

シールドトンネルの掘削解析

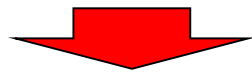
ー二次元解析と三次元解析ー

千葉工業大学

鈴木 誠

背景 目的

日本のシールドトンネル設計は、梁バネモデルが主流であるが、周辺地盤や近接構造物への影響を検討するにはFEMを用いる必要がある。また、シンガポールなどではFEMが使われてきている。



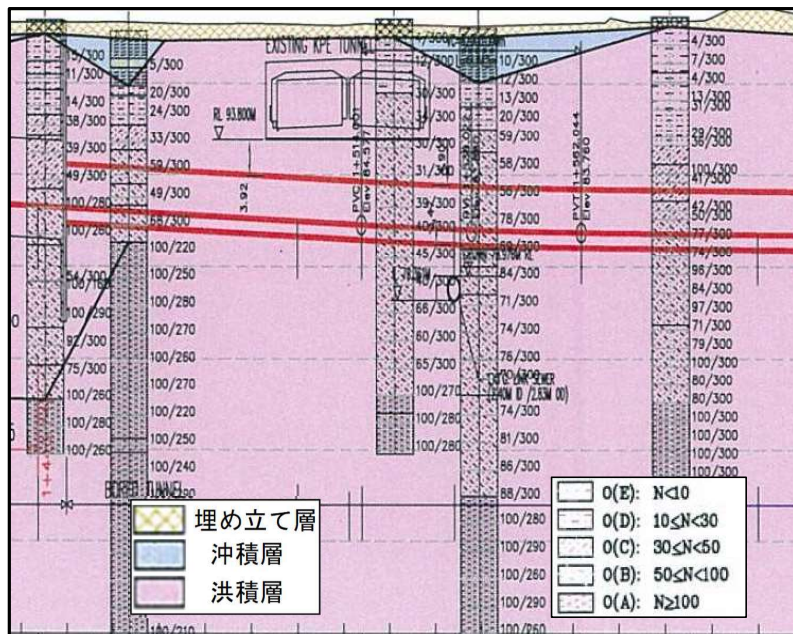
シンガポール地下鉄を対象とし、PLAXIS 3D+tijモデルを用いてシールドトンネルの三次元掘削解析を実施した。

- PLAXIS soil test による地盤パラメータの決定
- 数値解析による境界条件の影響を評価
- 掘削シミュレーションの検討
- 3D効果を考慮した2D解析の検討

地質概要と地層区分

地層断面

- 対象区間は洪積層が主
- N値により区分される

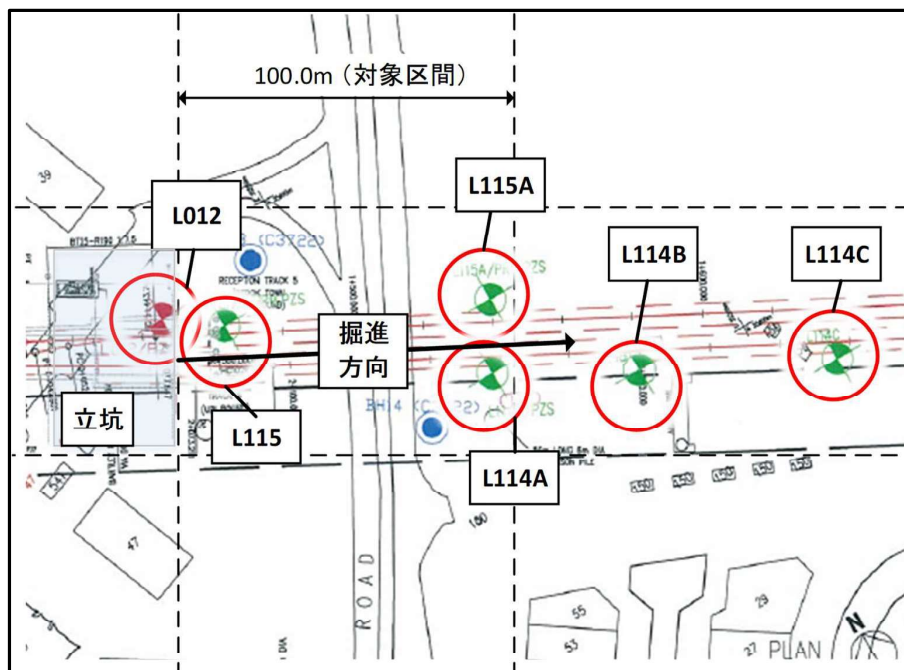


断面図

対象ボーリングデータ

対象平面図

- 土質パラメータ設定のために以下のボーリングから土質試験データを取得した



実施土質試験の状況

実施された土質試験

- Subloading tijモデルに必要な(λ , κ , N)を設定するための圧密試験のデータが少ない
 \Rightarrow CU試験結果における圧密過程から λ , κ を決定
 \Rightarrow SoilTestによるパラメータスタディから N を決定

行われた土質試験

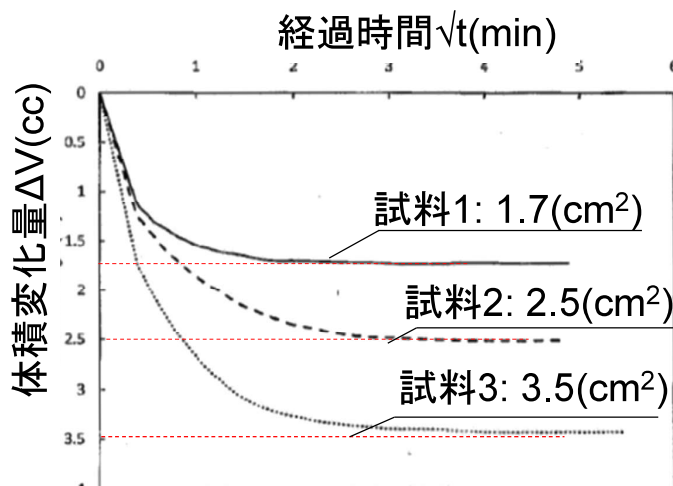
地層	L012	L114A	L114B	L114C	L115	L115A
O(E)			●●●●	●●		
O(D)	●		●●		□	●●
O(C)	●		●	●		
O(B)				●●	●	●
O(A)		●			●	●

● CU三軸試験
□ 圧密試験

CU試験における圧密過程

圧密過程[例 L114B-O(E)層]

- 土粒子密度を $2.6(\text{g}/\text{cm}^3)$ と定め等方圧密終了後の体積変化量から間隙比 e , e_0 を算出



	試料1	試料2	試料3
e_0	0.65625	0.64596	0.568047
e	0.62358	0.59822	0.504374

体積: $86.193(\text{cm}^3)$

ρ_d : 1.6, 1.61, 1.69 (Mg/cm^3)

PROJECT -

Contract 9131D Detailed Site Investigation For
Downtown Line 3 (Section 11) WO13

BOREHOLE - L114B

clay & light greenish
clayey SAND

SAMPLE - 75/4

DEPTH (m) - 8.00 - 9.00

JOB NUMBER - 912/6873

86.193 (cm^3)

1

2

3

INITIAL -

SAMPLE HEIGHT (mm)

76

76

76

SAMPLE DIAMETER (mm)

38

38

38

MOISTURE CONTENT (%)

22

22

21

BULK DENSITY (Mg/m^3)

1.95

1.97

2.05

DRY DENSITY (Mg/m^3)

1.60

1.61

1.69

SHEAR STAGE -

INITIAL CELL PRESSURE (kN/m^2)

250

400

400

INITIAL POKE PRESSURE (kN/m^2)

200

200

200

INITIAL EFFECTIVE PRESSURE (kN/m^2)

50

100

200

STRAIN RATE (mm/min)

0.05

0.05

0.05

1.61, 1.69 (Mg/cm^3)

18.42

20.50

CORRECTED SHEAR STRESS (kN/m^2)

144.9

197.4

250.6

A VALUE

-0.177

-0.121

0.024

STRESS RATIO

3.858

3.673

3.568

MAXIMUM STRESS RATIO -

STRAIN (%)

1.98

2.49

9.50

CORRECTED DEVIATOR STRESS (kN/m^2)

152.1

285.9

477.3

CORRECTED SHEAR STRESS (kN/m^2)

76.1

142.9

238.7

A VALUE

0.063

6

STRESS RATIO

4.762

1

FINAL -

MOISTURE CONTENT (%)

23

22

BULK DENSITY (Mg/m^3)

2.06

2.15

1.67

1.76

試料1

試料2

試料3

Specimen 1

Specimen 2

Specimen 3

TEST DATE - 20 Dec 2009

CHECK DATE - 05 Jan 2010

TESTING OFFICER -

KL Tan

APPROVED / CHECKED -

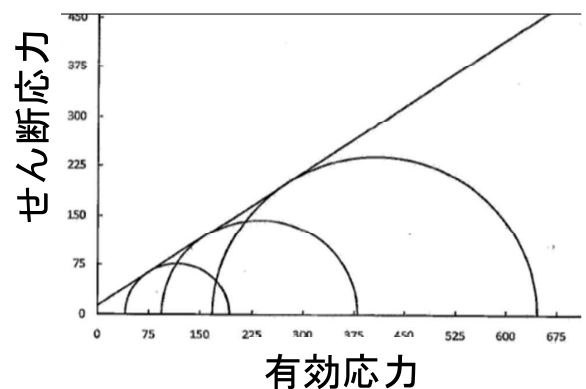
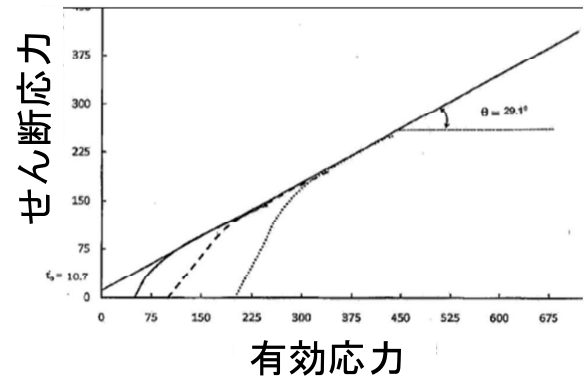
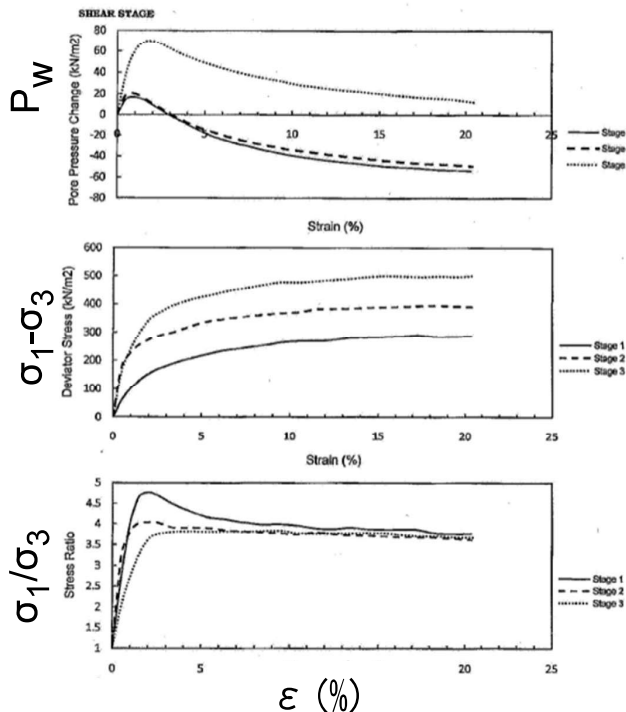
(Authorised Signatory - Samuel Teng)

This test results reported herein have been performed in accordance with the laboratory's terms of accreditation under SAC (MCA) AS

CU試験におけるせん断過程

せん断過程 [L114B-O(E)層]

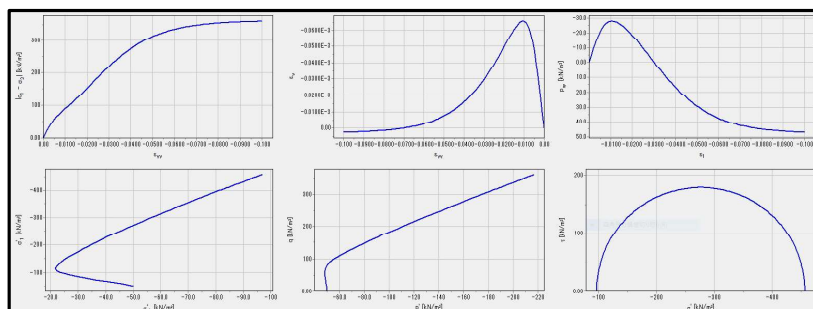
- SoilTestによるパラメータスタディにより N および土質パラメータ決定



Plaxis SoilTest

パラメータスタディ

- λ, κ : $e - \ln p$ から算出した値
 - R_{cs} : $\sigma_1/\sigma_3 \sim \varepsilon$ の残留値から決定
 - $N(e)$: パラメータスタディ
 - ν : 0.3で固定
 - β : 1.5で固定
 - α : 100
 - k_α : パラメータスタディ
- ⇒現場試験結果と比較して決定



出力画面

Property	Value	Unit
Material set		
Identification	O(E)	
Material model	User-defined	
User-defined model		
DLL file	tij117plaxis64.d	
Model in DLL	No1 ension/subk	
Parameters		
λ	0.08564	
κ	8.564E-3	
R_{cs}	4.700	
N (void ratio under at)	0.7680	
ν (Poisson ratio)	0.3000	
Beta (Shape of yield sur	1.500	
e_0 (void ratio under init)	0.6563	
[Density] a	100.0	
[Density] k_a	2.000	
[Bonding] Q_{c0}	0.000	
[Bonding] b	0.000	
[Bonding] k_b	0.000	
[Unit] Pa (Atmospheric pr	98.00	kN/m ²
[IC component] powerIC	2.000	
[Advanced] SplitStrainFlag	0.000	
[Advanced][e_0] e_{0inc}	0.000	
[Advanced][e_0] Z_{ref}	0.000	m

入力画面

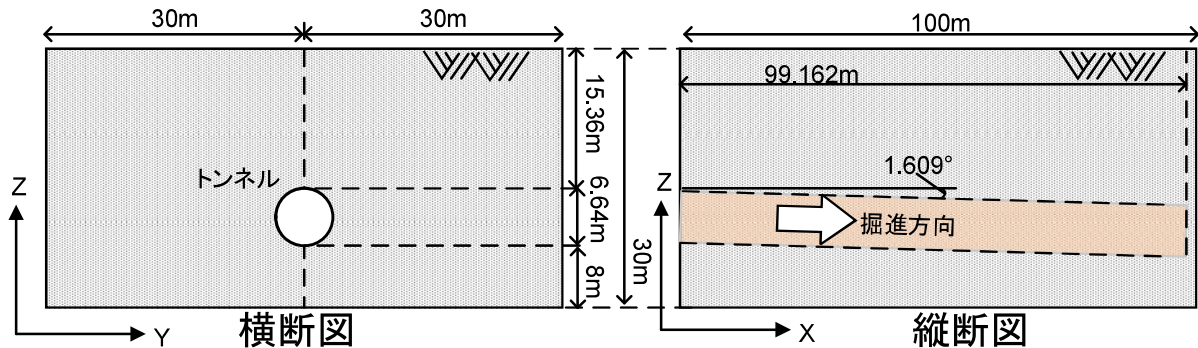
数値解析の境界設定

境界設定

掘進方向の境界長さに関して沈下量への影響が大きい
⇒ 妥当な境界長さを検討するため、カルバートを設置しない簡易的な解析を実施

解析概要

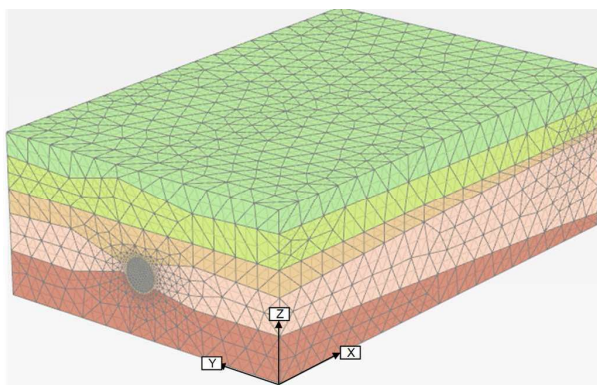
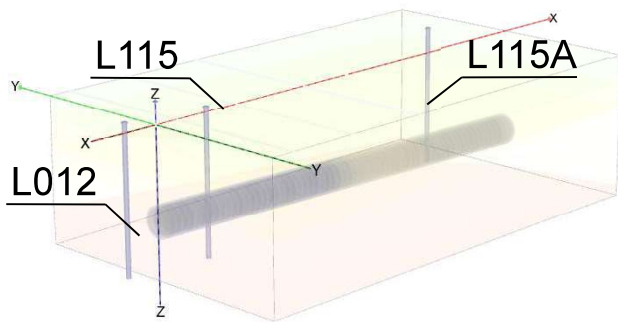
- 横断面境界長さは30mで固定
- トンネル下端境界長さは1B(トンネル直径)程度で固定
- 掘削距離 99.162m
- 掘進方向境界長さ 100m



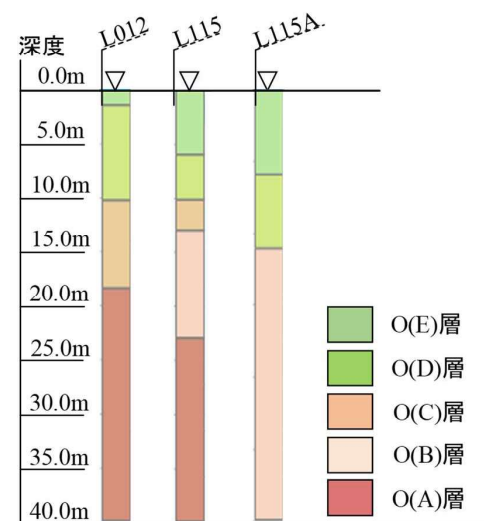
境界設定の地盤モデル

Plaxis3Dモデル

3か所のボーリングデータを使用



メッシュ図



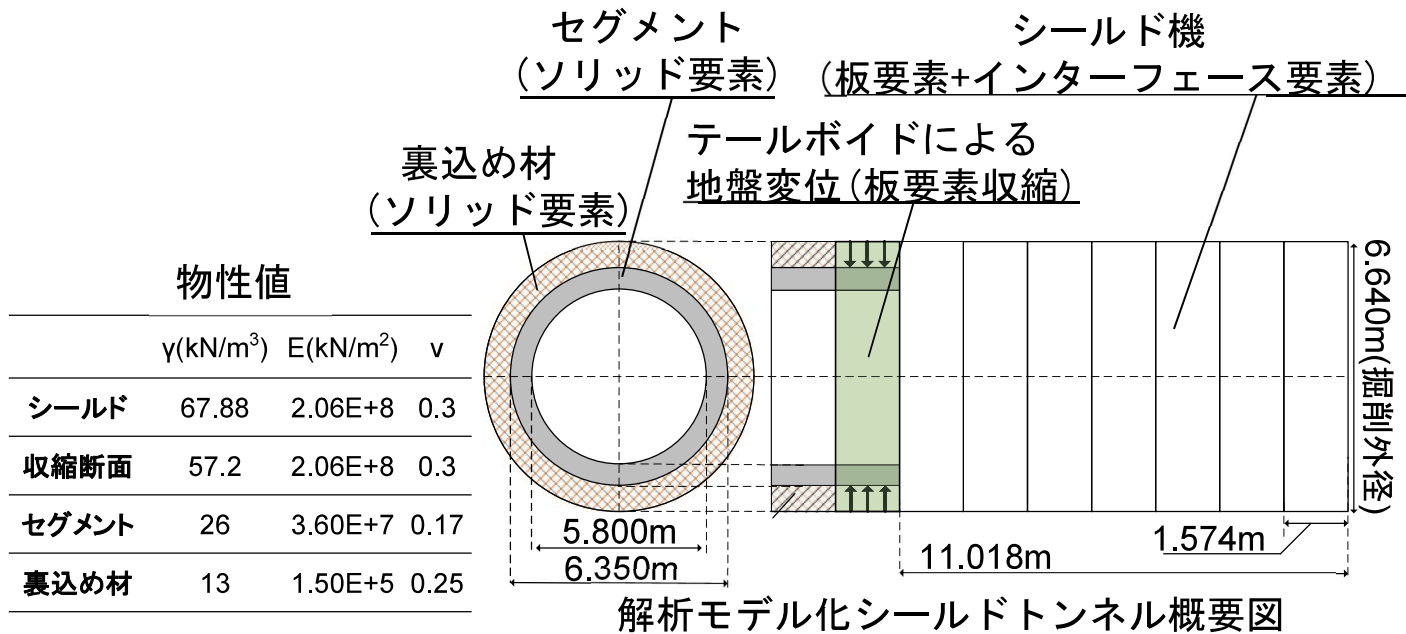
	L012	L115	L115A
深度	0.0m	0.0m	0.0m
	5.0m	5.0m	5.0m
	10.0m	10.0m	10.0m
	15.0m	15.0m	15.0m
	20.0m	20.0m	20.0m
	25.0m	25.0m	25.0m
	30.0m	30.0m	30.0m
	35.0m	35.0m	35.0m
	40.0m	40.0m	40.0m

柱状図と座標

トンネル概要 (解析モデル)

解析モデル概要

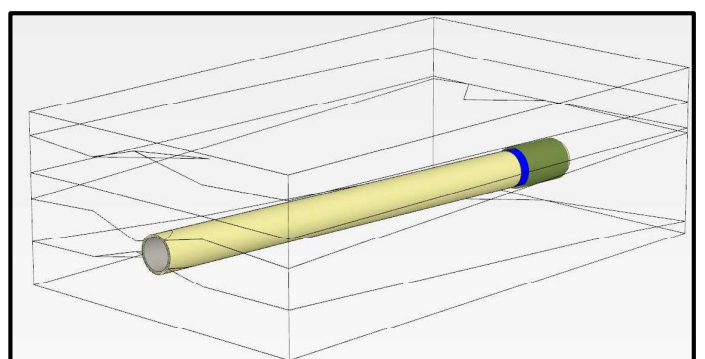
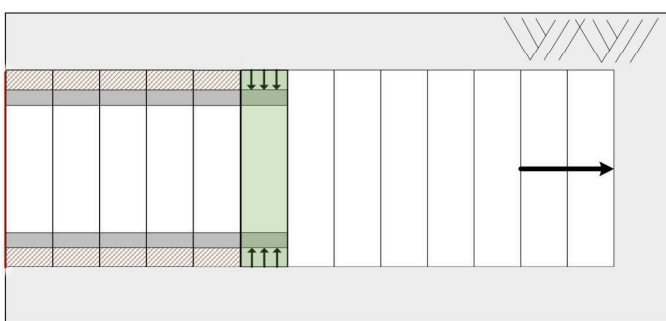
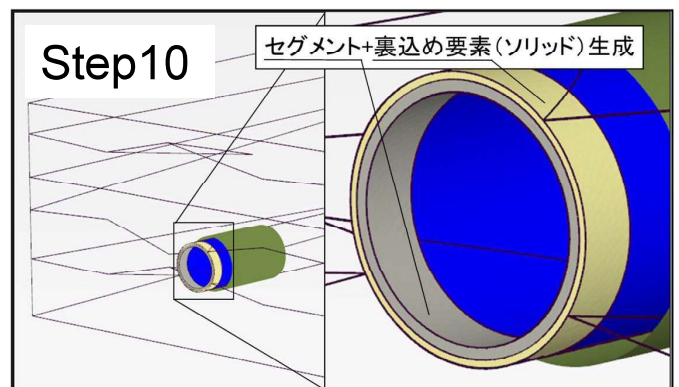
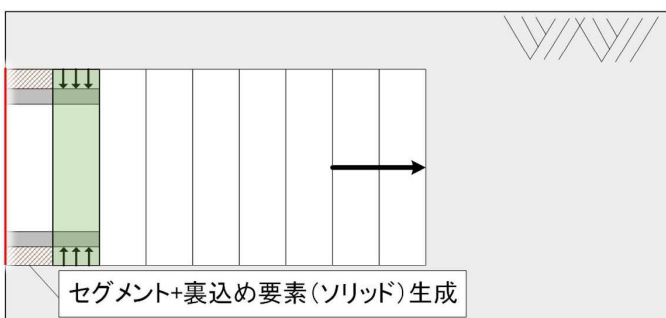
- ・ シールド機+テールボイド+覆工を1.574mで等間隔分割した (7断面でシールド機を表す)
- ・ 板厚はテールプレートの10倍程とし0.3m
- ・ テールボイドによる地盤変位は板要素に収縮率を与えて再現



掘削過程シュミレーション

- ・ セグメント要素+裏込め要素の生成 (ソリッド要素)
- ・ このステップを繰り返しシールドトンネル掘削を再現

Step10

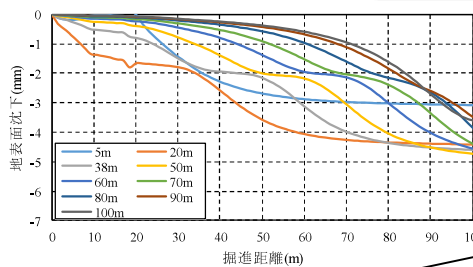
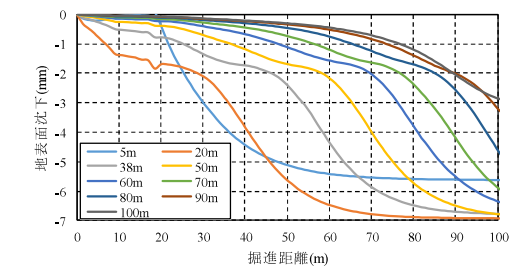
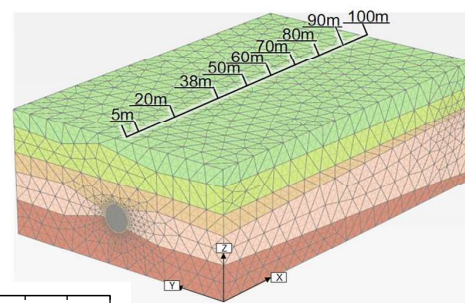


解析結果

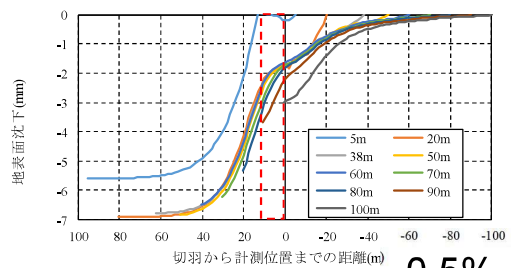
トンネル直上地表面沈下

(収縮率0.5%, 0.25%での比較)

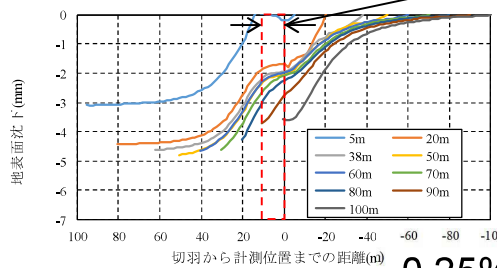
- シールド機直上通過後テールボイドにより顕著な沈下
- それぞれ7mm, 5mm程度で沈下が終了
- 5m, 90m, 100mの地点においては境界



シールド機長



0.5%



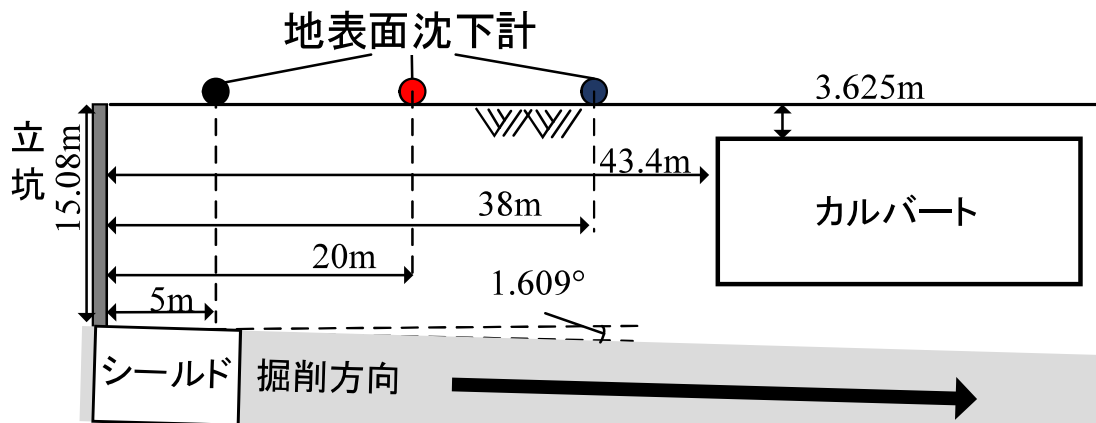
0.25%

地表面沈下計測区間

地表面沈下計

- 立坑から5m, 20m, 38mの位置で計測
- シールド掘進距離約100mまで計測

⇒地表面沈下の実測値からトンネル掘削による地盤挙動を
対象に数値解析の評価検討を行う

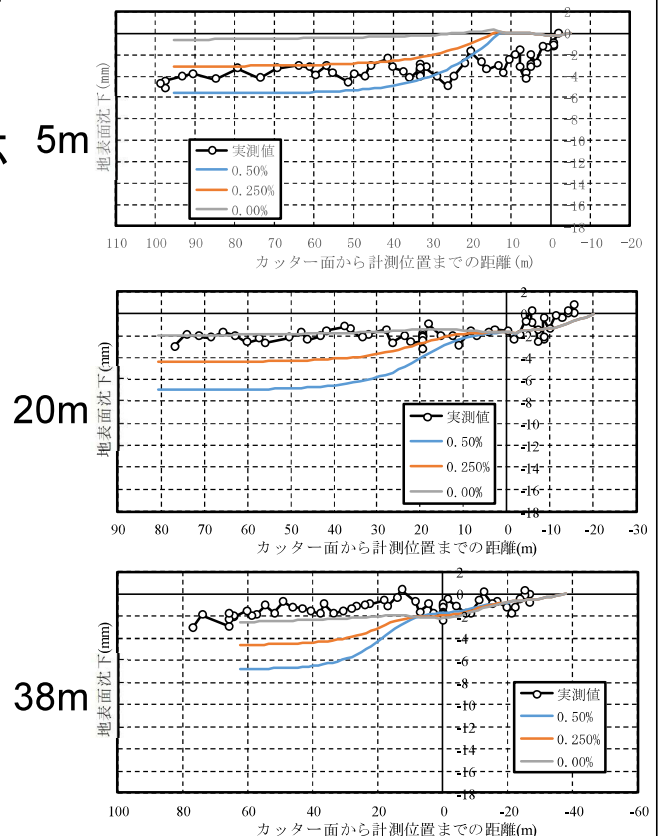
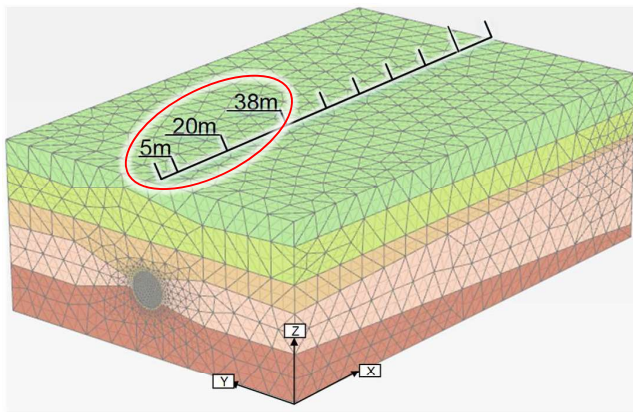


対象区間概要図

解析結果

実測値比較(立坑から5m, 20m, 38mの計測位置での比較)

- 5m地点に関して境界の影響を受けているため、解析での再現性は低い
- 20m地点に関して0%が良い対応
- 38m地点に関してカルバートトンネルの存在を無視しているため実測値の再現は難しい



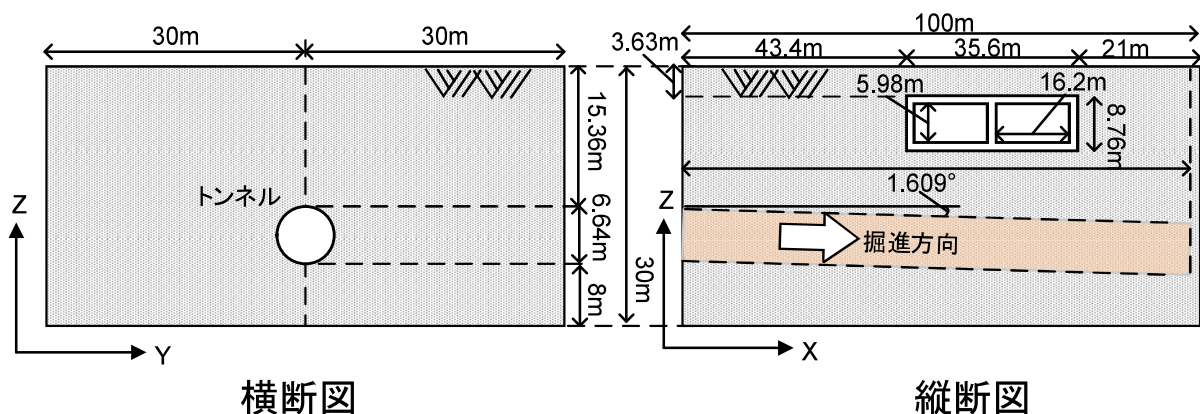
カルバート直下掘削の数値解析

カルバート直下掘削解析

実測値との比較に当たり、38m地点の結果はカルバートトンネルの存在を大きく受けると考えられる
 ⇒ カルバートトンネルを考慮した解析

カルバートの材料物性値

$$\gamma = 24.5(\text{kN/m}^3), E = 26.5 \times 10^6(\text{kN/m}^2), \nu = 0.2$$



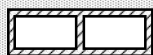
カルバート設置の概要

カルバートトンネル設置から掘削

Step1

土要素

Step2



土要素削除+
カルバート生成(ソリッド)

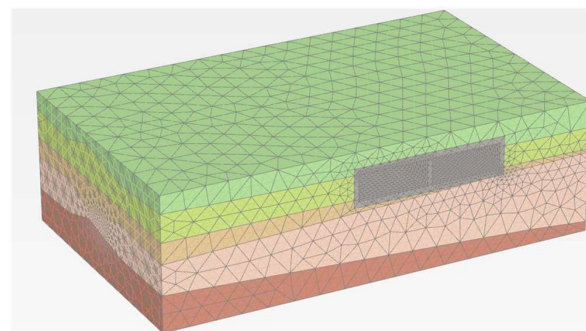
Step3



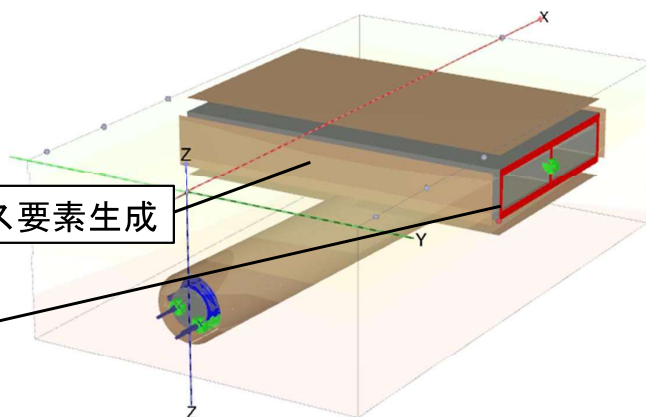
インターフェース要素生成

XYZ固定

縦断図: カルバート設置過程



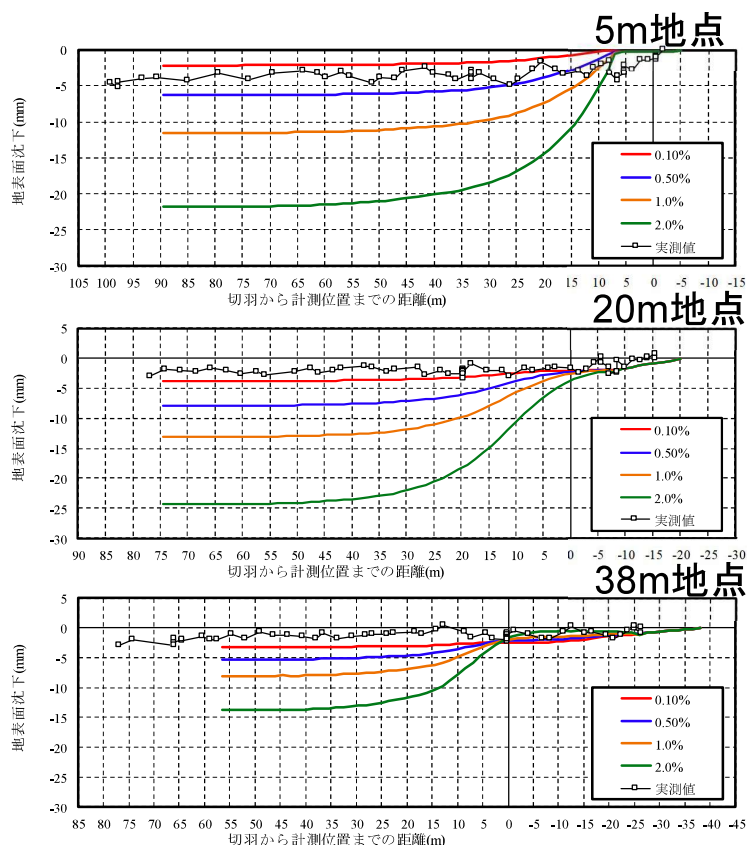
メッシュ図



解析結果 (トンネル直上沈下)

トンネル直上地表面沈下

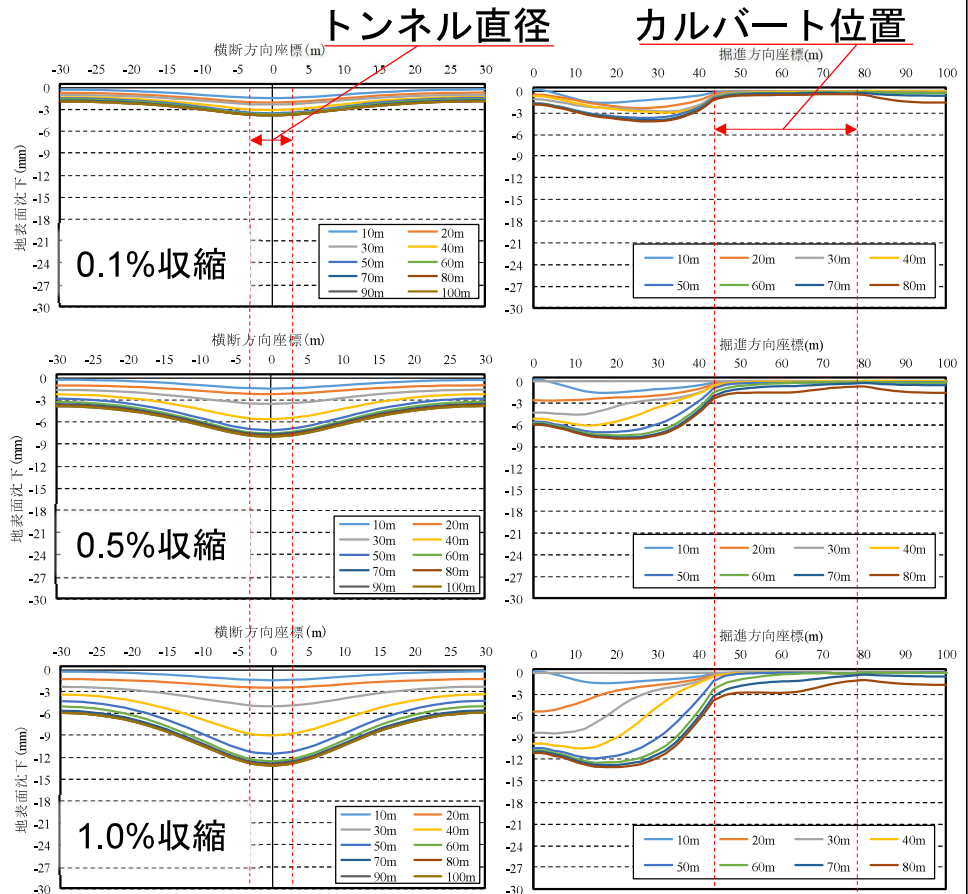
- カルバートトンネルの考慮しない解析と異なり
38m地点の沈下が小さい
⇒カルバートトンネルの存在が影響する
- 最終沈下を迎える切羽からの距離は収縮率により異なる



解析結果（影響範囲）

横断面（20m断面），縦断面（直上）掘削距離毎の比較

凡例：掘削距離

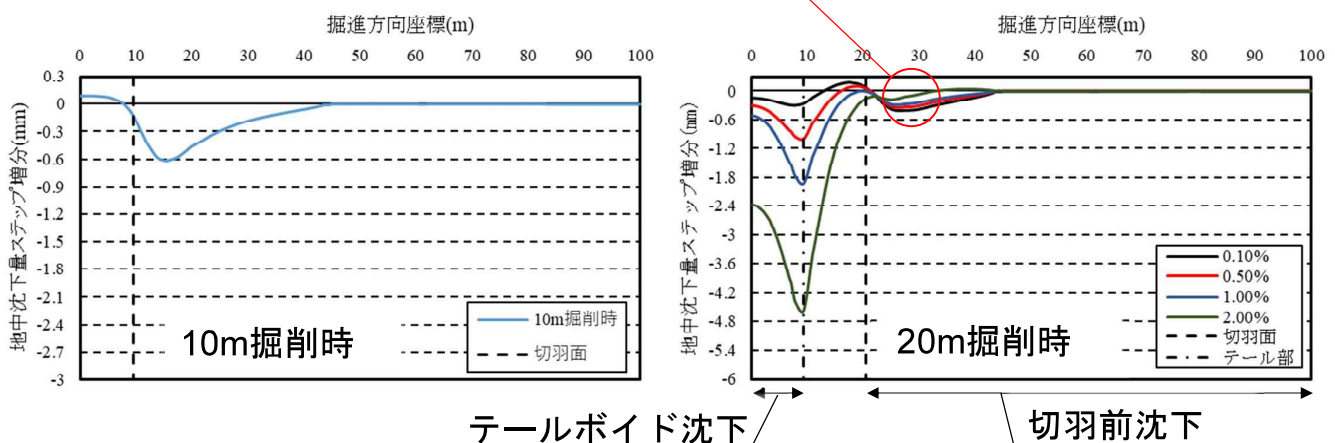


解析結果（地中沈下）

縦断面（直上）地中沈下量、10m, 20m掘削時の変位増分

地表面から10m以深での沈下分布

- 10m掘削時はテールボイド断面の定義が始まっていないため切羽前沈下
- 20m掘削時はテールボイド断面の定義による沈下量の増大を確認
- 断面収縮率の大小によってテールボイド沈下変化を確認
- 収縮率0.1%ではテールボイド沈下よりも切羽前沈下の方が沈下量が大きい
- 断面収縮率の大小により切羽前沈下への影響も確認
⇒収縮率が高いほど切羽前沈下が小さい？

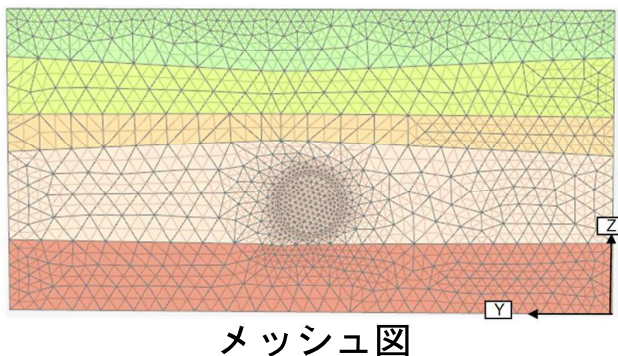
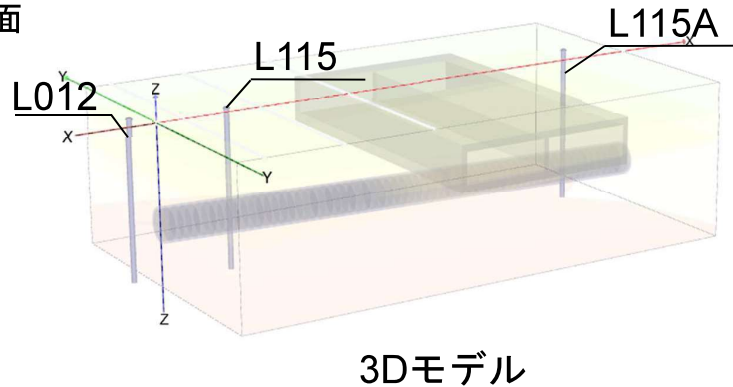
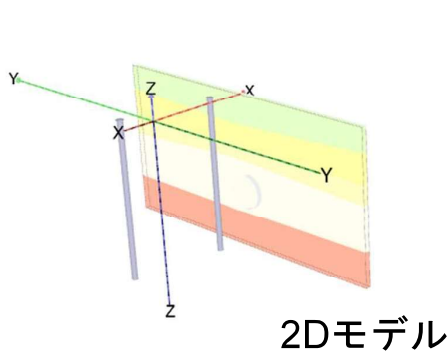


数値解析の地盤モデル

Plaxis3Dによる2Dモデル

3D同様のボーリングデータを使用

立坑から20m地点断面



	L012	L115	L115A
X座標 (m)	-3.078	14.81	90.53
Y座標 (m)	5.102	2.551	6.891

柱状図と座標

数値解析 2D解析

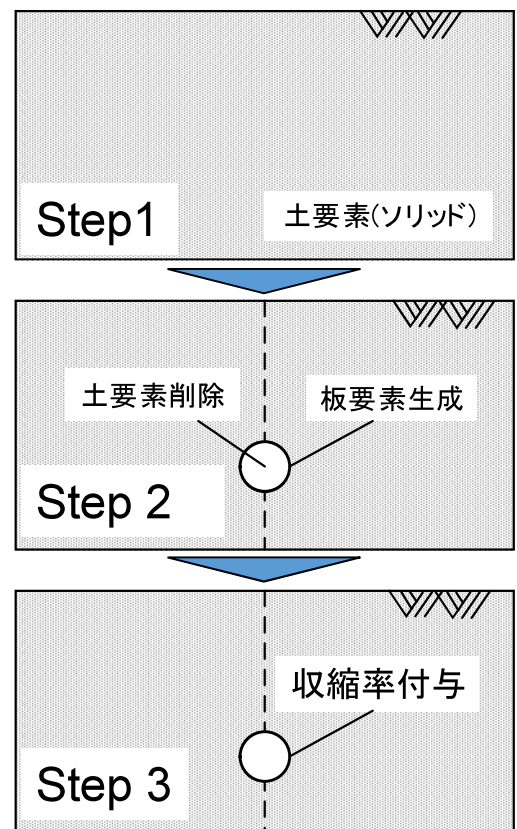
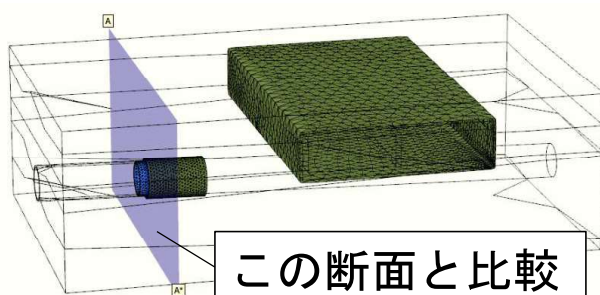
2D解析概要

- 3D解析におけるテールボイド断面のみを2Dで再現
 - 3D同様板要素に収縮率を与えてテールボイドによる地盤変位を再現
- ⇒3D解析における20m地点でのテールボイド断面収縮時と比較

Step 1 初期地盤作成

Step 2 土要素削除と板要素生成

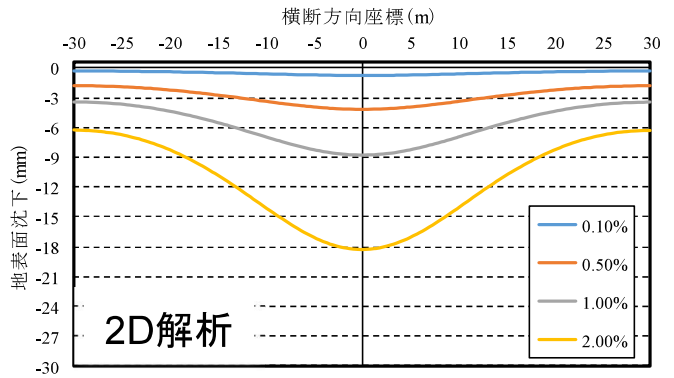
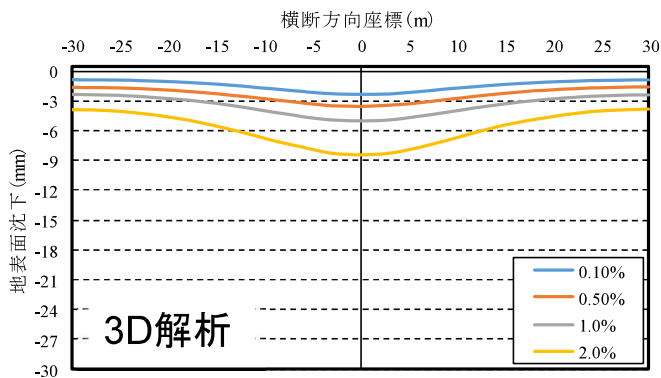
Step 3 板要素を収縮



解析結果 2D-3D

横断面地表面沈下(収縮率0.1%, 0.5%, 1.0%, 2.0%での比較)

- 全体的に2D解析の方が大きい沈下
(3D解析では切羽前沈下等を加算した値)
- 収縮率0.1%では3D解析の方が大きい沈下
⇒ テールボイド沈下よりも切羽前沈下の方が大きい



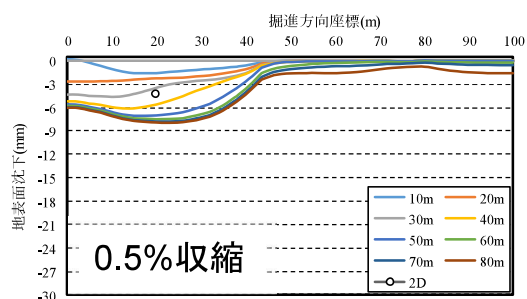
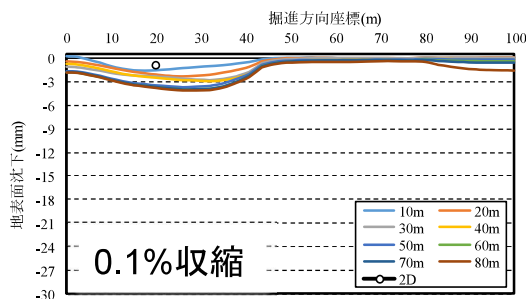
※掘削距離30m→テールボイド断面直上沈下

解析結果 2D-3D

縦断面地表面沈下(掘進距離毎の比較)

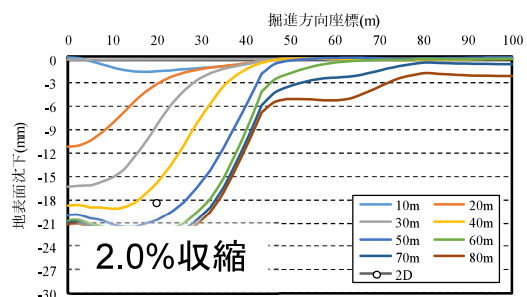
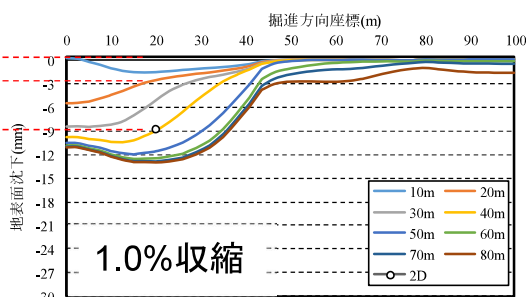
掘進方向座標40mまで

- 掘削距離10mの沈下はすべて切羽前沈下
⇒ 0.1%収縮は切羽前沈下が主体的
- 掘削距離40mの沈下はテールボイド収縮と後続による沈下
⇒ 収縮率による沈下量が主体的(20mと40mの差)



切羽前
沈下

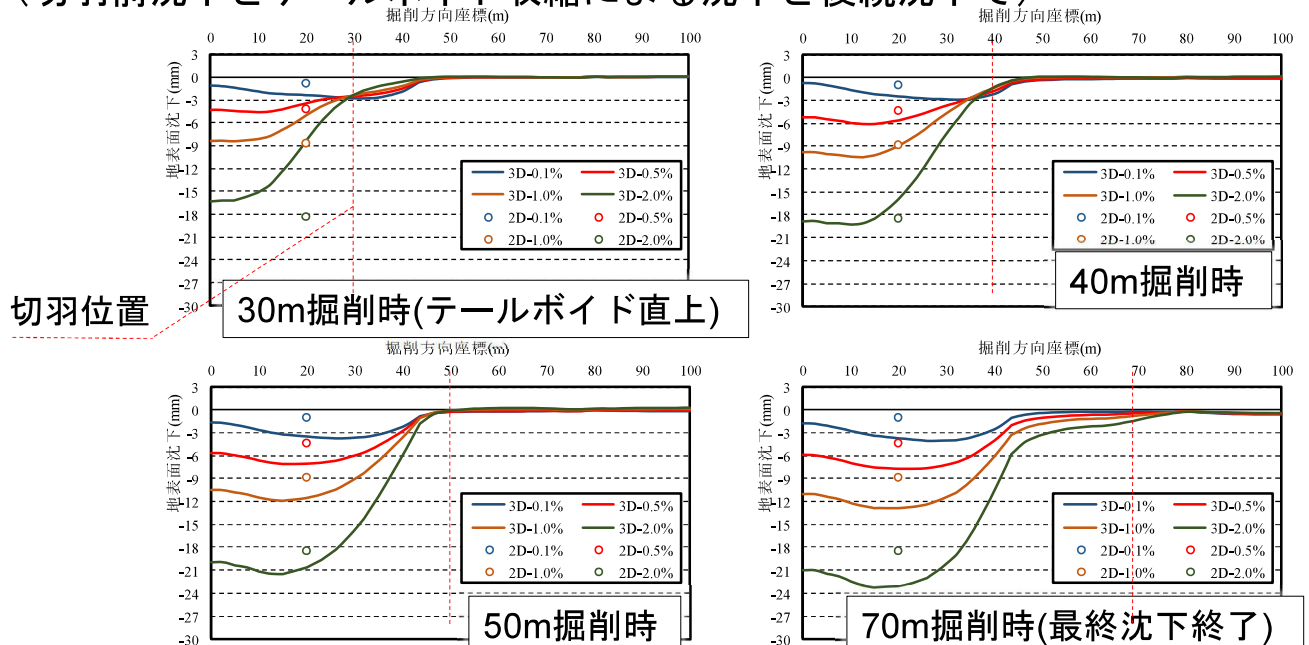
テール
ボイド
収縮+
後続



解析結果 2D-3D

縦断面地表面沈下(収縮率による比較)

- 3D解析における最終沈下量は2D解析では表現できない
- 収縮率が大きくなるとテールボイドの収縮による沈下が主体的で、後続の沈下も現れる
- 掘削距離30mでは0.5%, 40mでは1.0%が2Dと3Dの沈下量が等しい(切羽前沈下とテールボイド収縮による沈下と後続沈下で)



まとめ

境界値検討解析

- 掘進方向境界値について掘進距離100m程度とした時
 - ⇒ 計測位置40m程度は到達境界の影響小
 - ⇒ ただし、5m付近はトンネルを発進境界に固定したので影響あり
- テールボイドによる地盤変位を断面収縮率を与えることで、再現可能

カルバート直下掘削解析

- カルバートトンネルを設定することによる影響の違いが表現可能
- 20m付近では、断面収縮率0.1%が現場計測を表現

2D-3D解析比較

- 同じ段階(テールボイド直上での沈下)では2D解析結果は過大
- 掘削距離が長くなるとテールボイド収縮と後続による沈下が主体
- 収縮率が大きいと2D解析は3D解析の最終沈下量に近づく