

支保工背面の荷重伝達を表現する 境界面要素の適用性について

福田 毅¹・安藤 拓²・多田 浩幸³・石井 卓⁴・熊坂 博夫⁵

¹正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)
E-mail : tys.fukuda@shimz.co.jp

²正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目16-1)
E-mail : t.ando@shimz.co.jp

³正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)
E-mail : tada_h@shimz.co.jp

⁴正会員 元 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)
現 株式会社玉造 (〒220-0004 神奈川県横浜市西区北幸1-11-1 水信ビル7階)
E-mail : takashi141@ac.auone-net.jp

⁵正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4-17)
E-mail : h.kumasaka@shimz.co.jp

山岳トンネルの建設において、当初設計時の安定解析によるトンネルの挙動の予測値と施工時に観測される計測値との間には少なからず“隔たり”があることは、この分野においては周知の事実である。この“隔たり”が生じる要因として、地質条件に係る情報の不足に起因するところが大きいと言われているが、著者らはこの“隔たり”について地山の不均質性や吹付けコンクリート材料の品質のばらつき、あるいは地山と一次支保工の付着特性による影響にも着目して検討を行っている。

このような地山の变形、応力状態の把握に関する取組みに加え、本報告では、トンネル構造体の力学モデルの高度化の観点から、地山と一次支保工の材料境界面における付着特性が地山の变形や支保部材に生じる応力に及ぼす影響に着目し、この付着特性の影響を数値解析的に評価するための付着モデルの適用性を検討するとともに、付着特性の与える影響について考察したので報告する。

Key Words : Tunnel Structure, Stability, Bond Characteristic, Full-Slip, No-Slip

1. はじめに

約40年前の山岳トンネル建設の分野では、それまで用いられていた“矢板工法”によるトンネル構築工法に替り、新たな構築工法として“NATM (New Austrian Tunneling Method)”が導入され、現在に至るまで、わが国の複雑な地質条件に対して、いかに“NATMの概念”に沿ってトンネルを構築するか、技術的および実践的な取り組みがなされ、現在では、“NATM”はわが国の山岳トンネルの標準工法に位置づけられている。

このようなトンネル構築方法の変化を施工技術（支保工、掘削方法など）と設計技術（設計手法および安定性の判定など）に分けて整理したものを表-1に示す。表に示されるように、支保工、掘削方法、補助工法の開発と現場での試行による改良などにより、様々な新しい施工

技術を使用し、多種多様な計測機器を用いた情報化施工による施工、安全管理手法の活用も進められている。これらより、施工技術の発達は“NATM”の普及と進化に貢献していると受け止めることができる。

一方、トンネルの安定設計技術はどうであろうか。当時、従来の“矢板工法”のトンネルの安定性の考え方から“NATMの概念”と呼ばれる“トンネル周辺地山と支保構造体の力学的な相互作用を考慮した合理的な設計法”として、トンネル周辺地山がトンネル掘削によって生じる荷重を分担し、支保工の荷重（分担）が軽減されるとともに、Femner-Pacher曲線が考えられ最適解が存在することから、合理的な安定設計解を得ることが期待されたように思われる。

しかし、施工技術面における“NATM”の普及と進化に比べて、安定設計技術は進歩の余地を残しているとい

う見方もあるかもしれない。

現在の安定設計法は、当初設計と修正設計という2段階の手順、および情報化施工とよび事後解析の結果を踏まえたものや過去の類似の施工実績を加味した経験工学的な設計法となっている。このため、今後の新たな地下施設、例えば、地層処分の地下施設のような原子力関連施設においては、事前の安全審査において安全性に係わる設計の妥当性を示すことが要求されるため、当初設計時に現象を定量的に予測して諸元を決定することやそこで用いた手法の信頼性、妥当性の説明が必要となる。

現在のトンネルの設計検討においても、数値解析手法の導入と活用は進んだもののトンネルの安定性評価方法やそれに用いる解析手法や計算方法などは、これを準用することを謳っている原子力関連施設の設計方法とするほどトンネルの安定性評価技術が確立しているとはいえないと感じているのは著者らの認識に誤りがあるためであろうか。

当初設計時のトンネルの挙動の安定解析による予測値と施工時に観測される計測値との間には少なからず“隔たり”があることは周知の事実である。この“隔たり”が生じる要因として、地質条件に係る情報の不足に起因することが大きいと言われている。この“隔たり”に対して、前述の要因（情報不足）から、2段階あるいは3段階の修正検討を含む設計法を用いることで問題の解決策としてきた。

“NATM”が導入されて約40年経ち、技術的には飽和状態に近づいてるとの指摘もある中で、新たな技術的進化が求められ、その糸口として如何に真のトンネル挙動予測に基づいて本来の当初設計を行えるようにするかは、今後の山岳トンネルや新たな地下施設の分野において重要な課題である。

また、これに関連して、トンネルに作用する荷重の理解への取り組みも不足していた。例えば、表-1の標準工法の荷重系において連続体や弾塑性解析で用いられる荷重の他に“ゆるみ地圧”がある。“ゆるみ地圧”は“ゆるみ（荷重）”に起因する地圧を意図している。

“NATM”導入時期では、上記の二つの荷重の概念が混在、混用されてもやむ負えない時期であったと思われるが、その後40年経つ中で発生原因がわからないと“ゆるみ（荷重）”に起因する地圧との解釈で納めている。当初設計の高度化において、掘削にともなう荷重発生メカニズムの解明やその数理モデルの構築が十分進展したと受けとめられるかは個人差のあるところである。

著者らは上述の認識に立ち、トンネル構造体に作用する荷重系と支保部材の機能分担をどのようにモデル化すべきかについて検討を進めている¹⁾。

本報告では、“トンネル周辺地山と支保構造物の力学的な相互作用を考慮した合理的な設計法”の課題の一つ

として、トンネル構造体の力学モデルの高度化の観点から、地山と一次支保工の材料境界面における付着特性がトンネルの力学挙動に与える影響の違いに着目してみた。まず、この付着特性の影響を解析し評価するための付着モデル（本報告では、Interface要素と呼ぶ）の適用性を検討する。これを用いて円形トンネルを想定した場合の付着特性のトンネル構造体の挙動に与える影響、さらにはトンネル形状が円形ではない場合において与える影響について考察したので報告する。

2. 地山壁面と支保部材間の力学モデルとその適用性に関する検討

(1) 地山と支保工部材間の相互作用を表現する力学モデル（Interface要素）

地山と支保工の荷重伝達を表現するInterface要素の力学モデルを図-1に示す。Interface要素は、一般に連続体解析において不連続面を表現する際に用いられるジョイント要素と同等の機能を備えている。つまり、不連続な境界面において、法線方向バネ k_n とせん断方向バネ k_s を介して荷重の伝達（地山と支保工の相互作用）が行われ

表-1 山岳トンネル施工比較表

	矢板工法	標準工法
年代	～1970年代前半	1970年代後半～現在
支保工	・矢板 ・鋼製支保工	・吹付けコンクリート ・鋼製支保工 ・ロックボルト
掘削工法	底設導坑先進工法など、掘削手順の工夫により空洞の安定性を図る	切羽の安定化を図る補助工法を利用し、全断面、補助ベンチ付全断面掘削工法へ発展
掘削方式	発破／機械	発破／機械
設計手法	構造力学的アプローチ	材料力学的アプローチ
荷重系	ゆるみ荷重	初期地圧、掘削解放応力、ゆるみ地圧
安定性評価	<u>周辺地山</u> トンネルの沈下量 内空変位 <u>支保工</u> 支保工のひずみ量 (換算応力値)	<u>周辺地山</u> トンネル壁面の地山に生じるひずみ量 (変形勾配量) <u>支保工</u> 支保工のひずみ量 (換算応力値)
地山と支保工の施工状況	地山と鋼製支保工の間に空隙が残る 地山との密着性が低い	地山と鋼製支保工の間に吹付けコンクリートを密実に充填 地山との密着性が高い

る。なお、この要素は図-1に示す力学モデルからわかるように、ダイレイタンスー効果やせん断強度、引張り強度を定義することで縁切れを表現することも可能である。しかし、現時点の検討では、問題の複雑化を避けるためすべりの効果のみを取り扱うこととした。

本検討では有限差分法を用い、接触力増分式を次式で与えた²⁾。

$$F_n^{(t+\Delta t)} = k_n \cdot u_n \cdot A + \sigma_n \cdot A \quad (1)$$

$$F_{si}^{(t+\Delta t)} = F_{si}^{(t)} + k_s \cdot \Delta u_{si}^{(t+(1/2)\Delta t)} \cdot A + \sigma_{si} \cdot A \quad (2)$$

ここに、

$F_n^{(t+\Delta t)}$: 時間増分($t+\Delta t$)あたりの法線方向接触力

$F_{si}^{(t+\Delta t)}$: 時間増分($t+\Delta t$)あたりのせん断方向接触力

u_n : target faceへ節点Pの貫入量

Δu_{si} : せん断方向変位増分量

k_n : 法線方向の剛性

k_s : せん断方向の剛性

A : 接触面積

また、相互のすべりに対してCoulombの破壊基準に従うものとし、次式を用いる。

$$F_s \max = cA + F_n \cdot \tan \phi \quad (3)$$

ここに、

c : Interface要素表面の粘着力

ϕ : Interface要素表面の内部摩擦角

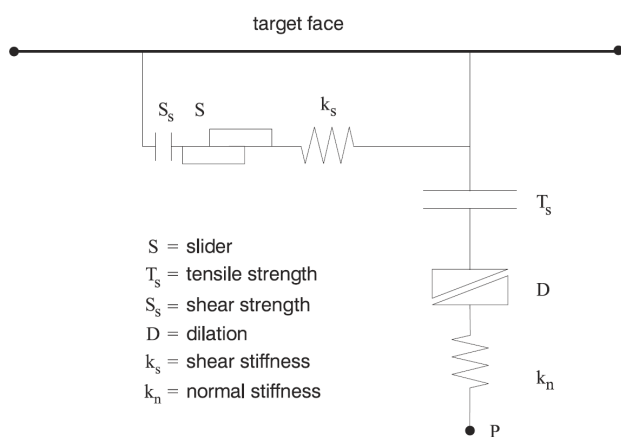


図-1 Interface要素の力学モデル

(2) Interface要素の適用性

本要素の適用性の検討モデルは、“二軸の初期応力が作用する二次元無限弾性体中に一次支保工（ライニング）を有する円孔がある場合”とした。

既往の研究では、Einsteinら²⁾により、ライニングを薄肉円筒シェル部材³⁾とおき、地山とライニング間のせん断応力が伝達する場合（no-slip状態）と伝達しない場合（full-slip状態）の各理論解とせん断応力の伝達の影響について報告している。また、FLAC3D（有限差分法）のマニュアル⁴⁾では、このせん断応力の伝達の違い（有無）による影響について、ライニングに付着特性を付加した厚みをもたないShell要素を用いた検討を報告している。これらは、ライニングを薄肉円筒シェルとおきシェル理論³⁾による近似モデルを用いた理論解と位置づけられる。一方、木山ら⁵⁾は、ライニングを厚みを考慮した厚肉円筒部材とおき、二次元弾性体のAiryの応力関数⁶⁾を用いた理論解の導出方法を報告している。

本報告では、近年、著者らは、脆弱な地山におけるトンネル工事に関わるケースが増え、支保工厚の増大、多重支保工の採用が多く見られるため、支保工の厚みが力学挙動に及ぼす影響も大きくなると思われるため、前述の報告例と同様に有限差分法を用い、一次支保工は厚みをもつSolid要素でモデル化し、地山と支保の間にInterface要素を用いて行う（図-2参照）。

本検討の目的である地山と一次支保工の間の付着特性がトンネル構造体の安定性に与える影響を定量的に示すため、Interface要素の適用性を確認する必要がある。そこで、上述したEinsteinら、木山らの理論解から得られる値と比較することで本計算手法の適用性を確認し、あわせて、付着特性が与える影響について考察する。

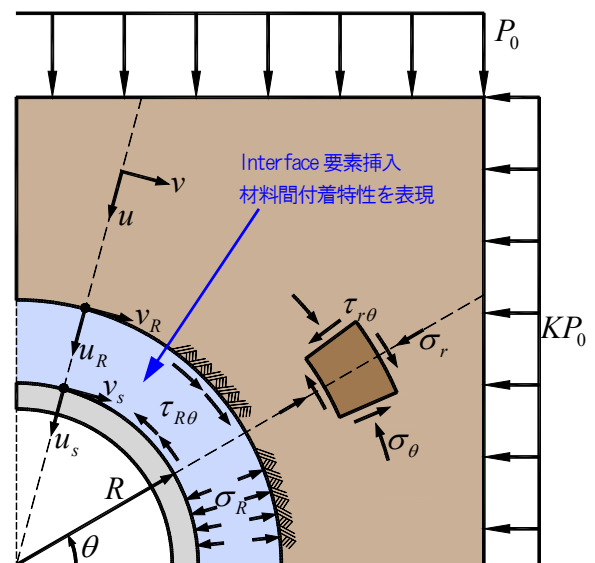


図-1 解析対象のモデル化

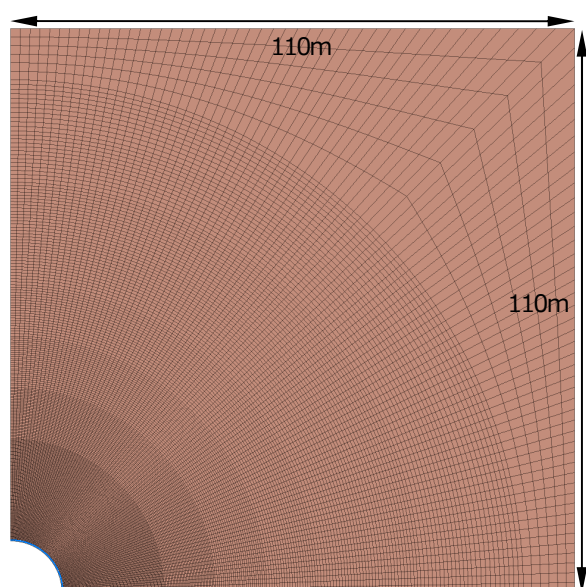
(3) 解析条件

二次元無限弾性体の地山中の円孔の数値解析モデルを図-2に示す。要素分割は、支保工と地山との相互作用に着目するため、周方向に1°間隔で細かく分割している。なお、後述する要素分割の影響検討では、要素分割を5°間隔にしたモデルと比較した。

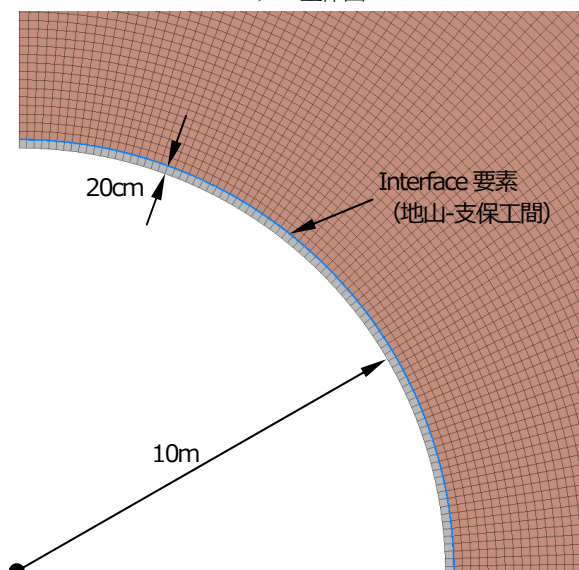
円孔モデルの諸元を表-2に、地山と支保工の物性値を表-3に示す。これらの条件は一般的な道路トンネルを想定したものであり、D級地山の施工条件とした。

解析領域の設定は、トンネル掘削による影響の及ばない領域を確保する点に留意し、トンネル代表径Dに対して5D (100m) とした。

解析手順は、理論解との比較を目的としているため、地山内の初期応力状態を再現した後、掘削直後に支保が構築されるものと仮定し、100%の掘削解放応力を支保工に作用させた。



《モデル全体図》



《円孔部拡大図》

図-2 解析モデル図

(4) トンネル形状と付着特性の関連性

トンネル形状と付着特性の関連性を検討するために、一般的な道路トンネルの支保パターン (DI) ⁷⁾ (図-2参照)、および同じ内径 (R1=5.8m, t1=15cm) の円形トンネルの数値解析を実施する。

地山と支保工の材料間の付着特性については、次の3つの範囲を設定し、付着特性の影響を確認する。

- ・トンネル全周をno-slip状態とする
- ・トンネル全周をfull-slip状態とする
- ・S.L.を境に上半no-slip状態、下半full-slip状態とする

表-4には付着特性を表現するInterface要素の物性値を示す。法線方向および接線方向の剛性は、次式により算定した剛性を10倍した値を採用⁸⁾した。

$$E = \max \left[\left(K + \frac{4}{3} G \right) / \Delta z_{\min} \right] \quad (4)$$

ここに、

K, G : 体積弾性係数, せん断弾性係数

$\Delta z_{\min}$: 境界面法線方向の最小要素幅

表-2 トンネルの諸元

	値
トンネル径[m]	20.0
初期地圧[MPa]	4.4
側圧係数[-]	0.50
支保工厚さ[m]	0.20

表-3 地山と支保工の物性値

	弾性係数 [MPa]	ポアソン比 [-]
地 山	500	0.30
支保工	4,000	0.20

表-4 Interface要素の物性値

	法線方向剛性 K_n [MPa/m]	せん断方向剛性 K_s [MPa/m]
バネ剛性	3.7×10^4	3.7×10^4

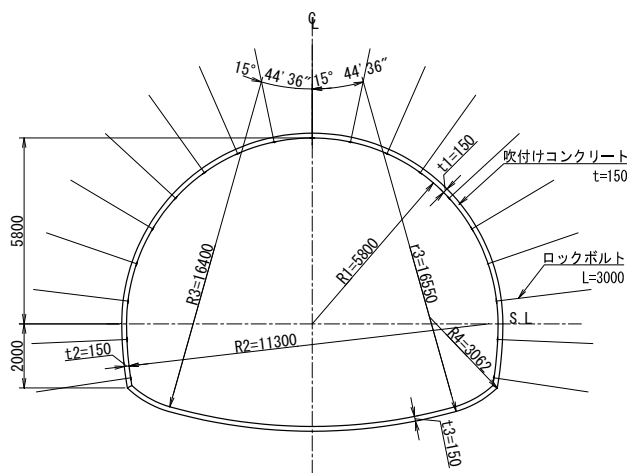


図-3 支保パターン図 (DI)

3. 断面形状が地山と吹付けコンクリートの付着特性に及ぼす影響に関する検討

(1) Interface要素の適用性と付着特性が及ぼす影響

Interface要素の適用性を把握するため、地山と一次支保工（ライニング）のfull-slip, no-slip状態に対し、数値解と理論解（Einsteinらの解、木山らの解）を比較した。

材料境界面上の接触応力 σ_R 分布を図-4に示す。図より数値解と理論解の各プロットは同一曲線上にありよく一致している。よって、境界面上の接触応力を把握するためにInterface要素を用いることが可能であるとわかる。加えて、ライニングを薄肉シェル部材あるいは厚肉円筒部材とモデル化することの差は小さいことがわかる。

次に、一次支保工の変位分布を図-5に示す。図に示される半径方向変位は数値解と理論解の各プロットは同一曲線上にありよく一致している。ただし、周方向変位分布に若干の差が生じる。このため、境界面上の半径方向変位を把握するためにInterface要素を用いることが可能であるが、周方向変位には注意が必要である。

(2) 要素分割の影響について

Interface要素を用いた解析を行う上で、通常要素分割の要領で良いか明らかにするため、要素分割寸法を変えたモデルを用いて比較検討した。一次支保工の軸応力分布を比較した結果を図-6に示す。図に示されるように、要素分割の疎密による影響は小さく、通常要素分割でInterface要素を適用することができる。

(3) 材料境界面の付着特性が及ぼす影響

支保工の軸応力分布を図-7に示す。初期条件が同じでも材料境界面の付着特性が異なれば、一次支保工に作用する地圧分布は大きく変化することがわかる。このことから、材料境界面の付着特性はトンネル構造物の安定性を考える上で重要な力学的因子であることがわかる。

(4) トンネル形状と付着特性の関連性

トンネル形状と付着力の関連性を検討した結果を図-8に示す。図は、図-4に示した σ_R の分布をカラーコンター表示したものである。この σ_R は、地山から支保工に作用する法線応力であり、単位奥行あたりで考えると“トンネル支保工に作用する荷重の法線方向分布”といえる。DIパターンの解析結果を図-8 (a), (b), (c)に示す。また、DIパターンの断面形状と比較のために円形断面形状の解析結果を図-8 (d), (e)に示す。

a) 円形断面における付着特性の影響

図-8 (d) は、no-slip状態の作用荷重分布であり、側圧係数 $k=0.5$ より、側壁部分の作用荷重が天端に比べ相対的に大きくなる。また、図-8 (e) は、full-slip状態の作

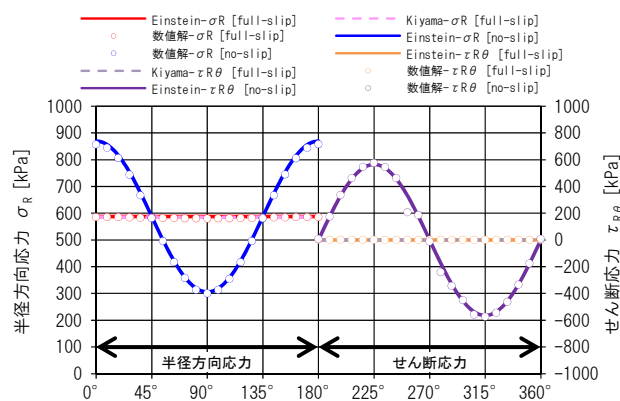


図-4 材料境界面の接触応力の比較

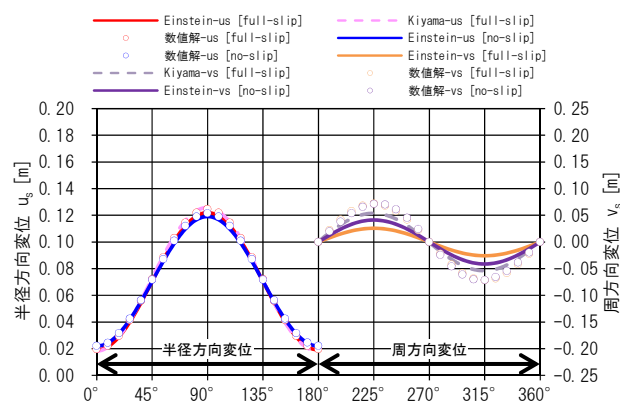


図-5 一次支保工の変位の比較

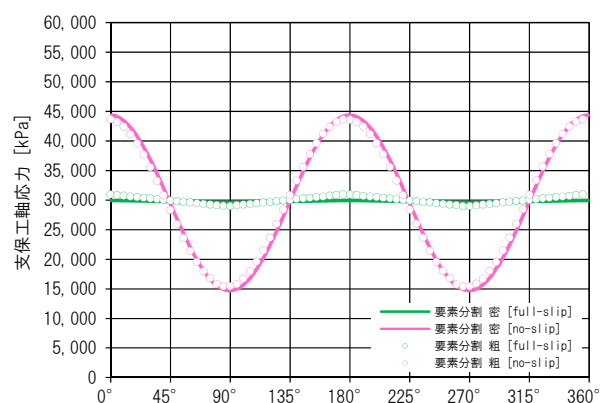


図-6 要素分割程度と解析結果の比較

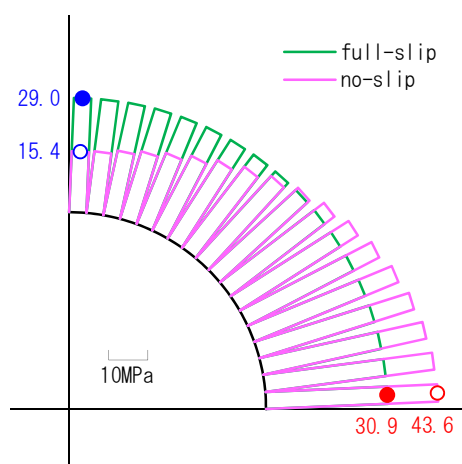


図-7 境界面付着特性と支保工軸応力の関係

用荷重分布を示している。no-slip状態の場合と比べ、トンネル全周にわたって一様な分布荷重となる。これらより、支保工背面をslipさせることで、支保工に作用する荷重が平準化されることがわかった。

b) トンネル形状が付着特性による荷重分布に及ぼす影響

no-slip状態の図-8 (a) と (c) を比較する。トンネル上半 (SLより上) では、トンネルに作用する荷重に大きな差は見られない。一方で、トンネル下半 (SLより下) では、脚部付近の作用荷重が大きく増大し、インバート中央付近では逆に作用荷重が小さい。これらより、トンネル形状が変わることで、隅角部に作用荷重が集中し、その周辺の作用荷重が小さくなることがわかる。

full-slip状態におけるトンネル形状の影響を明らかにするため、図-8 (e) と (c) を比較する。no-slip状態の結果と同じように、トンネル上半部は形状の影響は小さく、下半部の隅角部に作用荷重が増大、インバート中央部で作用荷重が小さくなった。しかし、前者の結果に比べ作用荷重の増大はみられない。図-8 (e) でみられた作用

荷重の平準化の働きが作用したものと考えられる。

c) 区分的な付着特性の付与による影響と効果

ここまでの知見から、トンネル上半部の作用荷重はトンネル下半部の形状の影響を受けにくい。そこで、DIパターンの下半部のみをfull-slip状態にし、上半部はno-slip状態とした場合の結果を図-8 (b) に示す。

全周full-slip状態の結果に比べて作用荷重部の平準化効果は小さいが、脚部に作用する荷重はno-slip状態に比べ小さくなる。

以上より、トンネル形状が変われば支保の作用荷重の“集中と分散”が生じることがわかった。また、支保工背面の付着特性を変化させることでトンネル支保工に作用する荷重を“平準化”させることが可能であることを示した。すなわち、支保工背面の付着特性を制御することで“トンネル作用荷重の制御”が可能であると言える。これは、トンネルの支保設計をする上で重要な要素となり得るものであり、今後検討を深めていきたいと考えている。

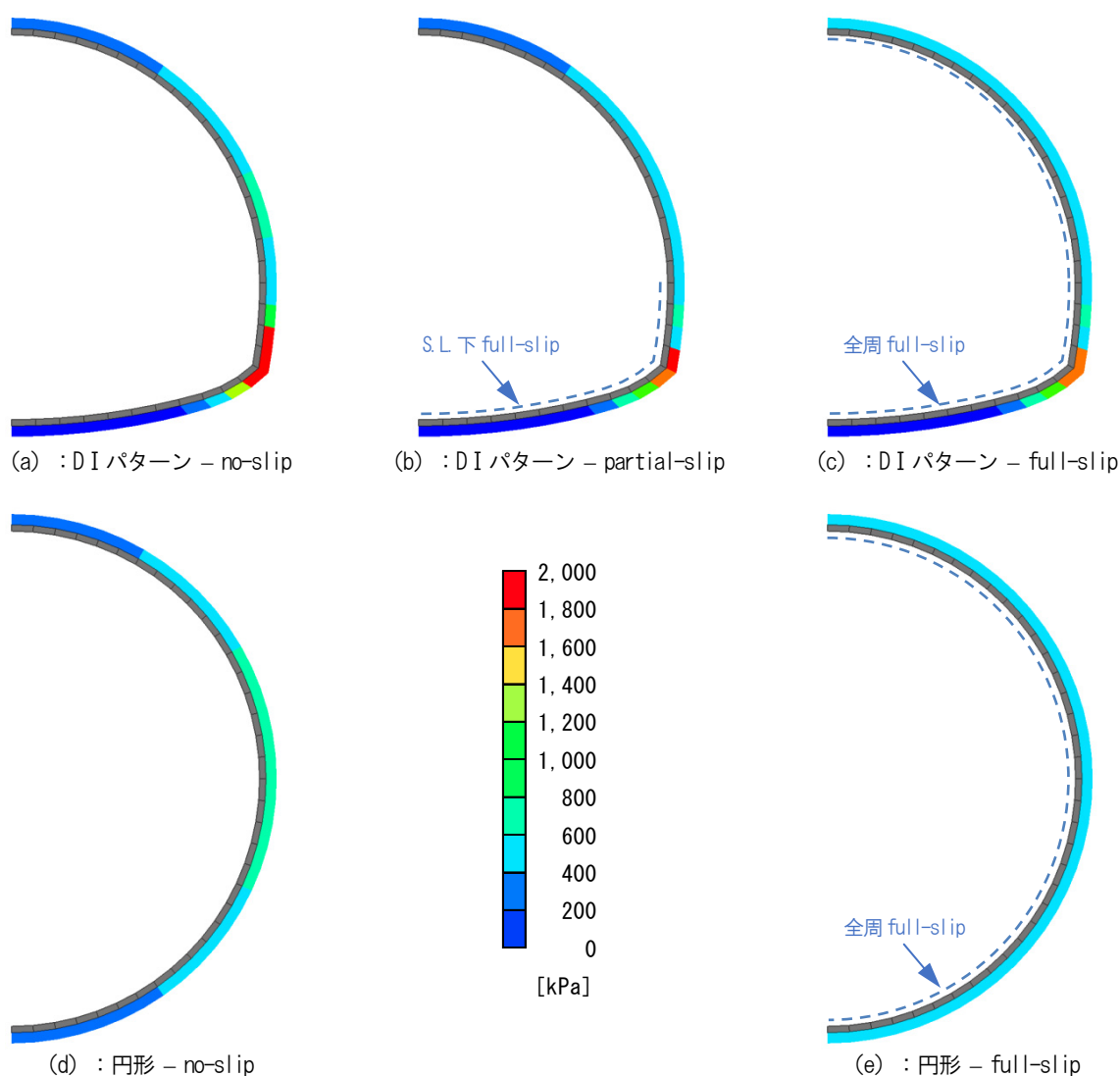


図-8 トンネル形状の違いによる支保に作用する地圧 (σ_R) 分布

4. おわりに

本報告では、“トンネル周辺地山と支保構造体の力学的な相互作用を考慮した合理的な設計法”の課題の一つとして、トンネル構造体の力学モデルの高度化の観点から、地山と一次支保工の材料境界面における付着特性がトンネルの力学挙動に与える影響の違いに着目し、地山と一次支保工の材料境界面における付着特性を表すInterface要素の適用性について検討するとともに、付着特性がトンネルの安定性に及ぼす影響や効果について予備的考察を行った。

検討から明らかになったことを要約して下記に箇条書きする。

- 1) 地山と一次支保工のfull-slip, no-slip状態に対して円形断面トンネルを対象にして、数値解と理論解を比較した結果、数値解と理論解は、良く一致している。
- 2) 初期応力や掘削解放率が同じ条件でも、材料境界面の付着特性が異なれば、一次支保工に作用する地圧は大きく変化する。
- 3) 支保工背面をSlipさせることで、支保に作用する荷重が平準化される。
- 4) トンネル形状が変われば支保の作用荷重の集中と分散が起こるが、支保工背面の付着特性を変化させることでトンネル支保工に作用する荷重を平準化させる（トンネル作用荷重を制御する）ことが可能である。

以上のことから、地山と一次支保工の付着特性を変えることでトンネル作用荷重の制御が可能であると言える。これは、トンネルの支保設計をする上で重要な要素となり得るものであり、押し出し性地山でのトンネル構造体の力学モデルや荷重分担率の検討に活用が期待できる。

今後は実測値との比較も視野に、地山と一次支保工の付着特性について検討を深めたいと考えている。

参考文献

- 1) 福田毅, 安藤拓, 多田浩幸, 熊坂博夫: 地山と一次支保工の材料境界面の付着特性がトンネル構造体の安定性に与える影響に関する検討, 土木学会年次講演会論文集, III-401, 2016.09.
- 2) Herbert H. Einstein, Charles W. Schwartz : Simplified Analysis for Tunnel Supports, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.105, No.GT4, pp.499-518, 1979.
- 3) Flugge, W., Stresses in Shells, Springer-Verlag, Inc., New York, N.Y., 1966.
- 4) Itasca Consulting Group, Inc.: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC3D Version 5.01), Verification Problems, Lined Circular Tunnel in an Elastic Medium with Anisotropic Stresses, pp.1-22, 2013.
- 5) 木山英郎, 藤村尚, 西村強, 池添保雄: 初期地盤の変形を考慮した円形ライニングの2次元弾性解—地山支保力の定量化へのアプローチ—, 土木学会論文集 No.589/III-42, 91-98, 1998.03.
- 6) Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N., Theory of Elasticity, 3rd ed., McGraw-Hill Book Co., New York, N. Y., 1934.
- 7) NEXCO: トンネル標準設計図集, 2006.10.
- 8) Itasca Consulting Group, Inc.: Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions (FLAC3D Version 5.01), Theory and Background, Section 2: Interfaces, pp.11-14, 2013.

(2016.8.5 受付)

APPLICABILITY OF INTERFACE ELEMENT TO DEMONSTRATE THE TRANSFER OF LOAD AT THE BACK OF TUNNEL SUPPORT

Tsuyoshi FUKUDA, Taku ANDO, Hiroyuki TADA,
Takashi ISHII and Hiroo KUMASAKA

In mountain tunneling construction, it is not unusual that the calculated and actual measurement value of ground and tunnel support behavior such as convergence to be different. One of the main reasons for this occurrence is due to the lack of geological information. However, the author believes that the bonding between the tunnel support and the ground play an important role as well.

In this paper, the interface elements will be examined and verified to demonstrate the bonding characteristic. In addition, the effect of bonding characteristic on the tunnel support will be discussed as well.