

## 粘性土の繰返しせん断挙動の解釈と工学的な扱いに関する考察

(国研) 土木研究所 正会員 ○石村 陽介 谷本 俊輔 佐々木 哲也

**1.はじめに** 現行の液状化判定においては、細粒分が多く塑性の高い粘性土は判定の対象外とされている。しかし、その力学的解釈についてはこれまで十分に説明されていない。本報では、典型的な粘性土の室内試験結果から、その力学的解釈やメカニズムの考察を行った。さらに、著者らが提案している  $F_L$  を指標とした土の繰返しせん断モデル<sup>1)</sup>による室内試験結果の再現を通じて、粘性土の繰返しせん断挙動の工学的な扱いについて考察した。

**2. 典型的な粘性土の室内試験結果** 典型的な粘性土の繰返し非排水三軸試験結果として、関東地方で得られた原位置試料<sup>3)</sup>のうち、埋立粘性土から採取された試料 13-1-1 における代表供試体（繰返し応力比  $CSR=0.294$ ）の試験結果の時刻歴及びヒステリシスを図1に示す。軸差応力  $\sigma_d$ 、軸ひずみ  $\varepsilon_d$  は、それぞれせん断応力  $\tau(=\sigma_d/2)$ 、せん断ひずみ  $\gamma(=1.5\varepsilon_d)$  に換算して示している。なお、試料 13-1-1 の主な物理特性は、細粒分含有率  $F_C=99\%$  程度、50% 粒径  $D_{50}=0.0615\sim 0.0111\text{mm}$ 、塑性指数  $I_p=35.7\sim 49.7$ 、繰返し三軸強度比（軸ひずみ両振幅  $\varepsilon_{DA}=5\%$ ） $R_{L20}=0.477$  であった。

試験結果の時刻歴を見ると、荷重開始直後から試験終了まで徐々にひずみが発達し、液状化の発生基準とされる  $\gamma_{DA}=7.5\%$  に到達しているが、過剰間隙水圧比は最大でも  $\Delta u/\sigma'_c=0.7$  程度と低い。このため、応力・ひずみ関係において接線剛性が極端に低下する領域が現れないという点が、典型的な砂の液状化挙動とは異なる。このため、塑性の高い粘性土を判定対象外とする現在の液状化判定法の扱いには、一定の合理性があると言える。一方で、繰返しせん断試験におけるひずみ振幅のみに着目した液状化発生基準には、再考の余地があると考えられる。

**3. 粘性土の繰返しせん断挙動に関する考察** 上述したような粘性土の繰返しせん断挙動の特徴は、典型的な砂の繰返しせん断挙動と大きく異なる点である。

実際に、文献<sup>1)</sup>で示した砂では、荷重初期ではほとんどひずみが発達せず、過剰間隙水圧比が  $\Delta u/\sigma'_c=0.95$  付近に達すると急激にひずみが発達する傾向が確認されている。また、応力・ひずみ関係において、接線剛性が極端に低下する領域が確認されている。

2.で述べたような粘性土の繰返しせん断挙動を特徴付ける要因は、①初期せん断剛性が低いこと、②負のダイレイタンスの累積量に対して圧縮性が高いこと、

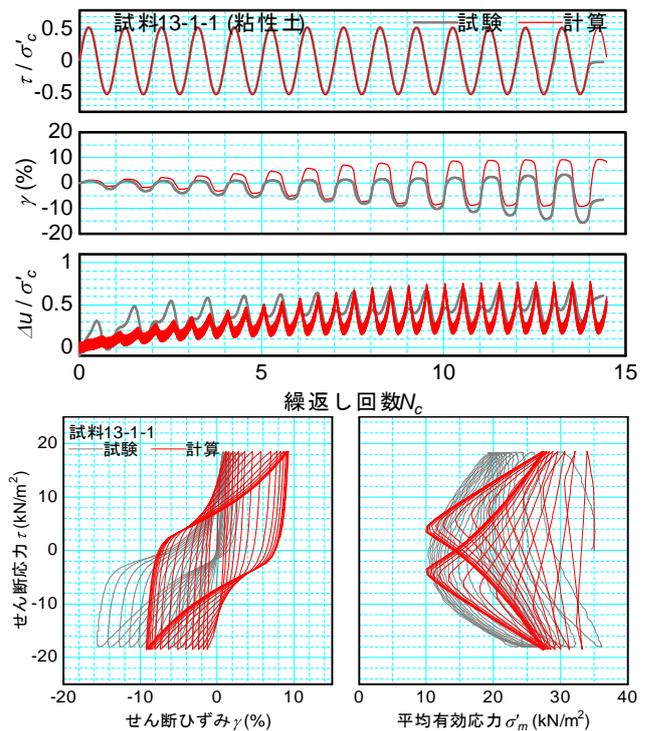


図1 代表供試体の室内試験結果と計算結果

にあると考えられる。初期せん断剛性が低いため、過剰間隙水圧比が低いに関わらず、液状化発生基準とされるひずみに容易に到達しうると考えられる。また、負のダイレイタンスの累積量に対して圧縮性が高いため、過剰間隙水圧の上昇が鈍く、顕著な剛性低下が生じないと考えられる。

事実、試料 13-1-1 の初期せん断弾性係数比  $\mu_0$  (=初期せん断剛性  $G_0$ /初期拘束圧  $\sigma'_c$ ) は 191~237、繰返しせん断後の再圧密体積ひずみは  $\varepsilon_v=0.0224\sim 0.0274$ 、圧縮指数は  $\lambda=0.031\sim 0.061$  であるのに対し、文献<sup>1)</sup>で示した砂質土は、 $\mu_0=436\sim 604$ 、 $\varepsilon_v=0.0185\sim 0.0457$ 、 $\lambda=0.012\sim 0.019$ 、となっており、砂質土に比べ、初期せん断剛性が小さく、負のダイレイタンスの累積量に対して圧縮性が高いことが確認できる。

**4. 数値モデルの概要** 以下に、著者らが提案している  $F_L$  を指標とした数値モデルの概要を示す。詳細は文献<sup>1)</sup>を参照されたい。

せん断応力  $\tau$  を平均有効応力  $\sigma'_m$  とせん断応力比  $Q$  の積として表すと、その増分形は式(1)で表される。

$$d\tau = Qd\sigma'_m + \sigma'_m dQ \quad (1)$$

$\sigma'_m$  は体積ひずみ  $\varepsilon_v$  とダイレイタンス  $\varepsilon_d$  から、せん断応力比  $Q$  はせん断ひずみ  $\gamma$  からそれぞれ定まるものとし、各々の関係を次の増分形で表す。

$$d\sigma'_m = D^c (d\varepsilon_v - d\varepsilon_d) \quad (2)$$

キーワード  $F_L$ , 粘性土, 繰返しせん断, 液状化

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 (国研) 土木研究所 土質・振動チーム TEL 029-879-6771

$$dQ = D^s dy \quad (3)$$

$D^c$ ,  $D^s$  はそれぞれ土の圧縮特性, 内部摩擦特性を表す接線勾配である. 圧縮特性 ( $\sigma'_m$  と  $\varepsilon_s$  の関係) については,  $e$ - $\log \sigma'_m$  関係を線形と仮定した上で, ダイレイタンシー  $\varepsilon_d$  を加味して定式化し, 内部摩擦特性 ( $Q$  と  $\gamma$  の関係) には Hardin-Drnevich モデルを適用している.

ダイレイタンシー  $\varepsilon_d$  については, 繰返しせん断によって非可逆的に収縮する成分 (負のダイレイタンシー)  $\varepsilon_d^f$  と, 反サイクルごとに可逆的な膨張・収縮を生じる成分 (正のダイレイタンシー)  $\varepsilon_d^d$  の和として表している. このうち, 負のダイレイタンシー  $\varepsilon_d^f$  については, 液状化強度曲線 (繰返し応力比  $CSR$  と液状化発生に要する繰返し回数  $N_{cl}$  の関係), 水圧上昇曲線 (過剰間隙水圧比  $R_u$  と繰返し回数比  $R_N (= N_c/N_{cl})$  の関係) を次式で与えた上で,

$$CSR = a(N_c/N_{cr})^{-b} \quad (4)$$

$$R_u = \begin{cases} R_{ur} R_N^{p_1} & (R_N < 1) \\ R_{u\max} - (R_{u\max} - R_{ur}) R_N^{-p_2} & (R_N \geq 1) \end{cases} \quad (5)$$

累積損傷度法と上述の圧縮特性を考慮することで表現している. ここに,  $a$  は液状化強度比の代表値,  $b$  は液状化強度曲線の勾配,  $N_{cr}$  は基準繰返し回数 (20 回),  $R_{ur}$  は基準過剰間隙水圧比,  $p_1$ ,  $p_2$  はそれぞれ初期液状化前後の水圧上昇指数,  $R_{u\max}$  は過剰間隙水圧比の上限値,  $e_0$  は初期間隙比である.

正のダイレイタンシー  $\varepsilon_d^d$  は, 井合らの方法<sup>2)</sup>を参考に, 次の増分形で与えている.

$$d\varepsilon_d^d = \begin{cases} b_d^d c_d^d \{Q_{pi} \operatorname{sgn}(Q - Q_u) - Q\} d\gamma & (\text{変相線到達前}) \\ -c_d^d Q d\gamma & (\text{変相線到達後}) \end{cases} \quad (6)$$

$Q_{pi}$  は変相応力比,  $Q_u$  は除荷点におけるせん断応力比,  $b_d^d$ ,  $c_d^d$  は正のダイレイタンシーの調整パラメータである.

**5.  $F_L$  を指標とした数値モデルによる再現計算** 試料 13-1-1 の試験結果を対象に, 著者らが提案している  $F_L$  を指標とした数値モデルによる再現計算を行った. 数値計算に用いた材料定数の一覧を設定方法と合わせて表 1 に示す. 材料定数は, 可能な限り, 室内試験の結果から直接的に設定している.  $F_L=1$  に相当する基準過剰間隙水圧比  $R_{ur}$  は,  $\gamma_{DA}=7.5\%$  相当のひずみが生じた時の過剰間隙水圧比を基に  $R_{ur}=0.6$  としている. 室内試験の結果からも論述したように, 粘性土のパラメータとして, 初期せん断弾性係数比が  $\mu_0=211$  と低いこと, 負のダイレイタンシーの最大値  $\varepsilon_d^f=0.0274$  に対して圧縮指数が  $\lambda=0.061$  と大きいこと, が特徴的である.

再現計算の結果は, 室内試験の結果と合わせて図 1 に示した. 室内試験結果に基づいてパラメータを設定した結果, 数値計算により, ひずみの発達速度や過剰

表 1 材料定数一覧

材料定数	試料13-1-1	設定方法
圧縮特性	$e_0$	1.905 液状化試験後の圧密記録
	$\lambda$	0.061 液状化試験後の圧密記録
内部摩擦特性	$\mu_0$	211 微小繰返し載荷
	$Q_f$	0.700 ストレスパスから読み取り
	$h_{max}$	0.35 動的変形特性(排水条件)の一般値
負のダイレイタンシー	$a$	0.468 液状化強度曲線のフィッティング
	$b$	0.119 液状化強度曲線のフィッティング
	$p_1$	0.8 水圧上昇曲線との整合性確認
	$p_2$	3.7 水圧上昇曲線との整合性確認
	$\varepsilon_d^f$	0.0274 液状化試験後の再圧密記録
正のダイレイタンシー	$Q_{pi}$	0.423 ストレスパスから読み取り
	$c_d^d$	0.32 試行錯誤

間隙水圧の時刻歴, 応力・ひずみ関係に見られる接線剛性の低下度合い, といった粘性土の繰返しせん断挙動の特徴を良好に再現できていることが確認された.

文献<sup>1)</sup>で示した砂質土での試算結果と合わせると, 本モデルを適用することにより, 液状化しやすい土 (砂質土) ~ 液状化しにくい土 (粘性土) の繰返しせん断挙動を詳細に表現できる可能性も考えられる.

上述のように, 繰返しせん断試験による液状化発生基準には再考の余地があると考えられるが, その一方で, 本モデルのような表現方法を適用すれば, ひずみ振幅のみによって液状化の発生有無を判定するのではなく, 繰返しせん断による砂質土~粘性土の変形特性を統一的に表現できる可能性が考えられる.

**6. 結論** 本検討により得られた知見を以下に示す.

- (1) 細粒分が多く高塑性の粘性土では, 繰返し非排水せん断に対して載荷初期からゆるやかにひずみが発達し, 砂の液状化の発生基準に相当するひずみが生じうるものの, 過剰間隙水圧の上昇が鈍く, 応力・ひずみ関係において接線剛性が極端に低下する領域が現れない.
- (2) 上記のような粘性土の繰返しせん断挙動は, 初期せん断剛性が小さいこと, 負のダイレイタンシーの累積量に対して圧縮性が高いことに起因するものと考えられる.
- (3) 構築した数値モデルにより, 粘性土の繰返しせん断挙動を良好に再現できることが確認された. このことは, 繰返しせん断による砂質土~粘性土の変形特性を統一的に表現できる可能性を示唆している.

参考文献

- 1) 谷本ら:  $F_L$  を指標とした土の液状化挙動に関する数値モデル, 第 15 回日本地震工学シンポジウム, pp.2817-2826, 2018.12.
- 2) 井合ら: 砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンシー関係, 京都大学防災研究所年報, 第 51 号 B, pp.291-303, 2008.6.
- 3) 佐々木ら: 細粒分を含む砂の液状化強度の評価法に関する再検討, 土木研究所資料, 第 4352 号, 2016.3.