

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を再現する



仲山 貴司
Takashi Nakayama
構造物技術研究部
トンネル研究室長



小西 陽太
Yota Konishi
構造物技術研究部
トンネル研究室
主任研究員



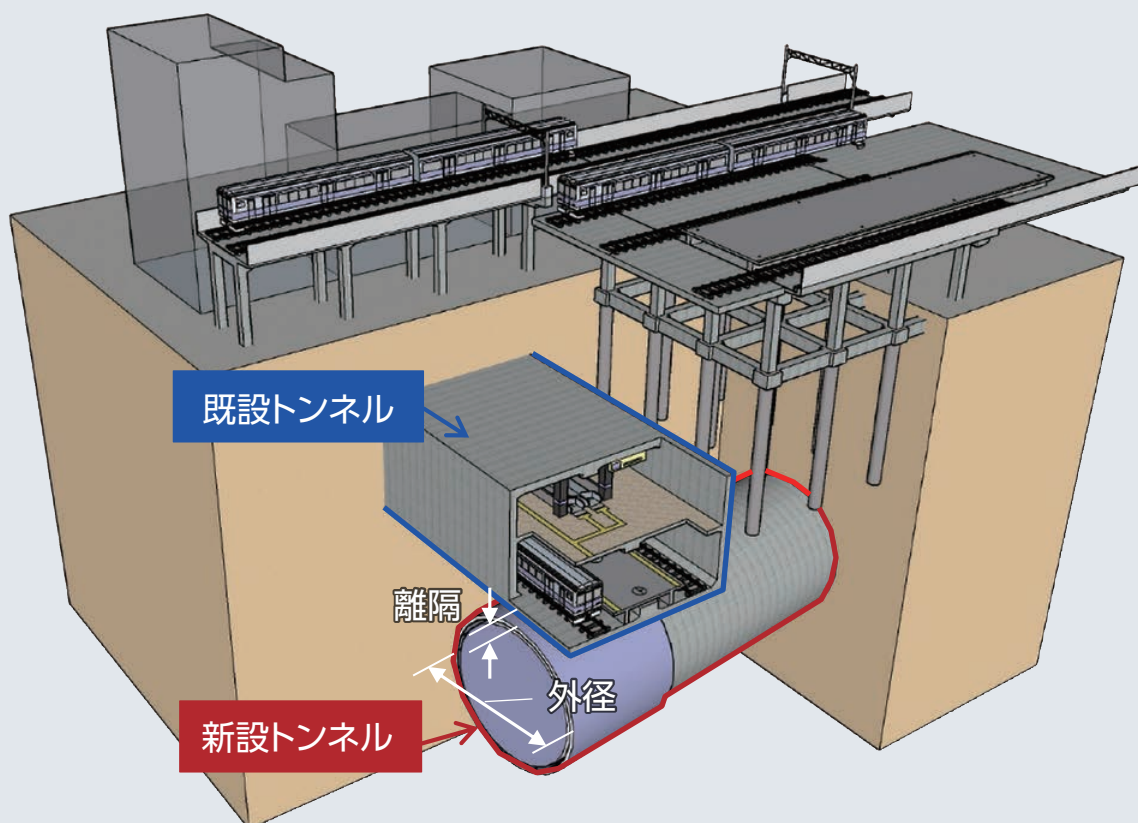
木下 果穂
Kaho Kinoshita
構造物技術研究部
トンネル研究室
主任研究員

はじめに

近年、鉄道や道路、上下水道といった社会インフラは、都市空間を有効に使うため、地下に整備されるケースが増えています。その結果、地下でトンネル同士が交差する工事も年々多くなっています。図1にトンネル同士の地下交差のイメージを示します。新しいトンネルを建設

する際には、地盤を削り取り地中に空間を創出する「掘削」と呼ばれる工事が必要ですが、多くの場合、既設トンネルを供用したまま工事を行う必要があります。そのため、掘削が既設トンネルにどのような影響を及ぼすのかを事前に正しく把握し、必要な対策を検討することが極めて重要になります。これまで、トンネル同士

図1 トンネル同士の地下交差のイメージ



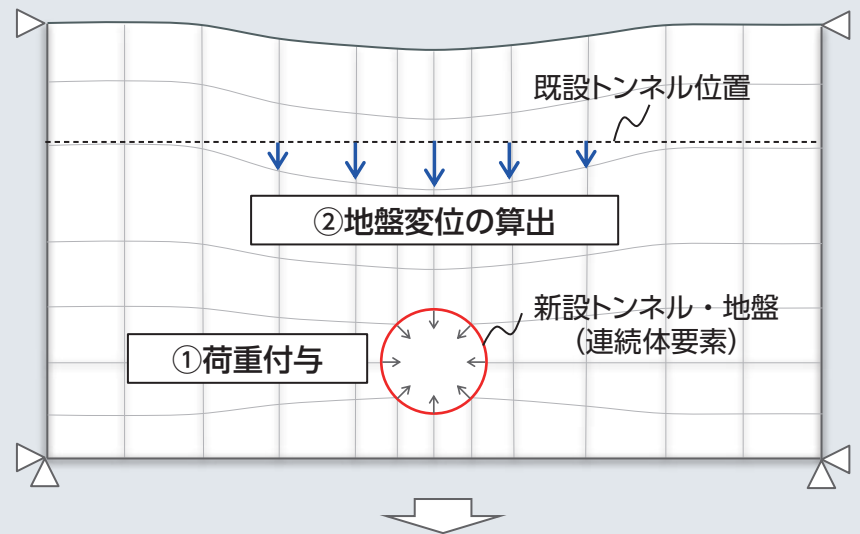
の離隔は新設トンネルの外径以上を確保することが一般的で、マニュアル^(例えば1)などには、この条件を前提とした影響予測の数値解析手法（以下、「従来手法」）が示されています。ここでの影響予測は、掘削による周辺地盤の動きとこれに伴う既設トンネルの変形を数値解析上で再現し予測することを目的としています。が、トンネル掘削の直上付近の地盤は掘削によって壊れ、複雑で予測が難しい挙動を示します。この範囲は「緩み領域」と呼ばれますが、従来、トンネル同士の離隔が新設トンネルの外径以上必要とされてきた理由の一つに、トンネル同士の離隔が外径以下の場合には、

既設トンネルが緩み領域に位置するため変形の影響予測が難しいことが挙げられます。

しかし近年、地下空間の利用がさらに進み、トンネル同士の離隔が新設トンネルの外径以下となる「極近接施工」を避けられないケースも増えています。このような場合、これまでは安全を重視し、地盤改良などの対策を一律に実施することが多くありました。一方で、地盤条件に応じた合理的な対策を選択できるよう、極近接施工にも対応できる数値解析手法の整備も求められていました。

こうした背景を踏まえ、本研究では、極近接施工を対象とした新たな数値解析手法（以下、「提案手法」）を考案しました。本稿では、従来手法と提案手法の概要を説明するとともに、トンネル掘削時の地盤の挙動を再現した室内模型

STEP1



STEP2

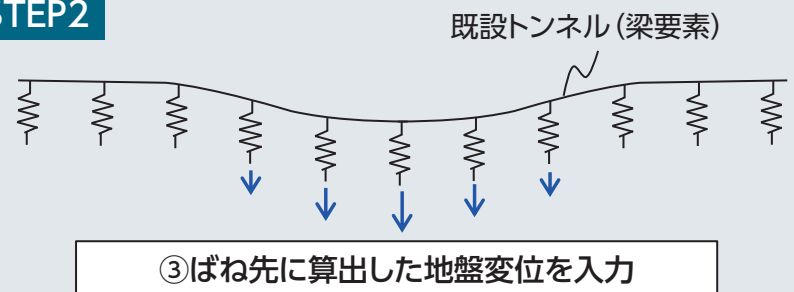


図2 従来手法のイメージ

実験との比較による提案手法の妥当性確認、ならびに両手法を用いた試算結果について報告します。

施工時影響解析法

Ⅰ 従来手法

トンネル同士の離隔が新設トンネルの外径より大きい場合には、地盤を一体の連続した材料としてとらえ、力を受けるとばねのような弾性的な性質に従って変形すると考える二次元の線形弾性FEM解析が一般に用いられます。この方法では、交差部を新設トンネルの断面で切り出し、平面上で地盤の変形や応力の分布を評価します。図2にそのイメージを示します。新設トンネルを掘削すると、その部分の地盤が支えていた力を失うため、その影響を解析上で再現

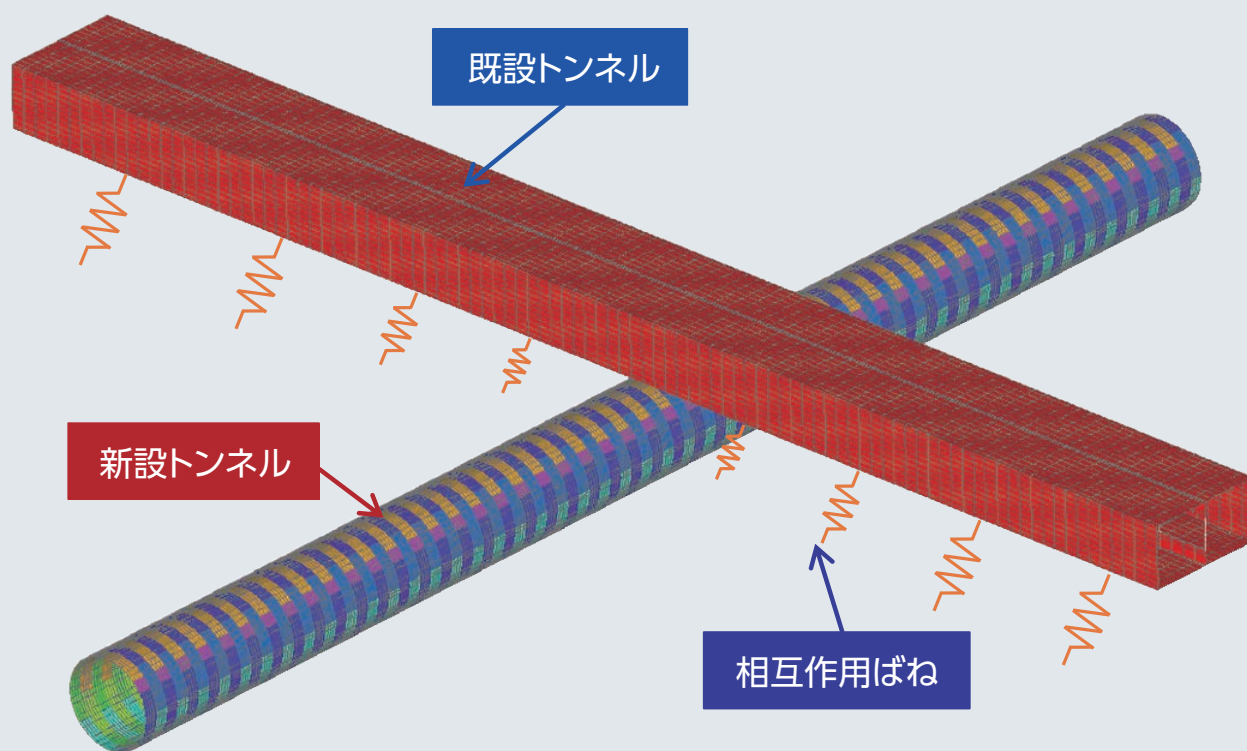


図3 提案手法のイメージ

します。そして計算結果として、既設トンネル位置での地盤の変位が求められます。既設トンネル自体は、一本の棒状の構造（梁）としてモデル化し、それを支える地盤はばねとして表現します。このばねを介してSTEP1で求めた地盤の変位を梁に伝えることで、既設トンネルの変形を評価します。

■ 提案手法

極近接施工の場合、従来手法にはいくつかの課題があります。一つ目は、トンネル間の地盤がすべて緩み領域となる場合、地盤が壊れることによる不規則な変形が生じるため、地盤を連続体として扱ってよいのかという点です。二つ目は、既設トンネルを一本の梁で表現してよいのかという点です。極近接施工では、トンネル間の離隔に比べて既設トンネルの高さや断面形状の影響が無視できなくなる可能性があります。

そこで提案手法では、図3に示すように、トンネルを3次元でモデル化し、トンネル間の地盤は緩み領域の存在を考慮できる相互作用ばねで表現する新たな数値解析手法としました。この手法では、地盤を連続体でなく相互作用ばねで表現することで、地盤の緩み領域の局所的かつ複雑な挙動を再現することができ、既設トンネルを梁でなく3次元でモデル化することでその形状の効果を考慮することができます。

土槽実験による提案手法の検証

提案手法では、相互作用ばねの設定が重要となります。本研究ではその設定方法を検討するため、降下床実験と呼ばれる室内模型実験を実施しました。降下床実験は、トンネル掘削時の地盤挙動を再現するため、これまでにも多くの研究で用いられてきた方法です^{2)~6)}。実験で

は、土槽内に地盤とトンネル模型を設置し、底版の一部（降下床）を降下させることで、新設トンネルの掘削に伴う周辺地盤挙動を模擬します。図4に、実験装置と本研究での配置を示します。降下床は新設トンネルを表し、その上方部分の地盤挙動を再現しています。

本研究では、新設トンネル近傍の緩み領域内に既設トンネルが位置するときの挙動を再現するため、降下床と直角に交わるように既設トンネル模型を土中に設置して降下させました。降下床の幅が100mmに対して、既設トンネルとの離隔は100mmと200mmに設定しました。離隔100mmが極近接施工に相当します。

既設トンネルを支える地盤の力は「地盤反力」と呼ばれ、既設トンネルに作用します。実験ではトンネルに取り付けた圧力センサーで、この地盤反力を計測しました。図5に、降下床中心からの水平距離と、降下前を1としたときの地盤反力の比を示します。いずれの条件でも、水平距離が降下床中心に近づくにつれて地盤反力は小さくなりましたが、極近接施工では、ある距離から急激に地盤反力が低下していることがわか

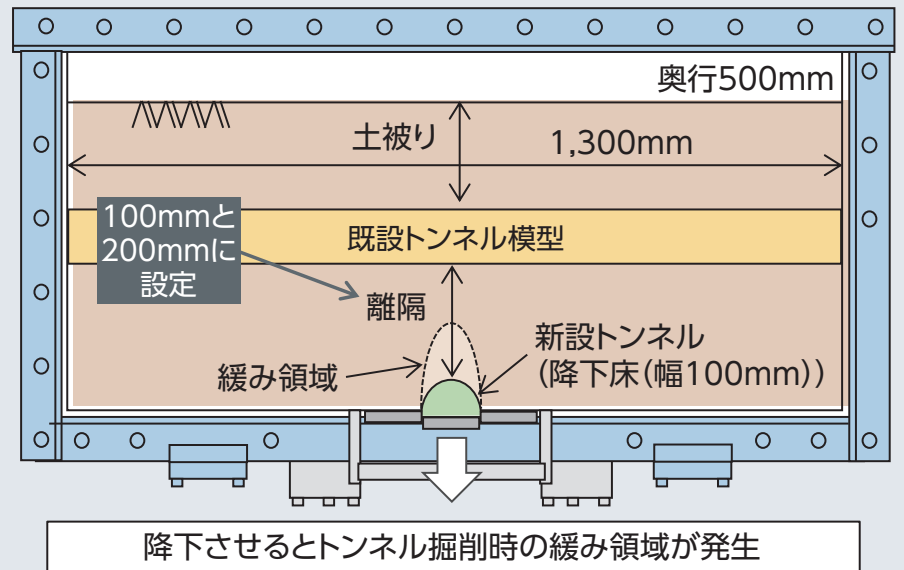
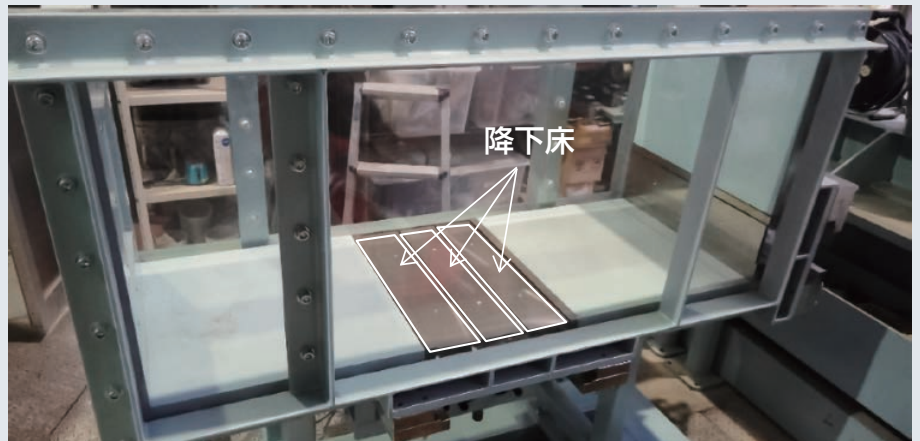
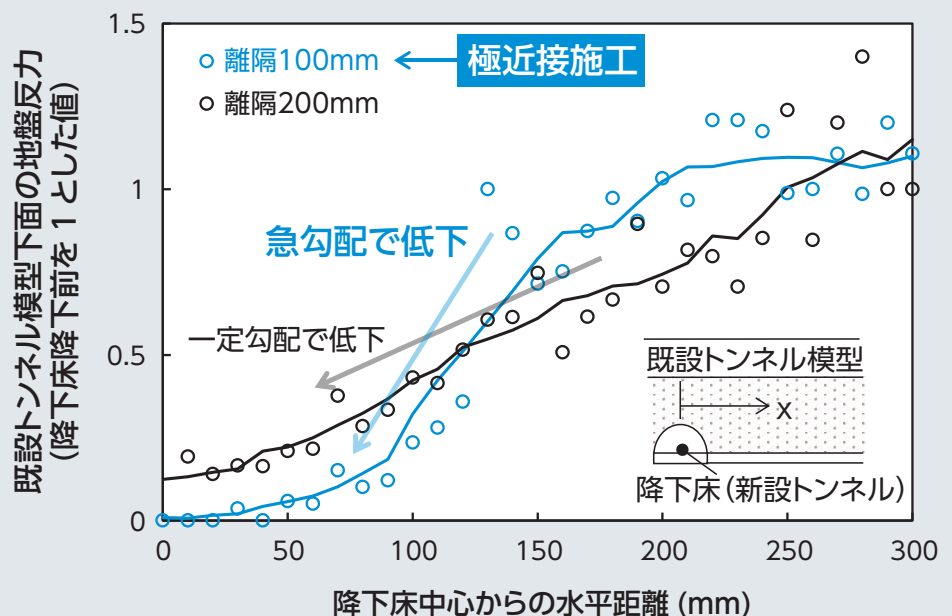


図4 降下床実験のイメージと実験方法

図5 既設トンネルの地盤反力の変化



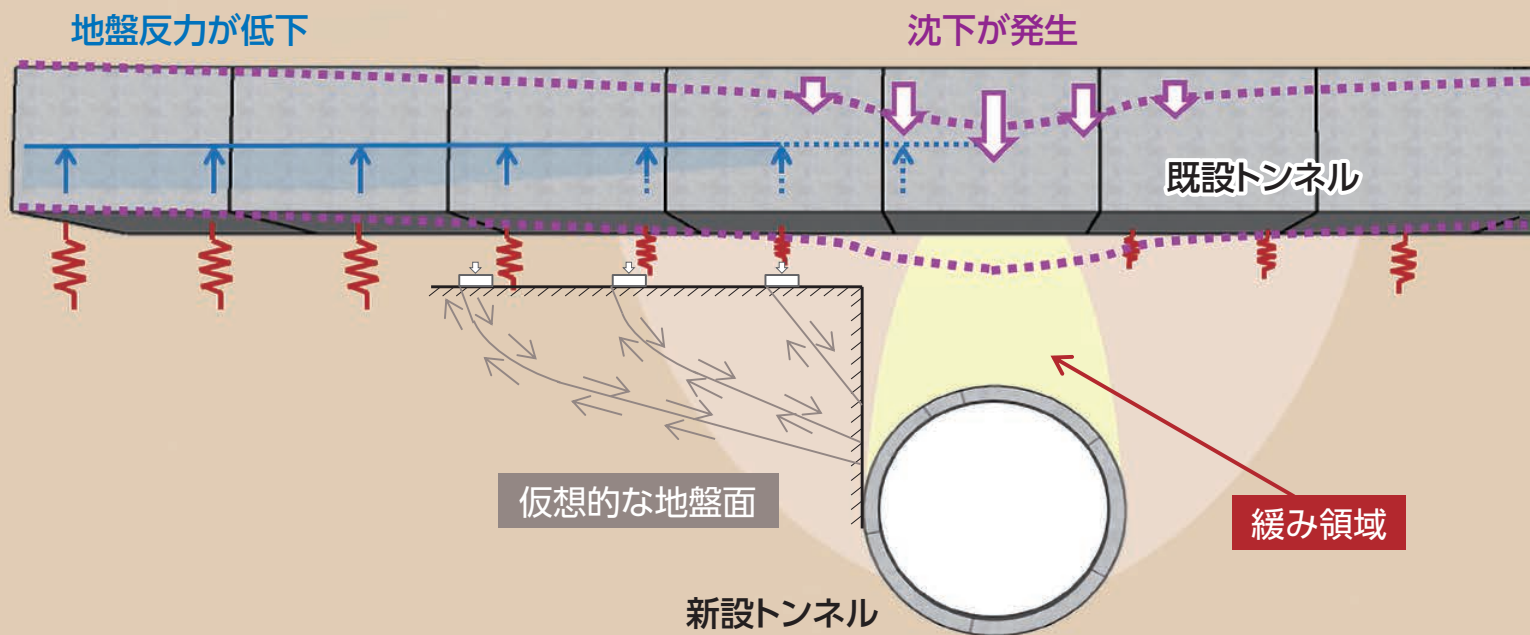
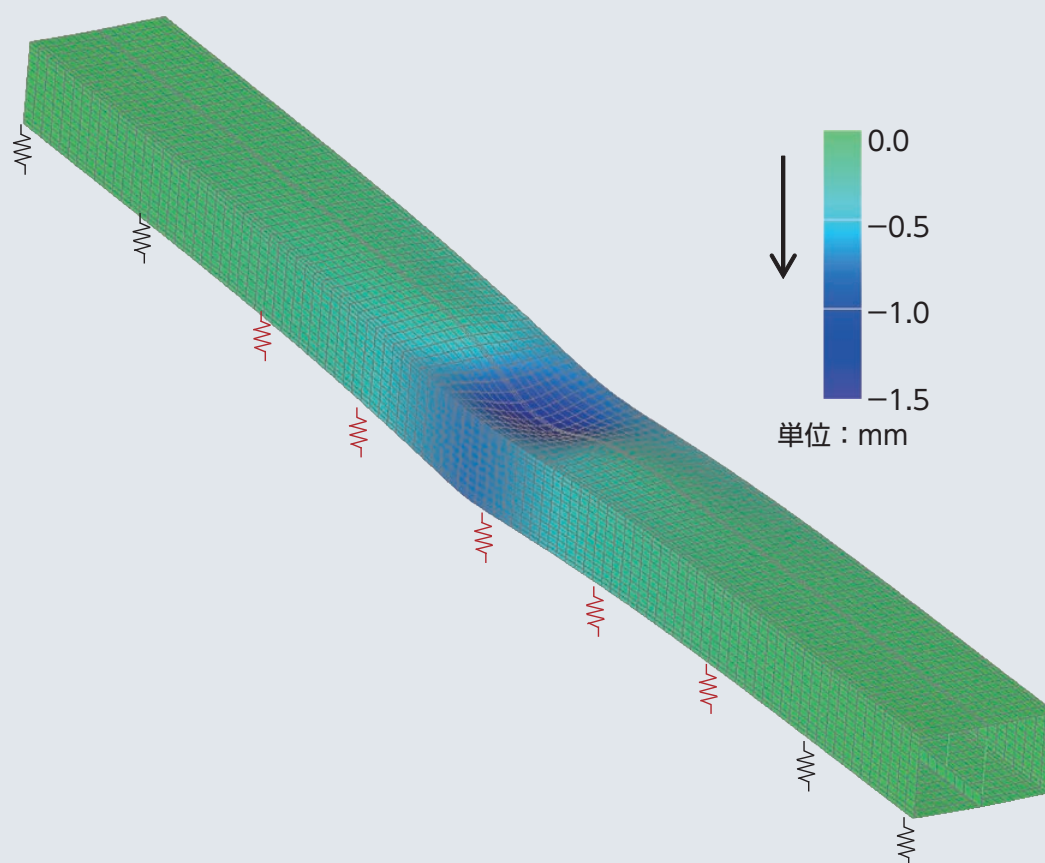


図6 緩み領域による既設トンネルの変形

りました。このことから、既設トンネルが緩み領域の影響を強く受けていることが再確認されました(図6)。本研究では、この現象を、緩み領域の発生により土中に仮想的な斜面が形成さ

れると仮定し、相互作用ばねの設定に反映させました。その結果、提案手法による既設トンネルの変形計算結果は、図7に示すように、実験結果を適切に再現できることが確認されました。

図7 提案手法による既設トンネル模型の変形の計算結果



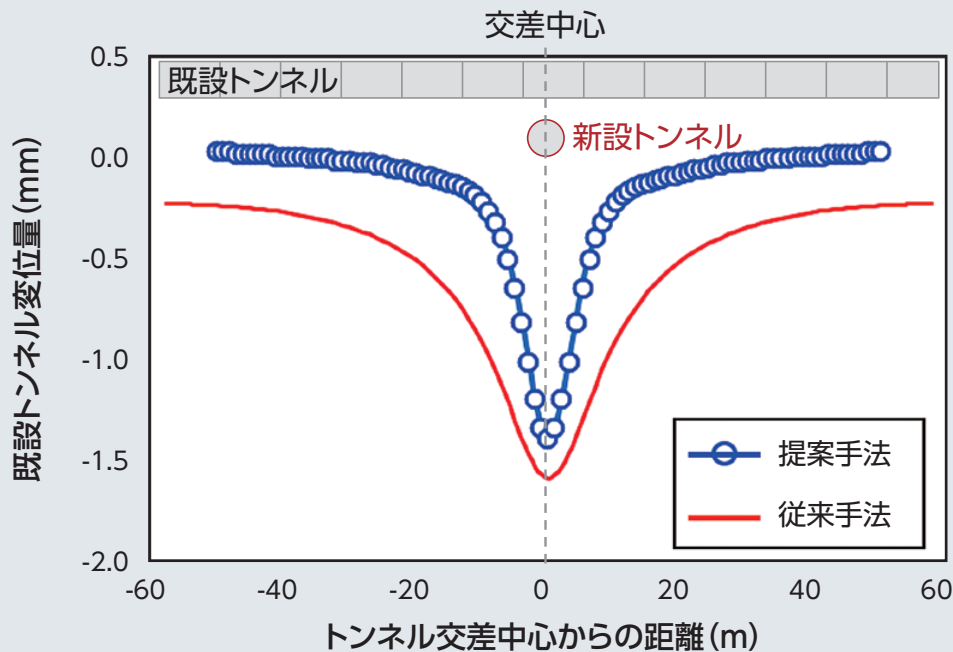


図8 提案手法と従来手法の計算結果の比較

従来手法と提案手法を用いた 試算の比較

トンネル間の離隔が十分にある場合と、外径以下となる極近接施工の場合を想定し、従来手法と提案手法による既設トンネルの変形挙動を比較しました。

図8は、離隔がトンネル外径の半分となる極近接施工条件での変位分布を示しています。両手法とも、変形は交差部付近に集中しましたが、提案手法では変形がより局所的に生じることが確認されました。一方で、最大変位量は従来手法の方が大きく評価されました。これは、従来手法では、既設トンネルを梁でモデル化しているため断面形状の影響が十分に考慮されていないこと、また、緩み領域の地盤も連続体として扱われるため、既設トンネルが地盤に引っ張られるような挙動を示すことが原因と考えられます。以上より、極近接施工においては、提案手法の方がより合理的な評価を与える場合があることが示されました。

おわりに

地下空間の過密化が進むなか、トンネル同士

が小さな離隔で交差する極近接施工は、今後ますます増加すると考えられます。本研究では、そのような条件に対応するため、降下床実験を通して、新たな数値解析手法を提案しました。提案手法を用いた検討の結果、トンネル交差部で既設トンネルの変形が局所的に集中する現象を再現できることを確認しました。また、地盤条件が良好な場合には、これまで経験的に一律で実施されてきた地盤改良が不要となり、建設コストの低減につながる可能性も示されました。今後は、実現場への適用を通して、更なる精度向上に努めていく計画です。【RRR】

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) Terzaghi, K: "Theoretical Soil Mechanics", John Wiley & Sons, New York, pp.66-76, 1943
- 3) 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
- 4) 足立紀尚，木村亮，岸田潔，伊藤浩志：降下床実験によるトンネル掘削過程を考慮したトンネルおよび周辺地盤の力学挙動の解明，土木学会論文集，Vol.694，pp.277-296，2001
- 5) 足立紀尚，木村亮，岸田潔，小坂警太，坂山安男：3次元降下床実験によるトンネル交差部の力学挙動，土木学会論文集，No.638，Ⅲ-49，pp285-299，1999
- 6) 菊本統，岸田潔，木村亮，田村武：降下床実験による離隔のない双設トンネルに作用する土圧の評価手法の構築，土木学会論文集，No.799，Ⅲ-72，pp25-36，2005