

初期構造異方性を有する飽和砂のせん断試験に対する要素シミュレーション

日本工営株式会社 正会員 ○森 篤史 正会員 石川 裕規
 パシフィックコンサルタンツ株式会社 正会員 芋野 智成 正会員 佐藤 成
 株式会社不動テトラ 森鼻 章治
 京都大学防災研究所 正会員 上田 恭平
 関西大学 正会員 一井 康二

1. はじめに

地盤材料は堆積環境や種々の繰返し荷重等の要因により初期構造異方性を有し、異方性は材料変形・強度特性に影響することが知られている。初期構造異方性が認められる材料に対して、それらを考慮したひずみ空間多重せん断モデル¹⁾の改良および将来的な FLIP プログラムへの導入を目的に既往の室内試験(中空ねじり試験)に対する要素シミュレーションを行い、パラメータの設定法や応答への影響について検討した。

2. 検討対象とした室内試験

UtheyakumarとVaid²⁾は非排水条件下において三主応力方向を変化させ載荷した場合の砂の挙動について基礎的研究を行っている。試験は非排水ねじりせん断試験機を用いて、主応力方向(α_σ), $b=(\sigma_2-\sigma_3)/(\sigma_1-\sigma_3)$, 平均主応力(σ_m')を一定に保持した単調載荷試験が行われている。その結果、定常状態時(SS)および準定常状態時(QSS)のせん断応力は、図-1 に示すように α_σ によって異なるが、SS, QSS の摩擦角は主応力方向によらず試料の固有の値となることを報告している。本検討では、細粒分が少なく平面ひずみ条件に近い Fraser River Sand($\sigma_{mc}'=200\text{kPa}$, $b=0.5$, $Dr_c=30\%$, $D_{50}=0.3\text{mm}$)の試験結果を対象に要素シミュレーションを試みた。

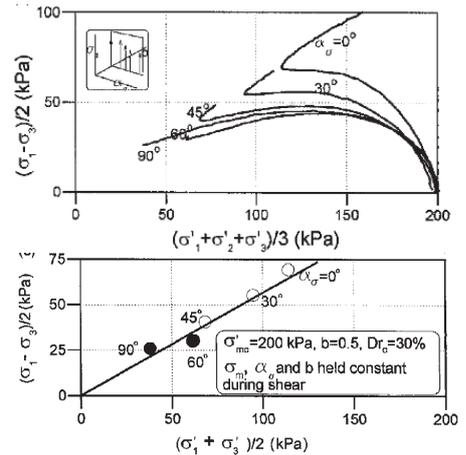


図-1 α_σ と SS, QSS 関係

3. 検討方法・検討概要

等方圧密(200kPa)後に非排水条件で任意方向のせん断を受ける1要素モデルの強制変位による単調載荷を行い、応力ひずみ関係、有効応力経路の適合性、初期異方性を含めたパラメータの感度分析を行った(図-2, 図-3)。また、最も適合性が高いパラメータを用いた二次元モデルでの自重解析を行い、初期異方性パラメータの有無による影響の確認を行った。

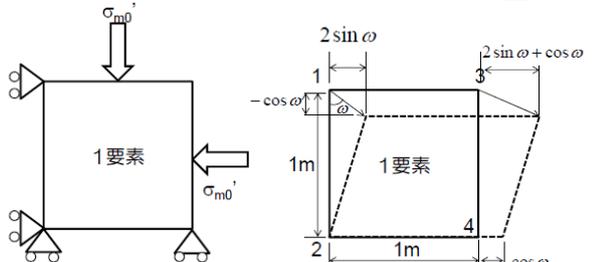


図-2 等方圧密後の任意方向の非排水せん断モデル

$$F(\theta - \theta_0) = 1 + a_1 \cos 2(\theta - \theta_0) + a_2 \cos 4(\theta - \theta_0)$$

$$\sigma' = m_v \bar{\sigma}_0 \left[\int_0^{2\pi} F(\theta - \theta_0) f_n(\theta) E(\theta) \mathbf{n} \otimes \mathbf{n} d\theta + \int_0^{2\pi} F(\theta - \theta_0) f_t(\theta) E(\theta) \mathbf{t} \otimes \mathbf{n} d\theta \right]$$

θ ($^\circ$)	ω ($^\circ$)	a_1	a_2
0	0	0.0~0.5	0.0~0.5
30	60		
45	90		
60	120		
90	180		

図-3 構成式及び異方性パラメータ

4. 検討結果

(1)初期パラメータの設定結果

初期パラメータ設定は図-4 に示す手順で行った。 $b=0.5$ の条件下では $p=(\sigma_1'+\sigma_2'+\sigma_3')/3=(\sigma_1'+\sigma_3')/2$ となることから、図-5 の有効応力経路より $\alpha_\sigma=0^\circ$ をターゲットに $\tau_f=\sigma_m' \cdot \sin\phi_f$ から $\phi_f=40.0^\circ$ とした。また、図-1 より $\phi_p=33.0^\circ$ とし、この条件で液状化強度曲線に適合する CGM パラメータを設定した。最後に異方性は無視した状態で $\alpha_\sigma=0^\circ$ の単調載荷特性に適合するように修正を行った。その結果、表-1 に示すパラメータセットが得られた。

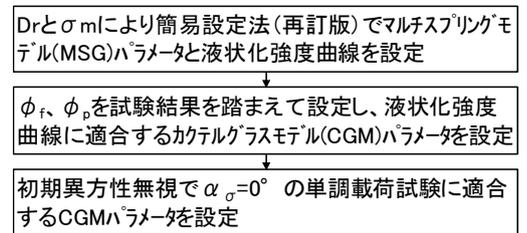


図-4 初期パラメータ設定手順

(2) 異方性パラメータおよびカクテルグラスモデルパラメータに関するケーススタディ

初期パラメータを基本に異方性パラメータ a_1, a_2, ω_0 および CGM パラメータの感度解析を実施した。試験体は水平方向の堆積であり $\omega_0=180^\circ$ で一定、CGM パラメータは事前の試解析を踏まえ $r_{edc}, r_{ed}, q_2, r_k$ の 4 パラメータを検討対象とした。感度解析の結果、 $r_{edc} \times r_{ed} = 1$ の条件のもと、 q_2, r_k , 異方性パラメータ a_1, a_2 を調整して適合するパラメータを得た(図-6)。

キーワード 初期構造異方性, 単調載荷試験, 有効応力解析

連絡先 〒102-8539 東京都千代田区九段北 1-14-6 3F 地盤技術部 TEL 03-3238-8355

表-1 FrazerRiverSandの基本特性とCGMパラメータの初期設定結果

基本特性	相対密度 $D_r(\%)$	30.0	せん断変形特性	初期せん断剛性 $G_m(\text{kPa})$	30500	液状化特性	変相角 $\phi_p(^{\circ})$	33.0	$r_k=r_k'$	0.15
	最大間隙比 e_{max}	1.00		体積弾性係数 $K_m(\text{kPa})$	79500		ϵ_{dm}	0.20	S1	0.005
	最小間隙比 e_{min}	0.68		基準化拘束圧 $\sigma'_m(\text{kPa})$	200.0		r_{dc}	4.25	c_1	1.0
	間隙比 e	0.905		ポアソン比 ν	0.33		r_{ed}	0.225	q_1	1.0
	土粒子比重 G_s	2.72		拘束圧依存パラメータ m_G, m_K	0.5		q_2	1.0	r_{mmp}	0.5
	細粒含有率 $F_c(\%)$	0.0		内部摩擦角 $\phi_i(^{\circ})$	40.0		l_k	2.0	q_{us}	0.0
	間隙率 n	0.48		粘着力 $C(\text{kPa})$	0.0		h_{maxL}	0.0		
	湿潤密度 $\rho_s(\text{t/m}^3)$	1.9		最大減衰定数 h_{max}	0.24					

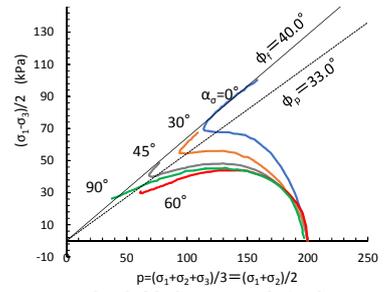


図-5 内部摩擦角 ϕ_f , 変相角 ϕ_p

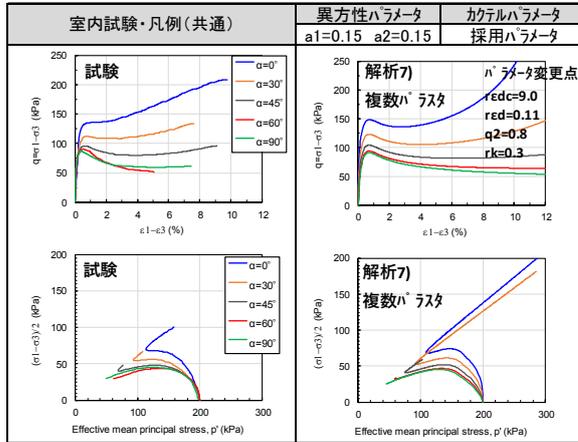


図-6 ケーススタディ結果

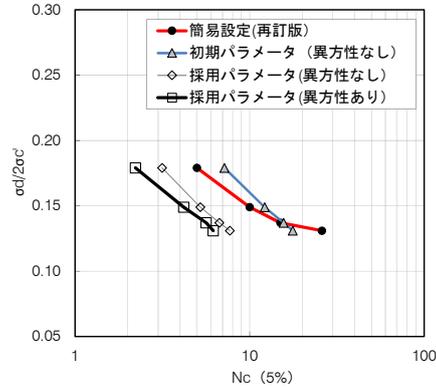


図-7 液状化強度曲線比較

採用パラメータにて液状化強度を算出した結果を図-7 に示す. 液状化強度曲線は, 簡易設定法を目標とした初期パラメータと比べ, 採用パラメータは液状化強度が低下しており, 異方性を考慮するとさらに強度が低下する結果となっている.

(3) 盛土を想定した二次元モデルの試験解析

高さ 4.7m の堤防盛土を想定した図-8 に示す寸法の二次元モデルを構築し, 非排水条件下で静的な初期自重解析 (重力加速度を 1g, 2g, 3g) を行った. 土層は CGM モデル要素, 間隙水要素は排水条件とした. 解析パラメータは前述の採用パラメータ用い, 堆積角の影響を確認するため, $\omega_0=180^{\circ}, 90^{\circ}, 270^{\circ}$ で比較し, 計 9 ケースの試験解析を行った. 図-9 に代表ケースの結果として重力加速度 3g ケースのせん断ひずみ γ_{xy} 分布を示す. $\omega_0=270^{\circ}$ で γ_{xy} が最も大きく, 異方性なしと $\omega_0=180^{\circ}$ はほぼ同一の結果となっており, 堆積方向が同じ水平であるためと解釈できる. 図-8 に示した堆積角のイメージの通り, 270° が最も変形しやすい性状となっており, 感覚的に整合する結果が得られた.

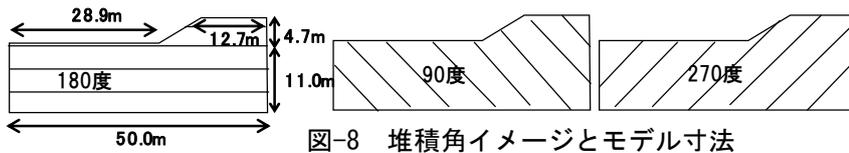


図-8 堆積角イメージとモデル寸法

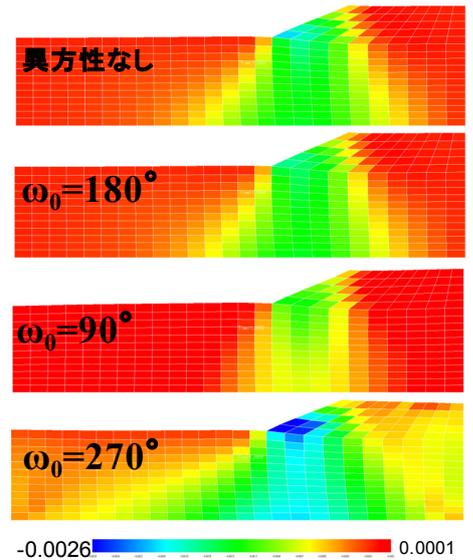


図-9 せん断ひずみ分布図

5. まとめ

本検討では主応力方向を変化させた文献 2) の試験結果 (軸差応力~平均主応力関係, 軸差応力~ひずみ関係) を対象に要素シミュレーションを実施した. 以下に過程と結果を整理して示す.

1. CGM パラメータは, 試験結果をもとに主応力方向の変化によらず ϕ_p は定常状態, 準定常状態の摩擦角は試料の固有の値で一定であるとの論旨を踏まえ, $\phi_p=33.0^{\circ}$ とした. 相対密度 D_r , 拘束圧 σ'_m より簡易設定法 (再訂版) を用いて液状化強度曲線を推定し, $\alpha_0=0^{\circ}$ の有効応力経路, 応力ひずみ履歴をターゲットに CGM 初期パラメータを設定した.
2. 既往の室内試験に対する要素シミュレーションの感度解析結果, 異方性パラメータと CGM パラメータの調整により軸差応力や応力経路は試験結果と調和的となることが確認された.
3. 高さ 4.7m の盛土地盤の非排水二次元自重解析を実施し, 異方性の影響について検討を行い, 異方性の考慮および堆積角の違いが盛土地盤の変位や応力状態に少なからず影響を及ぼす可能性が確認された.

謝辞: 本検討は FLIP コンソーシアム WG の活動の一環として実施されたものである. 関係者の方々に謝意を表します.

参考文献: 1) Ueda, K., Iai, S.: Constitutive modeling of fabric anisotropy in a strain space multiple mechanism model for granular materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geotechnics, 43(3), 708-737, 2018. 2) M. Uthayakumar and Y.P. Vaid: Static liquefaction of sands under multiaxial loading, Can. Geotech. J., 35, 273-283, 1998.