早期閉合における2次元 FEM 解析による 変位および支保工応力の再現性について

内藤 雅人1・三上 英明2・生島 直輝3・前田 佳克4・畔津 伸彦5

¹正会員 戸田建設(株) 土木技術部技術 1 課 (〒104-0032 東京都中央区八丁堀 2-8-5) E-mail: masato.naitou@toda.co.jp

²正会員 戸田建設(株) 大阪支店 (〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町 1-13-47) E-mail: hideaki.mikami@toda.co.jp

³正会員 戸田建設(株) 大阪支店 (〒550-0005 大阪府大阪市西区西本町 1-13-47) E-mail: naoki.ikushima@toda.co.jp

⁴正会員 西日本高速道路(株) 関西支社 新名京都事務所 (〒607-8034 京都府京都市山科区四ノ宮泓 37) E-mail: y.maeda.aa@w-nexco.co.jp

⁵ 西日本高速道路(株) 関西支社 新名京都事務所 (〒607-8034 京都府京都市山科区四ノ宮泓 37) E-mail: n.azetsu.aa@w-nexco.co.jp

山岳トンネルにおける安定解析は3次元モデルによる検討が望ましいが、コストや時間等の問題で簡易 的な2次元モデルによる解析が実施されることも多い、今回着目した早期閉合を対象とする2次元解析は、 既往文献内でいくつか解析手法が提案されている。しかしながら、それらの解析手法は最終変位を推定す るための解析方法であり、文献内では支保工応力等は検証されていない、そこで、応力開放率の設定方法 を変えた3ケースの2次元解析を実施・検証し、変位および支保工応力の再現性について検討した、検討結 果をもとに、次施工において簡易に実施できる2次元モデルを用いた解析手法を提案した。

Key Words: numerical analysis, stress release rate, earil closure invert

1. はじめに

本工事は、城陽〜大津間に計画されている新名神高速 道路のうち、宇治田原地区の施工を行う工事であり、切 盛土工、橋台を含むトンネル工主体の道路新設工事であ る.この宇治田原トンネル東工事は、工事延長2,068m、 トンネル延長2,094m(上り線:1,162m 下り線: 932m)、内空断面積125 mの道路トンネルを築造するも のである(図-1).

トンネル掘削に際して,起点側坑口部小土被り区間で 補助工法等の検討を2次元 FEM 解析を使用して実施し た.起点側坑口部での解析結果を次施工へと活かすため, 本稿では,早期閉合掘削における2次元 FEM 解析の解析 方法と応力開放率に関して、変位量および支保工応力の 再現性に着目して検証を行った。検証結果について報告 する.



図-1 本工事施工位置図

2. 工事概要

(1) 起点坑口部地質地形概要

当トンネル起点坑口部には、未固結の崖錐堆積物が厚 く分布し、且つ土被り4~7mの小土被り区間が約80m存 在している.この崖錐堆積物は粘土混りの砂礫からなり、 トンネル掘削時に周辺地盤の崩落が懸念された(図-2).

崖錐堆積物の下には全体的に亀裂が発達し部分的に破 砕質な大阪層群が 6~10mの厚さで分布しており、その 下には細~中粒珪長質砂岩を主体とした硬質塊状岩盤で ある丹波層群が分布している.地形は北西から南東にかけて緩く傾斜している.

(2) トンネル概要

本トンネルは3車線断面(掘削断面積145.272m²)の 超大断面トンネルである(図-3). 脆弱な崖錐堆積物が 分布する坑口部では、トンネルおよび周辺地山の不安定 化が懸念され、当初設計で長尺鋼管先受け工が見込まれ ていたものの、各種補助工法と早期閉合等の対策検討が 重要課題とされた.本工事の工事概要を表-1に示す.



図-2 地質平面・縦断図(上り線)



図-3 DⅢa(H)1-B 標準断面図

表-1 工事諸元

工事名	新名神高速道路宇治田原トンネル東工事			
発注者	NEXCO西日本関西支社新名神京都事務所			
施工者	戸田建設(株)			
工事場所	京都府綴喜郡宇治田原町禅定寺~荒木			
工期	2018年5月~2022年11月(当初)			
	掘削断面積 145m ² (DI)			
工事内容	(内空断面積 125m ²)			
	掘削延長:上り線 1,162m:下り線 932m			

3. 坑口部対策工検討

本トンネル断面は,前述のとおり山岳道路トンネルの 中でも掘削断面積が非常に大きいため,坑口部を含む小 土被り区間を対象に2次元FEM解析を行い,各種補助工 法の対策検討,周辺地山の安定性検討を実施した.

(1) 解析条件

解析断面は上り線起点坑口部の調査ボーリング位置 (No. 22+40) に設定した.解析モデルを図-4に示す. 解析手法は、トンネル掘削解析として多用される2次元 非線形弾性解析を用いた.事前の地質調査より設定した 地盤物性値を表-2に、支保工の物性値、長尺鋼管先受け 工による改良物性値を表-3,4に示す.

(2) 解析結果

FEM解析による各補助工法,早期閉合等の比較検討を 行った結果,アーチ部 180°範囲に注入式長尺鋼管先受 け工,注入式脚部補強工,インバートストラット併用に よる早期閉合を実施することでトンネル及び周辺地山の 安定が確保される結果となった.

なお、二次元解析における早期閉合時の応力解放率 α は、解析ステップや応力解放率 α をパラメータとした 2 次元解析と 3 次元解析を比較検討した既往文献 ¹)に準拠 し、補助ベンチ付き全断面掘削、全断面支保の 2 ステッ プでトンネル掘削を再現した(表-5).その際の応力解 放率は α =10~30%であることから、本検討では α =20% を採用し、全断面支保時(上半~一次インバート)の応 力解放率 α =80%とした.



図-4 解析モデル

記号	地層区分	単位体積重量 γ(kN/m ³)	粘着力 C(kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ(°)	初期変形係数 E o(kN/m ²)	初期ポアソン 比 <i>v</i> o	弾性限界パラ メータk	非線形 パラメータ a
dt	崖錐堆積物	18	0	34	7,000	0.40	2.0	1.0
Og	大阪層群	20	0	21	43,000	0.40	2.0	1.0
Tss	丹波層群	22	100	39	200,000	0.35	4.0	2.0

表-2 地盤物性値

表-3	支保工物性值

支保工	弾性係数 E(kN/m ²)	断面二次 モーメントl (m ⁴)	断面積 A (m ²)	モデル
高強度吹付けコンクリート(t=25cm)+ 高規格鋼アーチ支保工(HH-200)の合成部材	1.135E+07	8.849E-04	2.500E-01	ビーム要素
高耐力ロックボルト(M27,SD700),L=6m	2.100E+08	_	5.270E-04	トラス要素

表4 先受け工による改良物性値

+uh. I.	地山変形係数	鋼管変形係数	注入材変形係数	等価剛性	採用等価剛性
地山	(kN/m ²)	(kN/m^2)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m^2)
dt	7.000E+03	2.100E+08	3.500E+05	5.546E+05	5.546E+05

表-5 全断面工法(補助ベンチ付き全 断面工法を含む)による早期閉 合の2次元解析ステップ¹⁾



4. 施工結果

解析結果より採用した対策工を講じてトンネル掘削を 行った結果、切羽に見られた崖錐堆積物は脆弱であり、 鏡面からの肌落ちが見られたものの、解析断面近傍のト ンネル天端最終沈下量は解析結果の70%程度の変位量と なり、安全に掘削を完了した.このことから、事前解析 による天端沈下量の予測は妥当な結果であったといえる

(図-5).

今回実施した2次元FEM解析では、補助ベンチ付き全 断面工法による早期閉合をモデル化する手法として、表 -5に示す解析ステップを使用したが、当方法は最終変位 量を推定するための解析方法であり、文献^Dでは、掘削 時の支保工応力等は検証されていない.今後、早期閉合 を適用した際に支保工に作用する応力を精度よく推定し、 支保工の妥当性を検証すること.さらに、下り線掘削に おいては、上り線の支保工および覆工への影響が懸念さ れ、変位および支保工応力等を精度よく推定することが 重要と考えた.

トンネルの安定解析は3次元的な現象となるため、本 来、3次元解析による検討が望ましいが、3次元解析は2 次元解析に比べ、時間とコストなどの問題から、地山が 急変した際などに早急な対応が難しく、2次元モデルで 検討される場合も多い.このことから、前述した検討課 題に対して、精度よく変位および支保工応力を推定する 2次元モデルを使ったを早期閉合を対象とした解析手法 を導くことを今回の目的とした.

そこで,実計測結果に合致する解析ステップおよび応 力開放率を変えた3ケースの2次元解析を実施し,これ らによる変位,支保工応力結果と3次元解析より得られ た変位,支保工応力結果を比較することで,各ケースの 妥当性を検証した.検証結果を以下に示す.



図-5 天端沈下計測結果(No. 22+42)

5. 早期閉合をモデル化した2次元解析手法の検証

(1) 3次元逆解析による地盤物性値の見直し

施工結果より得られたトンネル天端沈下量を再現する 早期閉合をモデル化した3次元FEM逆解析(図-6)を実 施し,地盤物性値を見直した結果,トンネル周辺の崖錐 堆積物および大阪層群の物性値は事前調査で得られたも のに比べ変形係数を概ね3.5倍することで,A計測で得 られたトンネル天端沈下を再現することができた.見直 した地盤物性値を表-6に示す.さらに,無支保3次元解 析より得られた地山の特性曲線を図-7に示す.ここで得 られた新規地盤物性値と特性曲線を以降の2次元解析の 検証に使用した.



図-6 3次元解析モデル

表-6 見直した地盤物性値

地層区公	当初設定した変形係数 逆解析により見直した変形		
心自区力	E o(kN/m2)	E o'(kN/m2)	
崖錐堆積物	7,000	24500	
大阪層群	43,000	150500	



図-7 3次元解析から得られた特性曲線

(2) 解析ケース

早期閉合掘削における解析手法の検証として,解析ス テップを変えた以下に示す3ケースで検証を行った.

a) Case①—2ステップによる解析

前述の事前解析で設定した表-5 に示す補助ベンチ付き 全断面掘削,全断面支保の2ステップの解析ステップを 使用し,応力開放率を 20%-80%, 30%-70%, 40-60%に設 定した3パターンの解析を実施した.

b) Case②-6ステップによる解析

表-7に示すショートベンチカット工法の2次元解析ケ ースにインバート掘削,インバート支保のステップを追 加し, Case①と同様に応力開放率を変化させた3パター ンの解析を実施した.

c) Case③—加背ごとに開放率を変化させた 4 ステップ による解析

前述の解析 Case②では全ての加背に同じ掘削開放率を 適応しているのに対して、上半・下半・インバートの切 羽離れに応じた応力開放率を求め、加背ごとに開放率を 与えることで早期閉合の効果を評価した例³を参考に、3 次元解析より得られた特性曲線より設定した4ステップ の応力開放率による解析を実施した(図-8).

解析条件をまとめたものを表-8に示す.なお,事前解 析同様に非線形弾性解析(電中研モデル)で解析を行っ た.また,支保部材は3次元解析との比較を行うため, 合成部材ではなく、吹付けコンクリート(トラス要素), 鋼製支保工(梁要素)をそれぞれモデル化した.

表-7 ショートベンチカット工法の二次元解析ステップ¹⁾



表-8 解析ケースと条件

解析ケース	解析ステップ	応力開放率	
①-1		20%-80%	
①-2	2ステップ (全断面掘削-全断面支保)	2ステップ (全断面掘削-全断面支保)	30%-70%
①-3		40%-60%	
2-1	6ステップ	20%-80%	
2-2	(上半掘削-上半支保 -下半掘削-下半支保	30%-70%	
2-3	-インハート掘削-インハート支保)	40%-60%	
3	4ステップ		



図-8 特性曲線より求めた応力開放率設定

(3) 解析結果

a) 天端沈下

解析結果として、3次元解析と各ケースの天端沈下量 と天端沈下割合を比較したものを図-9、10に示す.天端 沈下とはトンネル天端における地山の鉛直方向の変位と した.

いずれの2次元解析結果も3次元解析結果と比べ,天端沈下量は少ない値となった.3次元解析では,一般的に地山等級が小さいほど切羽付近の地山の強度低下が顕著に現れ,先行変位が増加するため,いずれの2次元解析よりも最終変位が大きくなったと考えられる.一方, 2次元解析の解析ケースを比較すると,解析 Case2,③に比べて,解析 Case1の最終変位量が抑えられているのは,断面を円形に閉合することでトンネル上下半脚部の強度低下が抑制された結果であり,ショートベンチカット工法の解析ケースに比べ,全断面工法による早期閉合の効果を表している.

今回の解析結果を見ると、当現場条件においては Case ②の6ステップモデルの応力開放率40-60%が最も3次元







解析の最終変位量に近い結果となった.しかしながら, 図-10 に示す切羽進行ごとの変位率を比較すると, Case ②では上半通過までの先行変位が過小評価され,上半通 過後の変位量が大きくなっていることに留意する必要が ある.

地山の特性曲線より応力開放率を設定した Case③では, 3 次元解析の最終変位量 106mm に対し 88mm と比較的近 い最終変位量が得られ,なおかつ上半通過までの先行変 位率も Case②と比べ近い値が得られた.

b) 吹付けコンクリート断面力

吹付けコンクリートに作用する断面力(軸力)とその 発生割合を図-11,12に示す.解析の結果,3次元解析結 果に比べ Case①では、同等かそれ以上の断面力が作用す る結果となった. Case①で採用した2ステップの解析手 法は、変位抑制効果は高いが、支保工に作用する断面力 は大きくなる可能性があることを示している.

一方, Case²), ③では 3 次元解析の値よりも小さな値 となり,支保に作用する断面力を過少に評価する懸念が ある.



図-10 切羽進行ごとの天端沈下の変位率





地山の特性曲線から応力解放率を設定した Case③を見 ると、断面力の発生量は3次元解析に比べて小さいもの の、図-12 に示す切羽進行に応じた断面力の発生割合で は、3次元解析結果と比較的近い結果が得られた.この ことから、支保工に作用する断面力の切羽進行ごとの傾 向を導くには、Case③の手法は当現場条件において有効 であるといえる.

c) 鋼製支保工断面力

鋼製支保工に作用する断面力(軸力)とその発生割合 を図-13, 14 に示す. 2 次元解析の結果は吹付けコンクリ ートに作用する断面力と同様の傾向がある. これは, 2 次元モデルでは,吹付けコンクリートと鋼製支保工が同 じ位置にモデル化されるためと考えられる. 一方,図-14 の中で 3 次元解析の断面力の発生割合を見ると,図-12 に示す吹付コンクリートに作用する断面力に比べ,下 半通過時の軸力発生割合が大きくなっていることがわか る. これは,3 次元解析では,吹付けコンクリートに比 べ,鋼製支保工のほうがより切羽に近い位置に設置され, 下半掘削時の応力再分配の影響を大きく受けたためと考 えられる.

3 次元解析と各ケースの 2 次元解析の比較を行ったが, FEM 解析の支保部材の応力値は降伏や破壊応力値と比較 できるほど高い精度ではないことや,3 次元解析と 2 次 元解析では支保工の設置時期が異なるために応力の発生 モードが異なっており,3 次元解析の再現性が低いこと に留意が必要である.

6. 次施工への反映

前述の 2 次元解析手法の検証の結果,当現場条件において以下のことがわかった.



[・]最終変位量を予測するためには、ショートベンチカッ

図-13 切羽進行ごとの鋼製支保工断面力(軸力)

ト工法の解析手法 Case2(応力解放率40-60%)が最も精度よく再現することができる.

・地山の特性曲線をもとに加背ごとに設定した Case③を 用いると、3 次元解析に比較的近い最終変位量が得られ るうえに、先行変位率も近い値となる.

・支保工に作用する断面力の最終値が最も再現されるのは、全断面工法による早期閉合をモデル化した Case①である.

・切羽進行に伴う断面力の発生割合は地山の特性曲線より応力開放率を設定した Case③において、3 次元解析と近い傾向が得られる.

今後のトンネル掘削において, 脆弱地山の出現により 早期閉合を検討する際や下り線施工時の上り線への影響 を検討する際には, 最終変位量が比較的精度よく再現さ れ, 切羽進行に伴う断面力の発生割合が3次元解析に近 い Case③の解析手法が最も有効と思われる. その際, 支 保に作用する断面力は過少に評価されることに注意が必 要であり,解析目的によって今回得られた当現場におけ る解析傾向を考慮し, 解析手法を使い分けることも必要 と考える.

なお、加背ごとに応力解放率を変化させた Case③では、 3 次元解析で得られた天端沈下量をもとに解放率を決定 したが、上り線掘削時の坑内変位計測結果をもとにして、 支保工設置後の切羽進行に応じた解放率を適用すること で、より実現象に近い 2 次元解析が可能になると考えら れる.また、より実用的な 2 次元解析手法確立のために は、特性曲線や支保工応力把握のための B 計測の実施し、 解析結果を検証することが必要である.

7. おわりに

今回,複数のケースを用いて早期閉合掘削における2 次元解析の解析手法について検証した.3次元解析結果



図-14 切羽進行ごとの鋼製支保工断面力の割合(軸力)

と比較して、変位量、支保工応力ともに精度よく再現で きる理想的な解析手法は導くことができなかったが、当 現場条件における2次元解析の特徴を把握できた.

これにより、多くの時間とコストを要すると言われる 3次元解析を用いなくとも、ある程度の再現性がある 2 次元解析が可能となった.

当現場は令和3年7月末時点で上り線423m/1,162mま で掘削しており、今後の早期閉合を適用した際の安定検 討や下り線掘削時の上り線支保工・覆工への影響検討に 対し、今回検証した解析方法を役立てる予定である. 参考文献

- 真下英人,水川雅之,日下敦:トンネル早期閉合効 果に関する解析的検討,トンネル工学報告集,第17 巻,2007.
- 2) 大塚勇,今塩屋勝,吉川真仁,髙橋聡尚,篠崎哲明: I 期線トンネルに接近するⅡ期線トンネルの影響予測と対策工について、トンネル工学報告書、第26巻、2016.

(2021.8.6 受付)

IEPRODUCIBILITY OF DISPLACEMENT AND SUPPORT STRESS BY 2D FEM ANALYSIS IN EARLY CLOSURE

Masato NAITOU, Hideaki MIKAMI, Naoki IKUSHIMA, Yoshikatsu MAEDA and Nobuhiko AZETSU

It is desirable to examine the stability analysis in mountain tunnels using a three-dimensional model, but due to problems such as cost and time, analysis using a simple two-dimensional model is often carried out. For the two-dimensional analysis targeting early closure, which we focused on this time, several analysis methods have been proposed in the past literature. However, these analysis methods are analysis methods for estimating the final displacement, and the support stress etc. have not been verified in the literature. Therefore, we conducted and verified two-dimensional analysis of three cases with different stress release rate setting methods, and examined the reproducibility of displacement and support stress. Based on the examination results, we proposed an analysis method using a two-dimensional model that can be easily implemented in the next construction.