することは困難であり、地山の安定に寄与する支保工においても性能項目や限界値を設定して照査する方法等はないのが現状である。また、実務では、実績のある仕様を基に掘削工法や支保工を検討し、掘削、支保時の観察・計測により、①変形がほぼ収束していること、②支保工が大きく破壊していないこと等を確認することによって安全性を担保してきたという実績がある。そこで、トンネル標準・山岳編では、地山の安定を覆工およびインバートの照査の前提として扱い、掘削工法や支保工の仕様を施工条件として提示したうえで、観察・計測により、上記①、②等を確認することをもって、覆工およびインバートの照査の前提が満足されるとみなしてよいこととした。これを受け、表2に示したように、第Ⅳ編では、第Ⅱ編、第Ⅲ編にない、第4章 地山の安定に関する検討が加えられている。

### 6.2 適合みなし仕様の制定<sup>14)</sup>

図12に、地山条件別の覆工およびインバートの構造

と設計法を示す。大きく分けて、条件1：自重以外の常時の外力が想定される場合、条件2：完成後に地山から変位を受けることが想定される場合、条件3：上記以外の3つに分類できると考えられる。それぞれの具体例として、条件1：坑口部、小土被り部（含都市部）等、条件2：膨張性を有する地山等、条件3：坑口部から中に入り、風化した表層の影響が小さくなり十分安定した地山等が挙げられる。

条件1では、RC構造として緩み土圧、全土圧等を用意させた骨組解析を行って性能照査により設計することが考えられる。条件2では、完成後の地盤変位が想定される場合は、例えば、文献15で示したような方法により性能照査を行うことが考えられる。条件3では、無筋コンクリート構造として、自重に対して問題ないことを確認すれば良いと考えられるが、鉄道山岳トンネルは多くの区間が条件3に該当すると考えられるため、「適合みなし仕様」を定め、これを用いて設計を行うことが簡便と考えられる。

条件③に該当するトンネルのために、現状の整備新幹線の山岳トンネルでは大部分の区間において覆工およびインバートの標準設計が用いられていることと過去の設計との整合も考慮し、標準設計を適合みなし仕様として定めた。覆工の適合みなし仕様は、前記した条件③の場合に用いることができる。なお、地山の変形が収束してから覆工を施工することが適用にあたっての前提である。インバートの適合みなし仕様は、上記に加えて、軌道面の隆起のおそれがない場合、かつ軌道面の沈下の恐れがない場合に適用することができる。適合みなし仕様の詳細については、文献14に示す。

### 6.3 その他

一般に山岳トンネルでは地震の影響は少ないとされているが、坑口部等で地震の影響が完成後のトンネルに影

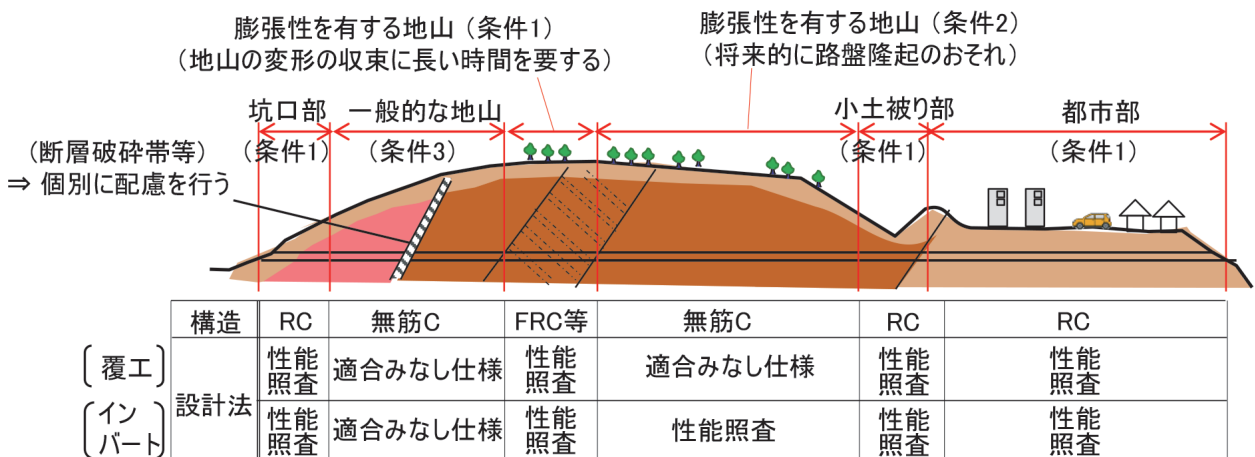


図12 覆工およびインバートの設計法の分類

響する場合はこれを考慮するものとし、地震の影響を受けやすい条件を示すとともに、10章 特殊な設計条件の山岳トンネルにおいて、耐震設計の方法を記載した。なお、地表断層変位や断層破碎帯等については、構造計画において別途配慮するものとしている。

## 7. おわりに

本展望解説では、鉄道におけるトンネルの設計技術の動向と、新しい鉄道トンネルの設計標準の概要を紹介した。新しい設計標準により、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トンネルが建設されることを期待したい。

最後に3トンネルの「鉄道構造物等設計標準に関する委員会」において審議を重ねていただいた、委員の方々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 コンクリート構造物, 丸善出版, 2004
- 2) 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 鋼・合成構造物, 丸善出版, 2009
- 3) 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 鋼とコンクリートの複合構造物, 丸善出版, 2016
- 4) 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 土構造物, 丸善出版, 2007
- 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 土留め構造物, 丸善出版, 2012
- 6) 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 基礎構造物, 丸善出版, 2012
- 7) 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 トンネル・開削編, 丸善出版, 2021
- 8) 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 耐震設計, 丸善出版, 2012.
- 9) 岡野法之, 神田政幸: 鉄道における開削トンネルの設計技術に関する動向, 鉄道総研報告, Vol.33, No.4, pp.1-4, 2019
- 10) 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
- 11) 仲山貴司, 西山和宣, 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
- 12) 中島卓哉, 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擬似一体解析手法, 鉄道総研報告, Vol.33, No.4, pp.17-22, 2019
- 13) 津野究, 仲山貴司, 藤田輝一, 船越宏治, 木下果穂: 大断面シールドトンネルにおける地盤反力係数の検討, 土木学会第73回年次学術講演会, III-569, 2018
- 14) 嶋本敬介, 川越健, 野城一栄, 上野光: 山岳トンネル覆工およびインパートの適合みなし仕様の提案, 鉄道総研報告, Vol.36, No.5, pp.21-27, 2022
- 15) 嶋本敬介, 野城一栄, 岡野法之: 地山劣化法を用いた山岳トンネル覆工およびインパートの性能照査法, 鉄道総研報告, Vol.36, No.5, pp.29-35, 2022