

FLIP プログラムの粘性土および杭基礎への適用検討調査

井合 進*

1. 研究の目的

FLIP コンソーシアムでは、地震時の地盤災害に関する新たな FLIP の高度利用技術開発の一環として、圧密沈下に引き続き地震時の粘性土の挙動のモデル化、および、液状化地盤中の杭基礎の挙動に関する課題に焦点を当てた研究開発プロジェクトに取り組んでいる。本研究では、その基礎的な検討として、FLIP で基本とするひずみ空間多重せん断モデルに基づく粘性土のモデル化のアルゴリズムの検討、および、液状化による流動地盤中の杭基礎の遠心模型実験結果についての FLIP プログラムの適用検討調査を行った。

(1) 粘性土のモデル化：ひずみ空間多重せん断モデルは、これまで、砂地盤の液状化解析に用いられてきたが、新たに、粘性土地盤の圧密沈下解析およびこれに引き続き地震時挙動のためのモデル化への展開が求められている。これを目的として、初期応力による応力誘導異方性を考慮した限界状態（砂の Steady state に相当）のモデル化、および、地震応答解析で必要となるひずみ速度依存性（粘性）のモデル化を行った。

(2) 液状化による流動地盤中の杭基礎の挙動：液状化による流動地盤中の杭基礎の挙動は、水平成層地盤の液状化に伴う杭基礎の挙動とは異なり、地盤流動に伴う新たな外力が杭基礎に加わることに伴って発生する幾何的相互作用の影響が著しいことが知られている。このような杭基礎の挙動について、遠心力場での模型実験結果を基に、FLIP 適用検討調査を行った。

2. 研究の方法

(1) 粘性土のモデル化

二次元解析でのひずみ空間多重せん断モデルでは、粒状体の巨視的な応力 σ とひずみ ϵ を以下により関係づける。

$$\sigma = -p\mathbf{I} + \int_0^\pi q \langle \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} \rangle d\omega, \quad \langle \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} \rangle = \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} + \mathbf{n} \otimes \mathbf{t} \quad (1)$$

ここに、 \mathbf{I} は identity tensor, \mathbf{n} と \mathbf{t} は粒子間の接点の垂直および接線方向ベクトル, p は平均有効応力（圧縮を正）, q は仮想単純せん断応力を表し、巨視的なひずみ成分の履歴依存型の関数を用いて以下で与えられる。

$$p = p(\epsilon'), \quad q = q(\gamma), \quad \epsilon' = \epsilon - \epsilon_d, \quad (2)$$

$$\epsilon = \mathbf{I} : \epsilon, \quad \gamma = \langle \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} \rangle : \epsilon$$

限界状態に至るまでのダイレイタンス ϵ_d は、数値解析的な安定性の観点から、柴田(1963)によるせん断応力比型のダイレイタンス¹⁾を、限界状態（下添字 US）の収縮的ダイレイタンスを規定する項として、限定して適用することとし、基本的には、カクテルグラスモデル系のダイレイタンスモデルに基づくものとした²⁾。限界状態でのダイレイタンス ϵ_{dus} は、収縮および膨張のダイレイタンスの和として、 $\epsilon_{dus} = \epsilon_{dus}^c + \epsilon_{dus}^d$ で与える。図-1 のとお

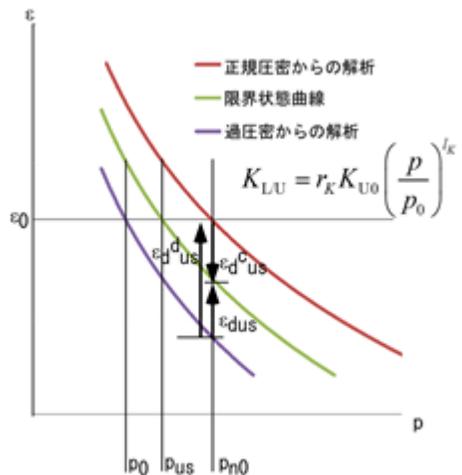


図-1 正規圧密ないし過圧密状態からの解析における体積ひずみ-有効拘束圧力関係

*京都大学防災研究所・教授

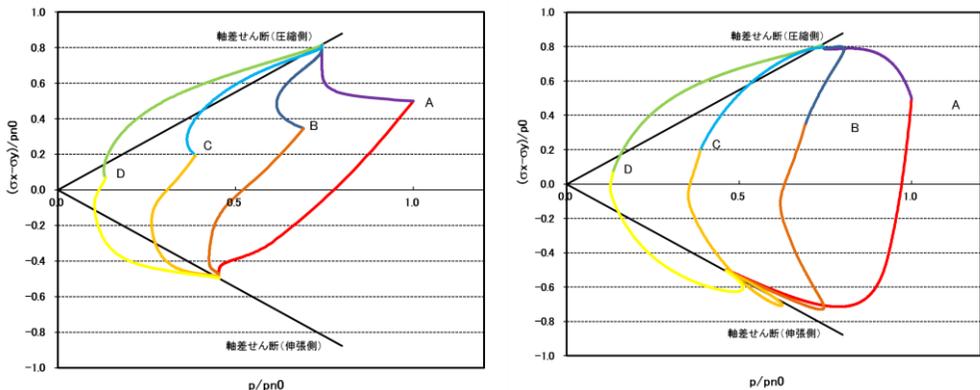
り、正規圧密からの解析では、同曲線が、収縮的ダイレイタンスの発生に応じて、下方へ移動していき、限界状態線に到達する。また、過圧密からの解析では、収縮的ならびに膨張的ダイレイタンスの和で規定されるダイレイタンスの発生に応じて、同曲線が、限界状態線よりも下方から始まる解析では、上方へ移動していき、限界状態線に到達する。

(2)液状化による流動地盤中の杭基礎の挙動

研究目的に記載のとおり、傾斜地盤中に杭基礎模型を設置した遠心模型実験を基に、FLIP 適用検討調査を行った。

3. 得られた成果

粘性土のモデル化については、上に述べた定式化による提案モデルの基本的な挙動を検討するため、過圧密比を $OCR=1, 2, 6, 40$, $K_0=0.6$ とし、同一の間隙比の状態からの非排水単調せん断を行った。解析では、せん断ひずみ増分に比例して発生する収縮的ダイレイタンス増分の比例係数に相当するパラメタ¹⁾と、限界状態における柴田の式による収縮的ダイレイタンスを規定するパラメタ Λ を変化させた。弾塑性モデルの場合には、塑性ポテンシャル面を有するため、 $0 \leq \Lambda < 1$ などの制約条件があるが、提案モデルの場合にはこのような制約条件がなく、対象とする粘土の挙動に即して適切な値に設定することができる。解析の結果は、図-2 に示すとおりとなり、提案モデルは、構造を有する粘土での巻返し(図-2(b))を含め、粘性土の非排水単調せん断挙動を、柔軟かつ精緻に表現することが確認された。



(a) $r_{\epsilon_d^c} = 0.85, \Lambda = 0.554$

(b) $r_{\epsilon_d^c} = 0.085, \Lambda = 0.554$ (構造を有する粘土)

図-2 非排水せん断時の提案モデルの挙動(応力経路)

液状化による流動地盤中の杭基礎の挙動についても、同様に、適用検討調査を行い、その適用性を確認した。

発表論文

井合 進・上田恭平(2016): ひずみ空間多順せん断モデルによる粘性土の力学挙動の表現, 京都大学防災研究所年報, Vol. 59

参考文献

- 1)Iai S, Tobita T, Ozutsumi O, Ueda K. (2011). "Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model." International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 35(3):360-392.
- 2)Shibata, T. (1963): On the volume changes of normally consolidated clays, Disaster Prevention Research Institute Annuals, Kyoto University, Vol.6, pp.128-1344.