

三主応力繰返しせん断試験による subloading t_{ij}^* model の検証

名古屋工業大学 ○京川 裕之, 菊本 統, 中井 照夫, 張 鋒, 石原 隆寛

1. はじめに 応力履歴(誘導異方性)と中間主応力の影響は土の構成モデルで考慮すべき重要な性質であるが, 従来はそれぞれ別の手法でモデル化されてきた。これに対して, 著者らは誘導異方性と中間主応力の影響を反映させた修正応力テンソル t_{ij}^* によって考慮し, それを導入した等方硬化モデル subloading t_{ij}^* model^[1]を提案している。本稿では, 同手法の概要を説明するとともに三主応力試験のシミュレーションを行い, そのパフォーマンスを検証する。

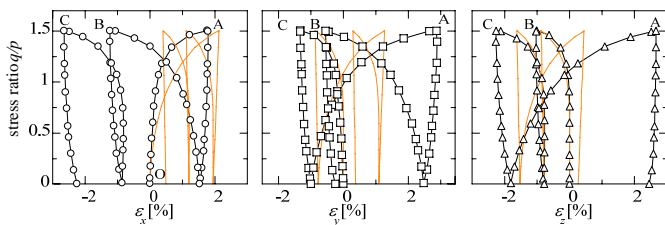
2. subloading t_{ij}^* model の概要 土の誘導異方性を統一的に考慮した修正応力 t_{ij}^* は, 一般応力 σ_{ij} と 2 階の変換テンソル a_{ij}^* を用いて, $t_{ij}^* = (a_{ik}^* \sigma_{kj} + \sigma_{ik} a_{kj}^*) / 2$ として表される。ここで, 変換テンソル a_{ij}^* は一般応力経路下で粒子構造の変化(応力履歴 / 中間主応力の影響)を考慮するテンソルである。なお, a_{ij}^* の変化(発展則)は既往の研究データを満足するように規定しており, 詳しくは文献^[1]に説明されている。修正応力 t_{ij}^* は一般的な弾塑性モデルであれば応力テンソルを t_{ij}^* に置き換え, t_{ij}^* 空間で流れ則を仮定するだけで, どのモデルにも適用可能である。本稿では等方硬化型の subloading t_{ij}^* model^[3]に適用した。

3. 解析概要および結果 上述の subloading t_{ij}^* model を用いて中密な豊浦砂($e=0.68$)の三主応力試験の解析を行い, 実測値および既往のモデルとの比較より同モデルの適用性を検証する。Table1 に提案モデルの構成パラメータを示す。Table1 に示される μ は, 応力履歴の影響の消散速度を表すパラメータである。また, 今回の解析値には, 参考として subloading t_{ij} model ならびに応力パラメータ (p, q) に基づく Cam-clay タイプのモデルを同時に示す。このモデルは, 応力比関数を subloading t_{ij} model に倣い $\zeta(\eta) = 1/\beta * (\eta/M)^\beta$ とすることで降伏面の形状を変化させ, 下負荷面の概念^[4]を導入した Cam-clay モデル(subloading Cam-clay model)である。構成パラメータは $\beta=1.9, a=0.3$, その他のパラメータは subloading t_{ij} model と等しい。

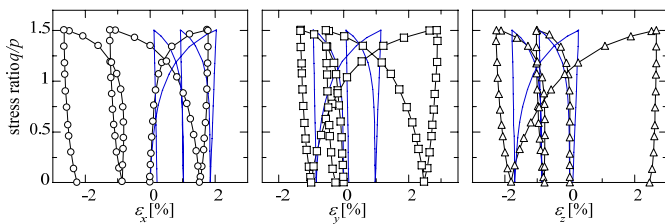
Fig.1, 2 は, 初期等方応力状態(O 点: $p=196\text{kPa}$)から平均主応力一定で各主応力方向に順に主応力比 4 の片振り繰返しせん断試験(Case1, 応力経路: $O \rightarrow A \rightarrow O \rightarrow B \rightarrow O \rightarrow C \rightarrow O$)を行った結果である。Fig.2 は正八面

Table1 豊浦砂の構成パラメータ

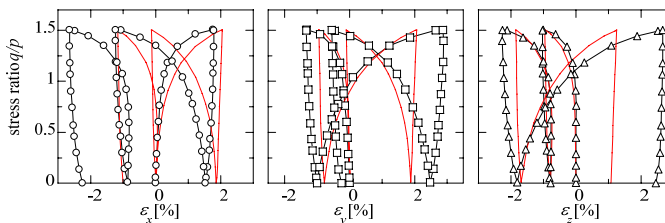
λ	0.07	Same parameters as Cam clay model	
κ	0.0045		
e_{NC} at $p=98\text{ kPa}$ & $q=0\text{ kPa}$	1.1		
$R_{cs} = (\sigma_1/\sigma_3)_{cs(comp.)}$	3.2		
v_e	0.2		
β	2.0	Shape of yield surface (same as original Cam clay if $\beta=1$)	
a	a_{AF}	35	Influence of density and confining pressure
	a_{IC}	500	
μ	40.0	Influence of stress history	



(a) Subloading Cam-clay model



(b) Subloading t_{ij} model



(c) Subloading t_{ij}^* model

Fig.1 三主応力試験(Case1)の応力比 q/p -主ひずみ関係 ϵ_i

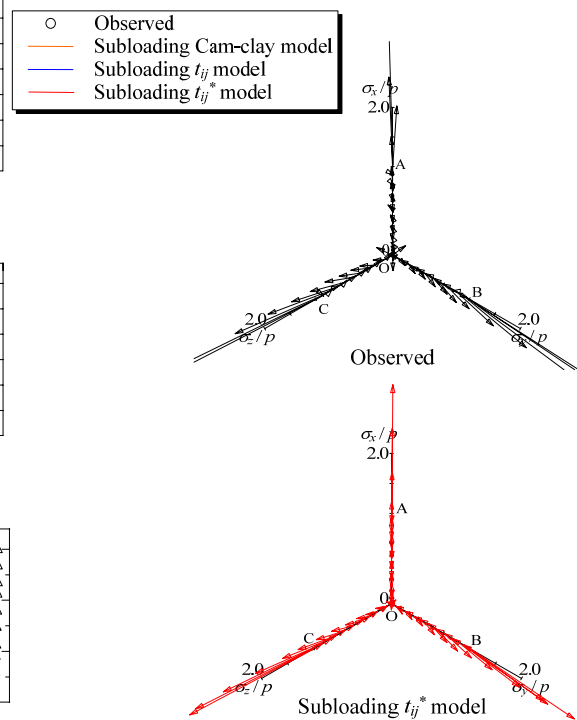


Fig.2 三主応力試験(Case1)の応力経路およびひずみ増分方向

キーワード: 構成式 誘導異方性 中間主応力 砂 三主応力試験

〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学社会工学専攻 TEL 052-735-7157

体面での応力経路とせん断ひずみ増分ベクトルである。図より、O点からA点への単調な荷重経路では、どのモデルも実測値の挙動を適切に捉えており、提案モデルと subloading t_{ij} model の解は一致する。またその後の荷重において、実測値のひずみ増分方向は応力履歴の影響を受け必ずしも半径方向を向いていない。このような挙動は、塑性ひずみ増分の方向が現在の応力状態から一意に決まる一般的な等方硬化モデル(subloading Cam-clay model, subloading t_{ij} model)では表現できない。一方で、提案モデルは実測値に見られる異方的に生じるひずみの方向・大きさを適切に表現している。

次に Fig.3, 4 は、初期等方応力状態(O 点: $p=196\text{kPa}$)から各軸の三軸圧縮および伸張条件で主応力比 4 になるような応力点を結ぶ経路で荷重した試験(Case2, 応力経路: $O \rightarrow A \rightarrow D \rightarrow B \rightarrow E \rightarrow C \rightarrow F \rightarrow A$)の結果である。図より、実測値では三軸伸張状態(D, E, F 点)において大きくひずみが発生していることが確認できる。これは中間主応力の相対的な大きさによる影響であり、3 次元的な応力下で土の強度・変形特性を適切に考慮する修正応力 t_{ij} やそれを継承した t_{ij}^* によるモデルでは実測値の挙動を適切に評価できる。しかしながら、一般応力パラメータ p, q で定式化された subloading Cam-clay model はこのような影響を考慮できず、ひずみを過小評価している。また提案モデルは、実測値に見られる荷重方向変化に伴う剛性変化や早期の塑性変形の発生を subloading t_{ij} model に比べよりの確に再現している。ひずみ増分方向に関しては、実測値との差はあるものの、subloading t_{ij} model に比べて、実測値に見られる異方的なひずみの発生を適切に捉えている。

4. まとめ 繰り返し荷重を含む三主応力制御試験のシミュレーションにより、subloading t_{ij}^* model の適用性の検証を行った。同モデルは、応力履歴ならびに中間主応力の影響を統一的に考慮する新たな修正応力 t_{ij}^* を用いた簡単な等方硬化型モデルでありながら、複雑な応力経路で発生した異方性の影響を従来のモデルに比べてより正確に記述できることを示した。三主応力制御試験は主応力軸が固定された条件であるため、今後は主軸回転時における異方性の影響を評価するとともに、修正応力 t_{ij}^* の改良を行う予定である。

参考文献: [1]菊本ら(2008), 第 43 回地盤工学研究発表会. [2] Nakai & Mihara(1984), S&F, 24(2), 82-94. [3]Nakai & Hinokio(2004), S&F, 44(2), 53-70. [4]Hashiguchi & Ueno(1977), Proc.of SS9, 9th ICSMFE, 73-82.

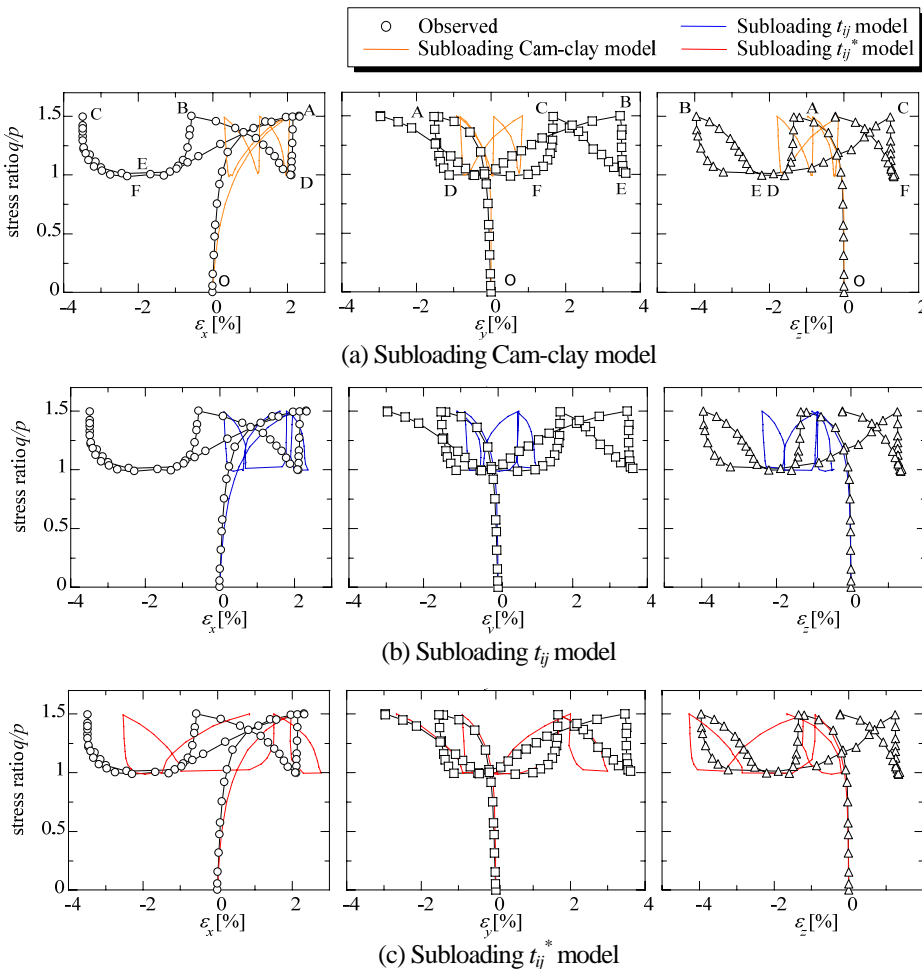
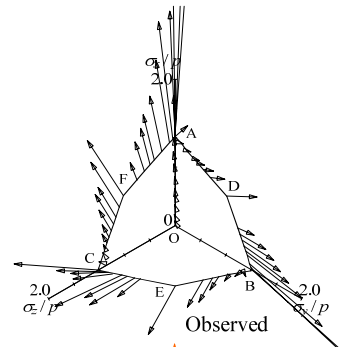


Fig.3 三主応力試験(Case2)の応力比 q/p -主ひずみ関係 ϵ_i

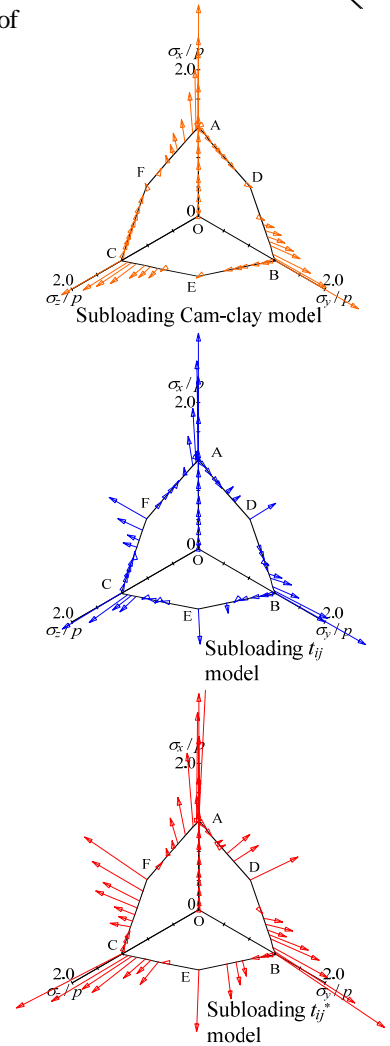


Fig.4 三主応力試験(Case2)の応力経路およびひずみ増分方向