

供用中のトンネルにおける鋼管を用いた複合構造によるインバート設置工法の検討

北村 元¹・岩尾 哲也¹・安井成豊²・西村和夫³

¹正会員 (株)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

²正会員 (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 (〒417-0801 静岡県富士市大淵3154)

³正会員 首都大学東京大学院 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

NEXCOが管理する高速道路トンネルにおいて、トンネル底盤部が隆起する盤ぶくれ現象が顕在化している。盤ぶくれ発生個所の大半は建設時にインバートが設置されておらず、最も効果的な対策工法はインバートを設置することと思われる。しかし、供用中の高速道路トンネルでインバートを設置した事例は、トンネルを一定の期間通行止めにしての施工が多いため、通行止めを要しないインバート設置工法を検討することとなった。通行止めの原因である、車線中央付近を開削をすることなく施工が可能な工法として、コンクリートと鋼管の複合構造によるインバート設置工法の新工法を考案し、その構造および施工方法について研究開発を進めている。

Key Words : heaving, invert, hybrid construction, steel pipe, close road

1. はじめに

NEXCO3社が管理する高速道路トンネルは約1 600kmに達するが、トンネル底盤部が隆起する盤ぶくれ現象が各所で発生している(図-1)。

盤ぶくれはお客様の安全快適な走行を阻害するだけでなく、放置することでトンネル自体の健全性をおびやかすおそれがあるため、速やかに対策を施すことが必要と考える。対策工はインバート設置による断面閉合が最も効果的であるが、これまでの高速道路における実績はトンネルを一定期間連続で通行止めにしての施工であった。

高速道路は物流の要であると同時に緊急輸送路や地域生活という点で重要な役割を果たしており、連続期間の通行止めは、社会的影響も大きく、できる限り避けるこ

とが望ましい。以上のような背景から、連続的な通行止めを行うことなく施工が可能な新たなインバートの設置工法(以後「新工法」とよぶ)の研究開発を行ってきた。

本稿は、この新工法の構造および施工に関する検討の概要を報告するものである。

2. 盤ぶくれ発生の背景

高速道路トンネルにおいて、盤ぶくれが顕在化している個所の地質を、地質縦断面図から分析したところ、泥岩や凝灰岩等長期的に劣化が予測される地質が約9割を占めている(図-2)。

NEXCO3社の現行の設計要領¹⁾によれば、これらの

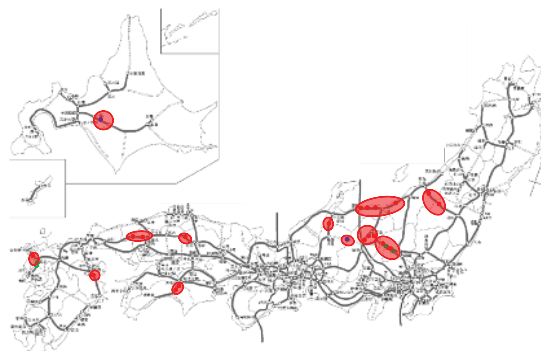


図-1 盤ぶくれ発生状況

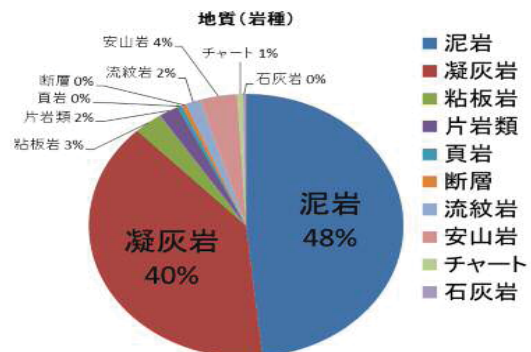


図-2 盤ぶくれ発生地質の整理

地質は、長期的に底盤部の健全性を損なうおそれがあるとして、原則インバートの設置を義務付けているが、これは平成9年以降に明確化されたものである。現在盤ぶくれが顕在化している個所は、これ以前に施工されたトンネルが多く、地山の長期耐久性に対する知見が一般的でなかったものと思われる。以下にNEXCOのインバート設置に対する設計要領の変遷を示す（表-1）。

3. 新工法の概要

(1) 新工法の概要

通常のコンクリートインバートの設置は、車線中央部の開削がネックとなり通行止めを要することから、掘削が可能な範囲はコンクリートインバートを設置し、問題となる車線中央付近は掘削を行わずに側方から鋼管を打設する、「鋼管とコンクリートの複合構造によるインバート設置工法」を新工法として考案した（図-3）。

(2) 施工条件の整理

高速道路のトンネルは、道路等級1種3級の場合概ね8.5mの全幅となっており、暫定2車線供用のトンネルでは概ね9.5mである。通常のコンクリートインバートを1車線規制の半割で施工することを考えた場合、通行帯は車線幅3.5mと両側路肩0.5mおよび0.75mの計4.75m程度確保できれば通行車両の安全性を確保できると考えるが、全幅8.5mのトンネルに対しては全幅の半分を超えており、車線中央付近の掘削が実質できないこととなり、施工が不可能である。また、通行帯を縮小するなどの考え方もあるが、一般的な2車線トンネルにおいては、安全性や走行性の確保が困難である。よって新工法は、全幅8.5mのトンネルに対して4.75mの通行帯を確保することを前提とし、作業エリアは3.0mとして各種検討を行った（図-3）。

4. 構造検討

(1) 膨張圧の検討

供用時はインバートが無く供用後に盤ぶくれが発生したトンネルにおいて、周辺地山の吸水等により発生する膨張圧は、図-4に示すように0.1MPa未満である場合がほとんどであった。

それ以上の膨張圧が発生したトンネルでは、インバートを破壊する大きな変状が発生するなど、特殊な状況であったため新工法の検討の対象外とし、0.1MPaを本検

表-1 インバート設置に関する設計要領の変遷²⁾

年度	適用 地山等級	摘要
S45	E	・地山等級Dも設置の検討
S58	坑口, D, E	・地山等級Dでも検討の上で省略することもできる
S60	坑口, D, E	・地山等級Cで、地質が泥岩、凝灰岩、蛇紋岩等の粘性土岩でかつトンネルの長期耐久性を損なう場合などにはインバートを設置 ・地山等級Dで省略する場合の判断注意、長期耐久性を評価
H9	坑口, C, D, E	・地山等級Cにおいても、地質が第三紀泥岩、凝灰岩、蛇紋岩等の粘性土岩や風化結晶片岩、温泉余土などでは、トンネルの長期耐久性を損なうおそれがあるので原則としてインバートを設置 ※長期耐久性の評価が工事中では困難として変更

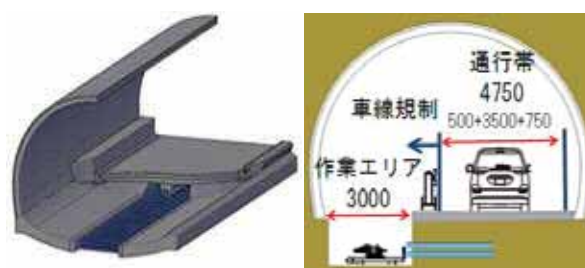


図-3 新工法イメージ

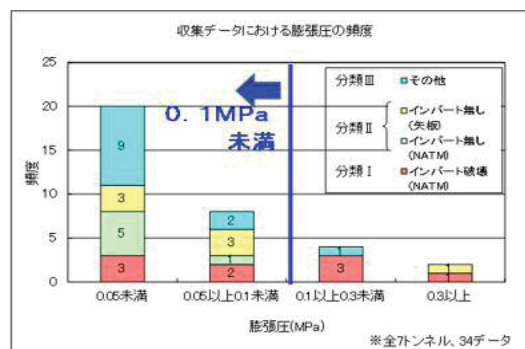


図-4 膨張圧の整理²⁾

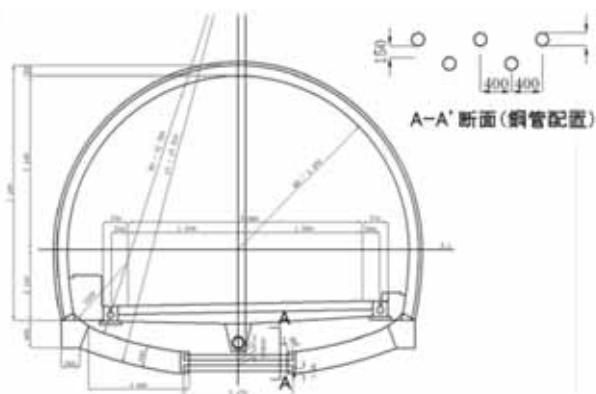


図-5 断面形状

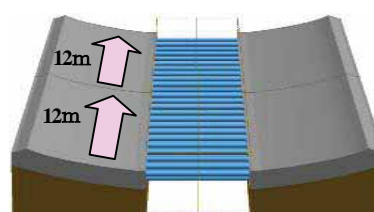
表-2 構造諸元

部材	項目	諸元	概要
コンクリート部分	曲線半径	2.5×R1	CII-b-iの形状
	強度	30N/mm ² 以上	通常強度以上, 早強材
鋼管部分	鋼管径	φ 165.2	通常機械で施工可能
	鋼管形状	直線鋼管	曲がり鋼管に比べて施工性がよい
	肉厚	11 mm	鋼管径に対する標準最大厚さ
	材質	STK400	一般的な鋼管の材質
	内部	中詰コンクリート	※検討中
	配置	上下千鳥 @350~400	図-5のとおり

討の基本的な膨張圧と整理し、地山周辺に作用させることで各種構造検討を行った。

(2) 二次元解析による構造検討

想定される膨張圧に対する断面および部材の検討は、主に二次元FEM解析にて行った。検討の結果、図-5の断面形状および表-2に示す構造諸元等の概要を定めた。



(本解析では1スパン 12mで検討)

図-6 繰返し施工イメージ

5. 掘削の影響検討

主にインバート掘削による既設構造物（覆工コンクリート）への影響を三次元FEM解析にて行った。

(1) 覆工足元のインバート掘削による影響

1スパンごとにインバートを構築する工程（インバート掘削→鋼管打設→コンクリート）を繰り返したとき（図-6）の既設覆工コンクリートに生じる影響を解析したところ、直下の掘削で覆工脚部に応力が集中し、覆工が内空方向に変形する個所が発生する結果となった（図-7）。

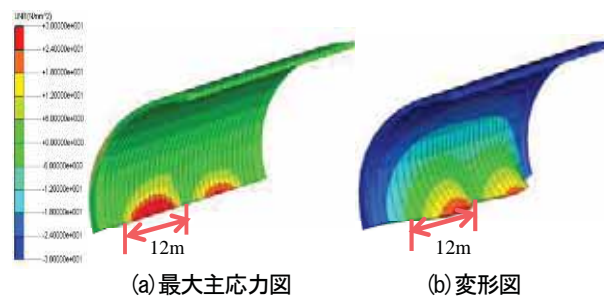
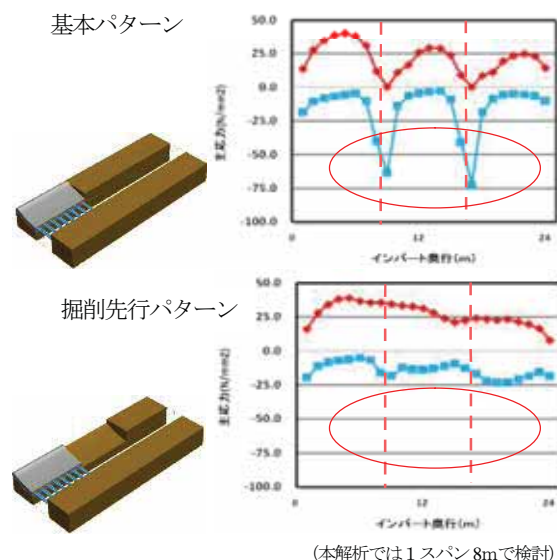


図-7 インバート掘削による覆工への影響

(2) 掘削パターンの違いによる影響

1施工区間ごとにインバートを構築するパターンを「基本パターン」とし、インバートを構築する隣接区間を先行して掘削する施工を「掘削先行パターン」とし、それぞれの掘削パターンにおける既設覆工への影響の違いを解析した。基本パターンのときに施工区間の境目に卓越した圧縮応力が発生したが、掘削先行パターンとした場合はそれが解消される結果となった（図-8）。



(本解析では1スパン 8mで検討)

6. 施工に関する検討

(1) 鋼管打設の実験

新工法の特徴である鋼管構造は、前述のとおり、トンネル内の3mという狭小な施工エリアに打設機械を設置して、水平方向に鋼管を打設する必要がある。なお、削

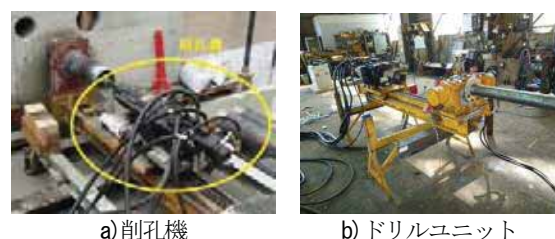


図-9 鋼管打設機械

表-3 模擬地山における鋼管打設実験結果

	地山条件													
	$\sigma=1\sim2\text{N/mm}^2$			$\sigma=1\sim2\text{N/mm}^2$ + 礫100mm		$\sigma=10\text{N/mm}^2$				$\sigma=20\text{N/mm}^2$				
実験ケース	1a	1b1	1b2	1gb1	1gb3	10a1	10a2	10b1	10b3	20a1	20a2	20b1	20b2	
鋼管径(mm)	216	165	165	165	165	216	216	165	165	216	216	165	165	
作業時間 (分)	削孔	14	7	11	35	30	58	57	36	16	88	90	41	28
	鋼管接続	10	9	11	9	9	11	12	12	10	11	11	10	8
	フラッシング	—	—	—	4	2	3	2	6	2	3	9	10	2
	清掃(洗浄, 他)	8	3	4	2	10	10	10	19	10	10	8	13	10
	ロッド回収	5	3	4	5	5	11	9	10	6	12	5	6	6
合計時間 (分)	37	22	30	55	56	93	90	83	44	124	123	80	54	

孔機械はジャンボのドリフタを改造したドリルユニット (図-9) である。また、地山は軟岩相当であることが予想され、鋼管打設も容易ではないことが予想される。よって、施工性を確認するために鋼管打設の施工実験を行った。施工実験にはコンクリートおよび流動化処理土を用いた模擬地山を用意し、圧縮強度を、 2N/mm^2 、 10N/mm^2 、 20N/mm^2 、と変化させ、さらにレキ混じりの地山も再現した (図-10)。また、鋼管径も $\phi 216$ と $\phi 165$ の場合を検証した。

施工実験の結果、狭小ヤードからの水平方向への鋼管打設は実現可能であることを確認し、同時に各実験ケースごとの鋼管1本 ($L=3.2\text{m}$) 当りのサイクルタイムを把握した。この結果を表-3に示す。

鋼管打設は、地山強度が低いほど、鋼管径が小さいほど施工性がよい。また $\phi 165$ はばらつきが大きい、 $10\sim 20\text{N/mm}^2$ の地山強度であれば大きく施工速度が変わらない傾向であった。

一方この実験では、鋼管打設の反対側 (到達側) にて約 10cm のズレが生じる鋼管もあり、施工精度に課題があることも判明した (図-11)。ただしこの課題は、打設機械の設置方法等の改善で解決できると考えている。

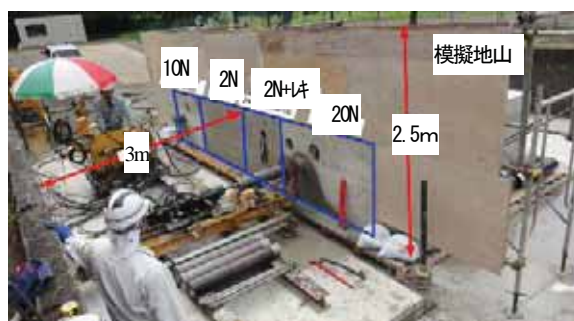


図-10 鋼管打設の施工実験風景

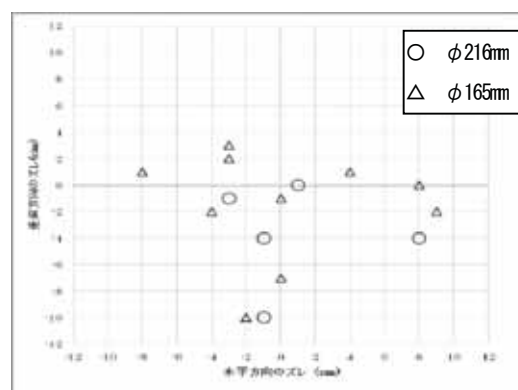


図-11 鋼管打設の精度

(2) 鋼アーチによる土留めの検討

車線規制内でのインバート掘削は、親杭方式による特殊 (土留) 掘削 (図-12) が一般的と思われるが、トンネル内の岩に対しては難工事となることが予想され、場合によっては土留工事のための通行止めも懸念される。このため、容易な土留め工法として鋼アーチによる土留め工法 (図-13) を検討した。この土留め工法は、C地質レベルで短期的には掘削面が自立する地山が対象で、掘削後に鋼製のアーチ状の部材で掘削断面を閉合することで親杭方式の根入れに相当する効果を期待する工法である。用いる材料はH-100程度で、アーチ部が4 (分割) ピースと底盤部1ピースの5ピースからなり、建て込みは小規模な荷揚げ機械と人力での施工が可能なサイズである。

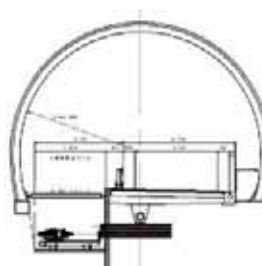


図-12 親杭方式

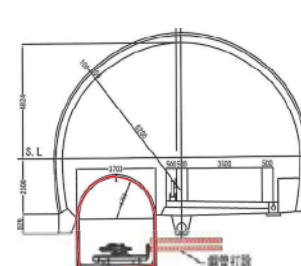


図-13 鋼アーチ土留め

7. 施工の影響解析を踏まえた施工方法の検討

(1) 覆工の足元のインバート掘削による影響に対して

5章(1)節にて、覆工直下でのインバート掘削の影響で、既設覆工脚部に応力が集中し、変形が生じるとの三次元解析の結果を示した。

これに対して新工法では、インバート掘削に先行して、覆工の足付けコンクリートを施工することとし（図-14）、インバート掘削による変位の抑制に努めることとした。

(2) 掘削パターンの違いによる影響に対して

5章(2)節にて、インバート掘削を行う隣接区間を先行して掘削することで、覆工へ発生する応力が軽減できるとの見解を示した。

これに対して新工法では、図-13に示す鋼アーチによる土留めを用いた連続施工方式を検討した（図-15）。

連続施工方式は、縦断的に一定区間を抜き掘るのではなく、インバート掘削→鋼アーチ土留め→鋼管打設→インバートコンクリート打設→埋戻し、の一連の工程を縦断的に連続して施工する方式である。鋼アーチ土留めは800mmピッチを想定しており、概ね2間進むごとに、後方の鋼アーチ土留め部材を前方へ転用することで連続施工が可能となる。

よって連続施工方式は、抜き掘る方式に比べて先行的にインバート掘削を行うこととなるため、覆工等への影響を軽減できると考える。

さらに鋼管打設の効率に注目すると、抜き掘り施工は削孔機械の搬入搬出を繰り返すのに対し、掘削をしたあとから鋼管打設が追ってゆける連続施工方法は削孔機械の搬入搬出は1回限りとなるため効率的である。以上よ

り、連続施工方式は、施工性および工期の面でも、効率的な施工方法であると考ええる。

ただし連続施工方式は、足付けコンクリートを先行施工していることが前提であることに留意が必要である。

8. おわりに

トンネルの走行性の確保や長期的な健全性確保の観点から、早急なインバート設置が望ましい箇所があるが、インバートを施工するための連続的な通行止が難しい現場もある。このようなニーズに応えられるのが本新工法であり、一般的な山岳工法のトンネルであれば供用しながらのインバート補強工事が可能と考える。

現在は、代表的な地質による解析的検討によりインバートの形状やスペックを定めたところである。

今後の課題は、定めた形状やスペックに対する実験による検証や、最終的な照査である。

本共同研究では、現場のニーズに応えるべく、引き続き現場適用に向けた最終的な検討を継続する予定である。



図-14 覆工足付けコンクリート

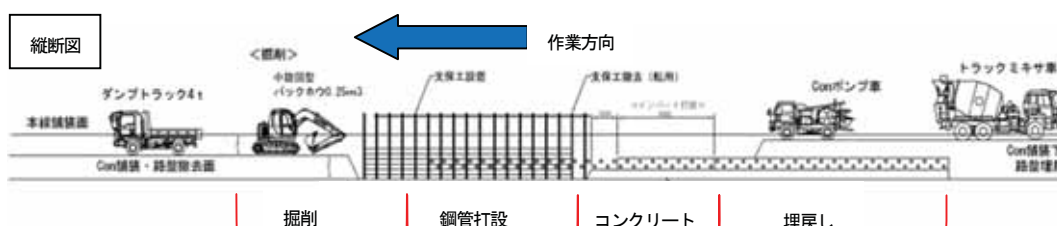


図-15 鋼アーチ土留めを用いた連続施工

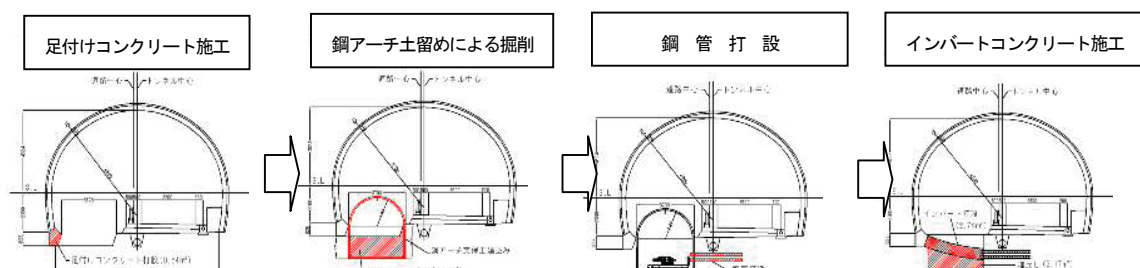


図-16 施工順序

謝辞：本検討における共同研究において，解析作業や現場実験に協力をいただいている，首都大学東京，施工技術総合研究所およびNEXCO総研の関係者各位に深く感謝の意を表します．

参考文献

- 1) 設計要領第三集 トンネル本体工建設編,p81,東日本高速道路(株),中日本高速道路(株),西日本高速道路(株),2012.
- 2) トンネルの補強工法に関する研究,pp.11-14,(株)高速道路総合技術研究所,2012.8

(2013. 9. 2 受付)

Examination of the invert setting method of construction by the compound structure using the steel pipes in a tunnel under service

Hajime Kitamura, Tetsuya Iwao, Shigetoyo Yasui , Kazuo Nishimura

Heaving, which is a phenomenon where the tunnel floor rises up, is becoming evident in tunnels managed by NEXCO. Most of the locations where heaving is observed are places where inverts have not been constructed when the tunnel was built, and therefore, the most effective way to deal with the situation is to construct inverts. But in most past cases, where inverts were constructed in expressway tunnels already in service, the roads had to be closed for a certain length of time for the works. We have decided to study a method to construct the inverter without closing the road. The reason for closing the road is that it is necessary to excavate around the center of the lanes for the construction. We have devised a new hybrid construction method using concrete and steel pipes that does not require the road to be closed. The structure and construction method of the new method is currently developing.