

## 修正応力 $t_{ij}$ に基づく不飽和土の弾塑性モデルと異方応力条件下の浸水コラプス

名古屋工業大学 ○小池 真奈, 京川 裕之, 立松 和憲, 菊本 統, 中井 照夫, H.M.Shahin

### 1. はじめに

等方あるいは一次元圧縮条件下での浸水に伴う土の体積圧縮(コラプス)については, Jennings & Burland の一次元圧縮・浸水試験<sup>1)</sup>をはじめとして様々な検討が行われ, 既に幾つかの構成モデル<sup>2)</sup>がその記述に成功している。一方, 異方応力条件下での浸水はせん断変形を伴うコラプス現象を引き起こす(一次元圧縮も無論, 異方応力条件であるが, せん断・破壊は議論できない)ことが実験的に示されている<sup>3)</sup>が, 密度や拘束圧, 3次元応力条件の影響も含めて異方応力条件下の浸水挙動を的確に再現するモデルはまだない。本稿では, 不飽和土の弾塑性モデルによる解析を行い, 異方応力条件下の浸水挙動に考察を加え, モデルの妥当性を検証する。

### 2. 修正応力 $t_{ij}$ に基づく不飽和土の弾塑性モデル

京川ら<sup>4)</sup>は状態変数  $\rho$  により密度と拘束圧の影響を考慮した飽和土の弾塑性モデル<sup>5)</sup>を, (a) 水分履歴パラメータ  $I_w$  と修正サクシオン  $s^*$  によりヒステリシスと間隙比の影響を考慮した水分特性曲線モデル<sup>6)</sup> (拡張 van Genuchten 式), (b) 有効応力パラメータ  $\chi = S_r$  とした Bishop の有効応力  $\sigma_{ij}^{(7)}$ , (c) 飽和度  $S_r$  に応じて  $e-\ln p$  関係で平行移動する正規圧密線に基づいて不飽和土のモデルに拡張している。既報では, 提案モデルが不飽和土の一次元圧縮や締め固め現象, 一次元応力条件下の浸水コラプス挙動を的確に表現できることを示している<sup>8)</sup>。修正応力  $t_{ij}$  に基づく提案多次元モデルの降伏関数は, 基本となる一次元モデルの応力パラメータ関数  $F$  を修正応力  $t_{ij}$  のパラメータ  $t_N, X$  で表し,

$$f = F - \{H + (\rho_0 - \rho) + (\psi_0 - \psi)\} = 0 \quad (F = (\lambda - \kappa) \{\ln(t_N/t_{N0}) - \zeta(X)\}, H = (-\Delta e)^p = (1 + e_0) \cdot \varepsilon_v^p, \psi(S_r) = -l \cdot (1 - S_r))$$

となる。ここに  $\rho_0$  は密度の状態変数  $\rho$  の初期値を,  $\psi$  は不飽和化による正規圧密線の移動量を表す状態変数であり,  $\psi_0$  はその初期値をそれぞれ表す。また塑性ひずみ増分は修正応力  $t_{ij}$  空間において関連流れ則 ( $d\varepsilon_{ij}^p = \Lambda \cdot \text{grad}(F)$ ) を仮定することで得る。そして, 適応条件 ( $df = 0$ ) と関連流れ則から塑性係数  $\Lambda$  は,

$$\Lambda = \left( \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}''} d\sigma_{ij}'' + \frac{d\psi}{dS_r} dS_r \right) / \left[ (1 + e_0) \left\{ \frac{\partial F}{\partial t_{kk}} + \frac{G(\rho)}{t_N} \right\} \right] = \left( \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}''} d\sigma_{ij}'' + \frac{d\psi}{dS_r} dS_r \right) / h_p$$

と表される。以上, 塑性係数  $\Lambda$  と流れ則より塑性ひずみ増分, Hooke の弾性式から弾性ひずみ増分をそれぞれ求め, その和から提案モデルの応力-ひずみ関係が表される。理論および定式化の詳細は文献を参照されたい。

### 3. 異方応力状態における浸水挙動のシミュレーション-概要および結果

Table 1, 2 に示す藤ノ森粘土の構成パラメータを用いて異方応力条件下の浸水挙動の数値シミュレーションを行う。解析で想定する試料は, 初期応力状態を平均基底応力  $p_{net} = 98 \text{ kPa}$ , サクシオン  $s = 110 \text{ kPa}$ , 飽和度  $S_r = 80 \%$  として初期有効応力を揃えた正規圧土 ( $e_0 = 0.83$ ) と過圧密土 ( $e_0 = 0.68$ ) の二種類を用いる。次に解析では, 平均基底応力一定のまま排水排気三軸条件で所定の応力比までせん断(圧縮・伸張)を行い, その後応力比(偏差応力)一定に保ってサクシオンを減じることで浸水挙動をシミュレートした。また可能であれば浸水後に再度残留強度まで三軸せん断を行っている。Fig.1, Fig.2 に正規圧密土の三軸圧縮・伸張条件での異方応力比(三軸圧縮:  $q = 49, 98, 147, 196 \text{ kPa}$ , 三軸伸張:  $q = 49, 98, 147 \text{ kPa}$ )での浸水時応力-ひずみ関係をそれぞれ示す。両図中の破線は浸水挙動を含まない不飽和試料の単調せん断挙動を示しており, 修正応力  $t_{ij}$  によって定式化された提案モデルは, 飽和状態だけでなく不飽和状態における中間主応力の影響(三軸圧縮・伸張状態での強度の差)を適切に表現していることが分かる。次に浸水時の挙動に着目すると, 各偏差応力によってその後の浸水挙動は大きく異なる。このような浸水時における挙動の差異は, 浸水初期の応力状態および浸水時の有効応力の変化が大きく影響している。これは, 浸水時のサクシオン減少に伴って偏差応力一定のまま平均有効応力が減少するため, 応力比 ( $q/p''$ ) が大きくなり, 土は浸水時にせん断されていることとなる。例えば Fig.1

Table 1 WRC モデルパラメータ

$S_{min}$	0.10	parameters for van Genuchten's equation
$S_{max}$	1.00	
$\alpha_{wet}$	0.03	
$\alpha_{dry}$	0.10	
$m$	0.1	
$n$	2.0	
$\xi$	100	effect of suction history
$\xi_e$	5.0	effect of void ratio

Table 2 構成モデルパラメータ

$\lambda$	0.104	same parameters as Cam clay model
$\kappa$	0.0100	
$N_{sat}$	0.83	
$R_{cs}$	3.5	
$\nu$	0.2	
$\beta$	1.5	shape of yield surface
$a$	500	effect of density and confining pressure
$l$	0.50	effect of $S_r$ on the position of NCL

キーワード 不飽和土, 弾塑性モデル, 浸水コラプス, せん断

連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 TEL 052-735-7157

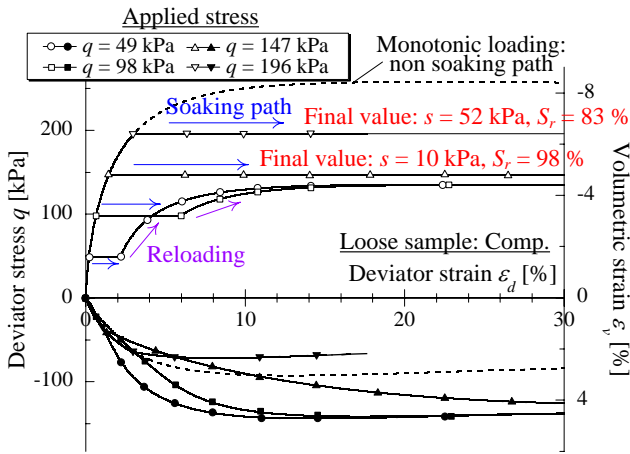


Fig.1 正規圧密試料の三軸圧縮時の浸水挙動

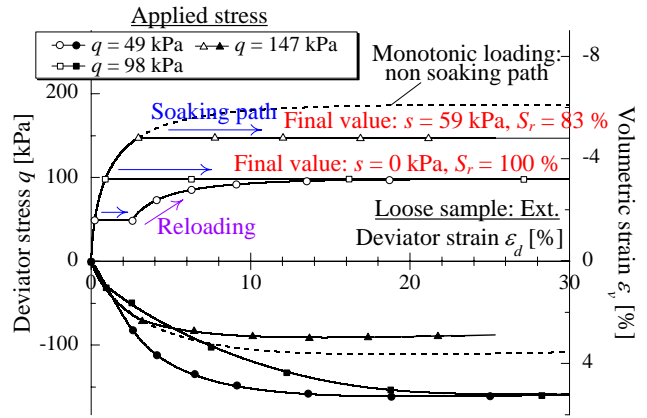


Fig.2 正規圧密試料の三軸伸張時の浸水挙動

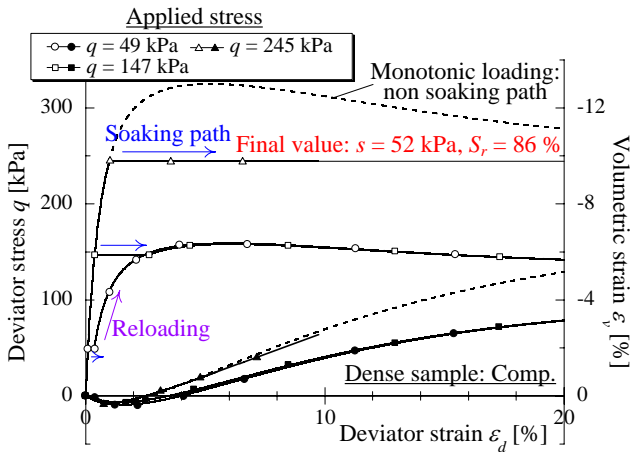


Fig.3 過圧密試料の三軸圧縮時の浸水挙動

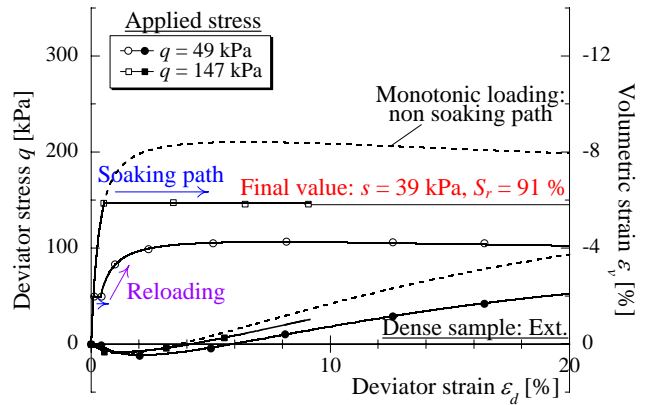


Fig.4 過圧密試料の三軸伸張時の浸水挙動

の  $q = 196\text{kPa}$  の結果は、浸水初期に高い応力比の状態にあるため、その後の浸水(サクシオン減少)による応力比の増加に伴い土は“塑性係数  $\Lambda \approx \infty$ ”となる不安定な状態(このとき  $s = 52\text{kPa}$ ,  $S_r = 82\%$ )に至っており、飽和状態に至る前に土はその状態を保てなくなる。また同図の  $q = 49, 98\text{kPa}$  の結果は、浸水後飽和状態で土は不安定な状態( $\Lambda \approx \infty$ )に至っておらず、その後のせん断により最終的な飽和試料の残留強度を示すことが分かる。これらは De'an Sun et al.<sup>9)</sup>によって行われた Pearl clay の実験結果と同様の挙動を示す。つまり、飽和試料の強度以下では、浸水時の変形は初期の応力比が大きいほど大きくなる。一方で飽和試料の強度以上の応力比が作用している土は、その後の浸水において土は不安定な状態になり、大きな変形挙動を示す。その際、浸水初期の応力比が大きいほど少しの浸水作用で土はその状態を保持できなくなる。また異方応力状態での浸水による体積変化挙動は、関連流れ則に従って生じるため、一般的なコラプス挙動とは異なりさらに複雑な挙動を示す。

次に Fig.1 と Fig.2 から、圧縮・伸張状態における浸水作用の差異を見ると、 $q = 100\text{kPa}$  での浸水時に二つの試料の挙動は大きく異なる。これは、飽和試料の残留強度が圧縮と伸張で異なることから説明でき、さらには浸水時における挙動は応力比だけでなく、その载荷状態(中間主応力の大きさ)にも大きく依存することが分かる。Fig.3, Fig.4 には高過圧密土の三軸圧縮 / 伸張条件異方応力比(三軸圧縮時:  $q = 49, 147, 245\text{ kPa}$ , 三軸伸張時:  $q = 49, 147\text{ kPa}$ )での浸水コラプス時応力-ひずみ関係をそれぞれ示す。両図の比較は、概ね先程の Fig.1 と Fig.2 の比較と同様の考察ができる。また Fig.3 と Fig.1, Fig.4 と Fig.2 から密度の影響を比較すると、過圧密が大きい試料の方が初期剛性、強度ともに大きくなり、浸水作用時における変形も全体的に小さくなる。

4. まとめ

本稿では、不飽和土を考慮した簡単な一次元モデルの多次元モデルへの拡張を示すとともに、そのパフォーマンスを異方応力状態における浸水挙動のシミュレーションから検証した。解析結果より、異方応力状態での浸水挙動には、浸水時の応力状態、応力比、密度が大きく影響することが示された。

参考文献: 1) Jennings & Burland, *Géotechnique* 12(2), 125-144, 1962. 2) 例えば Alonso et al., *Géotechnique* 40(3), 405-430, 1990. 3) 例えば S&F 18(3), 75-83, 1978. 4) 応用力学論文集 12, 331-342, 2009. 5) 応用力学論文集 12, 371-382, 2009. 6) 応用力学論文集 12, 343-352, 2009. 7) *Tecnisk Ukevblad* 39, 859-863, 1959. 8) Kikumoto et al., Proc. of 5th UNSAT, 2010. 9) De'an Sun et al., *Canadian Geotechnical Journal*, 44, 673-686, 2007.