

Ⅱ期線トンネル掘削がⅠ期線トンネルに与えた 近接影響の分析

沖原 穂高¹・中野 清人²・山崎 哲也³・高根 努⁴・鈴木 雅行⁵

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 町田市忠生1-4-1)
E-mail:h.okihara.aa@ri-nexco.co.jp

²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 町田市忠生1-4-1)
E-mail:k.nakano.aa@ri-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 町田市忠生1-4-1)
E-mail:t.yamazaki.ac@ri-nexco.co.jp

⁴正会員 株式会社オリエンタルコンサルタンツ (〒530-0005 大阪市北区中之島3-2-18 住友中之島ビル13F)
E-mail:takane@oriconsul.com

⁵フェロー会員 株式会社エイト日本技術開発 防災保全事業部 (〒164-8601 中野区本町5-33-11)
E-mail:suzuki-masayu@ej-hds.co.jp

「高速道路における安全・安心基本計画」が2019年9月に策定され、四車線化に伴うⅡ期線の事業化が行われ、70 チューブを超える新規のトンネル建設が計画されている。このため、これまで高速道路において施工されたⅡ期線施工の実績などからⅠ期線とⅡ期線の相互影響度合いを定量的に分析し検討した。そして、今後施工するⅡ期線トンネルを安全かつ合理的に施工することを目的とし、Ⅱ期線トンネルの設計・施工上の考慮すべき事項を抽出するために検討した内容について報告する。

Key Words: *neighboring work, road widening construction, mountain tunnel*

1. はじめに

既設トンネルに近接して計画された山岳トンネルにおいて、不良地山を掘削する場合に近接影響を引き起こすことがある。NEXCOの四車線化事業において、これまでⅡ期線(新設)トンネルの施工によりⅠ期線(既設)トンネルに近接影響(以下、影響)を与えた事例は報告されているが、個々の事象としての評価に留まっている。写真-1はⅡ期線トンネルの施工によりⅠ期線トンネルの覆工に大規模な損傷を与えた事例である。既設のⅠ期線トンネル側壁に延長120m程度のせん断ひび割れが水平に生じ、復旧に大がかりな対策が必要となっただけでなく、その後の管理段階においても苦慮している。

Ⅱ期線の掘削影響に伴うⅠ期線への近接影響が生じる一般的なメカニズムは図-1に示すとおりであるが、写真-1のトンネルではⅡ期線とⅠ期線のゆるみ領域が重なったため、Ⅰ期線に大きな荷重が作用したとされており、両者の現象は異なり明らかではない。

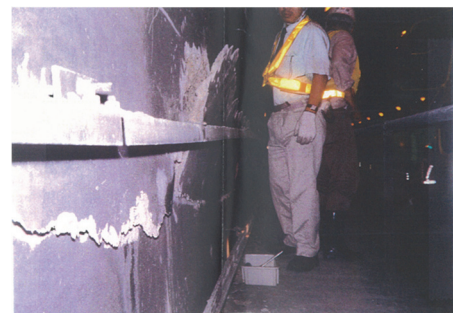


写真-1 近接施工による既設トンネルの覆工損傷¹⁾

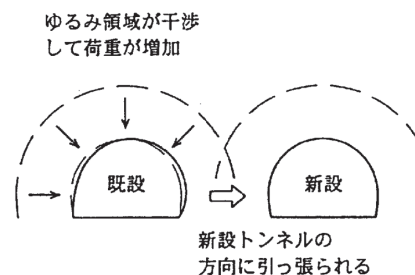


図-1 近接影響のメカニズム²⁾

従前から付加車線の整備に伴いⅡ期線トンネルの計画・施工が進められていたが、2019年9月に「高速道路における安全・安心基本計画」が策定され、70 チューブを超えるトンネルでⅡ期線の事業を進めている。このような背景から、Ⅱ期線施工によるⅠ期線との相互影響度合いを定量的に分析し、今後のⅡ期線トンネルを安全かつ合理的に設計施工していく上で、過去のⅡ期線トンネルの施工事例を総括的に分析する。あわせて理論的な裏付けを行うため数値解析により検討した。これらをマクロ的に考察することにより、Ⅱ期線トンネルの設計・施工上遵守すべき基準を踏まえ考慮すべき事項を報告するものである。

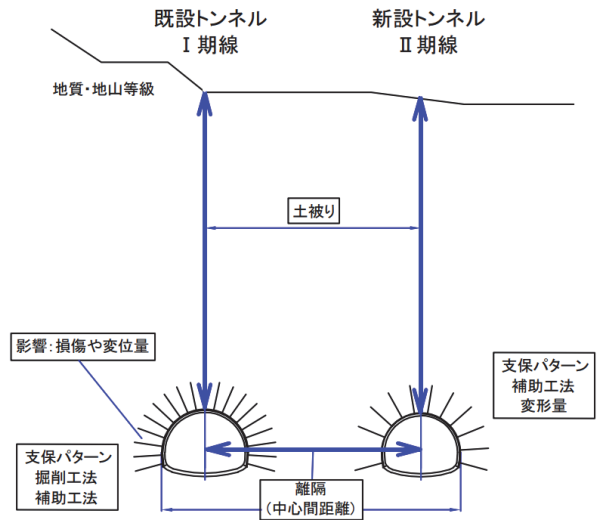


図-2 位置関係と指標

表-1 データベースとして整理した事例（土被り 50m程度未満）

分類	影響を与えた可能性が高い	影響なし(補助工法等対策)						部分的に影響(離隔小)	影響なし(補助工法等対策、離隔小)	備考
		永江第一	梶木	明神山	大久	好間	上野第一			
諸元	トンネル名	盃山	永江第一	梶木	明神山	大久	好間	上野第一		
	離隔(m)	標準	標準	標準	標準	標準	壁間6.2m	壁間5m	標準は中心間離隔30m程度を示す	
	土被り(m)	20~40	25	50	30~40	10~20	35	9		
	主要地質	流紋岩	砂岩、泥岩	花崗岩(土砂化)	頁岩・安山岩互層	砂岩・シルト	細粒砂岩	火山角礫岩		
	地山等級	C II、D I	D I	D I	D II	D II (D III)	D I 非常駐車	D II (D III)	()書きは支保パターンを示す。	
	区間延長(m)	266	54	74	250	200	200	184		
	qu(N/mm ²)	-	-	6.4	14	8.8	1	10.4		
	地山強度比	-	-	-	4~20	7~8	2.4	1.1		
	岩種	流紋岩質凝灰岩	泥岩	黒色片岩破砕帯	頁岩・砂岩互層	地すべり崩積土	固結の弱い礫岩層	火山角礫岩(風化)		
	掘削工法	全般	上半工法(ショートベンチ)	上半工法	上半工法	補助ベンチ付き全断面	上半工法	上半工法	補助ベンチ付き全断面	
支保パターン	閉合有無	上半仮インバート1次インバート		上半仮インバート						
	吹付コンクリート(cm)	10~15	10	(15)	(25)	(25)	(10~20)	(25)	()書きは金網ありを示す	
補助工法等	鋼製支保工	H125	H125	H125	H200	H125	H125	H200		
	備考			核残し						
	フォアライジング			○	○	○	○	○		
	鏡吹付			○						
	鏡ホルト									
	増しホルト	○		○	○					
I 期線掘削時に発生した事象	ウイングリブ			○						
	その他	なし	-	根固めホルト						
	内空変位 (mm)		108	102	243	30	45	21.6		
	天端沈下 (mm)		135		237	26		12		
	天端崩落			○						
	縫い返し				○					
	支保変状									
	その他			切羽崩落、地すべり	地すべり	地すべり				
	地山等級	C II、D I、D III	D III (被り7m)	D I	E	D III	D I	D III		
	掘削工法	全般	上半工法	補助ベンチ付き全断面	上半工法	上半先進ショートベンチ	補助ベンチ付き全断面	補助ベンチ付き全断面	補助ベンチ付き全断面	
閉合有無		上半仮インバート1次インバート			上半仮インバート	早期閉合	早期閉合	早期閉合	()書きは切羽~閉合箇所までの距離を示す	
支保パターン	吹付コンクリート(cm)	10~25 (金網)	25	15	25	20	(10)	(20)	()書きは高強度吹付を示す	
	鋼製支保工	H125.200	H200	H125	HH200	HH154 (HH154)	HH100	HH154 (HH154)	()書きはインバートストラットを示す	
補助工法	備考									
	フォアライジング	○								
	AGF等		○	○	○(180°)	○(150°)	○	○(150°)		
	鏡吹付					○	○			
	鏡ホルト				○	○	○	○		
	増しホルト					○(サトパイル)				
	スウェックスホルト									
	ウイングリブ		○	○		○				
フットパイル					○(先受AGF)					
その他										
内空変位 (mm)				130	78.4	10以下	5~7			
天端沈下 (mm)				100	90.5	10以下	5程度	()書きは脚部沈下を示す		
I 期線への近接影響	覆工ひび割れ	○								
	盤ぶくれ	○								
	覆工増加応力超過		○(内空変位)				○			

※表の変位量については図表からの読み取り値の場合がある。

2. 事例の収集・整理

最初に高速道路の近接影響について検討された 20 トンネルに関してⅡ期線トンネル施工事例の文献 200 編以上、委員会資料 50 編以上を収集して整理を行った。次いでⅡ期線施工によりⅠ期線の覆工に影響を与えた事例、Ⅱ期線施工時に補助工法によりⅠ期線覆工への影響を軽減した事例やⅡ期線施工時にⅠ期線との離隔を拡げることにより影響を回避した事例について着目し、それらの完成図書や施工記録（施工計画書、各種報告書、各種計測データ等）を確認し、図-2 に示す各種指標となる項目を抽出した。そして、表-1 及び表-2 に示すとおり影響の程度に応じてカテゴリーを設けて一覧できるデータベースとして整理した。整理に当たっては、土被りにより影響度合いに変化があると考え、土被り 50m 程度を境界として、大小で分けけた。なお、各種数値等については保存されている完成図書及び文献を参照し記載したものであるが、最終形状であるかについては確認しているところである。

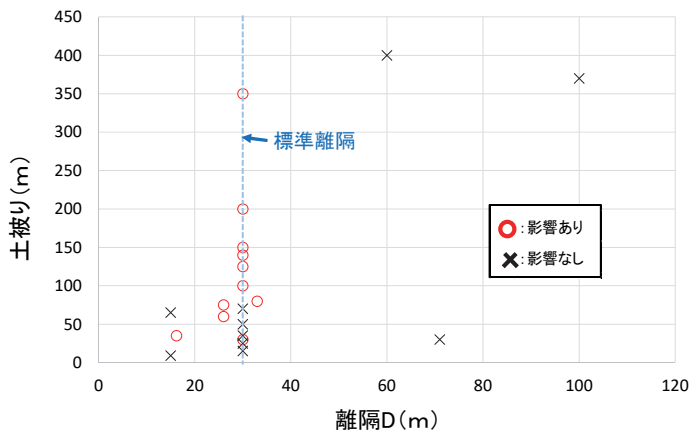


図-3 土被り及び離隔とⅠ期線への影響の有無との関係

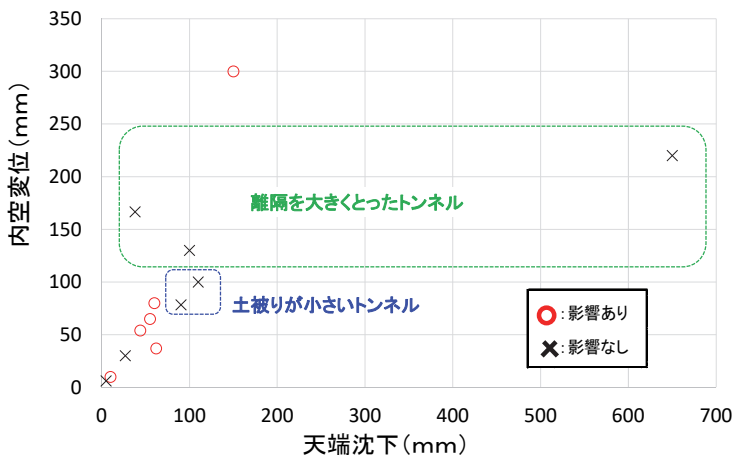


図-4 Ⅱ期線トンネルの内空変位及び天端沈下とⅠ期線への影響の有無との関係

3. Ⅰ期線トンネルに影響を与える指標の整理

(1) 土被りと離隔

土被りと離隔の関係から図-3 に示すとおり標準離隔（トンネル中心間距離 30m 程度）を境として離隔が確保されているトンネルは「影響なし」が多い結果となった。一方で土被りが 100m 程度より大きい場合、標準離隔のケースでは影響が生じ、土被りが小さい場合でもより接近している場合は「影響あり」となっている。以上より土被りと離隔がⅠ期線への影響の有無に関係していると言える。

(2) 内空変位量と影響の有無

図-4 からⅡ期線トンネル側の内空変位量もしくは天端沈下量が 50 mm 程度より大きい場合、離隔が確保されている場合や土被りが小さい場合を除き影響が生じている。各変位量が 50mm 以上であっても、緑色の枠中のトンネルは離隔を 5D（D は掘削幅）程度広げ影響を回避しており、青色の枠中のトンネルは土被りが小さく影響が生じていない。内空変位量が小さければ影響を受けない事例も見られるが、小さく抑えても影響を及ぼした事

表-3 Ⅱ期線施工時の支保の増減と影響の有無との関係

支保パターンの変化(Ⅱ期線施工時、Ⅰ期線施工時と比較)	影響あり	影響なし
支保パターンを重く変更	10	3
同程度の支保パターンで施工	1	6
支保パターンを軽く変更	1	1

表-4 Ⅱ期線施工時の一次インバート等による断面閉合の採否と影響の有無との関係

一次インバートや早期閉合等による断面閉合の採用状況	影響あり	影響なし
Ⅰ期線施工時から採用	8	3
Ⅱ期線施工時に採用	2	3
採用なし	0	3
不明	1	1

例もあった。つまり影響の有無はⅡ期線側の各変位量だけではないことがわかるが、一定程度(50mm)より大きく変位した場合は影響を与える可能性が高いと言える。

(3) Ⅱ期線の支保増減と断面閉合

表-3 には、Ⅱ期線とⅠ期線の支保パターンの変化と影響の有無を整理した。影響の有無に関わらず、いずれの事例もⅠ期線と比較するとⅡ期線の支保を重くしているケースが多く、重くしても影響ありのケースが多くみられた。Ⅱ期線掘削時はⅠ期線への影響を考慮し支保を重く(より安全側に)する傾向が強く、軽くする事例は少なかった。また離隔を十分確保した場合においても、影響は軽減されるものの、Ⅱ期線の地山状況を考慮し、支保を軽くしたという事例は少なく、同程度の支保で掘削している事例が多かった。

表-4 には、Ⅱ期線施工時のトンネル断面の閉合の有無とⅠ期線への影響を整理した。Ⅰ期線施工時から断面閉合を採用した影響なしのトンネルは離隔を確保したケースであり、Ⅰ期線施工時から断面閉合した標準離隔のケースでは、Ⅰ期線に影響を与えている。また、Ⅱ期線施工時に断面閉合を採用したケースについては影響の有無が分かれたが、Ⅱ期線施工時でも断面閉合を行わなかったケースは影響なしであった。Ⅱ期線施工時でも断面閉合を行わなかったケースについて、3件のうち2件は土被りが小さいトンネルであった。以上からⅠ期線の掘削状況を考慮し、変位を抑制する必要があると判断して早期閉合などの断面閉合の対策をしたにもかかわらず影響を与えているケースがあることがわかる。

このようなことから断面閉合による変位抑制効果だけではⅠ期線への影響を抑えるのに十分でない場合があるということが言える。

4. Ⅰ期線トンネルに影響を与えた条件の整理

Ⅱ期線施工によりⅠ期線トンネルが影響を受けた場合の指標に着目し、土被りと離隔を考慮すると、表-1、表-2に示すとおり土被り50m程度を境界に以下のとおり整理することができると考え整理した。

(1) 土被りが概ね50m程度以上の場合

以下の事項が言える。

- ・地山等級 E、DⅡの標準離隔ではⅠ期線への影響が発生している。
- ・地山等級 E の標準離隔では、本設インバートを損傷させる可能性がある。
- ・地山等級 DⅠで片岩、粘板岩、凝灰岩等の軟岩では、標準離隔でも非常駐車帯部のように断面が大きくなり、

より近接する区間ではⅠ期線の覆工にひび割れが発生することがある。

- ・地山等級 E では離隔を広げ 5D とすることで影響を低減し、補助工法がⅠ期線より軽減された。

(2) 土被りが概ね50m程度未満の場合(坑口部を含む) 以下の事項が言える。

- ・地山等級 DⅠ・DⅡでは標準離隔の条件で補助工法によりⅠ期線への影響が軽減された事例がある。
- ・坑口部 DⅢ区間では、標準離隔で影響が生じた事例は見られない。
- ・地山等級 DⅠ程度であっても標準離隔未満の場合は影響が生じる可能性が高い。

5. Ⅱ期線施工時の掘削対策

表-1、表-2からⅠ期線が影響を受けたケースにおけるⅡ期線施工時の掘削対策を整理した。

(1) 地山等級DⅡ程度の場合

Ⅱ期線施工時に対策工法を施工する事例が多いことが認められた。

- ・上半ベンチカット工法による、上半仮インバート。さらに下半吹付けインバートによる断面閉合が施工されている。
- ・上記対策工法を行った後に、補助ベンチ付き全断面工法による早期閉合が行われており、掘削方法の設計修正手順として多い事例である。
- ・上記の断面閉合を行う工法の他に、様々な補助工法が多用されている。

(2) 地山等級DⅠ程度の場合

Ⅱ期線施工時に対策工法を施工する以下の事例が多いことが認められた。

- ・長尺もしくは短尺の先受け工の他、フットパイルなどの補助工法を組み合わせる施工している。
- ・上半ベンチカット工法もしくは一部で吹付けコンクリートの一次インバートによる早期閉合が施工されている。

(3) まとめ

上述のように地山等級により違いはあるものの、Ⅱ期線施工によりⅠ期線が影響を受けた場合、断面閉合や補助工法の組み合わせで対策が強化され、より手厚く設計が修正されていく場合が多いと言える。

6. 数値解析による検証

(1) 解析方針

前述の「I期線トンネルに影響を与えた条件の整理」

から得られた結果について数値解析手法を用いて理論的手法から検証を試みる。設計要領トンネル保全編の近接施工編²⁾を参考にし、並行し近接するトンネル（間隔は標準離隔もしくは1.5D）のI期線施工後およびII期線

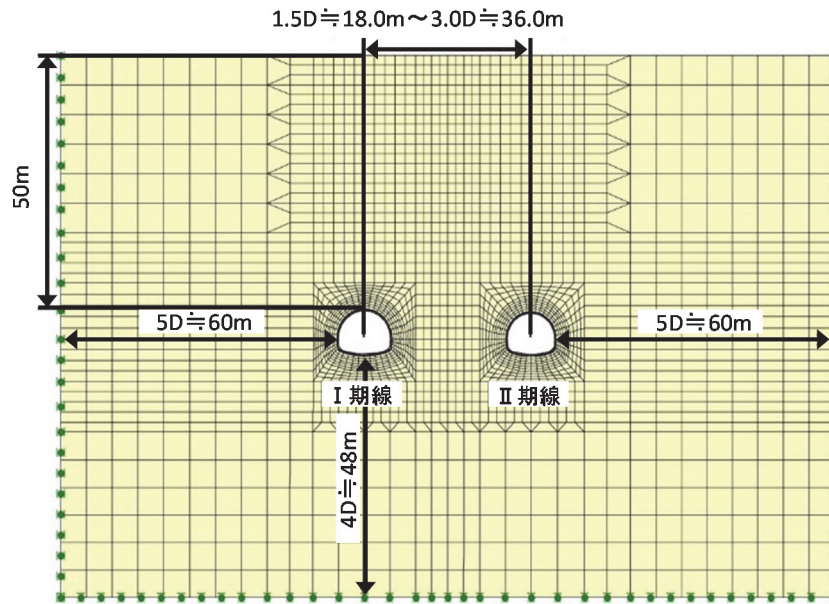


図-5 解析モデル

表-5 解析照査方法の比較

判断基準	内容	考え方	採否
増加応力	覆工に作用する増加応力（圧縮，引張）により評価を行う方法。	I期線の覆工状態が健全（B，OK）の場合 増加圧縮応力： $0.3\sigma_{ek}$ 増加引張応力： $0.06\sigma_{ek}$ 「既設トンネル近接施工対策マニュアル，（財）鉄道 総合技術研究所，平成7年」 ³⁾ と同じ考え。	○ 安全率が考慮されている。また，覆工ひずみを計ることで管理可能であり，現場での適用性が高い。
限界状態	設計する構造物が，既定の限界状態を超えた場合に構造物が機能を失い崩壊（終局限界）したり，使用不能となる（使用限界）など，限界状態を具体的に設定して安全性を照査する方法。	設計基準強度と安全係数から終局耐力を求める。 終局限界；M-N曲線で照査 設計基準強度； 圧縮； $18\text{ (N/mm}^2\text{)}$ 曲げ引張； $1.579\text{ (N/mm}^2\text{)}$ $0.23 \times \sigma_{ek}^{2/3}\text{ (N/mm}^2\text{)}$ 想定するひび割れ幅： 0.25 (mm) SFRCと同様の考え方からM-N曲線を考慮	△ 限界状態まで基準を緩めた場合，管理が難しい。

表-7 解析ケース毎の支保等の規格

項目	Case1, 2		Case3, 4		
	I期線	II期線	I期線	II期線	
I期線or II期線	I期線	II期線	I期線	II期線	
支保パターン	DI-a	DI-a	DII	DII	
支保工規格	従来	高規格	従来	高規格	
吹付コンクリート	強度(N/mm ²)	18	36	18	36
	厚み(cm)	15	10	20	15
鋼製支保工	規格	NH-125	HH-100	NH-150	HH-108
	強度(N/mm ²)	18	-	18	-
覆工コンクリート	厚み(cm)	30	-	30	-
	強度(N/mm ²)	18	-	18	-
インバート	強度(N/mm ²)	18	-	18	-
	厚み(cm)	45	-	50	-

表-6 解析ケース

Case	地山条件	離隔
1	D I	1.5D (18m)
2	D I	3.0D (36m)
3	D II	1.5D (18m)
4	D II	3.0D (36m)

表-8 地山等級毎の採用物性値

地山等級	変形係数	粘着力	内部摩擦角	引張強度	単位重量	側圧係数
	D	c	ϕ	σ_t	γ_t	k
単位	N/mm ²	N/mm ²	°	N/mm ²	kN/m ²	-
D I	500	0.4	35	0.08	22	0.5
D II	150	0.2	30	0.04	21	0.5

表-9 解析ステップ例

項目	STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 4	STEP 5	STEP 6
概念図						
施工状況	初期応力計算	上半掘削	上半支保設置	下半掘削	下半支保設置	インバート掘削
掘削解放率	—	40%	60%	40%	60%	100%
		100%		100%		

表-10 解析結果一覧

Case	地山等級	離隔	照査部位		
			アーチ	側壁	インバート
1	D I	1.5D	○	×	○
2	D I	3.0D	○	○	○
3	D II	1.5D	×	×	×
4	D II	3.0D	○	○	○ (引張0.85N/mm ²)

○: 増加応力による基準値以内
 ×: 増加応力による基準値超え

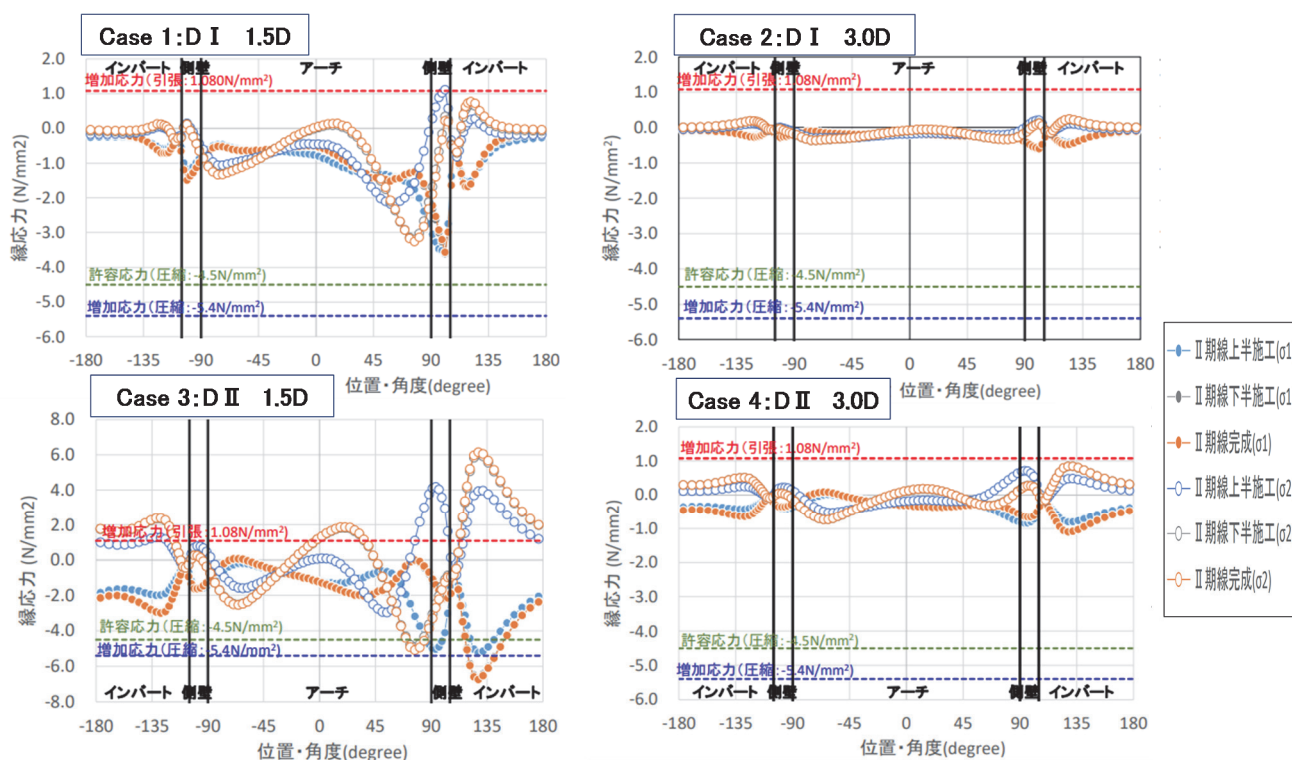


図-6 II期線施工によるI期線の覆工・インバートの増加応力の分布

施工後にて評価を行い、II期線トンネルの施工がI期線トンネルに与える影響を分析した。解析モデルは図-5に示すとおり土被り50m(側圧係数0.5)とし、採用した地山、支保部材および覆工とインバートの物性値はNEXCOのトンネル数値解析マニュアル⁴⁾に準拠した。

解析に当たっては、2次元有限要素法にて非線形弾性モデルとし、解析ソフトは「2D-σ」を使用した。評価方法は、表-5に示すとおり増加応力による照査と限界状態による照査を比較した上で、増加応力で照査することとした。具体的には、I期線のインバート、覆工に作

用する増加応力(圧縮, 引張)により評価を行う方法を採用した。

(2) 解析ケース

解析ケースを表-6に、解析ケースの支保等の規格を表-7に、採用した物性値を表-8に示す。本検討では、II期線施工によるI期線トンネルへの影響および地山条件の組み合わせによる4ケースを実施した。なお、II期線施工の影響が小さいと考えられる地山条件D IおよびI期線とII期線の中心間離隔が標準離隔相当(3.0D)の場合

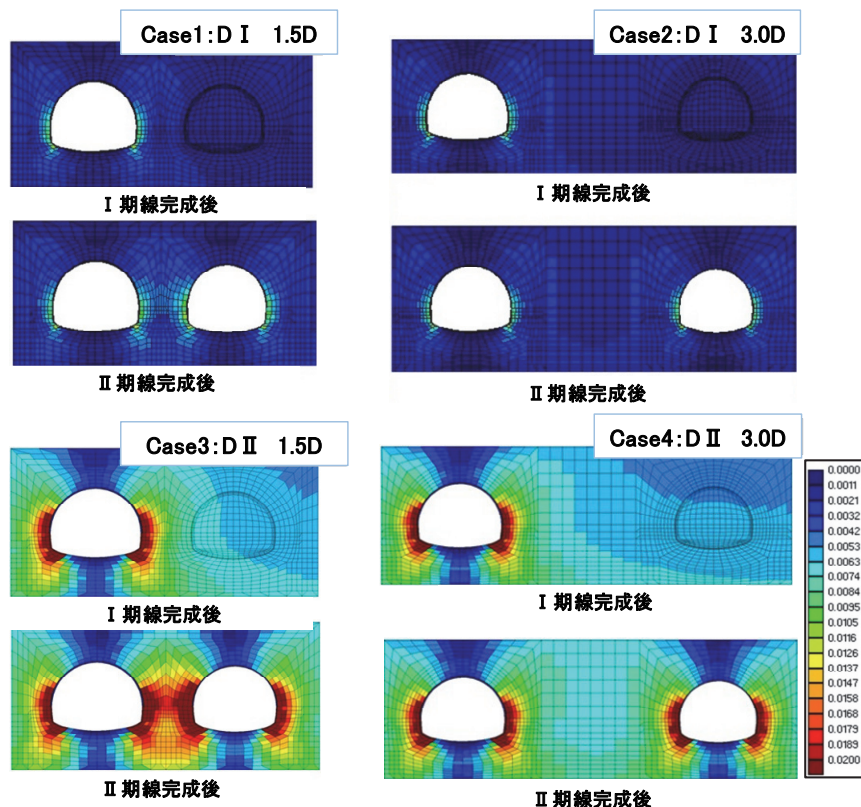


図-7 せん断ひずみの分布

合を基本ケースとし、それよりも地山が悪い条件（D II）や近接している条件（1.5D）を組み合わせることで評価することとした。なお、解析にあたり掘削ステップの例を表-9に示す。本数値解析においては、二次元有限要素法であることから、掘削、支保工設置等の各施工ステップにおいて、応力解放率を変化させることにより模擬した。

(3) 解析結果

解析結果一覧をトンネルの部位ごとで表すと表-10のとおりとなる。II期線掘削に伴うI期線の覆工とインバートの増加応力を図-6、周辺地山のせん断ひずみの分布を図-7に示す。D I 地山におけるII期線掘削時の影響について、離隔1.5Dの場合は側壁部の増加応力で基準値を超えた。D II 地山においては離隔1.5Dの場合は全ての照査部位で増加応力が基準値を超え、離隔を3.0Dにした場合は基準値を満足したものの、インバート部において基準値に接近した値となることが結果が得られた。

周辺地山のひずみ分布について、D II 地山・離隔1.5DにおけるII期線の掘削においては、I期線施工の影響を受けてやや不安定となった地山を掘削することになり、II期線完成時のせん断ひずみの分布は明らかに増加し塑性領域が大きくなる傾向が確認された。D I 地山・離隔1.5DおよびD II 地山・離隔3.0DについてはII期線掘削後、中間地山においてせん断ひずみの分布がわずかに広

がり分布領域が重なる傾向があり、それが覆工・インバートの増加応力の照査結果へ影響を与えていることが考察された。

以上のことから、D II 地山・3.0Dは照査基準値ギリギリになっており、今回の土被り50mより大きくなると基準値を上廻ることが思慮される。このことは4章で示した(1)と(2)の事実関係と符合していることがわかる。

7. まとめと今後の課題

II期線トンネルの施工事例分析と数値解析手法によるII期線施工によるI期線の影響検証結果により、II期線トンネルの設計・施工上の知見を以下のとおり新たに導いた。

- ・地山等級 D II レベルの不良な地山において標準離隔 30m では、I 期線トンネルに影響を与え、近接施工の基準値を超える可能性が高い。
- ・近接影響を考慮し離隔を広げて I 期線トンネルの安定を確保し、効率的に施工したトンネルがある。
- ・地山等級 D I の軟岩地山で標準離隔を確保したトンネルでも非常駐車帯部では一部近接影響を与える可能性がある。

本検討は有識者で組織した検討委員会で2年間審議した内容を要約したものであり、昨年秋に個々の

事例を含めて整理し NEXCO 各社へ共有を図った。現在、新規のⅡ期線トンネル詳細設計に活用していただくとともに、Ⅰ期線で難航したトンネル等のⅡ期線トンネル計画時には新規に第三者検討委員会を立上げ、現地での詳細な検討が行われている。

今後は更に検討を進め、Ⅱ期線トンネル施工時のⅠ期線トンネルの管理手法についても整理・分析を進めていく所存である。

謝辞：本稿は、「改築設計施工特別委員会」の結果を取りまとめたものである。砂金委員長をはじめご協力頂きました委員・協力者の皆様へここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 財団法人高速道路技術センター：北陸自動車道 上越～朝日間（Ⅱ期線）トンネル施工検討報告書（日本道路公団北陸支社委託），1998年3月。
- 2) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領第三集 トンネル保全編，2020年7月。
- 3) 公益財団法人 鉄道総合技術研究所：既設トンネル近接施工対策マニュアル，1995年1月。
- 4) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，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年1月（東日本,西日本），2018年2月（中日本）。

(2022. 8.26 受付)

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF 2ND TUNNEL NEIGHBORING 1ST TUNNEL

Hotaka OKIHARA, Kiyoto NAKANO, Tetsuya YAMAZAKI, Tsutomu TAKANE and Masayuki SUZUKI

"The basic policy of the relief and safety in the expressway" is devised in September, 2019, and the tunnel more than 70 tubes is planned as a plan of improvement the road lanes two for four. Therefore, we analyzed construction records regarding constructing new tunnel near the already constructed tunnel. Especially, we paid our attention to that records with overburden and the distance of parallel tunnels. Furthermore, we performed analysis constructing new tunnel near the already constructed tunnel with finite element method. Records and analysis provides that if you plan the new tunnel near the already constructed tunnel, you will pay attention to effects of neighboring. At that moment, you have to focus on the distance of two tunnels, support patterns and the scale of inner section.