

山岳トンネル覆工およびインバートの 適合みなし仕様の提案

嶋本 敬介* 川越 健** 野城 一栄* 上野 光#

Proposal of Pre-verified Specification for Mountain Tunnel Lining and Invert

Keisuke SHIMAMOTO Takeshi KAWAGOE Kazuhide YASHIRO Hikaru UENO

Construction results analysis, laboratory tests and numerical analysis were carried out to propose pre-verified specifications for the standard design of linings and inverts for mountain tunnels. An analysis of recently constructed Shinkansen tunnels focusing on defects in the linings, showed that the number of cracks requiring repairs was small and the usability was sufficiently satisfied. The applicable conditions of pre-verified specifications were shown from the case analysis of tunnels where floor swelling was observed after the start of operation and laboratory tests of rock samples. In addition, in the case of a tunnel in soft ground, an analytical design of linings and inverts was conducted using beam-spring analysis, and it was confirmed that the safety is satisfied. From the above, the validity of the standard design as pre-verified specifications was confirmed.

キーワード：山岳トンネル，覆工，インバート，適合みなし仕様

1. はじめに

鉄道山岳トンネルの覆工およびインバートの設計法の枠組みはこれまで明確に定められたものはなかったが、山岳部も含めて性能照査型設計法に移行する¹⁾にあたり、設計の考え方を整理した。図1に覆工およびインバートの設計法の分類を示す。設計は構造計画段階と性能照査段階で実施することとし、構造計画段階においては、地山条件や環境条件に応じて、無筋コンクリート、鉄筋コンクリート（RC）等の、基本的な諸元としてどのような構造・材料を用いるかを検討する。例えば、断層破砕帯等にある場合は、繊維補強コンクリートを用いる、鉄筋コンクリート構造等にすると等の配慮を行う、また、自重以外の外力の作用が想定される場合は、鉄筋コンクリート構造を採用するなどである。性能照査段階では、具体的な性能項目を設定して照査を行うことになる。断層破砕帯等にある場合を除けば、覆工およびインバートは、

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つの条件に応じて構造や設計法を選択すればよい。それぞれの具体例として、

条件1：坑口部、小土被り部等

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。構造、設計法は、条件1の場合は、RC構造として緩み土圧、全土圧、あるいは地震時の地盤変位を作用させた骨組解析を行って設計すれば良い。条件2の場合は、完成後の地盤変位が想定される場合は、例えば、文献2で示したような方法により設計すれば良い。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ることによれば良い。

ここで、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、適用条件を満足する地山においてはこれを用いて設計を行うことが簡便と考えられる。

以下、トンネルの覆工およびインバートの標準設計の適合みなし仕様の策定にあたり実施した、施工実績の分析、室内試験、数値解析による検証の結果について示す。

2. 提案した適合みなし仕様

現在、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³⁾が用いられている。整備新幹線の場合、標準設計は、アーチ部の巻厚は30cm、インバートの巻厚は45cmとされ、無筋コンクリート構造となっている。このため、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（図2）として定めることとした。なお、適合みなし仕様は、その仕様を用いること

* 構造物技術研究部 トンネル研究室

** 防災技術研究部 地質研究室

独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構

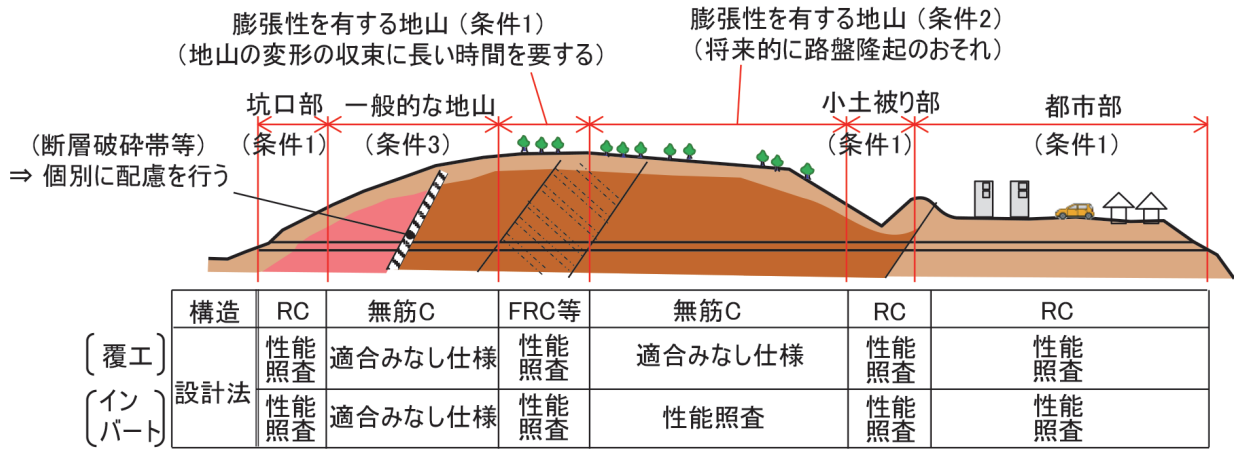


図1 鉄道山岳トンネルの覆工およびインバートの設計法の分類

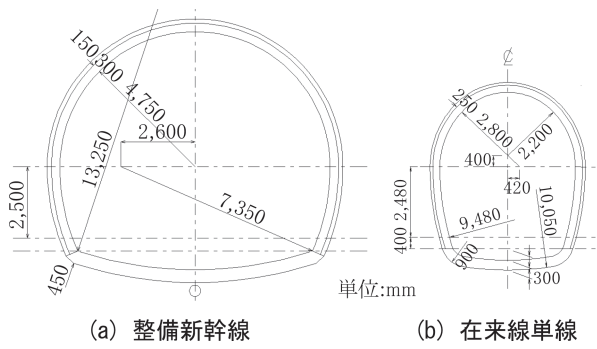


図2 適合みなし仕様の例

で、性能照査がなされたものとみなしてよいとされているが、「要求性能水準を満足することが事前に検証されている具体的な構築方法、材料、形状等の仕様」と定義されているように、トンネルの要求性能と性能項目の事前の検証が必要である。以下、表1に示したようなトンネルの要求性能と性能項目のうち、安全性（破壊）（公衆安全性）、使用性（水密性）に着目して検証を行った。

表1 トンネルの要求性能と性能項目

要求性能	性能項目	
安全性	破壊	
	疲労破壊	
	安定	内空の変位・変形 軌道面の不同変位
	走行安全性	
使用性	公衆安全性	
	外観	
	水密性	
	支持性能	
	乗り心地	
復旧性	騒音・振動	
	損傷	軌道面 部材
	残留変位	

3. 施工実績の分析による検証

トンネルが構造物としての要求性能を満足しているか否かの確認方法としては、適切な供試体による確認実験や経験的かつ理論的検証のある解析、現場計測による方法等が挙げられている¹⁾。本章では、整備新幹線トンネルの覆工およびインバートの標準設計について、要求性能を満足するかどうかを施工実績の分析により検証した。

最近建設された整備新幹線の2トンネルを対象とし、覆工およびインバートの標準設計が適用された区間の施工実績から、覆工完成時点での覆工の展開図に記載されたひび割れの分析を行った。表2に、調査対象トンネルの概要と調査結果の概要を示す。

覆工にみられた不具合は、施工後のコンクリートの収縮によるものとみられるひび割れのみで、漏水も確認されなかった。ひび割れ幅は、最大でもそれぞれ、幅0.65mm、0.80mmで、ごく軽微なもので、閉合ひび割れ等の、安全を脅かすはく落等が生じるおそれがあるひび割れ等はなかった。図3に覆工1ブロック当たり平均のひび割れ数を示すが、掘削時の内空変位との関係性

表2 調査対象トンネルの概要と調査結果の概要

項目	Aトンネル	Bトンネル
地質	新第三紀層	古第三紀 泥岩・凝灰岩
地山等級	主に I _{N-1} または I _{N-2} (一部 I _S , II _N が存在)	I _{N-1} または I _{N-2}
1ブロックの長さ	10.5m	10.5m
建設時の状況	過大な内空変形が発生したとの記録はない	一部区間で大きな内空変位が発生して難工(覆工は変位収束後に施工)
調査延長	3360m(320ブロック)	3360m(320ブロック)
最大ひび割れ幅	0.65mm	0.80mm
漏水	確認されていない	確認されていない

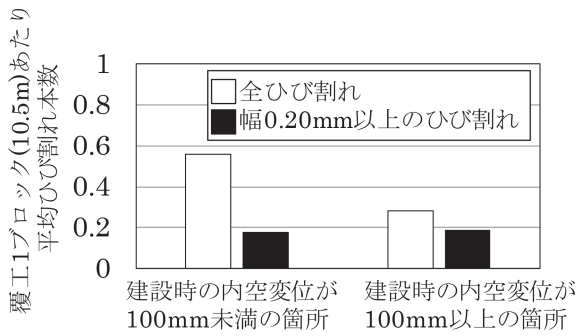


図3 覆工1ブロック当たりの平均ひび割れ本数

が見られないことから外力作用を受けたひび割れではないことが確認できる。

以上のことから、覆工の適合みなし仕様は安全性（公衆安全性）や、使用性（水密性）を十分満足するものと考えられる。

4. 事例分析と室内試験に基づく適用みなし仕様の適用条件の検討

4.1 概要

適合みなし仕様は適用条件を満足することが必要となる。たとえば、基準³⁾においても、標準設計が適用できるのは一般地山（地山分類基準で、地山等級 $I_{N-1} \sim V_N$ と判定される地山）とされている。ただし、i) 土砂地山等で土被りが小さい場合、ii) 大きな水圧が作用する場合、iii) 付加荷重が作用する場合、iv) 偏圧が作用する場合、v) 地山の変形の収束前に覆工を施工する場合、vi) 支保工耐力の限界に近いことが予想される場合に該当する場合は、別途検討を行うこととされており、これが除外条件となっている。vi) は地山の安定が満足されていない状態と考えられるのでこれを除くと、i) ~v) は覆工およびインバートの完成後に外力や変位等の作用を受けることに相当し、標準設計が適用できる条件は、1章で示した条件3と同じことを意味している。

以上をふまえ、山岳トンネルの覆工およびインバートの適合みなし仕様の適用条件として表3を定めた。トン

表3 山岳トンネルの覆工およびインバートの適用条件

覆工	インバート
下記条件に該当しない [1] 自重以外の常時の外力の作用が想定される場合 (a) 坑口部・小土被り部 (b) 都市部 (c) 防水型トンネル [2] 完成後に地山～変位を受けることが想定される場合 ※ 地山の变形が収束してから覆工を施工すること前提	左記に加えて以下を満たす [1] 軌道面の隆起の恐れがない [2] 軌道面の沈下の恐れがない

ネルが安定している地山中に位置し、想定される荷重が自重のみという条件である。

ここで、これまでに、新生代（古第三紀以降）の泥岩等の細粒碎屑岩類、同時代の凝灰岩や凝灰角礫岩等からなる地山等に位置する整備新幹線のトンネルにおいて不具合が生じたことが報告^{例えは4)}されている。ここで、これらの不具合事例は、ほとんどがインバートに関する不具合（盤膨れ）であり、覆工に関する不具合（水平内空の縮小）も数例報告されているが、これらのすべてで盤膨れも同時に生じていることがわかっている。

以上から、適合みなし仕様の適用条件の検討に当たり、整備新幹線のトンネルの覆工およびインバートの不具合の事例分析と岩石試料の室内試験により、表3インバート欄 [1] の判断目安を定めることとした。

4.2 地山の膨張性を示す指標と盤膨れ

地山の膨張性を示す指標はいろいろなのが提案されている。表4に、地山の膨張性を示す指標の例を示すが、粘土鉱物の吸水膨張特性の観点と地山の強度の観点からの指標となっている。盤膨れは地山の膨張性が顕在化した現象の一つと考えられ、表4を参考にすることができると考えられるが、一般に、ここでいう地山の膨張性は、例えば、建設時の100mmを超えるトンネルの変形といった急激かつ大きな変形を想定したもので、変形抑制のための掘削工法、標準支保パターンの検討、切羽安定・沈下対策のための補助工法の検討といった、建設時の各種検討のための指標と考えられる。そのため、適合みなし仕様の適用条件としてそのまま適用することは必ずしも適切でないと考えられる。

そこで、本章では、供用後の盤膨れを生じたトンネルの事例分析と室内試験により適合みなし仕様の適用条件の検討を行った結果を示す。

4.3 浸水崩壊度と地山強度比と盤膨れの関係

事例分析は盤膨れに着目して行うこととした。具体的には、完成後に盤膨れが確認された整備新幹線トンネルの事例のうち、標準設計が適用され、地山強度比と浸水崩壊度のデータを有する事例⁶⁾を用いて考察した。

図4に、地山強度比 G_n 、浸水崩壊度（縦軸の（）は

表4 地山の膨張性を示す指標の例

日本鉄道建設公団(1977)	吉川ほか(1988) ⁵⁾
【膨圧発生の可能性あり】 [1] 岩石中の主要粘土鉱物がモンモリロナイト [2] $2 \mu m$ 以下粒子含有率 $\geq 15\%$ [3] 塑性指数 ≥ 25 [4] 陽イオン交換容量 $\geq 20 meq/100g$	【膨張性を呈する地山】 [1] ボーリング時 ・ コア採取率が低い ・ コアディスクングが顕著 [2] $1.5 \leq G_n \leq 2.0$ [3] モンモリロナイト含有量 $\geq 20\%$ 、または、自然含水比 $\geq 20\%$

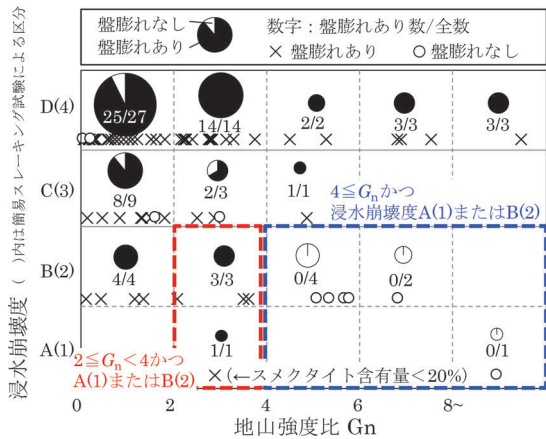


図4 浸水崩壊度、地山強度比と盤膨れの関係⁶⁾より作成

簡易スレーキング試験による区分)と盤膨れとの関係を示す。地山強度比 G_n について、 $4 \leq G_n$ かつ 浸水崩壊度 A(1) または B(2) の範囲では盤膨れは発生していない。 $2 \leq G_n < 4$ かつ 浸水崩壊度 A(1) または B(2) の範囲では、全ての事例 (4/4) が盤膨れしている結果であったが、スメクタイト (膨潤性粘土鉱物) 含有量 20% 以上のものがこれらのうち 3 事例あった。スメクタイト含有量 20% 以下の 1 事例について、建設時の切羽観察結果、切羽写真、その後に行われたボーリング調査の結果等をもとに盤膨れ箇所およびその付近の地質状況を確認したが、盤膨れ箇所およびその付近は全体に亀裂が多いこと、また、一軸圧縮強さから算出した地山強度比は深度により 0.1 以下となる箇所もあることが確認された。

以上から、浸水崩壊度 A(1) または B(2) の範囲では、 $4 \leq G_n$ の場合は盤膨れの可能性は小さいものと考えられるが、 $2 \leq G_n < 4$ の場合は割れ目やスメクタイトの存在に留意する必要があると考えられる。

4.4 吸水膨張特性と盤膨れとの関係

一般に、同様の岩石が分布している場合、弱層 (割れ目帯) は相対的に強度が小さく、変状の原因となりやすいとされている。3 節で示した事例分析結果も踏まえ、泥質岩から作成した試料に対し、岩石中の割れ目に着目して吸水膨張試験を実施した。

試験には古第三紀および新第三紀の泥質岩を対象に原位置で採取したブロックから作成した試料を用いた。図 5 に吸水膨張応力試験から得られた、最大吸水膨張応力⁷⁾を示す。図においては、盤膨れ量と比較できるように、新第三紀泥質岩に建設された整備新幹線トンネルの盤膨れ箇所のボーリングコアに対して実施した同試験の結果も示す。図より、古第三紀、新第三紀ともに、割れ目を多く含む部分の試料は塊状の部分の試料よりも最大吸水膨張応力が大きいことがわかる。なお、図 5 には、崩壊形状から判定した Na 型/Ca 型の違いも併せて示したが、

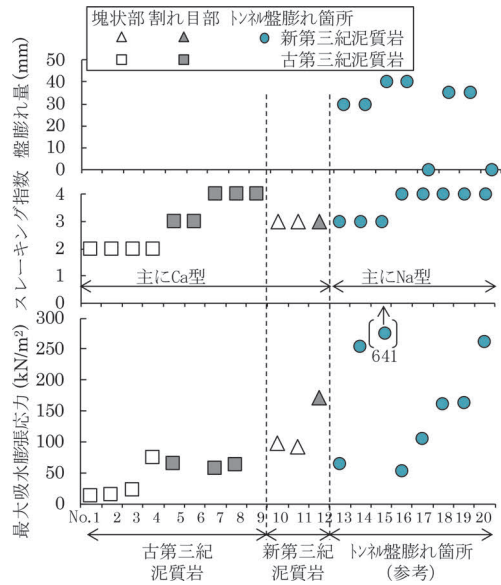


図5 試料別の吸水膨張試験の結果⁷⁾に加筆

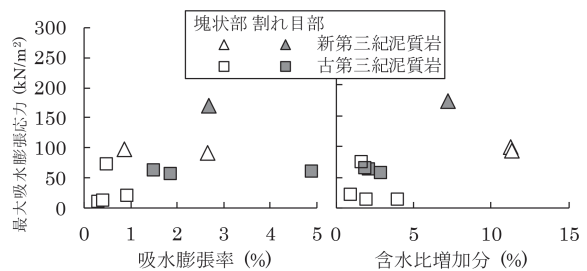


図6 吸水膨張率と最大吸水膨張応力⁷⁾に加筆

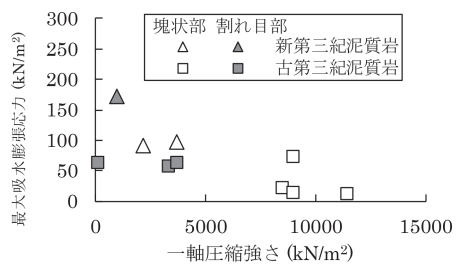


図7 一軸圧縮強さと最大吸水膨張応力⁷⁾に加筆

一般に言われているように、Na 型の場合は、Ca 型と比べて吸水膨張応力が大きいという結果となっている。

図 6 に吸水膨張率と最大吸水膨張応力の関係を示す。図より、両者は正の相関があり、吸水にともない膨張応力が発生していることがわかる。また、古第三紀、新第三紀ともに、割れ目部は塊状部と比べて吸水膨張率、最大吸水膨張応力が大きいこと、新第三紀の割れ目部では数%の含水比の変化で比較的大きな膨張応力が発生していることがわかる。

図 7 に一軸圧縮強さと最大吸水膨張応力との関係を示す。図より、両者は負の相関があり、割れ目部は塊状部と比べて、一軸圧縮強さが小さく最大吸水膨張応力が

大きいことがわかる。吸水による膨張応力の観点からは地山強度比 G_n ではなくその場所での岩石の一軸圧縮強さも十分に考慮する必要があることが示唆される。

4.5 スメクタイト含有量と盤膨れとの関係

一般に、スメクタイトを含有することで盤膨れが生じやすくなるものと考えられ、吉川ら⁵⁾により、膨圧発生の可能性判定のための目安として、スメクタイト含有量20%が提案されている。図8に、スメクタイト含有量と最大吸水膨張応力、盤膨れ量との関係を示す。塊状部ではスメクタイト含有量20%以下では最大吸水膨張応力は小さい傾向が見て取れ、文献5の記載内容と合致する。ただし、塊状部/割れ目部を区別しない場合、スメクタイト含有量と最大吸水膨張応力の相関は必ずしも高くない。

図8には、トンネルの盤膨れ箇所のボーリングコアに対して実施した同試験の結果も併せて示すが、ボーリングコアではスメクタイト含有率10%程度でも大きな盤膨れが生じている。これより、スメクタイト含有量に重きを置いて盤膨れの可能性を判断すると盤膨れを過小評価するおそれがあり注意が必要であることが示唆される。

4.6 インバートの適合みなし仕様の適用条件

表3インバート欄[1]の判断目安については、5節までの成果を踏まえ、判断の考え方を表5のように整理した。なお、表5においては、適用条件を裏返して、条件3に対応した地山の選定法として示している。

まず、盤膨れを生じうる地山を、新生代（古第三紀以降）の泥岩等の細粒碎屑岩類、同時代の凝灰岩や凝灰角礫岩等の火山碎屑岩類、風化や熱水変質および破碎の進行した岩石、蛇紋岩類等よりなる地山とし、このような地山で以下の条件に合致する場合は適合みなし仕様は適

表5 条件3に対応した地山の選定法

条件
・「注意が必要な地山」※1であり、下記条件のいずれかに該当すること※2
－「地山強度比 $G_n < 2$ 」
－「浸水崩壊度 C(3) または D(4)」
－「地山強度比 $2 \leq G_n < 4$ 」かつ「スメクタイト含有量※3 または割れ目が多い」
※1：「注意が必要な地山」とは以下の地山である
[1]新生代（古第三紀以降）の泥岩等の細粒碎屑岩類、同時代の凝灰岩や凝灰角礫岩等の火山碎屑岩類
[2]風化や熱水変質および破碎の進行した岩石
[3]蛇紋岩類等よりなる地山
ただし、蛇紋岩については、塊状の場合は比較的安定である一方、粘土状、葉片状の場合に強大な土圧を発生することから、地山強度比や浸水崩壊度だけでなく、切羽における塊状蛇紋岩の割合（塊状率）についても評価する必要がある。
※2：インバート部の地山とする。
※3：スメクタイト含有量は20%未満を目安に少ないと判断としてよい。

用できないこととした。

$G_n < 2$ の地山や、浸水崩壊度C(3)またはD(4)の地山では盤膨れが発生した事例が見られることから、適合みなし仕様は適用できないこととした。一方、 $2 \leq G_n < 4$ かつ浸水崩壊度A(1)またはB(2)の地山では、スメクタイトが多い、あるいは、割れ目が多い場合に盤膨れした事例が見られることから、適合みなし仕様の適用にあたりスメクタイト含有量や割れ目を評価することとした。ここで、スメクタイト含有量は、過去の研究結果と今回の試験結果に鑑み20%を目安とした。割れ目の多寡は定量的な評価が難しいが、事前のボーリングや切羽観察からある程度判定することできるものと考えられる。施工においては、切羽観察、ボーリング調査の結果から、割れ目が多い層の線路縦断方向の分布範囲を整理し、詳細な縦断図を作成することが重要である。また、スレーキング試験などの岩石試験を行う際には、安全側の判断ができるよう、割れ目を多く含む箇所から試料を採取することも重要と考えられる。

5. 数値解析による検証

山岳トンネルの覆工およびインバートは、使用性については、3章で示したように、これまでの実績により、適切な施工が行われれば使用上の不具合が生じていないこと、性能が実績等により確認された防水工・排水工が用いられる場合は使用性が満足されると考えられることから、ここでは安全性（破壊）を取り上げることにした。

図2で示した整備新幹線トンネルおよび在来線単線トンネルの標準的な断面を有する、覆工およびインバートを検証対象とした。地山条件は、鉄筋コンクリート区間に隣接した比較的軟らかい地山の場合として、 N 値

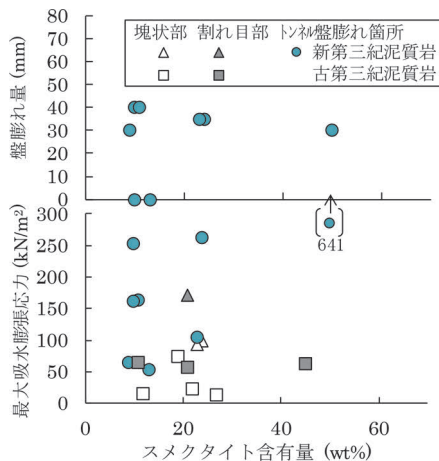


図8 スメクタイト含有量と吸水膨張応力、盤膨れ量の関係⁷⁾に加筆

20程度の地山を想定した。また、覆工完成時の自重を作用として設定して照査を行うものとした。解析条件を表6に示す。

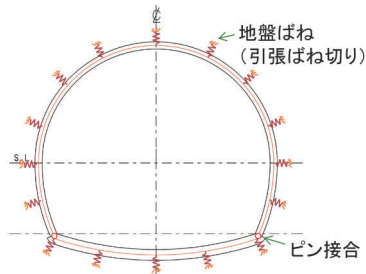
構造計算にあたっては、図9に示すように、覆工およびインバートを梁、地盤とトンネルの相互作用を地盤ばねでモデル化した、骨組構造解析モデルを用いた。

要求性能として安全性（破壊）を設定した。なお、安全性（破壊）の照査は覆工およびインバートが破壊しないことの確認を基本原則とするが、実際の無筋コンクリートにおける覆工およびインバートの破壊は複雑な挙動を示し、現状では破壊の評価手法は確立されていない。そのため、ここでは、安全側の評価として覆工に引張りひび割れが一つでも発生しない（引張応力を設計引張強度で除した照査値が1を下回る）ことを確認することとした。設計にあたり用いる安全係数を表7に示す。なお、安全係数についても、現時点では不明点が多く確立されたものが提示されていない。上記を踏まえてすべて1.0とすることも考えられるが、ここでは、安全側の検討となるよう、RC構造として性能照査を行う場合の各安全係数を準用することとした。

応答値（断面力図）を図10、11に示す。また、部材に発生する引張応力について、照査値を図12、13に示す。図より、照査値は1を下回り、安全性（破壊）を満足するという結果となった。

表6 解析条件

項目	項目	(単位)	数値
覆工 および インバート	設計基準強度 f_{ck}	N/mm ²	18
	ヤング係数 E	N/mm ²	2.2×10^4
	単位体積重量 γ	kN/m ³	23
	設計引張強度 f_{td}	N/mm ²	$\gamma_c \cdot 0.23 f_{ck}^{2/3}$
地山	N 値	—	20
	トンネル図心幅 D_c	m	9.8
	地盤反力係数	kN/m ³	15,400



※ 実際は対称性を考慮して左半分モデルで解析を実施

図9 骨組解析モデル

表7 検討に用いた安全係数

要求性能	作用係数 γ_f	構造解析係数 γ_s	材料係数 γ_m		構造物係数 γ_i
			γ_c	γ_b	
安全性	1.1	1.0	1.3	1.1	1.2

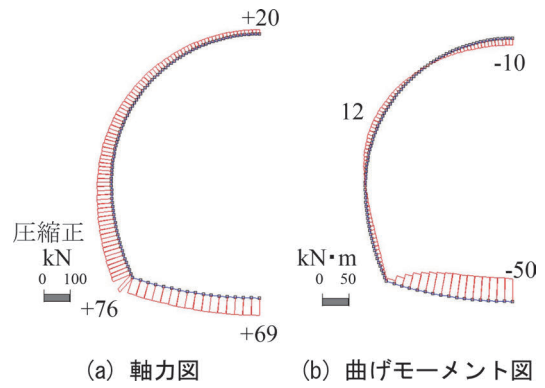


図10 応答値（整備新幹線）（断面力図）

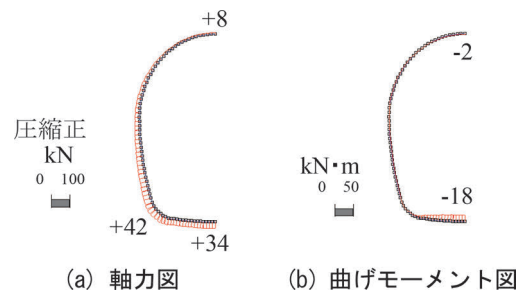


図11 応答値（在来線単線）（断面力図）

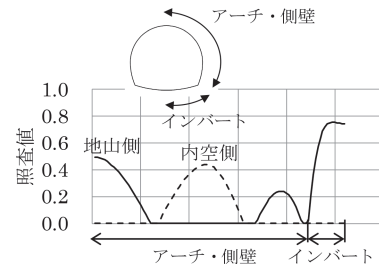


図12 照査値（整備新幹線）（引張応力）

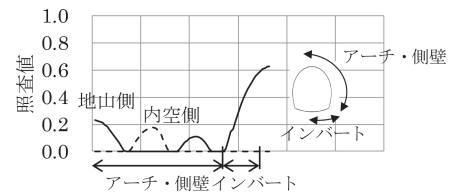


図13 照査値（在来線単線）（引張応力）

6. 結論

本論文では、トンネルの覆工およびインバートの標準設計の適合みなし仕様の策定にあたり実施した、施工実績の分析、室内試験、数値解析による検証の結果について示した。以下に結論をまとめる。

- (1) 最近施工された整備新幹線のトンネルを対象とし、覆工の展開図に記載された変状の分析を行った。補修の対象となるひび割れは少なく、安全性（公

衆安全性)や使用性(水密性)を十分満足することを確認した。

- (2) 供用後に盤膨れを生じたトンネルの事例分析結果と泥質岩試料の室内試験結果に基づき、適合みなし仕様の適用条件を示した。
- (3) 鉄筋コンクリート区間に隣接した区間を想定し、骨組解析を用いて自重を作用させて解析的検討を行ったところ、安全性(破壊)を満足することを確認した。

文献

- 1) 野城一栄：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，鉄道総研報告，Vol.36，No.5，pp.1-7，2022
- 2) 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バートの性能照査法，鉄道総研報告，Vol.36，No.5，pp.29-35，2022
- 3) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，p.272，2008
- 4) 久保原猛，若林秀明，鈴木延彰，齋藤貴：供用中のトンネルで未収束の路盤隆起に挑む，トンネルと地下，Vol.45，No.9，pp.45-53，2014
- 5) 吉川恵也，朝倉俊弘，小島芳之：NATMのための膨張性泥質岩の地山分類，応用地質学会63年度研究発表会，1988
- 6) 小林寛明，井浦智実，上野光，渡辺和之，嶋本敬介，伊藤直樹：山岳トンネルの盤ぶくれとその対策に関する基礎的研究，土木学会論文集F1(トンネル工学)，Vol.71，No.3(特集号)，I_80-I_93，2015
- 7) 川越健，太田岳洋，赤澤正彦，上野光，石田良二：泥質岩を掘削対象としたトンネルの変状と岩石の吸水膨張特性，土木学会第70回年次学術講演会，Ⅲ-106，2015