

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1)
 ー 豊浦砂の要素試験結果と Subloading t_{ij} model の材料パラメータの決定 ー

砂 構成モデル 圧縮支持力

東電設計(株)
東京電力ホールディングス(株)
大日本土木(株)
(株)地域地盤環境研究所

正会員○ 高橋 秀明
正会員 寺中 吉輝, 非会員 岡 滋晃
正会員 中谷 登
国際会員 中井 照夫

1. はじめに

送電用の鉄塔基礎として一般的に多く採用される逆 T 字基礎は、図-1 に示すように地盤へ根入れされた直接基礎で、引揚荷重には根入れと床板の側面で抵抗し、圧縮荷重には床板の底面で抵抗する支持機構を採用している。近年、宅地造成などに起因して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。従来の水平地盤を対象とした剛塑性解析ではこのような問題に適切に対処出来ないため、地盤の材料特性や地形条件の違いを考慮した解析が必要とされる。特に、逆 T 字基礎の床板直下は拘束圧が大きく変化するため、その挙動の予測には 3 主応力下で低拘束応力下から高拘束応力下までの材料特性を表現できる構成モデルを用いると共に地形構造を考慮した解析をする必要がある。概要集その 2¹⁾では、砂地盤の圧縮支持力に関する遠心模型実験²⁾³⁾と 3 次元の弾塑性有限要素法 (PLAXIS+ t_{ij} model) を用いたシミュレーション解析を報告した。本報は弾塑性有限要素解析で用いる Subloading t_{ij} model⁴⁾の材料パラメータを決めるため実施した要素試験と材料パラメータの決定法を述べる。

2. Subloading t_{ij} model の豊浦砂パラメータの設定方法

豊浦砂に関する Subloading t_{ij} model の材料パラメータを決定した手順を図-2 に示す。材料パラメータの決定に用いた要素試験を右側に、解析パラメータを左側に示して両者を関係づけた。豊浦砂は平均粒径 $D_{50} = 0.24\text{mm}$ の細砂で、遠心模型実験での相対密度は $Dr = 84\%$ である。要素試験は、等方圧密試験と三軸圧縮試験の 2 種類でそれぞれの拘束圧を 60～6000kPa まで 8 種類を設定し、载荷・除荷・再载荷の等方圧縮試験に続いて三軸圧縮せん断試験を実施した。

豊浦砂の正規圧密線 (NCL) は、要素試験から直接決定できないため、 $e \sim \log p$ 関係で限界状態線 (CSL) の勾配を求め、NCL と CSL の勾配が等しくなることより、圧縮指数 ($\lambda = 0.434C_s$) を定めた。限界状態線 (CSL) は、図-3 の破線の直線ように、等方圧縮試験と三軸圧縮試験の 2 つの試験データから、拘束圧が大きい範囲が限界状態に達している実験データと判断して採用した。正規圧密線 (NCL) の位置を決定する N (NCL 上の $p = 98\text{kPa}$ の間隙比) は、等方圧密試験の $e \sim \log P$ 関係の延長線上に位置することから、膨潤曲線の勾配 ($\kappa = 0.434C_s$) は、等方圧密試験の除荷過程から定めた。弾性成分のポアソン比は $\nu = 0.2$ とした。

限界状態のせん断強度比 R_{cs} は三軸圧縮試験を図-4 のように主応力比 (σ_1/σ_3) ～ 軸ひずみ (ε_a) で整理し、ひずみが大きく限界状態における主応力比を意味する。パラメータ R_{cs} も正規圧密状態に近い高拘束圧下の結果を重視した。降伏関数の形状を示すパラメータは $\beta = 2.0$ とした。以上のパラメータを基準に密度と拘束応力の影響に関するパラメータ a を等方圧密試験に対して決定した。パラメータ a の値が大きいほど、正規圧密線に早く接近する。その後三軸圧縮試験の $(\sigma_a - \sigma_r) \sim \varepsilon_a$ 関係の初期剛性やピーク強度を材料パラメータ k_a によって調整した。

3. Subloading t_{ij} model による豊浦砂の要素試験解析

図-2 に示した手順で豊浦砂の Subloading t_{ij} model の材料パラメータを表-1 のように決定し、等方圧密試験の要素解析の結果

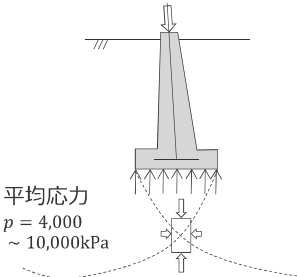


図 1 鉄塔の逆 T 字基礎

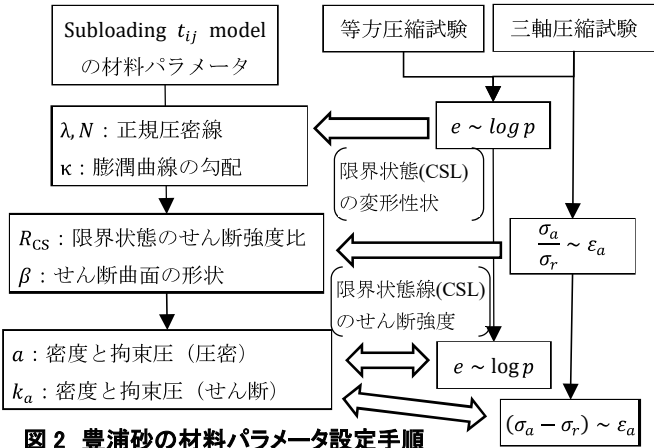


図 2 豊浦砂の材料パラメータ設定手順

表 1 豊浦砂の Subloading t_{ij} model 材料パラメータ

力学特性	パラメータ	記号	値
圧密	圧縮指数	λ	0.074
	膨潤指数	κ	0.004
	大気圧 (98kPa) 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	a	60
せん断	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 1).

H.Takahashi(Tokyo Electric Power Services), Y.Teranaka, S.Oka(Tokyo Electric Power HD), N.Nakatani(Dai Nippon Construction), T.Nakai(Geo-Research Institute)

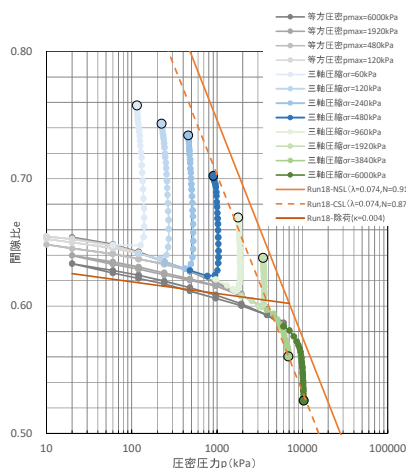


図 3 豊浦砂の $e \sim \log p$ (等方圧密試験と三軸圧縮試験) 関係の実測と Subloading t_{ij} model の NCL と CSL

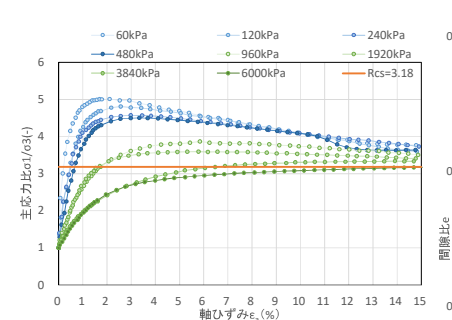


図 4 豊浦砂の三軸圧縮試験の主応力比と軸ひずみの関係と Subloading t_{ij} model のせん断パラメータ R_{cs}

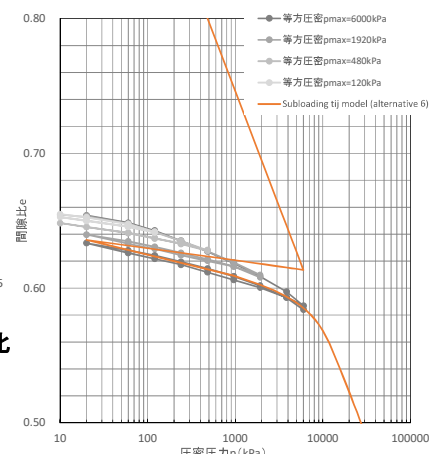


図 5 豊浦砂の等方圧縮試験と Subloading t_{ij} model の要素解析

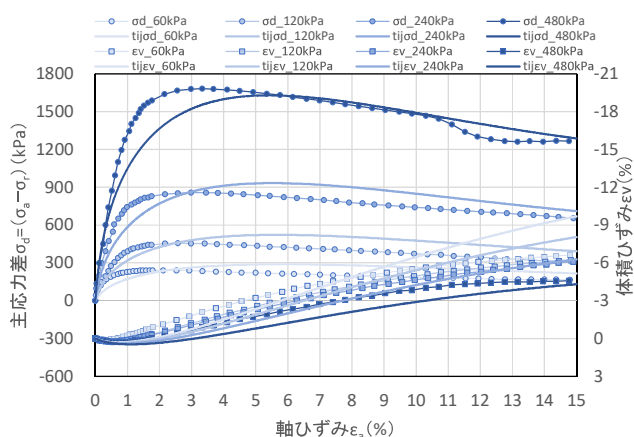
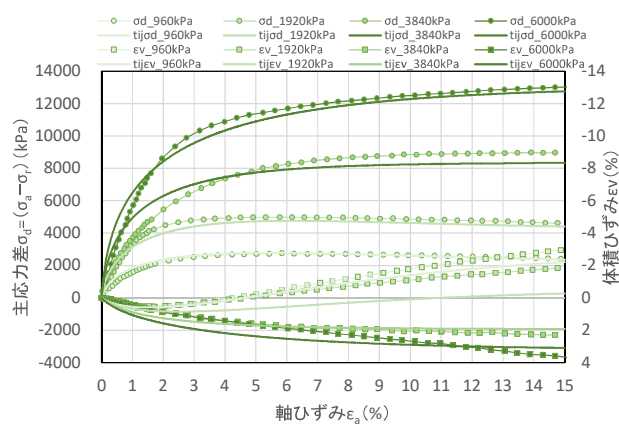


図 6 豊浦砂三軸圧縮試験結果と Subloading t_{ij} model の要素解析



を図-5 に、拘束圧 60～6000kPa の拘束圧の三軸圧縮試験の要素解析結果を図-6 に示す。等方圧密時に砂が過圧密から正規圧密の領域に近づく過程は Subloading t_{ij} model で良く表せている。三軸圧縮時のひずみの増加に伴うせん断応力の変化や高拘束圧になるほど体積変化が膨張から圧縮へ変化する密度・拘束圧の影響も Subloading t_{ij} model は良く表現している。

せん断変形と強度は拘束圧の依存性が高く、拘束圧が高くなるほど粒子破碎などの影響によりせん断強度が小さくなるのが三浦ら⁵⁾の実験により示されている。砂質土は拘束圧が大きくなるほど粒子破碎などの影響によりせん断強度が小さくなる⁴⁾。直接基礎が圧縮力を受けると、基礎直下の地盤は拘束圧が著しく大きくなり、8,000kPa 以上まで上昇するため、弾塑性解析で砂質土の支持力問題を取り扱う際は拘束圧の上昇がせん断挙動に及ぼす影響を地盤の構成式が表現できることが不可欠である。三軸圧縮試験の要素解析から得た砂のせん断強度の解析値と試験値を三浦ら⁵⁾の整理した拘束圧とせん断強度の関係に追記して図-7 に示す。砂の相対密度がやや小さいため、せん断強度 ϕ_s も三浦らの整理結果より小さいが、Subloading t_{ij} model の解析値は拘束圧の増加に伴うせん断強度 ϕ_s の低下が本要素試験や過去の実験値と調和的な関係と判断できる。

4. まとめ

砂質土では拘束圧が砂のせん断強度や変形特性に強く影響するため、要素試験を低拘束応力から高拘束圧まで実施した。その2の解析で用いる Subloading t_{ij} model は密度・拘束圧の違いを含め砂の変形・強度特性を唯一的な材料パラメー表現できる。

1)寺中・岡、高橋、中谷、中井：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）

2)岡、中島、篠口、松本：2 面切土場における逆 T 字基礎の圧縮支持力に関する実験的研究、第 77 回年次学術講演会、土木学会、III-240、2022。

3)寺中、岡、服部、中島：2 面切土場における逆 T 字基礎の圧縮支持力に関する解析的研究、第 79 回年次学術講演会、土木学会、III-364、2024

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)三浦、山内：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

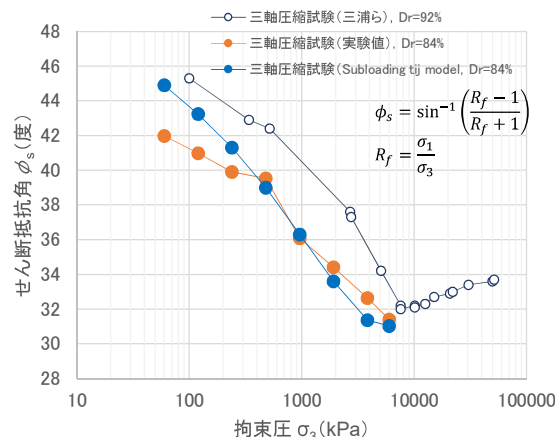


図 7 豊浦砂のせん断強度と拘束圧の関係⁵⁾