

山岳トンネルの二次覆工の支保効果に関する 解析的評価について

NUMERICAL ASSESSMENT OF SUPPORT EFFECTS OF TUNNEL LINING

米田裕樹*・蔣 宇静**・棚橋由彦***・茂山史憲****

Hiroki YONEDA, Yujing JIANG, Yoshihiko TANABASHI and Fuminori SHIGEYAMA

This paper is to evaluate the support effects of lining in tunnels excavated in soft rock masses during excavation process by using a new three-dimensional numerical method. The effects of shotcrete and concrete lining on controlling the deformations and collapse of rock masses around the tunnel excavation are investigated and discussed. The proposed 3D numerical analysis approach is also verified by comparing with the field measurements.

Key Words: tunnel, three dimensional numerical analysis method, lining, soft rock

1. はじめに

トンネルの一次支保である吹付コンクリート、ロックボルトの設計は、従来地山の材料定数や初期土圧を求めることが困難であること、さらにトンネルに作用する土圧が確定できないことから、経験的判断、あるいは、類似トンネルの施工事例等によって設計されることが主であった。一方、近年の社会情景を受けて、建設コスト縮減の機運が高まり、その対応としてトンネル全体コストの低減を図るために、支保部材の低減が求められており、そのための支保工設計は、経験則に依らない理論的かつ定量的な判断が求められるようになってきている。著者らは、一次支保、二次覆工の働きを明らかにするとともに、二次覆工無しへのアプローチを試み理論的な解析および実現現場での検証を行った。本研究は、近年日本におけるシングルシェルの実績が増えている状況より、トンネルの合理的かつコスト縮減を目指した設計を実現することを目的とし、軟岩地山を対象に、掘削過程を考慮できる三次元数値解析手法を用いて、二次覆工の支保工効果を検討する。また、解析と現場計測との比較を行うことにより、本解析手法の適用性を実証する。

2. トンネル設計の現状とシングルシェル導入に当たっての適用性と留意点

我が国において、NATMのトンネル技術が導入されて約20年が経過するが、吹付およびロックボルト等の一次支保工の耐久性と機能が向上するようになり、一時的な仮設としての考えだけではなく、永久構造物としての覆工構造への機能分担が加味されるようになってきている^{1), 2)}。また、一次覆工の機能や施工法が従来の矢板工法と相当異なってきたことから、その地山支持効果を定量的に把握することは、一次覆工の設計・施工、ならびに二次覆工の巻厚決定を合理的に行う上で重要となるが、掘削に伴う地山挙動のメカニズムの解明が困難であるため、経験的判断、類似トンネル施工実績に基づいて設計されてきた。また、これらのメカニズムを理解するために、従来から多くの研究が進められているものの、力学的挙動を加味し、施工段階も考慮できるような解析や評価法はほとんどないのが現状である。一方、建設コスト縮減の社会的背景を受けるトンネル技術にお

* 正会員 パシフィックコンサルタンツ(株)九州本社

**正会員 長崎大学 工学部社会開発工学科

***正会員 長崎大学 工学部社会開発工学科

****学生会員 長崎大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻

いては、欧州で発達している NMT（シングルシェル構造）の適用実績が我が国においても序々に増えてきているので³⁾、我が国の標準工法である NATM との比較、および日本に導入した際の適用性と留意点について述べる。

2.1 シングルシェルの定義

シングルシェルとは、『支保工としてロックボルト・金網・吹付コンクリートの諸々が一体となったもの』であり、吹付コンクリートを主要構造部材とし、吹付コンクリートによる最終仕上げ構造のトンネルであると定義する³⁾。シングルシェルは二次覆工を行わないため、最初に設置する吹付コンクリート・金網・ロックボルトを掘削した地山に直接密着させることで発生する土圧と変形を釣り合わせている。図-1 にシングルシェル工法概念図を示す。

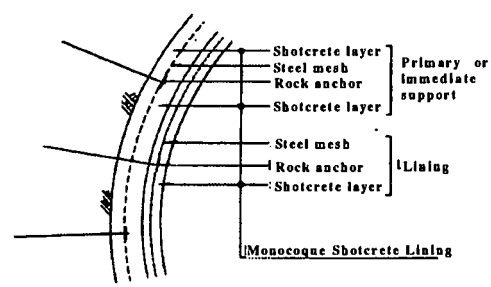


図-1 シングルシェル工法概念図

2.2 NTM と NATM との違い

NTM における二次覆工は、トンネル構造物の安全率を上げるためだけのもので、力学的には不要だという考え方が一般的であるが、NATM では、トンネルに作用する土圧、水圧のバラツキ(力学的機能)、急結剤を多用した吹付コンクリートの長期耐久性、気象(凍結・融解)による覆工劣化、化学的劣化(排水ガス、地下水の硫酸塩分等)による耐久性機能とトンネルの防水化(耐水機能)、照明効果、防災機器等の箱抜き等の表面平滑性・化粧機能としての通常『必要なもの』として考えられている。また、吹付コンクリートに対する取り組み方が違い、NTM では、『目的にあった吹付コンクリートは何か』という観点から品質確保に重点を置き、NATM では、『どのように吹付コンクリートを使うか』という考え方が強い。表-1 は、NTM と NATM の違いを簡単にまとめたものである。表-1 から読みとれるように、シングルシェル工法では、①二次覆工がないこと、②吹付の品質管理が徹底されていること、③鋼繊維吹付が基本であることが分かるが、これは地山条件のよって違ってくこともあるが、理論としての二次覆工評価法の確立、さらに、今後の日本における支保部材の改良、開発を行えば、日本でもシングルシェル工法の導入が十分に可能となる。

表-1 NTM と NATM の相違

項目	NTM	NATM
支保	①切羽時点で最終支保を決定する ②永久支保である	①支保は計測で決める ②一時的支保である
二次覆工	二次覆工を伴わない	二次覆工を伴う
吹付コンクリート	①鋼繊維補強吹き付けコンクリートが基本である ②湿式で 10～25m ³ /hr の施工が可能である ③近代的ロボットで高い位置まで吹ける	湿式でロボットも使われだしているが、一般的には ①湿式 ②金網を使用 ③手吹きである

2.3 シングルシェル工法の適用性と留意点

急結力の大きい低アルカリ鉱物粉体系が普及している我が国では、吹付コンクリート材料の品質を確保して、改良・開発を進め、永久構造物としての機能と信頼性を確保する必要がある。また、鋼繊維の繊維方向と必要とする応力抵抗方向が一致せず、吹付方向、長さ、能力、量、繊維長等によるコンクリート中に均一な繊維分布を期待できない現状であるが、これらの挙動・方向を制御することで、より少ない量で効果的な繊維吹付コンクリートの研究開発を行う必要がある。いずれにしろ、日本へのシングルシェル工法の導入にあたっては、特有の地山条件を考慮し、要求される品質の吹付コンクリート等の支保部材の開発を行えば、日本流のトンネル工法が模索できる。このことができれば、①二次覆工を避けることができる、②湧水を導水、あるいは水抜き孔から垂れ流し

処理する単純な方法が実施でき、コンクリート劣化やひび割れの問題も減少し、トンネル耐久性が増加する、③コンクリート打設ではなくパネルを設置できれば、施工費用、維持管理等が容易で安価なトンネルが構築できる点で有利となる。その場合、前提となるトンネル二次覆工の評価法がまだ我が国では確立されていないのが現状であり、これらのことを踏まえて、本論文では、合理的設計へ向けて、軟岩地山に着目し、トンネル掘削による岩の力学的挙動を的確に把握するため、掘削過程を考慮した三次元掘削解析モデリングを行い、一次覆工の能力を最大限に発揮させるための地山条件・支保効果を明らかにし、二次覆工なしのアプローチとしての合理的設計手法の提案を試みる。

3. 掘削解析による支保効果の評価

トンネルの変形挙動を解明するために、三次元解析が行われるようになったものの、実際の施工過程を忠実に表現したものは少なく、特に支保工の設置を含めた掘削プロセスの表現が従来の三次元解析では曖昧であった。トンネルの安定性、一次支保の効果は、本来三次元的なものであり、掘削に沿って進められていくため、本論文では、具体的に実際のトンネル現場で施工される施工順序に従う解析モデリングを示す。地山モデルとしては、地表面からスプリングラインまで 150m、側圧係数を 0.54 (地山ポアソン比 $\nu=0.35$) とする。なお、二次覆工を打設した場合としない場合による比較検討を行うものとし、実際の施工手順に基づき 1 掘削ステップ長 (1.2m) 毎に、計 30 ステップを再現する。支保工は、掘削してから 1 ステップ分遅らせてロックボルトと H 型支保工を含めた鋼製吹付コンクリート、さらに遅らせて二次覆工の打設を行う¹⁾。地山物性値と支保パターンは日本道路公団の地山分類 C II を想定した。さらに、地山は、Mohr-Coulomb 基準に従う弾塑性体とし、残留強度はピーク強度の 50% とする。解析ケースは、標準断面においては、掘削過程を考慮し二次覆工を打設する場合をケース 1-(a)、二次覆工を打設しない場合をケース 1-(b) として実施した。

3.1 解析結果と考察

ケース 1-(a)、(b) の比較では、図-2 から天端部と側壁部の地山変位量を見ると、ケース 1-(a)、(b) ともほぼ同じ値をとっており、わずかに (b) の方が、最終変位量 u_{fin} が小さい値となっている。最大変位はケース 1-(a) では 7cm、(b) では 6.8cm で、ほぼ同じ値が得られた。これは、二次覆工が無い (b) の場合、高強度の吹付けコンクリートを使用しており、強度の差が解析にも現れた結果となった。また側壁部では、どちらのケース共、内空側に押し出す結果となっている。トンネルの内空方向に変位が生じた理由として、地山側壁部の塑性化の進展と側圧係数が 0.54 と大きいことが挙げられる。

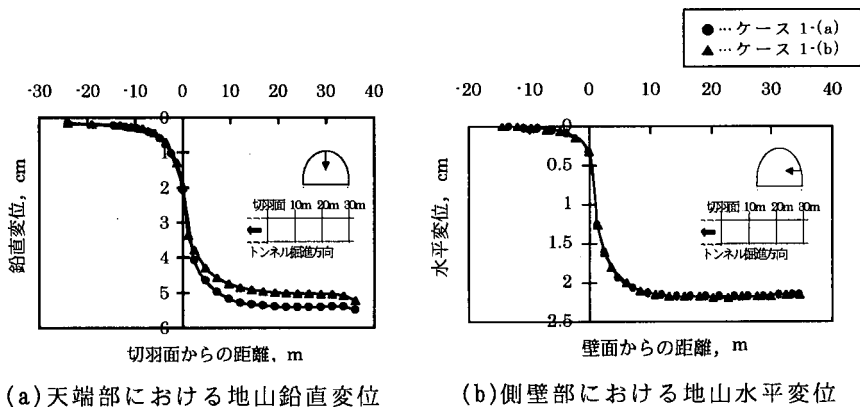


図-2 標準断面トンネルにおける地山変位

図-3,4にケース 1-(a),(b)での側壁部における塑性領域の分布図を示す。これらの図から、①二次覆工の有無での塑性領域の分布に相違がみられないこと、②最終変位や最大変位がほぼ同じ値であったこと、③塑性流動領域を発生しておらず、応力状態も同様の結果であることがわかる。総括すると、二次覆工の打設は塑性領域分布の抑制効果として発揮されていないことがわかる。これより、ケース 1-(a)の二次覆工をすべて取り除いたとしても、応力解放や変形が生じないことが推察できる。また、吹付け部分への塑性領域の分布が見られるが、適度な変形を許した状態となっており、地山は自立した状態となっておりと考えられる。すなわち、地山強度や吹付コンクリートの強度に応じる二次覆工は、周辺地山の塑性領域の広がりや変形に対する抑制効果があまり期待できないということが解析から明らかになった。このことにより、二次覆工に応力的な期待をしなくて良いということになり、今後の二次覆工のあり方、シングルシェル構造への普及に言及することができる。

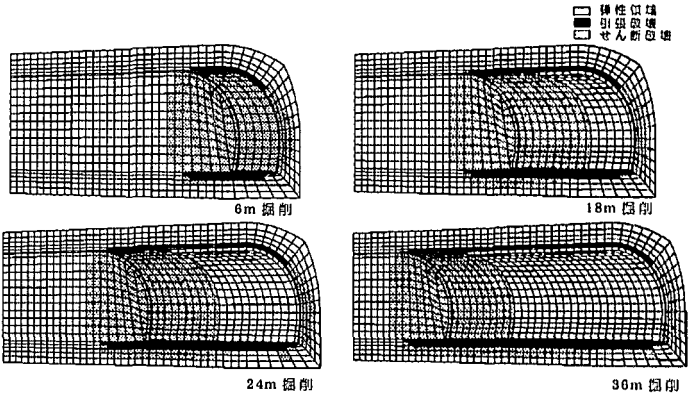


図-3 ケース 1-(a)における塑性領域の広がり(側面)

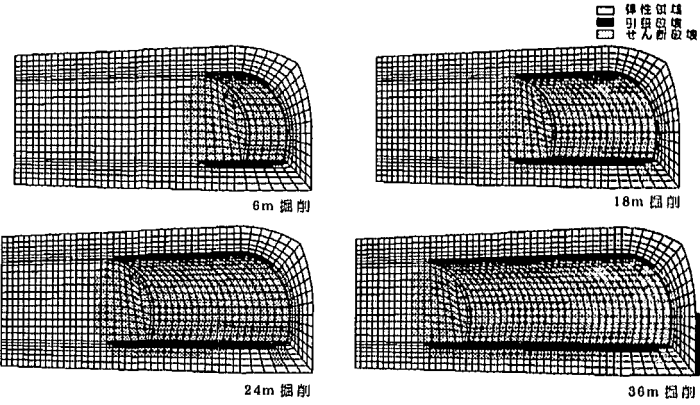
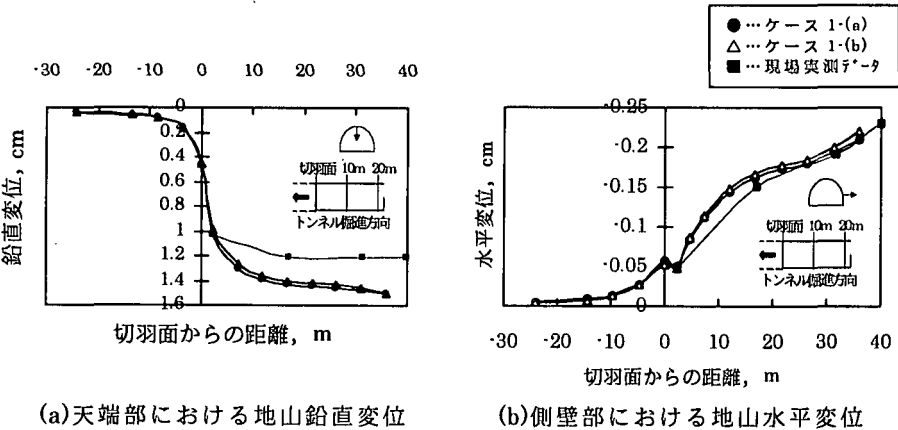


図-4 ケース 1-(b)における塑性領域の広がり(側面)

3.2 実現場計測との比較

図-5 に二次覆工がまだ打設されていない実現場で得られた天端沈下と側壁変位の計測データと解析値の比較を示す。この図で見られるように、天端部の沈下と



(a)天端部における地山鉛直変位 (b)側壁部における地山水平変位

図-5 実トンネル現場における地山変位

側壁部の押し出しおよび施工過程における地山変位履歴でも同様の傾向が見られた。実測値とは多少のずれはあるものの、現場では地山物性値が一樣でないこと、掘削による地山の土被りが変化してくることを考慮すると、本解析手法の妥当性が検証されたと判断できる。また、本解析手法が一般に適用されるようになれば、地山変位や地山への塑性領域分布の把握、支保効果の定量的な把握など可能になると考えられる。また、図-6は二次覆工を打設した場合としない場合の比較として、地山強度比と変位との関係を示したもので、地山強度比が2以下になると天端部および側壁部の変位量が急激に大きくなり、地山強度比が2以上になると、地山の変位量に大きな変化は見られないことがわかる。

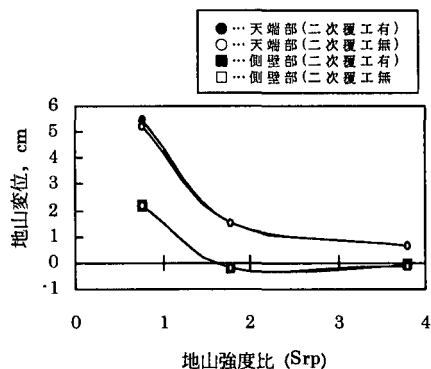


図-6 地山強度比と変位の関係

6. まとめ

我が国のシングルシェル工法の導入にあたり、日本特有の地山条件および材料の改良・開発を進めることで日本流のトンネル工法としての確立が模索でき、その前提としての二次覆工の支保効果の評価法が、解析手法を用いて表現できることを示すことができた。本論文で示した三次元解析手法を用いたケーススタディおよび現場計測との比較により以下のことが明らかになった。

- 1) 二次覆工を打設しない場合、吹付け部分への塑性領域の分布も見られたが、吹付コンクリートが地山の影響を直接受けてしまった解析になっている。実際は、適度な変形を許した状態であり、地山は自立していると考えられ、解析結果ほどの影響はないと推察できる。
- 2) 覆工有無での地山変形と塑性領域の広がり、ほぼ同じ程度となったことは、二次覆工の応力的な期待はなくても良いということになり、今後、シングルシェル工法の普及に拍車がかかる。
- 3) 解析データと現場データとの比較では、地山変位履歴に同様の傾向が見られたことなど、本解析手法の有用性を検証し、今後実現場設計へ適用できることを示せた。
- 4) 地山強度比2を目安に、塑性領域の分布状態や変位量を大まかに把握することができるという知見が得られ、地山強度比2を越える地山への標準支保パターンの見直しが今後求められ、さらなるコスト縮減につながる設計の可能性を指摘することができた。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書（山岳編）・同解説，pp.81～83，1977.
- 2) 矢口晃見，棚橋由彦，蔭 宇静，米田裕樹：地下空間の三次元力学挙動シュミレーションモデルの開発，平成11年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，第1分冊，鹿児島，pp.464-465，2000.
- 3) ジオフロンテ研究会：シングルシェル適用に関する検討報告書，PP.53，1997