

トンネル早期閉合効果に関する解析的検討

Study on immediate ring closure effect in tunneling through numerical analysis

真下英人¹・水川雅之²・日下敦³

Hideto Mashimo, Masayuki Mizukawa and Atsushi Kusaka

¹正会員 工博 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

E-mail:mashimo@pwri.go.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

³正会員 工修 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6)

Immediate ring closure method is increasingly adopted as a countermeasure against surface subsidence caused by excavation of shallow tunnel. However, the mechanism of this method is not solved sufficiently. In this paper, the effect upon subsidence restraint of immediate ring closure for shallow tunnel in soft ground is discussed through 3D numerical analysis. And stress-release ratio is examined with the aim of evaluating the effect by using 2D numerical analysis.

Key Words : immediate ring closure, surface subsidence, foot subsidence, 3D excavation analysis, temporary invert

1. はじめに

近年、山岳工法の適用範囲は、トンネルの社会的ニーズの多様化に伴って、一層の広がりが見られ、都市部等の厳しい条件下での施工事例も増加している。従来の山岳工法では、掘削の安全性を確保するうえで、切羽の自立を重視し、地山が軟弱な場合、加背を小さくするショートベンチカット工法が主流であったが、近年の補助工法の進歩に伴い、土砂地山などにおいても切羽を補強することにより補助ベンチ付き全断面工法で早期に断面を閉合し、トンネルの内空変位や地表面沈下を抑制した例¹⁾²⁾も増えつつある。このように早期の断面閉合（以後、早期閉合）が経験的に有効であることは知られてきたが、このシステムをより合理的に実施するには、早期閉合による沈下抑制メカニズムを解明し、効果的な閉合方法とその設計法（対策効果を定量的に評価する手法）を確立する必要がある。

そこで、著者らは、都市部の軟弱な地山中を小土かぶりで掘削するトンネルを想定し、そこに通常のショートベンチカット工法によりトンネルを掘削した場合と補助ベンチ付き全断面工法による早期閉合によりトンネルを掘削した場合、トンネルの内空変位や周辺地山の挙動にどのような違いが生じるかに

ついて三次元数値解析を用いて検討した。また、三次元解析の結果と応力解放率等をパラメータとした二次元解析の結果を比較することで、補助ベンチ付き全断面工法によるトンネル掘削時の挙動に対する二次元解析の適用性を検討した。

2. 早期閉合効果に関する解析的検討

本章では、トンネルの掘削サイクルを忠実に考慮した三次元数値解析により、早期閉合がトンネルの内空変位や周辺地山の挙動に与える影響について検討した。用いた解析コードは三次元有限差分法解析（FLAC3D³⁾）で、連続体解析で大変形の表現が可能である。そのため、塑性化するような軟質な地山のモデル化には適している。

(1) 解析条件

a) 解析モデル

三次元解析の解析モデルを図-1に示す。トンネルの掘削径(D)は10.6mとし、土かぶりは都市部の小土かぶりを想定して1Dとした。

地山は2層構造とし、下層の地山および支保工部材を弾性体、上層の地山をMohr-Coulombの破壊基準に従う完全弾塑性体とした。

解析領域は掘削の対称性を考慮して半断面とし、境界条件は、上面を地表面として自由面、4方向の側面をローラー境界、底面は固定境界とした。

初期応力は、側圧係数 k_0 を0.5として、各要素に土被り厚さ相当の自重を作用させた。

解析における掘削は、先ず境界の影響を避けるため、2Dまでを全断面一括掘削した。その後、1m逐次掘削により所定のベンチ長を確保後、本掘削では上・下半を1mずつ掘削した。

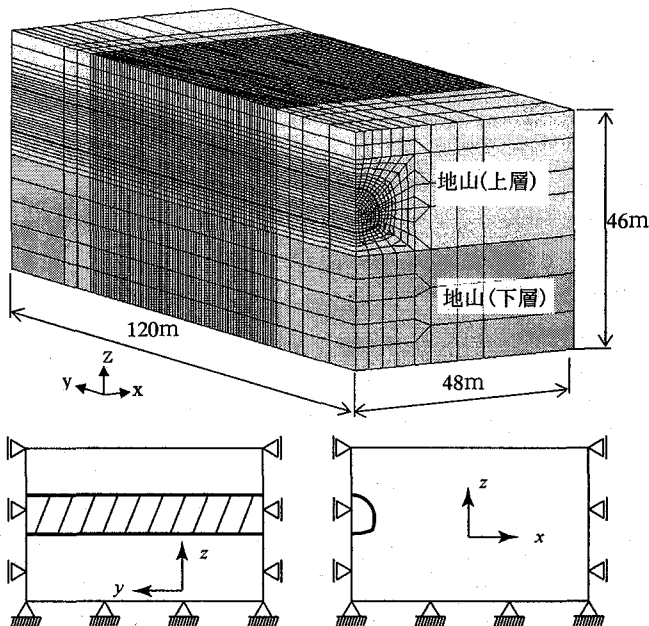


図-1 三次元解析モデル

b) 解析物性値

表-1に解析に用いた物性値を示す。地山は、上の層には実現場におけるN値20程度の未固結地山²⁾、下の層には地山等級DⅡ程度を想定して、その代表的な物性値⁴⁾を設定した。支保工は、DⅢパターン程度を想定して、鋼アーチ支保工(H-200、建込間隔1.0m)、吹付けコンクリート(厚さ $t=25\text{cm}$)の合成部材として設定した。また、一次インバート部も同様に鋼アーチ支保工(H-200、建込間隔1.0m)、吹付けコンクリート(厚さ $t=25\text{cm}$)の合成部材とした。

c) 解析ケース

表-2に解析ケースの一覧を示す。

解析は、掘削工法を①ショートベンチカット工法、②ショートベンチカット工法に補助工法として上半仮インバート、③補助ベンチ付き全断面工法で、正規のインバートの下にH鋼と吹付けコンクリートによるインバートを切羽面に近接して施工する一次インバート(一次インバートの施工位置：③上半切羽の5m後方、④上半切羽の3m後方、⑤上半切羽の1m後方)とした5ケースについて実施した。

表-1 解析に用いた地山と支保の物性値

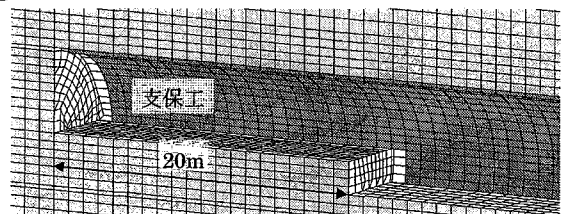
	弾性係数 (MPa)	ポアソン比	粘着力 (MPa)	内部摩擦角 (°)	単位体積重量 (kN/m ³)
地山(上層)	20	0.35	0.05	25	20.0
地山(下層)	150	0.35	—	—	22.0
支保工、一次インバート	8,650	0.25	—	—	23.8
上半仮インバート	4,000	0.20	—	—	23.0

表-2 三次元解析ケース一覧

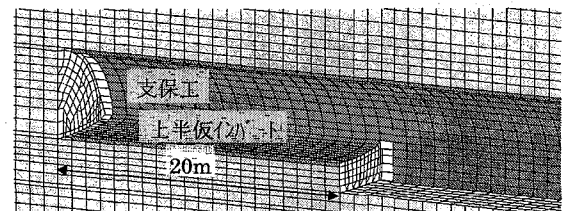
ケース	掘削工法	ベンチ長(m)	上半仮インバート	一次インバート(閉合位置)	モデル
①	ショートベンチカット	20	—	—	弾塑性
②	カット		●	—	
③	補助ベンチ	5	—	●(切羽後方5m)	
④	付付き全断面	3	—	●(切羽後方3m)	
⑤	断面	1	—	●(切羽後方1m)	

掘削概要図

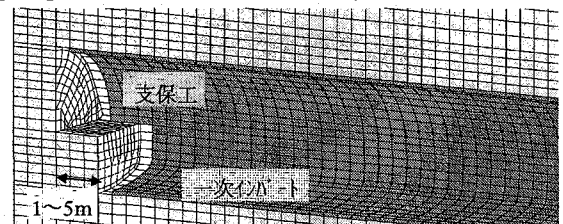
① ショートベンチカット



② ショートベンチカット + 上半仮インバート



③～⑤ 補助ベンチ付き全断面 + 一次インバート



(2) 解析結果

解析結果から得られた各工法における切羽の進行と変位の関係(変位特性曲線)を図-2～4に示す。図-2～4より、上半仮インバートや一次インバートが

主に切羽通過後のトンネル変位の抑制に有効に作用していることが分かる。ただし、上半仮インバートについては、下半掘削前までの変位は大きく抑制するが、その後の下半掘削時には比較的大きな沈下が発生する結果となっている。

表-3に各工法におけるトンネル周辺地山の塑性領域を示す。図中の灰色部が塑性領域を示しており、ショートベンチカット工法で上・下半分離施工を行った場合、脚部には大きな応力集中による塑性領域が発生し、沈下の発生を助長する結果となっている。一方、上半仮インバートや一次インバートによる早期閉合を行った場合、トンネル脚部の塑性領域の発生が大きく抑制され、閉合時期が早いほどその効果が大きいことが分かる。ただし、上半仮インバートによる塑性領域の発生の抑制効果については、下半掘削前までに限られ、その後の下半掘削時には無体策の場合（ケース①）と同程度の塑性領域が上下半脚部に発生する結果となっている。

図-5には各工法における最終変位の比較、図-6には無体策の場合（ケース①）を基準にした場合の各工法の変位抑制（効果）割合の比較を示す。図-5、6より、一次インバートの閉合時期が早いほど大きな変位抑制効果が得られ、なかでも、脚部沈下の抑制効果が最も大きくなっていることが分かる。これは断面を円筒状に閉合することでトンネルの断面剛性が向上したことで、トンネル上下半脚部の塑性領域の発生が抑制されたことに起因するもので、また、脚部の沈下を抑えることにより地表面の共下がりの量も抑えられていることが分かる（図-4参照）。

以上の解析結果より、本研究で想定した軟弱地盤、低土被り下のトンネル掘削に、上半仮インバートや一次インバートによる早期閉合は有効であり、切羽面に近接して断面を円筒状に閉合しトンネル剛性を向上させることで、主に切羽到達後の脚部の沈下や塑性領域の発生が抑制され、それに伴う周辺地山の塑性化や地表面沈下量も抑制される。ただし、上半仮インバートについては、下半掘削前までの変位や塑性領域の発生は大きく抑制するが、下半掘削時に

比較的大きな沈下や塑性領域が発生するため、状況によりその対策工が必要になることが分かる。

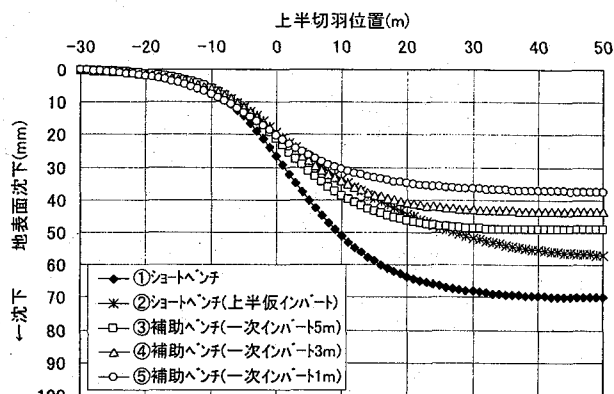


図-2 各工法における地表面沈下の特性曲線

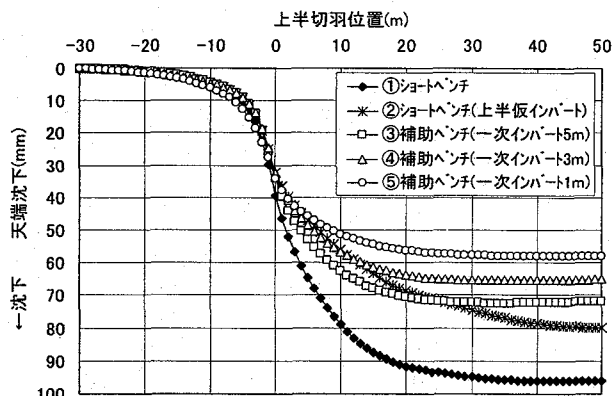


図-3 各工法における天端沈下の特性曲線

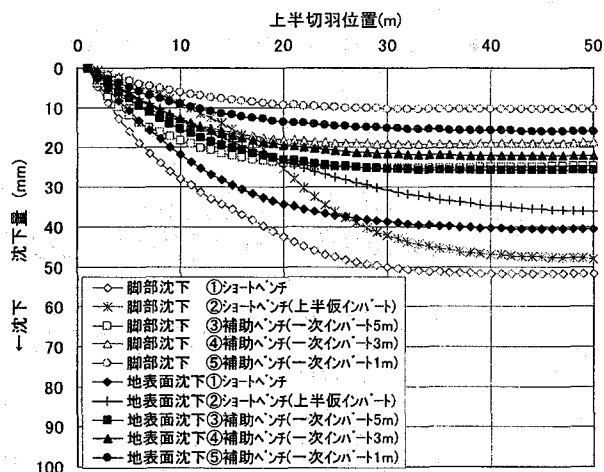


図-4 各工法における上半支保工建込後の
上半脚部沈下と地表面沈下

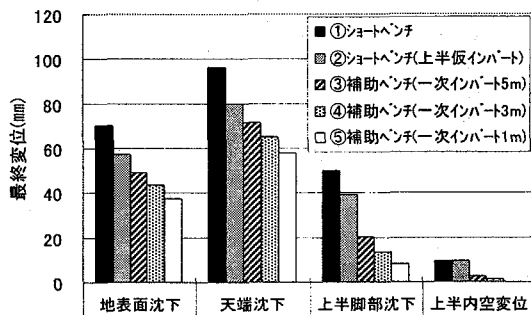


図-5 各工法における最終変位の比較

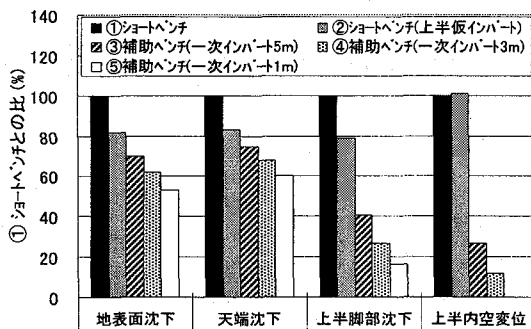
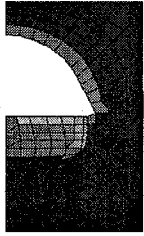
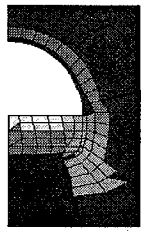
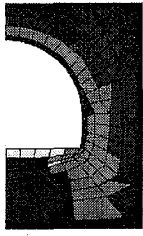
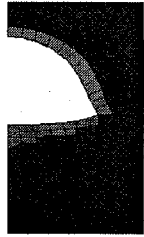
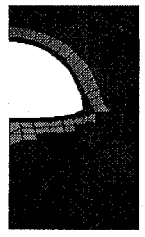
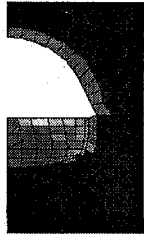
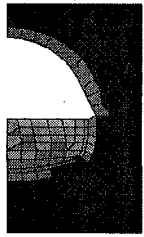
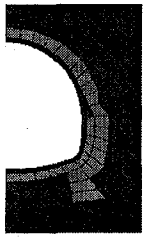
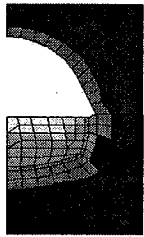


図-6 各工法の変位抑制（効果）割合の比較

表-3 各工法における塑性領域の比較(三次元解析)

	上半切羽 位 置	上半切羽 後方10m位置	変位収束 位 置
ケース① ショートベンチ			
ケース② ショートベンチ 上半仮 インバート			
ケース③ 補助ベンチ 一次 インバート 5m後方			
ケース④ 補助ベンチ 一次 インバート 3m後方			
ケース⑤ 補助ベンチ 一次 インバート 1m後方			

3. 早期閉合効果の評価手法に関する検討

早期閉合の効果を評価するためには、本来三次元解析を行うべきであるが、多大な労力や計算時間を要することから実務的には二次元解析が用いられることが多い。二次元解析では、トンネルの軸方向に平面ひずみ場を仮定し、支保を建て込む前の先行的な変位を意味する応力解放率を設定し、切羽の三次

元的な効果を擬似的に考慮する手法が用いられているが、補助ベンチ付き全断面工法の場合の解析ステップや応力解放率等の解析条件は従来のショートベンチカット工法の場合と同様に設定されていることが多いのが現状であり、補助ベンチ付き全断面工法によるトンネル挙動を二次元解析で求める場合の手法はまだ確立されていない。

本章では、解析ステップや応力解放率をパラメータとした二次元解析結果と三次元解析結果を比較することにより、補助ベンチ付き全断面工法によるトンネル掘削時の挙動に対する二次元解析の適用性を検討した。解析は三次元解析については前章と同じ有限差分法解析、二次元解析については有限要素法解析を用いた。有限差分法の解析結果と有限要素法の解析結果は、弾性解析であれば同じ結果が得られることを確認済みである。

(1) 解析条件

a) 解析モデル

二次元解析の解析モデルを図-7に示す。

ここでは、早期閉合効果を二次元解析で評価する際の入力条件の大まかな目安を得ることを主目的とすることから、解析は弾性解析とした。また、補助ベンチ付き全断面工法による早期閉合は、大規模な塑性化を許したのでは施工不可能で、鏡ボルトなどの併用により鏡前方地山および切羽近傍地山の塑性化を抑制することを前提にしていることから、まずは弾性解析で簡単な目安を得る必要があると考えた。

その他、トンネル掘削径、土かぶり、解析領域、境界条件、初期応力、物性値などの解析諸条件については、前章の三次元解析と同様に設定した。

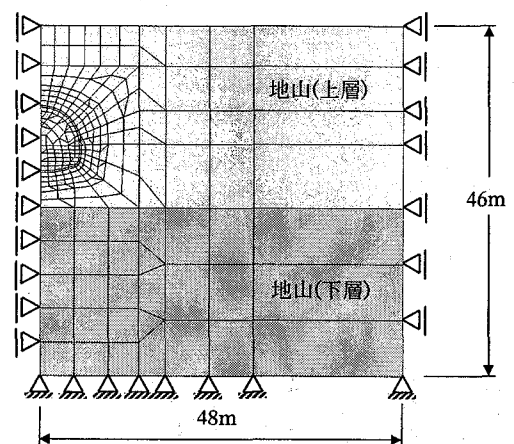


図-7 二次元解析モデル

b) 解析ケース

表-4 に二次元との比較に用いた三次元の解析ケース、表-5 に全断面工法(補助ベンチ付き全断面工

法を含む)を対象とした二次元の解析ケース、表-6にショートベンチカット工法を対象とした二次元の解析ケースを示す。ショートベンチカット工法を対象とした二次元解析では、上半、下半の順に掘削し、それぞれの支保工建込み前に応力解放率を設定する従来の解析ステップを設定した。全断面工法(補助ベンチ付き全断面工法を含む)を対象とした二次元解析では、全断面を一度に掘削し、応力解放率設定後に全断面の支保工を一度に建込む解析ステップを設定した。

表-4 二次元との比較に用いた三次元解析ケース

ケース	掘削工法	ベンチ長(m)	一次インバート(閉合位置)	モデル
⑥	全断面	0	●(切羽後方0m)	弾性
⑥-素掘	"	"	—	
⑦	ショートベンチ	20	—	
⑦-素掘	"	"	—	
⑧	補助ベンチ付き全断面	3	●(切羽後方3m)	
⑨	"	5	●(切羽後方5m)	

表-5 全断面工法(補助ベンチ付き全断面工法を含む)による早期閉合の二次元解析ケース

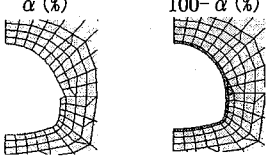
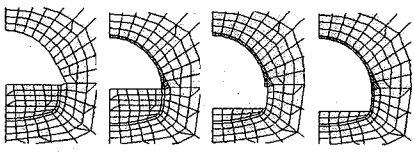
ケース	閉合	応力解放率 α	解析ステップ
④	● 一次インバート	10% ~ 30%	全断面掘削 → 全断面支保 

表-6 ショートベンチカット工法の二次元解析ケース

ケース	閉合	応力解放率 α	解析ステップ
⑤	—	10% ~ 30%	上半掘削 → 上半支保 → 下半掘削 → 下半支保 α (%) $100-\alpha$ (%) α (%) $100-\alpha$ (%) 

(2) 解析結果

まず、全断面工法における三次元解析結果(ケース⑥)と二次元解析結果(ケース④)の比較を図-8, 9に示す。図-8, 9によると、素掘りの場合の先行変位率は地表面沈下($36/93=38\%$)と天端沈下($41/145=28\%$)では異なっていることが分かる。また、支保工の効果により先行変位が抑えられていることも分かる。三次元解析と一致する変位が得られる応力解放率は、三次元解析の支保有の先行変位を素掘りの最終変位で除した値(地表面沈下については14%, 天端沈下については13%)で、これにより三次元解析の地表面沈下と天端沈下の先行変位から最終変位までを忠実に再現できている。

次に、ショートベンチカット工法における三次元解析結果(ケース⑦)と二次元解析結果(ケース⑤)の比較を図-10, 11に示す。図-10, 11によると、ショートベンチカット工法については、上半、下半の順に掘削する従来の解析ステップ(表-6)で、三次元解析と一致する変位が得られる応力解放率は、着目点の相違(先行変位か最終変位か、地表面沈下量か天端沈下量か)によって多少異なるがことが分かる。先行変位については、全断面工法の場合と同様に、三次元解析の支保有の先行変位を素掘りの最終変位で除した値(地表面沈下については18%, 天端沈下については13%)を設定することにより三次元解析と一致する結果が得られるが、最終変位についてはこの値では一致せず、地表面沈下、天端沈下ともに応力解放率を20~30%程度に設定することにより三次元解析と一致する結果が得られている。

さらに、補助ベンチ付き全断面工法における三次元解析結果(ケース⑧, ⑨)と二次元解析結果(ケース④)の比較を図-12, 13に示す。図-12~13によると、補助ベンチ付き全断面工法については、全断面を一度に掘削する解析ステップで、三次元解析と一致する変位が得られる応力解放率はショートベンチカット工法の場合と同様に着目点の相違(先行変位か最終変位か、地表面沈下量か天端沈下量か)によって異なり、先行変位については全断面工法の場合と同程度の10~15%, 最終変位についてはショートベンチカット工法の場合と同程度の20~30%に設定することにより、三次元解析と一致する結果が得られている。

以上の解析結果から、補助ベンチ付き全断面工法によるトンネルの挙動を二次元解析により評価する際には、全断面を一度に掘削する解析ステップを用い、一次インバートの施工時期が切羽後方5m程度内であれば、応力解放率はショートベンチカット工法の場合と同程度に設定することにより、切羽到達時

の先行変位は再現できないものの、最終変位については三次元解析結果と概ね一致する結果が得られることが分かった。ただし、三次元解析結果に一致する結果が得られるときの応力解放率は着目点の相違（先行変位か最終変位か、地表面沈下量か天端沈下

量か）によって異なり、また、一次インバートの閉合時期や支保工剛性、地山のモデル化や物性値、土被りなどによっても影響を受けることが想定されるため、二次元解析はあくまでも大まかな目安を得るものであることに留意する必要がある。

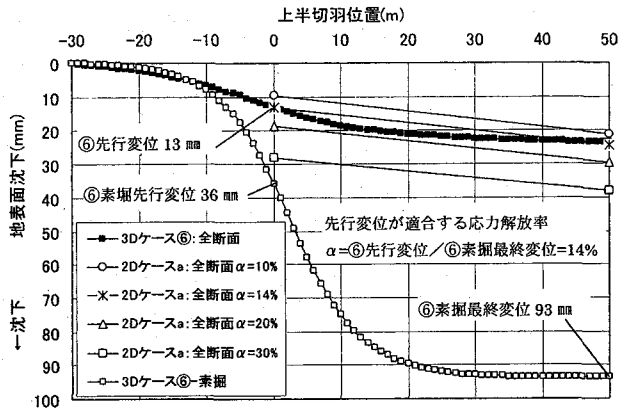


図-8 全断面工法における二次元解析と三次元解析結果の比較（地表面沈下）

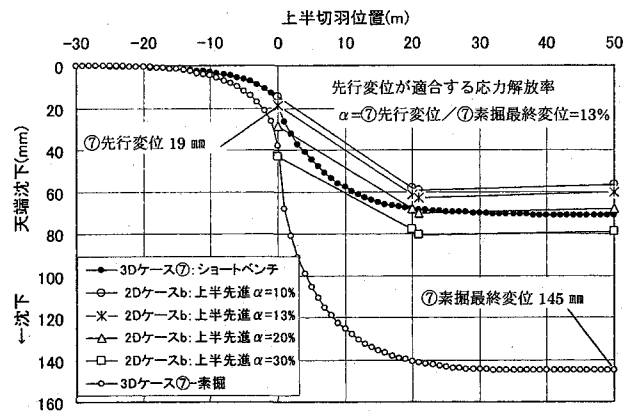


図-11 ショートベンチ工法における二次元解析と三次元解析結果の比較（天端沈下）

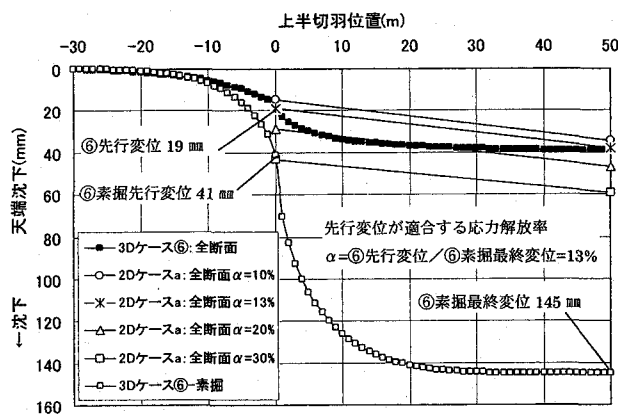


図-9 全断面工法における二次元解析と三次元解析結果の比較（天端沈下）

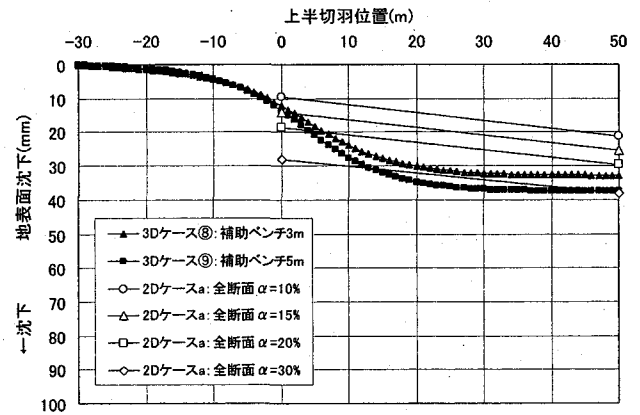


図-12 補助ベンチ付全断面工法における二次元解析と三次元解析結果の比較（地表面沈下）

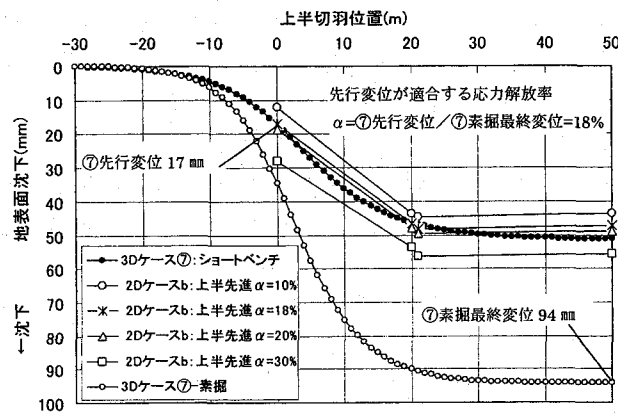


図-10 ショートベンチ工法における二次元解析と三次元解析結果の比較（地表面沈下）

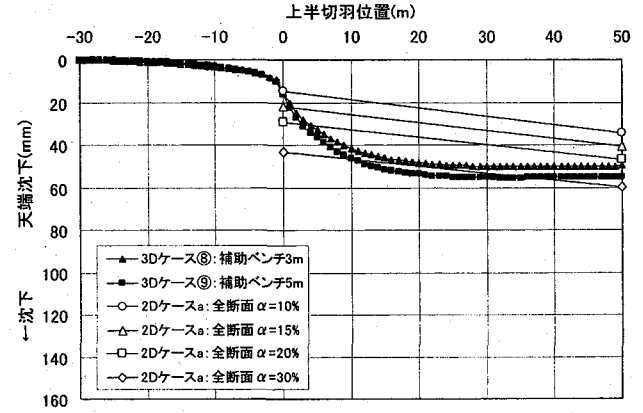


図-13 補助ベンチ付全断面工法における二次元解析と三次元解析結果の比較（天端沈下）

4. まとめ

本研究では、軟弱な地盤中を小土かぶりで掘削するトンネルの早期閉合効果に関する三次元の数値解析的検討を行った。また、三次元の解析結果を解析ステップや応力解放率などをパラメータとした二次元の解析結果と比較することで、補助ベンチ付き全断面工法によるトンネル掘削時の挙動に対する二次元解析の適用性を検討した。

本研究の成果として以下のことが明らかとなった。

- ①軟弱地山、小土かぶり下のトンネル掘削に、一次インバートによる早期閉合が可能となる補助ベンチ付き全断面工法は有効であり、切羽面に近接してトンネルの断面剛性を向上させることで、主に切羽到達後の脚部の沈下や塑性領域の発生が抑制され、それに伴い地表面沈下量も抑制される。
- ②ショートベンチ工法での上半仮インバートも下半掘削前までの脚部の沈下や塑性領域発生の抑制には有効であるが、下半掘削時に比較的大きな沈下や塑性領域が発生するため、状況によりその対策

が必要となる。

- ③三次元解析と一致する結果が得られる二次元解析の応力解放率は掘削工法により異なり、補助ベンチ付き全断面工法によるトンネルの挙動を二次元解析で評価するには、全断面を一度に掘削する解析ステップで、応力解放率をショートベンチカット工法の場合と同程度に設定することにより、最終変位については三次元解析結果と概ね一致する。

参考文献

- 1) 例えば、照屋正史，高良哲治，駒谷恒雄，森崎泰隆：民家直下で超近接トンネルを全断面早期閉合により施工，トンネルと地下，Vol.38，No.7，2007.7
- 2) 佐藤守，高瀬文明，小松敏彦，櫻井孝臣：未固結地山における超近接双設トンネルの施工，トンネルと地下，Vol.38，No.5，2007.5
- 3) Itasca Consulting Group：Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC3D)，2002.
- 4) 日本道路公団試験研究所：トンネル数値解析マニュアル，試験研究所技術資料第358号，1998.10