

供用トンネルの盤ぶくれ対策検討などにおける 数値解析について

前川 和彦¹・伊藤 哲男²・海瀬 忍³・國村 省吾⁴・奥井 裕三⁵・蔣 宇静⁶

¹正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）

E-mail:k.maegawa.aa@ri-nexco.co.jp

²正会員 西日本高速道路株式会社 技術本部（〒530-0003大阪府大阪市北区堂島1-6-20 堂島アバンザ）

E-mail:t.ito.ak@w-nexco.co.jp

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）

E-mail:s.kaise.aa@ri-nexco.co.jp

⁴正会員 応用地質株式会社 メンテナンス事業部（〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5）

E-mail:kunimura-shogo@oyonet.oyo.co.jp

⁵正会員 応用地質株式会社 メンテナンス事業部（〒331-8688 埼玉県さいたま市北区土呂町2-61-5）

E-mail:okui-yuzo@oyonet.oyo.co.jp

⁶フェロー 国立大学法人 長崎大学 大学院工学研究科（〒852-8521 長崎県長崎市文教町1-14）

E-mail:jiang@nagasaki-u.ac.jp

現在，東日本高速道路（株），中日本高速道路（株），西日本高速道路（株）では，構造物の長寿命化を目的としたリニューアル工事を実施しており，トンネル構造物については，覆工補強および盤ぶくれ対策が対象となっている．しかし，リニューアル工事である覆工補強工事および盤ぶくれ対策工事を推進していくうえで，確立された設計手法がないことや参考となる実例等が少ないことから，それらを取りまとめる必要があった．本稿では，トンネルのリニューアル工事である盤ぶくれ対策工事のための追加インバート等の変状対策設計において，用いられている数値解析による設計と適用条件について検討した結果とトンネルの解析手法について取りまとめたトンネル数値解析マニュアルの改定内容について述べる．

Key Words: design by numerical analysis, invert reinforcement, heaving, renewal

1. はじめに

現在，東日本高速道路（株），中日本高速道路（株），西日本高速道路（株）の3会社（以下，「NEXCO」という．）が管轄する道路は，1963年の名神高速道路が開通してから現在まで約9000kmが開通しており，その内トンネルの延長は約1760km，約1850本となっている．その内約30%のトンネルが供用後30年を経過しており，老朽化が進んでいる．

高速道路を保全・管理するNEXCOは，国土交通省の事業許可を得て構造物の長寿命化を目的としてリニューアル工事を実施している．しかし，トンネルの補修および補強（以下，便宜上「補強」という．）設計のために確立された手法がないことや設計を実施する際の参考となる事例が少なく，それらを取りまとめる必要があった．

本報告は，追加インバートによる盤ぶくれ対策等の変状対策設計において用いられている数値解析による設計と適用条件について検討した結果，およびトンネルの解析手法を取りまとめたトンネル数値解析マニュアル（以下，「マニュアル」という．）の改定内容について述べる．

2. リニューアル工事の概要

NEXCOで実施するリニューアル工事は長寿命化を目的とし，トンネル構造物においては，ひび割れ等により低下した覆工耐力の回復および建設時に想定していなかった外力が供用後に作用したことに對しての対策である覆工の補強工，および路面隆起により通行車両に支障を

きたしている箇所とその恐れのある箇所に対しての盤ぶくれ対策が主な内容となっている（表-1）。

トンネルのリニューアル工事の事業規模は 2015～2030 の 15 年間で 130km の事業が予定されている。

3. リニューアル工事実施のための課題

(1) 施工上の課題

利用者への影響を最小限にし、限られた期間の中で多くの箇所の工事を実施するためには、以下の問題点が挙げられる。

① 対象の区間の多くは、外力性の変状を受けていない老朽化による損傷もしくは、過去に外力を受けて変状しているが現在は進行性がない、もしくは少ない区間となっており、これらの変状に対する原因分析や状況調査は完全に実施されていない状況である。

また、変状が顕在化している区間もあり、その変状の原因としては、以下のことが考えられる。

- ・トンネル建設時の応力解放により地山がゆるみ、時間経過とともに何らかの要因で地山の劣化が進行し、地山強度比が著しく低下した。
- ・スメクタイト等の膨潤性を有する粘土鉱物が地山等からの水の供給により吸水膨張した。

② NEXCO の管理する高速道路は、都市部、山間部といった地域性や交通量の大小など様々な状況にある。特に都市部で交通量の多い区間や山間部で迂回路の交通容量が少ない区間では、通行止を実施しての対策工の施工は困難であるため、2 車線のうちの 1 車線を規制しながらの施工となる。1 車線での施工は作業区間が狭小であるため、大規模な施工機械を用いることが出来ず、施工速度が上がらない。

(2) 設計上の課題

明らかな外力性変状がある区間に対する補強設計では、調査等を実施して、覆工等に作用する外力を推定し、設計する。しかし、先に述べたとおり、リニューアル工事を実施する多くの区間は、現在進行性がみられない、も

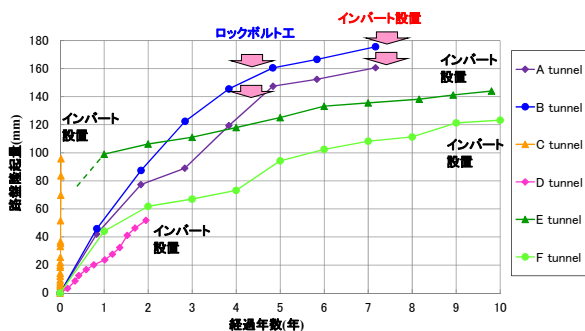


図-1 路面隆起量と経過年数

しくは小さく、過去に発生した外力の推定や現在の外力の影響の推定が困難であるため、調査による地山の物性値の設定が困難な場合がある。

4. 盤ぶくれ対策の設計

(1) 調査と対策の現状

a) NEXCO の盤ぶくれ対策工

NEXCO のトンネルの盤ぶくれ対策は、追加インバートを設置することを基本としている。これは、過去にロックボルト工やマイクロパイル工を用いた路盤下補強工にて対策を実施した事例があるが、変位の抑制効果は確認できたが、変位の収束にはいたらず結果的に追加インバートを設置したことによるものである（図-1）。

b) 調査

盤ぶくれ対策設計のための調査においては、路面変位測定およびその経時変化（進行速度）、スメクタイト等の膨潤性粘土鉱物の含有量、円形水路の閉塞状況などを実施する（表-2）。

c) 追加インバート工の断面形状

追加インバートの断面形状は、盤ぶくれが顕在化した場合、「NEXCO トンネル標準設計図集」¹⁾（表-3）から同等か概ね 1 ランクアップの断面形状とし、耐荷力が不足する場合は、インバート半径、強度、厚さ、インバー

表-1 リニューアル工事の概要

対策工	対策理由
覆工補強	ひび割れ等により低下した耐力の回復 建設時に想定していなかった外力が供用後に作用したことに対する耐力の回復
盤ぶくれ対策	路面隆起により、通行車両に支障をきたしているため 路面隆起の恐れのあるため

表-2 盤ぶくれ対策設計のための調査項目

調査項目	内容
既存資料調査	トンネル概要 トンネル建設時の状況 等
路面変位測定	路面の高さ、盤ぶくれ量 等
目視調査	覆工および路面のひび割れ、変形 等
側溝の開口幅調査	盤ぶくれの状態 等
中央排水工の流量調査	中央排水工の流量
内空変位測定	建築限界に対する施工余裕 覆工の変位量 等
地中変位測定	地中の変状範囲
孔内水平載荷試験	地山の変形係数
地山試料試験	膨潤性鉱物の有無、膨張率・某調圧、浸水崩壊度、地山の粘着力、地山の内部摩擦角 等

表-3 支保パターンとインバート厚さ

支保パターン	インバート厚さ (cm)
CII-b	40
DI-a, DI-b	45
DII-a	50

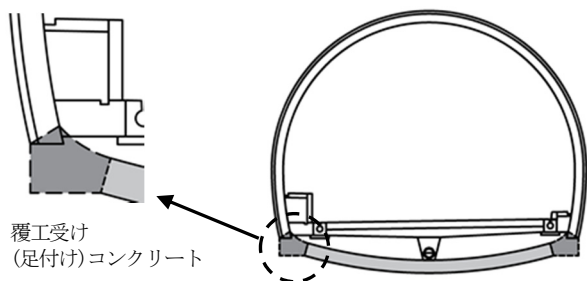


図-2 覆工受け（足付け）コンクリート施工の例

トストラット、繊維補強コンクリートの採用等による増強を検討することとする。

既設覆工の沈下や破損が懸念されるため、覆工コンクリート打継目に覆工受け（足付け）コンクリートを先行施工するように計画する。

追加インバートの施工により覆工と接合することによりトンネル断面閉合したリング構造となり、トンネル構造の安定性を向上させられることから、覆工コンクリートとインバートの接続形状は、既設覆工コンクリートの根足部をウォールソー等でインバート形状に対し法線方向にハツリ軸力が伝達しやすい形状とする（図-2）。

地山からの側圧により、既設覆工の押出しが懸念される場合には、事前にロックボルトを側壁に施工することが有効な場合もあるため変状の状況に応じて計画する必要がある（図-3）。

(2) 数値解析による検討フロー

数値解析は、有限要素法（FEM）や有限差分法（FDM）により、非線形弾性解析あるいは弾塑性解析が実施されるのが一般的であり、粘性挙動を考慮する場合もある。

数値解析の流れとしては、まず盤ぶくれ等の変状状況を再現し、次に、トンネル周辺の地山物性を低減させて、今後の進行や将来予測、対策工をモデル化してその補強効果を評価する。

盤ぶくれが顕在化した場合のインバート補強工の数値解析による設計の検討フローを図-4に示す。

(3) 地山のモデル化

地山の力学的モデルは、最低限、弾塑性体などの降伏後の地山挙動を再現できるモデルを用いる。また、時間

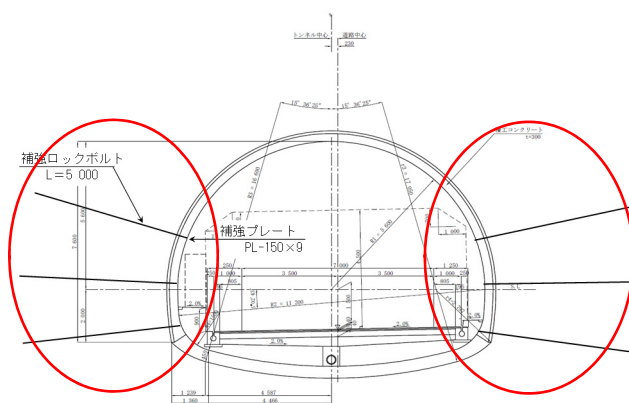


図-3 側壁ロックボルト施工の例

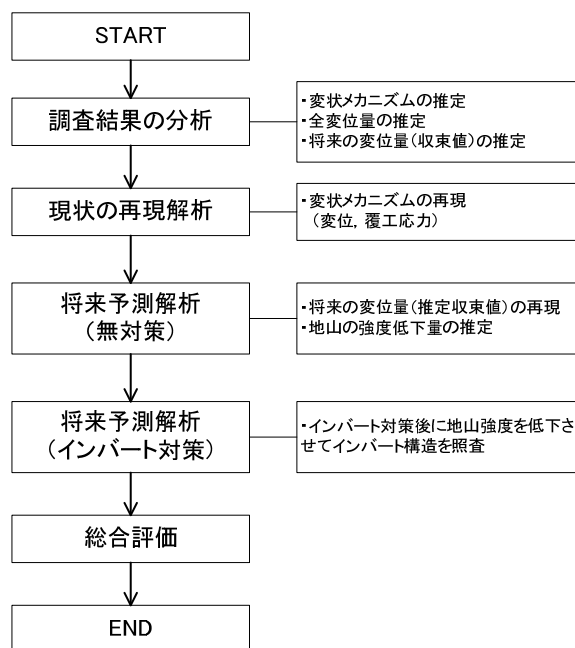


図-4 盤ぶくれが顕在化した場合の検討フロー

依存性が再現できる場合は、地山強度が時間と共に低下するという考え方や、粘弾性体、粘弾塑性体でモデル化する方法もある。

入力物性値には、単位体積重量、変形係数、ポアソン比、強度定数（粘着力、内部摩擦角）等が含まれる。

図-5に地山強度低下の概念図を示す。概念図は、当初の強度より粘着力、内部摩擦角が低下した場合を示す。建設時、現状再現時、将来予測時で、それぞれの段階での計測工や予測値・推定値を再現できるように、変形係数、ポアソン比、粘着力、内部摩擦角の地山物性値をパラメータとして設定する。推定するための初期段階での入力値は地質調査等で得られた地山の物性値に準拠して仮に設定する。

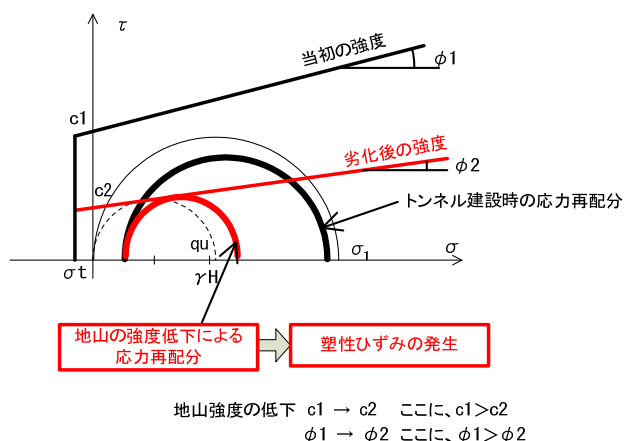


図-5 地山強度低下の概念図

(4) 各部材のモデル化

a) トンネル構造のモデル化

吹付けコンクリートおよび覆工コンクリートは、平面要素として設定する。入力物性値には、形状（巻厚、断面積、断面二次モーメント、単位体積重量）強度（弾性係数、圧縮強度、引張強度）が含まれ、実測値がある場合はそれを用いるが、実測値がない場合は、トンネル設計時の断面形状、部材厚および部材の設計値（コンクリート強度、弾性係数）等に準拠して設定する。

施工継ぎ目等の不連続断面は、結合要素（ジョイント要素、ばね要素等、インターフェース要素）によってモデル化する場合がある。

b) 対策工のモデル化

地山とトンネル構造の間の結合については、覆工が内空側へ変位する場合（引張には追従しない）、連結要素（ジョイント要素、ばね要素等）でモデル化する。

現在は、既設覆工とインバートの結合方法のモデル化は知見が少なく定まったものがない。ただし、一般的には軸力が卓越する場合は、既設覆工とインバートとの接合面でズレや開きが発生しないことから剛結としてよいと考えられる。

近年、覆工コンクリートとインバートの打継ぎ部の拘束度に関する研究²⁾も実施されているので、研究の進展により拘束状態を反映した条件設定も可能となる。

(5) 数値解析

a) 解析領域

インバート補強工の構造諸元の設定は二次元解析、施工手順の設定は三次元解析で実施することが多い。

インバート補強工の構造諸元の設定のための解析の流れを図-6に示す。

二次元解析の解析領域の設定にあたっては、土被りが比較的大きい場合は、解析境界の影響を排除するため4D~5D（Dはトンネル径）程度の領域を確保する。土被りが小さい場合は、地表面をモデル化し、下方領域は

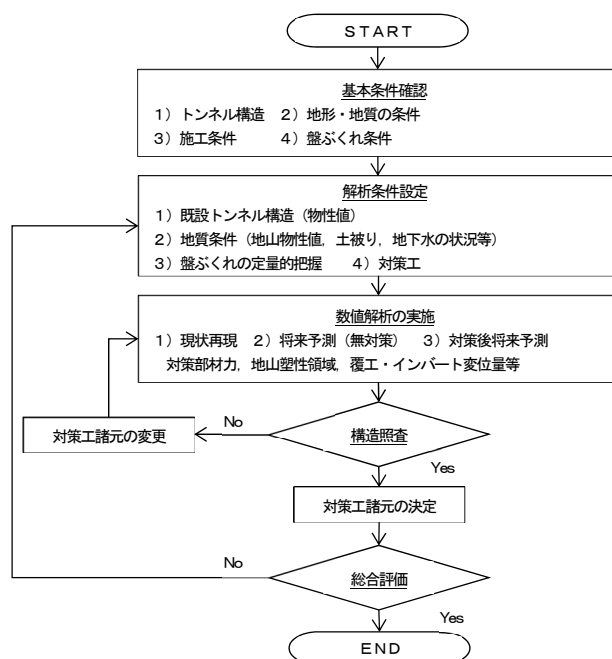


図-6 数値解析の手順

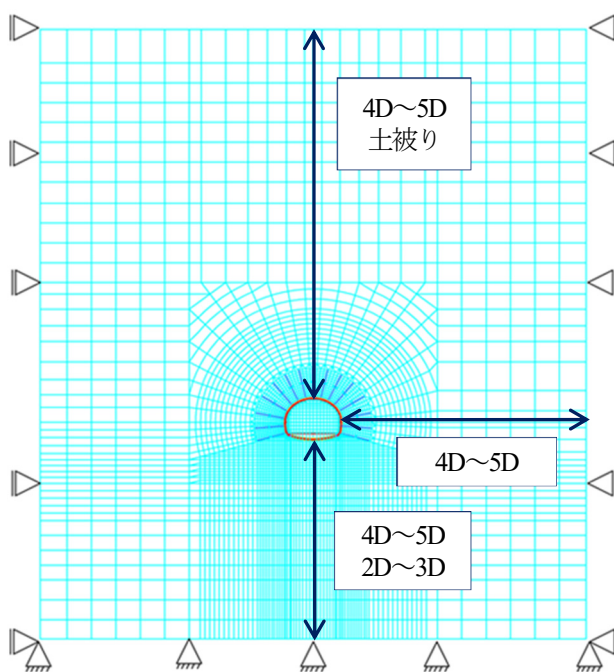


図-7 解析領域設定とメッシュ分割（一例）

2D~3Dを確保する。下方からのリバウンドがある場合は下方領域を1D~2Dとすることもある。左右の領域は土被りが大きい場合と同様に、4D~5Dとする（図-7）。

b) 現状の再現解析

現状再現のための数値解析は、施工時の変位および供用後の盤ぶくれによる変状（盤ぶくれ量、覆工応力等）を再現する。解析ステップは、①自重解析→②トンネル掘削解析→③覆工設置→④地山の強度低下解析（現況の再現）という流れで実施する。

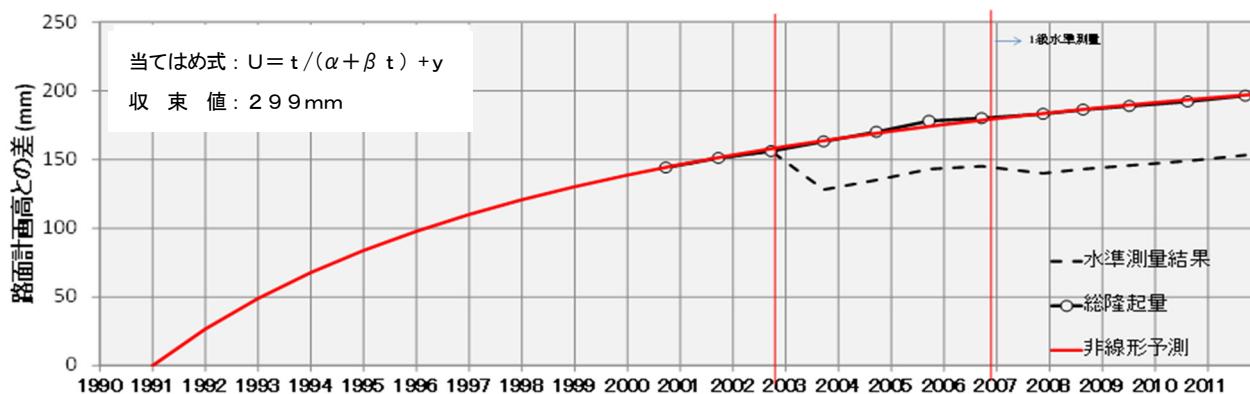


図-8 路面変位測定結果からの隆起予測の例

盤ぶくれの発生は、トンネル周辺地山の強度低下によるものと仮定し、強度が低下する範囲は現場での変状状況を確認し、トンネル周辺全体、SL より下方、脚部より下方等適切に設定する必要がある。

計測結果は、路面変位量（盤ぶくれ量）、鉛直方向に設置した地中変位計による地中変位および覆工コンクリートに発生している応力などがある。

c) 将来予測解析

将来予測解析では、過去の路面変位量（盤ぶくれ量）等から、対策工が無い状態における将来の変状状態を予測する。

地山物性値は、現状再現時の地山物性値（例えば、粘着力、内部摩擦角、弾性係数、ポアソン比など）を低下させて路面変位の収束値を模擬できる物性値をパラメトリックスタディで求める。

路面隆起の将来予測方法での例を図-8に示す。この事例では、計測された路面変位測定の経時変化のデータからカーブフィッティング（曲線あてはめ）で変状の予測を実施している。

(6) 対策工の評価

a) トンネル構造照査

インバート補強工の構造照査を行う場合には、インバートコンクリートに発生する応力照査（軸力、曲げ、せん断）を行う。また、インバート施工により断面が併合されたことで既設覆工に応力が伝達することから、既設覆工の変形、応力の照査（建築限界等必要な内空断面の確保、増加応力の許容値との比較）も行う必要がある。

応力の照査等で満足しない場合、盤ぶくれ規模がインバートを破壊するような場合および変形速度が大きい場合は、変位拘束のためにインバート構造の剛性を大きくすることも有効であるため、コンクリート強度の増強の検討が必要となる。また、インバートストラットを採用した剛性の高いインバートとすることも有効であると考えられる。

b) 施工の影響照査

全幅一括施工（全面通行止）の場合は、底盤掘削時の既設覆工の変位や引張応力増分の評価が必要となる。

半割施工（片側車線規制）の場合は、全幅一括施工時と同様に既設覆工の評価とともに、通行車線の挙動等の半割施工に着目した評価が必要である。

(7) 盤ぶくれ対策設計の留意点

変状対策設計を実施する際の留意点について、以下に取りまとめる。

- ① 調査結果の分析においては、事前調査、設計、施工時、変状調査時のデータを一覧にまとめることで、変状のメカニズムの推定が容易となる。
- ② 建設時の再現解析では、事前の地質調査結果、設計時の地山評価、施工時の切羽観察結果や計測工の結果を分析し、建設時の再現を行うが、施工時データが収集できないこともある。その場合は地山等級に応じた一般値（例えば「NEXCO のトンネル数値解析マニュアル」³⁾）から再現を行う方法もある。
- ③ 変状の現状再現を行う場合は、変形量だけに着目するのではなく、覆工の状況、例えば、変状調査時の内空変位や覆工応力の状況も合わせて取り入れる。

地山劣化モデルで再現を行う場合は、変状状況を再現するため、地山劣化の範囲を、例えば、トンネル周辺全体、SL より下方、脚部より下方のようなケースを実施し、変状の傾向を把握して、地山劣化範囲を設定する。

- ⑤ 盤ぶくれ対策を実施する際は、インバート補強工により断面が閉合されることにより、覆工に作用する地圧が増加することも予想される。

そのため、地圧が大きい場合には、覆工の健全度を加味した覆工の側壁・アーチ部への補強対策工も併せて検討が必要となる。

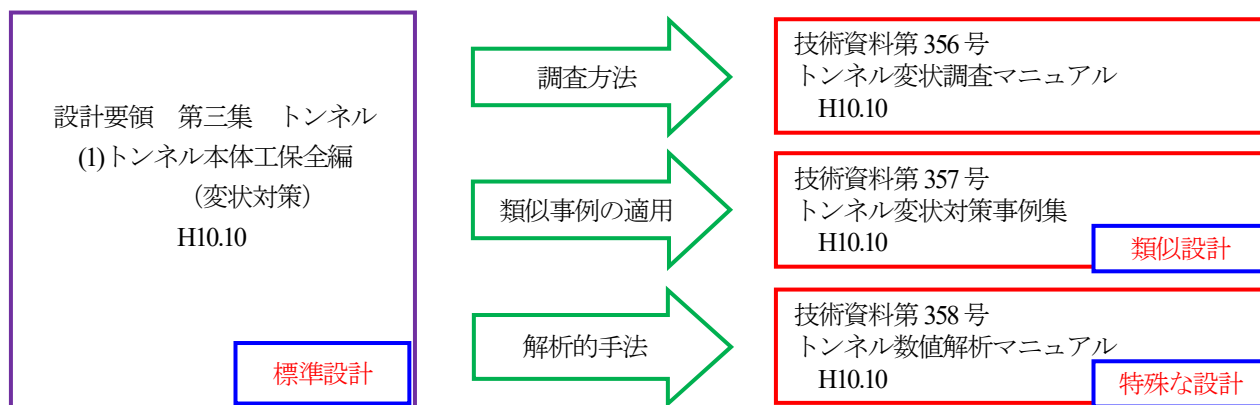


図9 平成10年のトンネル技術基準類の体系^{4）7）}

5. トンネル数値解析マニュアルの更新

NEXCOにおいて、リニューアル工事の対象工事である、盤ぶくれ対策や覆工補強を実施した事例は少なく、経験したNEXCO技術者も少ないこと、設計要領等の基準類も十分には記載されておらず、NEXCOでトンネルのリニューアル工事を実施していくためには、技術基準類の整備および更新は必要不可欠である

NEXCOにおいては、平成10年10月に設計要領（保全編）^{4）}の制定に合わせて設計要領を補完するために、技術基準類^{5）7）}が制定されており、NEXCOではこれらを含めて各種マニュアル等をリニューアル工事に再整備をする必要があった。

技術基準類は、図-9のとおりとなっており、特殊設計を行う際に必要な数値解析についてとりまとめたものがトンネル数値解析マニュアルである。

マニュアルは、平成10年10月に発行されており、その後、平成14年3月に補足編として、トンネル数値解析マニュアル（都市部トンネル解析留意事項編）が発行されている。従来のマニュアルについては、建設工事（支保工の設計、近接施工）を意識したものとなっており、変状対策については、覆工補強を骨組み構造解析にて、設計する方法が記載されているのみであった。また、近年電子機器の高性能化により、三次元解析が身近となっているが、マニュアルには三次元解析の記述や有限差分法（FDM）の記述がなかった。

従来のマニュアルでは、盤ぶくれ対策工および覆工補強の設計の記述が不足しており、事例も少ないこと、三次元解析や有限差分法をはじめとした最新の知見が反映されていないことなどから、改定が必要と判断した。

(1) マニュアルの改定内容

a) マニュアルの改定の手順

マニュアルの改定については、従来のマニュアルの改善点とマニュアルを制定した平成10年10月より現在に至るまでの知見を抽出することから始めた。

従来のマニュアルの改定すべき内容については、以下の点が考えられた。

- ・三次元解析のマニュアルへの取込み
- ・都市部トンネル解析留意事項の取込み
- ・変状対策設計において、有限要素法（FEM）や有限差分法の適用
- ・支保構造設計や近接施工対策において、有限差分法の適用

改定作業は、「支保構造設計」「変状対策設計」「近接施工対策」について過去の数値解析事例を収集し、事例から得られた知見のマニュアルへの反映を行った。

また、変状対策設計についての収集できた事例が少なかったため、リニューアル工事で実施される、繊維シートによる覆工補強および追加インバートによる盤ぶくれ対策について試算を実施し、試算から得られた知見もマニュアルに反映した。

変状対策設計の試算は、繊維シートによる覆工補強については、NEXCOの設計要領で変状対策設計に記載のある骨組構造解析（ひびわれ進展解析）で実施した。

また、追加インバートによる盤ぶくれ対策については、主に断面の決定に採用される二次元有限要素法と有限差分法、施工時の影響検討で採用される三次元差分法にて実施した。

非線形性の強い地山を弾塑性体としてモデル化した場合に、有限要素法では「収束しない」状態となるような条件でも、有限差分法では降伏した後の地山挙動（塑性流動）を大変形に至るまで安定してシュミレートすることが出来ることなどから、トンネルの解析においては、二次元解析よりも複雑な三次元解析を実施する場合、有限差分法を用いる場合が多い。

b) マニュアルの検討結果

試算の結果、覆工補強で使用した骨組構造解析（ひびわれ進展解析）については、条件により、解析が不安定（定性的に考えると正しくない結果）になることが分かった。

先に述べた追加インバートによる盤ぶくれ対策の試算

算では、図-5のようなフローにて、図-6のような地山の強度低下を内部摩擦角 ϕ や粘着力 c などを低下させることで、現状再現解析や将来予測解析が可能であり、盤ぶくれ対策設計の解析手法を記載できた。

検討および試計算の結果、改善点で挙げられた点についても、マニュアルに反映することができた。

また、マニュアルの参考資料を大幅に充実することができ、特に、収集した数値解析事例 24 事例をマニュアルの参考資料として掲載した。

(2) トンネル数値解析マニュアル（二次元留意事項編）について

先に述べたマニュアルを本編と位置づけ、現地実務経験者からの要望が多い以下の3点を取りまとめたものをトンネル数値解析マニュアル（二次元解析留意事項編）⁹として作成した。

- ・本来三次元の問題であるトンネルのモデル化を二次元にて解析を行うための応力解放率について、近年採用事例が増えている全断面早期閉合や補助ベンチ付全断面掘削工法について特に定めたものがないことから試計算を実施し留意点等を記載。
- ・また、AGF 等の先受け鋼管による補助工法の解析手法について従来4つの解析手法が提案されていたものの比較検討を実施し留意点等を記載。
- ・不良地山での近接施工に対する数値解析の留意点等

6. おわりに

令和元年度で NEXCO のトンネルのリニューアル工事に必要な「トンネル変状事例集」，「盤ぶくれに伴うトンネル補強対策工法に関する手引き」，「トンネル覆工補強対策に関する手引き」および「トンネル数値解析マ

ニュアル」の各種マニュアルの整備が、すべて完了の予定である。

個々のマニュアルに現在までの最新の知見を集約することが出来たことで、NEXCO のトンネルリニューアル工事も進捗が加速することが出来ると思われる。

今後は、改定したマニュアルを基にリニューアル工事の調査、設計および施工について技術支援を実施し、新たな知見があれば適宜各種マニュアルに反映していきたいと考えている。

謝辞：今回のマニュアルの修正、改定に当たっては、トンネル数値解析に関する特別委員会（委員長：首都大学東京 西村教授）の中で議論し、委員の方々から多くのご指導、ご助言をいただき、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 東・中・西日本高速道路株式会社：トンネル標準設計図集，2016
- 2) 村田雄輝，西脇敬一：覆工コンクリート側壁部のインバートによる拘束度に関する確認実験，土木学会第73回年次学術講演会概要集，IV-105，2018
- 3) 東・中・西日本高速道路株式会社：トンネル数値解析マニュアル，2018
- 4) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル（1）トンネル保全編（変状対策），1998
- 5) 日本道路公団：技術資料356号 トンネル変状調査マニュアル，1998
- 6) 日本道路公団：技術資料357号 トンネル変状対策事例集，1998
- 7) 日本道路公団：技術資料358号 トンネル数値解析マニュアル，1998
- 8) 東・中・西日本高速道路株式会社：トンネル数値解析マニュアル（二次元解析留意事項編），2019

(2019. 8. 9 受付)

METHODOLOGY OF NUMERICAL ANALYSIS OF COUNTERMEASURE AGAINST HEAVING FOR DEFORMED TUNNEL IN SERVICE

Kazuhiko MAEGAWA, Tetsuo ITO, Shinobu KAISE,
Shogo KUNIMURA, Yuzo OKUI and Yujing JIANG

The NEXCO 3 company is currently conducting renewal work with the aim of extending the life of the structure, and tunnel structures are subject to lining reinforcement and countermeasures against heaving.

However, since there was no established design method or few examples, to serve as reference in promoting renewal work of lining reinforcement and heaving countermeasure, it was necessary to organize them. This paper describes the results of a study on the design and application conditions for numerical analysis used in the design of countermeasures against heaving countermeasures by additional invert, which is a renewal of the tunnel and revised contents of the tunnel numerical analysis manual that summarizes analysis method.