

# 盤膨れ対策の手引き書の検討

北村 元<sup>1</sup>・岩尾 哲也<sup>2</sup>・増田 弘明<sup>3</sup>・奥井 裕三<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 ㈱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:h.kitamura.aa@ri-nexco.co.jp

<sup>2</sup>正会員 西日本高速道路株式会社 関西支社 (〒567-0871大阪府茨城市岩倉町1-13)  
E-mail:i.iwao.aa@w-nexco.co.jp

<sup>3</sup>正会員 ㈱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:h.masuda.aa@ri-nexco.co.jp

<sup>4</sup>正会員 応用地質株式会社 九州支社ジオテクニカルセンター (〒811-1302福岡市南区井尻2-21-36)  
E-mail:okui-yuzo@oyonet.oyo.co.jp

NEXCO3会社は，高速道路資産の長寿命化を見据え，主に橋梁やトンネル等の構造物の大規模な更新や修繕を行う特定更新等事業を推し進めることとしている．高速道路トンネルにおいては，盤膨れ現象に対するインバート補強工や外力に対する覆工補強工を積極的に行うこととしている．

インバート補強工は供用中の高速道路においては難工事となりかつ事例も少ないことから，各現場が円滑にインバート補強工を進めるうえでは，設計や施工に際して参考となる情報が必要となる．

そこでNEXCO総研ではこれらの情報を，数少ない事例から手引き書として取り纏めることとした．本報告は，これらの情報を取り纏めるうえでの検討内容を紹介するものである．

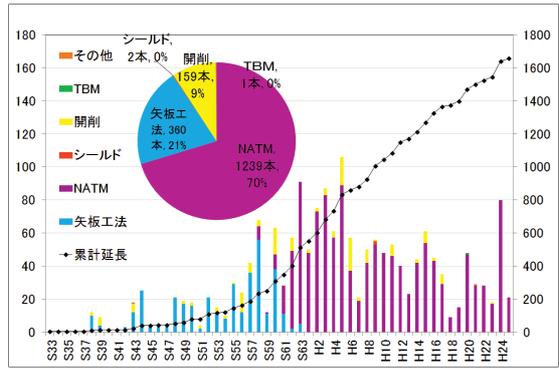
**Key Words :** heaving, manual, invert, potential risk, analysis design, ancillary construction

## 1. はじめに

NEXCO3 会社（以後 NEXCO という）は「大規模更新・大規模修繕」（以下「特定更新等工事」という）計画を策定し，平成 27 年 3 月に国土交通大臣の認可を受けた．

特定更新等工事は，トンネルや橋梁等の高速道路を構成する主な構造物を，老朽化等による支障が発生することのないよう，計画的に更新もしくは修繕して，高速道路機能を強化する事業である．

トンネルでは，のような盤膨れへの対策としてのインバートの追加設置（以後「インバート補強」という）や，外力による変状に対する覆工補強が特定更新等工事の内容となっている．

このうち盤膨れは，高速道路トンネル延長が約 1600kmに達している（）うちの約 9kmで顕在化しており，さらには盤膨れの懸念があるとされる区間も含めて，概ね約 15km の延長においてインバート補強の検討が行われる予定である．

しかし，供用後のトンネルにおけるインバート補強



図-1 盤膨れ発生状況

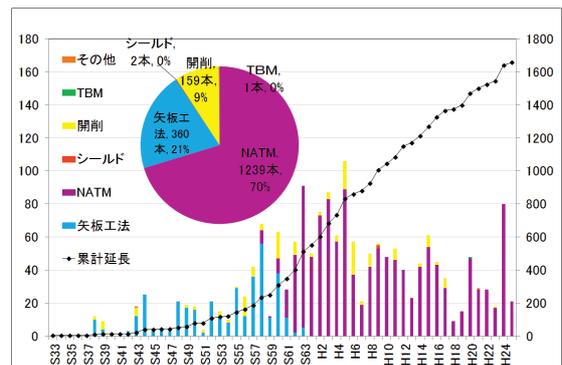


図-2 NEXCOのトンネル開通延長 (H26.4 現在)

工事は難工事であり、事例が少ないことから経験や知識を有する技術者が少ない。

このような状況下で NEXCO がインバート補強工事を円滑に進めるためには、今後インバート補強工事を検討する者に、これまでの経験や教訓、さらにはこれを踏まえた提言等を適切に伝える必要があると考え、NEXCO 内部向けの手引き書（以下「手引き」という）を策定することとした。

本報告は、手引きを策定するにあたっての検討内容を紹介するものである。

## 2. 手引きの内容および位置付け

手引きは、インバート補強工の実績を有する事務所の協力を得て、トンネル本体の変状対策に関する技術的な内容から、トンネル特有の支障物の移設等の付帯工事まで、盤膨れ対策に特化して調査から工事まで幅広く紹介することとした。位置付けは、NEXCO が保有する設計要領を補足するものとし、事例を基に設計や施工方法をより具体的に提案するものである。

## 3. 手引きにおける基本事項

手引きを策定するにあたり、以下の2点を基本事項として定めることとした。

### (1) インバート補強工原則

盤膨れ対策工には大きく、路盤下補強工（図-3）とインバートを増設するインバート補強工が存在する。

NEXCO の設計要領<sup>1)</sup>では、インバート補強工は通行止めを伴うことから実施が非常に困難であるとして、路盤下補強工を優先させる内容となっていたが、図-4に示すように、より確実に盤膨れを抑制できる“インバート補強工”を恒久対策として用いることとした。

### (2) 「潜在リスク段階」という概念の設定

盤膨れが顕在化した箇所の地質は、泥岩や凝灰岩など長期的に劣化が予想される地質が多い（図-5）。建設時に適用する NEXCO の現在の設計要領では、これらの地質は標準的にインバートを設置することになっているが、当時は「設置を検討する」という扱いとなっていた。そのため、このような地質であるがインバートを設置していなかった箇所では盤膨れが発生し、表-1 に示すようにインバートの設置基準が適宜見直されてきた。

つまり、盤膨れが懸念される地質ではあるが、過去の基準でインバートを設置していない箇所は、現状では変

状が生じていなくても、水の供給等により地山の劣化が進行して盤膨れが顕在化する可能性がある。

このような盤膨れ懸念箇所で盤膨れが顕在化していない状況を、盤膨れの「潜在リスク段階」と定義した。

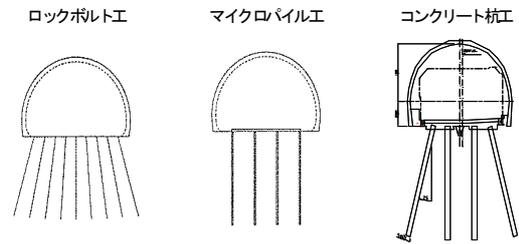


図-3 路盤下補強工の例

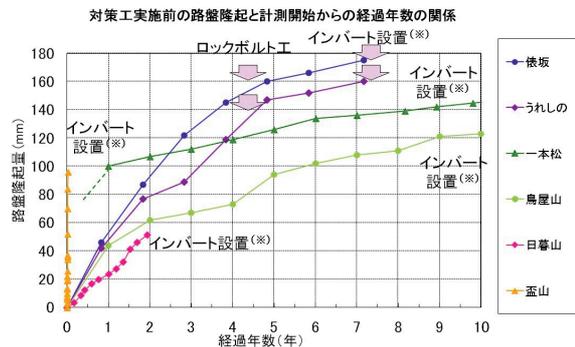


図-4 インバート設置の効果<sup>2)</sup>

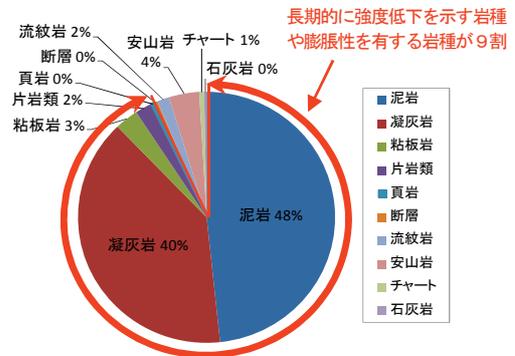


図-5 盤膨れ箇所の地質<sup>2)</sup>

表-1 インバートの設置基準の変遷

時期	適用地山	概要
S45	E	Dも設置の検討
S58	坑口, D, E	Dでも検討の上で省略できる
S60	坑口, D, E	Cで、泥岩、凝灰岩等の長期耐久性を損なう場合に設置
H9	坑口, C, D, E	Cで、第三紀泥岩、凝灰岩等は長期耐久性を損なうので設置
H21	坑口, C, D, E	泥岩の“第三紀”を抹消

## 4. 変状調査および計測

供用トンネルにおける変状調査や計測内容は、既存の要領でも概ね記載はあるが、盤膨れやその懸念に対しての具体的な記載はない。このため盤膨れに特化した調査項目や調査頻度について検討した。

### (1) 盤膨れの段階に応じた整理

盤膨れに対する調査項目や計測項目は色々考えられるが、現地の状況に応じた調査項目や計測内容およびそれらの頻度を整理することとした。この整理で必要なのは現地の状況をどのように区分するかである。

前述の「潜在リスク段階」には詳細な調査は不要であるが、盤膨れが顕在化して進行している状況では対策工の設計や、その前段の調査が必要であり、この状況を「対策検討段階」とした。

また、これらの間に位置する、盤膨れが多少は認知されたがそれほど進行がない状況は、設計というより、まずは状況を把握することが先決であり、このような状況を「進行性把握段階」とし、3段階での整理を行った。

### (2) 盤膨れの段階に応じた調査項目および頻度

#### a) 盤膨れの段階に応じた調査目的

各段階では調査目的が異なり、それに応じて調査項目や頻度も異なるため、各段階での調査目的を明確に定義した(表-2)。

潜在リスク段階は初期値の把握、進行性把握段階は進行性の把握、対策検討段階は設計に必要な物性値等の取得である。

#### b) 調査項目の設定

調査項目は、既存資料調査、類似事例調査、詳細調査に大別し、具体の調査項目は表-3のように整理した。

##### ①既存資料調査

点検データの他、適宜建設時の切羽観察記録等、地質に関するデータを収集する。

##### ②詳細調査

現地調査、現地計測、地山試料試験に大別した。

##### i) 現地調査

主に水準測量等により盤膨れ量や速度を把握し、対策検討段階では、ボーリング調査により実際の地質状況を把握することとした。

##### ii) 現地計測

内空変位計測は、盤膨れ発生後のトンネル自体の健全性を把握するための必須項目とした。

##### iii) 地山資料試験

対策工設計に必要な物性値を取得する岩石試験を列挙した。

### (3) 頻度の設定

調査頻度は、測量関係では客観的な変動を捉えるために、四季を通じて計測を行うこととし、対策工設計に必要なボーリングや岩石試験は対策工設計を意識した段階で行うことを提案した。

### (4) 調査結果の整理方法

変状原因の究明や総合的な判断のためには、切羽データ、測量データ、岩石試験データ等、各データを並べて相対的な比較ができる整理方法を例示した。

表-2 変状の段階と調査目的

変状の進行段階	変状状況	調査目的と必要作業
潜在リスク段階	盤膨れ無	初期状態の把握 →資料調査, 測量
進行性把握段階	盤膨れ初期 進行なし	変状程度の監視 →測量, 計測
対策検討段階	盤膨れ顕著 進行あり	対策工の設計 →土質, 岩石試験重視

表-3 調査項目の設定の例

調査項目	変状の進行段階			備考(設計要領の補足)
	潜在リスク	進行性把握	対策検討	
既存資料調査				
点検・調査結果資料調査	◎	◎	◎	トンネル点検, 調査結果
当該トンネル資料調査	◎	◎	◎	地質縦断面、切羽観察簿 施工時計測、 完成面(排水系統、支保パターン) インバート設置の有無(区間毎) 路面高さ
類似事例調査		○	◎	地質状況、変状状況、トンネル構造が類似している事例を収集する 進行性把握段階では変状の進行性が早いと考えられる場合に実施
目視調査	※1	◎	◎	覆工のひび割れ・変形、路面・側溝の変状、変状位置、形状、パターン、進行性
周辺地山・環境調査	※1	○	◎	進行性把握段階では変状の進行性が早いと考えられる場合に実施
中央排水工の流量調査		◎	◎	基本情報として把握に努める
水準測量	◎ 1測線 50m/点 全線	◎ 1測線 10m/点 変状区間	◎ 6測線 10m/点 変状区間	進行性把握段階、対策検討段階の変状区間以外は、全線50mピッチで実施 変状状況(路面のひび割れ等)に応じて適宜間隔を指定する
断面測量			◎	断面の変形、ノンプリズム測量、未変状断面と比較(健全度が悪い場合に実施)
ボーリング調査			◎	地山試料試験のためのコア採取、地質構成、ボーリング中の水量と発生位置
孔内水平載荷試験			△	岩盤の変形係数の変化の把握(健全度が著しく悪い場合に実施)
覆工応力測定			△	覆工応力(健全度が悪い場合に実施)
コンクリート軸圧縮試験			△	覆工コンクリート強度(健全度が悪い場合に実施)、シュミットハンマーで代用できる※2
試験によるインバート破壊状況確認			△	インバート設置箇所で盤膨れが発生している場合はできるだけ実施することが望ましい
内空変位		◎	◎	水平測線(SL付近)を基本とするが、変状形態により変位低下や傾斜測線等、適宜測線を追加する
覆工ひずみ			△	覆工応力の増分(健全度が悪い場合に実施)
亀裂変位			○	変状の進行性(健全度が悪い場合に実施)
地中変位			○	変状範囲(健全度が悪い場合に実施)は省略も検討する
ロックボルト軸力			△	側壁部の覆工補強が必要な場合に実施を検討する
一軸圧縮			◎	地山強度
三軸圧縮			◎	地山強度(健全度が悪い場合に実施)
超音波伝播速度			◎	地山状況
針貫入試験			◎	地山強度
密度			◎	単位体積重量の推定
浸水膨脹			◎	膨潤性の目安
塑性限界			△	強度が小さく、粘土質地山の場合に実施
X線回折分析			◎	膨潤性粘土鉱物の有無、含有量
陽イオン置換容量			○	膨潤性粘土鉱物の有無、含有量、性質 ※3分析で膨潤性の粘土鉱物が確認される場合に実施
吸水膨張率試験			◎	岩石の膨潤量(率)の把握
吸水膨張試験			◎	岩石の膨潤圧力の把握

◎: 実施する必要がある項目  
○: 実施が望ましい項目  
△: 必要に応じて実施する項目

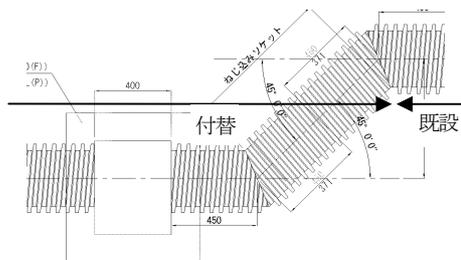


図-6 中央排水の切替え例



(a)切替状況 (b)既設中央排水管内

図-7 中央排水

### (5) 経験から得た知見

インバート補強工の設計に際しては、トンネル本体構造に注目するのは当然であるが、施工上、中央排水管の移設および復旧も併せて検討する必要がある。最近のインバート補強の事例は、社会情勢的に通行止めを極力回避した供用施工が主流であるが、トンネル中央部に位置する中央排水の仮移設切替（図-6）に際しては、図-7

(a)のように車道際での施工となり、中央排水の流量次第では通行止めの要否もしくは通行止め時間の判断が異なってくるため、事前の「中央排水の流量調査」を必要な調査項目として扱うこととした。

## 5. インバート補強工の計画

### (1) インバート補強工の基本原則

インバート補強工は、トンネルを通行止めにして、建設時と同様なコンクリートでのインバートの構築（図-8）が一般的な流れであったが、車線規制での施工が可能な工法の開発や施工方法の検討が進み（図-9～11）、今後はこちらのニーズが高いものと予想される。ただし、設置するインバートの品質やコストおよび施工の安全性を考慮すると、従来のトンネル通行止めによる施工が理想である。

したがって、インバート補強の計画時は、まずは通行止めによるコンクリートのインバートの構築を基本にし、交通規制の方法（トンネル通行止めが可能か）を検討して、それに応じて施工方法を検討する考え方を提案した。

### (2) 調査から設計への基本的な流れ

前述の交通規制の方法（通行止めか車線規制か）次第



図-8 通行止めによるコンクリートインバート



図-9 車線規制によるコンクリートインバート（左右分割）

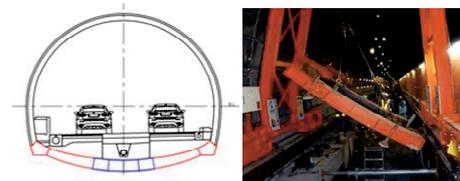


図-10 車線規制による鋼製函体のインバート

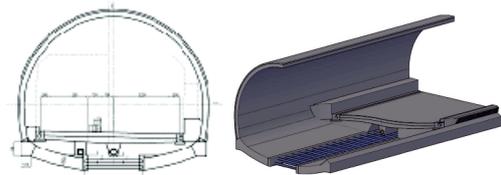


図-11 車線規制による鋼管複合のインバート

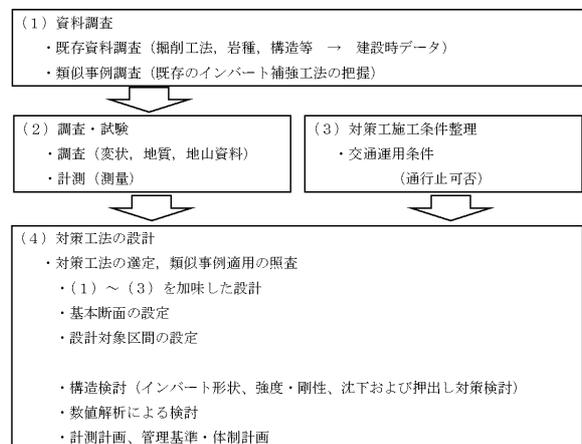


図-12 設計にむけた基本的な流れ

で選定できる工法が異なるため、目的物を決めて、それに合わせた交通規制計画を立案するのではなく、各種調査と同時に交通運用条件を整理のうえ、施工方法を含めた目的物を設計する流れを整理した（図-12）。

### (3) 施工方法の選定

(1)で紹介した複数の施工方法に対し、コンクリートによるインバートの構築を基本とした場合の、インバ

ート補強工法の選定フローを図-13のように整理した。

このフローの主な考え方は以下のとおりである。

①盤膨れ箇所の既設インバートの有無

これは、対象とする盤膨れ箇所に発生している地圧の大小を判断している。既設のインバートを破壊するような大きな膨張圧に対しては、既設のインバート構造以上のインバートを適用する必要がある。

②現況道路（トンネル）幅員

コンクリートによるインバートが理想との考えに基づくが、全幅が広い（概ね 9.0m 以上の）トンネルは、インバートを走行車線側と追越車線側に分割して車線規制にて施工する半割施工のコンクリートによるインバートが施工可能である。

③通行止め施工の可否

ここでいう通行止めは、インター間通行止めと、完成 4 車線区間において片方のトンネルを対面通行化させ、対象トンネルを通行止めすることの両方を含むが、通行止めが可能であれば、前述の全幅一括施工のコンクリートによるインバートが施工可能である。

④鋼管複合、函体推進

通行止めが困難で、車線規制により半割施工のコンクリートによるインバートを施工するために必要な通行帯幅を確保できないトンネルでは、特殊な施工方法を採用することとなる。図-13 の工法選定フローは、鋼管複合構造の適用が盤膨れ膨張圧 0.1MPa 以下であることと、函体推進工法は軟質な地山に対しては有利であるとの観点で整理している。

6. インバート補強工の設計全般

インバート補強工の設計は、図-13 にもとづき工法を選定したうえで、その工法における基本断面を設定し、必要に応じて数値解析による照査を行い、構造を検討する流れを提示した(図-14)。

(1) 数値解析の要否と標準図集の適用

a) 盤膨れが顕在化している場合

盤膨れが顕在化している場合は、基本的に数値解析により照査を行う。

b) 盤膨れが顕在化していない場合

対象区間の支保パターンに対して、トンネル標準図集にある標準断面を基本に考えることとした。ただし、覆工の健全度が低い場合等は、覆工補強も併せて検討し、必要に応じて数値解析等により照査する必要があるとした。

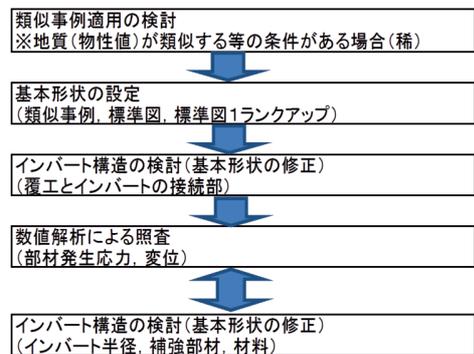


図-14 設計の流れ

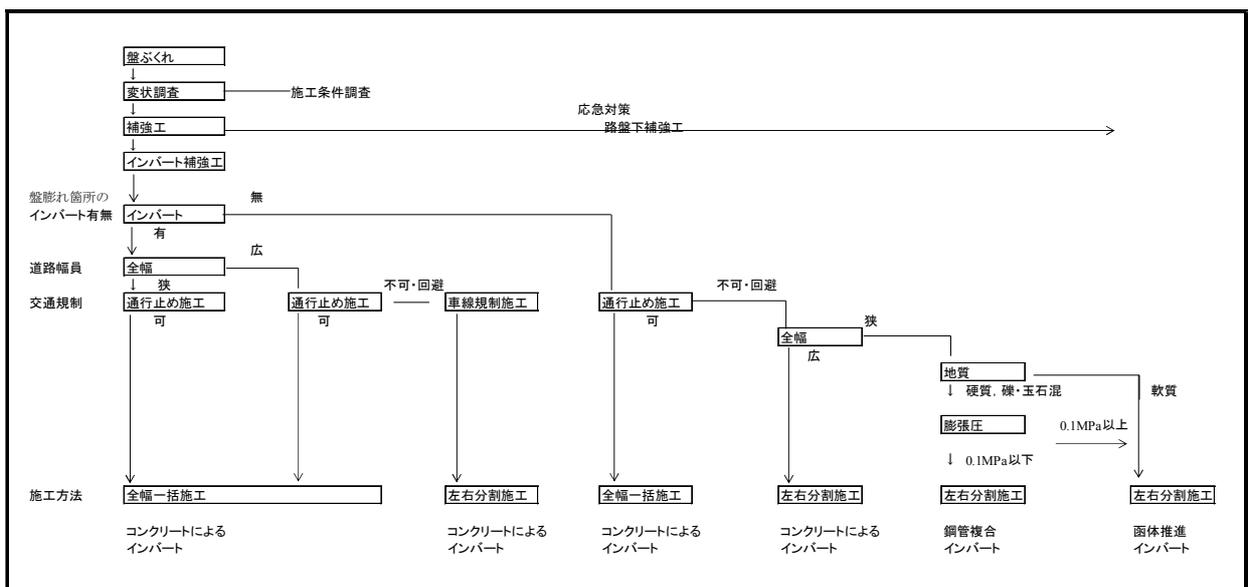


図-13 工法選定フロー

## (2) 基本断面の設定

盤膨れが顕在化していない場合は、(1) b)のとおりであるが、顕在化している場合は、類似事例として同様な地質での対応事例を参考にすることが合理的である。類似事例がない場合は、対象区間の支保パターンから1ランク重いパターンの標準図の構造から検討する必要があると考えた。これは地山の劣化が進行しているため、現時点で採用すべき支保も1ランク程度アップしていると考えたためである。

## (3) インバート構造の検討

インバートの形状、強度や剛性、施工方法やそれを加味した構造の検討のことであり、これには2通りが考えられる。

### a) 基本断面に対して

施工方法を検討して、必要に応じて基本断面を修正することを想定している。具体的には、覆工とインバートの接続部について、覆工直下の掘削時の抜き掘り方法や、沈下対策の覆工受け（足付け）コンクリートの設置等に応じて構造を検討することを想定している。

### b) 数値解析結果に対して

数値解析を行う場合において、一度定めた基本断面を7.で示す数値解析により照査し、補強が必要な場合には、インバート半径等の構造を見直して基本形状を修正する必要がある。

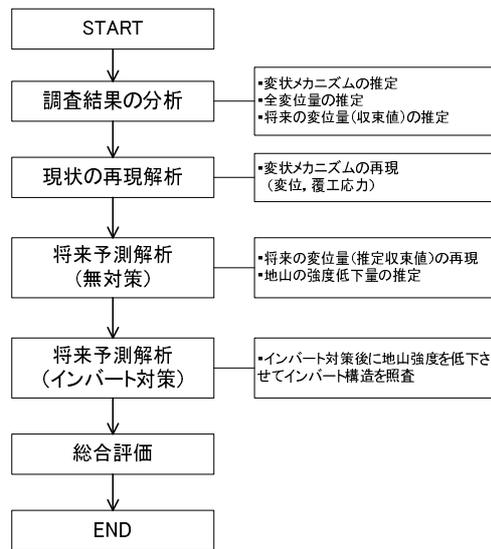


図-15 解析検討の基本的な流れ

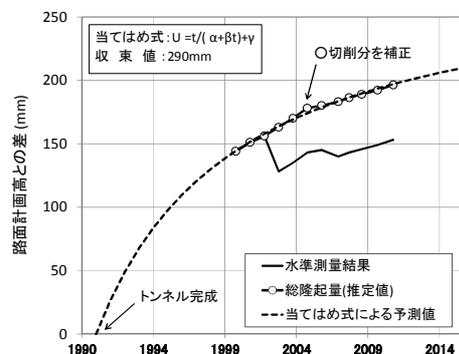


図-16 水準測量結果の整理と当てはめ式による変形の将来予測結果

## 7. 数値解析による設計

6. (2) または (3) で定めた断面に対し、それを数値解析にて照査する場合の方法を示した。

### (1) 解析的検討の基本的な流れ

解析検討の基本的な流れを図-15に示す。

### (2) 盤膨れの将来予測方法

対策工の応力照査を実施するために、仮に変状を放置した際の変形（盤膨れ）の将来の値を予測する方法は以下のように示した。ただし、現状の傾向で変形が進行することを前提としたものである。

- ①変形の将来予測方法は、トンネルの切羽の進行に伴う内空変位の最終値予測に用いられる指数関数法や軟弱地盤における最終沈下量の予測に用いられる双曲線法等がある（ここでは単に「当てはめ式」という）。
- ②どの当てはめ式を採用するかはとくに制約はないが、いくつかの当てはめ式を試してみて、調査等から得られている変形の時間的変化を良く表しているものを採用することとする。

③計測期間が短い場合等の理由で変形の収束性が確認できていない場合には、舗装完成時の変位をゼロとして、路面標高の複数回の計測結果を時間軸で整理することで、収束傾向にあるかどうかを見る方法や、文献<sup>3)</sup>に示されているように吸水させた岩石供試体の三軸圧縮試験から、強度低下した岩石強度を推定する方法等の採用が考えられる。

④手引きでは、図-16に示すような双曲線法による当てはめ結果と変形の将来予測結果を示した。

### (3) 現状の再現解析

対策工の妥当性の照査には、まず、現状で得られている計測結果（内空変位や路面隆起量、覆工に発生している応力等）を解析モデル上で再現する必要がある。

詳細調査による物性値等を基本として地山の強度低下範囲を変化させて（地山の強度低下を模擬して）、盤膨れ現象が再現できるか否かでトライアルを行い、物性値（土質定数）や緩み範囲を設定する。

また、トライアルでは、詳細調査で得られた覆工応力

測定結果や地中変位データを参照し、解析モデルの再現性を検証する。

#### (4) 将来予測解析<sup>3)</sup>

次に、変状を放置した場合の変形量を再現するための解析を行い、将来的な見かけの地山強度を求める。

見かけの地山強度は、(2)の方法による当てはめ式近似式等により将来の盤膨れ量を予測し、現状の再現解析で定めたモデルにおいて、地山物性値を低下させて将来盤膨れ量にて照合し、将来劣化の物性値（土質定数）を定める。

#### (5) インバート構造の適用と応力照査方法

対策工の検討は、現状からインバート部の掘削、インバートの設置を行い、(3)で求めた地山の強度を低下させた場合の解析を実施し、6(2)または(3)で定めた断面の覆工やインバートに発生する応力で構造的な安全性が確保できるかを照査する。照査の結果問題がある場合は、インバート半径の調整や補強を行うことで断面を設定し、再び数値解析にて照査する。

この方法での解析結果の例は図-17のようになる。なお、ここで採用した解析では、比較的簡易な構成則としてモール・クーロンの破壊基準を適用し、せん断強度を低下させることで地山強度低下を表現した。また解析には、比較的速度の速い有限差分法による一般的なソフトウェアFLAC3Dを用いた。

なお、ここで示した方法は、ある時点で対策工を検討する際の応力照査を目的とした便宜的なものである。

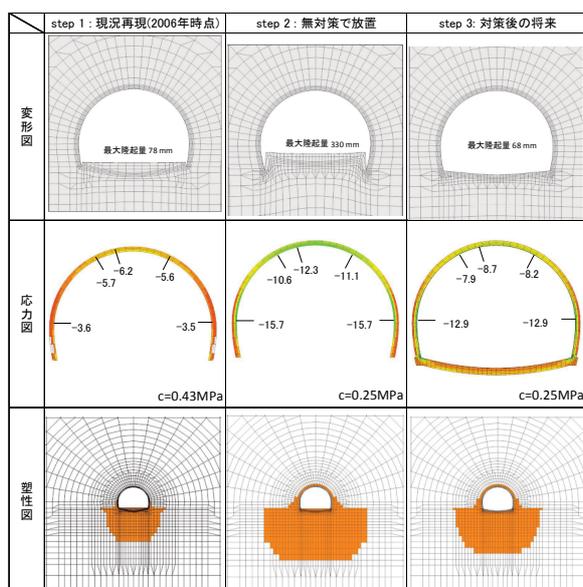


図-17 変状の再現と将来予測，対策工の応力照査結果

## 8. 付帯的な検討事項

インバート補強の手引きの主たる部分は、インバート補強工の調査から設計や施工に関する技術的な内容であるが、トンネルの大規模な工事は、主たる部分以外に付帯的に検討をしておくべきことが複数存在するため、これらについても検討のうえ参考資料として取りまめることにした。

### (1) 費用便益

各インバート補強工法のなかで直接的な工事費が安いのは、コンクリートによるインバートを通行止めで構築することだが、通行止めは社会的損失（影響）が大きく、また、工事対象トンネルのみ通行止めにして並行するトンネルを対面通行化する手法は交通安全対策等に費用を要することとなる。一方、車線規制による鋼管複合や函体推進等特殊な工法は、インバート補強工事費自体が高価である。このような状況で交通規制方法（インバート補強工法）を選定する際の検討手法の一つに費用便益による判断方法が考えられる。

手引きでは「H20の国交省の費用便益分析マニュアル」を基に簡単な計算手法を紹介することにした。

### (2) トンネル内諸設備の支障移転工事

#### a) トンネル内設備の整理

トンネル内には様々な設備があり、インバート補強工事で路盤下を掘削するのに支障となる施設が複数存在する。そこでトンネル内の標準的な諸設備を一覧にて整理するとともに、標準的にインバート工事にて支障となるか否かを整理した。

#### b) 支障物の移設工事の内容

インバート補強工事で支障となる施設は縦断的に敷設されているケーブル類であり、仮移設が必要となる。

“ケーブルの仮移設”は、ケーブルが接続している端末の諸設備はどれも重要なものばかりであることから、とくに非常用施設関係の機能停止時のバックアップ等の対応事例等も紹介することとした。

## 9. まとめ

手引きを策定するにあたっての検討内容および検討結果等を紹介したが、あくまでも数少ない事例を基にした考察もしくは提案である。今後は施工事例が増えることが予想されるため、それらを踏まえてさらに手引き書自体の更新を図っていく必要があると考える。

謝辞：本検討において、インバート補強工の事例を提供いただいたNEXCO関係者の皆様に、深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 設計要領第三集 トンネル本体内建設編・保全編,東日本高速道路株,中日本高速道路株,西日本高速道路株,2015
- 2) 山田隆昭, 中田雅博, 殿垣内正人, 大津敏郎, 高速道路トンネルの大規模修繕に関する検討, トンネルと地下

Vol.45, No.8, 2014.6

- 3) 奥井裕三, 太田裕之, 早川泰史, 伊佐治晋, 緩慢に進行する盤ぶくれ現象の調査とトンネルの安定性評価に関する一考察, 土木学会 トンネル工学報告集第 20 巻/pp.85-92, 2010.
- 4) NEXCO3 社：高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会報告書, 2014.1

(2015. 8. 7 受付)

## Examinations for compiling a manual on countermeasures for heaving in tunnels

Hajime Kitamura, Tetsuya Iwao, Hiroaki Masuda , Yuzo Okui

East Nippon Expressway Company Limited, Central Nippon Expressway Company Limited and West Nippon Expressway Company Limited, the three expressway operators of Japan, are to push forward a special renewal operation of expressways that will carry out major repairs and renovations of expressway assets, mainly bridges and tunnels, to promote their longevity. In expressway tunnels, invert reinforcement works to prevent heaving and lining reinforcements to protect against external forces will be actively carried out.

Invert reinforcement works are difficult to carry out on an expressway already in service. In addition, not many of these works have been carried out, and therefore, information on the design and construction is needed as reference for the construction to be carried out smoothly at each construction site.

In order to provide such information, Nippon Research Institute Company Limited has decided to compile a manual of the needed information, gathering data from the very few invert reinforcement projects that were carried out. This paper introduces the items studied to compile the manual.