

## 第8回「PLAXIS+tijモデル」プログラムセミナー

### 双設トンネルを対象にした FEM-tijとPLAXIS+tijの比較

(WG3-2; シールドトンネル)

2023年10月27日 (金)

清水建設 (株) 杉山博一

## WG-3 掘削問題 (山留め・シールドトンネル)

■概要：山留めとシールドトンネルは主に応力解放の掘削問題である。2つのサブワーキンググループで、これらの現行解析の課題点をまとめ、事例解析を通して、どこまで進歩できるのかを探っていく。

- SWG-1・山留め (サブリーダー：金田先生)；弾性解析と弾塑性解析のメリットとデメリットに着目し、解析事例を通してそれぞれの適用性を明らかにする。最近、境界領域が解析結果に与える影響を議論している。また、PLAXISを用いた解析事例の問題点を明らかにしている。
- SWG-2・シールドトンネル (サブリーダー：杉山)；弾塑性解析と断面収縮という手法を導入し、従来手法と比較しながら、その特徴と適用性を検討する。この後は、掘削土の重量の扱い方を議論し、3次元解析への展開していく予定である。

## 検討対象

■2016～2019年度に千葉工大・鈴木先生の研究室で実施された双設トンネルの実験・解析を対象にPLAXIS+tijモデルで再現解析して比較

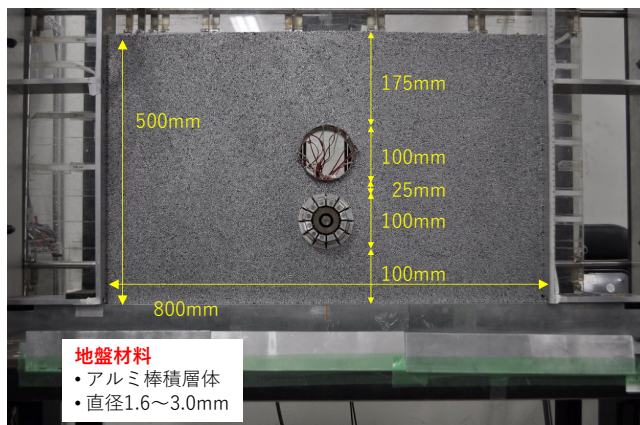
## ■参考文献

- 木村拓憲 他；双設シールドトンネルの施工影響評価、第52回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1405-1406, 2017年
- 木村拓憲 他；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.
- 杉山博一 他；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－、第54回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1401-1402, 2019年

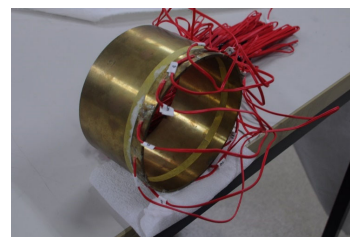
## 模型実験の概要

### ■概要

- アルミ棒積層体による模型実験
- 後行トンネルの掘削を模擬し、地盤変形、先行トンネルのひずみ（断面力）変化を計測

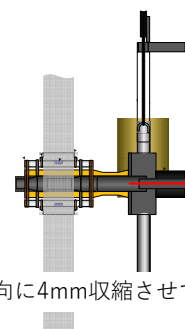
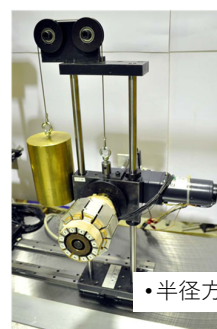


### ■先行トンネル模型



- 真鍮製
- 直径100mm, 厚さ1mm
- 30度ごとにひずみゲージ

### ■後行トンネル装置



- 半径方向に4mm収縮させて掘削を模擬

# 実験ケース

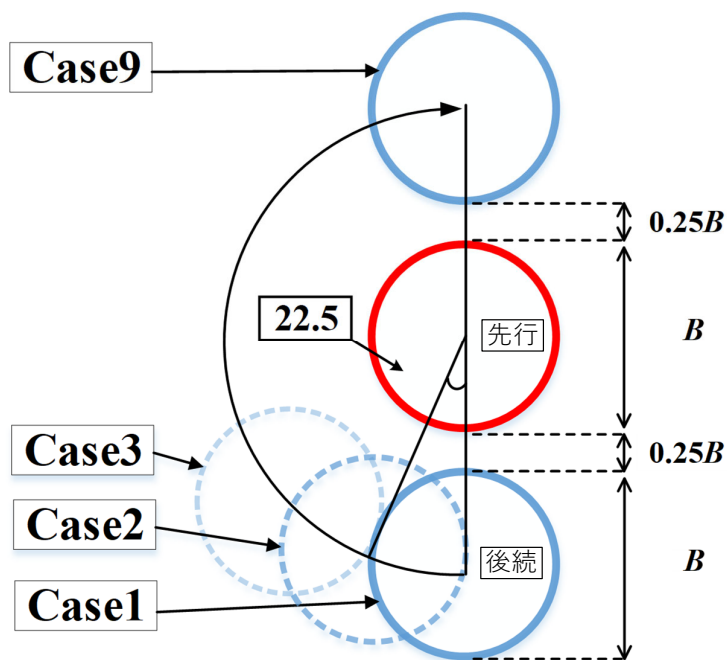
## ■先行トンネル (既設・真鍮リング)

## ■後行トンネル

- Case1 ; 直下
- Case3 ; 45度斜め下
- Case5 ; 真横
- Case7 ; 45度斜め上
- Case9 ; 真上

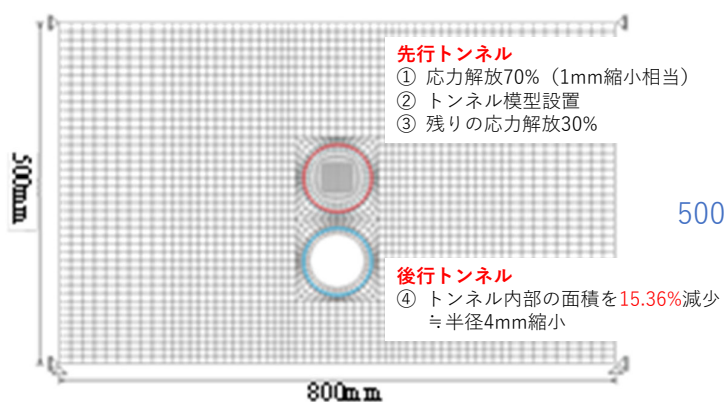
### ➤内空側へ4mm変位させて実験

- ✓解析でのモデル化？
  - ・応力解放？ (何%)
  - ・強制変位？ (半径4mm)
  - ・断面収縮？ (面積で15.36%縮小)

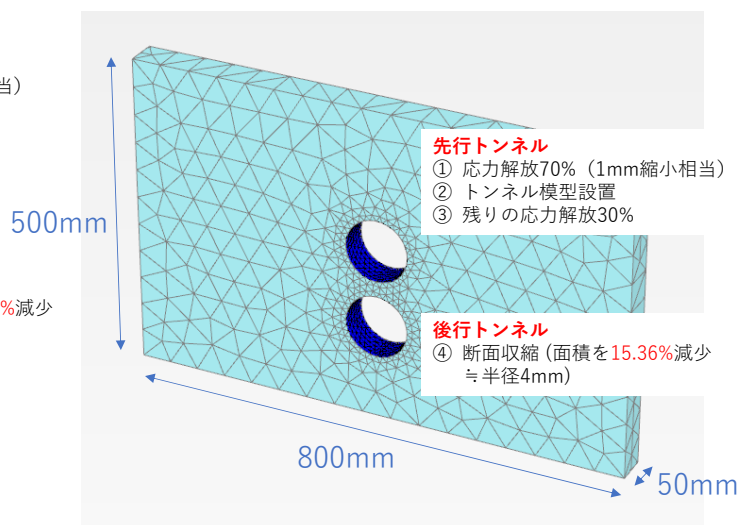


# 解析の概要

## ■FEMtij-2D

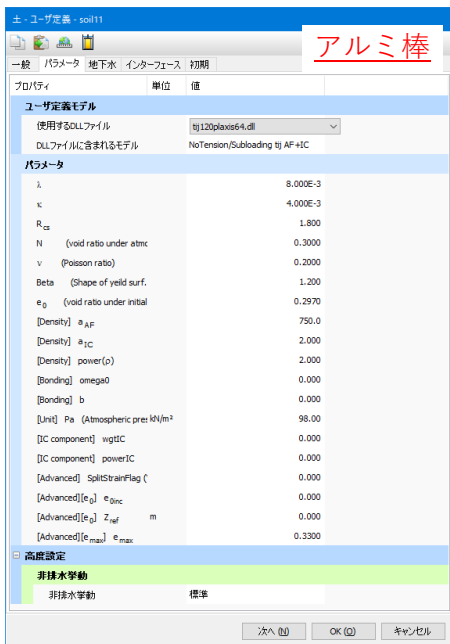


## ■PLAXIS+tij

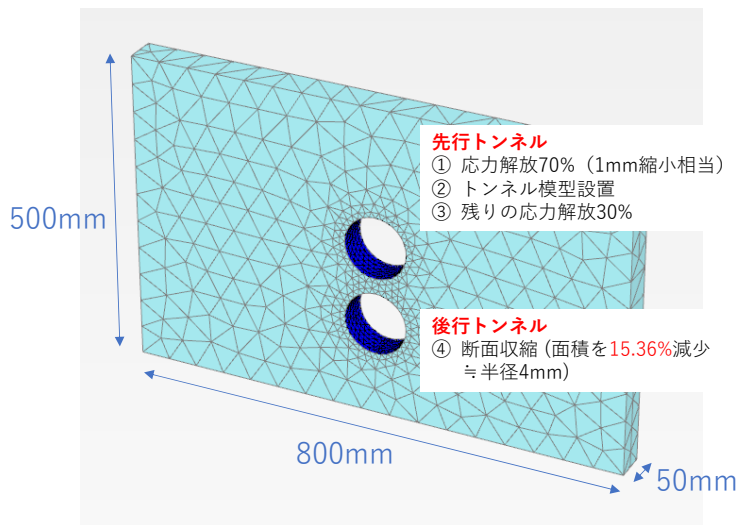


# 解析の概要

## ■設定パラメータ



## ■PLAXIS+tij

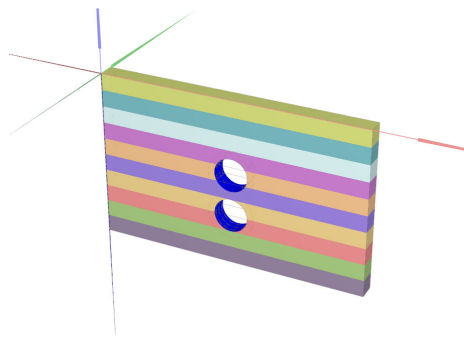


## $e_0$ 分布、 $K_0$ 設定

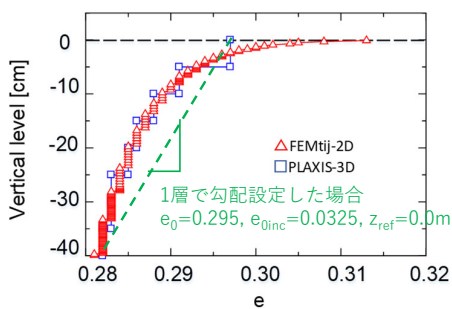
■FEMtij-2Dの解析条件に近づけるため、10層に分けてそれぞれ間隙比 $e_0$ 、側方土圧係数 $K_0$ を設定

■PLAXIS+tij model ver.1.20( $e_{max}=0.33$ を導入) も試行

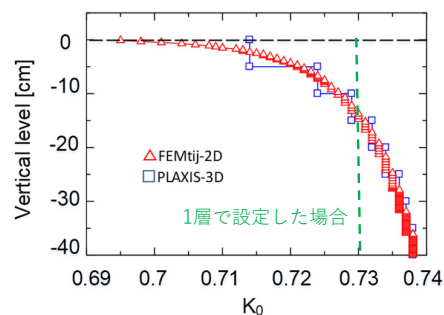
地盤を10層に分けてモデル化



初期間隙比  $e_0$



側方土圧係数  $K_0$



## $e_0$ 分布の比較（最終結果）

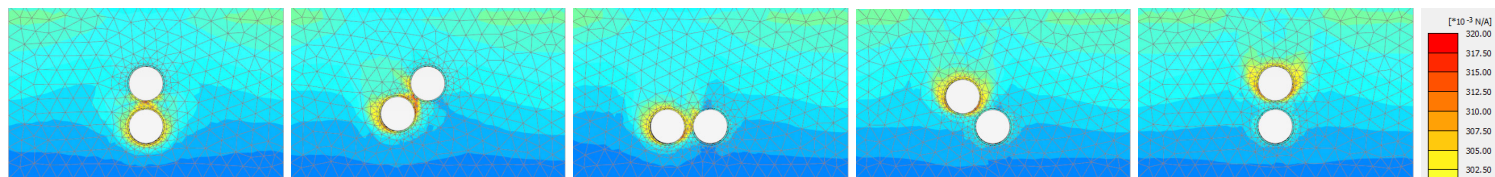
Case1  
後行；真下

Case3  
後行；45° 左斜め下

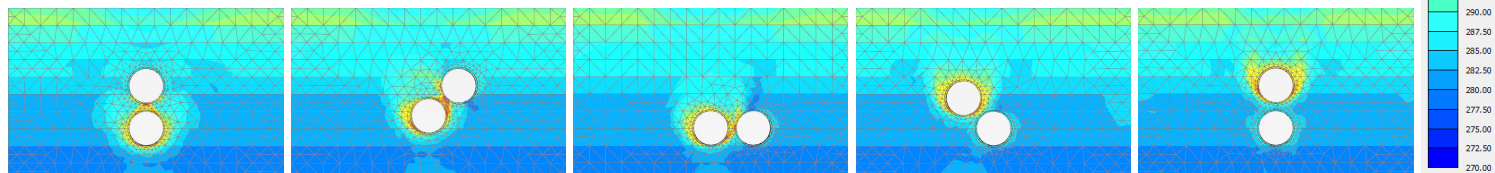
Case5  
後行；左真横

Case7  
後行；45° 左斜め上

Case9  
後行；真上



1層でモデル化した場合( $e_0$ を0.295~0.282で均等勾配分布、 $K_0=0.73$ )



10層に分けて層ごとに設定（注； $e_{max}=0.33$ も導入）

$e_0$ ,  $K_0$ 分布の設定の違いによる影響はさほど大きくなかった

## 全主ひずみの比較（最終結果）

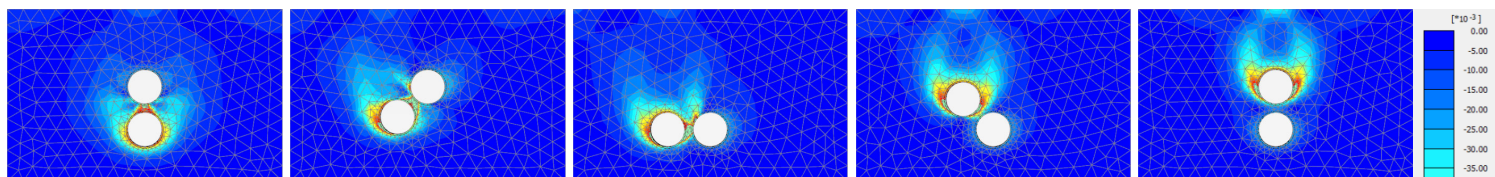
Case1  
後行；真下

Case3  
後行；45° 左斜め下

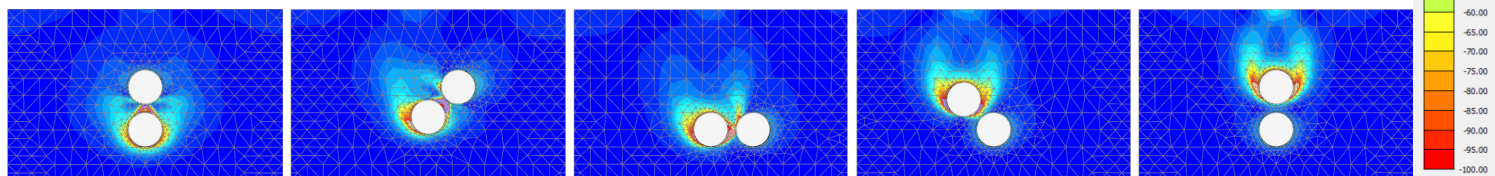
Case5  
後行；左真横

Case7  
後行；45° 左斜め上

Case9  
後行；真上



1層でモデル化した場合( $e_0$ を0.295~0.282で均等勾配分布、 $K_0=0.73$ )



10層に分けて層ごとに設定

$e_0$ ,  $K_0$ 分布の設定の違いによる影響はさほど大きくなかった

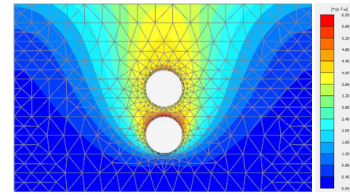
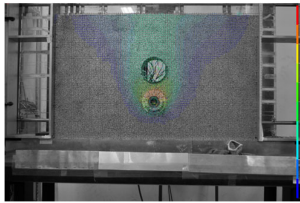
# Case1 (直下の掘削) ; 地盤の挙動関係

実験

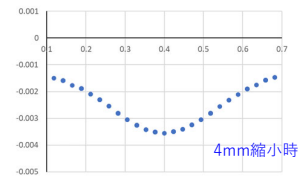
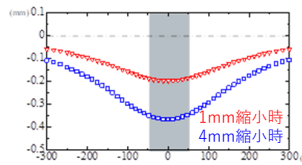
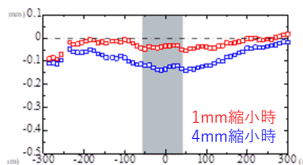
FEMtij-2D  
(断面収縮15.36%)

PLAXIS+tijモデル  
(断面収縮15.36%)

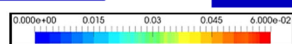
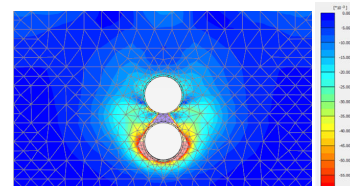
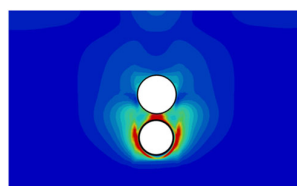
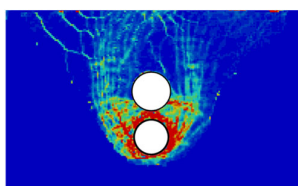
変位分布



地表面沈下



偏差ひずみ  
 $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$



全主ひずみ  $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$

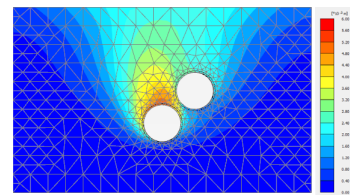
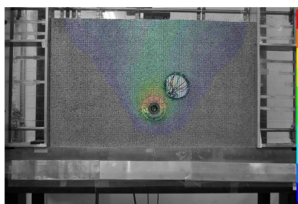
# Case3 (45°斜め下) ; 地盤の挙動関係

実験

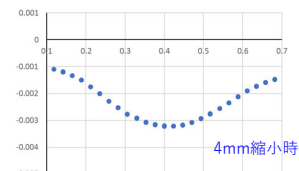
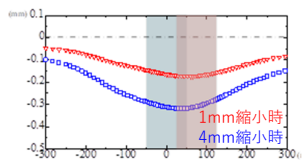
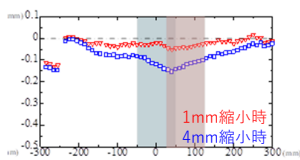
FEMtij-2D  
(断面収縮15.36%)

PLAXIS+tijモデル  
(断面収縮15.36%)

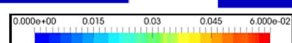
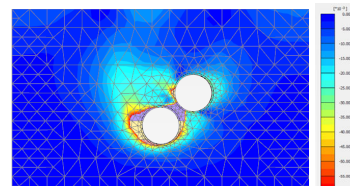
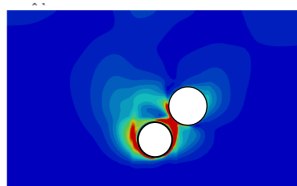
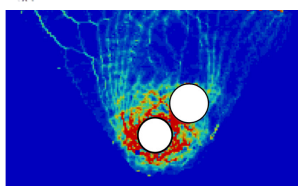
変位分布



地表面沈下



偏差ひずみ  
 $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$



全主ひずみ  $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$

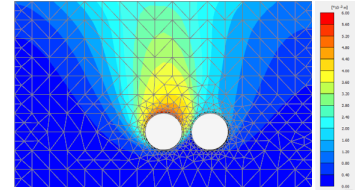
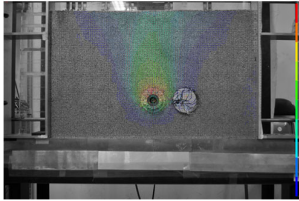
# Case5 (真横の掘削) ; 地盤の挙動関係

実験

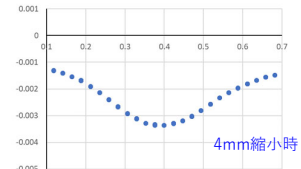
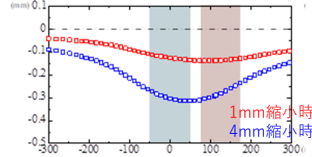
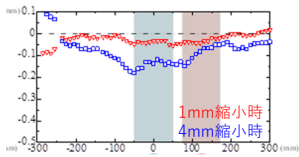
FEMtij-2D  
(断面収縮15.36%)

PLAXIS+tijモデル  
(断面収縮15.36%)

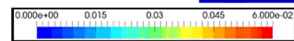
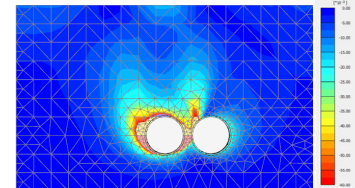
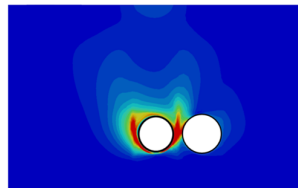
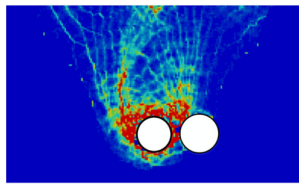
変位分布



地表面沈下



偏差ひずみ  
 $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$



全主ひずみ  $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$

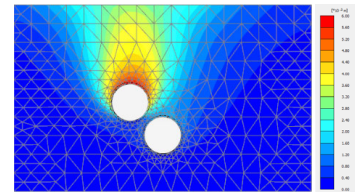
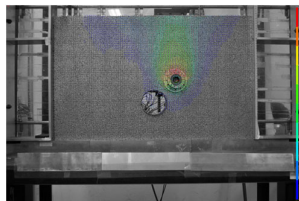
# Case7 (45°斜め上) ; 地盤の挙動関係

実験

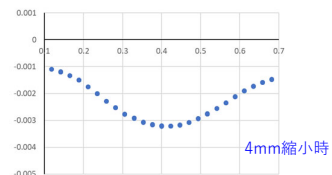
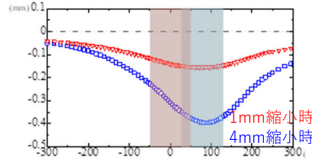
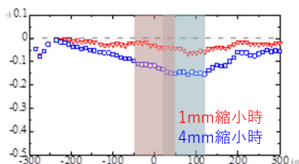
FEMtij-2D  
(断面収縮15.36%)

PLAXIS+tijモデル  
(断面収縮15.36%)

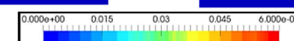
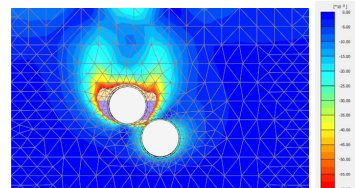
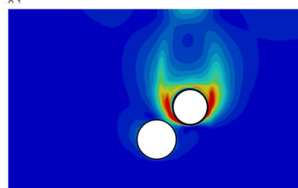
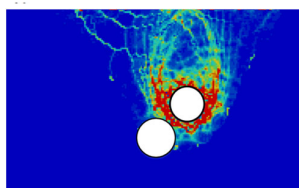
変位分布



地表面沈下



偏差ひずみ  
 $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$



全主ひずみ  $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$

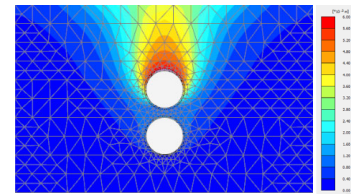
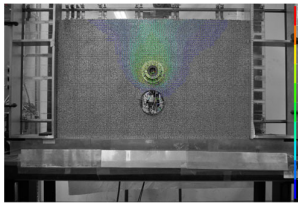
## Case9 (真上の掘削) ; 地盤の挙動関係

実験

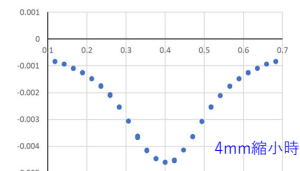
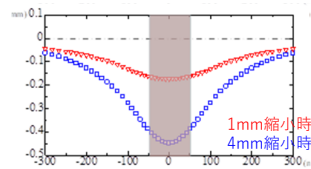
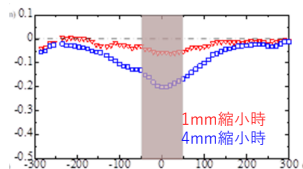
FEMtij-2D  
(断面収縮15.36%)

PLAXIS+tijモデル  
(断面収縮15.36%)

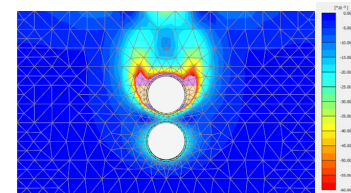
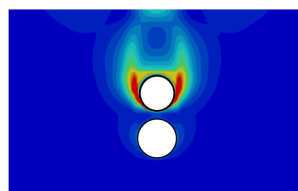
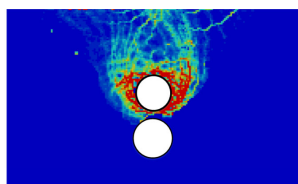
変位分布



地表面沈下



偏差ひずみ  
 $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$



全主ひずみ  $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2$

## 先行トンネルへの影響 (断面力比較)

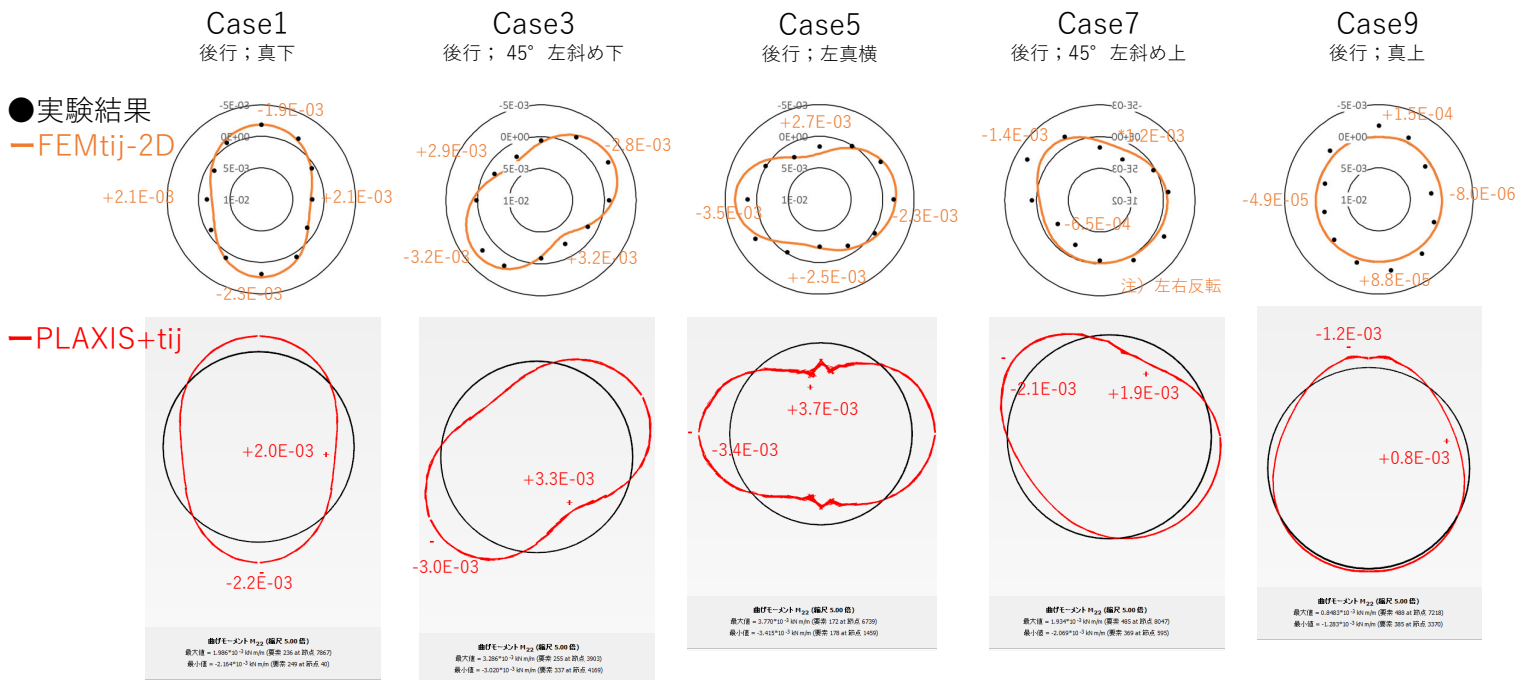
■既設 (先行) トンネルへの影響として、曲げモーメントを比較

■補足 (PLAXIS+tijでの解析ステップについて)

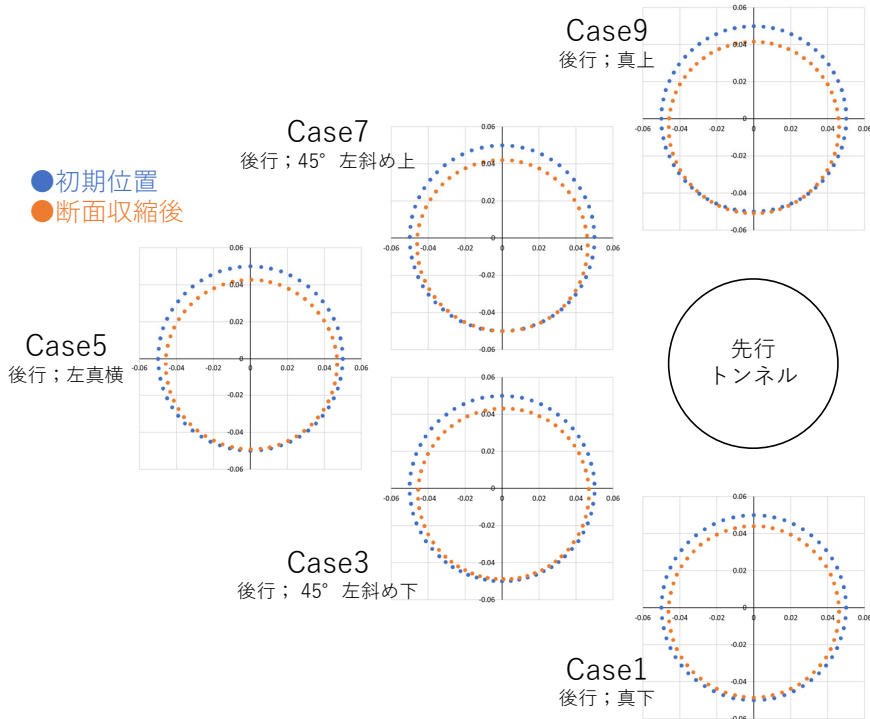
- Initial Phase; 初期応力解析
- Phase\_1 ; 地表面荷重
- Phase\_2 ; 先行T シェル要素・インターフェースを追加
- Phase\_3 ; 先行T 内部要素を除去
- Phase\_4 ; 先行T 断面収縮(半径1mm)→先行Tの断面力に悪影響があるため削除
- Phase\_5 ; 後行T シェル要素・インターフェースを追加
- Phase\_6 ; 後行T 内部要素を除去
- Phase\_7 ; 後行T 断面収縮(半径4mm)



# 先行トンネル・曲げモーメントの比較[kN m/m]



# 断面収縮15.36%(半径4mm相当)のトンネル変形



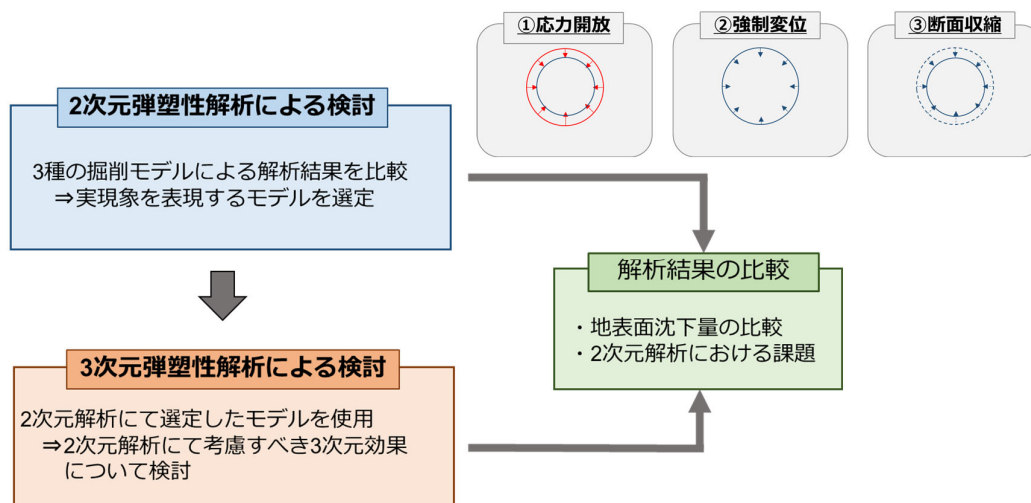
- 概ねインバートの方向に収縮するような形状となっている
- 強いて違いを挙げると、
  - Case9は全体的に沈下
  - Case1はインバートが浮上
- ちなみに、「内部要素の除去」だけではほとんど変化なし

## まとめ

- 過去に実施された模型実験（アルミ棒、双設トンネル）とFEMtij-2Dの比較による検証研究を対象にPLAXIS+tij modelで再現解析を実施
  - 後行トンネルのモデル化；断面収縮（4mm半径方向に縮小）
- FEMtij-2DとPLAXIS+tij modelによる結果はほぼ同等であることを確認

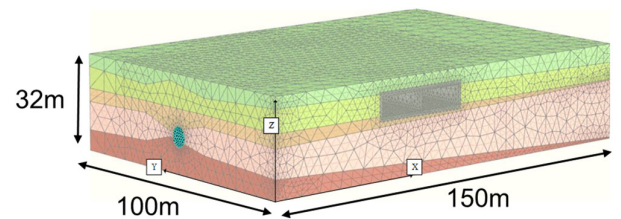
## 今後の予定（3次元解析に向けて）

- 実際のシールドトンネル掘進のモデル化方法の検討
  - まずは、2次元弾塑性解析による検討、続いて3次元弾塑性解析に展開
  - 特に、掘削土除去による浮き上がり挙動に着目



## 今後の予定（3次元解析に向けて）

- 過去にシンガポール地下鉄を対象とした再現解析を実施、報告
  - 第30回tij研究会(2019.12), 第32回tij研究会(2020.8), 第5回tijセミナー(2020.11)
- 様々な検討がされているが、課題も残されている状態（？）
  - 弾性？弾塑性？
  - 応力解放？強制変位？断面収縮？
  - 切羽土圧？裏込め注入？
  - 掘削土の除去による浮き上がりをどうするか？
- 基本的にはPLAXISに装備されているTunnel designerを利用とした3次元解析方法（モデル化）を検討し、実務への展開を図る



ご清聴ありがとうございました