

膨張性地山に施工されたトンネルの 変形解析手法の検討に関する研究

東 幸宏¹・蔣 宇静²・李 博³・高橋俊長⁴・山田浩幸⁵

¹長崎大学大学院 生産科学研究科 (〒852-8521 長崎市文教町 1 番 14 号)

²長崎大学教授 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

³長崎大学助教 工学部社会開発工学科 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

⁴東日本高速道路株式会社 千歳工事事務所 (〒066-0037 北海道千歳市新富 1-2-14)

⁵株式会社 鴻池組 本社土木事業本部(〒530-8517 大阪市北区梅田 3-4-5)

E-mail:d709170d@cc.nagasaki-u.ac.jp

膨張性地山における山岳トンネルの掘削や施工管理においては、大きな変位が発生し難工事となることが多い。過去の現場計測によると、膨張性地山では、初期地山応力の側圧係数が 1 に等しいかそれより大きい場合がある。その結果、トンネルを大きく変状させる施工事例が少なくない。一方、膨張性地山トンネルの変形挙動の予測評価では、側圧係数やダイレーション角といったパラメータの設定によって解析結果が大きく変わる。そこで本研究では、側圧係数やダイレーション角などがトンネル変形挙動に与える影響についてケーススタディを行うことにより詳細に検討し、膨張性地山のトンネル変形解析における留意点を提示した。

Key Words : mountain tunnel, deformation analysis, squeezing ground, deterioration prediction

1. はじめに

岩盤の力学的特徴として、ひずみ軟化やダイレーションのみならず、クリープや強度低下などの時間経過に伴う性質が挙げられる。トンネルを掘削し、覆工などの支保工が施工された後、時間の経過とともに周辺地山に塑性領域が拡大しトンネル内空側に地山が押し出されて地圧が覆工に作用するケースが見られる。この地圧は塑性圧と呼ばれ、覆工に対して変形・ひび割れ・剥落などのダメージを与えることがある。塑性圧とは、トンネル掘削によって周辺地山に形成される塑性領域が拡大することにより、地山の力学的特性が変化するような力学的挙動に起因するものであると考えられる。このような状況においては、内空変位の進行を抑制したり、必要な内空断面を確保するなどのトンネルの変状に対する補強対策が必要となる。そのため、設計段階より変状の発生箇所や程度、トンネル変状に対する補修の必要性、最適な対策工の選定、対策工施工後の効果を的確に予測することが求められている。

特に脆弱な地山におけるトンネルでは、変位が経時的に生じるため、トンネルの変状予測や危険度の評価においては変状の発生メカニズムを把握することが重要であ

る。そのため、トンネル周辺の地山の適切な力学モデルを準備し、その力学モデルに基づく変形挙動を良好に再現できる数値解析手法の適用が必要とされる。

膨張性地山に施工されたトンネルの場合、側圧係数が通常の地山と比べて大きいケースが多い。それにより異常な膨張圧が覆工に作用し、大きな変状をもたらすことが報告されている。また、岩盤のダイレーション角がトンネルの変形に対して大きな影響を与えるため、これらを考慮した数値解析では、側圧係数やダイレーション角といったパラメータを決定する必要がある。

そこで、本研究では北海道横断自動車道穂別トンネル西工事を対象として、ダイレーション角、側圧係数、支保工のモデル化についてケーススタディを行い、これらがトンネルの変状へ与える影響を詳細に考察した。さらに、膨張性地山におけるトンネル変形解析を行う際の留意点を示した。

2. 解析概要

(1) レオロジーモデル

本研究では、解析対象トンネルのクリープ変形特性を

考慮して、岩盤強度低下の時間依存性を考慮したBurger-MC劣化モデル¹⁾を採用した。

このレオロジーモデルは、Kelvinモデル、Maxwellモデル、Mohr-Coulombモデル (MCモデル) から成り、これらを直列につないだBurger-MCモデル中のMCモデルの粘着力 c と摩擦角 ϕ を時間と共に低下させ、岩盤の強度劣化を考慮することが出来るように修正したものである。

Burger-MC劣化モデルの概要図を図-1に示す。

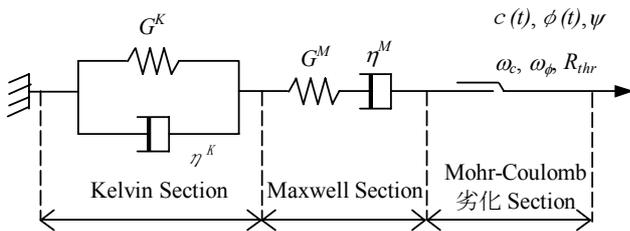
また、Burger-MC劣化モデルの構成式は以下のように表される。

$$\frac{dc}{dt} = -\omega_c R \quad (R \geq R_{thr}) \quad (1)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = -\omega_\phi R \quad (R \geq R_{thr}) \quad (2)$$

$$R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \cos \phi + (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi} \quad (3)$$

ここに、 R_{thr} は岩盤の応力状態限界係数であり、応力状態係数 R が R_{thr} 値を超えると劣化を始める。MCセクションの ω_c 、 ω_ϕ は粘着力と内部摩擦角の劣化率であり、両者の経時変化は R に比例する²⁾。Burger-MC劣化モデル



ω_c : MC要素の粘着力劣化率
 ω_ϕ : MC要素の摩擦角劣化率
 R_{thr} : MC要素の劣化応力状態限界係数

図-1 Burger-MC劣化モデル¹⁾

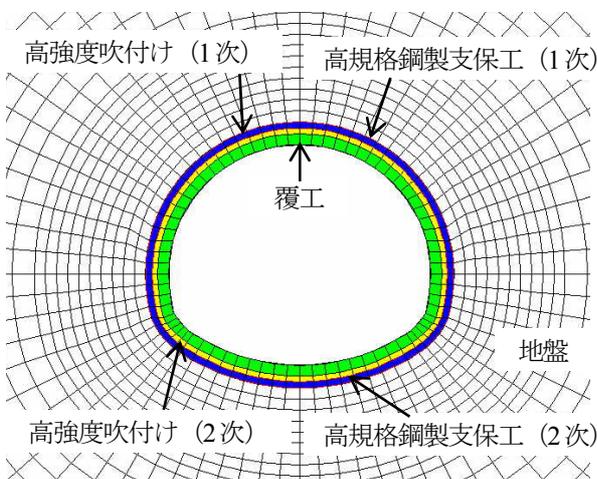


図-2 解析モデル

ル構成式においては、粘着力 c と摩擦角 ϕ の単位時間当たりの変化量は、それぞれ粘着力劣化率 ω_c と応力状態係数 R の比例式、摩擦角劣化率 ω_ϕ と応力状態係数 R の比例式で表すことができる。

(2) 解析モデル

本研究では、施工中においても大変形を生じる穂別トンネルを対象に解析を行った。穂別トンネルの周辺地山は泥岩、緑色岩、蛇紋岩といった異なる岩体が複雑に関係した地質構造を呈し、岩体の硬軟が様々で、膨張性を有している。地山強度比は $Srp=0.113$ と非常に小さく、土被りの大きい区間 (土被り300m以上) では大きな変位が生じる、非常に脆弱な地山である³⁾。図-2に解析モデル図を、表-1に解析で用いた地盤物性値を示す。なお、本論の解析で用いたクリープ変形に関するパラメータは既往研究で実施した再現解析⁴⁾の結果に基づいて決定した。パラメータの一部を表-2に示す。

(3) 解析ケース

本研究では、ダイレーション角 ψ と側圧係数 K がトンネルの変状特性に与える影響を評価するために、表-3に示すように解析ケースを設定した。

対象地盤の内部摩擦角 ϕ が 30° であったため、ダイレーション角の最大値はその半分であると仮定して $0^\circ \sim 15^\circ$ の範囲に設定した。また、側圧係数 K は1以上の値から1以下の値までの範囲での影響を考慮するため、0.6, 0.8, 1.0, 1.3と設定した。穂別トンネル本坑の計測日数にあわせて解析日数を400日と設定してクリープ解析を実施する。

表-1 地盤の物性値

E (N/mm ²)	ν	γ (kN/m ²)	C (N/mm ²)	ϕ (deg)	T (N/mm ²)
150	0.34	24	0.2	30	0.04

表-2 クリープ係数

G^K (Pa)	η^K (Pa · s)	η^M (Pa · s)
6.04×10^8	4.04×10^{16}	3.83×10^{17}
ω_c (Pa/year)	ω_ϕ (°/year)	R_{thr}
$5.88E \times 10^4$	3	0.6

表-3 解析ケース

case	ψ (deg)				
	0	5	10	15	
K	0.6	1-1	1-2	1-3	1-4
	0.8	2-1	2-2	2-3	2-4
	1	3-1	3-2	3-3	3-4
	1.3	4-1	4-2	4-3	4-4

3. 側圧係数とダイレーション角の違いによる変形挙動の比較

(1) 側圧係数の違いによる比較

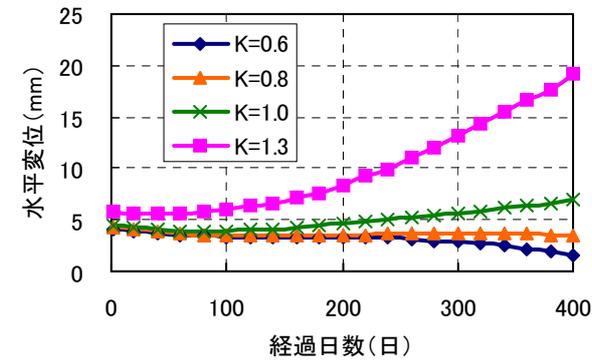
側圧係数とは、初期地山応力の鉛直成分に対する水平成分の比であり、一般的な岩盤においては1/2よりも小さい値になることが多い。この場合、トンネルの天端に作用する鉛直応力が大きくなり、天端に引張応力が発生しやすくなる。しかし一方、泥岩や凝灰岩、蛇紋岩、変質した安山岩といった膨張性を有する岩盤では、側圧係数が1に等しいかそれより大きいことがある。側圧係数は1になる場合に、岩盤の圧縮強度が初期地圧の鉛直

成分の2倍よりも小さくなるとトンネル周辺には圧縮せん断破壊を受けて破壊領域が形成される。

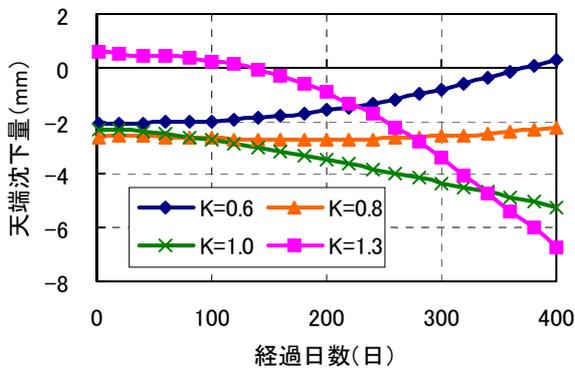
ここでは、ダイレーション角を $\phi = 15^\circ$ と一定にし、側圧係数 K を0.6, 1.3と設定した2ケース (case1-4とcase4-4) を用いて側圧係数による影響の比較・検討を行う。

図-3(a)に水平測線の比較を、図-3(b)に天端変位の比較を示す (+ : 隆起・伸張, - : 沈下・収縮)。また、図-4にそれぞれのケースにおける塑性領域図を、図-5に変形モードを示す。

図-3, 5より、側圧係数の違いにより変形モードが大きく異なることがわかる。case4-4において、水平変位と天端沈下量は時間経過とともに卓越していくことが伺える。塑性領域においてもトンネルの上下に広がっており、変形モードは上下に大きく押しつぶされる変形を呈している。これに対し、case1-4では、天端の両側のアーチ部分に大きな塑性領域が発生し、天端変位が沈下から隆起

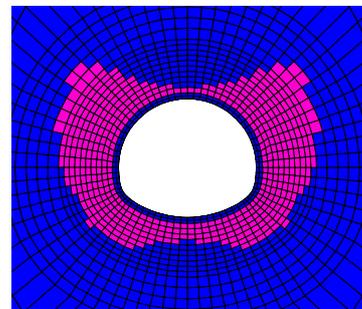


(a) 水平変位

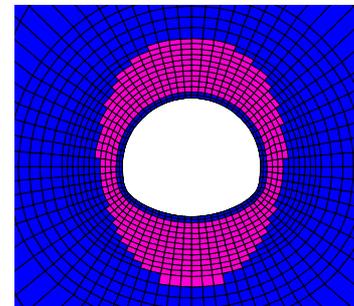


(b) 天端沈下

図-3 側圧係数による変形挙動比較 ($\phi = 15^\circ$)

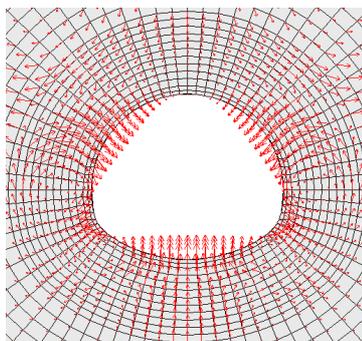


(a) case1-4 ($K=0.6$)

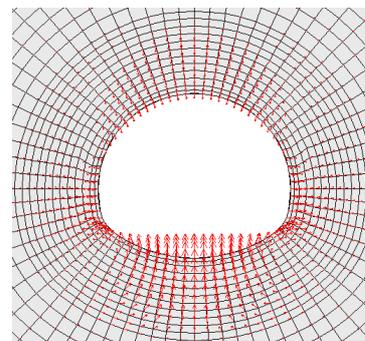


(b) case4-4 ($K=1.3$)

図-4 塑性領域の比較 ($\phi = 15^\circ$)

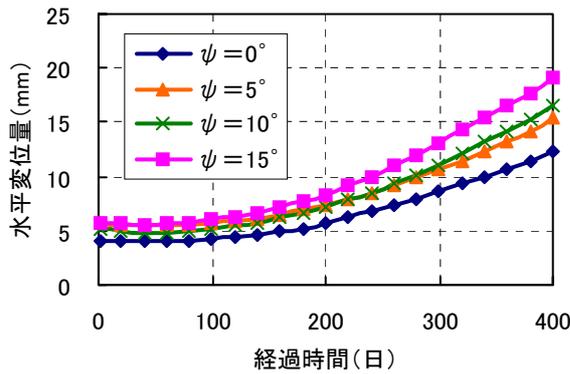


(a) case1-4 ($K=0.6$)

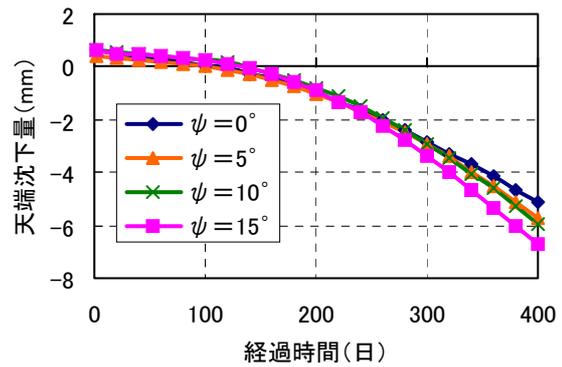


(b) case4-4 ($K=1.3$)

図-5 変形モードの比較 ($\phi = 15^\circ$)

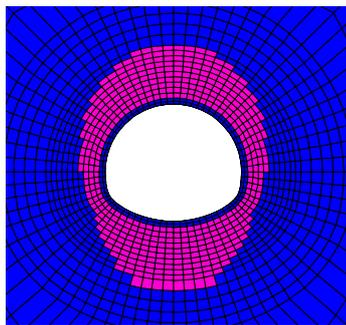


(a) 水平測線

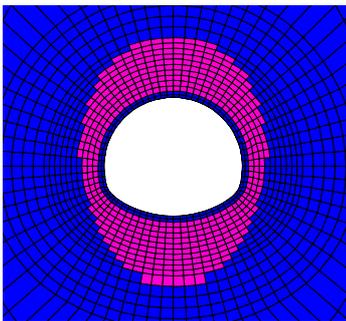


(b) 天端沈下

図-6 ダイレーション角による変形挙動比較 ($K=1.3$)

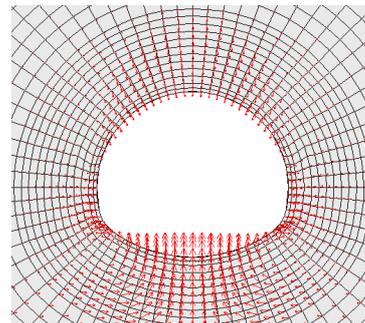


(a) case4-1 ($\psi = 0^\circ$)

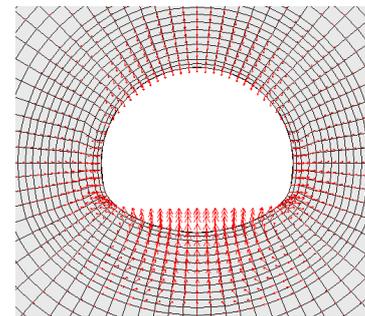


(b) case4-4 ($\psi = 15^\circ$)

図-7 塑性領域の比較 ($K=1.3$)



(a) case4-1 ($\psi = 0^\circ$)



(b) case4-4 ($\psi = 15^\circ$)

図-8 変形モードの比較 ($K=1.3$)

へ遷移していることにより、両肩部が大きく沈下し、天端が上方向に押し上げられることが伺える。

(2) ダイレーション角の違いによる比較

側圧係数 $K=1.3$ が一定で、ダイレーション角 ψ が 0° と 15° の2ケース (case 4-1とcase4-4) について比較を行う。図-6に水平測線・天端沈下の比較を、図-7に塑性領域の比較を、図-8に変形モードの比較をそれぞれ示す。

図-6, 8に示すように、両ケースはほぼ同じ変形モードを示しているが、ダイレーション角の大きいcase4-4の方は変形量が卓越していることがわかる。最終変形量については、天端沈下が約2mm、水平測線変位が約7mmの差が見られる。これは、ダイレーション角が大きくなると、同じ荷重がトンネル断面に作用しても塑性化した岩

盤の変形が大きくなるためと考えられる。この結果より、ダイレーション角が断面変形に対して大きく影響していることがわかる。

塑性領域に関しては、両ケースで大きな差は見られなかった。これは、塑性領域の発生形状がトンネルに作用する応力経路と地山強度比によって大きく影響される⁹⁾ためであり、ダイレーション角にあまり支配されないと考えられる。

4. 支保工のモデル化による比較

(1) 対象トンネルにおける支保工について

研究対象としている北海道徳別トンネルでは、高規格

鋼製支保工および高強度吹付けによる2重支保同時施工を採用している。これはFEM解析による施工前の事前予測解析により最も適した支保パターンの選定により決定したものである⁹⁾。

本研究では、この高規格支保による二重支保工をモデル化して変状予測解析を試みた。しかし、予測解析において水平変位が地山側に押し出されるという、実挙動とは大きく異なる変形モードを示す結果となった。図-9に穂別トンネルの計測結果を示す。実変形モードを解析的に再現するためには、支保工を実現場に相当するようモデル化する必要がある。これは、他の支保工の場合も同様であるが、変状予測解析を行う場合には支保工のモデル化が重要なポイントの一つとなっている。

表-4 支保工モデル化パターン

	パターン1	パターン2
鋼製支保	無し	無し
吹付け	変化無し	ジョイント部 剛性低下
	パターン3	パターン4
鋼製支保	無し	有り (剛性低下: 1/100)
吹付け	一次吹付け剛性低下	一次吹付け剛性低下

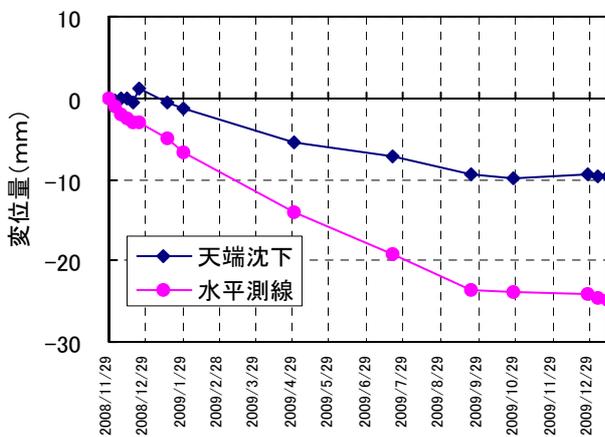
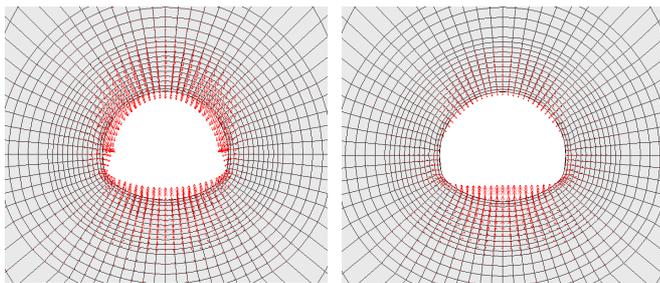


図-9 穂別トンネル本坑計測結果



(a) パターン2 (b) パターン4

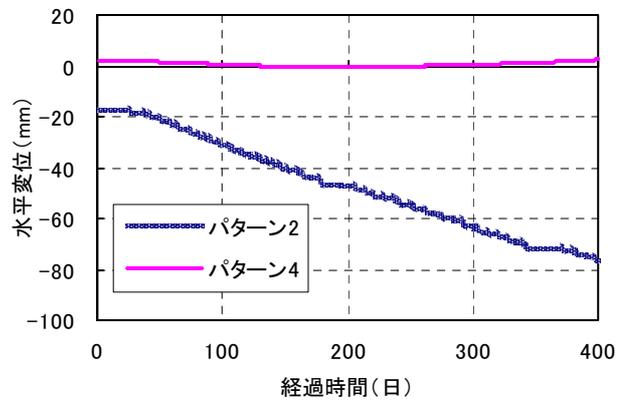
図-11 変形モードの比較

(2) トンネル支保工の解析モデル化

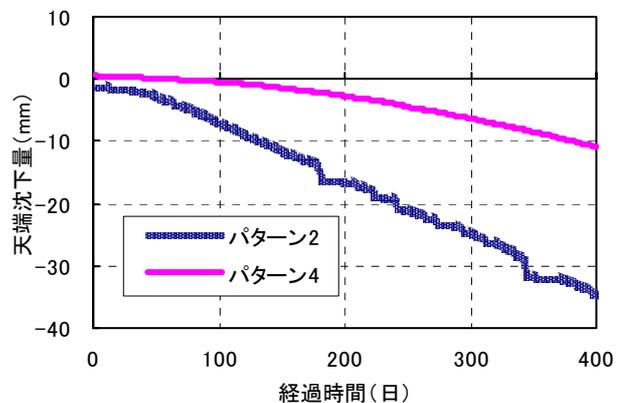
従来の解析においては、吹付コンクリートや覆工はメッシュ要素を用い、鋼製支保工などは軸力等を考慮し、全周を剛結させた形で支保工をモデル化している。しかしながら、実際の現場においては、完全に剛結されていることは少なく、鋼製部材の継手部分において過剰に応力集中を起こしたり、段階施工によってできたコンクリートの打継部分においてクラックが生じたりするなど、支保部分の弱部が存在している。また、本研究の解析対象では、支保工が設置された後に、荷重によって降伏してしまい、支保の役割を果たさなくなるという状況が見られた。

通常の変状解析では、これらの弱部における影響が無視できるレベルの誤差に止まる。しかし、脆弱な地山に施工されたトンネル等をモデル化する場合、この支保工のモデル化によっては実挙動と解析結果との誤差が無視できないほど大きくなることもある。

そこで、支保工のモデル化について、いくつかのパターンで解析を実施し、その効果の比較を行った。表-4に支保工のモデル化パターンを示す。パターン1~3については、鋼製支保工がモデル化されていない理由として、鋼製支保工に作用する応力値の計測結果より、支保工が設置後にすぐ降伏しており、支保効果がない



(a) 水平変位



(b) 天端沈下

図-10 支保パターンによる比較

ものと考えたパターンであり、パターン4においては降伏したことにより鋼製支保工の剛性が低下したものである。ジョイント部と一次吹付けの剛性低下率は1/100と設定した。

(3) 支保工のモデル化パターンによる比較

ここでは、パターン2とパターン4について支保効果を比較する。図-10に水平変位・天端沈下量の比較を、図-11に変形モードの比較を示す。

パターン2の変形モードでは、天端・側壁・インバートが内空側に変位しており、断面全体が収縮するような変形モードを呈しているのに対し、鋼製支保工を導入しているパターン4では支保工モデル化変更前と同様に上下に押しつぶされ、側壁が地山側に変位している変形モードとなっている。これは、支保工が完全剛結状態としてモデル化され、リング効果が大きく作用しているためと考えられる。そのため、覆工や吹付け、鋼製支保工が全周にわたって剛結されたモデルでは変形の逃げ道として上下方向もしくは水平方向に流れるようになる。また、解析対象となっているトンネルの地山は地山強度比が極端に低く、地山強度が支保工と比べて非常に小さいことに起因していると考えられる。

5. まとめ

本研究では、側圧係数 K やダイレーション角 ϕ といった岩盤パラメータおよび支保工のモデル化がトンネル変形挙動に与える影響を考察するために、ケーススタディを行った。主な研究結果は以下のようになる。

- (1) 側圧係数の大小により、変形モードが大きく変化し、地山に進展する塑性領域に大きく影響を与えることが確認された。

- (2) ダイレーション角はトンネルの変形量に明らかな影響を与えるが、塑性領域の進展にほとんど影響しないことがわかった。
- (3) 支保工のモデル化手法は変形モードに顕著な影響を与えるため、高精度な変形予測解析を目指すには実現場と同様なモデル化を行うことが必要である。

本研究の解析結果により、支保パターンや支保工設置後の状況を十分に考慮したうえでモデル化を行うことの重要性が確認された。ただし、継手部分や吹付け部の剛性低下率の設定、支保部材のレオロジーモデル（弾性体モデルや弾塑性体モデル等）の設定などいくつかの留意点が存在していることを念頭におく必要がある。

参考文献

- 1) Guan Z, Jiang Y, Tanabashi Y, and Huang H.: A new rheological model and its application in Mountain Tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.23, No.3, pp.292-299, 2008.
- 2) 里 優, 竹田直樹, 亀村勝美: 強度の時間依存性に着目した岩盤の解析, 第18回土質工学研究発表会論文集, 土質工学会, pp.817-820, 1983.
- 3) 山田浩幸, 佐々木正博, 大村修一, 高田 篤: 土被りの大きい脆弱地山(蛇紋岩)におけるトンネル設計と施工に関する一考察, 2009 トンネル技術研究発表会, 日本トンネル技術協会, pp.81-92, 2009.
- 4) 東 幸宏, 高橋俊長, 山田浩幸, 福田 毅, 蔣 宇静: 強度低下の時間依存性を考慮したトンネル変状の予測, 第39回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.27-31, 2010.
- 5) 蔣 宇静: 深部地下空洞の力学安定に関する理論的および実験的研究, 九州大学博士論文, 1993.
- 6) 山田浩幸, 高橋俊長, 大村修一, 高田 篤: 大土被りの蛇紋岩地山における最善管理型二重支保の設計と施工, 第39回岩盤力学に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.375-380, 2010.

EXAMINATION OF DEFORMATION ANALYZING METHOD FOR TUNNELS CONSTRUCTED IN SQWEEZING GROUND

Yukihiro HIGASHI, Yijing JIANG, Bo LI, Toshihisa TAKAHASHI
and Hiroyuki YAMADA

The coefficient of lateral pressure of sqweezing ground is equal to or sometimes higher than 1 as reported in many construction cases, leading to large deformation on tunnels. In the evaluation of the deformation behavior of tunnel constructed in sqweezing ground, the analytical results change greatly with the parameters such as the coefficient of lateral pressure and the dilation angle. In the present study, we conducted case studies to estimate the influences of the coefficient of lateral pressure, dilation angles and modeling method of tunnel support on the deformation behavior of tunnel and proposed a few important points that need to be paid attention on when modeling the tunnels in sqweezing ground.