

III-298 主応力回転を考慮したモデルによる地中構造物の液状化解析

関東大林組技術研究所 正会員 ○伊 藤 浩 二
同 上 正会員 表 佑 太 郎

1. まえがき

地震時の液状化による地中構造物の挙動を予測するにあたっては、地盤材料の変形挙動を適切に表現できる構成モデルをもちいることが重要である。そこで、二次元有効応力解析プログラム"DIANA-J"の材料構成モデルの1つである"Multi-mechanism"モデル中に、松岡等¹⁾により提案されている二次元下の主応力回転による変形成分の導入をおこない、非排水繰返し単純せん断試験ならびに模型振動実験のシミュレーションから本モデルの適用性を検討した。

2. "Multi-mechanism"モデルへの主応力回転成分の導入

主応力回転を考慮した"Multi-mechanism"モデルのkメカニズム(k=1,2,3)の全塑性ひずみ増分を、式-(1)と仮定する。

$$\{d\varepsilon^p\}_k = \{d\varepsilon^p\}_{s,k} + \{d\varepsilon^p\}_{ic,k} + \{d\varepsilon^p\}_{R,k} \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 $\{d\varepsilon^p\}_k$: kメカニズムの全塑性ひずみ増分

$\{d\varepsilon^p\}_{s,k}$: せん断による 塑性ひずみ増分

$\{d\varepsilon^p\}_{ic,k}$: 等方圧密による 塑性ひずみ増分

$\{d\varepsilon^p\}_{R,k}$: 主応力回転による塑性ひずみ増分

最初に松岡モデルの $\{d\varepsilon^p\}_{s,k}$ 、 $\{d\varepsilon^p\}_{R,k}$ の大きさを規定する比例定数 $\lambda_{s,k}$ 、 $\lambda_{R,k}$ と"Multi-mechanism"モデルの $\lambda_{s,k}$ は、単調載荷時にそれぞれ式-(2)、(3)、(4)で表現される。

$$\lambda_{s,k} = \frac{k_s \cdot \sin^2 \phi_r \cdot \cos \phi_{mo}}{(\sin \phi_r - \sin \phi_{mo})^2} d\phi_{mo} \quad \text{--- (2)}$$

$$\lambda_{R,k} = \frac{2 \cdot k_s \cdot \sin \phi_r \cdot \sin \phi_{mo}}{(\sin \phi_r - \sin \phi_{mo})} d\alpha \quad \text{--- (3)}$$

$$\lambda_{s,k} = \frac{a_m \cdot \sin \phi_r \cdot \cos \phi_{mo}}{\mu_k \cdot (\sin \phi_r - \sin \phi_{mo})^2} d\phi_{mo} \quad \text{--- (4)}$$

$$\lambda_{R,k} = \frac{2 \cdot a_m \cdot \sin \phi_{mo}}{\mu_k \cdot (\sin \phi_r - \sin \phi_{mo})} d\alpha \quad \text{--- (5)}$$

ここに、 ϕ_{mo} : mobilized angle ϕ_r : 破壊時の内部摩擦角 α : 主応力軸の回転角

k_s , a_m : 硬化パラメータ μ_k : ダイレタンシーパラメータ

そこで、式-(2)、(4)から得られる $k_s = a_m / (\mu_k \cdot \sin \phi_r)$ の関係を式-(3)に代入し、式-(5)により、従来の"Multi-mechanism"モデルのパラメータから主応力回転による $\lambda_{R,k}$ を算定している。また除荷・再載荷時は、繰返し載荷時の硬化パラメータ a_c から k_s を評価している。

3. 非排水繰返し単純せん断試験のシミュレーション

主応力回転を考慮した"Multi-mechanism"モデルにより、非排水繰返し単純せん断試験($d\varepsilon_x = d\varepsilon_y = d\sigma_x = 0$)の要素シミュレーションをおこない、主応力回転の効果について検討する。ここでモデルパラメータは、岐阜砂($Dr=30\%$)による液状化強度試験から得られているせん断力比 $R=0.21$ 、液状化に至るまで

表-1 解析ケースと解析条件(unit:KN/m²)

ケース	回転	σ'_x	σ'_y	σ'_z	$\tau_{xy, max}$
CASE 1	有	98	98	98	20.58
CASE 2	無	147	73.5	73.5	20.58
CASE 3	有	147	73.5	73.5	20.58

表-2 モデルパラメータ

せん断	ϕ_r	37.7°	圧密	λ_c	0.024
	C	1.00		λ_s	0.005
	μ_{max}	1.20		e_o	1.056
	S_c	0.0035	弾性	G_o	27440
	a_m	0.0002		ν	0.33
	a_c	0.0001		G_o (unit: KN/m ²)	

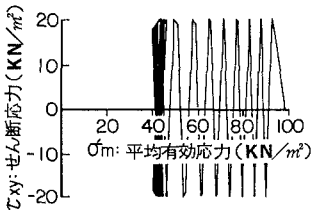


図-1 $\tau_{xy}-\sigma'_m$ 関係(CASE 1)

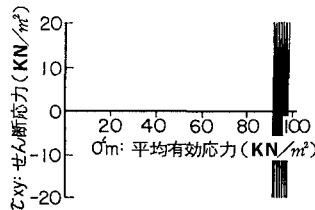


図-2 $\tau_{xy}-\sigma'_m$ 関係(CASE 2)

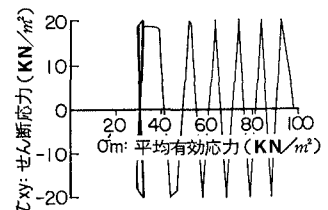


図-3 $\tau_{xy}-\sigma'_m$ 関係(CASE 3)

の繰り返し回数 $N_1=20$ をほぼ満足する条件から設定している。

解析ケースと解析条件、モデルパラメータを表-1,2に示す。このように初期平均有効応力 σ'_{mi} 、作用せん断応力 $\tau_{xy, max}$ が等しい条件で主応力回転の有無、静止土圧係数 K_0 の異なるCASE 1~3について応力制御の解析をおこなっている。

CASE 1~3の有効応力経路 $\tau_{xy}-\sigma'_m$ 関係を図-1~3に示す。主応力回転を考慮しないCASE 2では、CASE 1と比較して液状化強度がかなり大きく算定され、一般的にいわれる、等方・異方圧密状態にかかわらず同じRでは液状化強度がほぼ等しくなるという傾向と異なっている。一方CASE 3では、CASE 1と同様の有効応力経路を示しており、主応力回転を考慮することにより液状化強度等の砂のせん断変形特性を定量的に表現できるようである。

4. 模型振動実験のシミュレーション

二次元有効応力解析プログラム"DIANA-J"の材料構成則に関する"user-subroutine"として、主応力回転を考慮した"Multi-mechanism"モデルを組み込み、地盤-軽量地中構造物系の模型振動実験のシミュレーションから本モデルの適用性を検討する。尚解析では、 $k=3$ の1つのメカニズムのみ機能すると仮定している。

解析モデルを図-4に示す。ここに、構造物模型の単位体積重量は 1.02tf/m^3 、周辺地盤(岐阜砂)の飽和単位体積重量は 1.80tf/m^3 である。また岐阜砂のモデルパラメータは、せん断弾性係数 G_0 を除いて表-2に示す値をもちいている。尚入力波は、振動数4Hz、波数20波、継続時間6秒、最大加速度振幅50galの正弦波である。

最初に、液状化時の構造物に作用する浮上力に相当する構造物直下W1と、自由地盤W2の過剰間隙水圧の経時変化を模型振動実験と比較した結果を図-5(a), (b)に示す。また、W1とW2の $\tau_{xy}-\sigma'_m$ 関係の解析結果を図-6(a), (b)に示す。

このように解析結果は、加振初期に主応力回転が卓越するために過剰間隙水圧の発生が大きく、その後の加振に対しては、cyclic mobility現象が顕著に生じると伴に主応力回転が減少するためその増加が抑えられる実験結果を適切に表現していることがわかる。

次に、液状化時の構造物の浮上量に相当する構造物天端D1と、自由地盤の地表面D2の鉛直変位の経時変化を図-7(a), (b)に示す。このように解析による残留変形量は、模型振動実験と比較して小さく算定されているが、 $k=1, 2, 3$ を考慮した厳密なモデルをもちいることによりシミュレーション可能と思われる。

尚主応力回転を考慮した"Multi-mechanism"モデルの主要ルーチンは、東京大学石原教授、佐藤工業(株)吉田氏より提供を受けた従来モデルのルーチンに機能追加をおこなったものである。

5. まとめ

- (1) 従来の"Multi-mechanism"モデルに主応力回転の効果を導入することにより、室内試験で得られる液状化強度特性を定量的に表現できるようである。
- (2) 上記モデルをもちいた二次元有効応力解析による模型振動実験のシミュレーションから、液状化により生じる地盤の過剰間隙水圧、残留変形等を適切に予測可能であることが確認された。

参考文献 1) Matsuka et al. (1987): A constitutive model ---, Soils and Foundations, Vol. 27, pp. 73-88

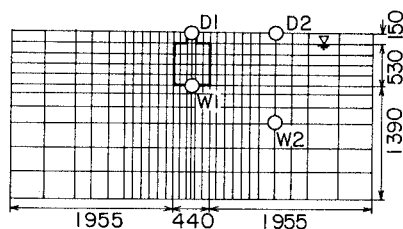


図-4 解析モデル

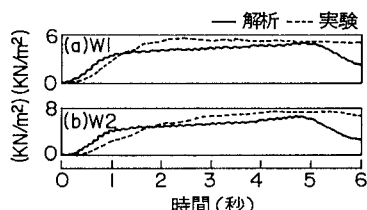


図-5 過剰間隙水圧の経時変化

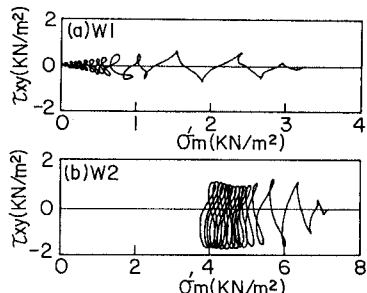


図-6 $\tau_{xy}-\sigma'_m$ 関係

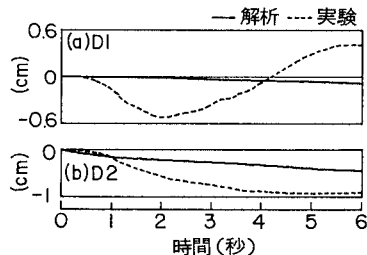


図-7 鉛直変位の経時変化