

# 小土被り部におけるⅠ期線トンネルへの 変形抑制効果を考慮した補助工法の設計

The design method of the 2nd stage tunnel with shallow overburden considering the effects of controlling deformation of the 1st stage tunnel

吉永浩二<sup>1</sup>・阿久津孝夫<sup>2</sup>・山下勝治<sup>3</sup>・中嶋英裕<sup>3</sup>・大谷達彦<sup>1</sup>  
Kouji Yoshinaga, Takao Akutsu, Katsuji Yamashita, Hidehiro Nakashima  
and Tatsuhiko Otani

<sup>1</sup>正会員 西松建設株式会社 土木設計部設計課 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1-20-10)

E-mail:kouji\_yoshinaga@nishimatsu.co.jp

<sup>2</sup>東日本高速道路株式会社 新潟支社信越工事事務所 (〒943-0847 新潟県上越市南新町3-46)

<sup>3</sup>西松建設株式会社・真柄建設株式会社 上信越自動車道永江トンネル工事共同企業体  
(〒389-2104 長野県中野市大字永江字向原648-2)

In case of construction of 2nd stage tunnel of parallel tunnels, it is important to design the auxiliary method considering the influence on the 1st stage tunnel.

In this paper, the design method of auxiliary method of 2nd stage tunnel considering the effects of controlling deformation of the 1st stage tunnel is described, and the result of the comparison between the measured displacements and the prediction by FEM is shown.

**Key Words :** *design of auxiliary method, the effects of controlling deformation, parallel tunnels*

## 1. はじめに

建設当初において、交通量が少ない地域では、高速道路網を早期に整備するため、暫定2車線道路が建設される。暫定2車線道路は、対面通行で供用され、供用後の交通量の増加にあわせて、新たにもう1本の2車線道路が建設される。

このような四車線化工事では、暫定2車線道路トンネル(以降、Ⅰ期線トンネルと称す)に併設して、新設トンネル(以降、Ⅱ期線トンネルと称す)が建設される。Ⅱ期線トンネルの施工に際しては、Ⅱ期線トンネル自体の安定性のみでなく、Ⅰ期線トンネルへの影響も考慮することが重要となる。

本報告では、上信越自動車道永江トンネル工事で実施した補助工法の設計方法について示す。今回報告する小土被り部は、Ⅰ期線の拡幅部(非常駐車帯)に併設するために、一般部に比べてⅠ期線とⅡ期線のトンネル中心間の離隔が小さい条件であった。また、検討箇所と同じ地層において、Ⅰ期線トンネル

施工時に多量の湧水が発生し、トンネルには100mmを越える大きな内空変位が生じた<sup>1)</sup>。これらの条件から、Ⅱ期線トンネルの施工により、Ⅰ期線トンネルへ大きな影響を与えることが懸念された。供用中のⅠ期線トンネルに支障が生じた場合には、社会的問題を派生することも懸念され、Ⅱ期線トンネルの掘削を行うためには、Ⅰ期線トンネルの変形を抑制することが重要であった。

本報告では、Ⅰ期線への影響予測解析に基づく補助工法の設計手法を示す。そして、実施工データと予測解析結果を比較し、本設計手法の妥当性について考察する。

## 2. トンネル概要

### (1) 工事概要

本工事は、上信越自動車道(豊田飯山IC~信濃町IC間)の四車線化工事の一区間である(図-1参照)。

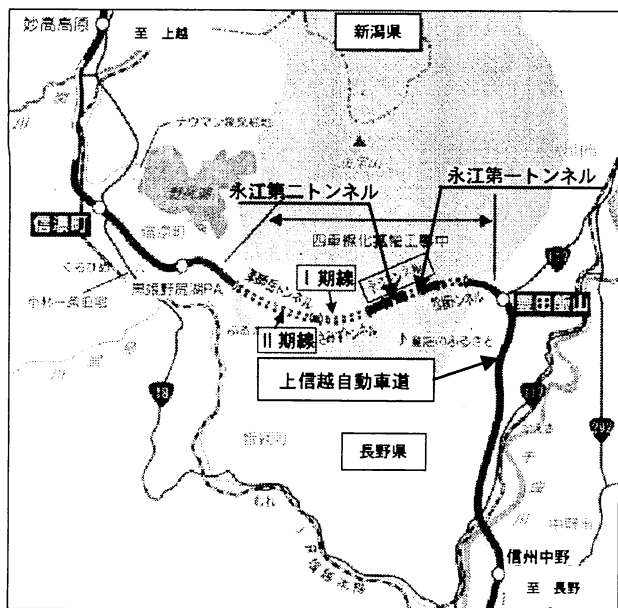


図-1 永江トンネル位置図

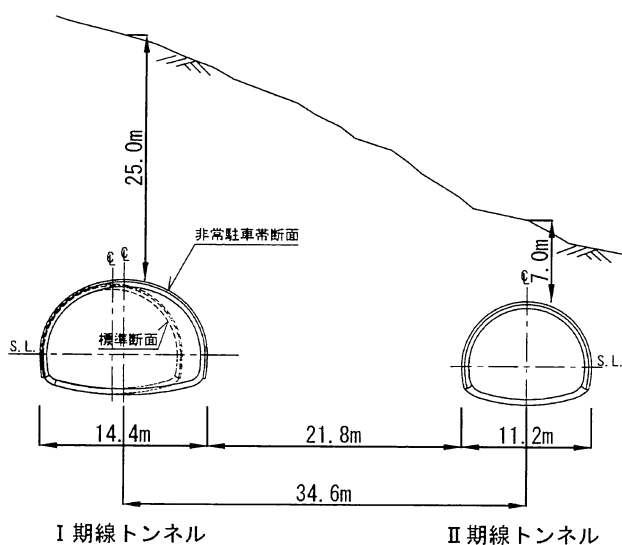


図-2 検討箇所断面図

当該区間には、永江第一トンネル(L=603m)、永江第二トンネル(L=244m)の2本のトンネル工事が含まれる。これらに併設するI期線トンネルは、NATMで施工され、1996年に竣工した。永江第一トンネルと第二トンネルともに、I期線とII期線のトンネルセンター間の離隔は、相互に影響が生じないとされるトンネル掘削幅D(D：I期線トンネルとII期線トンネルの掘削幅の平均値)の3倍(3D)以上<sup>2)</sup>確保されていた。しかし、今回の検討箇所である小土盛り箇所(永江第一トンネルSTA.221+0付近)については、I期線トンネルの非常駐車帯に位置し、トンネル断面がII期線側に拡幅されている(図-2参照)。そのため、

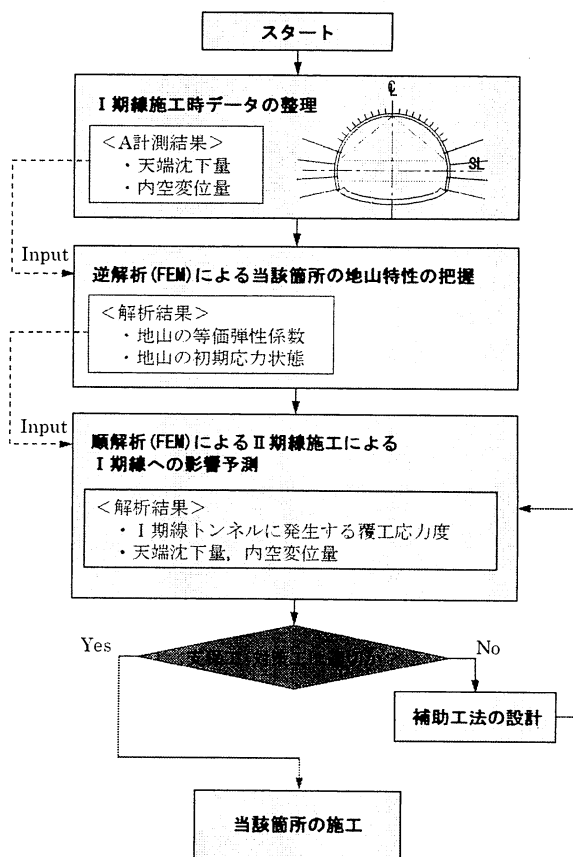


図-3 当該箇所の補助工法の設計フロー図

トンネルセンター間の離隔が3D以下となり、II期線施工により、I期線トンネルに影響を与えることが懸念された。

## (2) 地形・地質概要

永江トンネル付近は、斑尾山、飯綱山、黒姫山等の標高1,000~2,000m級の第四紀火山に囲まれ、丘陵性の低い山地となっている。地質は、新第三紀・鮮新世・飯山累層の大川層が主体であり、トンネル断面位置の地層は、砂岩・礫岩・含礫砂岩・泥岩・凝灰岩で構成されている。

今回の検討箇所は、泥岩、砂岩、礫岩が互層状に分布していて、泥岩については、固結度が小さく、低強度のものが出現する可能性があるとして想定されていた。また、当該箇所と同じ地層において、I期線施工時に、多量の湧水や大きなトンネル坑内変位(天端沈下135mm、内空変位108mm)が生じている。その上、II期線トンネルの土盛りが7m程度と小さくグラウンドアーチが形成されにくい条件であった。

これらの条件からも、II期線トンネル施工により、I期線トンネルに影響を与えることが懸念された。

表-1 逆解析入力値

項目		入力値
上半掘削時 坑内変位量 (mm)	天端沈下	269.6
	水平測線	216.6
	左斜め測線	62.6
	右斜め測線	69.0
土被り (m)		38.0
地山の単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )		21
ポアソン比		0.35

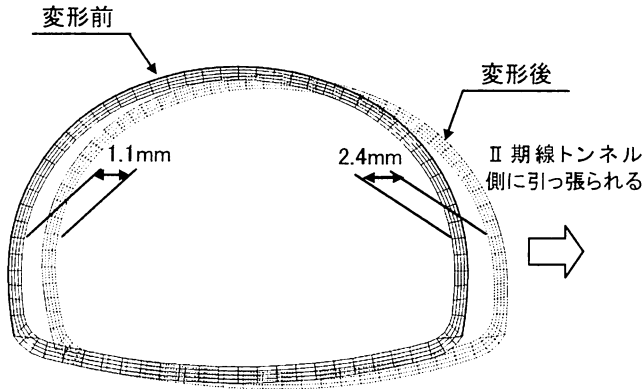


図-4 I期線トンネルの変形図(対策工なし)  
(図中の数値はII期線上半掘削による増分量を示す)

### 3. 変形抑制効果を考慮した補助工法の設計

#### (1) 補助工法の設計の考え方

当該箇所の補助工法を設計するにあたっては、II期線トンネルの安定性確保に加えて、I期線トンネルへの影響を考慮することが重要であった。また、合理的な設計を行うためには、I期線トンネル施工時の情報を有効に活用することが重要であった<sup>3)</sup>。

そこで、図-3に示す設計フローに従い、I期線トンネルの最大変位発生断面でのA計測データ<sup>1)</sup>を用いた逆解析を実施して、当該地層の地山条件を評価した。そして、この地質条件を入力値とした順解析を実施し、II期線トンネル施工によるI期線トンネルへの影響を予測した。その結果を踏まえ、対策工の必要性を判断し、必要な補助工法を設計した。

#### (2) I期線施工時の計測データを用いた逆解析

今回の検討で用いた逆解析(DBAP)<sup>4)</sup>は、I期線トンネル施工時に得られた変位量を入力値とし、最適化手法によって地山の等価弾性係数、初期応力状態を推定するものである。

逆解析では、切羽到達前の先行変位を含む全変位を入力値とするため、これを算出する必要があった。

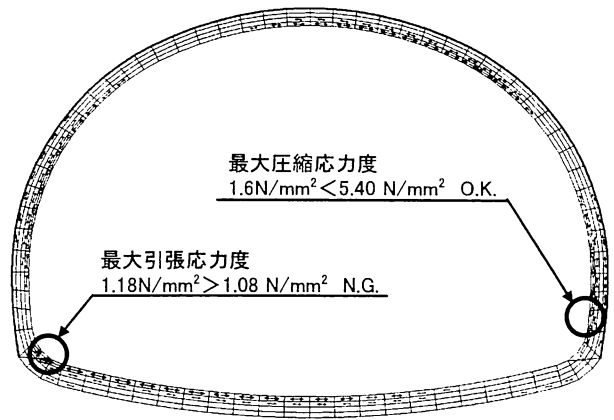


図-5 I期線トンネルの増加応力度(対策工なし)

一般的に、先行変位は、全変位の40%程度とされている<sup>5)</sup>。今回は、計測開始までのロスタイムを考慮し、50%として全変位(逆解析の入力値)を設定した(表-1参照)。

逆解析の結果、地山の等価弾性係数は、 $E=39,000\text{kN/m}^2$ と算出された。この値は、一般的な土砂地山の変形係数と同等の値であり、トンネル掘削により変形が生じやすい地山であると予測した。また、地山の側圧係数は $K=1.3$ と算出され、地山の応力状態は、鉛直方向応力に比べて、水平方向応力の方が大きく、トンネル掘削時に水平方向の変位が生じやすいと予測した。

#### (3) 影響予測解析に基づく対策工の検討

逆解析で得られた地山の等価弾性係数と初期応力状態を用いて、II期線トンネル掘削によるI期線トンネルへの影響予測解析(順解析)を実施した。このとき、逆解析断面と順解析断面の土被りの相違を考慮して換算した初期応力度の値を入力値とした。解析により得られた変形図を図-4に示す。このように、I期線トンネルはII期線側に引っ張られ、トンネル断面が水平方向に伸びる変形モードとなる解析結果となっていることがわかる。

そして、図-5のように、I期線トンネルのインバート左端部に、許容値( $1.08\text{N/mm}^2$ )を越える最大引張応力度( $1.18\text{N/mm}^2$ )が生じる結果となった。

この結果から、I期線トンネルに発生する引張応力度を許容値以下とするために、II期線トンネル施工時に、I期線トンネルの変形を抑制する補助工法が必要であると判断した。変形を抑制するための補助工法としては、AGF工法、パイプルーフ工法等の先受け工法や薬液注入工法等が一般に用いられる<sup>6)</sup>。補助工法の選定にあたっては、薬液注入工法は

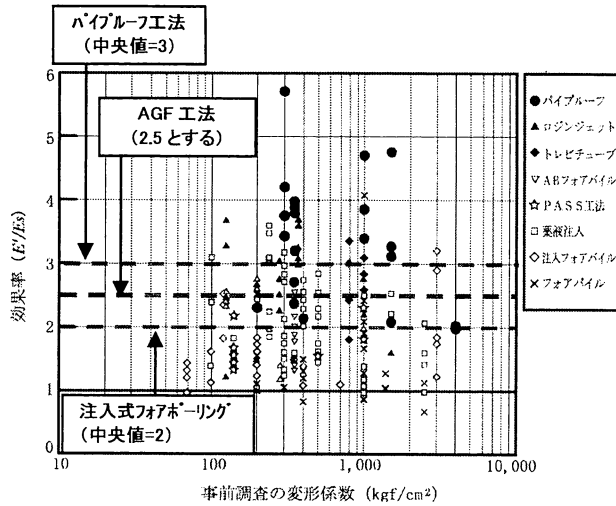


図-6 各補助工法の地山変形係数と効果率<sup>8)</sup>

表-2 AGF工法を考慮した順解析ステップ

Step	施工内容	地山弾性係数 (kN/m <sup>2</sup> )	応力解放率 (%)
1	初期応力解析	39,000	—
2	I 期線 上半掘削		40
3	I 期線 上半支保		60
4	I 期線 下半掘削		40
5	I 期線 下半支保		60
6	I 期線 インバート掘削		100
7	I 期線 インバート施工 覆工施工 II 期線 AGF工法施工		—
8	II 期線 上半掘削	97,500 ※ AGF工法の変形抑制効果を考慮し、地山全体の弾性係数を2.5倍する。	20
9	II 期線 上半支保		80
10	II 期線 下半掘削		40
11	II 期線 下半支保		60
12	II 期線 インバート掘削		100

高価であるため、先受け工法を選定することにした。そして、先受け工法のうち、当現場において既に使用していたドリルジャンボ(油圧削岩機)で施工可能であるAGF工法を選定した。当該箇所は、土被り7mの小土被り部であり、長尺先受け工であるAGF工法は、天端の安定確保にも効果的である。

次に、AGF工法を用いたときのI期線トンネルへの影響予測解析を実施した。AGF工法の効果を数値解析で表現する場合、トンネル上方の地表面沈下抑制効果については、AGF工法の設置領域(帯状)の弾性係数を向上させるモデル化が一般的である<sup>7)</sup>。しかし、トンネル側方の併設トンネルへの変形抑制効果をFEMで評価するときのモデル化の方法は確立されていない。そこで、今回の解析では、櫻井らの提

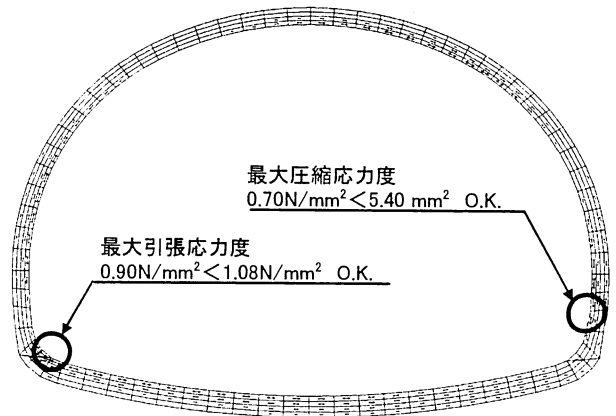


図-7 I期線トンネルの増加応力度(AGF工法あり)

案する「効果率」の考え方をFEMに取り入れた<sup>8)</sup>。効果率とは、補助工法による変形抑制効果を評価する一つの指標であり、施工時の計測データを用いた逆解析により求めた地山全体の等価弾性係数(E')と、事前調査における孔内載荷試験によって得られた地山の弾性係数(Es)との比(E'/Es)として定義される。すなわち、補助工法の変形抑制効果により、地山全体の見かけの弾性係数が向上すると考える。

図-6に示すように、これまでに多くのトンネルの施工実績から、各種補助工法の効果率が整理されている。櫻井によればパイプルーフ工法は2~4(中央値=3、図-6中の●印)、注入式フォアポーリングは1~3(中央値=2、図-6中の◇印)と評価されている。AGF工法の効果率については、図-6には示されていないため、これら2つの工法の間位置すると考えて2.5とした。そして、影響予測解析において、AGF工法施工後の解析ステップ(表-2中のステップ8以降)に対して、効果率の考えを適用した。前述のように、地表面沈下抑制効果を表現する場合には、AGF工法施工範囲のみ弾性係数を向上させるのが一般的であるが、今回の検討では、効果率の考え方を参考にして、地山全体の弾性係数を2.5倍(39,000×2.5=97,500kN/m<sup>2</sup>)とした。

また、既往の文献では、先受け工を用いた場合、先受け効果により、通常の前受け率よりも小さな値(10~30%)として解析を行っている事例がみられる<sup>7), 9)~12)</sup>。これらの実績を参考として、AGF工法を用いた場合の前受け率を20%とした。AGF工法を考慮した予測解析の結果を図-7に示す。このように、I期線トンネルに発生する最大引張応力度は0.9N/mm<sup>2</sup>となり、許容値である1.08N/mm<sup>2</sup>以下に抑制できる結果となった。この解析結果に基づき、AGF工法を用いることによって、I期線トンネルの安定性を確保できると判断した。

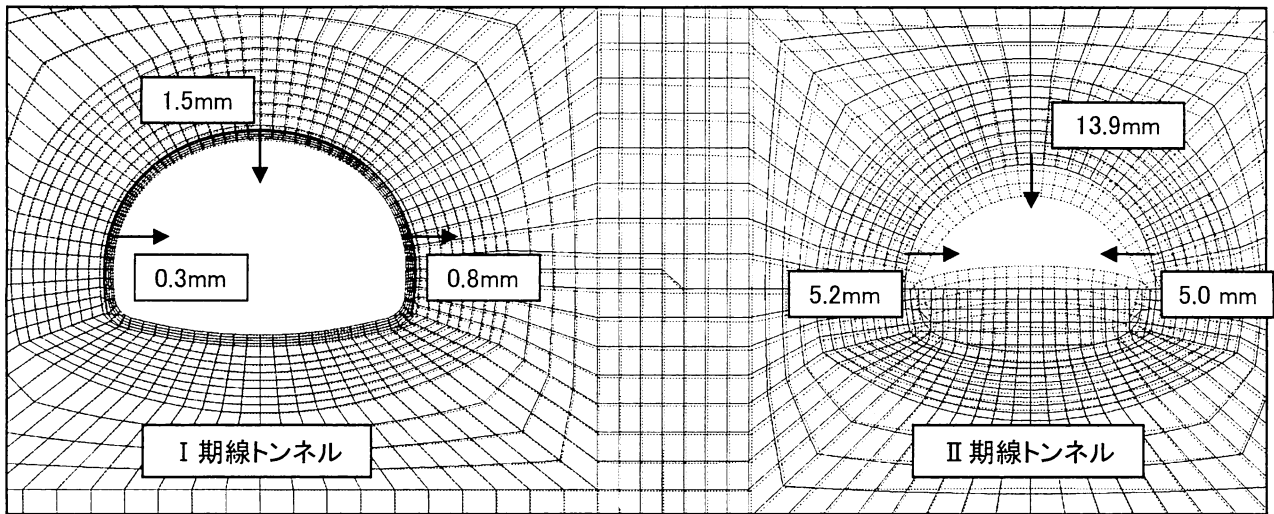


図-8 II期線トンネル上半掘削後の変形図(AGF工法あり)  
(図中の数値はII期線上半掘削による増分量を示す)

表-3 解析結果と計測結果の比較 (II期線トンネル掘削時の増分)

項目		沈下量(mm) (負値:沈下, 正值:隆起)					内空変位量(mm) (負値:縮小, 正值:拡大)				備考	
		1	2	3	4	5	A	B	C	D		
II期線 変位	上半掘削に よる増分	解析値※	-13.9	-14.5	-14.5	-	-	-10.2	-3.7	-3.7	-	
		計測値	-9.2	-17.1	-14.1	-	-	-14.5	0.3	-4.3	-	
	下半掘削に よる増分	解析値※	13.9	12.1	12.0	8.4	8.3	-9.3	-2.4	-2.4	-12.8	
		計測値	-5.1	-16.9	-4.0	-13.1	-1.4	-18.7	-0.7	-7.1	-18.1	
I期線 変位	上半掘削に よる増分	解析値※	-	-	-	-	-	0.5	-	-	-	
		計測値	-	-	-	-	-	0.5	-	-	-	
	下半掘削に よる増分	解析値※	-	-	-	-	-	0.7	-	-	-	
		計測値	-	-	-	-	-	3.1	-	-	-	

※ 解析値は、計測可能変位量を抽出し、表中に示した。

#### 4. 計測結果と予測解析結果の比較検討

本章では、計測結果と予測解析結果を比較し、今回の設計手法の妥当性を検証する。

表-3に、II期線トンネル施工による計測値と解析値を示す。同表には、「上半掘削による増分変位量」と「下半掘削による増分変位量」をそれぞれ示した。この結果から、上半掘削時に関しては、II期線トンネル、I期線トンネルのいずれについても、計測値と解析値が概ね一致していることがわかる。この結果から、効果率の考え方をFEM予測解析に取り込むことによって、上半掘削時のAGF工法の変形抑制効果を十分な精度で予測できたといえる。

それに対して、下半掘削時については、計測値と解析値に差異が生じる結果となった。特に、実施工

において、II期線トンネル全体が沈下する挙動を示した点が、解析値と大きく異なる。当該施工においては、脚部の支持力確保のための対策工として、ウィングリブ付き鋼製支保工を採用していた。しかし、下半脚部付近に、想定よりも低強度の泥岩が出現したため、脚部沈下が発生し、トンネル全体が沈下する挙動を示した。そこで、インバート吹付けによるトンネル断面の閉合を実施し沈下を収束させた。

このような脚部沈下については、当然、これを防止するための脚部対策工の検討が重要である。しかし、地山条件によっては、本報告のように、対策工を施しても脚部沈下が生じる可能性がある。今回の予測解析で用いたFEMでは、このようなトンネル全体が沈下する変形モードを表現することは難しい。今後、脚部沈下に対する配慮が特に必要となるとき

には、有限差分解析 (FLAC) のようなトンネル全体の沈下挙動を表現できる数値解析手法<sup>13)</sup>の適用も検討する必要があると考える。

また、Ⅰ期線トンネルの内空変位についても、Ⅱ期線トンネルの下半掘削時の計測値と解析値に差異がみられ、計測値は、解析値の4.4 (=3.1/0.7) 倍程度の大きな値となった。これも、FEMでは、Ⅱ期線トンネル全体の沈下挙動の表現が難しいことに起因すると考える。

このように、設計段階において、下半掘削時の影響を十分に評価できなかったものの、Ⅱ期線トンネル施工前後に実施したⅠ期線トンネルの調査結果から、当該箇所での覆工コンクリートのクラックの増加は認められず、Ⅰ期線トンネルへの影響を抑制しながら、Ⅱ期線トンネルを施工することができた。これは、管理基準値による監視体制に基づき、迅速に、仮インバートによる断面閉合等の対策を実施し、変形を抑制できたためであると考えられる。このように、事前に、Ⅰ期線への影響を考慮した監視体制を計画し、トンネルの挙動を監視しながら施工することが重要である。

## 5. まとめ

本報告では、Ⅰ期線トンネルの変形抑制のための補助工法の設計について述べた。今回の施工では、変形抑制のための補助工法として、AGF工法を採用し、Ⅰ期線トンネルに、変状や新たなクラックを発生させることなく、Ⅱ期線トンネルの掘削を完了することができた。

今回の補助工法の設計にあたっては、FEMによる影響予測解析を実施した。このとき、補助工法の変形抑制効果を数値解析で表現するために、「効果率」の考え方を採用し、地山全体の弾性係数を向上させて解析を実施した。その結果、上半掘削時の挙動については、計測値と解析値が概ね一致する結果となり、効果率の考え方をFEMに取り込むことにより、Ⅱ期線トンネル施工によるⅠ期線トンネルへの影響を予測することができた。

しかし、下半掘削時については、予測解析結果よりも大きな影響がⅠ期線トンネルに生じる結果となった。これは、下半掘削時に、FEMでは表現が難しいトンネル全体の沈下挙動を示したことが要因の一つであると考えられる。今後、下半掘削時に沈下が生じる懸念がある場合には、これを表現できる有限差分解析 (FLAC) 等の適用も考えていく必要がある。

また、事前に、Ⅰ期線への影響を考慮した監視体制を計画し、トンネルの挙動を監視しながら施工することが重要である。

## 参考文献

- 1) 日本道路公団 名古屋建設局 中野工事事務所：上信越自動車道日影トンネル工事 工事報告書，1996。
- 2) 東日本高速道路（株）：設計要領第三集 トンネル編，p.5，2006。
- 3) 中川浩二，青木宏一，進士正人，廣井和也，嵯峨正信，岩井勝彦：Ⅰ期線施工結果を活用したⅡ期線トンネルの合理的な支保設計，土木学会論文集，No.721/VI-57，pp.81-93，2002。
- 4) 櫻井春輔，武内邦文：トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法，土木学会論文報告集，No.337，pp.137-145，1983。
- 5) 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室：トンネル数値解析マニュアル，p.2-32，1998。
- 6) 2006年制定トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，土木学会，p.187，2006。
- 7) ジェオフロンテ研究会：注入式長尺先受工法 (AGF工法) 技術資料 (五訂版) —AGF工法の考え方とその適用—，p.54，p.188，2006。
- 8) 櫻井春輔編著：都市トンネルの実際 合理的な設計・施工法をめざして，鹿島出版会，pp.84-85，1998。
- 9) 山本秀樹，木谷努，岡嶋正樹，海瀬忍：AGFを用いたトンネルの地表面沈下予測手法について，土木学会第57回年次学術講演会，pp.501-502，2002。
- 10) 藤村三喜男，山野賢治，原田浩史，須藤敏明：国内初の2層道路トンネル 首都圏中央連絡自動車道 青海トンネル，トンネルと地下，Vol.29，No.9，pp.15-25，1998。
- 11) 近接施工技術総覧編集委員会：近接施工技術総覧，pp.77-78，1997。
- 12) 飯島興二，梅木信夫，高橋聖二，千代谷朝男：幹線道路直下を90mのパイプルーフで克服 東北新幹線市川トンネル，トンネルと地下，Vol.37，No.6，pp.7-16，2006。
- 13) 亀谷英樹，真田昌慶，板垣克利：併設トンネルの掘削影響解析と現場計測結果，第12回岩の力学国内シンポジウム 併催：第29回西日本岩盤工学シンポジウム，pp.569-576，2008。