

III-284

液状化解析で用いる地盤構成則に関する考察

大林組技術研究所 正会員 伊藤 浩二

" 正会員 鳥井原 誠

" 正会員 松田 隆

1. まえがき

本研究では、地震・波浪等の変動荷重に対して、地盤の非線形挙動が構造物ならびに地盤の動的安定性に与える影響や構造物に作用する動的外力を評価しうる応答解析手法を開発し、種々の境界値問題への適用性の検討を行っている。本報では、導入した地盤構成モデルに対し(松岡により提案されたモデルに弾性成分を考慮¹⁾)、砂材料の非排水せん断試験で観測される変相角近傍のダイレタンシー挙動に着目したパラメータ特性の検討とそのモデル化について述べる。

2. 地盤構成モデル

本モデルの塑性ひずみ増分は、一般の弾塑性モデルと同様に(1)式の流れ則に従う。

$$d\varepsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial g}{\partial \sigma_{ij}} = d\varepsilon_1^p \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_{ij}} + d\varepsilon_3^p \frac{\partial \sigma_3}{\partial \sigma_{ij}} \quad (1) \quad d\lambda_s = \frac{k_s \sin^2 \phi_f \cos \phi_{m0}}{(\sin \phi_f - \sin \phi_{m0})^2} d\phi_{m0} \quad (2)$$

$$d\lambda_r = \frac{2k_s \sin \phi_f \sin \phi_{m0}}{\sin \phi_f - \sin \phi_{m0}} d\alpha \quad (3) \quad d\lambda_{sc} = \frac{k_c \sin \phi_f \sin \phi_{m0}}{\sin \phi_f - \sin \phi_{m0}} \frac{d\sigma_m}{\sigma_m} \quad (4)$$

ここに σ_{ij} :応力テンソル、 σ_1 :主応力であり、 $d\varepsilon_{ij}^p$:塑性ひずみ増分テンソル、 $d\varepsilon_1^p$:塑性主ひずみ増分、 $d\lambda$:比例定数、 g :塑性ポテンシャルは、せん断成分((2)式)、主応力回転成分((3)式)、異方圧密成分((4)式)の各々で評価される。また ϕ_f :破壊時の内部摩擦角、 ϕ_{m0} :モビライズド角、 k_s , k_c は硬化パラメータである。ここで(1)式の $d\varepsilon_{ij}^p$ は、(5)式の応力-ダイレタンシー関係と(6)式から決定される。

$$\frac{d\varepsilon_1^p + d\varepsilon_3^p}{d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_3^p} = \frac{2\mu}{\lambda} \cos \phi_{m0} \zeta - \frac{2-\lambda}{\lambda} \sin \phi_{m0} \quad (5) \quad d\lambda = (d\varepsilon_1^p - d\varepsilon_3^p) \zeta \quad (6)$$

ここに λ , μ :ダイレタンシーパラメータである。また繰り返しせん断挙動を表現するために、せん断成分で $\zeta = 1$ ($d\phi_{m0} \geq 0$)、 $\zeta = -1$ ($d\phi_{m0} < 0$)、主応力回転、異方圧密成分は $\zeta = 1$ とする。尚等方圧密成分は、(1)式に別途付加して表現される。

3. パラメータ特性

せん断による塑性ひずみ増分のみ生じる等方圧密下の非排水繰り返し単純せん断条件を考える。

緩砂($\tau/\sigma'_{m0} = 0.14$)を想定した表-1のパラメータを用いた $\tau - \sigma'_m$ 関係、 $\tau - \gamma$ 関係を図-1, 2に示す。このように従来モデル(λ , μ , k_s が応力経路に係わらず一定)では、①液状化強度を満足させる硬化パラメータ k_s は、単調荷重の排水試験から決定した $k_s (= 0.1\%)$ を低減する必要がある②変相角近傍において、 $\tau - \sigma'_m$ 関係、 $\tau - \gamma$ 関係が定常となり、せん断ひずみが数%まで漸増しながら液状化に至る挙動が表現できない等の特性が認められる。そこで、繰り返し荷重のダイレタンシーパラメータ λ^r , μ^r と硬化パラメータ k_s^r を新たに定義し、応力反転時毎に、単調荷重の λ , μ , k_s を変化させるというモデル化を試みた。

λ^r , μ^r は、(5)式から規定される変相角($\tan \phi_p = 2\mu/2-\lambda$)が応力経路に係わらず一定という条件²⁾を仮定した場合、 $(2\mu^r/\lambda^r) = (\text{Factor})_{\lambda, \mu} (2\mu/\lambda)$, $(2-\lambda^r/\lambda^r) = (\text{Factor})_{\lambda, \mu} (2-\lambda/\lambda)$ の関係から、各々(7), (8)式で表現される。ここに $(\text{Factor})_{\lambda, \mu}$ は、低減係数を意味し、単調荷重で1、繰り返し荷重で応力反転が変相角を越える場合に0.9、越えない場合に0.5を、前反転時の λ^{r-1} , μ^{r-1} に乗じて算定する(但し $(\text{Factor})_{\lambda, \mu}$ の下限値は0.5⁴⁾を仮定)。尚 $(\text{Factor})_{\lambda, \mu}$ の根拠は明確ではないが、塑性ひずみの累積量と関連した値と類推される。 k_s^r は(9)式で算定する。ここに $(\text{Factor})_{k_s}$ は、増幅係数を意味し、単調荷重で1、繰り返し荷重で応力反転が変相角を越える場合に1.15を、前反転時の k_s^{r-1} に乗じて算定する。 $(\text{Factor})_{k_s}$ の乗

数1.15は、(5)、(6)式の体積ひずみ増分(=dε₁^p+dε₃^p)の算定式から理解されるように、変相角近傍のτ-σ'_m関係、τ-γ関係を表現できる(Factor)_{ks}、(Factor)_{λ,μ}>1を満足する係数として設定している。

以上λ^r、μ^r、k_s^rを導入することにより、従来モデルの①、②の特性の改善が可能と考えられる。

$$\lambda^r = \frac{2\lambda}{\lambda + (\text{Factor})_{\lambda, \mu}(2 - \lambda)} \quad (7) \quad \mu^r = \frac{2(\text{Factor})_{\lambda, \mu}\mu}{\lambda + (\text{Factor})_{\lambda, \mu}(2 - \lambda)} \quad (8) \quad k_s^r = (\text{Factor})_{ks}k_s \quad (9)$$

4. 解析結果

緩砂(τ/σ'_{m0}=0.14)に対して、単調载荷の排水試験から決定したパラメータによるτ-σ'_m関係、τ-γ関係を図-3、4に示す。また同様の手法による、密砂(τ/σ'_{m0}=0.72)の結果を図-5、6に示す。ここで、図-3、5中の応力反転時に対応する(Factor)_{λ,μ}、(Factor)_{ks}を図-7、8に示す。このようにλ^r、μ^r、k_s^rを用いたモデルでは、従来モデルと異なり、緩砂の非排水せん断試験で観測される液状化強度、変相角近傍における挙動を適切に表現できるようである。一方密砂のサイクリック・モビリティー現象は、緩砂と同様に、γが漸増しながら液状化に至ることになり、今後この点に関するモデル化が必要である。

表-1 モデルパラメータ

硬化パラメータ	k _s	0.015%
ダイレタンシー	λ	1.2
パラメータ	μ	0.2
内部摩擦角	φ _i	35°
圧縮指数	C _c /1+e ₀	0.0062
膨張指数	C _s /1+e ₀	0.0012
非共軸パラメータ	δ	30°
骨格ヤング係数	E	18500×σ' _{m0} ^{0.5} kPa
骨格ポアソン比	ν	0.3

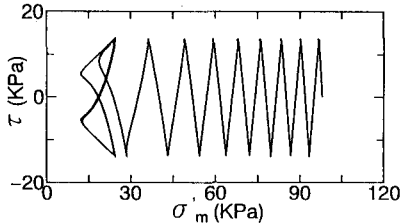


図-1 τ-σ'_m関係（緩砂）

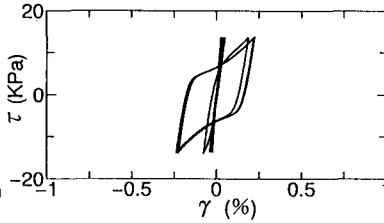


図-2 τ-γ関係（緩砂）

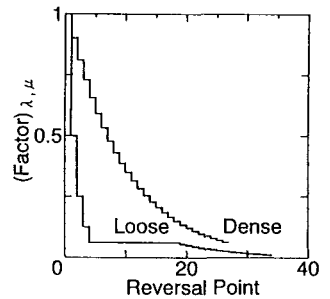


図-7 (Factor)_{λ,μ}の変化

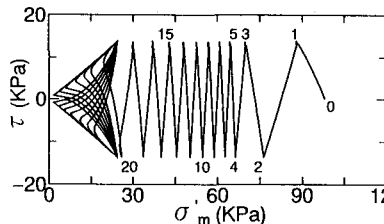


図-3 τ-σ'_m関係（緩砂）

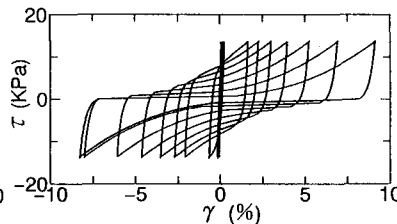


図-4 τ-γ関係（緩砂）

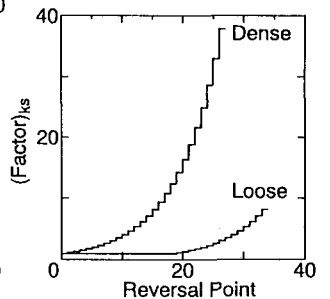


図-8 (Factor)_{ks}の変化

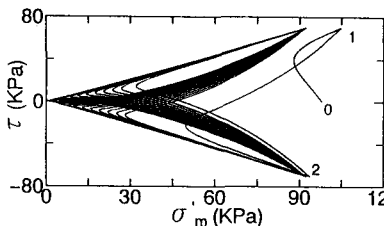


図-5 τ-σ'_m関係（密砂）

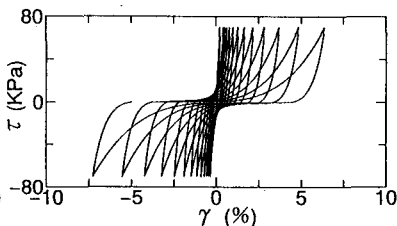


図-6 τ-γ関係（密砂）

5. まとめ

繰り返し载荷の応力反転時に更新するダイレタンシーパラメータλ^r、μ^r、硬化パラメータk_s^rを導入した結果、緩砂の非排水条件下の繰り返しせん断挙動を適切に表現できる。

参考文献

- 1)伊藤他(1992). 三次元応力下の砂の繰り返しせん断挙動の解析. 第27回土質工学研究発表会.
- 2)松岡他(1992). 粒状体の任意応力下の「十字」経路繰り返しせん断試験. 第27回土質工学研究発表会.