

トンネル掘削が近接トンネルに与える影響 —モデル実験および数値解析による検討—

数値解析 モデル実験

清水建設 国際会員 ○杉山 博一
 千葉工業大学 国際会員 鈴木 誠
 千葉工業大学 学生会員 初谷 樹弥
 地域地盤環境研究所 国際会員 中井 照夫

1. はじめに

都市部では用地幅を少なくするために相互に近接して掘削する双設トンネルの採用事例が多い。先行のトンネル（以下、先行トンネルと記す）への影響を評価する際、従来から弾性有限要素解析を用いた検討が多いが、より合理的な評価を行うためには弾塑性解析の適用拡大が必要であると考えている。

そこで筆者らは双設トンネルを題材としてモデル実験と数値解析を実施し、数値解析の適用性について検討している。既報¹⁾では先行トンネル（上側）の土被りと後続トンネル（下側）の土被りをそれぞれ固定し、離隔距離の違いによる影響を評価した。本研究では、先行トンネルと後続トンネルの離隔距離を固定し、上下の位置関係を変化させた場合の影響を評価する問題にした。モデル実験と数値解析を実施してそのメカニズムを検討するとともに、数値解析手法の妥当性を検討する。

2. 評価方法

図-1 に検討した近接トンネルの配置パターンを示す。先行トンネルと後続トンネルの離間距離は $0.25B$ (B :トンネル直径) に固定し、先行トンネルを中心としてインバートから天端まで 22.5 度ずつ角度を変化させた位置に後続トンネルを配置した Case1~9 を想定する。

(1)実験方法

直径 1.6mm ~ 3.0mm のアルミ棒を積み重ねたアルミ棒積層体の中に、先行トンネルとして真鍮製のリング模型を、後続トンネルとして半径方向に収縮機構を持つトンネル模型を所定の位置に設置する。先行トンネルは直径 $B=100\text{mm}$ 、厚さ 1mm であり、内外面の 30 度ごとにひずみゲージが貼付されている。一方、後続トンネルの直径も 100mm であり、収縮機構のほか土圧バランスに応じてトンネルが移動できる機構になっている。なお実験装置の都合上、Case1~5 の後続トンネルの土被りを $3B$ に固定し、Case6~9 は先行トンネルの土被りを $3B$ に固定した。

実験では後続トンネルを 4mm 収縮させて掘削を模擬し、地表面の変位をレーザー変位計で、また地盤内のアルミ棒の変位は PIV (図-2 参照) で計測し、さらに先行トンネルのひずみを計測した。

(2)解析方法

数値解析では subloading t_{ij} モデル²⁾に基づく2次元弾塑性有限要素解析(解析コード: FEM t_{ij} -2D)を実施した。図-3 に Case1 の解析メッシュを示す。解析手順としては、まず先行トンネルの掘削を模擬して 70% の応力解放した状態で先行トンネル(梁要素)を追加し、残りの 30% を解放する。先行トンネルに与えた応力解放率 70% は、収縮装置で 0.93mm (面積で 3.69%) 収縮させた状態と概ね対応することが確認されている。次に後続トンネル(図の青線)内部の要素(弾性体)の面積を 15.36% 収縮させることで掘削を模擬した。この収縮量はトンネル半径を一様に 4mm 縮めた量に相当する。

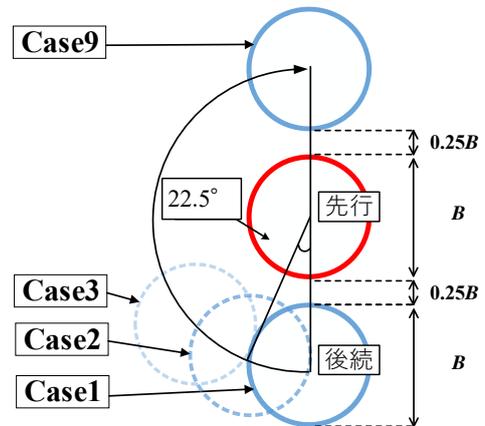


図-1 検討したトンネル配置ケース

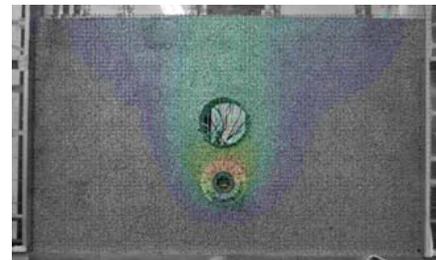


図-2 PIV で得られた変位量(Case1)

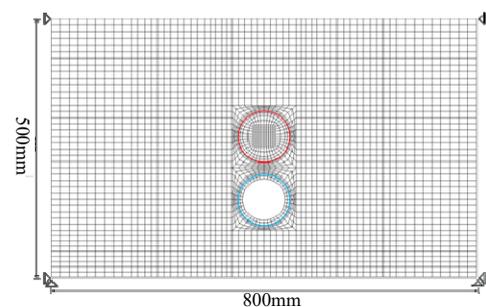


図-3 解析メッシュ(Case1)

3. 地盤の挙動

図-4 に後続トンネル掘削後の地盤内の偏差ひずみ($\varepsilon_1 - \varepsilon_3$)について、数値解析とモデル実験の結果を示す。なお Case7 についてはトンネルの位置関係がわかりやすくなるように左右を反転して示した。

偏差ひずみの分布についてはいずれのケースも概ね実験と解析で良く対応しているが、大きさについては実験のほうがやや大きい。また実験ではすべり線のような連続した偏差ひずみが観察されているが、有限要素解析ではすべり線は再現できない。

図は割愛するが、地表面変位についてはいずれのケースで実験よりも解析のほうが2倍ほど大きく出ているが、最大沈下量となる位置は概ね一致していた。

4. 先行トンネルの挙動

実験ではひずみが計測され、解析では断面力(モーメント)が算出されることを考慮し、図-5 の左側には解析結果のモーメントと実験結果から計算したモーメントを、右側には実験結果のひずみと解析結果の断面力から算出したひずみを比較した。なお、いずれも後続トンネルの影響として増分で示している。

Case1~7については後続トンネルに近い位置で負の曲げモーメントが発生し、90度回転した位置で正の曲げモーメントが発生する傾向が実験と解析で整合している。また、偏差ひずみが大きい部分と重なる付近で曲げモーメントがより大きくなっていることがわかる。なお、Case1~3の曲げモーメントの傾向は先行トンネルに作用するトンネル土圧の傾向とも対応する³⁾。一方、Case9については実験と解析の誤差が大きい。これについては、モデル実験において地盤作成時に先行トンネル(薄層の真鍮)への影響を避けるため後続トンネル回りの地盤を密な状態にできなかったことが原因と考えている。

5. まとめと今後の課題

Case1~7では偏差ひずみの分布や先行トンネルへの影響については実験と解析でほぼ整合していた。特にCase3, 5等、後続トンネルから延びる偏差ひずみが大きい領域に先行トンネルがある場合に曲げモーメントの増分が大きくなっていた点については新たな知見と考えられる。なお、Case9、および地表面沈下量で実験を再現できなかったことについては、今回のモデル地盤が従来実施してきた実験よりも緩い地盤状態となってしまった可能性を挙げた。今後は実験時の密度を再評価したうえで検討する必要がある。また、実験精度の問題から軸力増分については本研究では取り扱わなかったが、数値解析の結果から影響を評価できると考えられる。

参考文献

- 1) 木村、鈴木、中井：双設トンネルにおいて後続トンネル位置が地盤および先行トンネルにおよぼす影響、第53回地盤工学研究発表会、pp.1613-1614, 2018.
- 2) Nakai, T. and Hinokio, M.: A Simple Elastoplastic Model for normally and over consolidated soil with unified material parameters, Soils & Foundations, 44(2), pp.53-70, 2004.
- 3) Shahin H.M., Nakai T., Ishii K. Iwata T and Kuroi S.: Investigation of influence of tunneling on existing building and tunnel - model tests and numerical simulations, Acta Geotechnica, 11(3), pp.679-692, 2016.

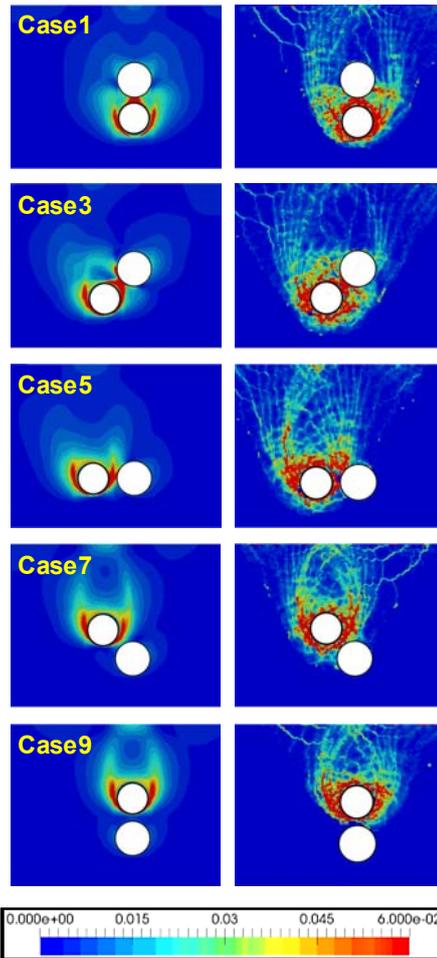


図-4 偏差ひずみ
(左; 数値解析、右; モデル実験)
※Case7は左右を反転して表示

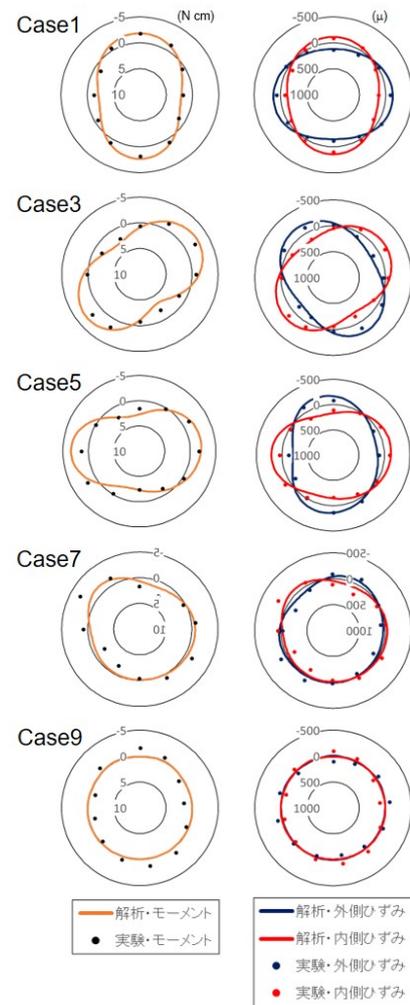


図-5 先行トンネルのモーメントとひずみ
(左; モーメント増分、右; ひずみ増分)