

インバート追加設置時の既設覆工への 縦断方向の影響に関する一考察

巽 義知¹・日下 敦²・小出 孝明³

¹正会員 戸田建設株式会社（元土木研究所）（〒104-0032東京都中央区八丁堀2-9-1）

E-mail: yoshitomo.tatsumi@toda.co.jp

²正会員 国立研究開発法人土木研究所（〒305-8516茨城県つくば市南原1-6）

E-mail: kusaka@pwri.go.jp

³正会員 三井住友建設株式会社（〒104-0051東京都中央区佃二丁目1番6号）

E-mail: tkoide@smcon.co.jp

供用中の道路トンネルにおいて、盤膨れが生じる事例があり、インバートの改築や追加設置する更新工事が実施されている。この際、迂回路がない場合には一般車の通行帯を確保しながらの施工となる。このような活線施工においては通行帯の安全確保が必要となり、通行帯上部の覆工に工事の影響が及ぶ場合には、覆工の状況によっては事前の対策が必要と考える。しかし、インバート更新時の覆工への影響範囲の検討に資する知見はほとんどない。そこで、本研究では、インバート更新時の既設覆工への影響について、施工に伴う覆工の挙動に着目し、インバート追加設置時の計測結果を再現した3次元数値解析モデルを用い、インバート施工箇所周囲における既設覆工の周方向応力の変化量の分布を確認し、既設覆工への影響の傾向を把握した。

Key Words: mountain tunnel, invert, numerical analysis, measurement, behavior of lining

1. はじめに

供用中の道路トンネルにおいて、盤膨れが生じる事例があり、変状の状況によってはインバートの改築や追加設置する更新工事が実施されている^{例えぱり}。この際、迂回路がない場合には、トンネル内の道路中央部を土留めで仕切り、片側に一般車両の通行帯を確保し、切り替えながら、インバートを半分ずつ施工する手順となる。通行帯の安全確保には、通常、インバート施工箇所と通行帯の間に防護柵やフェンスが設置されるが、通行帯上部の覆工に工事の影響が及ぶ場合には、覆工の状況によっては事前の対策が必要と考える。しかし、インバート更新時の覆工への影響範囲の検討に資する知見はほとんどない。そこで、先行研究²⁾ではインバート更新時の既設覆工への影響について、施工に伴う覆工の挙動に着目し、インバート追加設置時の計測結果で確認するとともに、その結果を再現した3次元数値解析モデルにより、現地計測結果では未解明な縦断方向に影響が及ぶ距離について確認した。本稿ではさらに、同数値解析モデルを用い、縦断方向に影響が及ぶ範囲内における、既設覆工の周方

向応力の変化量の分布について考察した。なお、数値解析モデルの特徴を示すため、先行研究²⁾で報告した現地計測結果と数値解析結果の比較による数値解析結果の再現性の確認についても、内空変位の追加の考察を含めて記載した。

2. 計測概要

対象トンネルは、最大で90cm以上の顕著な盤ぶくれ区間が存在し³⁾、現在は廃坑となっている、矢板工法で建設された内空幅7.4m、高さ5.2mのトンネルである（図-1）。計測は、インバート未施工区間において、延長9.0mのインバートを左右半断面ずつ追加設置する際の実施した。当該区間は顕著な盤ぶくれ区間からは40m程度離れていたが、後述の初期応力の計測結果より、既設覆工にはインバート施工前にすでに大きな外力が作用していた。計測項目は既設覆工の表面における、インバート施工前の初期応力と、施工時の応力、沈下量、および内空変位とし、図-1に示すA～C断面の①～⑤の測点

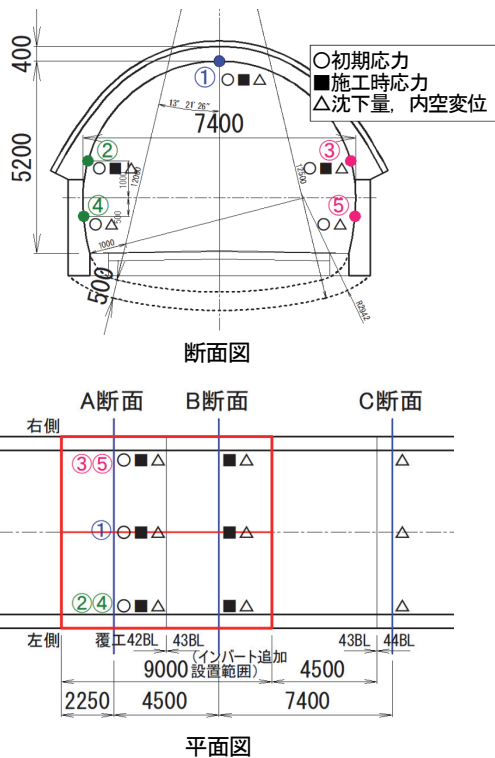
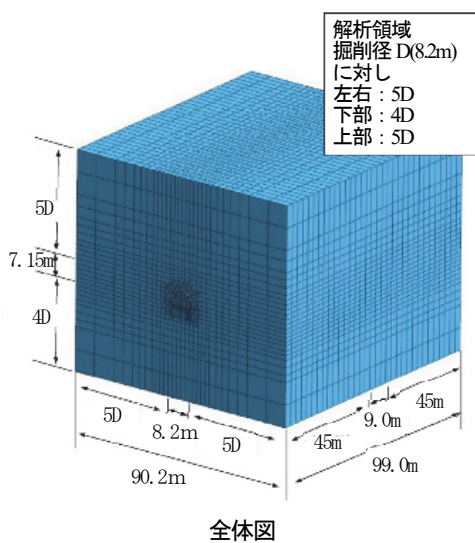


図-1 対象トンネル標準図, 計測位置

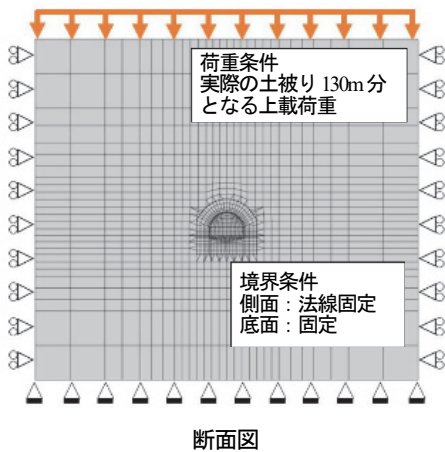
で計測した。なお、初期応力は応力解放法により測定した解放ひずみから算出した。

3. 数値解析概要

解析手法は 3 次元 FEM 解析とした。図-2 に解析モデル全体図と断面図を、同図中に解析領域、荷重条件、境界条件を示す。掘削時の状況から、地質は塊状砂質泥岩（施工箇所付近のボーリング調査結果では一軸圧縮強度 $q_u=23.9\text{N/mm}^2$ 、変形係数 $E=3,670\text{N/mm}^2$ ）主体であり、地山等級は D I と見られた。地山物性値はそれらとトンネル数値解析マニュアル⁴⁾を参考に表-1 の通りとし、全領域で一様とした。構造部の物性値は表-2 の通りとした。地山と覆工の境界は覆工が内空側へ変位する場合に地山が追従しない設定とした。解析ステップは図-3 の通りとし、全延長 99.0m 掘削後、中央部延長 9.0m の範囲にインバートを設置した。掘削時の応力解放率は、覆工の初期応力の計測値に解析値が近付くようにトライアルして設定した。



全体図



断面図

図-2 解析モデル

表-1 地山の物性値

項目	線形条件	要素条件	圧縮強度 (N/mm ²)	変形係数 (N/mm ²)	粘着力 (N/mm ²)	内部摩擦角 (deg)	単位体積重量 (kN/m ³)
地山	弾性	ソリッド要素	23.9	3,670	0.4	35	22

表-2 構造部の物性値

項目	要素条件		仕様		変形係数 (N/mm ²)		
	線形条件	要素条件	巻厚	圧縮強度 (N/mm ²)	変形係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比
鋼アーチ支保工		梁要素	H-150@1.2m		210,000		
覆工	弾性部材	リット'要素	40cm	18	22,000	23	0.2
インバート	弾性部材	リット'要素	50cm	18	22,000	23	0.2
項目	線形条件	要素条件	N値		変形係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比
埋戻し土	弾性部材	リット'要素	15		42	19	0.35

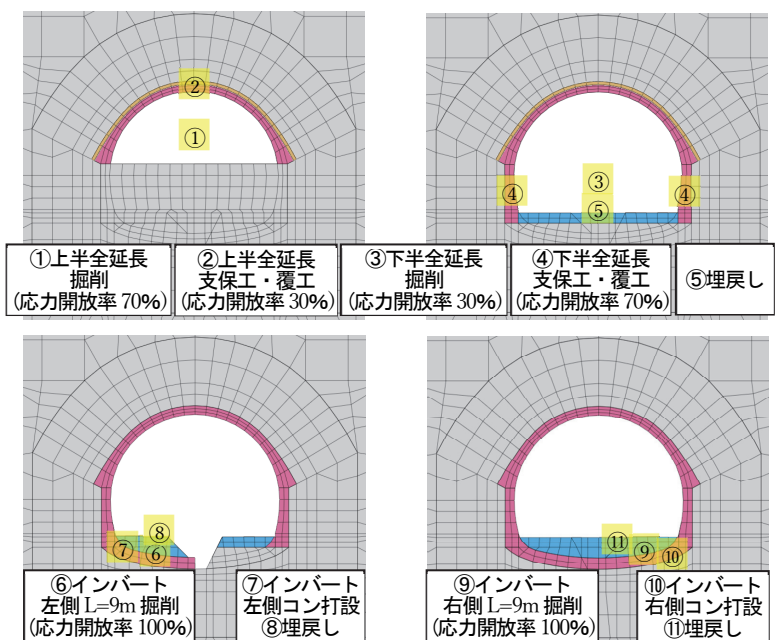


図-3 解析ステップ

4. 数値解析結果の再現性の確認

(1) 初期周方向応力

施工前の覆工の初期周方向応力は、表-3の通り、計測値は最大で圧縮 7.55 N/mm² であり、設計基準強度 (18N/mm²) の 1/2 に近く、大きな外力が作用していたと考えられる。解析値は計測値と近く、本解析モデルではそれを概ね再現できていると考える。

(2) 周方向応力の変化量

インバート施工時の覆工周方向応力の変化量は、施工前日の値を 0 とすると、図-4、図-5、表-4 の通りとなる。計測値は、A 断面において、左側の測点②では、左側施工時に引張側に変動し、右側施工時には、ほぼ変動はない。右側の測点③では、左側施工時に引張側に比較的小さく変動し、右側施工時、引張側にさらに変動している。B 断面において、左側の測点②では、左右施工時通じてほぼ変動はない。右側の測点③では、左側施工時に引張側に比較的小さく変動し、右側施工時、さらに引張側に変動している。これらより、インバート半断面施工時、覆工の周方向応力は、施工側では引張側に変動し、非施工側での変動は比較的小さい傾向にあると考える。

また、解析値は、A、B 断面ともに、左側の測点②では、左側施工時に引張側に変動し、右側施工時には、ほぼ変動していない。右側の測点③においては、左側施工時には圧縮側に比較的小さく変動し、右側施工時には引張側に変動している。これらより、計測結果で見られた、覆工の周方向応力は、施工側では引張側に変動し、非施工側での変動は比較的小さい傾向を本解析モデルでは概ね再現できていると考える。

表-3 初期周方向応力

測点	初期周方向応力 (N/mm ²)	
	計測値	解析値
①	-7.55	-5.98
②	-4.52	-3.12
③	-6.59	-3.12
④	0.33	-1.44
⑤	-1.82	-1.43

表-4 周方向応力の変化量

時期	測点	周方向応力の変化量 (N/mm ²) - : 圧縮 + : 引張					
		A 断面			B 断面		
		①	②	③	①	②	③
施工前日	計測値	0	0	0	0	0	0
	解析値	0	0	0	0	0	0
左側終了時	計測値	-0.1	1.0	0.5	0.0	-0.3	0.2
	解析値	-0.2	0.5	-0.3	-0.2	0.5	-0.3
左右終了時	計測値	0.1	1.0	1.4	-0.1	-0.2	1.1
	解析値	-0.4	0.4	0.4	-0.4	0.4	0.4

(3) 沈下量、内空変位

沈下量と内空変位を表-5に示す。沈下量は、計測値で最大4.2mmの沈下を示しているが、図-6に示すように、施工前1ヶ月間の沈下量の計測値に全測定断面で一様な5mm程度範囲の上下動があり、測量誤差の含有が考えられ、参考値と考える。なお、解析値では、左右側壁部の測点④、⑤で最大0.3mmの沈下を示している。

内空変位は、計測値では最大3.5mm内空側への変位、解析値では最大0.8mm内空側への変位であり、計測値の方が大きい値となるが、全体に変位は小さい。計測値、解析値ともに、左側終了時と左右終了時で、肩部②③間の側線(3)よりも側壁部④⑤間の側線(4)の方が大きく変位しており、変位の傾向は概ね再現できていると考える。

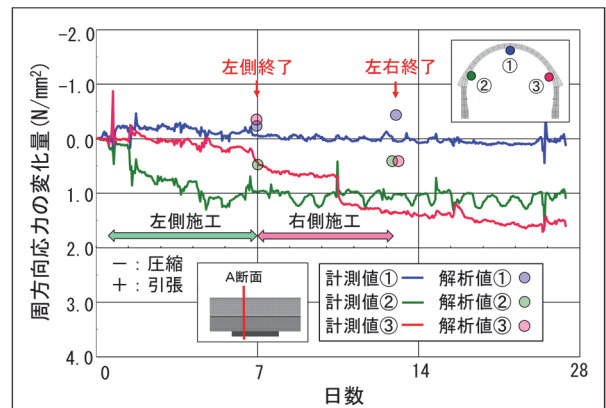


図-4 周方向応力の変化量(A断面)

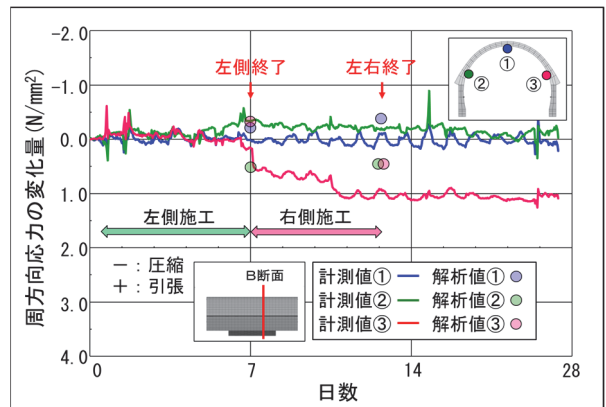


図-5 周方向応力の変化量(B断面)

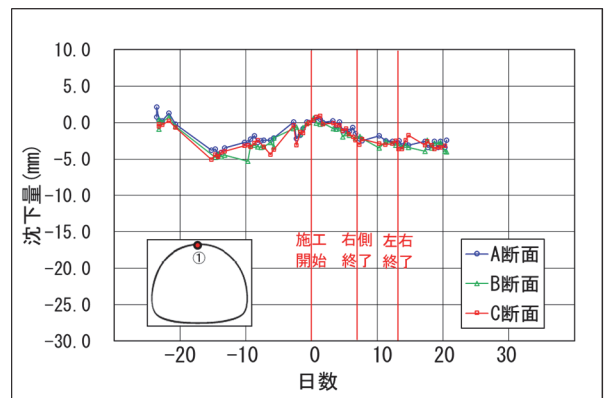


図-6 沈下量 (①部)

表-5 沈下量, 内空変位

時期	測定項目	沈下量 mm					内空変位 mm						計測位置
		①	②	③	④	⑤	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	
A断面													
施工前日	計測値	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	解析値	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
左側終了時	計測値	-1.5	-1.9	-1.5	-2	-2	0	0.5	0.2	-1.9	-0.6	0	
	解析値	0.0	-0.2	0.0	-0.3	0.1	—	—	-0.2	-0.5	—	—	
左右終了時	計測値	-2.8	-2.8	-2.4	-3	-2.1	-1	0	-0.8	-3.5	-2.4	-0.6	
	解析値	0.0	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	—	—	-0.4	-0.8	—	—	
B断面													
施工前日	計測値	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	解析値	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
左側終了時	計測値	-1.9	-1.6	-2.3	-2.1	-0.8	-1.2	-0.1	-1.5	-3.1	-1.0	-1.6	
	解析値	0.0	-0.2	0.0	-0.3	0.1	—	—	-0.2	-0.5	—	—	
左右終了時	計測値	-3.0	-3.8	-4.2	-2.9	-2.3	-0.8	1	-0.8	-2.8	-1.2	-1.3	
	解析値	0.0	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	—	—	-0.4	-0.8	—	—	
C断面													
施工前日	計測値	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	解析値	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
左側終了時	計測値	-2			0.02	-0.02				-0.9	-0.2	0.2	
	解析値	0.00			-0.02	0.02				-0.06	—	—	
左右終了時	計測値	-2.9			-3.2	-3.7				0.2	0.1	0.8	
	解析値	-0.01			-0.01	-0.01				-0.09	—	—	

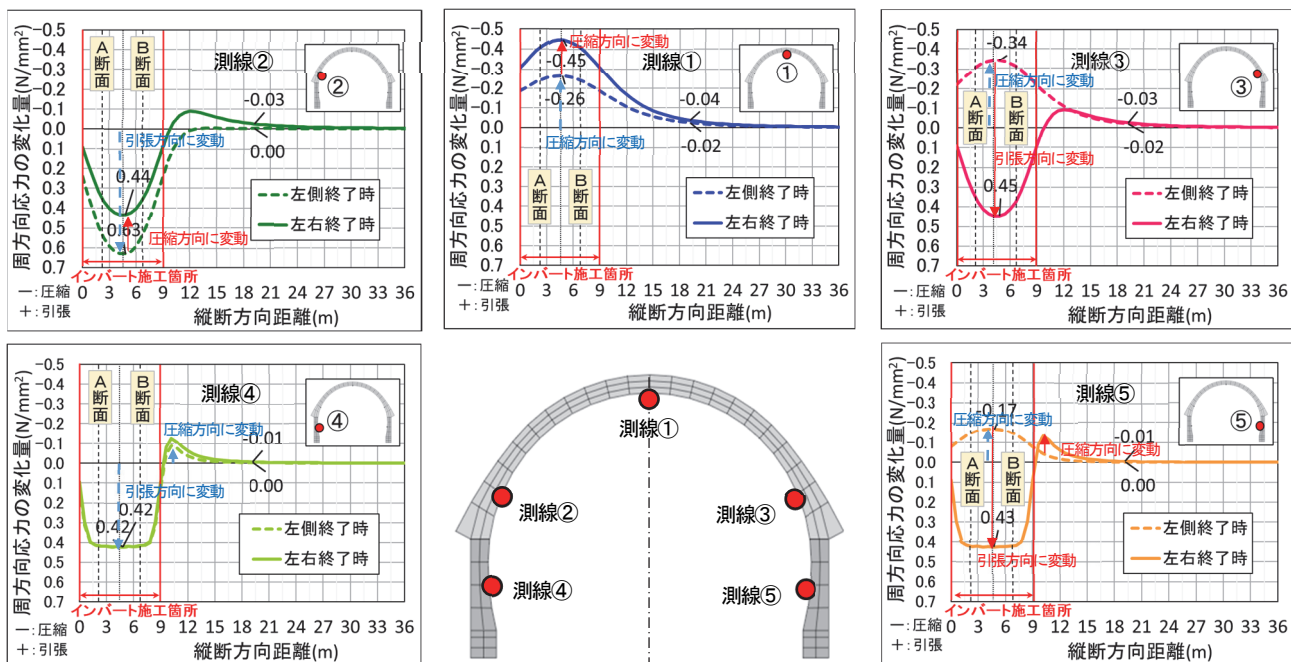


図-7 周方向応力の変化量の縦断方向分布

5. 周方向応力の変化量の縦断方向分布

覆工の周方向応力の変化量の縦断方向分布について、測点①～⑤の各位置でトンネル縦断方向に引いた側線①～⑤において、上記の数値解析モデルで確認すると図-7の通りとなる。

覆工の周方向応力の変化量が最大値となる位置は、インバート施工を通じて、①～⑤の全測線でインバート施工箇所中央部となっている。

左側施工時の覆工の周方向応力は、施工箇所近傍の左側側壁部の測線④においては、施工箇所の範囲内で引張方向に変動し、施工箇所端部を境に圧縮方向に転じてい

る。施工箇所端部から 1m 程度離れたところで圧縮方向の変動が最大となり、施工箇所端部から 10m 程度離れると変動はほぼない。左側の測線②においては、インバート施工箇所の範囲内で引張方向に変動し、施工箇所端部から 3m 程度離れると変動はほぼない。天端の側線①と右側の測線③⑤においては、施工箇所付近での変動は圧縮方向となり、施工箇所端部から 10m 程度離れると、変化量は最大値の 1/10 以下程度となる。これらより、左側施工時の覆工の周方向応力は、施工側の左側では、施工箇所の範囲内で引張方向への変動があり、施工箇所の端部付近を境に、施工箇所の範囲外の側壁部では圧縮方向に変動する傾向がある。天端と非施工側の右側では、施

工箇所付近で圧縮方向に変動する傾向がある。また、施工箇所端部から10m程度離れると、左側では変動はほぼなく、天端と右側では変化量は最大値の1/10以下程度、初期応力の1/100程度となり、影響は小さくなると考えられる。

右側施工時（左右終了時）の覆工周方向応力は、施工箇所近傍の右側側壁部の測線⑤においては、インバート施工箇所の範囲内で引張方向に変動し、施工箇所端部を境に圧縮方向に転じている。施工箇所の端部から1m程度離れたところで圧縮方向の変動が最大となり、施工箇所端部から10m程度離れると変動はほぼない。右側の測線③においては、インバート施工箇所の範囲内で、左側施工終了時の値から引張方向に変動しており、施工箇所端部から3m程度離れると左側施工終了時の値から変動はほぼない。天端の側線①と左側の測線②④においては、インバート施工箇所の範囲内で、左側施工終了時の値から圧縮方向に変動し、施工箇所の端部から10m程度離れると最大値の1/10以下程度となる。これらより、右側施工時の覆工周方向応力は、左側施工時と同様、施工側の右側では施工箇所の範囲内で引張方向への変動があり、施工箇所端部付近を境に、施工箇所の範囲外の側壁部では圧縮方向に変動する傾向がある。天端と非施工側の左側では、施工箇所付近で圧縮方向に変動する傾向がある。また、施工箇所端部から10m程度離れると、右側では変動はほぼなく、天端と左側では変化量は最大値の1/10以下程度、初期応力の1/100程度となり、影響は小さくなると考えられる。

6. まとめ

計測結果を再現した数値解析モデルにより、既設覆工の周方向応力の変化量の縦断方向分布を確認した。その

結果、本解析条件下では、インバートを左右半断面ずつ施工する場合、左右の施工の後先に関わらず、以下の傾向を確認した。

- 施工側においては、既設覆工の周方向応力は施工箇所の範囲内で引張方向への変動があり、施工箇所端部を境に、施工箇所の範囲外の側壁部では圧縮方向に変動する。
- 非施工側と天端付近においては、既設覆工の周方向応力は圧縮方向に変動する。
- インバート施工箇所端部から10m程度離れると、施工側の既設覆工の周方向応力は変動がほぼなく、天端と非施工側での変化量は最大値の1/10以下程度、初期応力の1/100程度となる。

限られた条件下での結果ではあるが、インバート更新時の覆工への影響の検討に資する知見を得たと考える。ただし、工事の影響には工事振動の影響等も考えられ、それらも含めて総合的に判断する必要がある。

参考文献

- 1) 香川佳隆, 篠原愛明, 富永裕紀: 安全性と施工性に配慮した連続車線規制によるインバート設置工事, トンネルと地下, 598号, Vol.51, No.6, 2020.6
- 2) 巽義知, 日下敦, 小出孝明: 既設トンネルのインバート追加設置時における覆工への影響範囲の検討, 第77回土木学会年次学術講演会概要集, 2022.9 (投稿中)
- 3) 砂金伸治, 真下英人, 石村利明: 現地計測に基づく既設トンネルの変状の進行に関する考察, 土木技術資料, 55-12, pp.22-25, 2013
- 4) (株)高速道路総合技術研究所: トンネル数値解析マニュアル (2017年度版), p.2-13, 2017

(2022.8.26 受付)

A STUDY OF THE EFFECT ON THE EXISTING LINING WHEN INSTALLING ADDITIONAL INVERTS

Yoshitomo TATSUMI, Atsushi KUSAKA and Takaaki KOIDE

In road tunnels in service, there have been cases of floor heaving, and renewal work to reconstruct or install additional invert has been carried out. In such cases, if there is no detour route, construction work must be performed while maintaining a traffic lane. In such construction, the safety of the traffic lane must be ensured, and if the construction affects the lining above the traffic lane, it is necessary to take measures in advance depending on the condition of the lining. However, there is almost no knowledge about the range of effect on the lining during invert renewal. In this study, we focused on the behavior of the existing lining and confirmed the distribution of circumferential stress changes in the existing lining around the area where the invert was installed, using the measurement results when the invert was installed and a 3-D numerical analysis model that reproduced the measurement results. As a result, the tendency of the effect on the existing lining was identified.