

逆 T 字基礎の直下で高拘束を受ける砂の Subloading t_{ij} model による圧縮支持力解析（その 2）
 ー 豊浦砂を用いた遠心模型実験と三次元の弾塑性有限要素法による再現解析 ー

支持力 遠心力模型実験 有限要素法 東京電力ホールディングス（株） 正会員 ○寺中 吉輝，非会員 岡 滋晃
 東電設計（株） 正会員 高橋 秀明
 大日本土木（株） 正会員 中谷 登
 （株）地域地盤環境研究所 国際会員 譽田 孝宏，国際会員 中井 照夫

1. はじめに

送電用鉄塔で一般的に使用されている基礎形式の一つに逆 T 字基礎がある．近年，宅地造成や砂利採取などにより，送電用鉄塔の周辺で地形が改変されることが多く，地盤の材料特性や地形条件を反映した合理的な基礎の安定性照査が求められている．従来の二次元の水平地盤を対象とした安定解析法¹⁾や剛塑性解析²⁾では，このような問題に適切に対処することが難しいため，設計をより高度化するために，三次元場における地盤の変形および支持力メカニズムを詳細に把握する必要がある．根入れのない二次元平面ひずみ条件における帯基礎については，これまで多くの遠心模型実験や有限要素法による解析（以下，FEM 解析）が盛んに実施されており³⁾，支持力メカニズムも検討されている．しかし，根入れのある逆 T 字基礎で，かつ実際の状況を念頭にした三次元場の実験や解析の事例はほとんどなく，未解明の点も多い．そこで，逆 T 字基礎の三次元場における詳細な地盤の変形および支持力メカニズムを解明することを目的に，豊浦砂を用いた 40G 場での遠心模型実験と，地盤材料の力学特性を適切に表現できる Subloading t_{ij} model⁴⁾を用いた弾塑性 FEM 解析による再現解析を実施した．

2. 実験条件と解析条件

実験と解析ともに，Case1 は二次元平面ひずみ条件を想定したケース，Case2 は実際の状況を想定した三次元のケースで，解析における Case1，Case2 が，実験における Case1，Case2 を再現解析したケースとなっている．実験は実規模の 1/40 を想定した水平地盤で，遠心加速度 40G 場で鉛直載荷装置を用いて基礎模型を圧縮載荷し，荷重～変位関係や地盤の変形特性を調べた．地盤模型や基礎模型の図面は割愛するが，解析モデルの 1/40 寸法である．解析における有限要素メッシュを図-1 に示す．地盤の材料パラメータ（表-1）は，実験で使用した豊浦砂の高拘束圧下までの要素試験結果をもとに，概要集その 1⁵⁾で述べた方法により決定した．基礎は弾性体とし，材料パラメータは実験で使用したアルミ製の模型基礎を想定した値とした．実験では，基礎模型の周囲に豊浦砂を接着し基礎と地盤の摩擦係数を大きくしているため，解析では基礎と周囲の地盤は連続とした．荷重は，基礎の頂部に変位制御で面載荷とした．

3. 実験結果と解析結果の比較・考察

実験と解析における鉛直応力～鉛直変位関係を図-2 に示す．なお，実験の鉛直変位量については，実規模に換算した値（40 倍）としている．Case1 では初期勾配は実験と解析でよく一致した．実験の一次ピーク後の挙動に差があるが，全体としては概ね整合している．Case2 でも，解析結果は実験結果を良く表現することができている．実験，解析に関わらず，初期勾配，

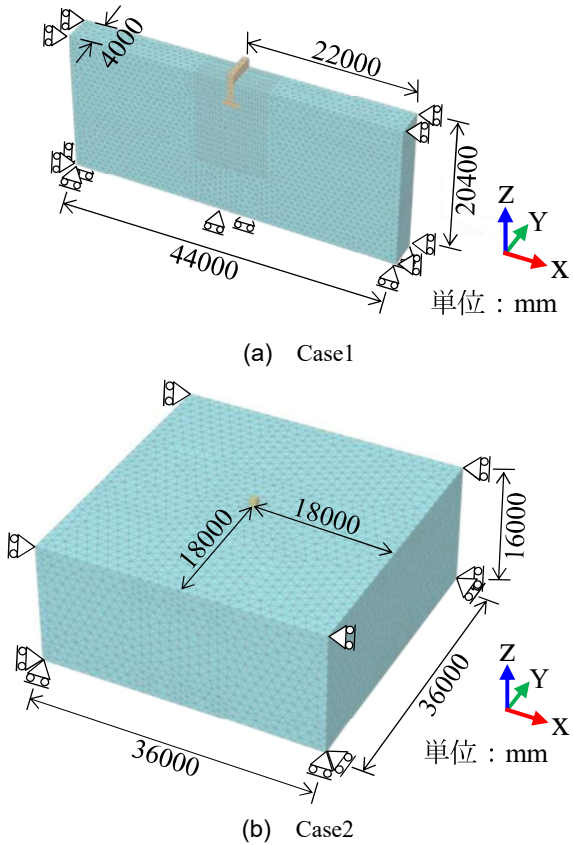
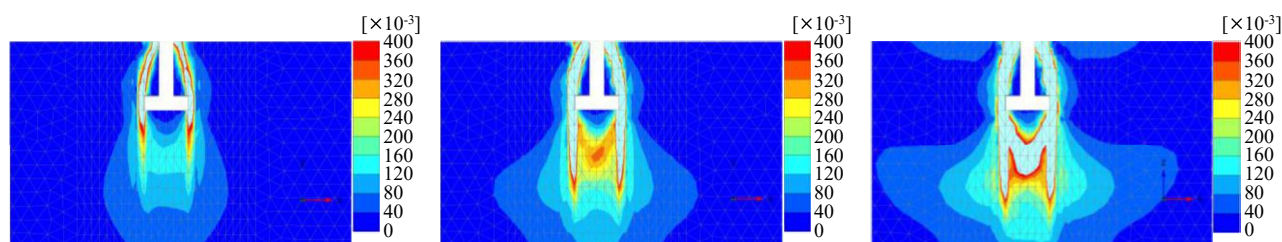


図-1 地盤モデルの有限要素メッシュ

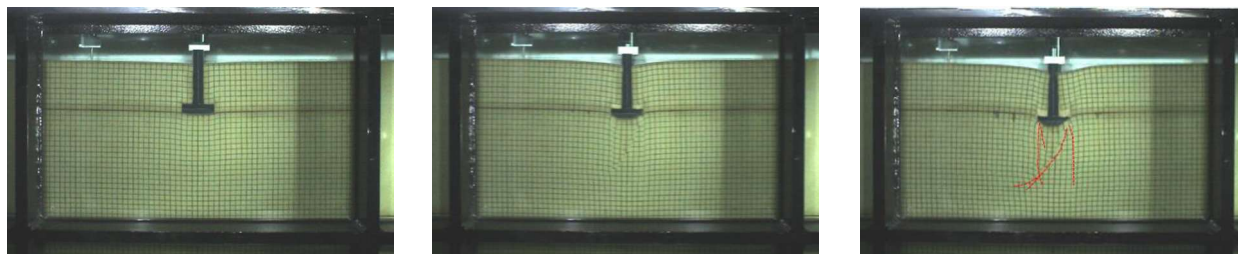
表-1 地盤の材料パラメータ

力学特性	パラメータ	記号	値
圧密特性に関するパラメータ	圧縮指数	λ	0.074
	膨潤指数	κ	0.004
	大気圧（98 kPa）下の NCL の間隙比	N	0.918
	弾性成分のポアソン比	ν	0.2
	密度と拘束応力の影響	α	60
せん断特性に関するパラメータ	限界状態の主応力比	R_{cs}	3.18
	降伏曲面の形状	β	2.0
	密度と拘束応力の影響	k_a	3.0

Analysis of compressive bearing capacity of sand subjected to confining pressure beneath inverted T-shaped foundation using subloading t_{ij} model (Part 2). Y.Teranaka, S.Oka(Tokyo Electric Power HD), H.Takahashi(Tokyo Electric Power Services), N.Nakatani(Dai Nippon Construction), T.Konda, T.Nakai(Geo-Research Institute)



(a) 解析におけるせん断ひずみコンター図 (左から鉛直変位 400 mm, 700 mm, 1000 mm 時点)



(b) 実験における地盤の変形状況 (左から鉛直変位 400 mm, 800 mm, 1200 mm 時点)

図-3 地盤の変形状況の比較 (Case1)

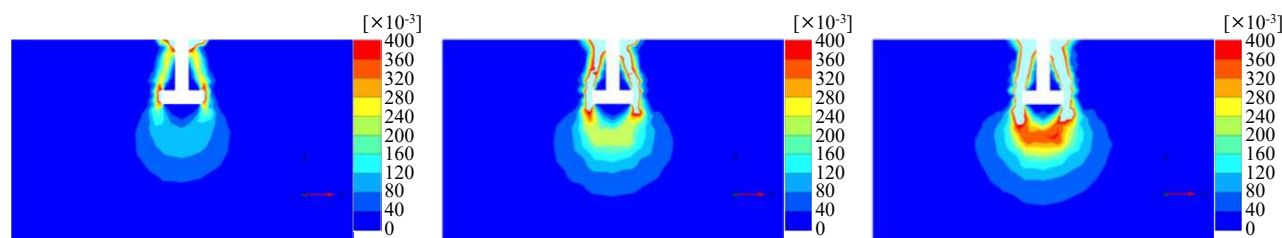


図-4 (a) 解析におけるせん断ひずみコンター図 (左から鉛直変位 400 mm, 700 mm, 1000 mm 時点)

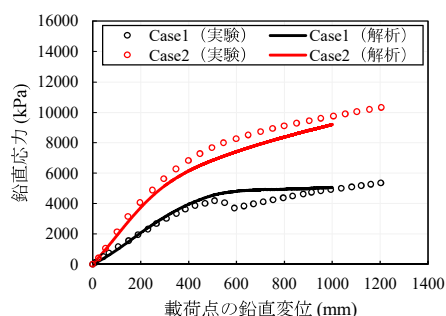


図-2 荷重～変位関係



図-4 (b) 実験における地盤の変形状態

図-4 地盤の変形状況の比較 (Case2)

最大鉛直応力とともに、Case2の方が2倍程度大きくなった。三次元モデルでは、奥行き方向からの地盤のせん断抵抗も期待できるので、地盤の支持力が大きくなったと考えられる。実験と解析で地盤の変形状況を比較したものを図-3 (Case1)、図-4 (Case2) に示す。Case2では実験終了後に地盤を切断して変形状態を確認したため、鉛直変位 1000mm 時点の結果のみを示す。Case1では実験、解析ともに、主働領域の沈下に伴い受働領域が左右にわずかに広がる様子が確認できたが、安定解析法で想定されるような、地表面まで到達する明確な受働領域は観察されなかった。今回の基礎には根入れがあるため、根入れ部分の上載圧によりせん断変形の進行が抑えられたためと考えられる。Case2では、図-4(b)の赤色の点線で示すように、基礎の床板直下にパンチング破壊のような破壊形態がみられた。基礎の床板直下以外には明確なすべり線が見られないことから、局所せん断破壊に近い状態で破壊したと思われる。基礎の床板下部の主働領域の形状は、Case1ではくさび形の鋭い形状となったが、Case2では円形に近い形状となった。これは、Case2のように地盤の変形の自由度が高い条件の場合、せん断変形の領域が分散されるためと考えられる。

4. まとめ

Subloading t_f model を用いた再現解析では、構成モデルの圧縮支持力問題に対する有用性を確認できた。地盤の変形状況の比較では、二次元モデルでは主働領域の沈下に伴う受働領域の発達が観察されたが、三次元モデルでは基礎周囲の地盤の拘束応力によりせん断ひずみが進展しにくいいため、二次元モデルと比べて支持力が発揮されやすいと言える。

1)例えば：Terzaghi, K.: Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., 1943.

2)例えば：Tamura, T., Kobayashi, S., and Sumi, T.: Rigid-plastic finite element method for frictional materials, Soils and Foundations, Vol. 27, No. 3, pp. 1-12, 1987.

3)例えば：LIU, SRENG, 望月, 上野, 坪井: 重力場, 遠心場における水平砂地盤上基礎の支持力実験と変形挙動計測, 地盤工学ジャーナル, 第2巻, 第3号, pp. 139-148, 2007.

4)Nakai・Hinokio: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameters, Soils and Foundations, 44(2), 53-70, 2004.

5)高橋・寺中・岡・中谷・中井: 逆T字基礎の直下で高拘束を受ける砂の Subloading t_f model による圧縮支持力解析 (その1), 本研究発表会, 2025.