

MIDAS CONSTRUCTION TECHNICAL SEMINAR

シールドトンネルの近接・ 併設の影響と設計検討手法 (その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

MIDAS × HORICHI

堀地 紀行

Noriyuki HORICHI

- # 併設シールドトンネル
- # 計測データ
- # 数値解析方法
- # 設計・施工対策

国土舘大学 理工学部 教授、
同大学院（修士課程、博士課程）教授

学歴・経歴

早稲田大学理工学部卒業。同大学院修士課程修了。早稲田大学博士（工学）の学位を取得。

日本鉄道建設公団（現鉄道運輸機構）に入社。

津軽海峡線（北海道新幹線）、仙台市地下鉄南北線、京葉都心線、北陸新幹線・リニア実験線等の建設とリニア中央新幹線調査、本社計画部、本社設計技術室等に約20年間勤務の後、国土舘大学教授。

その間、ロンドン大学シティー校客員研究員（教授）、ケンブリッジ大学客員研究員（教授）、

アジア工科大学院（ハノイ校）招聘教授。

シールドトンネル、山岳トンネル、鋼コンクリート複合構造等のテーマで国内外の学協会に40編程の論文、報告等を投稿。

（一社）日本鉄道施設協会優秀論文賞、（公益）日本推進技術協会黒瀬賞受賞。

ロンドン市よりロンドン名誉市民称受章。技術士（建設部門）。

MIDAS CONSTRUCTION
TECHNICAL SEMINAR

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

MIDAS × HORICHI

AGENDA

Session.1

土木学会標準示方書による近接・併設事項の確認

Session.2

現場計測の概要

Session.3

計測結果と評価（下部シールド）

Session.4

計測結果と評価（上部シールド）

Session.5

FEM逐次掘削解析

Session.6

まとめ

シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法（その2）

国土舘大学 教授 堀地 紀行



Session.1

土木学会標準示方書による 近接・併設事項の確認

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.1 標準示方書の確認

5

併設トンネルによる相互干渉の影響、施工時の荷重の影響については、地盤を平面ひずみ要素、覆工をはり要素でモデル化し、施工ステップを考慮した解析等によって評価される場合が多い。他の手法としては、トンネルの掘削による周辺地盤の緩みを土圧係数の低減、地盤反力係数の低減あるいは鉛直土圧の割増し等によって評価する方法もある。併設トンネルの影響を検討する場合には、これらの評価手法も含め過去の研究、実験、計測結果等を参考にし、安全性の確保を基本として適切な評価を行うことが重要である。

シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法（その2）

国土舘大学 教授 堀地 紀行



Session.2

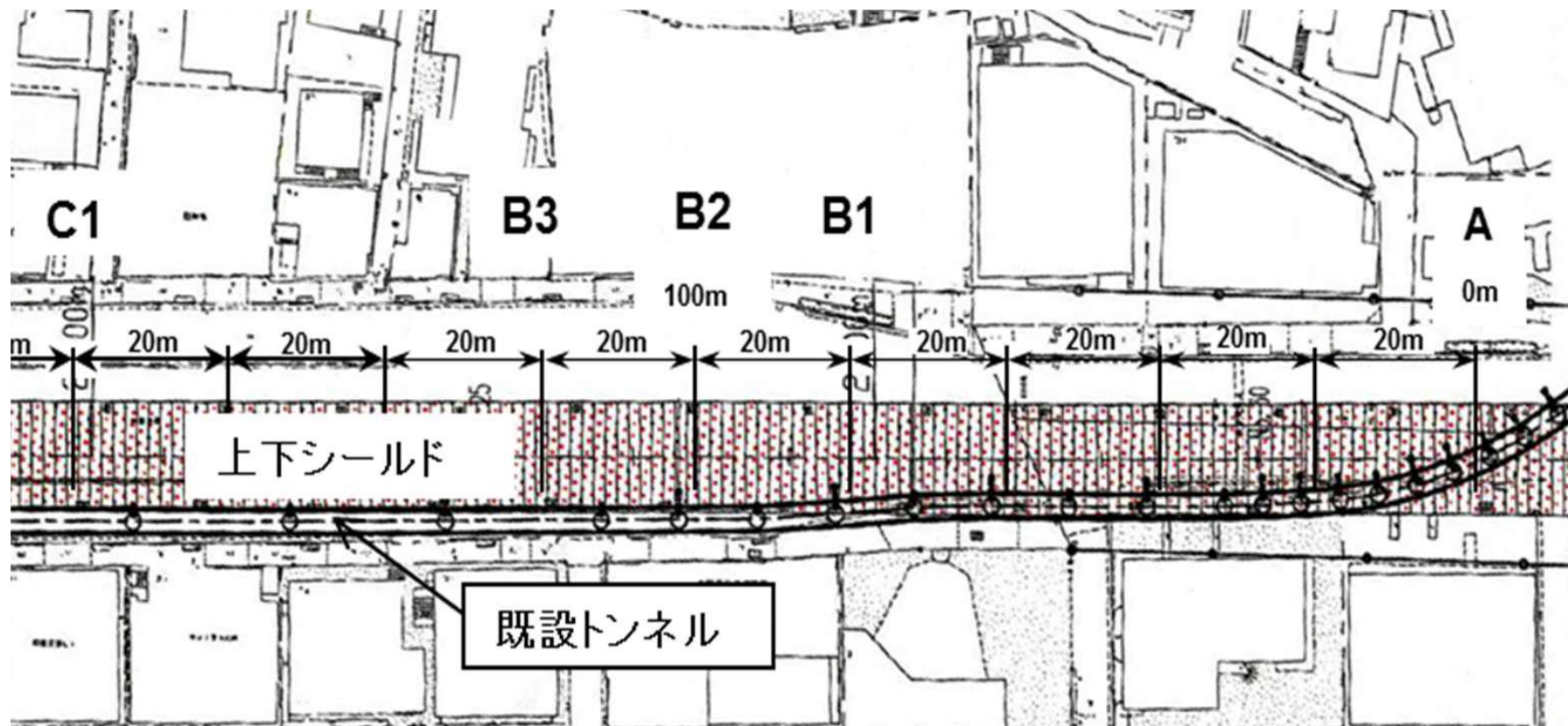
現場計測の概要

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.2 現場計測の概要

7



シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

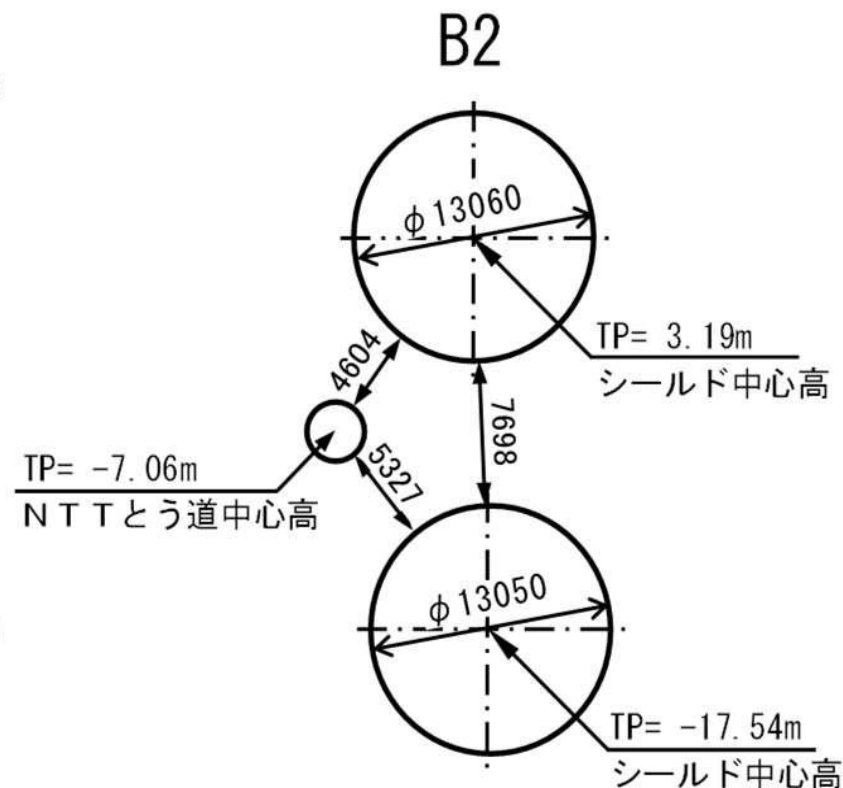
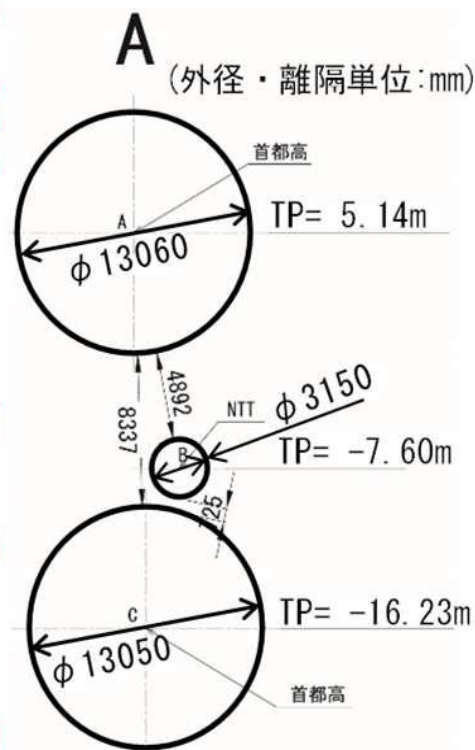
Session.2 現場計測の概要

8

Tog (東京層)、Ks (上総層) のN値 100 以上の層内でトンネル施工

(単位:m)

地質凡例	層厚	地表からの深さ
Tos2	1.35	-17.91 ▼
Toc2	4.25	-22.16 ▼
Tos3	1.50	-23.66 ▼
Tog	5.32	-28.98 ▼
Ks1	13.83	-42.81 ▼
Ks2	7.22	-50.03 ▼
Kc	10.03	-60.06 ▼



シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法（その2）

国土舘大学 教授 堀地 紀行



Session.3

計測結果と評価（下部シールド）

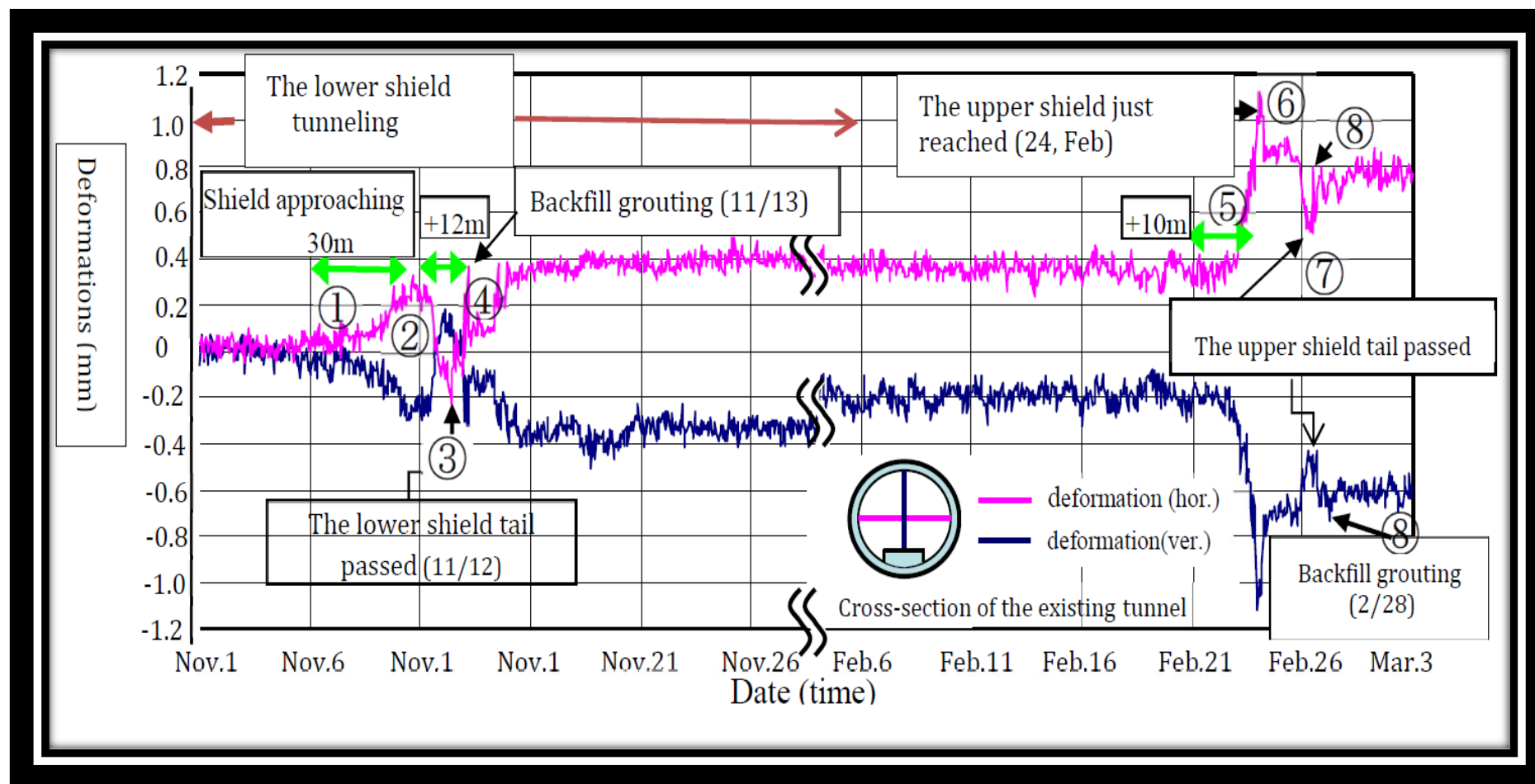
シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.3 計測結果と評価 (下部シールド)

10

既設トンネルと下部シールドの離間距離 0.73 m



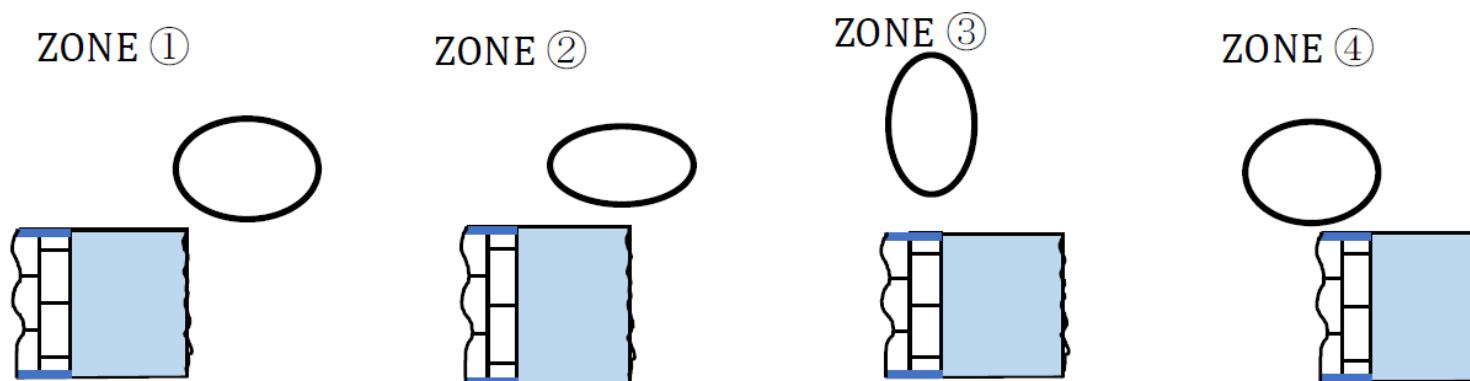
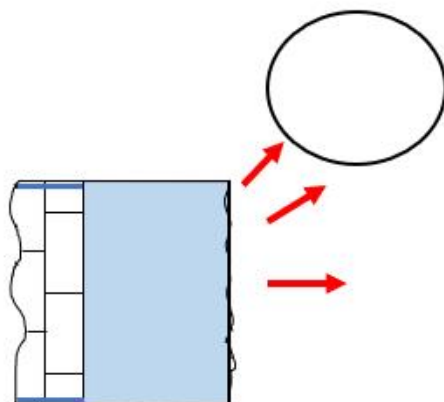


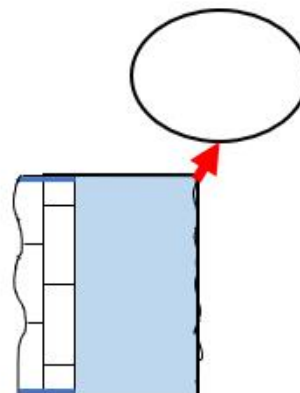
Figure 4. The relationship between the deformations of the existing tunnel and the positions of the shield machine

zone①と②の状態

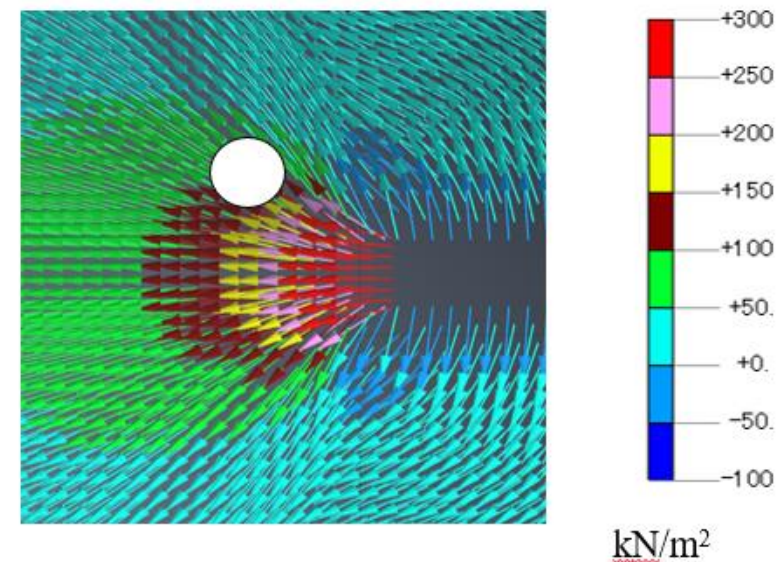
ZONE ①

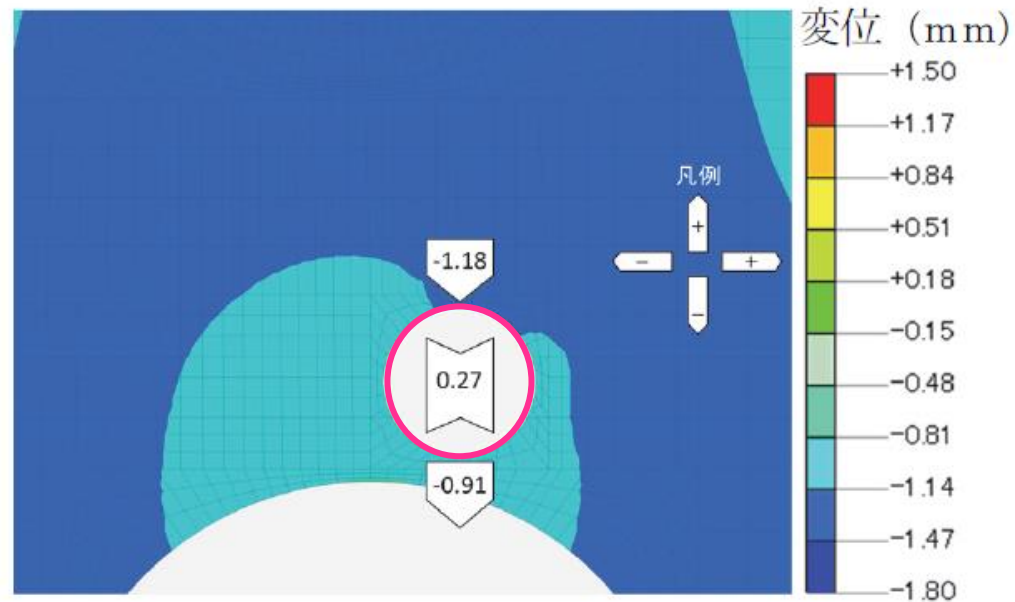


ZONE ②



Maximum principal stress vector
according to Mindlin's 2nd Analysis



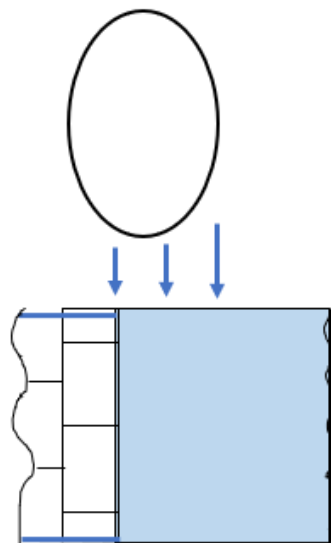


FEM 鉛直変位図 (step-2: 下段切羽到達)

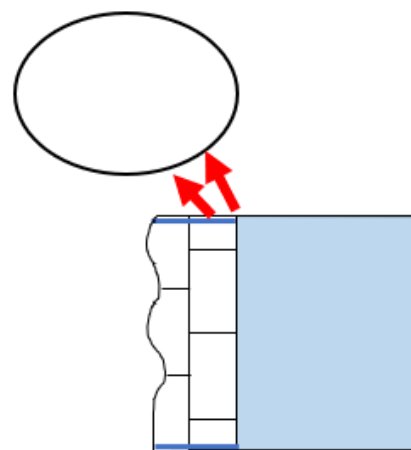
既設トンネル上部地盤は約 1.2 mm 鉛直方向に変位し、既設トンネル下部地盤は約 0.9 mm 変位した。つまり、その差 0.3 mm だけ既設トンネルは鉛直に収縮した。

The phenomena of the zone ③ and ④

ZONE ③



ZONE ④



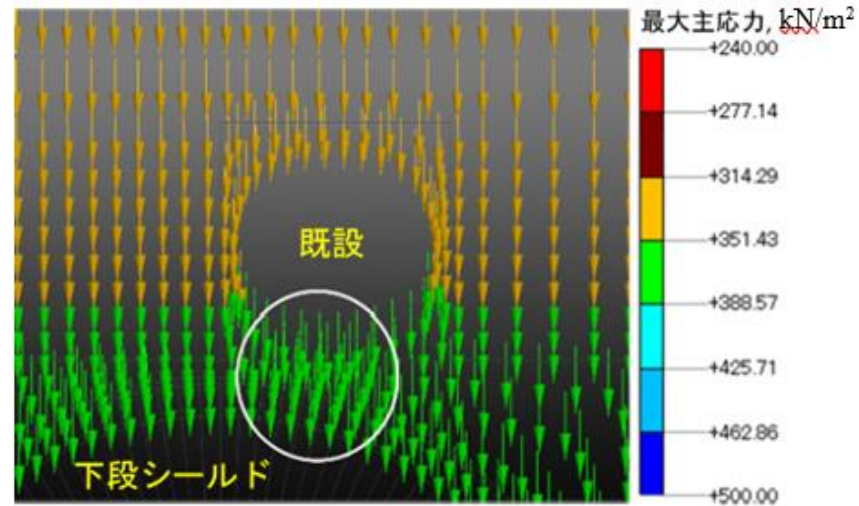
- The phenomena of zone ③ must be caused by the ground stress relief due to over-cutting and tail-void.
- The existing tunnel was flattened again by backfill mortar pressure to the tail-void in zone ④.

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

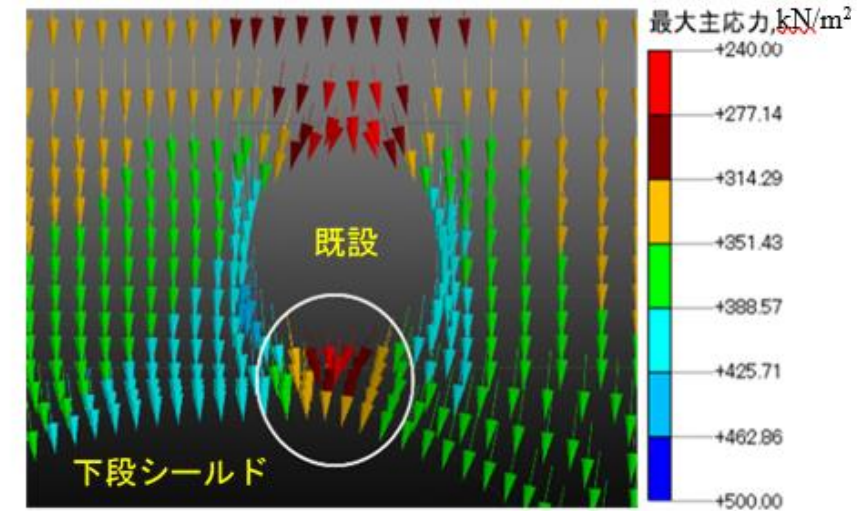
国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.3 計測結果と評価 (下部シールド)

15



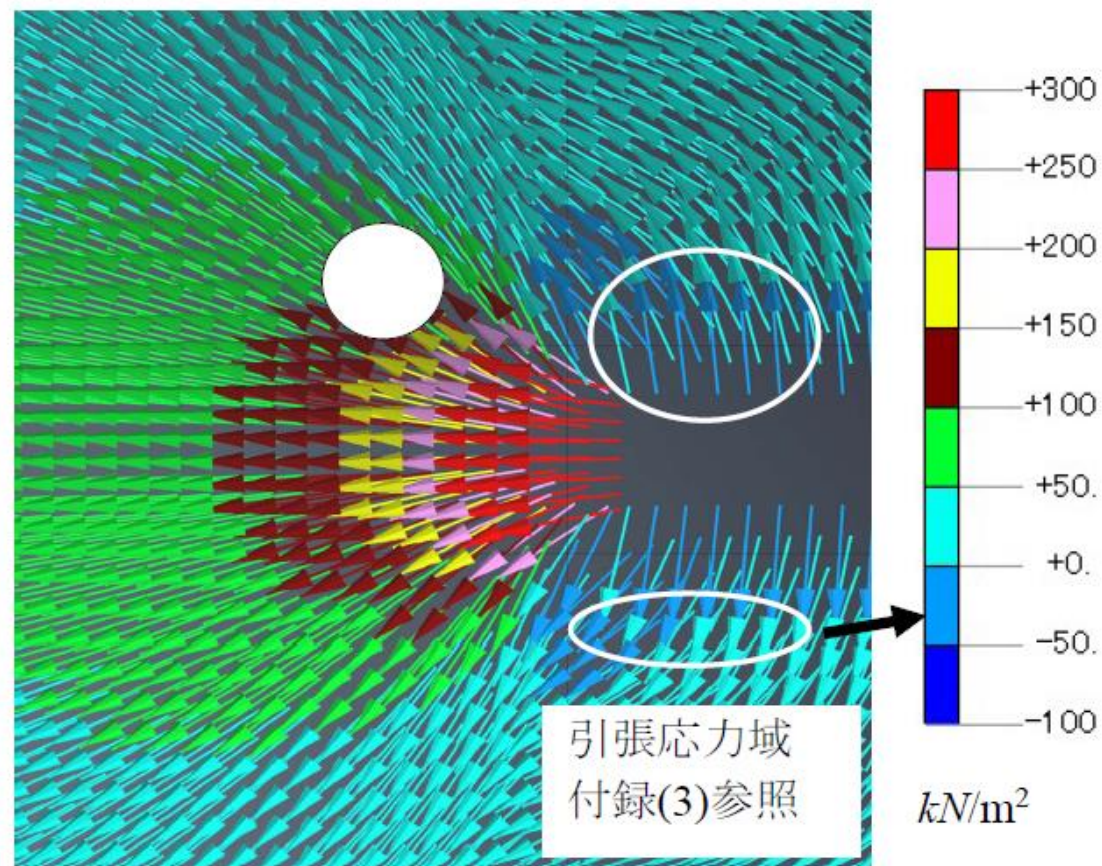
最大主応力ベクトル図初期状態 (step-0)



最大主応力ベクトル図 (step-2:下段切羽到達)

FEM逐次掘削解析から判明したこと②の状態

ZONE③の状態 (白楕円のエリアの応力減少域)



シールドガーター
部に応力低下発生
白楕円

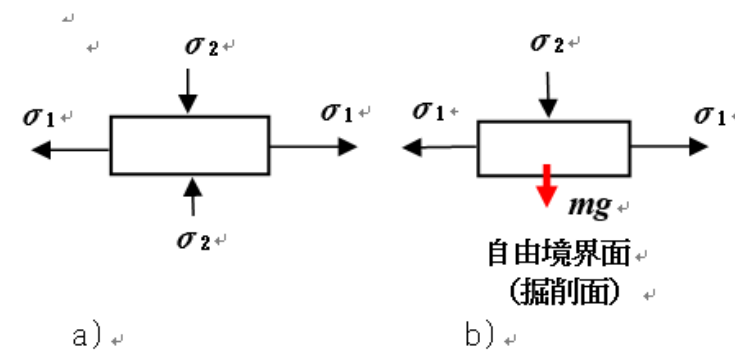
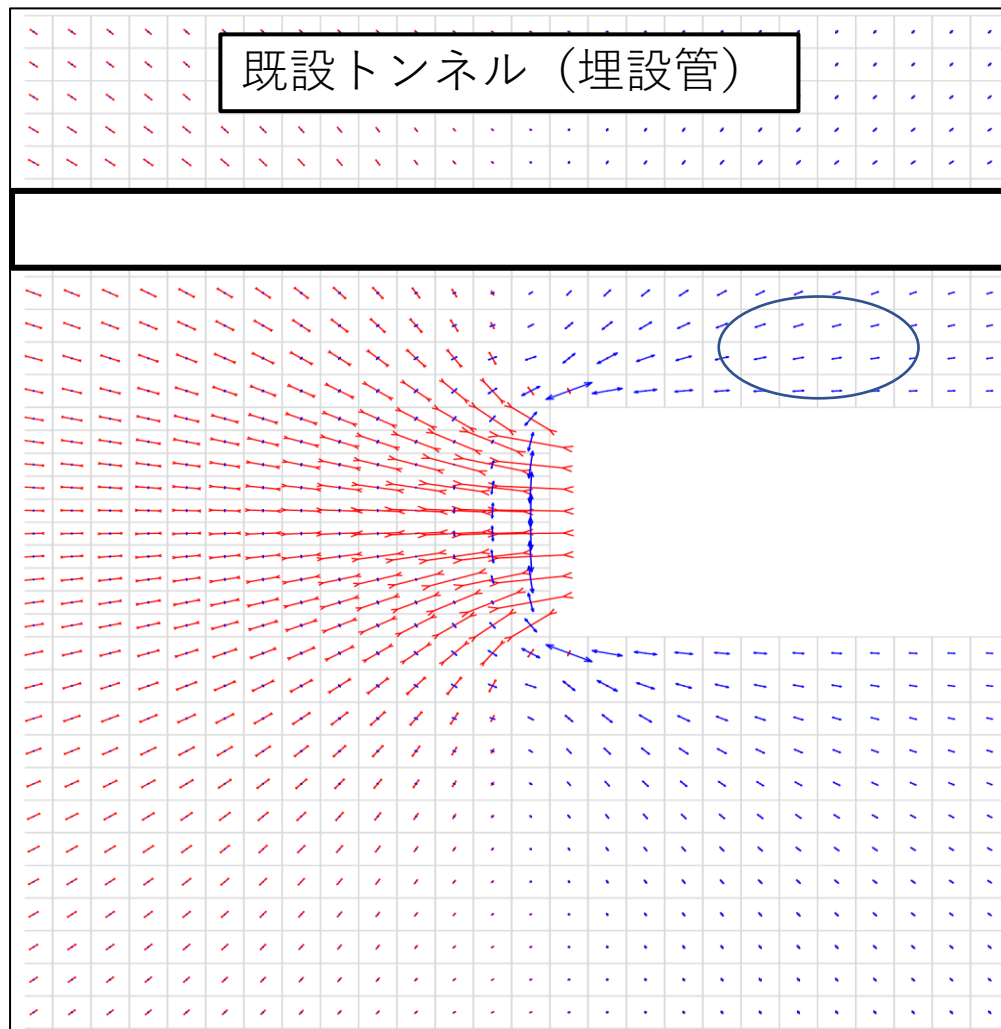
(楕円内は引張応力域, 白丸は既設トンネルを示す.)

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.3 計測結果と評価 (下部シールド)

17

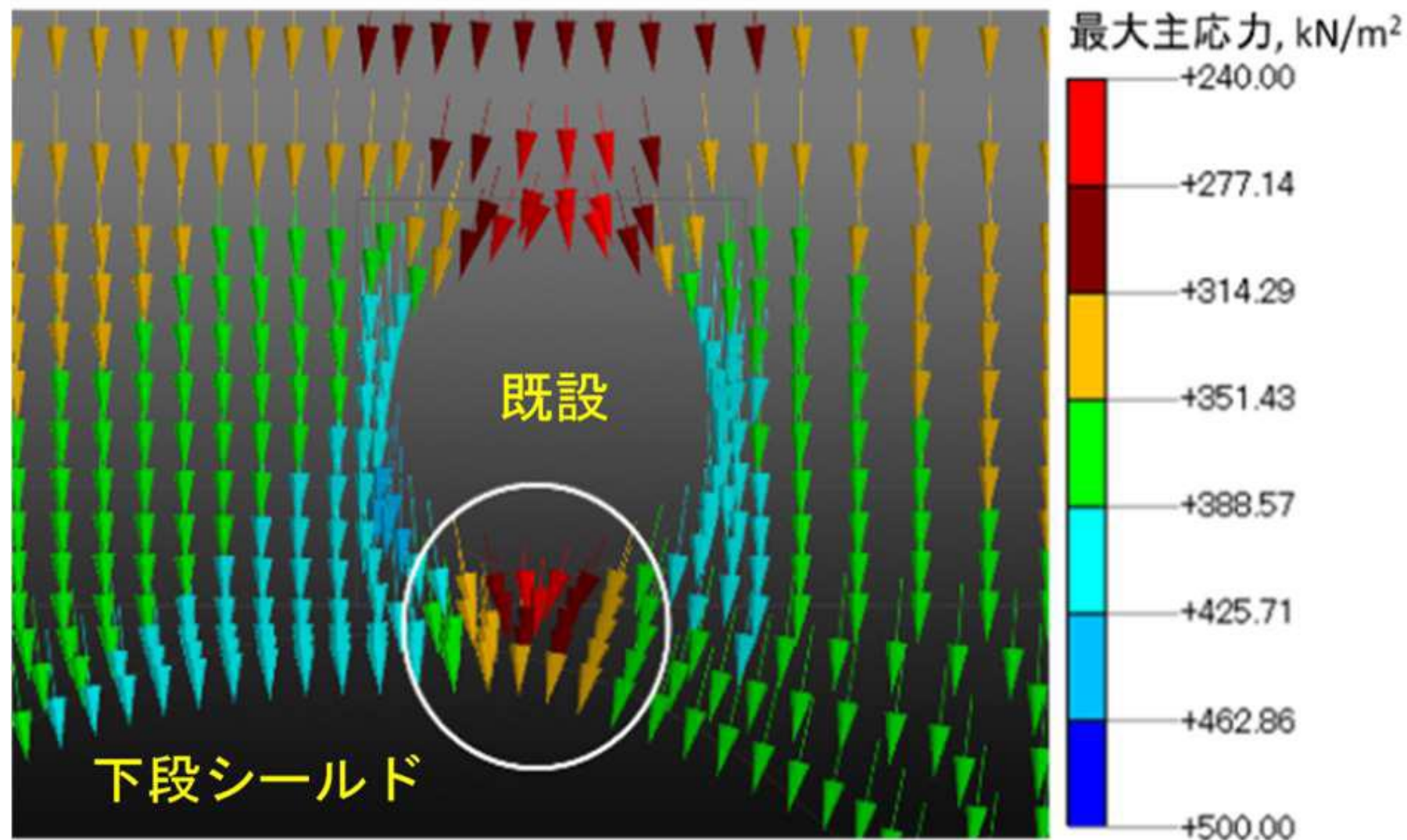


シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.3 計測結果と評価 (下部シールド)

18



シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法（その2）

国土舘大学 教授 堀地 紀行



Session.4

計測結果と評価（上部シールド）

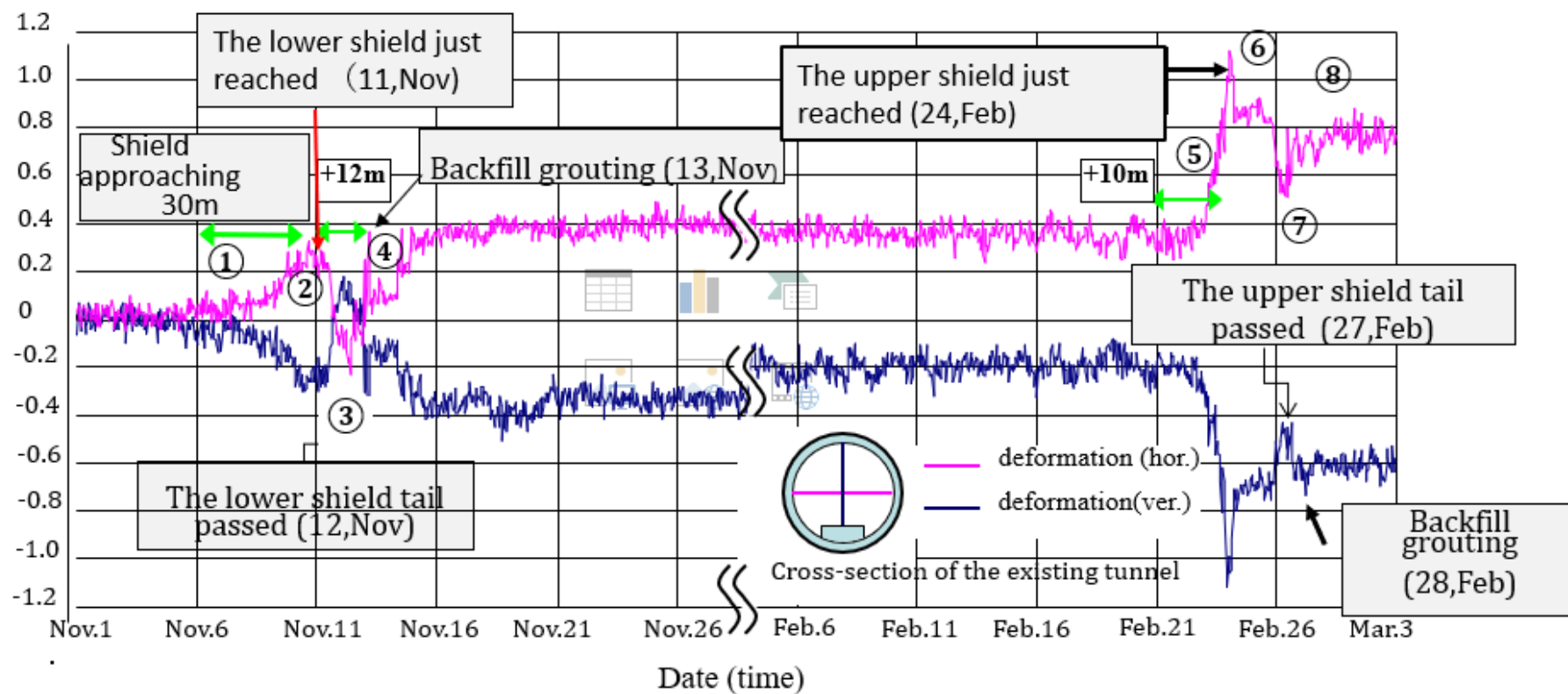
シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.4 計測結果と評価 (上部シールド)

20

既設トンネルと上部シールドの離間距離 4.9 m



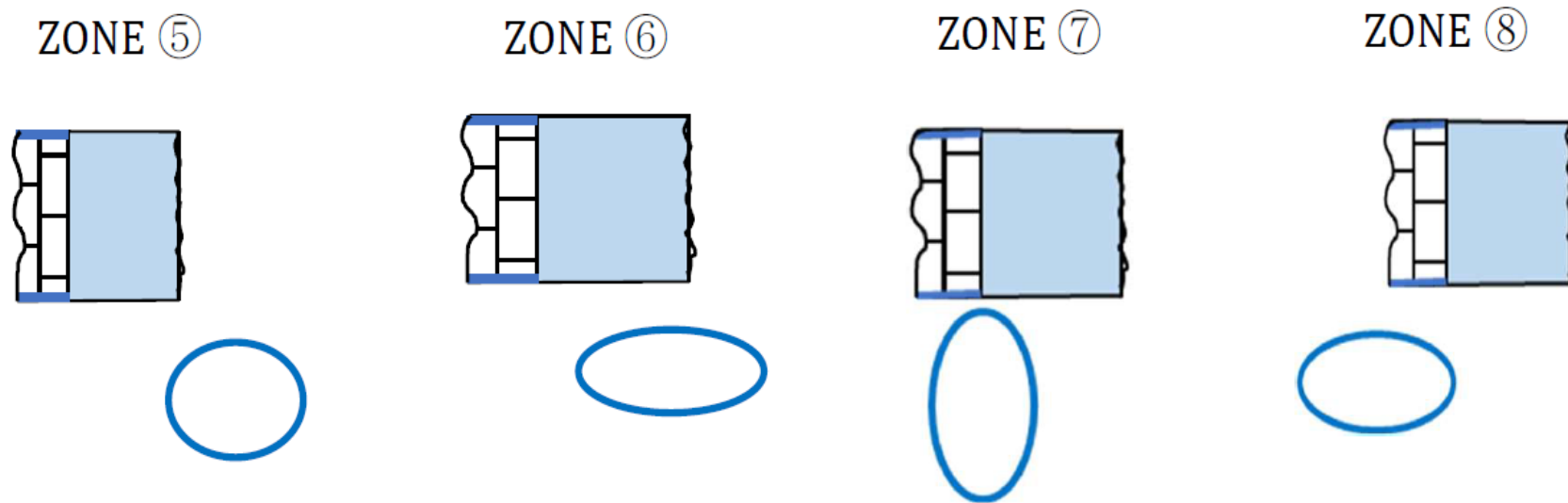


Figure 6. The relationship between the deformations of the existing tunnel and the positions of the shield machine

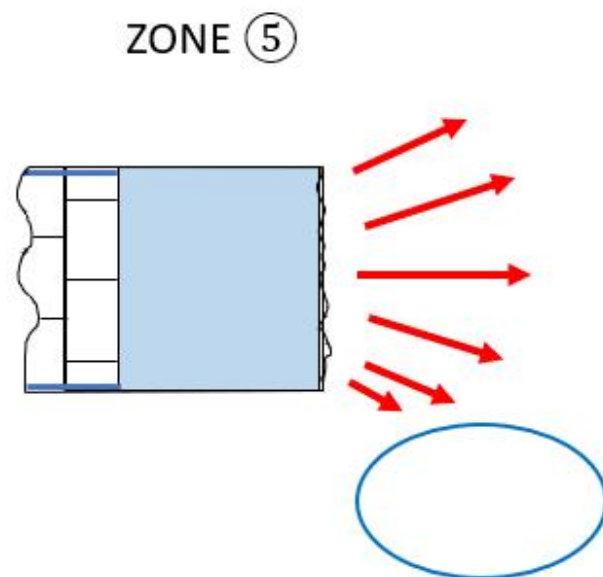
⑥の主な原因：シールド重量、特に重い先端部。カッターヘッド、隔壁、チャンバー内掘削土、駆動機器。

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

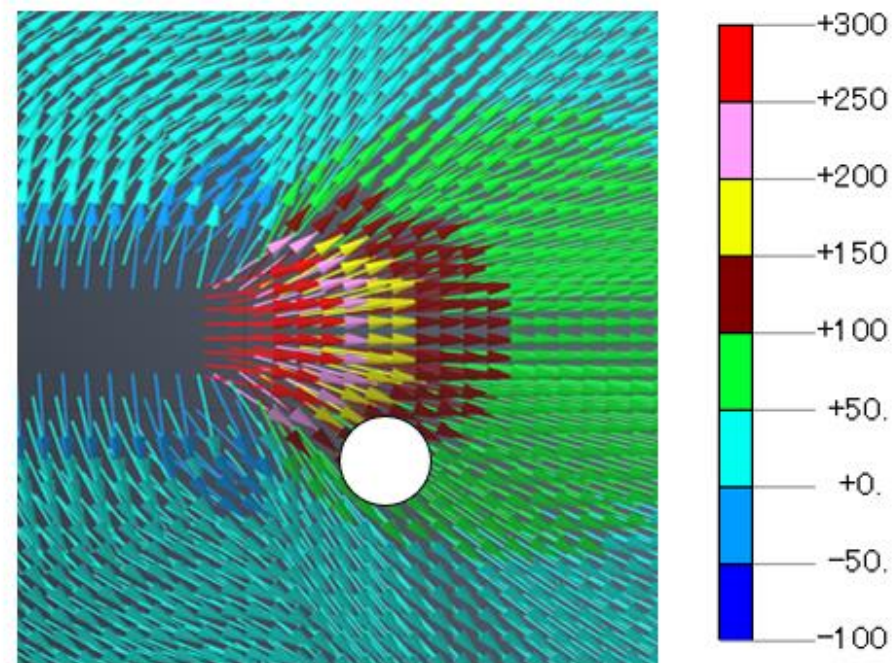
国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.4 計測結果と評価 (上部シールド)

22



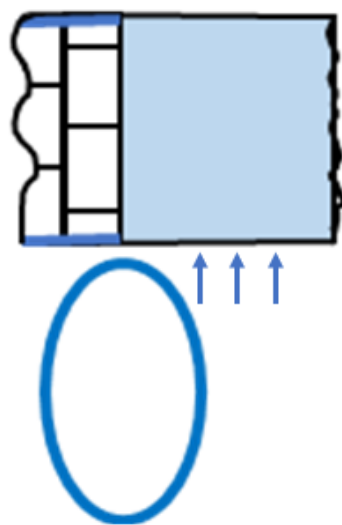
Maximum principal stress vector
according to Mindlin's 2nd Analysis



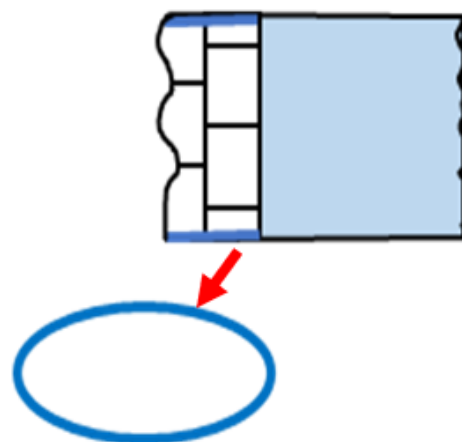
kN/m²

The phenomena of the zone ⑦ and ⑧

ZONE ⑦



ZONE ⑧



↑ ↑ : Stress relief

(The middle position of a shield machine is always lighter than the head of the machine.)

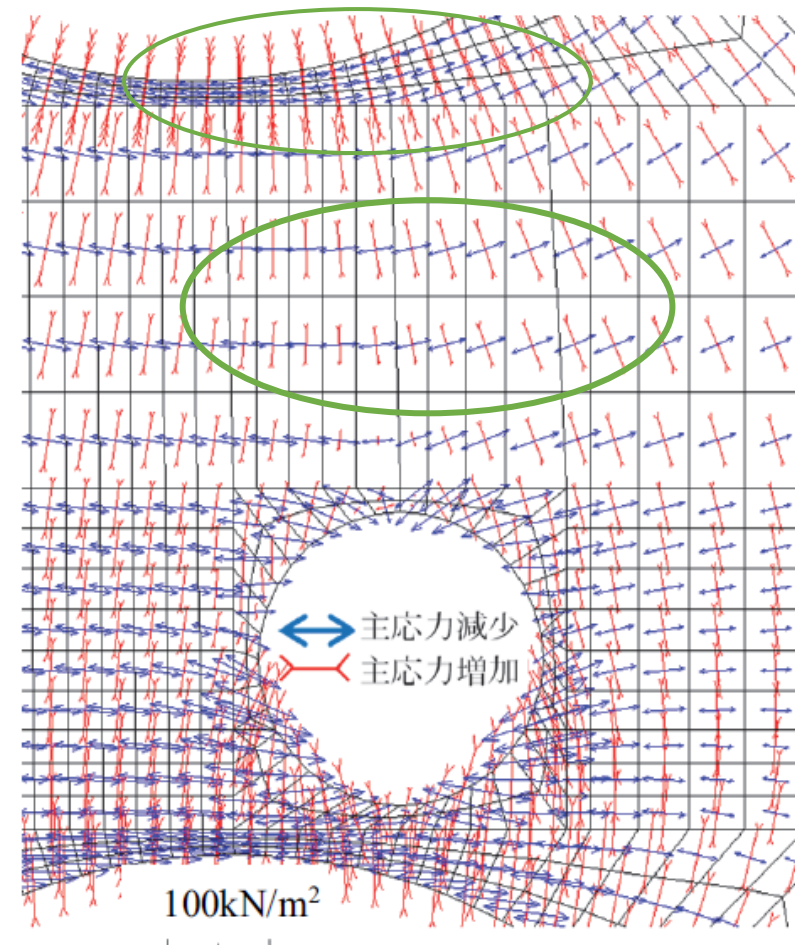
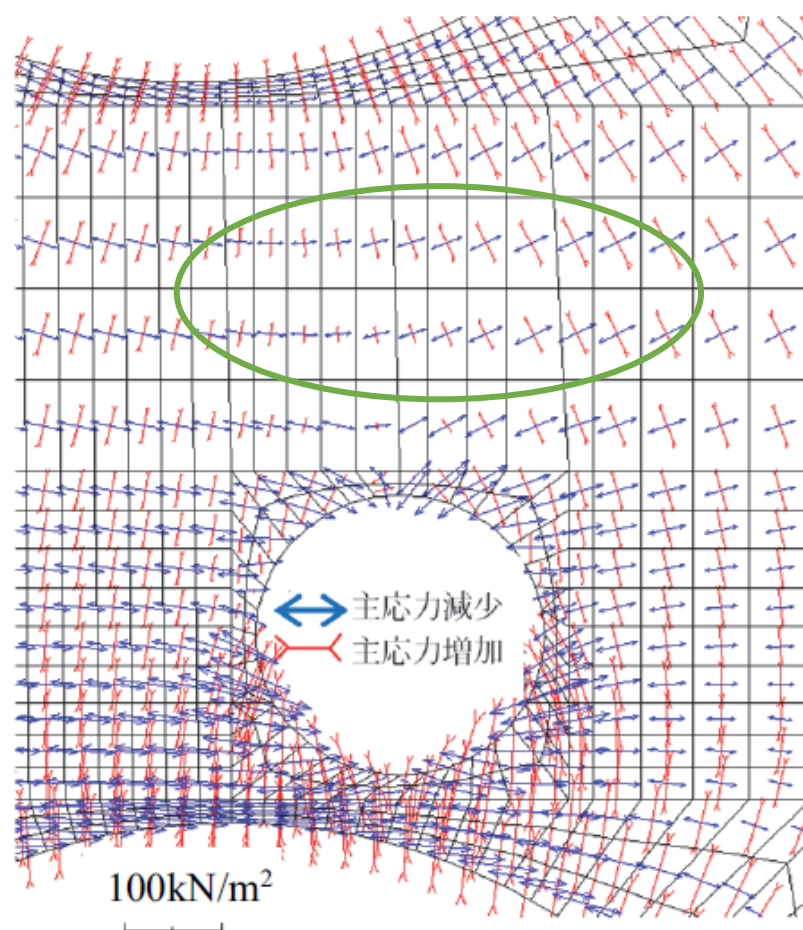
← : Backfill pressure

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.4 計測結果と評価 (上部シールド)

24



主応力増分ベクトル図 (step-7: 上段応力解放) 主応力増分ベクトル図 (step-8: 上段裏込め注入)

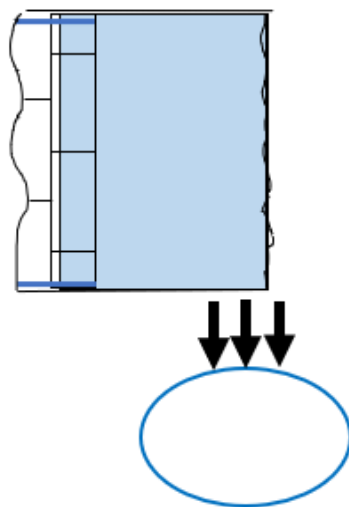
シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

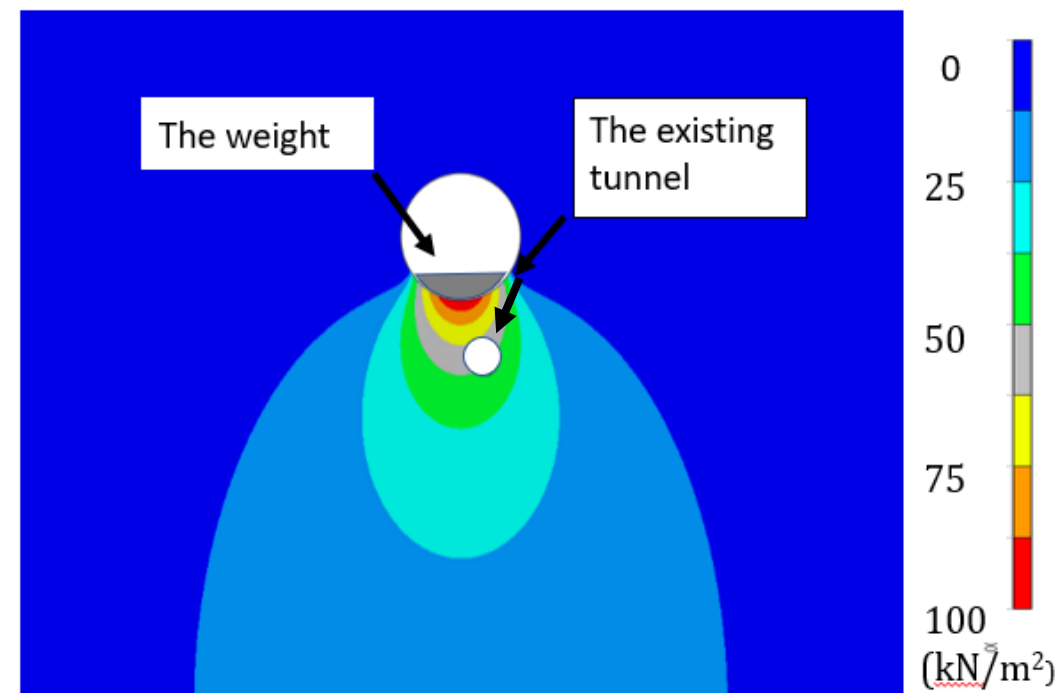
Session.4 計測結果と評価 (上部シールド)

25

ZONE ⑥



Boussinesq's solution applied for the
cross-section of the upper shield tunnel



シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法（その2）

国土舘大学 教授 堀地 紀行



Session.5

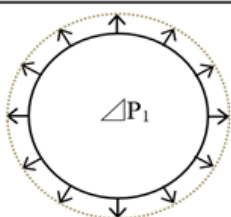
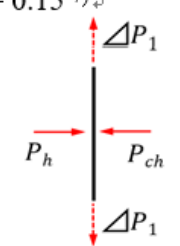
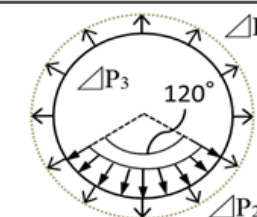
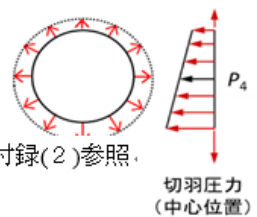
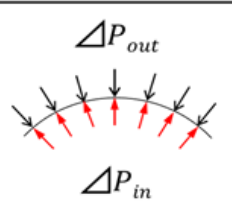
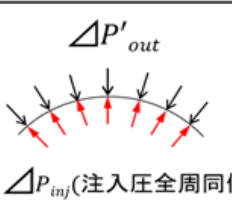
FEM逐次掘削解析

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.5 FEM逐次掘削解析

27

入力 Step	Step-1 切羽接近	Step-2 切羽到達	Step-3 テール応力解放 ²⁵⁾	Step-4 テール裏込注 ⁷⁾
入 力 状 況	 $\Delta P_1 = (P_{ch} - P_h) \times \alpha$ P_{ch} : 切羽圧力 (実測値) (中心位置) P_h : 切羽面の地山側圧 (中心位置) $\alpha = 0.15$ ⁷⁾ 	 ΔP_d : 泥水圧 ΔP_2 : マシン重量 ΔP_3 : 掘削土重量 チャンバー内の掘削土重量は泥水比重 1.3 と評価。地下水との比重差 0.3 と評価。 マシン重量: 2,000kN/m (底部に 120°の範囲で載荷) ※ マシン先端部は鋼材の水中重量を適用。 チャンバー内は浮力考慮なし (カッターのスリット通水のため)  付録(2)参照 切羽圧力 (中心位置) 泥水圧: 静水圧的分布を考慮 泥水比重を適用 荷重・泥水圧: 3次元応力状態の2次元応力状態への補正值 75% を適用	 ΔP_{out} ΔP_{in} テール天端付近の概念図全周同様の考え方 応力解放率 α : 20%²⁵⁾ ΔP_{out} : Step2・Step6 終了後の地山応力 ΔP_{in} : 泥水圧(上段・下段) $(\Delta P_{out} - \Delta P_{in}) \times 20\%$ 泥水圧は静水圧的分布を考慮。泥水比重 1.3 適用。 分布図は左 Step2 の図と同様。 テール部に泥水が回ると仮定。	 $\Delta P'_{out}$ ΔP_{inj} (注入圧全周同値) テール天端付近の概念図は全周同様の考え方。 $\Delta P'_{out}$: Step3・Step7 終了後の地山応力 ΔP_{inj} : 裏込注入圧 (上段・下段) 荷重・泥水圧: 3次元応力状態の2次元応力状態への補正值 75% を適用 (75%⁷⁾) セグメント重量: 284.9kN/m (底部に 120°の範囲で載荷) ※ トンネル(セグメントリング)に作用する浮力を考慮。

国士舘大学 教授
堀地 紀行



シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.5 FEM逐次掘削解析

29

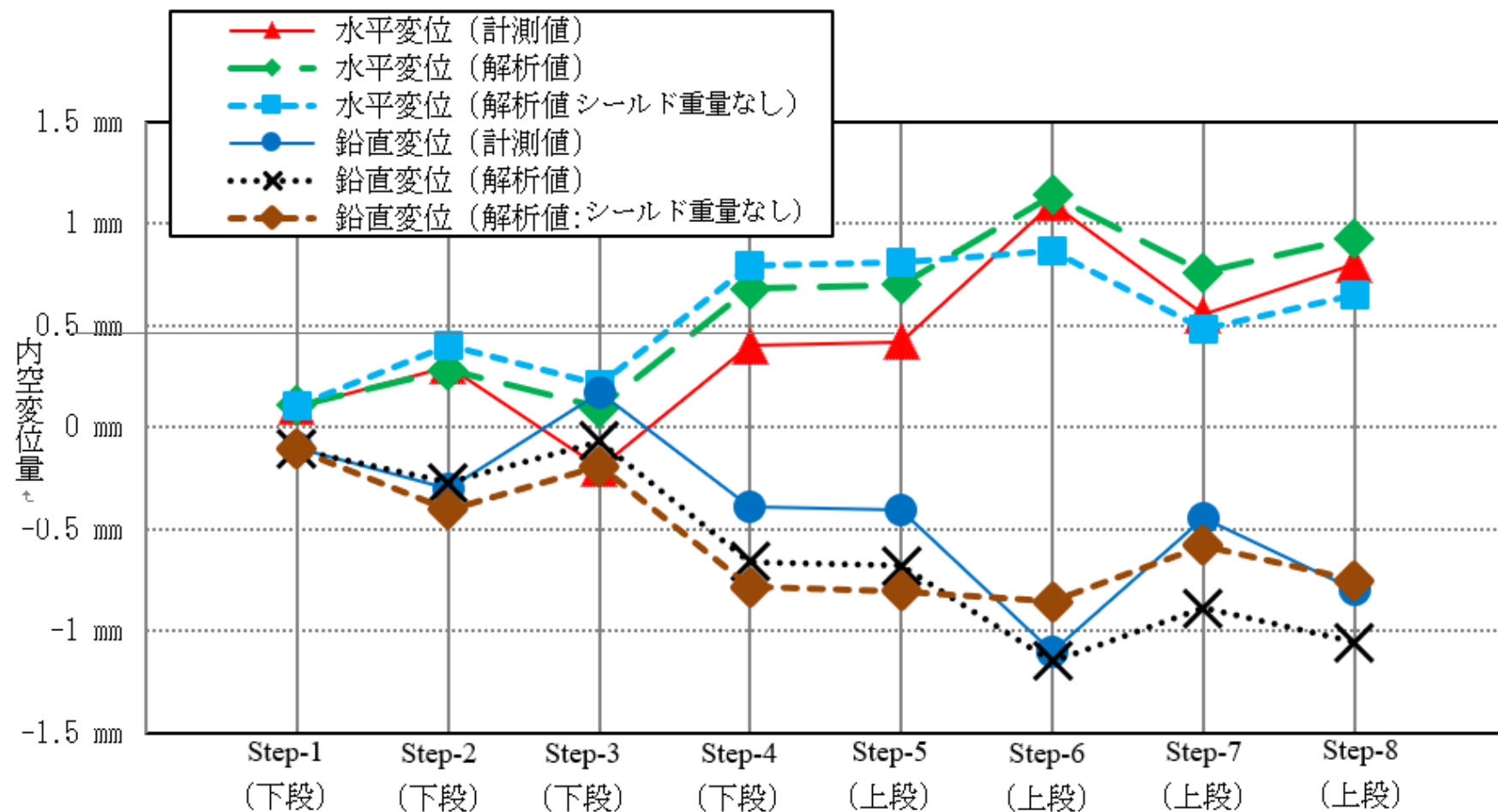
ノ 点	深度 (m)	N 値	ν:ポア ソン比	γ:湿潤 重量 (kN/m^3)	E:弾性係数(kN/m^2)	
					E_b :坑内水 平載荷試験	$4E_b$ 又は 2800N
Lm	-3.41	8	0.45	13.1	—	22,400
Lc1	-6.26	8	0.45	13.2	—	22,400
Lc2	-11.21	8	0.45	14.7	—	22,400
Tos1	-14.31	21	0.35	18.3	13,141	52,564
Toc1	-16.56	10	0.40	18.7	—	28,000
Tos2	-17.91	21	0.35	17.9	13,141	52,564
Toc2	-22.16	10	0.40	18.4	—	28,000
Tos3	-23.66	21	0.35	18.8	18,041	72,164
Tog	-28.98	120	0.30	18.6	206,780	827,210
Ks1	-42.81	100	0.30	18.7	72,343	289,372
Ks2	-50.03	100	0.35	18.7	—	280,000
Kc	-60.06	130	0.30	18.1	—	364,000

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

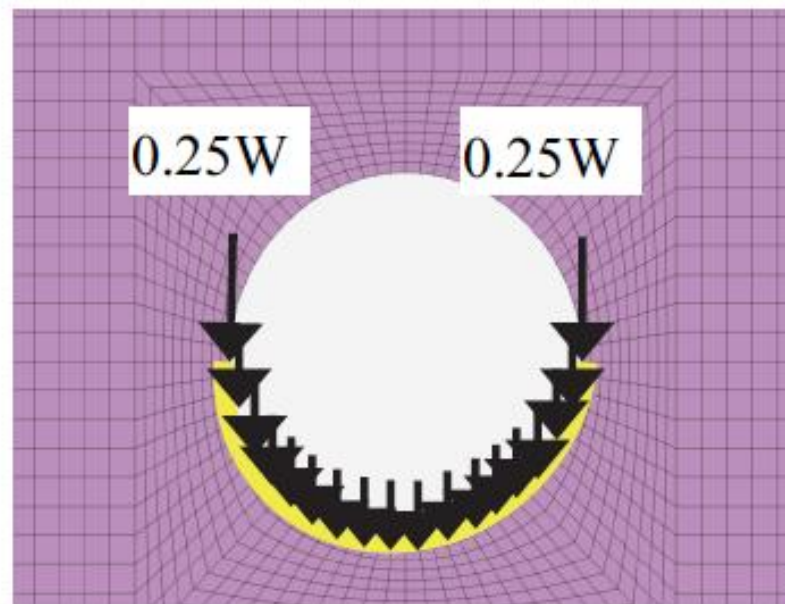
国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.5 FEM逐次掘削解析

30



簡易FEM解析に適用したシールド先端部重量（含むチャンバー泥土荷重）の概念図（地盤により载荷範囲を縮小すべき）



ここで $p = 490 \text{ kN}/20 \text{ m} = 24.5 \text{ kN/m}$, 20 m: 半円周相当

シールド重量の荷重入力状況 (FEM)

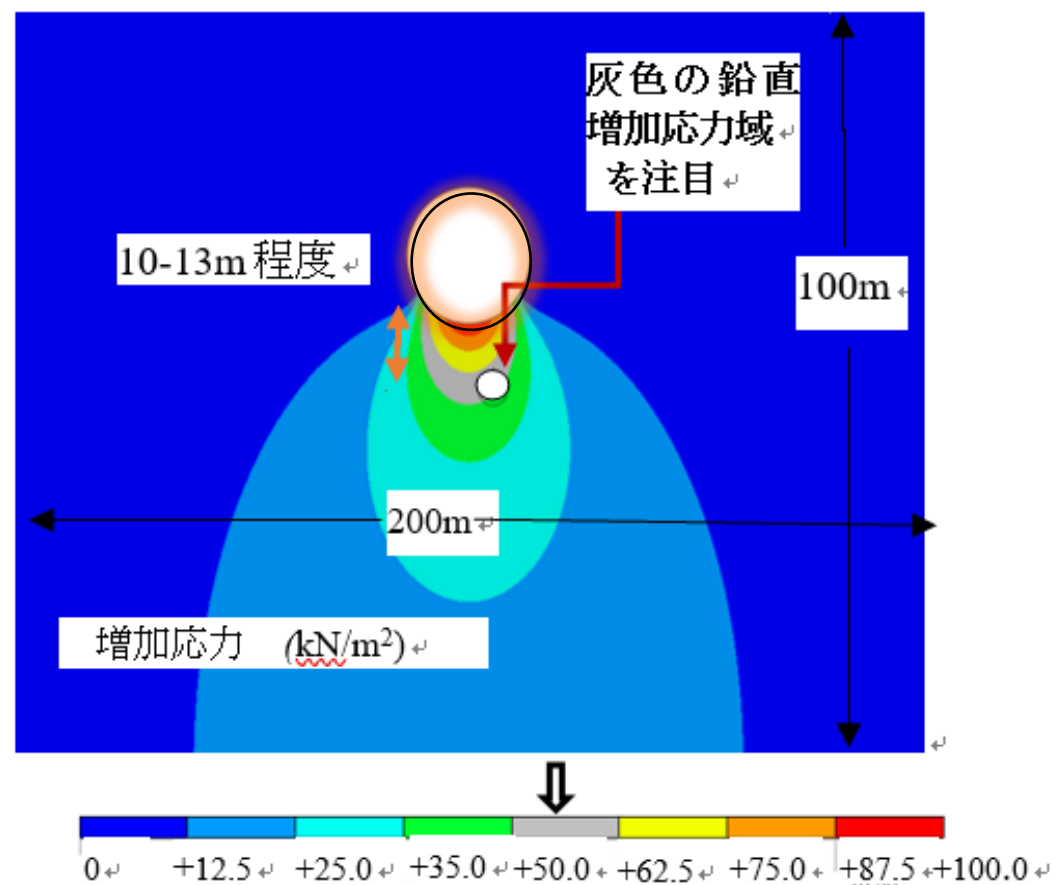
シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.5 FEM逐次掘削解析

32

上部に大断面シールドが掘削される場合の検討事項：シールドマシン先端部面板とチャンバー内掘削土の重量による上載荷重（土被り換算で3 m）増加の影響



シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法（その2）

国土舘大学 教授 堀地 紀行



Session.6

まとめ

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.6 まとめ

34

(1) 今回の講演では、既設のシールドトンネルに対して、上下に外径 13 mの大断面シールドが施工された際の既設トンネルの内空変位の計測結果について解説し、既設トンネルの変位挙動を再現し、今後の予測解析手法となるFEM逐次掘削解析の各段階での入力状況を示しました。

(2) 初めに施工された下段シールド施工では、上部の既設トンネルは下段シールドの切羽圧と裏込め圧の影響を受け、その影響はしばらく続いた。

(3) 上段シールド施工では、切羽到達時に既設トンネルでは、面板とチャンバー内泥土を含めたシールド先頭部の大きな重量が作用し、最大値となる内空変位が発生した。

こうした現象は、土木学会標準仕方書では「その影響は比較的小さい」と記述されていた事項であり、都市高速道路のランプ部などでは、中・小口径のトンネルや管路を上越し（オーバーパス）する事例も想定され、十分配慮すべき点と考えます。

前回の講演では、左右併設、下部通過（アンダーパス）をテーマに計測結果と既設トンネルの構造検討手法について説明しました。

今回の講演では、既設トンネルを挟んで施工された上下併設の大断面シールド施工が既設トンネルに与える影響について計測結果を通して説明し、FEM逐次掘削解析によりその事象の再現を図り、良い整合性を得ました。FEMは言うまでもなくトンネル地盤解析においても、強力なツールとなります。

2回の講演を通じて、左右・上下・下部通過・上越しの各事例が紹介できたと考えていますが、現場計測値はあくまで各現場の地質や個別の施工状況に依存し、他の事例も併せて、設計施工等の業務の参考にさせていただければ幸いです。

次ページに今回の講演の参考文献を記載しておきます。

シールドトンネルの 近接・併設の影響と 設計検討手法(その2)

国土舘大学 教授
堀地 紀行

Session.6 まとめ（参考文献）

35

奥要治,土橋浩,堀地紀行,長屋淳一,張升翼,小泉淳：上下併設の大断面シールドが既設トンネルに与える影響, 土木学会論文集C（地圏工学）,Vol.78,No.4,261-276,2022.

シールドトンネルの近接・併設の影響と設計検討手法（その2）

国土舘大学 教授 堀地 紀行



**ご清聴
ありがとうございました**