

坑内変位による支保工応力の予測を目的とした支保工応力再現解析

藤岡 大 輔 中岡 健 一

Support Stress Reproduction Analysis to Predict Support Stress
from Underground Displacement

Daisuke Fujioka

Kenichi Nakaoka

Abstract

In mountain tunnels, the ground properties are estimated using converged tunnel displacements for back analysis. Forward analysis with these properties shows good agreement for tunnel displacements but often deviates for support stresses, such as steel supports and shotcrete. This study aims to improve the accuracy of support stress prediction by simultaneously reproducing the measured tunnel displacements and support stresses. The analytical values approach the measured values by introducing interface elements to the boundaries between the steel supports and the ground, top joints, and joints of the upper and lower half supports. Additionally, this study considers the possibility of slippage at actual boundaries and suggests a measurement method to confirm its presence or absence, thus enhancing the understanding of support-ground interactions.

概 要

山岳トンネルでは、収束した坑内変位を入力値とした逆解析により地山の物性値を推定することがある。その物性値を用いて順解析を行うと、坑内変位の解析値と実測値は良く一致するが、鋼製支保工や吹付けコンクリートといった支保工の応力の解析値と実測値は乖離する場合が多い。本研究は、坑内変位を用いた支保工応力の予測精度向上を目的として、坑内変位と支保工応力の実測値を再現する順解析を試みたものである。本研究では、鋼製支保工と地山の境界、頂部継手、上半と下半支保工の継手、等に材料間のすべりを表現するインターフェイス要素を導入した結果、解析値が実測値に近づくことを述べる。また、解析結果から、実際の支保工と地山の境界等においてすべりが生じている可能性を考え、すべりの有無を確認するための計測方法を示す。

1. はじめに

山岳トンネルでは、弾性係数や初期応力といった地山の物性値を求めるため、収束した内空変位や天端沈下（以下、坑内変位と記す）を入力値として逆解析が実施される。逆解析で得られた物性値を用いて順解析を実施すれば、掘削に伴い地山状況が大きく変化しない限り、坑内変位を予測できる。ただし、鋼製支保工や吹付けコンクリート（以下、合わせて支保工と記す）に発生する応力は乖離する場合が多い。大林組がこれまでに実施した数値解析によるトンネル安定性解析と鋼製支保工応力測定過去の事例から、鋼製支保工の縁応力の解析値を抽出し、実測値と比較した結果を Fig. 1 に示す。トンネル安定性解析とは、坑内変位（内空変位と天端沈下、脚部沈下）の解析値と、収束した坑内変位の実測値が一致するようにフィッティング解析を行い、支保工の応力照査などを実施することである。その結果から鋼製支保工の縁応力を抽出し、同断面で実測された縁応力と比較した。解析値には、二次元弾性 FEM、二次元弾塑性 FEM、三次

元弾塑性 FEM の結果が含まれている。比較した結果、坑内変位が小さい場合、実測値と解析値は近い値となるものの、坑内変位が大きくなるにつれて解析値が大きくなり、実測値と乖離する傾向を確認した。このような場合、便宜的に鋼製支保工の弾性係数を 1/2 とする¹⁾、鋼製支保工の応力照査を行わずに地山のひずみでトンネル安定性を検討する、等の対策がとられる。

大林組は、二次元弾性 FEM を併用し、地山の物性値と変位を定式化する直接逆解析法と呼ばれる方法で坑内変位から支保工に生じる応力（以下、支保工応力）を予測する手法を検討してきた²⁾。坑内変位が小さい場合、予測された支保工応力の解析値と実測値は概ね一致するものの、坑内変位が-30mm を超えるような場合、Fig. 1 で示した状況と同様に両者は乖離する事例が多かった。

このような背景から、坑内変位を用いた支保工応力の予測精度を向上することを目的として、坑内変位と支保工応力を同時に再現可能な解析モデルを検討し、後述する Fig. 2 に示す流れで応力再現解析を実施した。

本研究では、応力再現解析で設定した解析モデルやパ

ラメータについて述べたのち、その解析結果を示す。また、解析結果から、実際の支保工と地山の境界面等において、どのような現象が生じているかを考察し、実際にこの現象を確認する計測方法を提案する。

2. 応力再現解析の方法

2.1 応力再現解析の流れ

前章で述べたように、通常の解析モデルでは現実の支保工の応力を再現することが困難な場合が多い。しかし、坑内変位と支保工応力を同時に再現することが可能な解析モデルがあれば、両者の推定精度が向上すると考え、Fig. 2 に示す流れで応力再現解析を実施した。

- 1) 実測値を抽出する。本研究では、計測 A（坑内変位計測）と計測 B（鋼製支保工応力測定と吹付けコンクリート応力測定）が同時に実施された二車線の道路トンネルの実測値を採用した。
- 2) 坑内変位の収束値（実測値）と解析値が一致するように、地山の弾性係数やポアソン比、等をフィッティングする。
- 3) 解析モデルの条件を設定する。ここでは、後述するインターフェイス要素の有無や場所、物性値を設定する。
- 4) 解析結果を出力する。
- 5) 支保工応力の解析値と実測値を比較する。両者が乖離する場合は 3) の条件等を再設定する。一致する場合は終了となり、解析モデルを支保工応力推定モデル（逆解析）に反映する。フィッティング後にインターフェイス要素の物性値を変更するため、支保工応力だけでなく坑内変位においても解析値と実測値を比較した。

2.2 解析条件

Fig. 3 に応力再現解析の対象とした地点の支保パターン図を示す。土被りは 530m であり、泥岩を主体とする軟質な地山であった。Fig. 4 に解析モデルを示す。支保パターンにはインバート吹付けが含まれるが、実測値としてインバート掘削する前の値を採用したため、インバート吹付けについてはモデル化しなかった。ロックボルトはトラス要素、鋼製支保工と吹付けコンクリートはソリッド要素として等価剛性モデルとし、二次元弾塑性解析とした。解析ソフトには FLAC3D ver5.0 を用いた。解析ステップを Fig. 5 に示す。応力解放率は 40% とし、検証するパラメータを減らすため本研究では固定値とした。土被り圧を考慮して地山の初期応力を設定し、掘削面に地圧の 40% を内空方向に载荷する掘削解析を実施した。支保工を追加した後、残りの 60% を内空方向に追加で载荷した。図に示すステップ 3 とステップ 2 で出力される変位の差分が坑内変位の解析値となる。

2.3 解析物性値

Table 1 に解析物性値を示す。地山の物性値は、トンネ

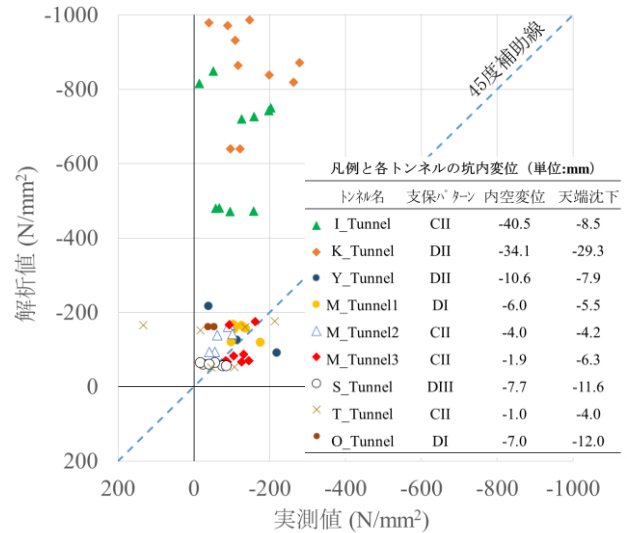


Fig. 1 鋼製支保工の解析値と実測の比較事例
Examples of Comparison Between Analytical Values and Measured Values of Steel Support

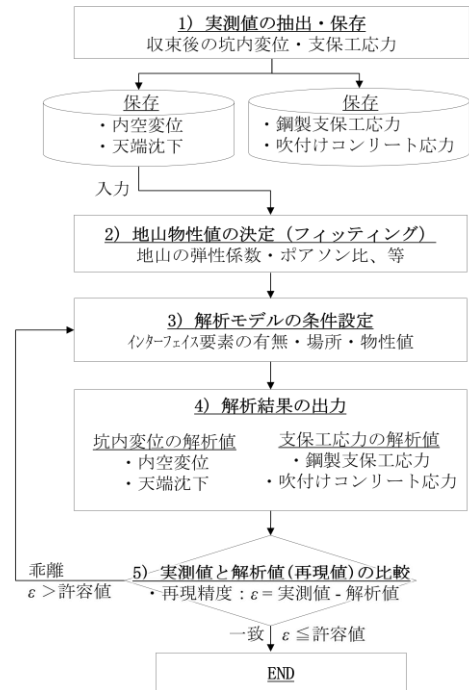


Fig. 2 応力再現解析の流れ
Flow of Stress Reproduction Analysis

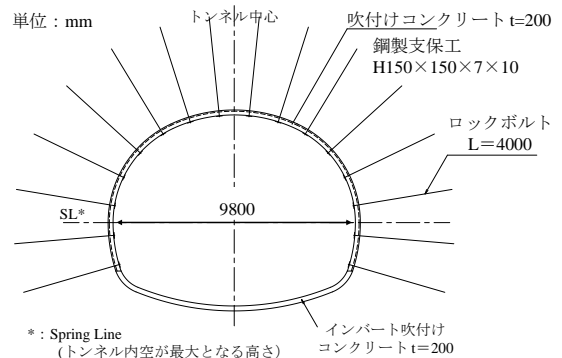


Fig. 3 支保パターン図
Support Pattern

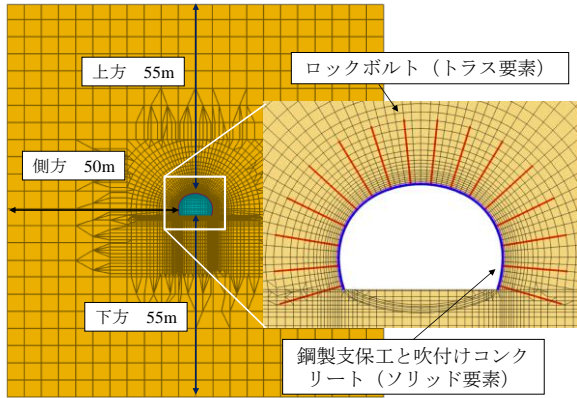


Fig. 4 解析モデル
Analytical Model

ル数値解析マニュアル³⁾に記載された一般値を参考に、フィッティング解析により坑内変位の解析値が実測値に近づく値を採用した。鋼製支保工と吹付けコンクリートの物性値はトンネル数値解析マニュアル、ロックボルトの物性値はNEXCOの設計要領⁴⁾を参考として設定した。

2.4 インターフェイス要素

インターフェイス要素は、材料間の付着やすべり状況に応じた荷重伝達を表す要素である。Fig. 6 にこの要素の力学モデルを示す。せん断剛性 k_s と法線剛性 k_n を与えることにより相互に伝達される応力が計算され、粘着力と摩擦角を与えることでモールの破壊規準を超えた場合にスライダーが機能し、伝達される応力が一定値となる。

山岳トンネルの解析モデルにインターフェイス要素を採用した既往文献として、付着特性を変化させて支保工や覆工に作用する荷重の制御や低減を試みた例^{5), 6)}や、めがねトンネルの施工時に生じる応力の予測精度を向上させた例⁷⁾がある。

Fig. 7 にインターフェイス要素を設定した位置を記す。本研究では、支保工と地山の境界だけでなく、支保工と支保工の境界となる部位である「頂部継手」、「上半と下半支保工の継手（以下、上下半継手と記す）」、「下半支保工底板と地山の境界」にもインターフェイス要素を設定した。いずれも厚みを持たない線要素とした。

2.5 解析ケース

解析ケースとインターフェイス要素の有無、物性値をTable 2 に示す。最初にインターフェイス要素の無い通常解析 Case 0 を実施後、インターフェイス要素の強度を小さくする方向に変化させた。インターフェイス要素の物性値として、地山の強度を基準とした低下割合を設定し、せん断強度低減法に基づき以下のとおり計算した。地山の弾性係数、粘着力、摩擦角はTable 1 の値を用いた。

インターフェイス要素の強度が地山の $1/n$ 倍となるとき、

- ・せん断剛性 k_s , 法線剛性 k_n : 地山の弾性係数 $\times 1/n$
- ・粘着力 c : 地山の粘着力 $\times 1/n$
- ・摩擦角の係数 $\tan\phi$: $\tan\phi \times 1/n$

Table 1 解析物性値
Analytical Properties

土被り[m]		530
単位体積重量 [kN/m³]		24
地山の弾性係数 [MPa]		2000
地山のポアソン比	初期応力解析	0.49
	掘削解析	0.30
	支保工設置	0.30
地山の粘着力 [MPa]		2.0
地山の摩擦角 [度]		45
地山の引張強度 [MPa]		0.4
地山のダイレイタンス角[度]		45
鋼製支保工弾性係数 [MPa]		200000
ロックボルト弾性係数 [MPa]		200000
吹付けコンクリート弾性係数 [MPa]		4000
鋼製支保工と吹付けコンクリートの 等価弾性係数 [MPa]		8084
鋼製支保工と吹付けコンクリートのポアソン比		0.20

ステップ1 初期応力解析 土被り圧を載荷し、地山の初期応力(地圧)を取得	ステップ2 掘削解析 地圧の40%を掘削面から内空方向に載荷	ステップ3 支保工設置解析 地圧の60%を掘削面から内空方向に「追加」載荷
地圧は内圧と等しい	内圧が減少	支保工には地圧の60%が載荷
出力される変位 ゼロ	出力される変位 先行変位 (=坑内変位の初期値)	出力される変位 全変位 (=坑内変位+先行変位)

Fig. 5 解析ステップ
Step of Analysis

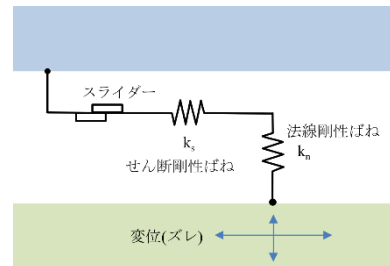


Fig. 6 インターフェイス要素の力学モデル
Mechanical Model of Interface Elements

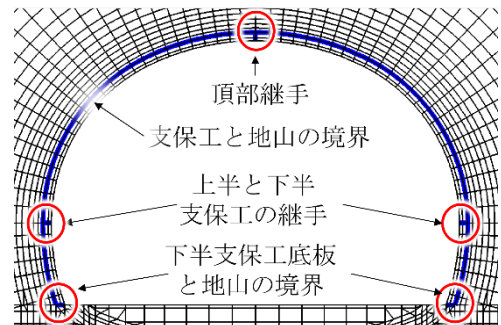


Fig. 7 インターフェイス要素設定箇所
Locations for Setting Interface Elements

Table 2 インターフェイス要素のパラメータ

解析 ケース	地山強度に 対する インターフェイス強度	インターフェイス要素 適用箇所	インターフェイス要素の物性値			
			せん断剛性 ks(Mpa/m)	法線剛性 kn(Mpa/m)	粘着力 C(MPa)	摩擦角 φ(度)
Case0	剛結	無し	-	-	-	-
Case1	1/10	支保背面・下半底板・ 上下半継手・頂部継手	200	200	0.2	6
Case2	1/100	支保背面・下半底板・ 上下半継手・頂部継手	20	20	0.02	1
Case3	1/1000	支保背面・下半底板・ 上下半継手・頂部継手	2	2	0.002	0

3. 応力再現解析の結果

3.1 実測値

Fig. 8 に計測 A と計測 B の計測箇所, Fig. 9 に内空変位と天端沈下の実測値, Fig. 10 に鋼製支保工応力と吹付けコンクリート応力の実測値を記す。OUT は鋼製支保工の地山側の縁応力, IN は内空側の縁応力を示している。解析値は左右対称となるため, 以下の実測値の収束値を平均して解析値と比較した。

- ・ 肩部に位置する S2 と S3, T2 と T3
- ・ SL 上に位置する S4 と S5, T4 と T5

3.2 解析結果

Fig. 11(a)～(c)に Case 0～Case 3 の解析結果を示す。支保工のソリッド要素は鋼製支保工と吹付けコンクリートの等価剛性モデルとなっているため, ソリッド要素の最大主応力から, 鋼製支保工と吹付けコンクリートの応力を式(1)と(2)より算出した。また, 鋼製支保工の IN と OUT は内側と外側の要素の応力から, 吹付けコンクリートは応力計の設置位置に近い外側の要素から求めた。

$$\sigma_{Steel_support} = \sigma_{max_Principal_Stress} \times \frac{n(A_c + A_s)}{A_c + nA_s} \quad (1)$$

$$\sigma_{Shotcrete} = \sigma_{max_Principal_Stress} \times \frac{A_c + A_s}{A_c + nA_s} \quad (2)$$

ここに,

$\sigma_{max_Principal_Stress}$: 支保工要素の最大主応力

$\sigma_{Steel_support}$: 鋼製支保工の最大主応力

$\sigma_{Shotcrete}$: 吹付けコンクリートの最大主応力

n : 鋼製支保工と吹付けコンクリートの弾性係数の比

A_s : 鋼製支保工の断面積

A_c : 吹付けコンクリートの断面積

3.2.1 鋼製支保工応力 インターフェイス要素が無い Case 0 とインターフェイス強度が大きい Case 1 において実測値と大きく乖離した(Fig. 11(a))。インターフェイス要素の強度を地山強度に対して小さくするほど解析値が下がっていき, 地山強度の 1/1000 とした Case 3 が最も実測値に近づいた。ただし, Case 1 はインターフェイス要素を入れたにもかかわらず, Case 0 の値よりも大きくなった。この原因は, 地山と支保工の境界にインターフェイス要素を入れることによる応力低下量より, 3 章 3 節に記述する局所的な応力増加量が上回ったためと考えられる。

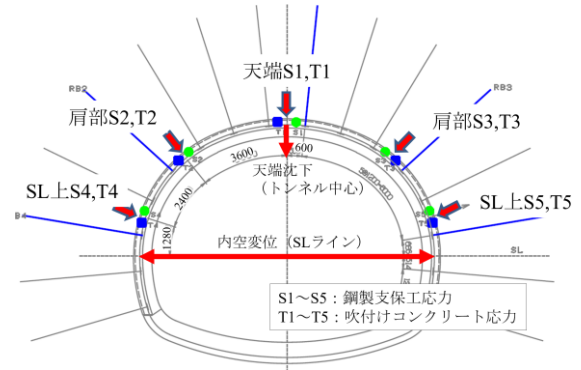


Fig. 8 実測値の計測箇所

Measurement Locations for Measured Values

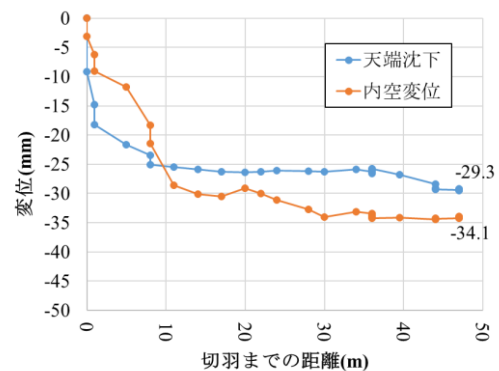


Fig. 9 坑内変位の実測値

Measured Values of Converged Tunnel Displacements

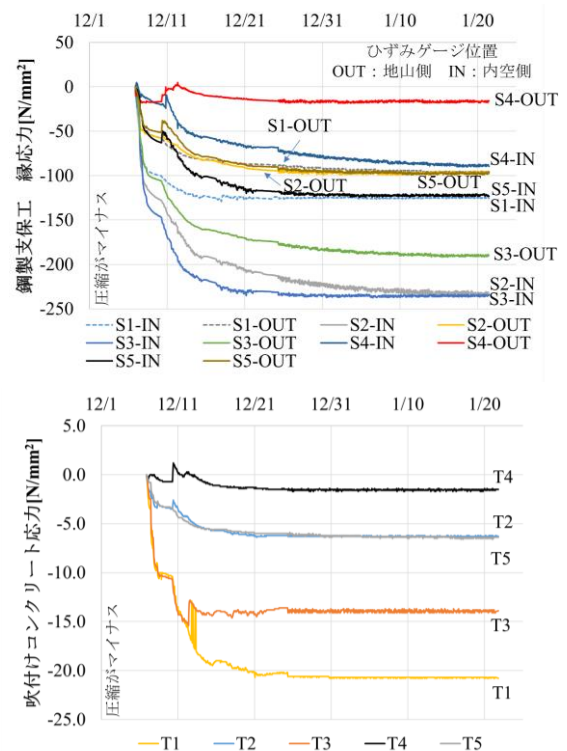


Fig. 10 支保工応力の実測値

Measured Values of Support Stress

3.2.2 吹付けコンクリート応力 全ての Case において実測値の応力分布を再現した解析値は得られなかった(Fig. 11(b))。この原因として、1)支保工背面への吹付けコンクリートの充填状況が均質な解析条件とは異なっていたこと、2)吹付けコンクリートの弾性係数は材齢により変化し、実測値が収束した時点の弾性係数が不明であったこと、等が挙げられる。以上のことから、本解析では吹付けコンクリート応力の正確な再現は難しいと判断した。

3.2.3 坑内変位 坑内変位は、支保工内面の変位に加え、地山内面（支保工と地山の境界）の変位をプロットした(Fig. 11(c))。支保工内面の変位は、インターフェイス要素の無い Case 0 が最も実測値と一致するが、インターフェイス要素を入れることで、支保工が地山の變形に追従しなくなり、Case 1 と Case 2 では実測値よりも大きく、Case 3 は実測値より小さくなった。インターフェイスの強度が小さくなるにつれて支保工の効果が低下するため、地山内面の変位は徐々に大きくなった。支保工内面の変位が実測値より大きくなる原因は、Fig. 12 に示す変形図のように、インターフェイス要素付近で内空方向への變形が大きくなったためと考えられる。また、実測値より小さくなる原因は、Fig. 13 に示すように、法線剛性が小さいため、支保工要素への地圧の伝達が小さく支保工の変位も小さくなり、支保工が地山に埋まるような變形が生じたためと考えられる。

現状では、以下の手順を用いることで、坑内変位と支保工応力の両者を再現可能なことがわかった。

- 1) Case 0 のように、地山と支保工を剛結したモデルで解析して坑内変位を再現する。この時、フィッティングにより地山物性値を定める。
- 2) Case 3 のように、1)で得た地山物性値を用いるとともに、解析モデルにインターフェイス要素を追加して支保工応力を再現する。支保工応力の実測値があれば、フィッティングによりインターフェイス要素のパラメータを定める。

3.3 インターフェイス要素の影響

Fig. 14 に、インターフェイス要素の強度を地山の 1/100 とした Case 2 において、段階的にインターフェイス要素を追加した場合の支保工応力分布を示す。横軸は解析モデルの x 座標で、トンネル断面に向かって右向きであり、中央が頂部である。支保工背面と脚部にインターフェイス要素を入れた場合、支保工応力は一様に低下した。上下半継手や頂部継手にインターフェイス要素を追加すると、追加した箇所周辺の応力が増加した。その原因は、支保工の剛性が低いインターフェイス要素部において、地山が降伏し大きな変位が発生すること等の要因が考えられるため、さらに解析データの分析が必要である。

4. すべりの計測方法案

本章では、インターフェイス要素より表現されるような支保工と地山の境界におけるすべりを計測する方法と

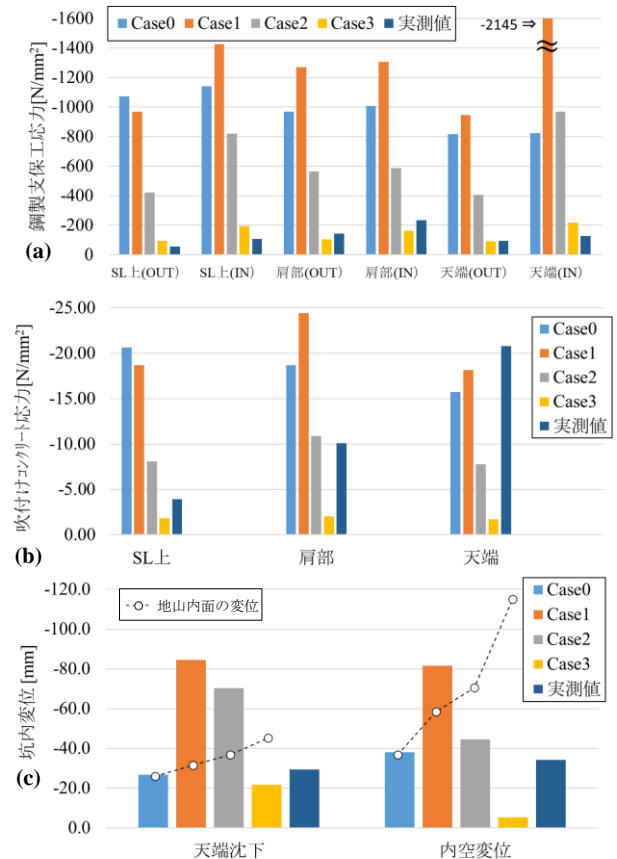


Fig. 11 支保工応力と坑内変位の解析結果
Analysis Results of Support Structure Stress and Underground Displacement

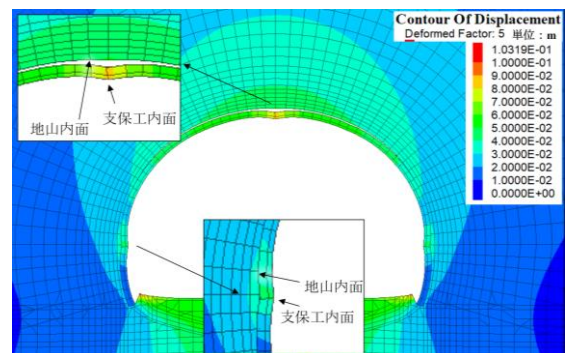


Fig. 12 Case 1の変形図（変形倍率5倍）

Deformation Diagram for Case 1 (Magnification 5x)

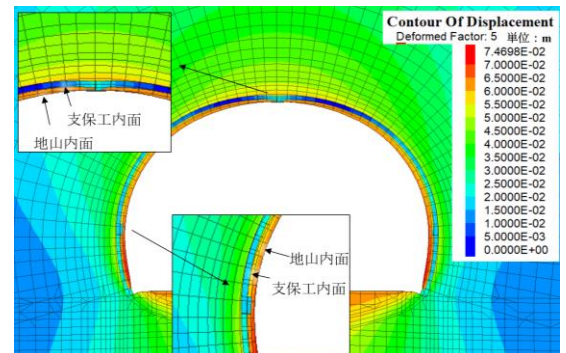


Fig. 13 Case 3の変形図（変形倍率5倍）

Deformation Diagram for Case 3 (Magnification 5x)

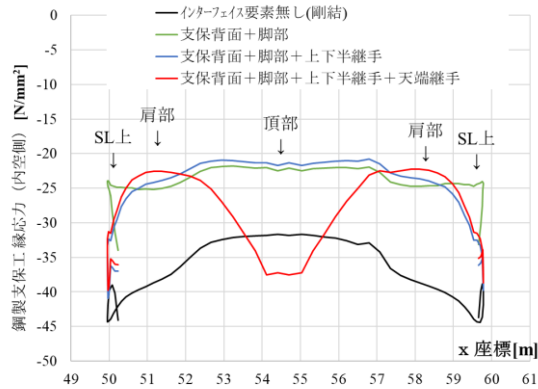


Fig. 14 インターフェイス要素の有無による影響
Impact of Interface Elements

して、Fig. 15 に示すような短尺パイプひずみ計とカンチレバ型変位計を用いた計測方法を提案する。

4.1 計測機器

4.1.1 短尺パイプひずみ計 樹脂製のパイプに貼られたひずみゲージにより、鋼製支保工と吹付けコンクリート、地山の境界で生じるすべりに伴う曲げひずみを測定するものである。長さは1mとし、ひずみゲージはすべりが生じる可能性がある範囲に高密度（例えば50mm間隔）で配置する。

4.1.2 カンチレバ型変位計 鋼製支保工にカンチレバを取り付け、その先端の測定子を吹付けコンクリートに取り付けた治具と接触させ、鋼製支保工と吹付けコンクリート表面のすべりに伴う変位を測定するものである。

4.2 計測方法

短尺パイプひずみ計とカンチレバ型変位計を用いたすべりの計測は、Fig. 8 に示したような鋼製支保工応力測定等と合わせて実施し、同じ位置に以下の手順で機器を設置する。

- 1) 鋼製の削孔ガイド治具を鋼製支保工に溶接し、鋼製支保工を通常通り建て込む。
- 2) 削孔ガイド治具に削孔ビットを通し、短尺パイプひずみ計を挿入する孔を1m削孔する。
- 3) ロックボルトと同様に、定着材を注入後、短尺パイプひずみ計を挿入し、固定する。
- 4) カンチレバ型変位計および治具を、鋼製支保工と吹付けコンクリートの表面に設置する。
- 5) 坑内配線後に計測を開始し、掘削に伴い発生する曲げひずみや変位を監視する。

5. まとめ

本研究では、坑内変位から支保工応力を予測することを目的として、坑内変位と支保工応力の両者を再現する応力再現解析を試みた。また、支保工応力の解析値と実測値に乖離が発生する原因として、支保工と地山のすべりの可能性を示唆し、すべりの有無を確認する計測方法

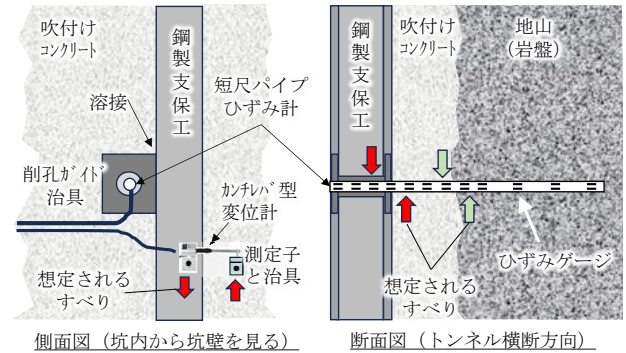


Fig. 15 すべりの計測方法案
Proposed Method for Measuring Slippage

を提案した。以下に本研究で得られた知見を記す。

- 1) 支保工と地山の境界や、頂部継手、上下半継手、下半支保工底板と地山の境界のインターフェイス要素のせん断剛性等を低くすれば、支保工応力の解析値は低減し、実測値に近づく。
- 2) 支保工と地山を剛結したモデルで坑内変位を再現する解析によって地山の物性値を設定し、インターフェイス要素を追加すると支保工応力が再現できる。ただし現段階では、同じ解析で坑内変位と支保工の応力を同時に再現することは困難であった。
- 3) 支保工と地山の境界において、すべりが生じているかどうかを確認するための計測方法を提案した。

今後、4 章で提案した計測を実施し、すべりの有無を確認する予定である。

参考文献

- 1) 独立行政法人鉄道建設運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説，pp. 434-437，2008
- 2) 藤岡大輔，中岡健一：坑内変位から支保工応力を予測し支保適合性を確認する方法の研究，第 50 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp. 187-192，2024.1
- 3) 株式会社高速道路総合技術研究所：トンネル数値解析マニュアル 2017 年度版，2018.2
- 4) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領第三集，トンネル建設編，pp. 4-49，2020
- 5) 福田毅，安藤拓，多田浩幸，石田卓，熊坂博夫：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，トンネル工学報告集，第 26 巻，1-6，2016.11
- 6) 岸田展明，日下敦，砂金伸治：山岳トンネル覆工の破壊時荷重における覆工形状の影響に関する数値解析的検討，トンネル工学報告集，第 26 巻，1-7，2016.11
- 7) 小池真史，田口敬介，大島基義，青木智幸，田村武：トンネル掘削解析の高度化，大成建設技術センター報，第 42 号，No.25，pp.1-9，2009.12