

# 既設トンネルに極近接する シールドトンネルの施工時影響解析法

三輪 陽彦\* 清水 達貴\* 仲山 貴司\*\*

The Influence Analysis Method of a Shield Tunnel under Construction Extremely Close to an Existing Tunnel

Akihiko MIWA Tatsuki SHIMIZU Takashi NAKAYAMA

This paper proposes a new numerical analysis method for neighboring construction where a new shield tunnel is excavated under an existing tunnel with a short distance. These tunnels are mathematically modeled using detail 3D shell elements and the ground between the tunnels is modeled using interaction springs. The strength of the interaction springs is determined using stability calculations of the ground above the new shield tunnel. We conducted the trapdoor test that reproduces this neighboring construction and measured the interaction between the intersecting tunnels. The results confirmed that the proposed analysis method can simulate the test result of ground reaction forces and tunnel deformation.

キーワード：トンネル，近接施工，降下床実験，数値解析

## 1. はじめに

近年，鉄道や道路，上下水道などの線状構造物は地下に整備されることが多くなり，これに伴い，図1に示すようにトンネル同士が地下で交差する工事（以下，「トンネル交差工事」）が増加している。新設トンネルの掘削は，既設トンネルを供用しながらの工事になるため，地盤を介して既設トンネルに与える変位や応力の増加を的確に予測し，事前に必要な対策を講じておくことが極めて重要になる。

トンネル交差工事に限らず，このように地盤を介して既設構造物に影響が生じる可能性のある工事は「近接施工」と呼ばれており，一般に，新設構造物と既設構造物の水平離隔が新設構造物の幅の2～3倍以下の工事が対象になる<sup>1) 2)</sup>。「都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル」（以下，「近接マニュアル」）<sup>1)</sup>では，新設構造物の種類毎に図2のような近接程度の区分図を示しており，新設構造物が「要注意範囲」または「制限範囲」と重なる場合が近接施工にあたる。また，近接施工にあたる場合には，影響予測と対策検討を行うこととしており，このための施工時影響解析法や対策事例も掲載している。

しかしながら，地下空間の過密化が進むなか，構造物同士の離隔は小さくなる傾向にあり，施工時影響解析法の改良が必要になってきている。トンネル交差工事の場合については，近接程度を「制限範囲」と判定して影響予測することとなるが，トンネル同士の離隔が新設トンネルの外径以下になる近接施工（以下，「極近接施工」）

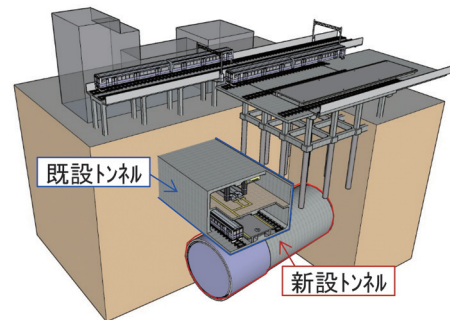


図1 トンネル同士の地下交差工事の模式図

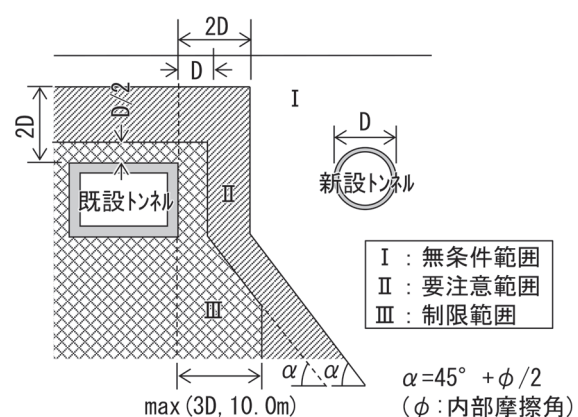


図2 近接程度の区分図の例<sup>1)</sup>を加筆・修正

に対しては，従来の施工時影響解析法のみでは対応しきれず，地盤条件に関わらず地盤を改良して固結する対策を講じる必要があった。地盤条件に応じた地盤改良の検討ができるよう，解析法の拡充も求められていた。

そこで本研究では，極近接施工を対象として，新たな施工時影響解析法を考案し，極近接施工を模擬した土槽

\* 元 構造物技術研究部 トンネル研究室

\*\* 構造物技術研究部 トンネル研究室

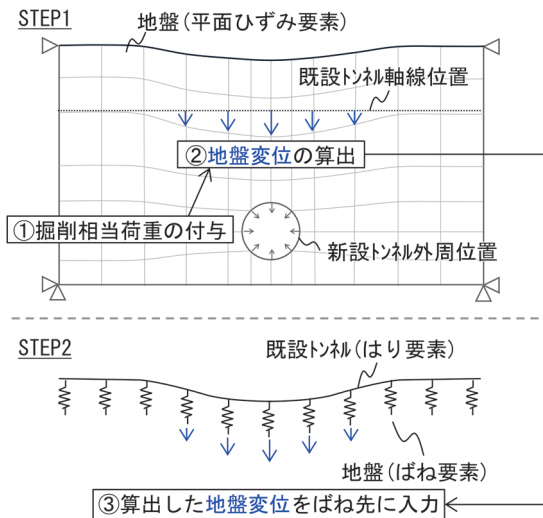


図3 従来手法の計算の流れ

実験で妥当性を検証した。本稿では、この詳細をまとめるとともに、実スケールでの施工条件を仮定して、新たな施工時影響解析法を用いて、既設トンネルへの影響を試計算した結果も報告する。

## 2. 施工時影響解析法

### 2.1 従来の施工時影響解析法

#### (1) 概要

従来の施工時影響解析法（以下、「従来手法」）は、新設トンネルの掘削に伴い、既設トンネル周囲の地盤は連続性を持って挙動し、既設トンネルは地盤に追従して変形するという仮定のもと構築された。

解析の具体的な流れを図3に示す。まず新設トンネル横断面に地盤を平面ひずみ要素でモデル化し、新設トンネル外周位置に掘削に相当する荷重を与える。これにより既設トンネル軸線位置の地盤変位を求める（図3、STEP1）。次に、既設トンネルを弾性床上的のはりでモデル化し、算出した地盤変位をばね先に入力することで変位や応力の増分を得る（図3、STEP2）。

#### (2) 極近接施工を対象とした場合の課題

極近接施工に対しては、従来手法のみでは対応しきれず、地盤条件に関わらず地盤改良が必要であった。この背景には、新設トンネル上方の土中に発生する「緩み領域」<sup>3) 4)</sup>の存在がある。

緩み領域とは、トンネル掘削に伴い、領域外の地盤との連続性を失い、土の拘束圧が極度に低下する領域をいう<sup>3)</sup>。図4(a)に示すように、トンネルの側方では $45^\circ + \phi/2$  ( $\phi$ : 内部摩擦角)の傾斜を有する直線、その上方ではアーチ形状をなす。緩み領域の幅 $b$ は、例えば内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ は新設トンネル外径 $D$ の1.58倍であ

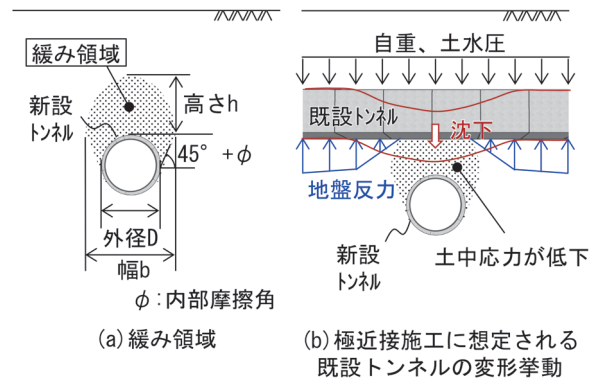
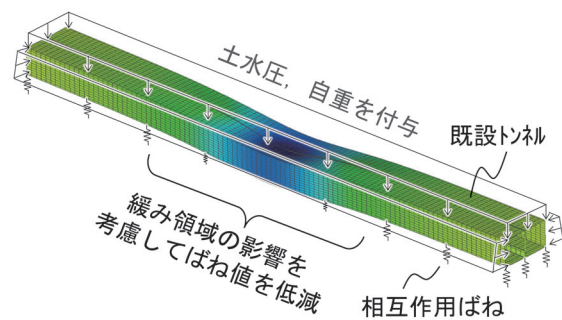


図4 緩み領域と極近接施工の関係



相互作用のばね値 = 低減率 × 原地盤の地盤ばね値  
 低減率 = 新設トンネル掘削前後の既設トンネル下面の  
 極限支持力比率

図5 提案手法の模式図

り、内部摩擦角 $\phi$ が小さいほうが広がる。また、緩み領域の高さ $h$ は、一般には外径 $D$ と同程度から、施工条件次第では2倍程度に及ぶとされている<sup>4)</sup>。

一般に、極近接施工の場合には、緩み領域を考慮した十分な検討が必要とされている<sup>5)</sup>。特に、軟弱地盤の場合には、土の拘束圧低下に伴い地盤剛性も大きく低下するため、緩み領域の影響が大きくなる。既設トンネルは、従来手法で仮定する地盤に追従した変形挙動を示す可能性があるほか、図4(b)のように、緩み領域付近で地盤反力が低下し、荷重バランスが崩れて自沈する挙動を示す可能性もある。しかしながら、緩み領域内の地盤剛性の変化量は定量的に解明されていない。これまでは、自沈挙動が生じないように、地盤条件に関わらず地盤改良することで緩み領域を固結する対策が講じられてきた。

### 2.2 新たな施工時影響解析法

#### (1) 概要

図5に、提案する新たな施工時影響解析法（以下、「提案手法」）を示す。前述した極近接施工時の自沈挙動を再現できる解析法であり、既設トンネル下面に緩み領域の影響を考慮できるばね（以下、「相互作用ばね」）を配置するところに特徴がある。相互作用ばね値は、原地盤

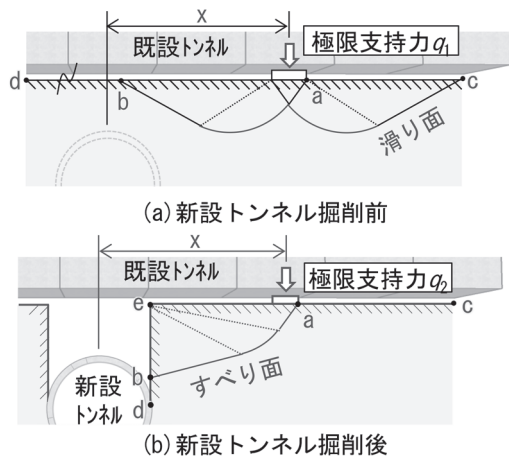


図6 既設トンネル下面の極限支持力計算上の仮定

の地盤ばね値に低減率を乗じて求める。低減率には新設トンネル掘削前後の既設トンネル下面の極限支持力比率を用いる（詳細は(2)にて記載）。低減率以外の設計値は「鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル・開削編）」<sup>6)</sup>に基づき求める。地盤改良による効果は、これら設計値を求める際の地盤の設計用値で考慮することができる。また、極近接施工では、離隔に比べて既設トンネルの寸法が大きくなるため、どの程度の離隔まで弾性床上のほりりで既設トンネルをモデル化できるか明確でない。そのため、既設トンネルを形状通りに3次元でモデル化することとした。

### (2) 相互作用ばねの低減率の算定方法

相互作用ばね値の低減率については、「鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）」<sup>7)</sup>に掲載される、設計実務で十分な実績のある斜面近傍の基礎構造物下面の地盤ばね値の算出方法を応用した。この方法では、平地上と斜面近傍にある基礎構造物の極限支持力<sup>8)</sup>をそれぞれ算出して、この比率を斜面近傍にある基礎構造物下面のばね値の低減率として用いている。特に、極限支持力の算出にあたっては、テルツァーギの支持力公式（式(1)）を用いて簡易に計算できるように、既設トンネル下方に仮想の地盤面を設定する方法を考案した（図6）。

$$q = cN_c + \frac{\gamma B}{2} N_r \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 $q$ ：極限支持力、 $c$ ：地盤の粘着力、 $\gamma$ ：地盤の単位体積重量、 $B$ ：基礎幅、 $N_c$ 、 $N_r$ ：支持力係数

新設トンネル掘削前の極限支持力  $q_1$  の算出では、図6(a)のように、既設トンネルの土被り部分の地盤抵抗力は無視した仮想の地盤面  $cd$  とすべり線  $ab$  を仮定して、式(1)の支持力係数に、地表面上の支持力算定に用いる値<sup>7)</sup>を準用することとした。一方、掘削後の極限支

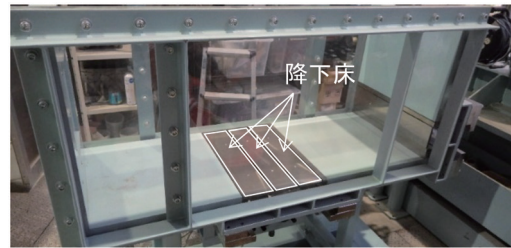


図7 降下床実験装置

持力  $q_2$  の算出では、図6(b)のように、緩み領域内の地盤も無視した仮想の地盤面  $dec$  と仮想の地盤面  $de$  に向かうすべり線  $ab$  を仮定して、既往文献<sup>8)</sup>に基づき求めることとした。このようにして水平距離に応じた極限支持力  $q_1$ 、 $q_2$  を求めていき、極限支持力比率  $q_2/q_1$  を、それぞれの水平距離での低減率として用いる。なお、新設トンネル掘削後の極限支持力  $q_2$  は、仮想の地盤面  $de$  近傍では非常に小さい値になり、上載荷重がこれを上回ることも考えられる。この場合には低減率をゼロとすることとした。

## 3. 土槽実験と提案手法の検証

### 3.1 概要

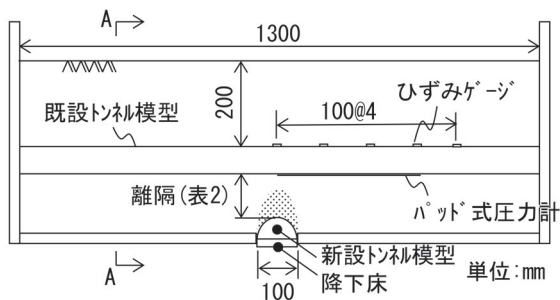
極近接施工を模擬した土槽実験を実施し、シミュレーション解析を通して、提案手法の妥当性を検証した。

図7に使用した降下床実験装置を示す。降下床実験とは、新設トンネルを設計する際の設計土圧の算定式の構築などに際して実施されてきた実験方法である<sup>例えは3) 9)</sup>。土槽内部に乾燥砂やアルミ棒を敷き詰めたのち、土槽底板の一部（降下床）を降下させることでトンネル掘削を再現する。本研究では、図8に示すように、降下床上面に新設トンネル模型を固定し、直交するように既設トンネル模型を土中に配置のうえ、新設トンネル模型を既往文献<sup>3) 9)</sup>と同様に1mm降下させた。

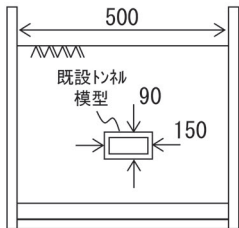
なお、トンネル掘削と降下床実験では、掘削境界面の挙動が図8(c)のように異なり、降下床実験ではトンネル側方の緩みが小さくなる。そのため、降下床実験は、緩み領域の幅  $b$  は新設トンネル外径と同程度まで狭くなるという問題があることも指摘されている。この対応については本章の最後にまとめる。

### 3.2 実験条件および実験方法

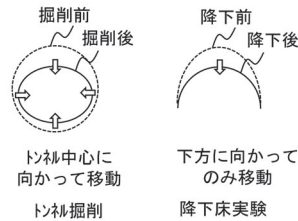
トンネル交差工事の実績<sup>1)</sup>では、新設トンネルはシールドトンネル、既設トンネルは開削トンネルである場合が多いことから、新設トンネル模型は半円形とし、既設トンネル模型は矩形とした。既設トンネル模型の材料と寸法は、模型と地盤の剛性比率が  $N$  値 25 相当の地盤内



(a) 平面図



(b) A-A横断面



(c) 掘削境界面の挙動の相違

図8 本研究の降下床実験の模式図

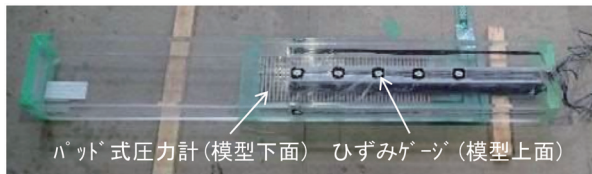


図9 既設トンネル模型

に標準的な鉄道開削トンネル（1層2径間）が存在する場合と同程度、かつ、ひずみの変化が計測できることを前提に設定した。材料にはアクリルを使用し、トンネル横断面の外寸法は高さ90mm、幅150mm、部材厚は10mmで一様とした。

地盤には、表1の地盤物性を有する乾燥珪砂7号を用い、相対密度70%を目標として突き固めた。新設トンネル模型と既設トンネル模型の離隔は、表2のように100mm、200mmの2ケースを実施した。このうち離隔100mmのケースが極近接施工にあたる。

既設トンネル模型の下面には、地盤反力を密な間隔で測定するためパッド式圧力計<sup>10)</sup>を配置した。上面には変形挙動を把握するため、ひずみゲージを配置した(図9)。

### 3.3 実験結果と提案手法の検証結果

#### (1) 既設トンネル模型の地盤反力の変化

図10に、新設トンネル模型中心からの水平距離と、既設トンネル模型下面の地盤反力分布の計測結果の関係を示す。なお、地盤反力分布については、新設トンネル模型の降下前後の比率で示した(以下、「地盤反力比」)。

図中のプロットは、パッド式圧力計による実測結果を示している。また、実線および破線は、実測結果を前後

表1 地盤作成に使用した珪砂7号の物性値

最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ ( $\text{kN/m}^3$ )	15.6	
最大乾燥密度 $\rho_{dmin}$ ( $\text{kN/cm}^3$ )	12.2	
三軸 (CD)	粘着力 $c$ ( $\text{kN/m}^2$ )	5.8
	内部摩擦角 $\phi$ (deg)	42.4
	変形係数 $E_{50}$ ( $\text{MN/m}^2$ )	33.3 ( $\sigma_3=25\text{kN/m}^2$ ) 33.4 ( $\sigma_3=50\text{kN/m}^2$ ) 57.1 ( $\sigma_3=75\text{kN/m}^2$ )

表2 実験ケース

実験 ケース	新設・既設トンネル模型 の離隔(mm)
1	100
2	200

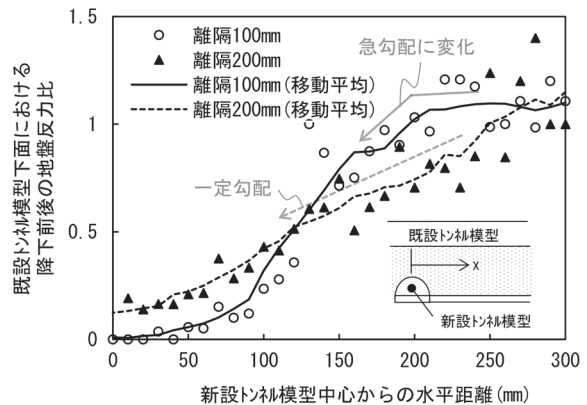


図10 トンネル模型下面の地盤反力比の分布

30mmの区間で移動平均した値を示している。いずれの離隔のケースも、新設トンネル模型中心からの距離が小さくなるにつれて地盤反力比は低下していくが、その傾向は異なることがわかる。離隔100mmのケースでは、水平距離200mm程度から急勾配に変化して、水平距離0~50mmの範囲ではほぼゼロとなった。一方、離隔200mmのケースでは、概ね一定勾配で低下した。

極近接施工において、緩み領域内外で地盤剛性の低下量が大きく異なる場合、既設トンネル下面の地盤反力は、図4(b)のように緩み領域近傍で大きく低下する分布を描くと考えられる。土槽実験においても、極近接施工にあたる離隔100mmのケースにおいてのみ、この特徴を有する地盤反力分布を得ることができた。

#### (2) 相互作用ばね値の算出方法の検証

提案手法の相互作用ばねの算出方法を用いて、既設トンネル模型下面の地盤反力分布を求めた。なお、図11に示すように、図6(b)の仮想の地盤面deの位置は、新設トンネル中心と側面の2通りを設定して計算した。

図12には、極近接施工にあたる離隔100mmのケースと比較した結果を示す。いずれの計算結果も実験結果

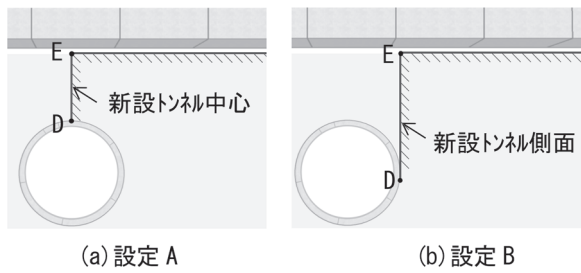


図 11 仮想の地盤面 DE の設定位置

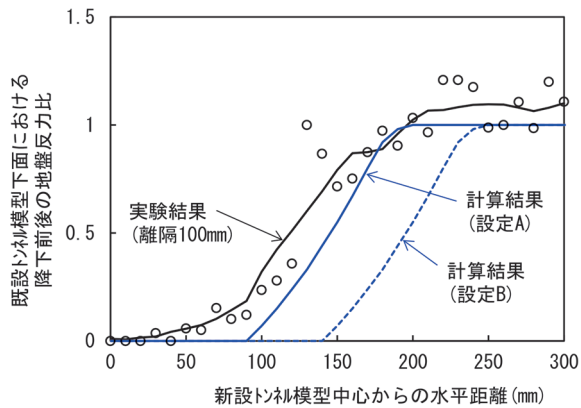


図 12 実験結果（離隔 100m）と計算結果の比較

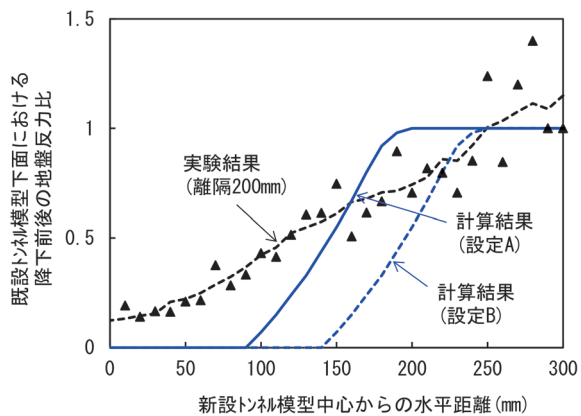


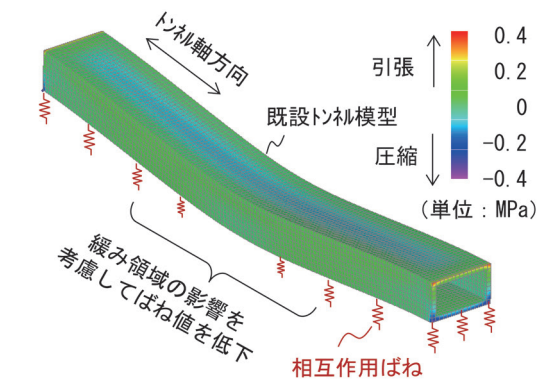
図 13 計算結果（離隔 200mm）と実験結果の比較

に近い勾配を描いているが、設定 A の計算結果ほうが実験結果に近いことがわかる。一方、図 13 には、離隔 200mm のケースと比較した結果を示す。仮想の地盤面 de の位置に関わらず、極近接施工でない場合には、計算結果は実験結果と乖離することがわかる。

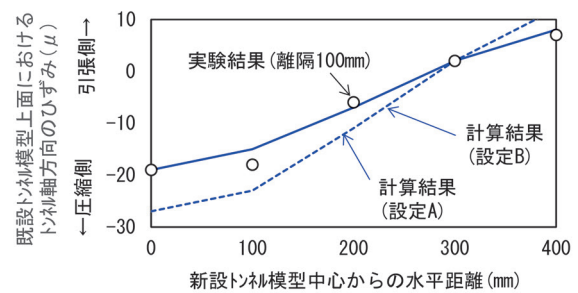
### (3) 既設トンネル模型のシミュレーション解析

提案手法を用いて、既設トンネル模型上面のひずみ分布を求めた。既設トンネル模型はソリッド要素でモデル化し、下面に相互作用ばねを配置したうえで、自重、鉛直土圧および水平土圧を与えた。なお、(2) の結果を踏まえ、解析対象は離隔 100mm のケースとした。

図 14(a) には、解析結果の一例として、仮想の地盤



(a) 変形・応力コンター図（設定 A）



(b) 模型上面のトンネル軸方向ひずみ分布の比較

図 14 提案手法を用いたシミュレーション解析結果

面 de の位置を設定 A とした場合の変形・応力コンター図を示した。この図から、トンネル軸方向に対して中央部が大きく沈下する挙動を示していることがわかる。図 14(b) には、既設トンネル模型上面のトンネル軸方向ひずみの計算結果と実験結果を示す。この結果から、水平距離 100mm の位置では多少の乖離がみられるものの、地盤反力分布と同様に、設定 A の計算結果ほうが実験結果を捉えることができることがわかる。

### 3.4 まとめ

実験では、極近接施工である離隔 100mm のケースにおいて、緩み領域の影響を受けた場合の地盤反力分布が観測された。提案手法を用いて、この実験ケースのシミュレーション解析を行ったところ、図 6(b) の仮想の地盤面 de の位置を新設トンネル模型中心に設定すると、既設トンネル模型下面の挙動を概ね再現できることを確認することができた。

しかしながら、前述したように降下床実験と実際のトンネル掘削では緩み領域の幅  $b$  が異なるため、実現場への適用にあたっては、この違いを考慮して仮想の地盤面 de の位置を補正する必要がある。図 4(a) に示したように、実際のトンネル掘削での緩み領域の幅  $b$  は、地盤の内部摩擦角  $\phi$  により定まる。仮に内部摩擦角  $\phi=0^\circ$  とすると緩み領域の幅  $b$  は最大となり、降下床実験にお

る幅の2倍になる。この場合、仮想の地盤面 de の位置は、新設トンネル中心から  $D/2$  だけ移動させた新設トンネル側面の位置 (図 11(b)) に補正する必要がある。実際には、地盤調査で得られる内部摩擦角  $\phi$  を用いて同様の補正を行うこととなるが、仮想の地盤面 de の位置は新設トンネルの中心から側面の間になることが想定される。

#### 4. 従来手法と提案手法を用いた試計算

##### 4.1 概要

実スケールの施工条件を仮定のうえ、従来手法と提案手法で試計算を実施した。図 15 に、試計算にあたり仮定したトンネル交差工事を示す。地盤は単一粘性土 ( $N$  値 30 相当) とし、既設トンネル (開削トンネル (1 層 2 径間)) の下方を、新設トンネル (シールドトンネル (単線)) が直交して通過する工事を仮定した。

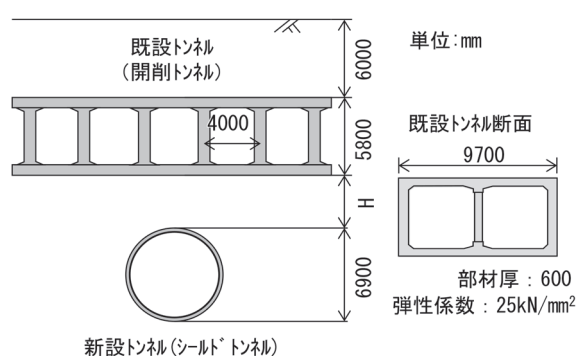


図 15 トンネルの諸元

表 3 比較検討ケース

解析ケース	トンネル同士の離隔
1	3.5m
2	14.0m

##### 4.2 従来手法による試計算

近接施工マニュアル<sup>1)</sup>に基づき試計算を実施した。地盤の変形係数  $E$  は  $2500N$  相当 ( $N: N$  値) として求め、解析領域は、側方のトンネル底部までの深さの 5 倍、底面の解析領域は新設トンネル下端より掘削外径の 2 倍に設定した (図 16)。トンネル同士の離隔については、従来手法では、地盤改良を行うことで極近接施工にも適用された事例<sup>1)</sup>もあることから、表 3 のように 2 通りの離隔で計算を実施した。なお、離隔 3.5m のケースが極近接施工にあたる。

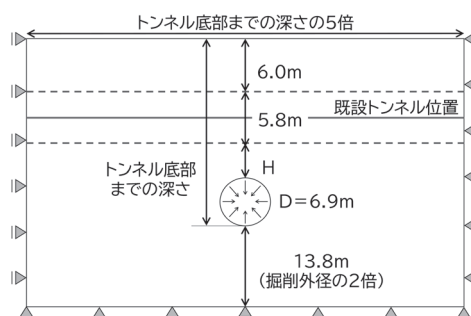


図 16 従来手法の変位算出用の解析モデル

まず初期応力解析を行い、次に新設トンネルの掘削に伴う等価な節点外力を新設トンネル位置に与えた。この荷重値は、トンネル掘削前の土中応力に「応力解放率」と呼ばれる比率を乗じて求める。一般に、応力解放率の値は洪積層で 8~15%、沖積層で 15~30% とされており、試計算では、この境界にあたる 15% を設定した。

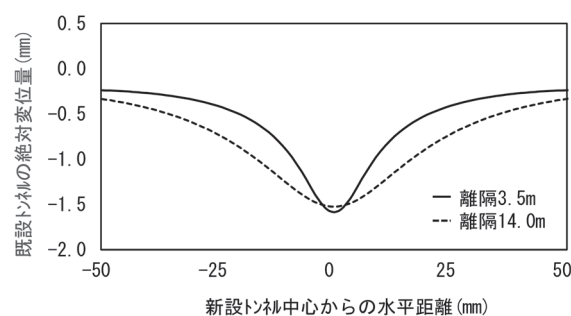


図 17 既設トンネル下面の絶対変位量 (従来手法)

図 17 に、既設トンネル下面の絶対変位量を示す。離隔 3.5m と離隔 14m のケースの解析結果を比べると、離隔が小さい離隔 3.5m のケースのほうが、最大沈下量は大きく、変位量の分布は急峻であることがわかる。

##### 4.3 提案手法による試計算

既設トンネルの床版、側壁と縦桁はシェル要素、中柱はビーム要素でモデル化し、トンネル軸方向の長さは、モデル端部が解析結果に影響を与えない 100m とした。また、荷重は自重、鉛直土圧および水平土圧とした。

提案手法は、土槽実験から極近接施工でない場合は、実挙動と乖離が生じることが確認されたため、離隔 3.5m のみで解析を実施した。また、極近接施工による変位増分を得るため、既設トンネルの下面に原地盤の地盤ばねを配置した解析と、相互作用ばねを配置した解析を行い、

これらの差分を求めた。

図 18 には、既設トンネルの変形・変位コンター図を示す。土槽実験の解析結果と同様に、トンネル軸方向に対して中央部が大きく沈下する挙動を示したていることがわかる。図 19 に、既設トンネル下面の絶対変位量を示す。提案手法と従来手法の離隔 3.5m のケースの解析結果を比較すると、提案手法のほうが変位量の分布は急峻であるが、絶対沈下量の最大値は、従来手法のほうが大きいことがわかる。

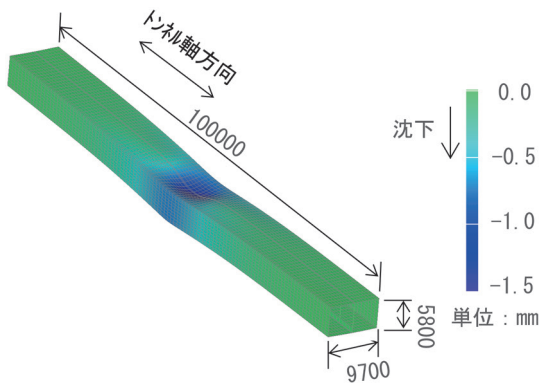


図 18 既設トンネルの変形コンター図

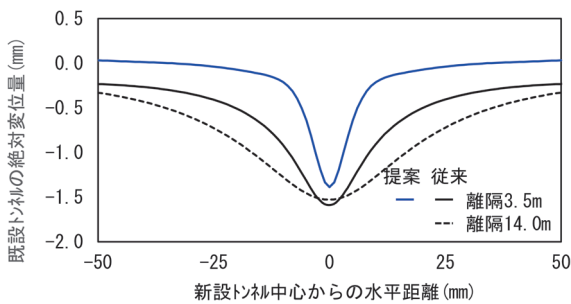


図 19 既設トンネル下面の変位量（従来，提案手法）

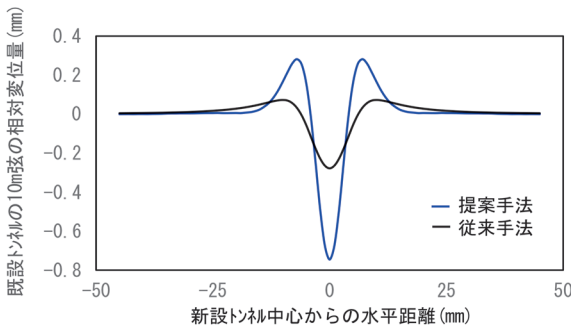


図 20 相対変位量（10m 弦）での比較（離隔 3.5m）

#### 4.4 極近接施工時の従来手法と提案手法の比較

鉄道における列車走行の安全性の確認では相対変位量が重要であり、既設トンネル部材の発生断面力も相対変位量と相関する。例えば、近接施工時の影響予測において、列車走行の安全性を確認する場合には、軌道の剛性は安全側の結果が得られるよう考慮せず、単純に既設鉄道構造物の絶対変位量を 10m 弦に換算した相対変位量が、軌道整備基準値から定まる制限値以内に収まることを確認している<sup>1)</sup>。

図 20 には、提案手法と従来手法の離隔 3.5m のケースで得られた絶対沈下量を、10m 弦での相対変位量に換算した値を示した。相対変位量の最大値は、変位量の分布が急峻である提案手法のほうが大きいことがわかる。この結果は、提案手法と提案手法を併用して対策検

討を行った場合、提案手法が対策内容の決定ケースになることを示唆している。また、これまでの極近接施工では、従来手法のみでは対応しきれず、提案手法が再現する既設トンネルの挙動が生じないように、地盤条件に関わらず地盤改良が必要とされてきたこととも整合する。

## 5. まとめ

本研究では、極近接施工の特徴である、地盤の緩み領域の影響を受けた既設トンネルの挙動を再現できる新たな施工時影響解析法を構築した。

本研究で得られた主な成果を以下に示す。

- (1) 降下床実験装置を使用して、極近接施工を模擬した土槽実験を実施したところ、極近接施工時で生じる可能性のある特徴的な既設トンネル下面の地盤反力分布を捉えることができた。
- (2) 極近接施工を想定した実験ケースに対して、提案手法を用いたシミュレーション解析を実施したところ、既設トンネル下面の地盤反力および上面のトンネル軸方向ひずみの計測結果を再現することができた。
- (3) 実スケールの施工条件を仮定のうへ、提案手法を用いた試算を実施したところ、従来手法よりも提案手法のほうが相対変位量は大きくなる場合があることが明らかになった。この結果は、これまでの極近接施工では、提案手法が再現する既設トンネルの挙動が生じないように、地盤条件に関わらず地盤改良が必要とされてきたこととも整合する。

極近接施工時においては、従来は地盤条件に関わらず一律に地盤改良が講じられてきたが、本研究の提案手法による既設トンネルへの影響予測を追加すれば、地盤条件に応じた地盤改良の検討も可能になる。提案手法が材適な対策を講じるための一助になれば幸いである。

## 文 献

- 1) 鉄道総合技術研究所：都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル，2007
- 2) 地盤工学会：地盤工学・実務シリーズ 28 近接施工，丸善出版，2011
- 3) Terzaghi, K: "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley & Sons, New York, pp.66-76, 1943.
- 4) 鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル，1998
- 5) 土木学会：2016 年制定 トンネル標準示方書 シールド工法編，2016.
- 6) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 トンネル・開削編，丸善出版，2020

- 7) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物, 丸善出版, 2012
- 8) 日下部治: 斜面上直接基礎の支持力評価に関する計算, 土と基礎, No.325, 1985
- 9) 村山朔郎, 松岡元: 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第187号, pp.95-108, 1971.3
- 10) NITTA 圧力分布測定システム: <https://www.nitta.co.jp/product/sensor/detail/> (参照日: 2024年4月1日)