

—PLAXIS+t<sub>ij</sub> モデルによる解析と遠心力載荷実験—

## 2 面切土された地形における逆T基礎の地盤 支持力に関する解析検討

■ t<sub>ij</sub>地盤解析研究所

中井照夫

■ 大日本土木（株）

中谷 登

■ （株）地域 地盤 環境 研究所

誉田孝宏

劉 適剣

■ 東京電力（株）

岡 滋晃, 中島 陽

服部洋子, 木村健太郎

寺中吉輝

■ 前田建設工業（株）

丸山憲治

■ 東電設計（株）

高橋秀明, 鈴木康代

# 報告内容

## I. 検討の背景と目的

- a. 送電用鉄塔基礎周辺の地形改変
- b. 直接基礎の安定性へ及ぼす影響評価

## II. 2面を切土された砂地盤の直接基礎圧縮支持力の遠心載荷実験

- a. 砂地盤の遠心載荷実験の概要
- b. 2面を切土された砂地盤の圧縮支持力の低減
- c. 2面を切土された砂地盤の直接基礎直下のすべり面

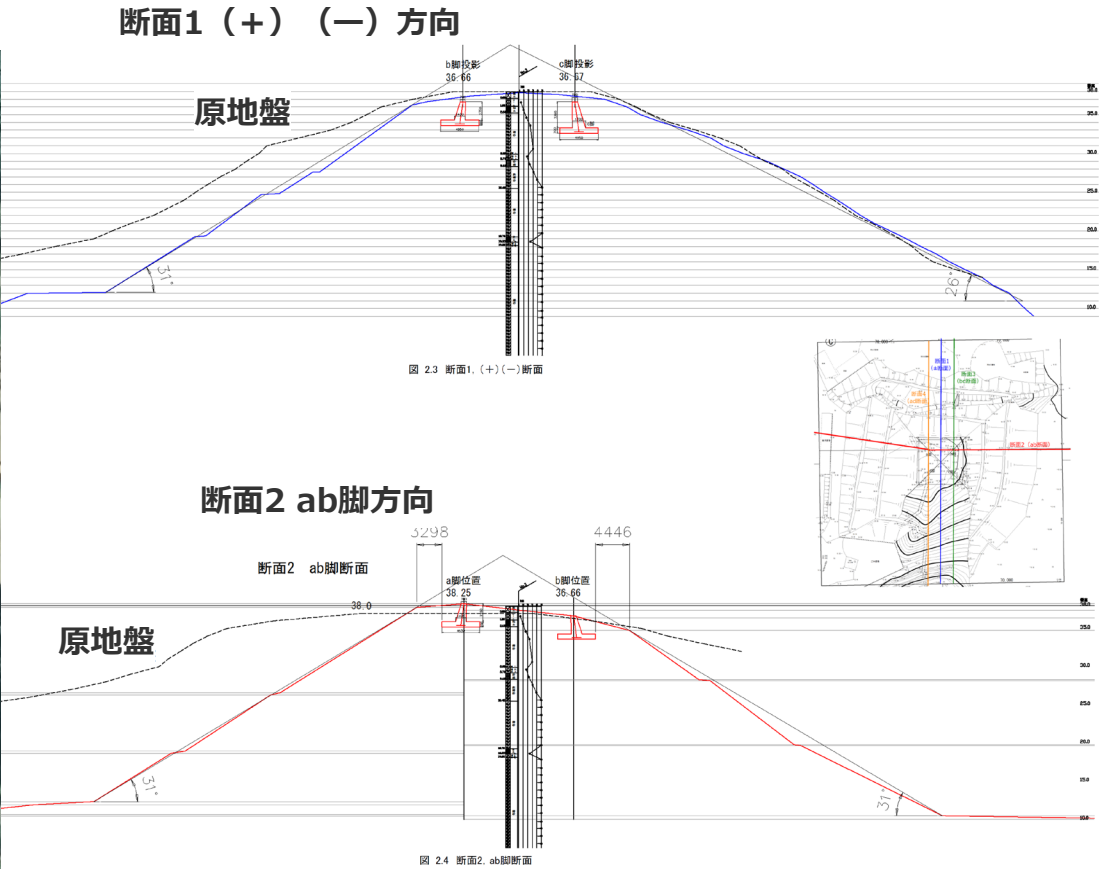
## III. PLAXIS+t<sub>ij</sub>の遠心載荷実験のシミュレーション

- a. 豊浦砂のSubloading t<sub>ij</sub> modelのパラメータ解析パラメータの設定
- b. 砂のせん断抵抗角の拘束圧依存性解析結果
- c. 遠心載荷実験とPLAXIS+t<sub>ij</sub>解析の比較

## IV. まとめ

- a. 切土地形の直接基礎の支持力低下
- b. 今後の課題

# 送電用鉄塔の基礎周辺の地形改変(1)



## I3地点の切土改変

砂利採取のために、鉄塔の周辺地盤を切土掘削され、ピラミッド状の地形に改変された状況

## 送電用鉄塔の基礎周辺の地形改変(2)





# 切土斜面上に位置する逆T基礎の圧縮支持力低減の評価

## 極限圧縮支持力度

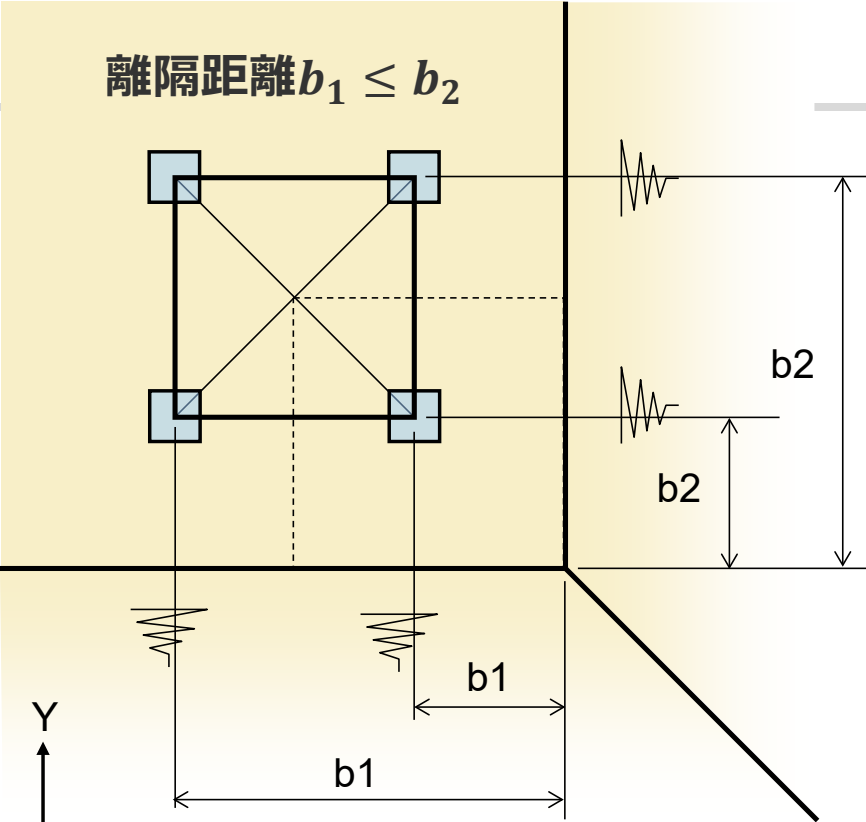
平坦地盤： $q_0 = i_c \cdot \alpha \cdot c \cdot N_c + i_\gamma \cdot \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot N_\gamma + i_q \cdot \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q$

切土斜面： $q(b_1, b_2) = \xi(b_1, b_2) \cdot q_0$

### 低減係数（離隔距離）

1.遠心模型実験

2.有限要素法（PLAXIS 3D）



| Case3:平坦   | Case4: 1 面切土<br>(b1=0)   | Case5: 2 面切土<br>(b1=0, b2=0)  | Case6: 2 面切土<br>(b1=0, B2=3B)   |
|--|--|---|---|
|  |  |  |  |

# 遠心載荷実験の概要

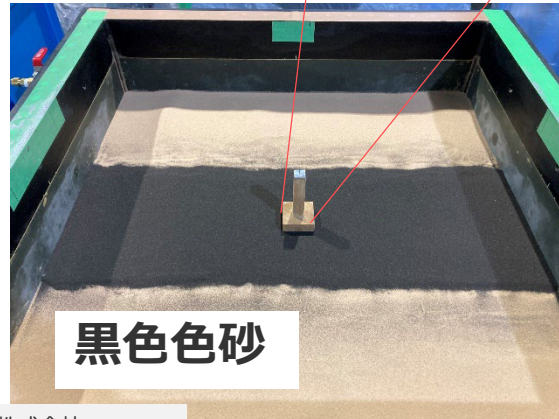
## □ 遠心載荷実験

- ・ 遠心加速度 40G
- ・ 砂地盤（豊浦砂，相対密度84%）

サンドホッパーによる  
地盤作成



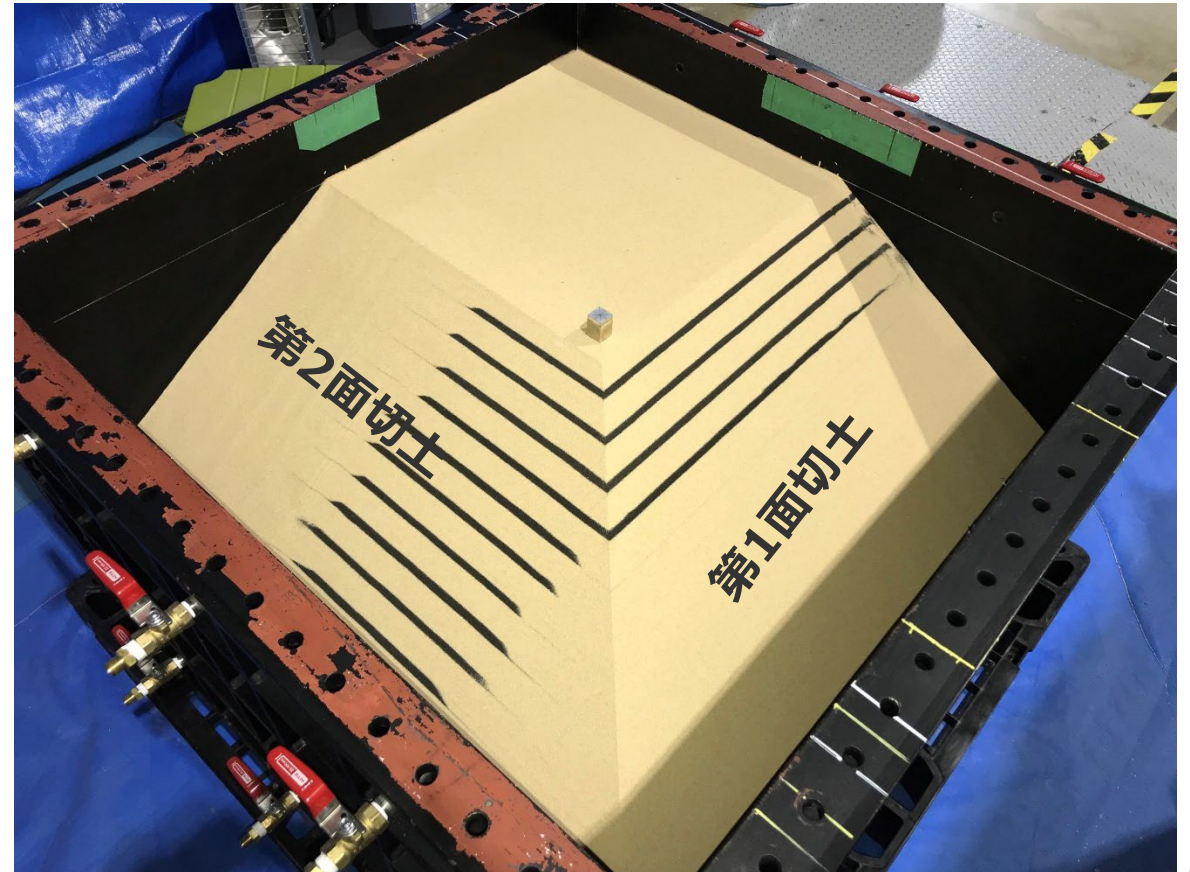
模型試験体  
(アルミ製)  
表面砂貼付



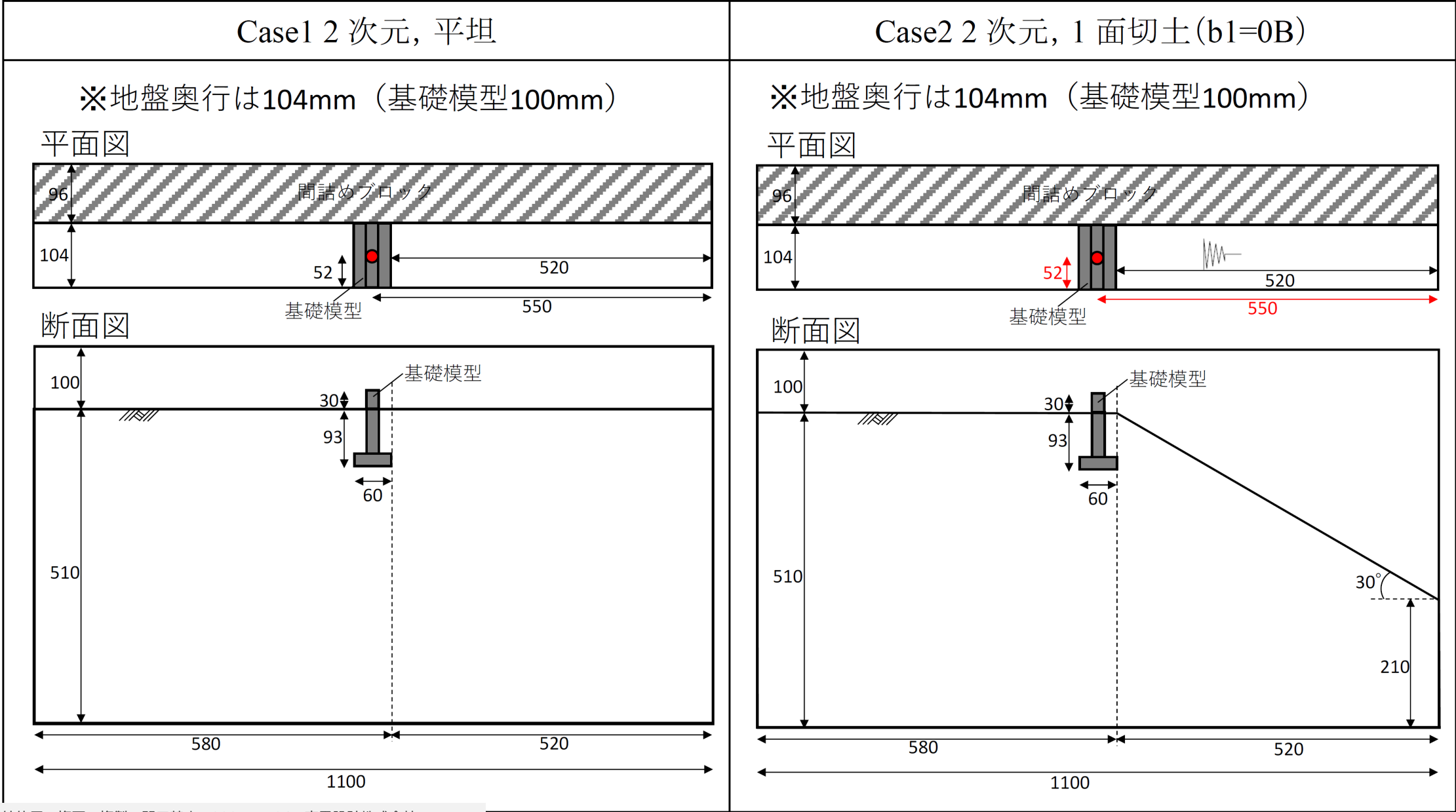
黒色色砂

## □ 室内試験（拘束圧 $60\text{kN/m}^2 \sim 6000\text{kN/m}^2$ ）

- ・ CD条件三軸圧縮試験
- ・ 等方圧密・除荷試験

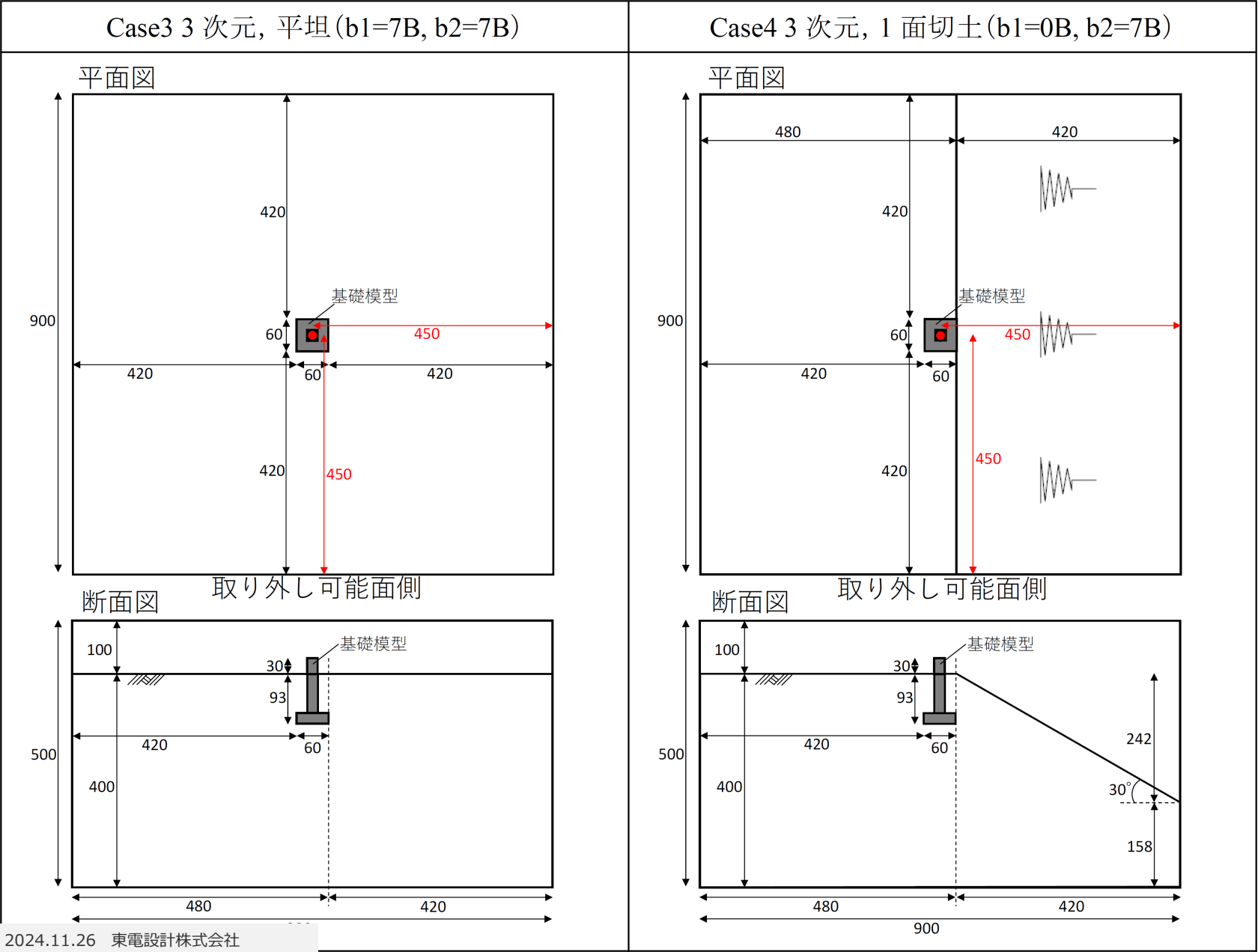


# 2次元平面ひずみ基礎の遠心载荷試験（平坦と1面切土の30度斜面）



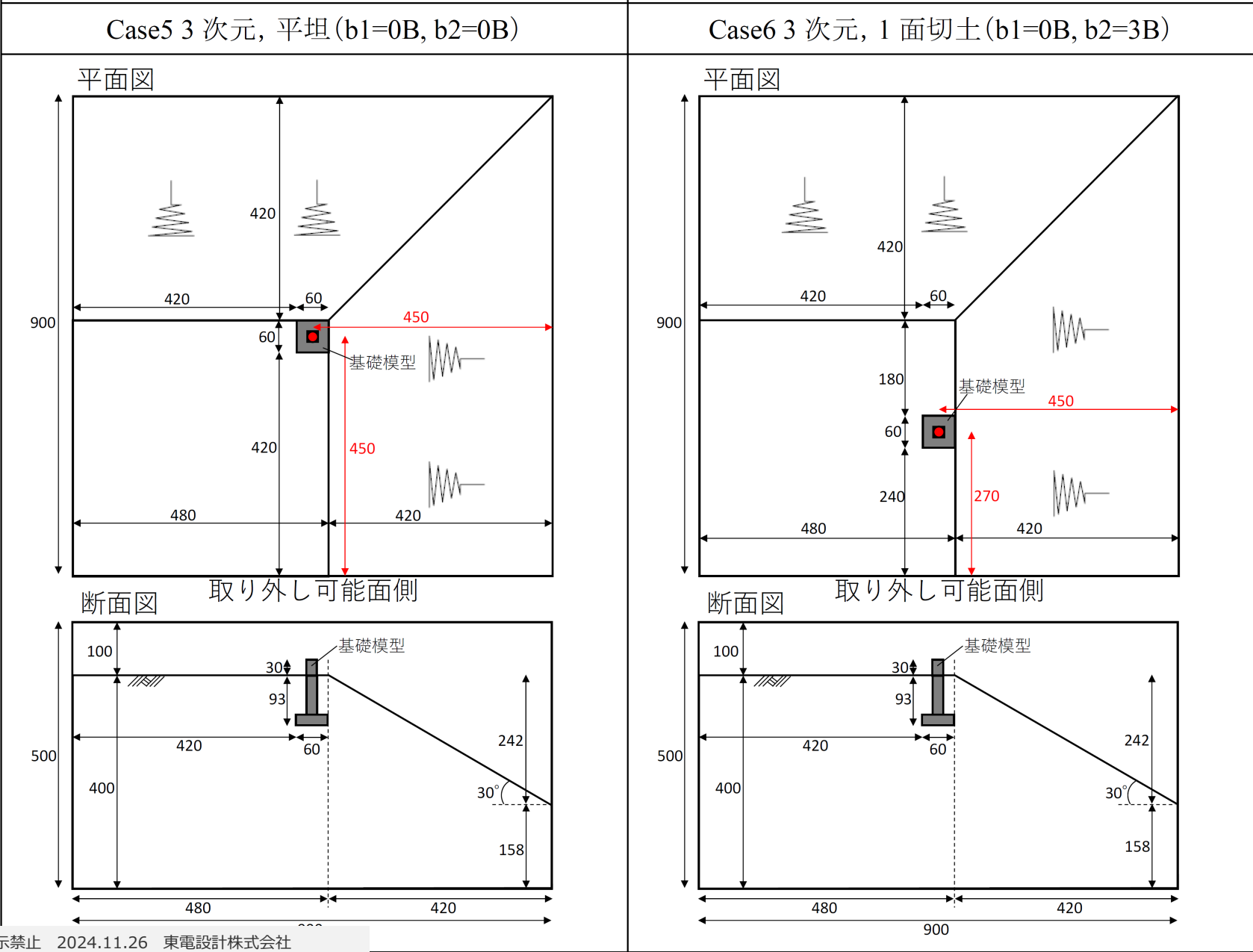


# 3次元基礎の遠心載荷試験（平坦と1面切土30度斜面）



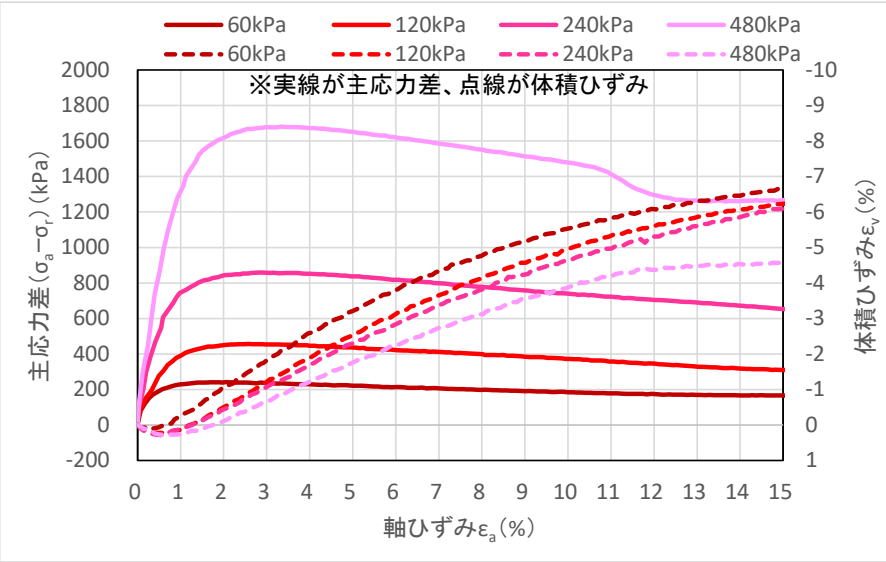


# 3次元基礎の遠心載荷試験（2面切土30度斜面，基礎位置の差）

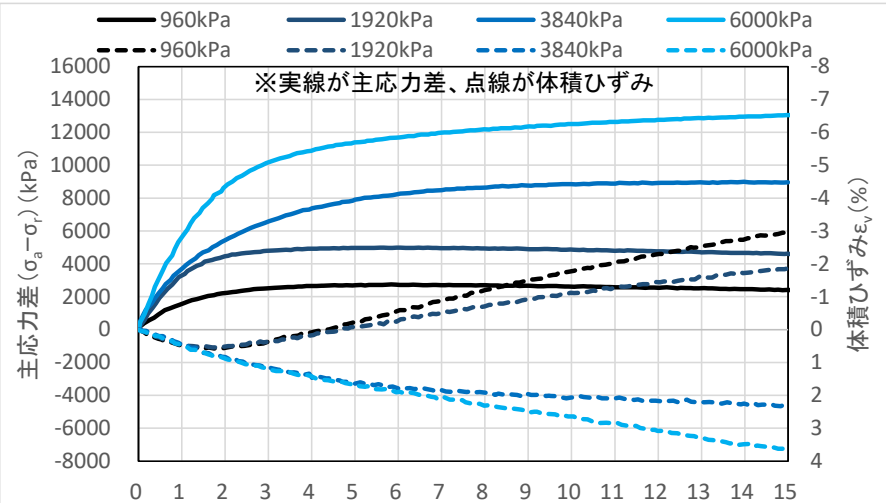


# 豊浦砂のCD条件三軸圧縮試験結果とせん断抵抗角

## □ 拘束圧60kN/m<sup>2</sup>～480kN/m<sup>2</sup>)



## □ 拘束圧(960kN/m<sup>2</sup>～6,000kN/m<sup>2</sup>)



## □ 拘束圧と最大せん断強さの関係

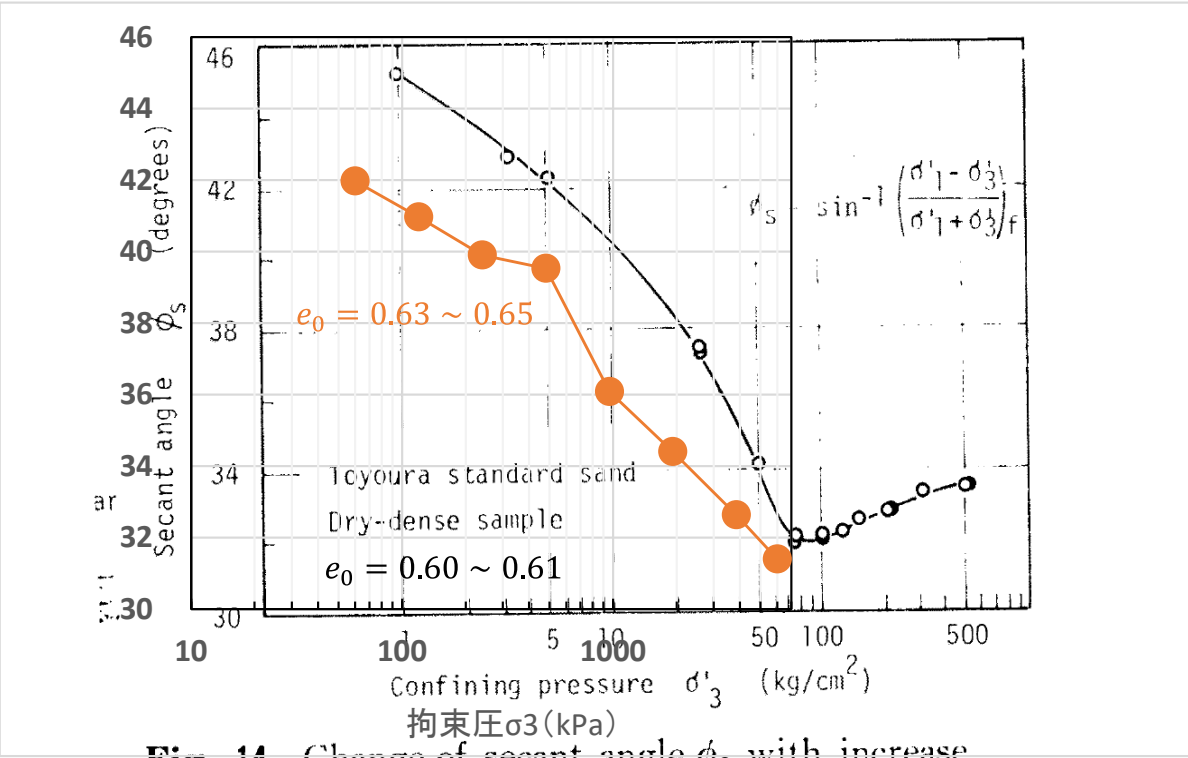


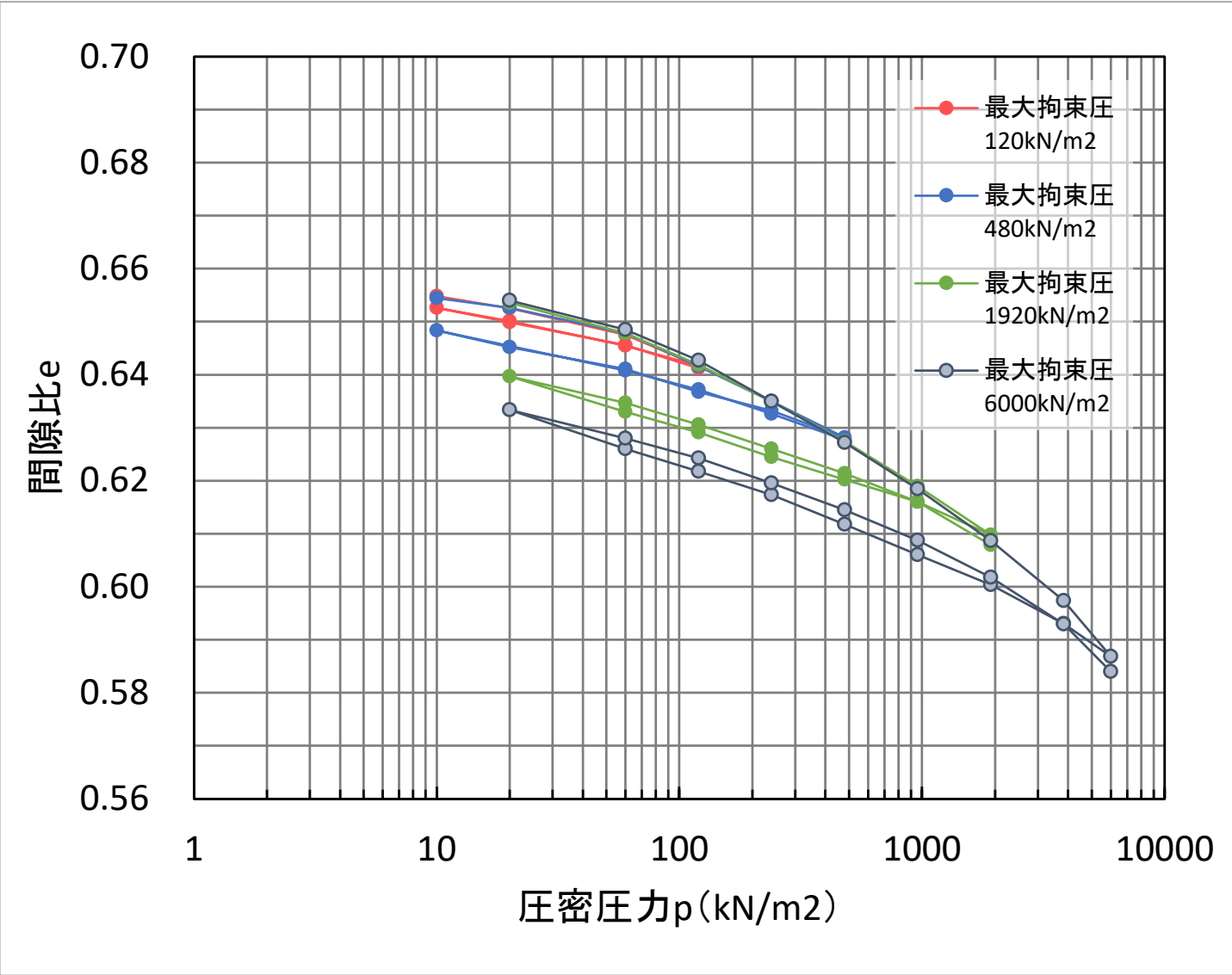
Fig. 14 Change of secant angle  $\phi_s$  with increase of confining pressure  $\sigma'_3$  in drained tri-axial compression test.

三浦哲彦, 山内豊聡; 砂のせん断特性に及ぼす粒子破碎の影響, 土木学会論文報告集 第260号, 1977年4月

### 基礎直下の拘束圧の上昇の影響

圧縮応力による拘束圧の増加が砂のせん断変形とせん断強度に及ぼす影響を数値解析に取り入れる必要がある.

# 豊浦砂の圧密・除荷試験



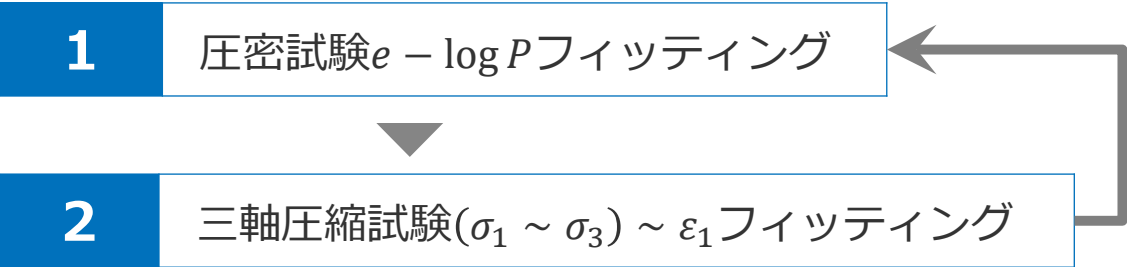
# 豊浦砂のsubloading $t_{ij}$ 構成モデルのパラメータ設定

## Subloaing $t_{ij}$ 構成モデルの特徴

- ① 中間主応力が変形・強度に及ぼす影響
- ② ひずみ増分方向に及ぼす応力増分方向の影響
- ③ 正・負ダイレイタンシー特性
- ④ 変形・強度に及ぼす密度や拘束応力の影響
- ⑤ 繰返し载荷による影響
- ⑥ 堆積過程で生じる固有異方性
- ⑦ 自然堆積粘土等に見られる構造の発達した土の挙動
- ⑧ 粘土と砂を統一した地盤パラメータで表現

砂質土の正規圧密状態NCLの設定が強く関係するため、  
以下を考慮してトライアンドエラーを実施

- ・ 高拘束圧下の砂質土の正規圧密線NCL
- ・ 20ケース程度のパラメータでフィッティング検討



|        |                      |                          |              |
|--------|----------------------|--------------------------|--------------|
| 圧密     | 圧縮指数                 | $\lambda$                | <b>0.074</b> |
|        | 膨潤指数                 | $\kappa$                 | 0.004        |
|        | 大気圧下(98kP)のNCL直線の間隙比 | N                        | <b>0.918</b> |
|        | 弾性成分のポアソン比           | $\nu$                    | 0.2          |
|        | 密度と拘束応力の影響           | a                        | <b>60</b>    |
| せん断    | 極限状態の主応力比            | $R_{cs}$                 | 3.18         |
|        | 降伏曲面形状               | $\beta$                  | 2.0          |
|        | 密度と拘束応力の影響           | $k_a$                    | 3.0          |
| ボンディング | 過圧密度の特性              | b                        | 0.0          |
|        |                      | $Q_0 = b \cdot \omega_0$ | 0.0          |
|        |                      | $k_b$                    | 0.0          |

### 要素解析

- [ 1 ] 圧密試験と
- [ 2 ] 三軸圧縮試験の  
両方を説明可能パラ  
メータを模索する.

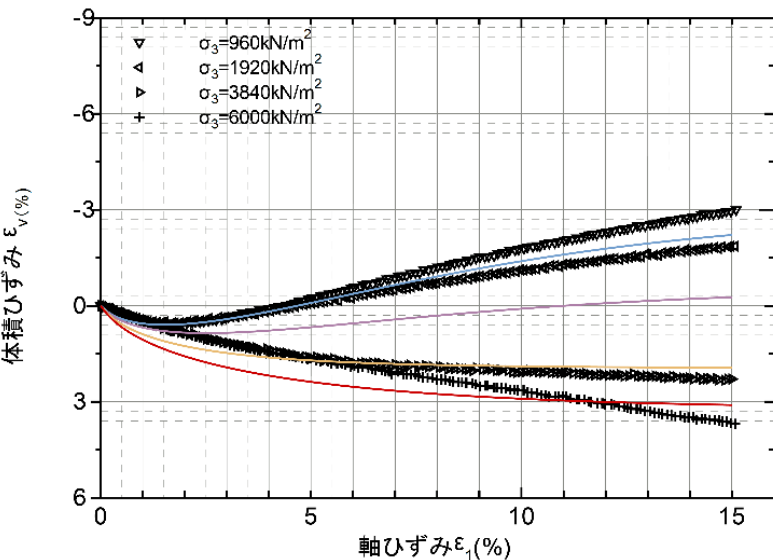
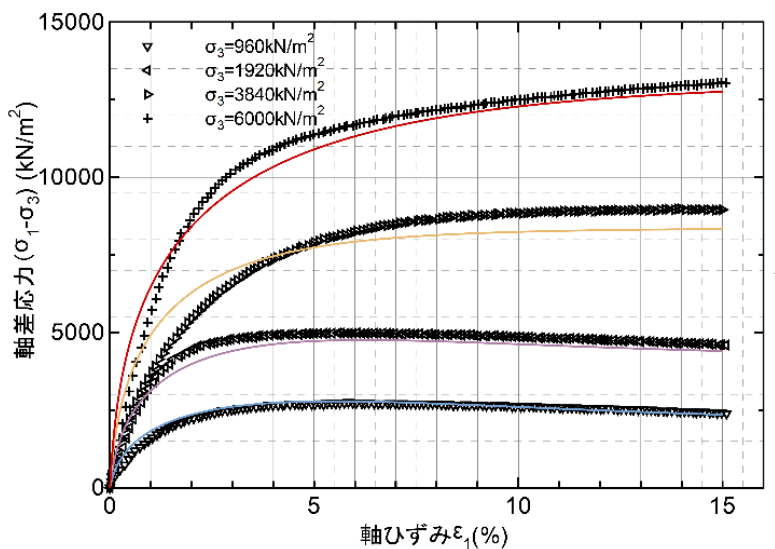
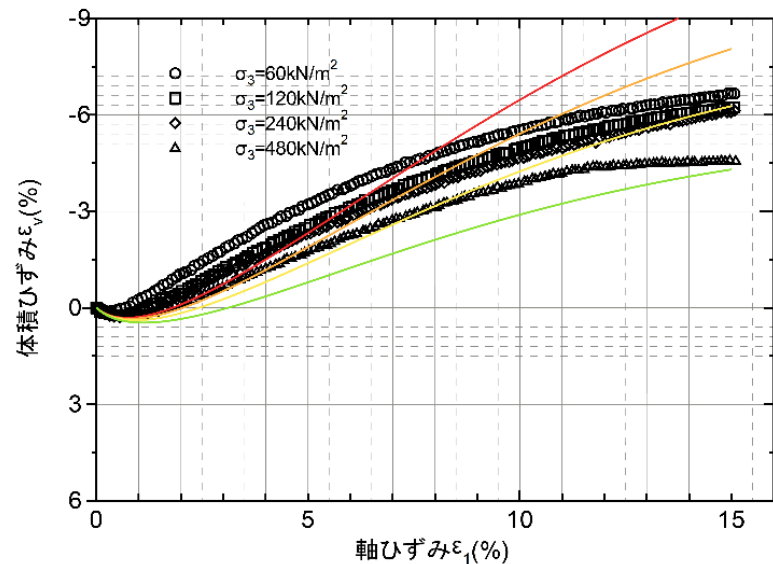
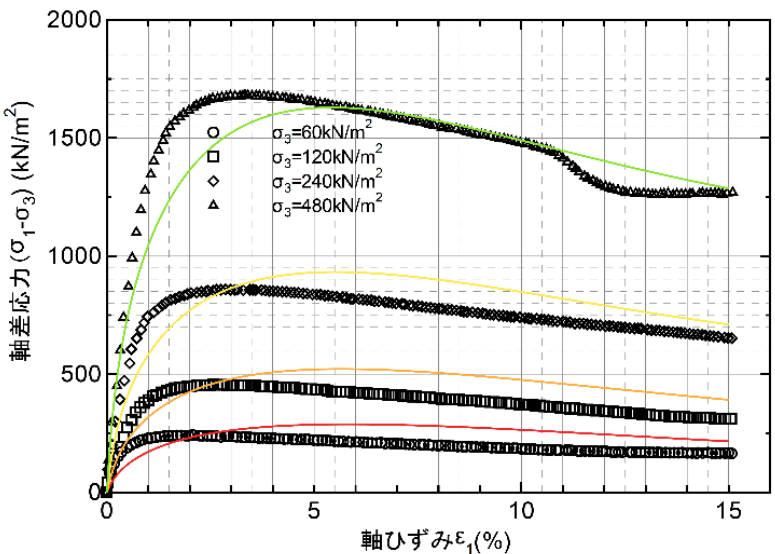
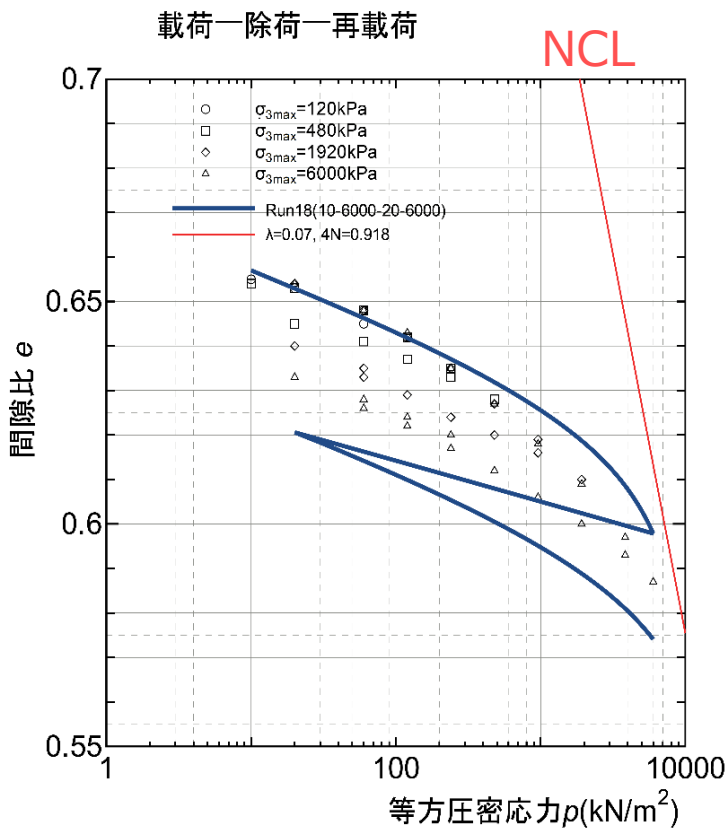
### 全体モデル解析

全体地盤の初期間隙比  
で初期状態を定義し、  
要素試験のパラメータ  
で全体解析する.



# 豊浦砂のSubloading $t_{ij}$ モデルの要素シミュレーション最終結果

- 等方圧密試験の要素シミュレーション
- CD条件三軸圧縮試験の要素シミュレーション



## 基礎直下の拘束圧の上昇の影響

圧密特性に若干の差異があるがせん断特性（強度・体積変化）は概ね試験をトレースできていると判断した。

# 2次元遠心載荷実験のPLAXIS+t<sub>ij</sub>の解析メッシュモデル

## モデル規模

地盤要素タイプ：4面体ソリッド

要素数(soil)：38,384

節点数：59,999

## 地盤要素

Subloanding tij構成モデル

## 基礎体

アルミ弾性体

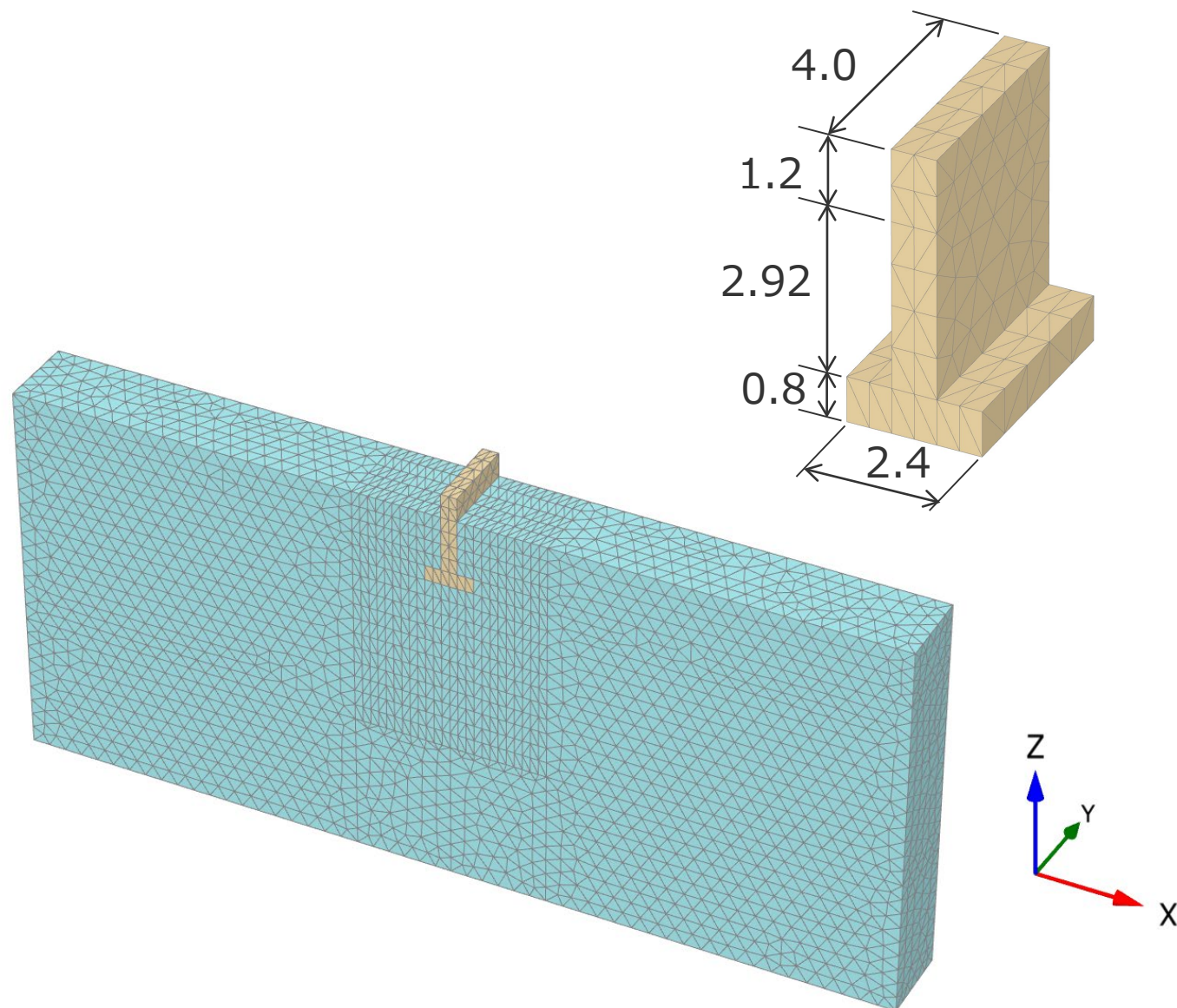
## 境界条件

側面と底面：直交面固定ローラー支承

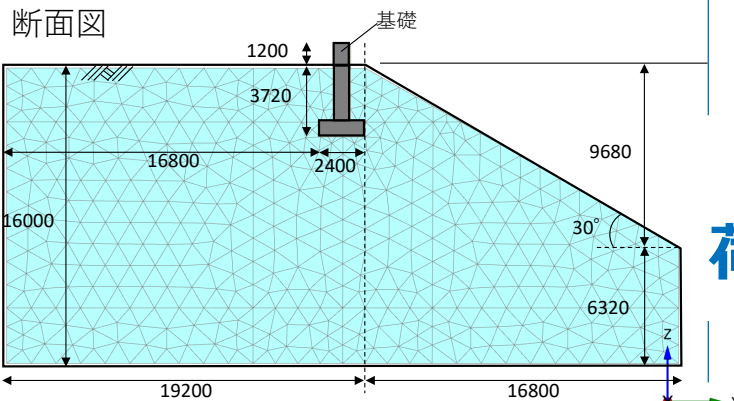
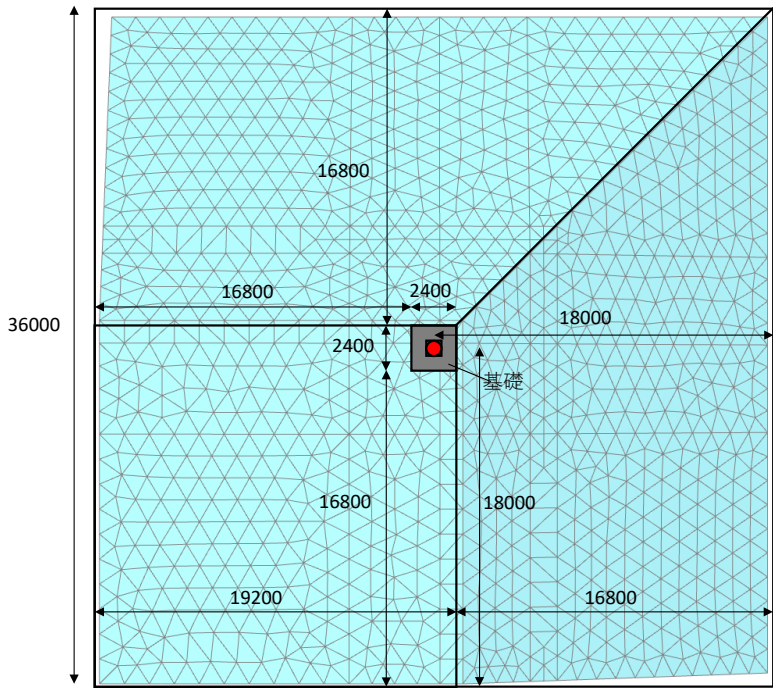
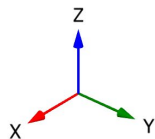
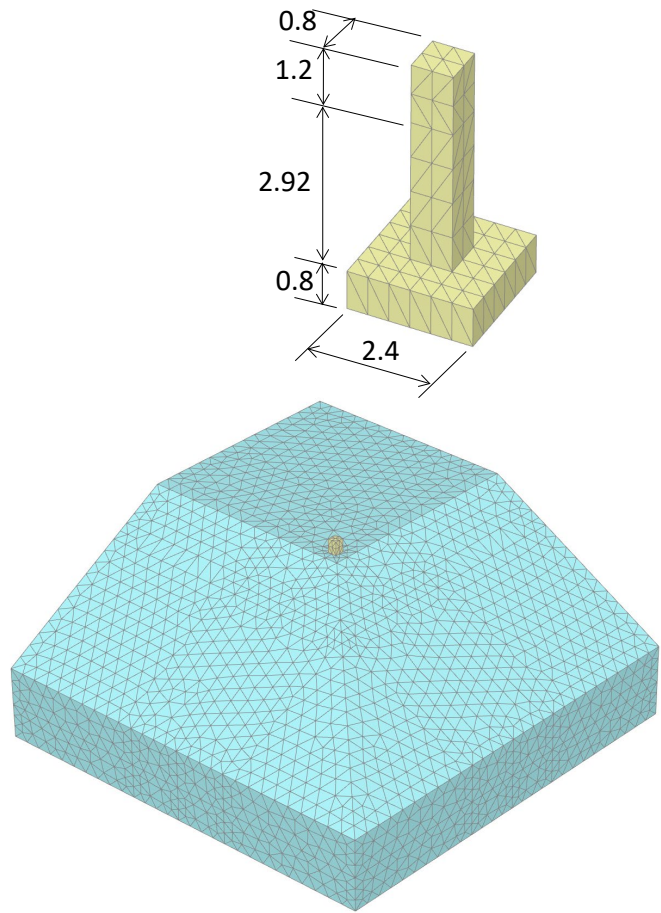
基礎と地盤の境界：剛結合

## 荷重載荷

鉛直変位の面載荷



# 3次元遠心載荷実験のPLAXIS+t<sub>ij</sub>の解析メッシュモデル



## モデル規模

地盤要素タイプ：4面体ソリッド  
要素数(soil)：39,468  
節点数：59,316

## 地盤要素

Subloanding tij構成モデル

## 基礎体

アルミ弾性体

## 境界条件

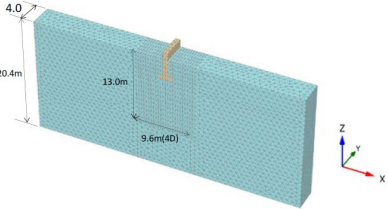
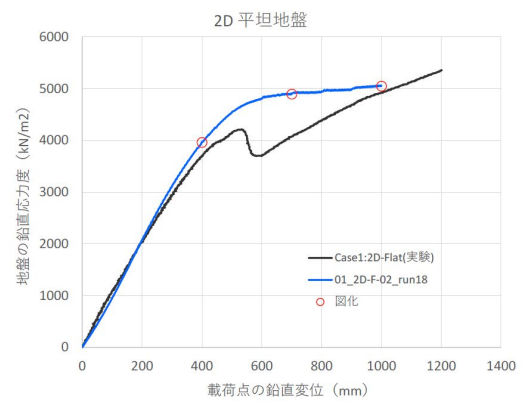
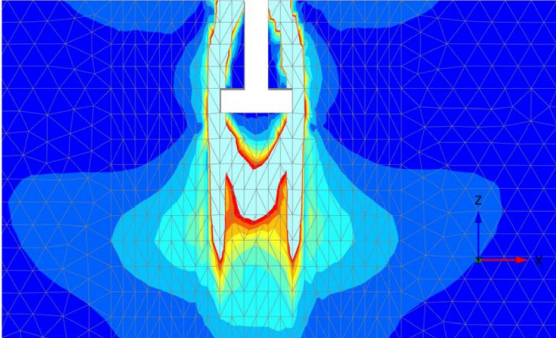
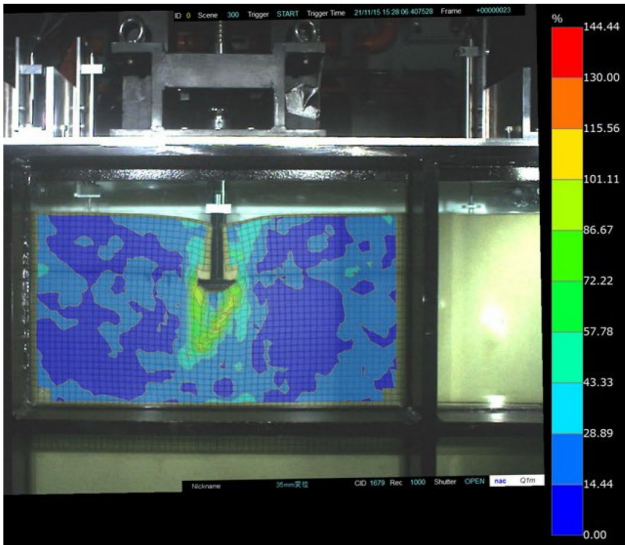
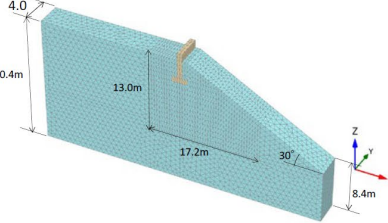
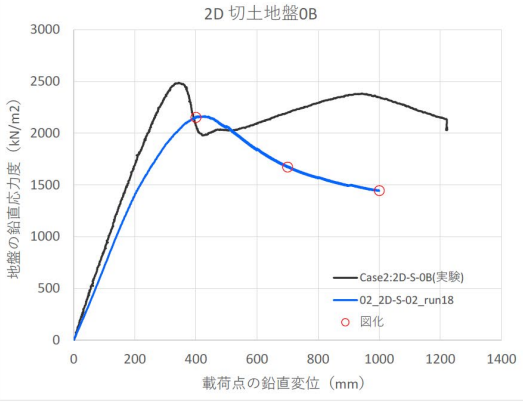
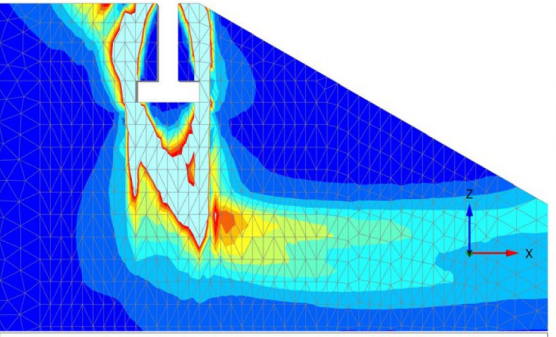
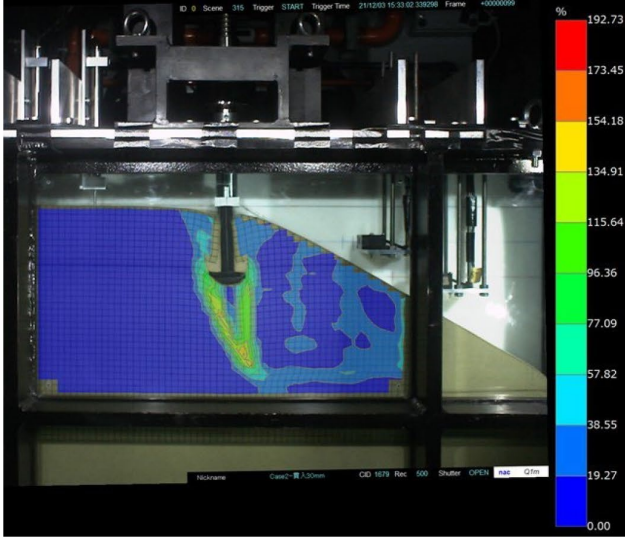
側面と底面：直交面固定ローラー支承  
基礎と地盤の境界：剛結合

## 荷重載荷

鉛直変位の面載荷



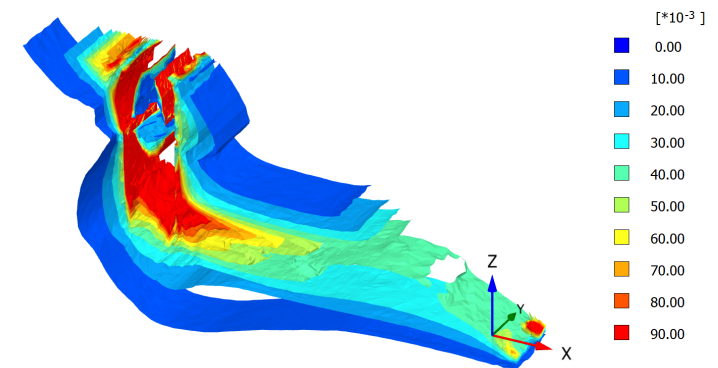
# 2次元平面ひずみ条件の遠心実験とPLAXIS+t<sub>ij</sub>の比較

| ケース  | 地盤反力度 $p_z$ ~ 変位 $U_z$ 関係  | 偏差ひずみ, $U_z=1000\text{mm}$ ( $U_z/B=41\%$ )  | 最大せん断ひずみ, $U_z=30\text{mm}$ ( $U_z/B=50\%$ )   |
|--|--|--|--|
| <p>Case1, 平面ひずみ基礎<br/>— 平坦地盤</p>          | <p>2D 平坦地盤</p>     |  <p>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 0.500 times)<br/>Maximum value = 2.473 (Element 16610 at Node 18429)<br/>Minimum value = 0.2144*10<sup>-3</sup> (Element 3903 at Node 17950)</p> |   |
| <p>Case2, 平面ひずみ基礎<br/>— 1面切土地盤(0B)</p>  | <p>2D 切土地盤0B</p>  |  <p>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 0.500 times)<br/>Maximum value = 2.454 (Element 5563 at Node 2660)<br/>Minimum value = 0.09116*10<sup>-3</sup> (Element 3886 at Node 18697)</p> |  |

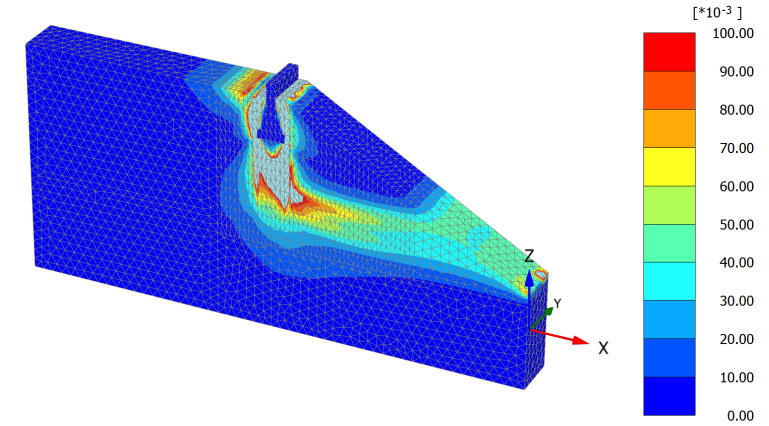


# 2次元平面ひずみ条件のPLAXIS+t<sub>ij</sub>の偏差ひずみ $\gamma_s$

変位0.7m

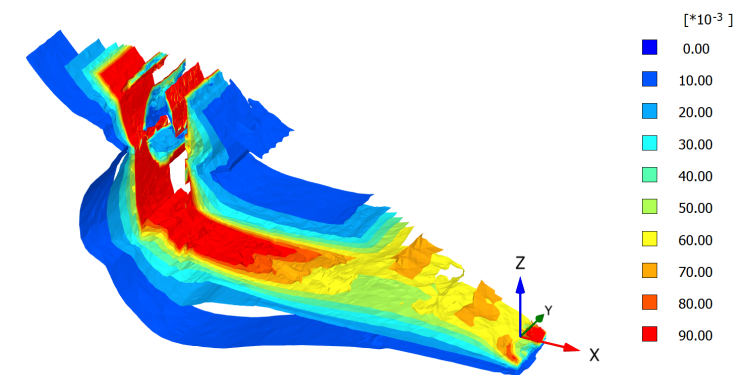


**Total deviatoric strain  $\gamma_s$  (scaled up 0.500 times)**  
Maximum value = 1.702 (Element 5564 at Node 2662)  
Minimum value = 1.538\*10<sup>-6</sup> (Element 5406 at Node 1875)

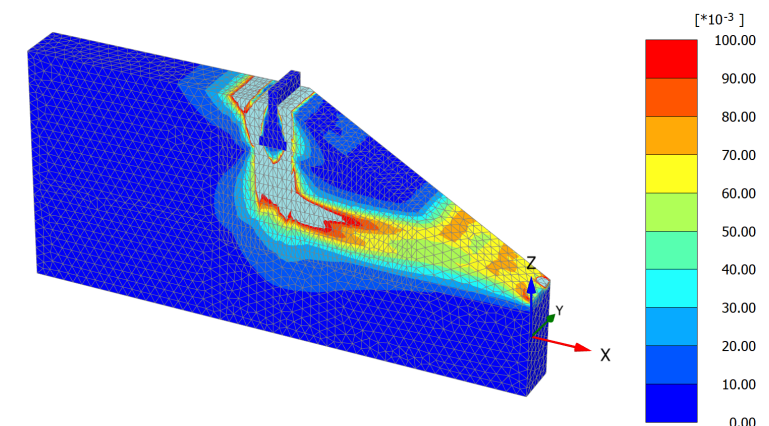


**Total deviatoric strain  $\gamma_s$  (scaled up 0.500 times)**  
Maximum value = 1.702 (Element 5564 at Node 2662)  
Minimum value = 1.538\*10<sup>-6</sup> (Element 5406 at Node 1875)

変位1.0m



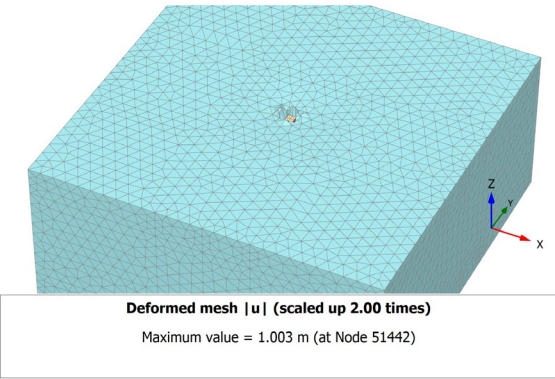
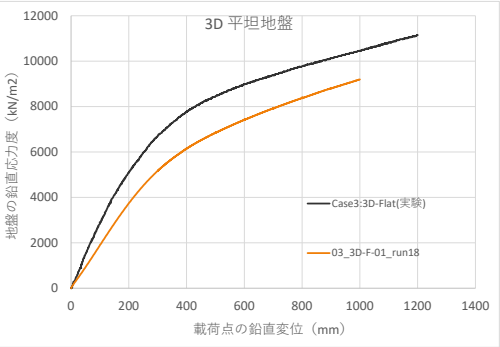
**Total deviatoric strain  $\gamma_s$  (scaled up 0.500 times)**  
Maximum value = 2.454 (Element 5563 at Node 2660)  
Minimum value = 0.9132\*10<sup>-6</sup> (Element 5406 at Node 1875)



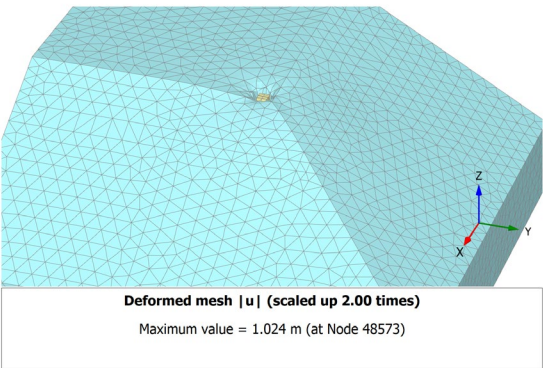
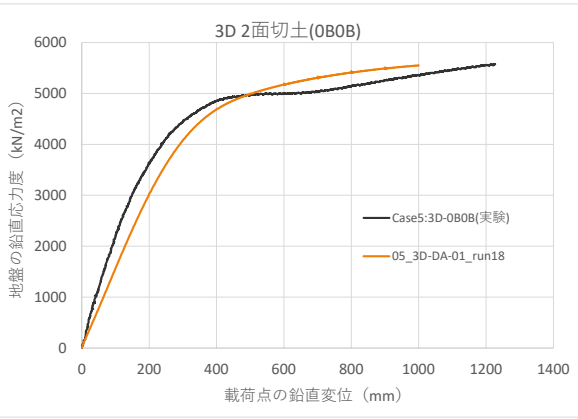
**Total deviatoric strain  $\gamma_s$  (scaled up 0.500 times)**  
Maximum value = 2.454 (Element 5563 at Node 2660)  
Minimum value = 0.9132\*10<sup>-6</sup> (Element 5406 at Node 1875)

# 遠心載荷実験とPLAXIS+t<sub>ij</sub>解析の圧縮荷重～変位関係の比較

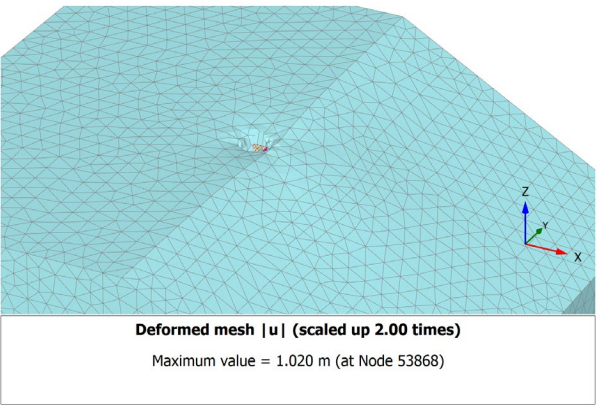
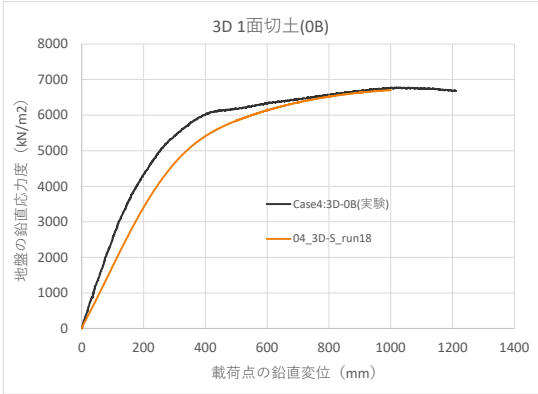
Case3:平坦



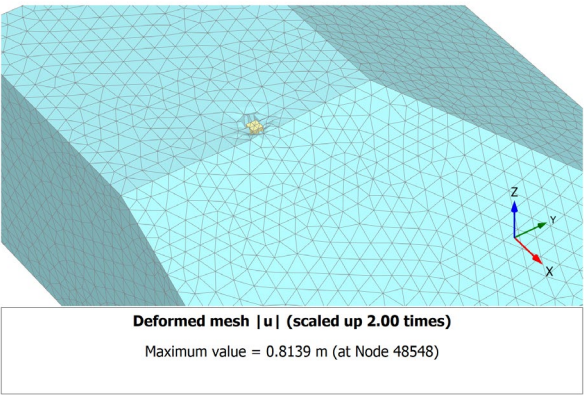
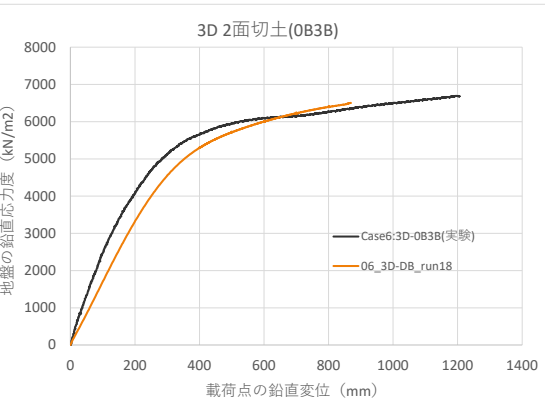
Case5: 2面切土 (b1=0, b2=0)



Case4: 1面切土 (b1=0)



Case6: 2面切土(b1=0, B2=3B)



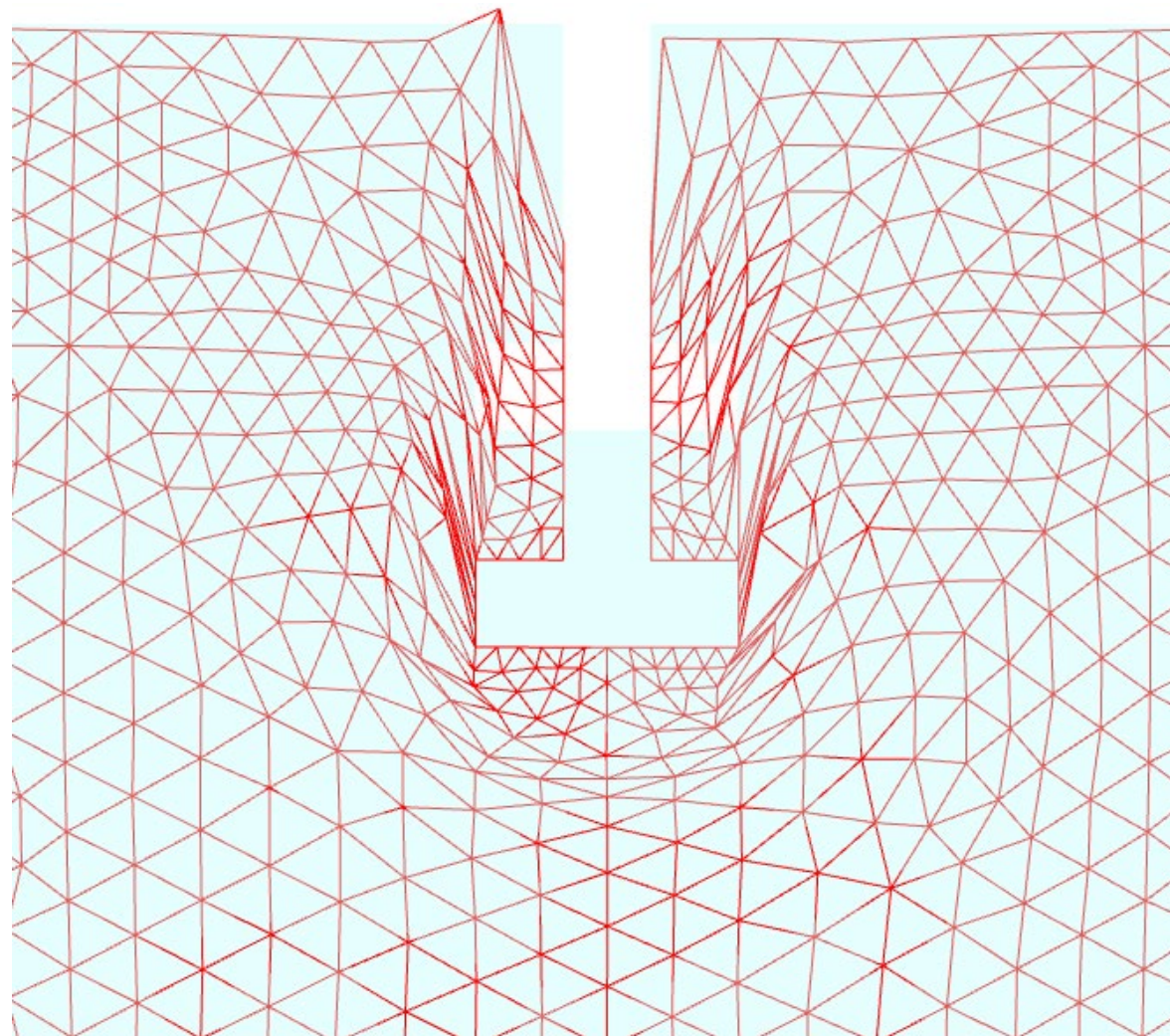


# 遠心載荷実験とPLAXIS+t<sub>ij</sub>解析の地盤変形性状の比較, **Case3:平坦**

遠心載荷実験 ( $U_z=1200\text{mm}, U_z/B=0.50$ )



PLAXIS+t<sub>ij</sub>解析 ( $U_z=1000\text{mm}, U_z/B=0.41$ )



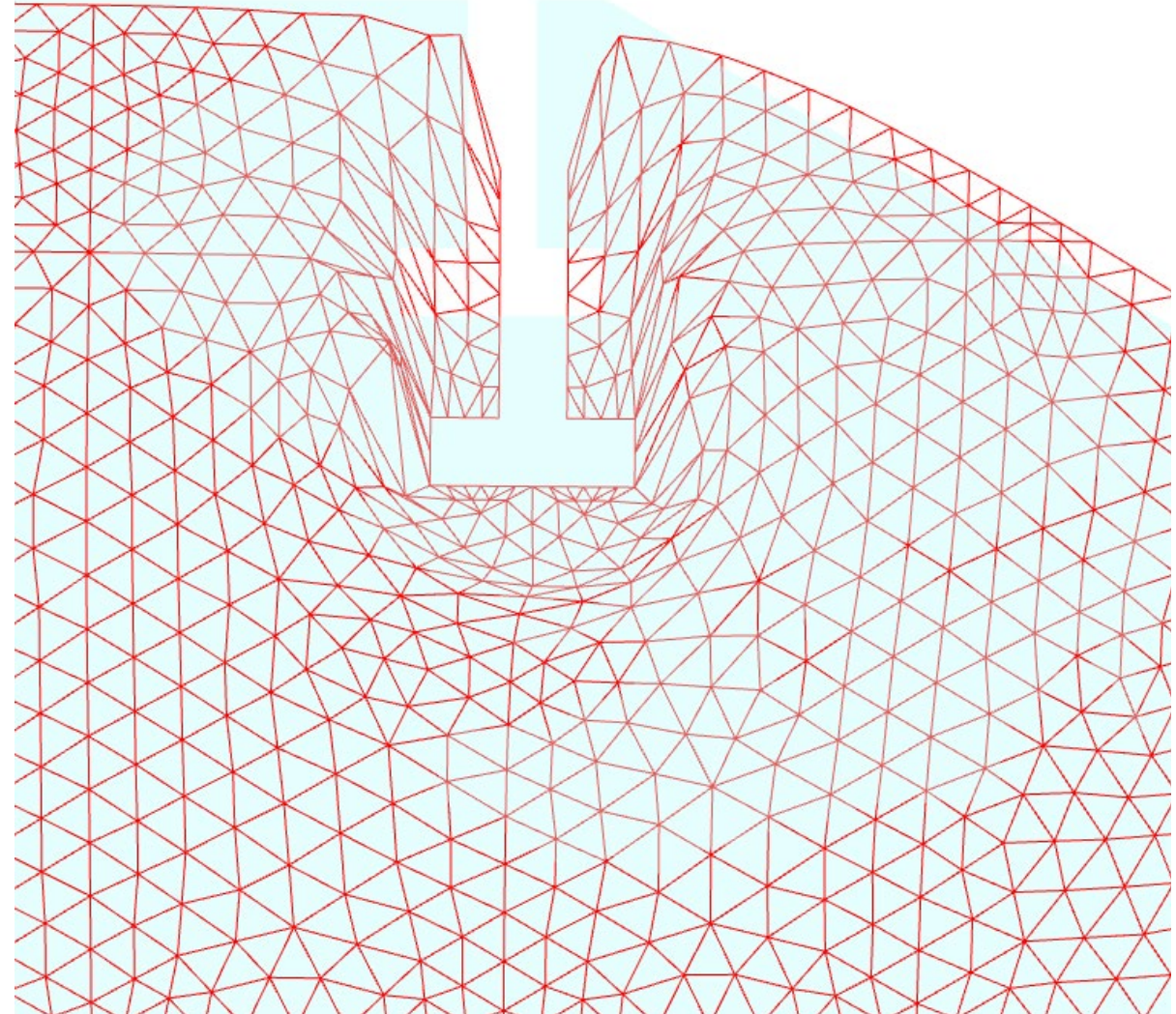


# 遠心載荷実験とPLAXIS+t<sub>ij</sub>解析の地盤変形性状の比較, **Case4: 1面切土 (b1=0)**

遠心載荷実験 (Uz=1210mm, Uz/B=0.50)



PLAXIS+t<sub>ij</sub>解析 (Uz=1000mm, Uz/B=0.41)



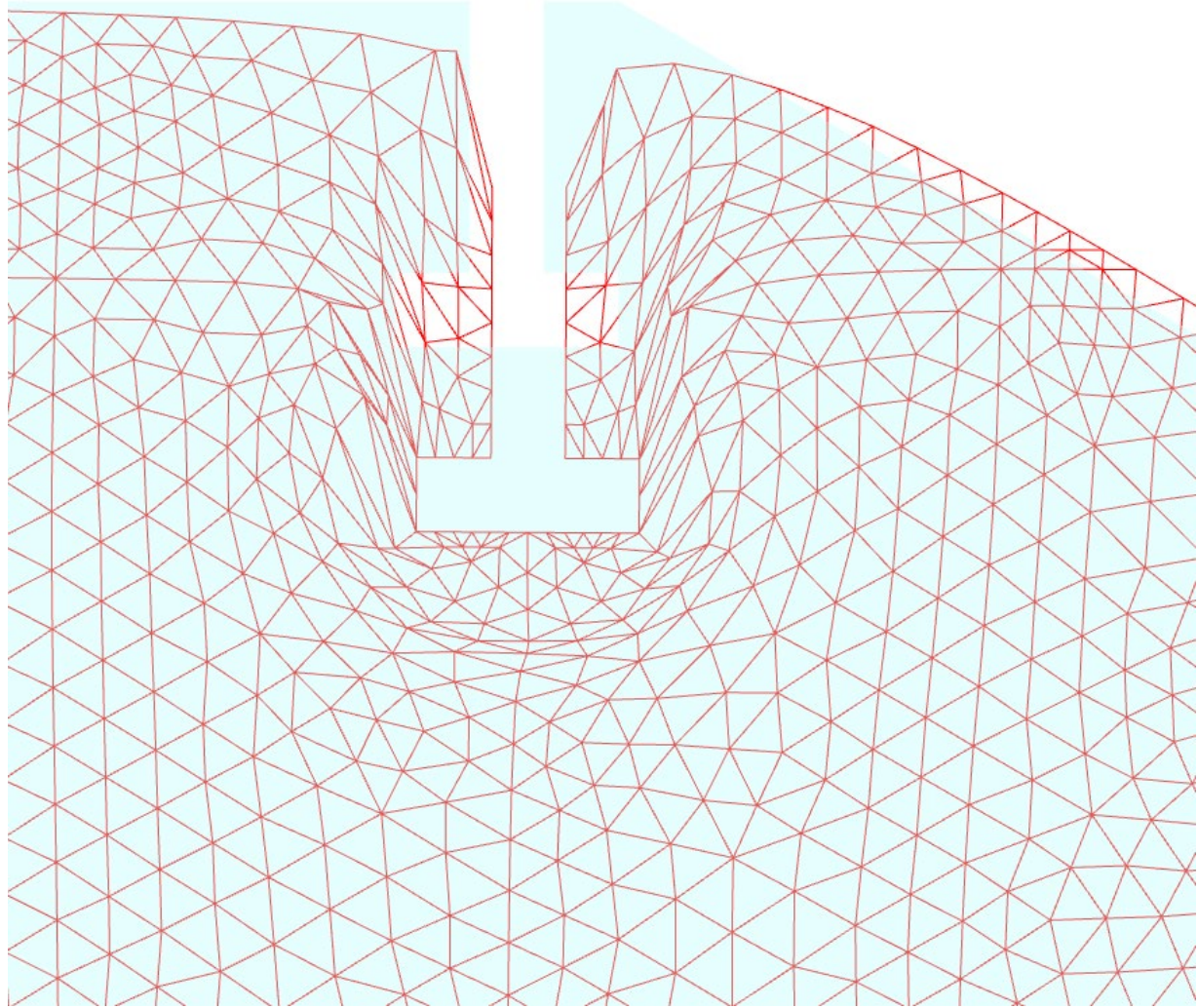


遠心載荷実験とPLAXIS+t<sub>ij</sub>解析の地盤変形性状の比較, **Case5: 2面切土 (b1=0, b2=0)**

遠心載荷実験 (Uz=1226mm,Uz/B=0.51)



PLAXIS+t<sub>ij</sub>解析 (Uz=1000mm,Uz/B=0.41)



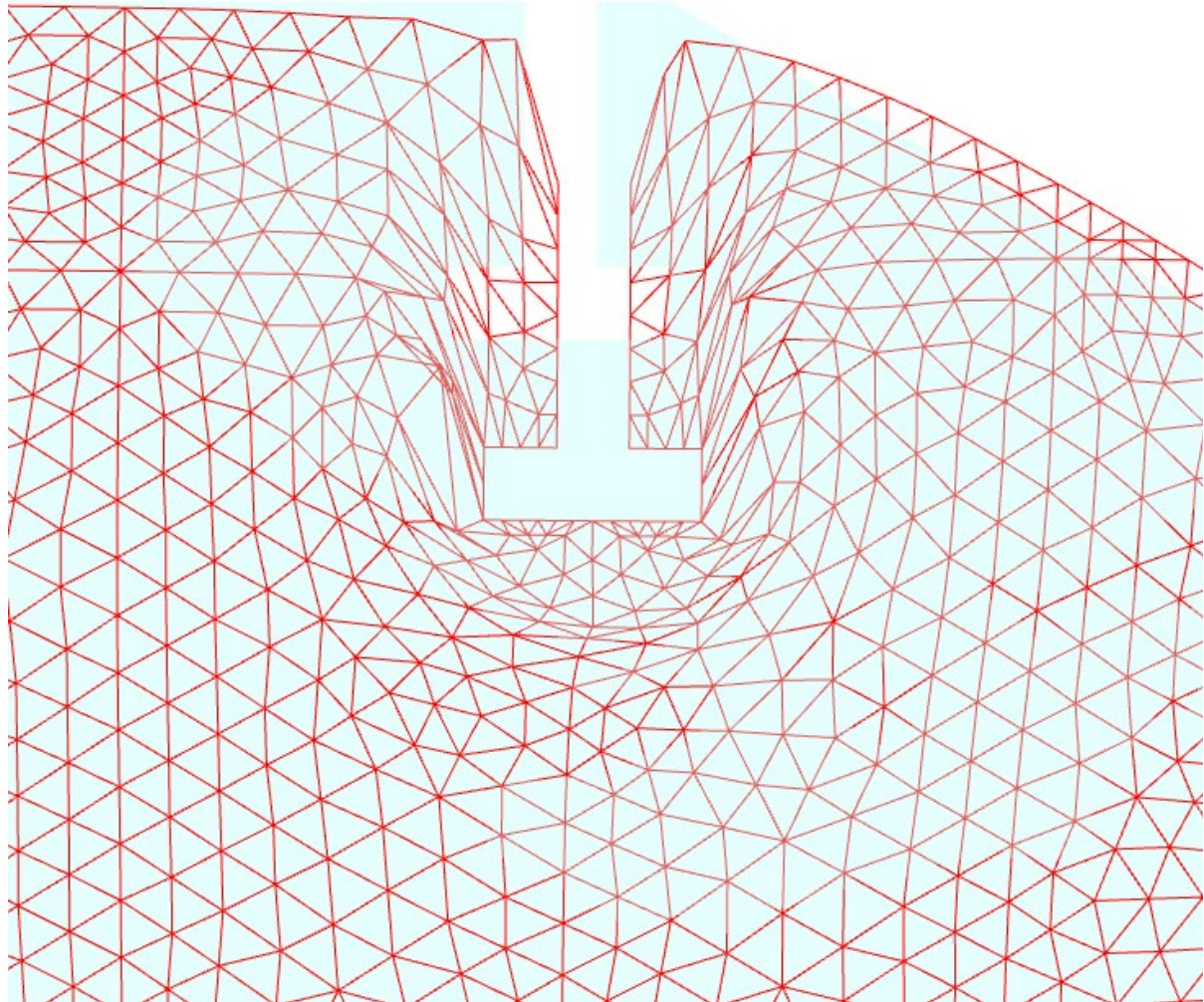


遠心載荷実験とPLAXIS+t<sub>ij</sub>解析の地盤変形性状の比較, **Case6: 2面切土(b1=0, B2=3B)**

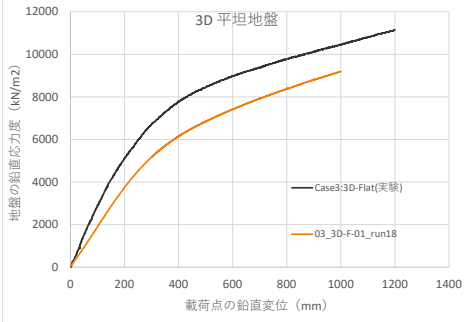

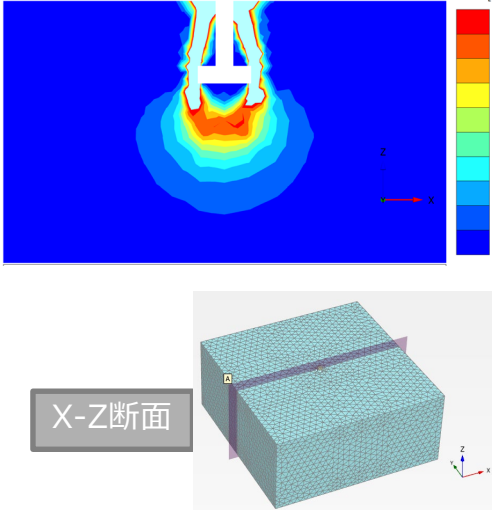
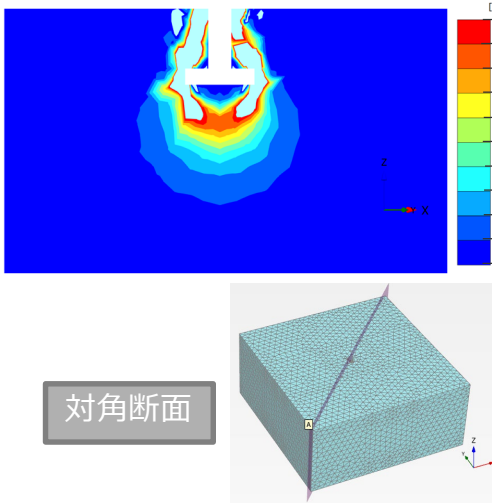
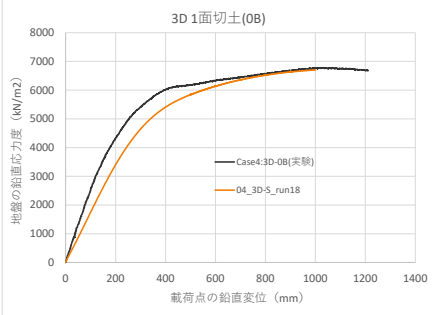
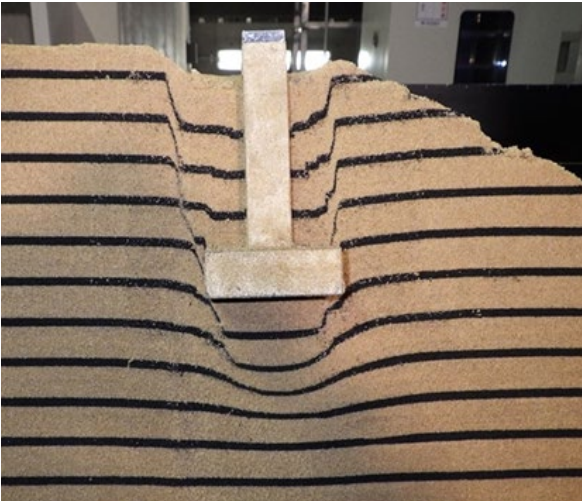
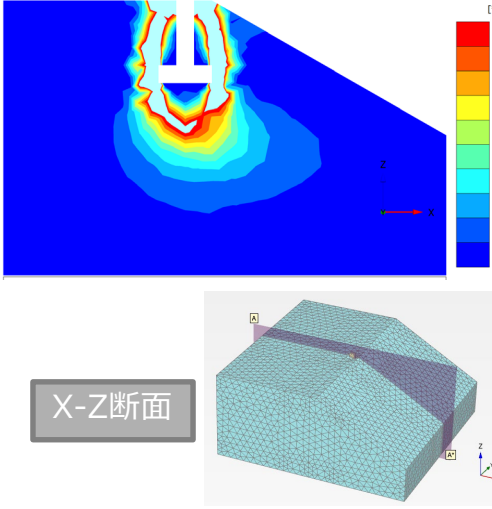
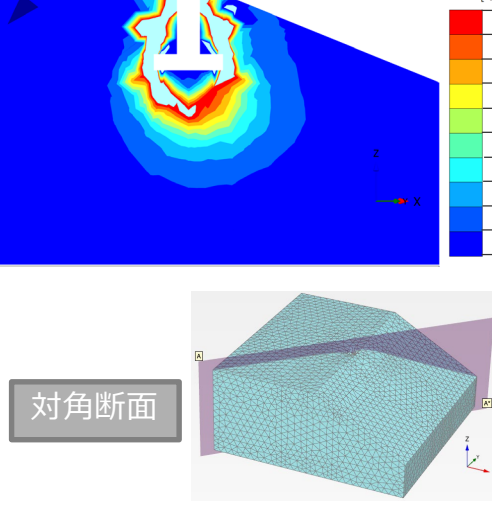
遠心載荷実験 (Uz=1200mm,Uz/B=0.50)



PLAXIS+t<sub>ij</sub>解析 (Uz=870mm,Uz/B=0.36)



# 平坦と1面切土に関する遠心载荷実験とPLAXIS+t<sub>ij</sub>の比較

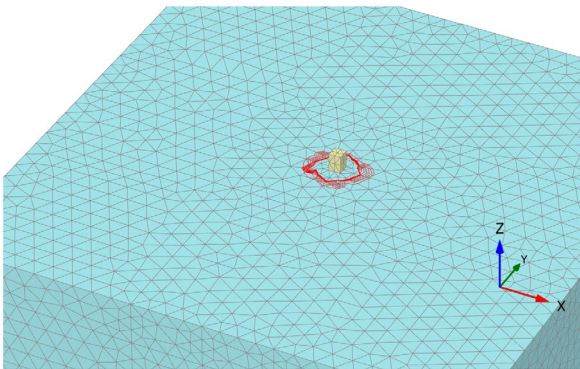
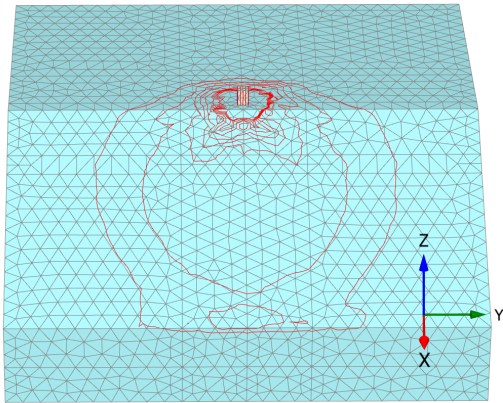
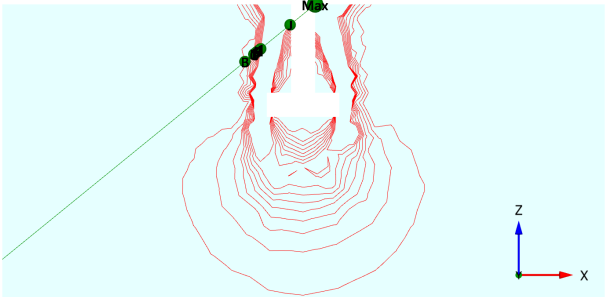
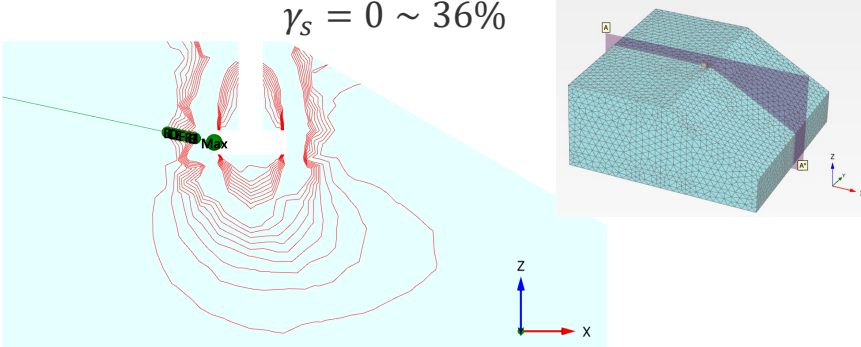
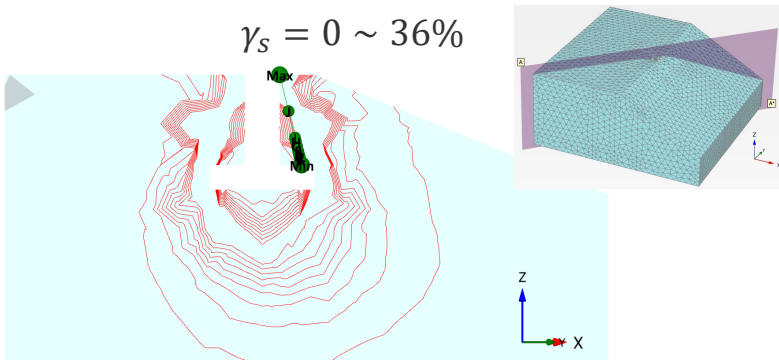
| Case | 圧縮荷重—変位  | 遠心载荷実験  | PLAXIS+t <sub>ij</sub> 解析, 偏差ひずみUz-1000mm,Uz/B=0.41   |  |
|------|--|---|---|--|
| 平坦   |   |   |  <div>X-Z断面</div>  |  <div>対角断面</div>  |
| 1面切土 |  |  |  <div>X-Z断面</div> |  <div>対角断面</div> |



# 2面切土に関する遠心载荷実験とPLAXIS+t<sub>ij</sub>の比較

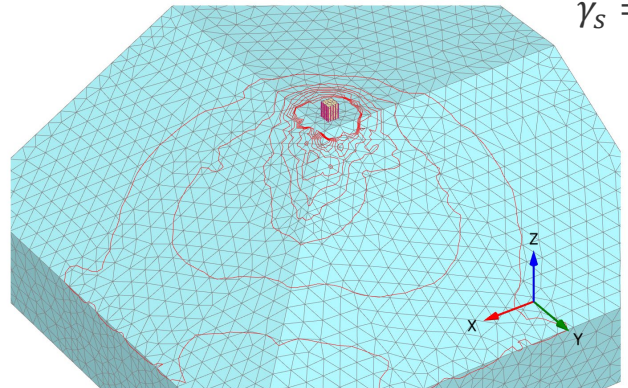
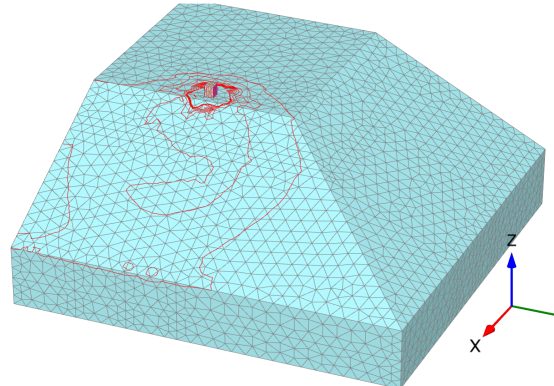
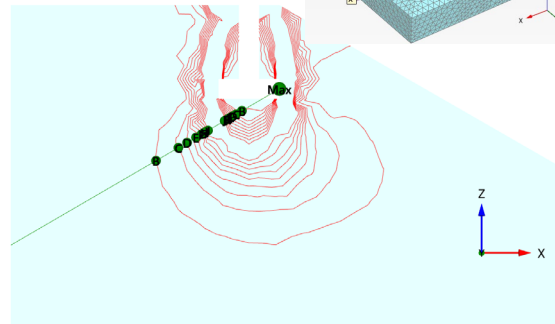
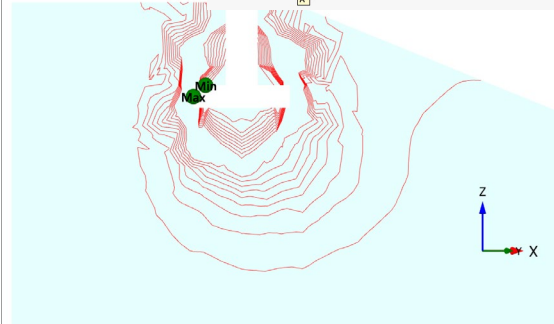
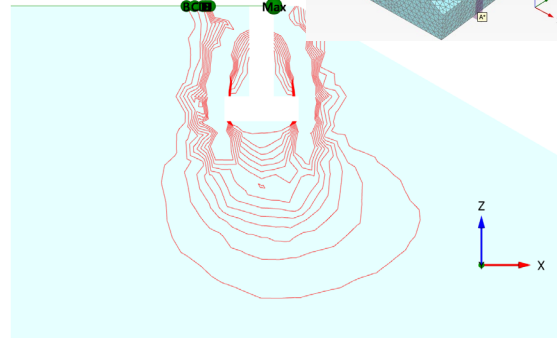
| Case             | 圧縮荷重—変位 | 遠心载荷実験 | PLAXIS+t <sub>ij</sub> 解析, 偏差ひずみUz-1000mm,Uz/B=0.41 |  |
|------------------|---------|--------|---|--|
| 2面切土<br>0B<br>0B |         |        |   |  |
| 2面切土<br>0B<br>3B |         |        |   |  |

# PLAXIS+t<sub>ij</sub>解析を用いた切土改変が基礎圧縮時の偏差ひずみに及ぼす影響比較（1）

| Case | Case3:平坦  | Case4: 1面切土 (b1=0)  |  |  |  |
|------|---|---|--|--|--|
| 地表   | <div><math>\gamma_s = 0 \sim 36\%</math></div> <div></div> <div><b>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 0.500 times)</b><br/>Maximum value = 4.127 (Element 7397 at Node 2001)<br/>Minimum value = 0.01980*10<sup>-3</sup> (Element 20782 at Node 196)</div> | <div><math>\gamma_s = 0 \sim 9\%</math></div> <div></div> <div><b>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 0.500 times)</b><br/>Maximum value = 2.595 (Element 6886 at Node 1933)<br/>Minimum value = 0.01658*10<sup>-3</sup> (Element 34397 at Node 3823)</div> |  |  |  |
|      |   |   |  |  |  |
| 断面   | <div><math>\gamma_s = 0 \sim 36\%</math></div> <div></div> <div><b>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 0.500 times)</b><br/>Maximum value = 3.290<br/>Minimum value = 0.3509*10<sup>-3</sup></div>   | <div><math>\gamma_s = 0 \sim 36\%</math></div> <div></div> <div><b>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 0.500 times)</b><br/>Maximum value = 1.686<br/>Minimum value = 0.2252*10<sup>-3</sup></div>  | <div><math>\gamma_s = 0 \sim 36\%</math></div> <div></div> <div><b>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 0.500 times)</b><br/>Maximum value = 1.991<br/>Minimum value = -0.1999</div> |  |  |
|      |   |   |  |  |  |
|      |   |   |  |  |  |



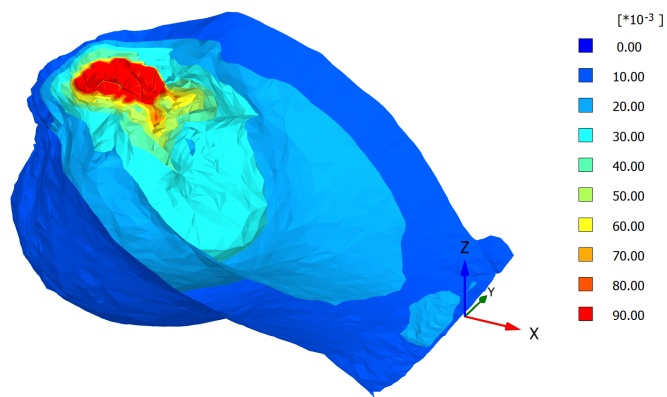
## PLAXIS+t<sub>ij</sub>解析を用いた切土改変が基礎圧縮時の偏差ひずみに及ぼす影響比較（2）

| Case | Case5:2面切土 (b1=0, b2=0)   |  | Case6:2面切土 (b1=0,b2=3B)   |   |
|------|---|--|---|---|
| 地表   | <div><div><div><math>\gamma_s = 0 \sim 9\%</math></div><div></div></div><div><div>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 0.500 times)</div><div>Maximum value = 1.956 (Element 16117 at Node 1641)</div><div>Minimum value = 1.075*10<sup>-6</sup> (Element 29993 at Node 250)</div></div></div> |  | <div><div><div><math>\gamma_s = 0 \sim 9\%</math></div><div></div></div><div><div>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 0.500 times)</div><div>Maximum value = 2.895 (Element 4257 at Node 1888)</div><div>Minimum value = 0.03923*10<sup>-3</sup> (Element 5201 at Node 21194)</div></div></div> |   |
|      | 断面  | <div><div><div><math>\gamma_s = 0 \sim 36\%</math></div><div></div></div><div><div>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 5.00 times)</div><div>Maximum value = 1.419</div><div>Minimum value = 0.2905*10<sup>-3</sup></div></div></div> | <div><div><div><math>\gamma_s = 0 \sim 36\%</math></div><div></div></div><div><div>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 5.00 times)</div><div>Maximum value = 1.307</div><div>Minimum value = -0.1764</div></div></div>  | <div><div><div><math>\gamma_s = 0 \sim 36\%</math></div><div></div></div><div><div>Total deviatoric strain <math>\gamma_s</math> (scaled up 0.500 times)</div><div>Maximum value = 2.049</div><div>Minimum value = 0.1912*10<sup>-3</sup></div></div></div> |



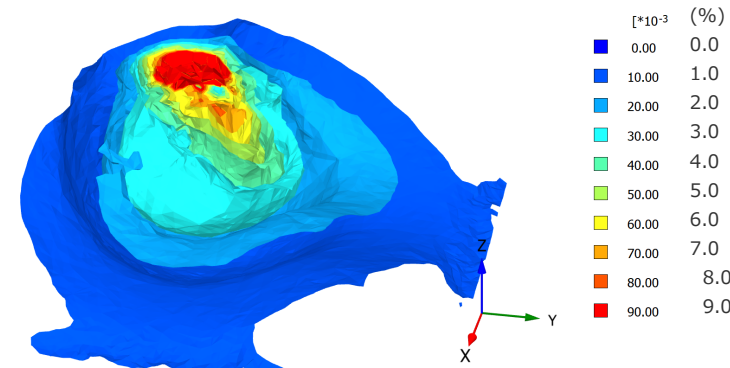
# PLAXIS+t<sub>ij</sub>解析の偏差ひずみのアイソサーフェースコンタの比較

Case4: 1面切土 (b1=0)

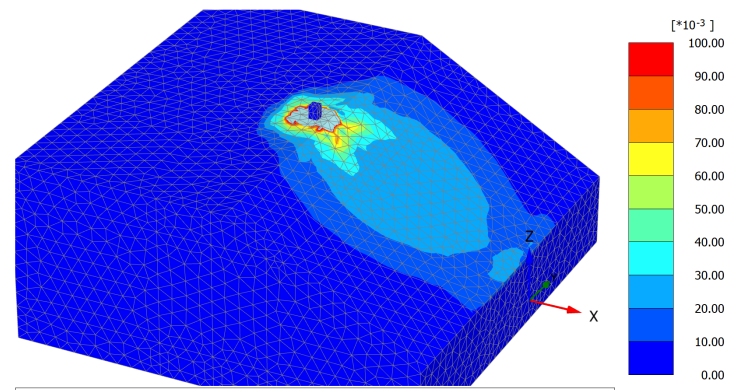


**Total deviatoric strain  $\gamma_s$  (scaled up 0.500 times)**  
Maximum value = 2.595 (Element 6886 at Node 1933)  
Minimum value = 0.01658\*10<sup>-3</sup> (Element 34397 at Node 3823)

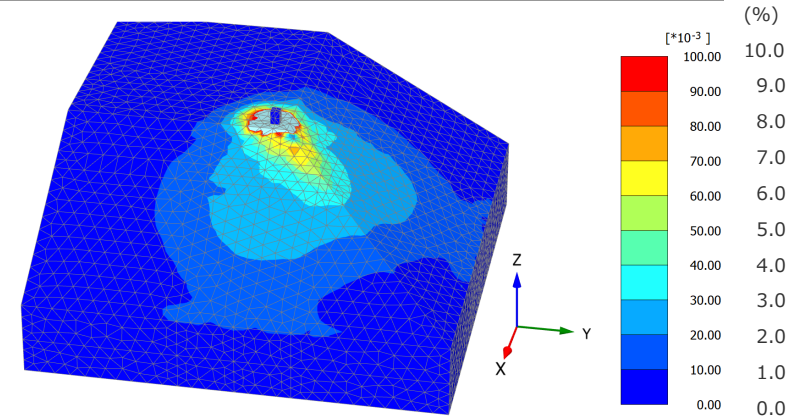
Case5: 2面切土 (b1=0, b2=0)



**Total deviatoric strain  $\gamma_s$  (scaled up 0.500 times)**  
Maximum value = 1.956 (Element 16117 at Node 1641)  
Minimum value = 1.075\*10<sup>-6</sup> (Element 29993 at Node 250)



**Total deviatoric strain  $\gamma_s$  (scaled up 0.500 times)**  
Maximum value = 2.595 (Element 6886 at Node 1933)  
Minimum value = 0.01658\*10<sup>-3</sup> (Element 34397 at Node 3823)



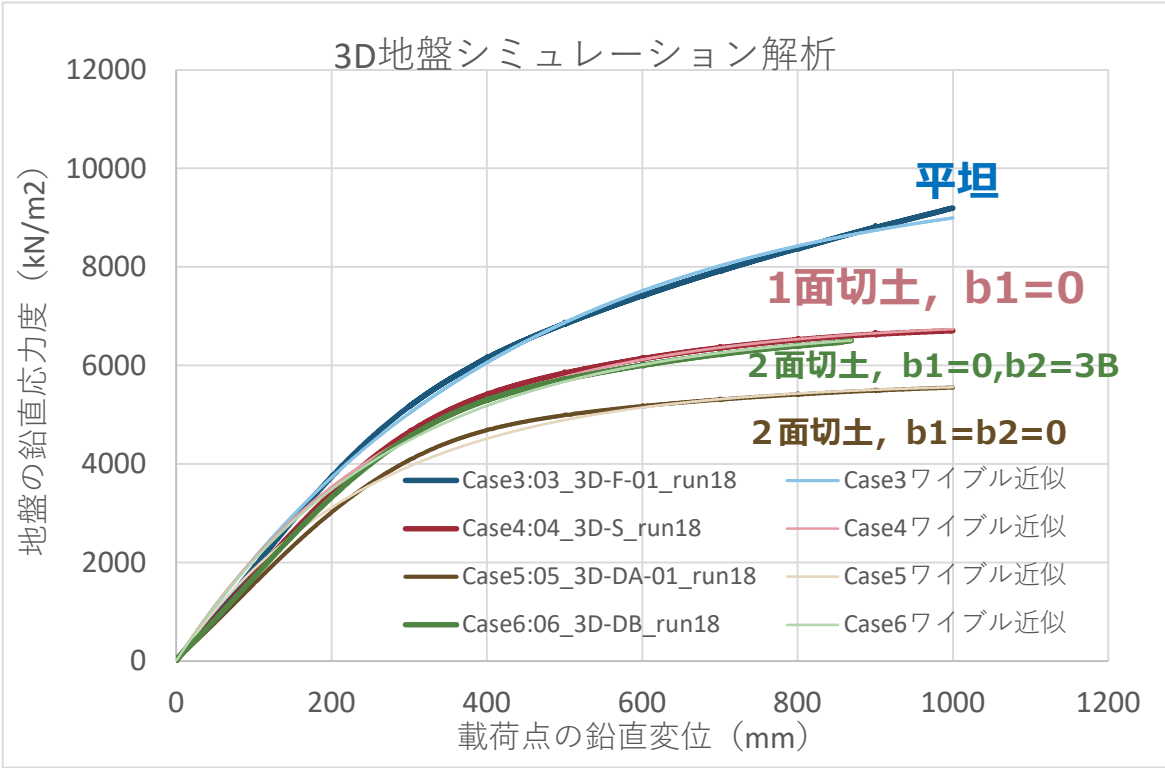
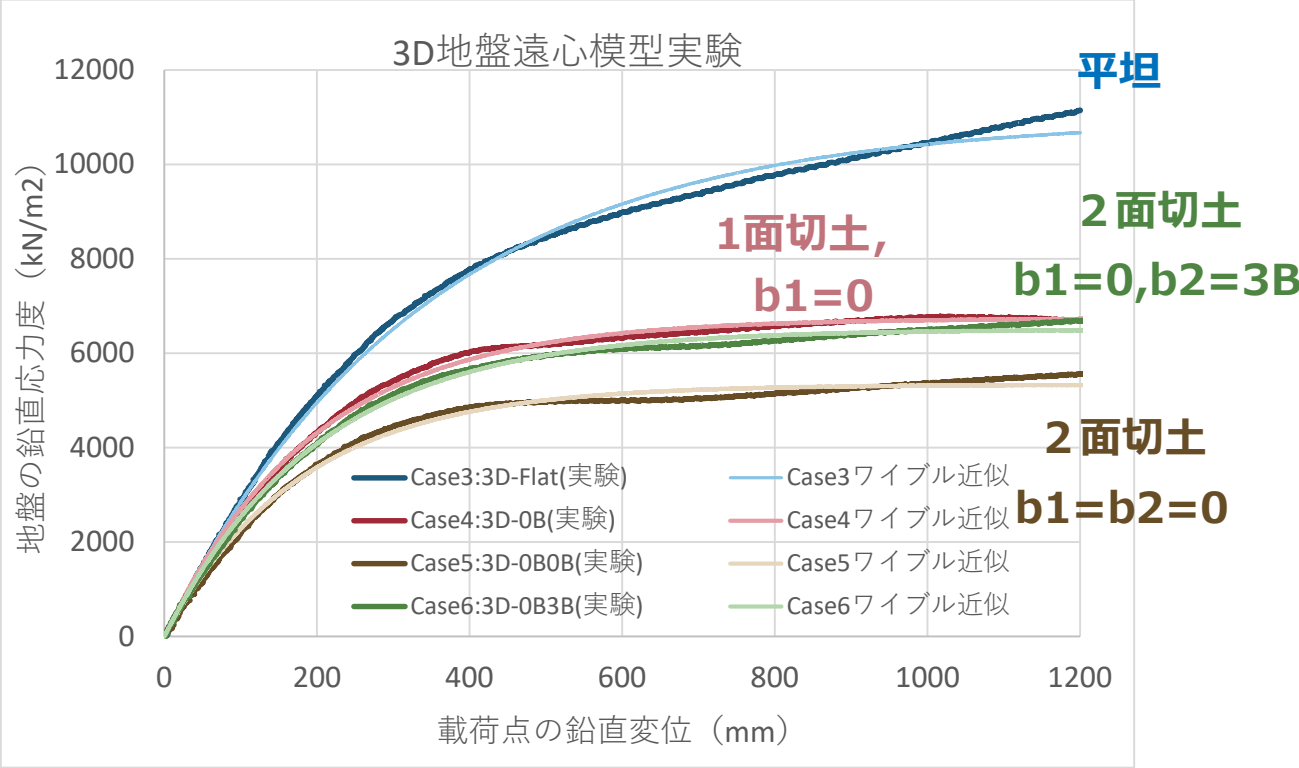
**Total deviatoric strain  $\gamma_s$  (scaled up 0.500 times)**  
Maximum value = 1.956 (Element 16117 at Node 1641)  
Minimum value = 1.075\*10<sup>-6</sup> (Element 29993 at Node 250)

# 切土地形による支持力度の低下，ワイブル関数近似による支持力低下検討p

遠心載荷実験

ワイブル関数： $p = p_{max}(1 - e^{u/u_s})$

PLAXIS +  $t_{ij}$



ピラミッド形状の2面切土の圧縮支持力度，1面切土からあまり低下しない。

- 1面切土 ( $b_1=0$ ) の圧縮支持力は著しく低下するが，ピラミッド地形の2面切土でも  $b_2=3B$  程度の距離があれば，それ以上低下しない。
- 2面切土 ( $b_1=b_2=0$ ) の圧縮支持力は，1面切土 ( $b_1=0$ ) よりも低下するが，その程度は小さい。





# 地形改変が砂地盤の圧縮支持力の低下に及ぼす影響のまとめ

詳細な遠心模型実験と3次元のPLAXIS+t<sub>ij</sub>解析の比較を通して確認できたこと.

## PLAXIS + t<sub>ij</sub>の有効性

1. 要素試験の圧縮変形特性, せん断特性を精度良く推定できれば, 地盤の構成モデルを形成するパラメータは固定（共通）で良く, 地形や基礎形状の影響を影響と精度良く予測できる.
2. 砂地盤の基礎圧縮支持力を精度良く予測するためは, 床板直下の拘束圧が高まるため, その領域をカバーできる構成モデルが重要である.
3. 地盤の構成パラメータは等方圧縮試験と三軸圧縮せん断試験の結果から, トライアンドエラーで設定しなければならない. とくに砂質土は正規圧密曲線（NCL）の設定が解析に強く関係する.

## 鉄塔周辺の切土の地形改変に対する解析

1. 実際の根入れのある基礎の圧縮支持力は, 3次元形状の根入れ拘束効果が大きく, 圧縮支持力の発揮されるすべり面の進展は小さい.
2. 1面切土の地形改変は, 拘束圧が低下してその方向へのすべり面の進展と圧縮支持力の低減を引き起こす.
3. 2面のピラミッド地形は, 切土方向より対角方向の拘束効果が大きいいため, 圧縮支持力の低減は1面切土よりも緩和される.

# JSCEでの報告

| # | 発表年度    | 著者                        | 対象                          | 内容   |
|---|---------|---------------------------|-----------------------------|--|
| 1 | 2022年9月 | 岡 滋晃, 中島 陽, 篠口 冴子, 松本 美紀  | 砂, 圧縮, 遠心実験                 | 2面切土の圧縮支持力は1面切土に対して低減が小さい.                       |
| 2 | 2023年9月 | 岡 滋晃, 中島 陽, 服部 洋子, 木村 健太郎 | 粘土, 引揚, Subloading tij (実物) | 2面切土の引揚支持力は, 平坦に対する提言は小さい.                       |
| 3 | 2024年9月 | 寺中 吉輝, 岡 滋晃, 服部 洋子, 中島 陽  | 砂, 圧縮, 遠心実験, Subloading tij | 1面切土に対しても, 圧縮のすべり線は基礎直下に局所化するため, 切土地形の影響は顕著ではない. |