

降伏曲面の形状変化を考慮した構成式

名古屋工業大学 大学院 学生会員 榎尾 正也
 名古屋工業大学 正会員 中井 照夫
 名古屋工業大学 大学院 学生会員 吉田 英生

はじめに

従来から多くの構成モデルでは、応力比～塑性ひずみ増分比関係が唯一的に表されること(ストレスダイレイタンス式)から降伏関数の形状が決定され、密度や応力経路によらず一定であった。しかし、砂の実測値において密度の違う試料や同じ試料でも硬化時と軟化時では、応力比～塑性ひずみ増分比関係が異なる。このため解析値が実測値の挙動を適切に表現できないことがある。本研究では、密度の違いによる挙動や応力比～塑性ひずみ増分比関係の違いを表現できるように、従来から提案されている移動硬化型の弾塑性構成モデル *kinematic t_{ij} model*¹⁾ を拡張し、実測値との比較・検討を行った。

モデルの拡張

今回の提案モデルでは Chowdhury & Nakai の stress-dilatancy 式²⁾を参考に、降伏関数 f を(1)式から(2)式に変更する。この降伏曲面の形の変化を Fig.1 に示す。これにより、降伏曲面の原点および $t_N = t_{N1}$ における特異点が存在しなくなる。また塑性パラメータとしては、粘土のモデルと同様 v^p を用いる。

$$f = \ln t_N + \frac{-a}{1-a} \ln \left| 1 - (1-a) \frac{X}{M^*} \right| - \ln t_{N1} = 0 \quad (1)$$

$$f = \ln t_N + \frac{1}{b} \left(\frac{X}{M^*} \right)^b - \ln t_{N1} = 0 \quad (2)$$

流れ則や比例係数は一般に次の式で表される。

$$\dot{e}_{ij}^{p(AF)} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial t_{ij}}, \quad \Lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial s_{lm}} \dot{s}_{lm}}{h} \quad (3)$$

ここでは、密度の影響を表現するため橋口の下負荷面の概念³⁾を参考にして上式を

$$\dot{e}_{ij}^{p(AF)} = \Lambda \frac{\partial f}{\partial t_{ij}}, \quad \Lambda = \frac{\frac{\partial f}{\partial s_{lm}} \dot{s}_{lm}}{h + \frac{a}{t_N} d^2} \quad (4)$$

とする。(4)式において、 d は Fig.2 で示すように $d = (1-k) \ln \left(\frac{t_{N1e}}{t_{N1}} \right)$ で表され、同じ応力状態にある正規圧粘土との間隙比(B点)と現在の間隙比(A点)の差を表す。

- $d = 0$ 正規圧密状態 (は従来の粘土のモデルと一致)
- $d > 0$ 過圧密状態 (は従来の粘土のモデルより小さい)

また、 $*$ を d の関数として $M^* = M_{NC}^* \exp(-d)$ として与えることにより、

$*$ は過圧密状態では $* < *_{NC}$ となり d が減少し正規状態になると $*_{NC}$ に等しくなる。つまり、密度の変化によって応力比～塑性ひずみ増分比関係の切片が変化することにより、正規状態のダイレイタンスはそのままで、同じ応力比であっても過圧密状態の土が膨張しやすくなる。ここに $*_{NC}$ は限界状態での応力比($R_{CS} = 1/3$)から決定される。

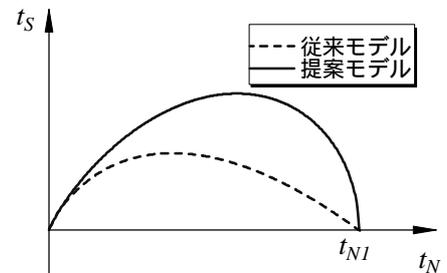


Fig.1 降伏曲面の形の変化

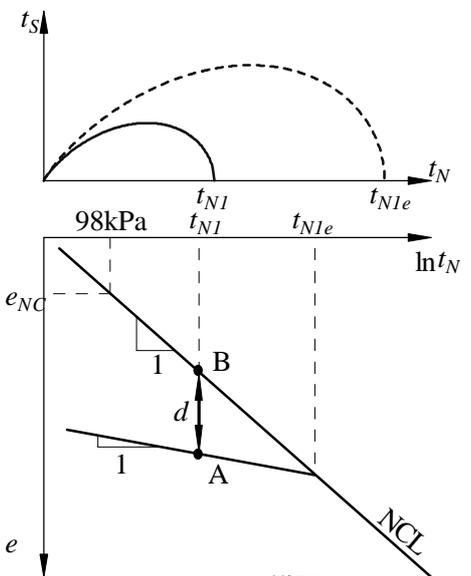


Fig.2 dの説明

結果と考察

Fig.3, 4&5 に密度の異なる試料を平均主応力一定で三軸圧縮せん断した際の実測値と解析値を示す。プロットは密な試料($e=0.66$)、プロットはゆるい試料($e=0.83$)での実測値であり、これらに対応した解析値を実線、破線で示す。比較のため Fig.3 は M^* が変化しない場合の解析結果、Fig.4 は M^* が変化する場合の解析結果である。

Fig.3&4 の応力ひずみ関係の実測値において、密な試料では典型的な砂の挙動である正のダイレイタンスーやひずみ軟化を示しており、またゆるい試料は体積膨張してはいるがほとんどひずみ軟化せず正規状態に近い挙動となっている。一方解析では、密度の違いによる応力ひずみ関係への影響は、 d によって ν の値が変わることによって生じることとなる。また、Fig.3 の様に d による応力比～塑性ひずみ増分比関係の変化がない場合は最大圧縮点での応力比をパラメーター R_{CS} ($\nu/3$) $_{CS(comp.)}$ としているため残留強度を過小評価するが、Fig.4 の様に M^* が変化する場合は実測値とよく似た傾向を示している。Fig.5 は応力比～ひずみ増分比関係を示す。 M^* が変化する場合の解析に加えて、 M^* が変化しない場合の解析結果も実線で示す。また、図中にある点線は体積ひずみ増分が 0 の線である。これらの図から、ここでのモデルによる解析値は正のダイレイタンスーやひずみ軟化現象など実測値と良い対応をしており、 d や M^* の変化を導入したことにより構成式が密度の違いによる砂の挙動への影響をうまく表現し、残留強度も妥当に評価していることがわかる。解析に用いたパラメータを Table.1 に示す。

まとめ

今回提案したモデルでは、正規状態との間隙比の差 d を塑性係数 ν の中に導入することにより、密度の違いが砂の挙動(強度・剛性)に及ぼす影響を表現することができた。また、 M^* を d の関数として与えたため応力比～塑性ひずみ増分比関係が変化することで、より実測に近い挙動の表現が可能となった。

《参考文献》

- 1) T.Nakai, J.Fujii & H.Taki (1989): kinematic extension of anisotropic hardening model for sand, Proc. NUMOG 3, pp.36-45
- 2) E.Q.Chowdhury, T.Nakai (1998):Consequences of the t_{ij} -concept and anew modeling approach, Computers and Geotechnics 23 (1998) 131-164
- 3) 橋口 公一 (1990): 最新弾塑性学, 朝倉出版

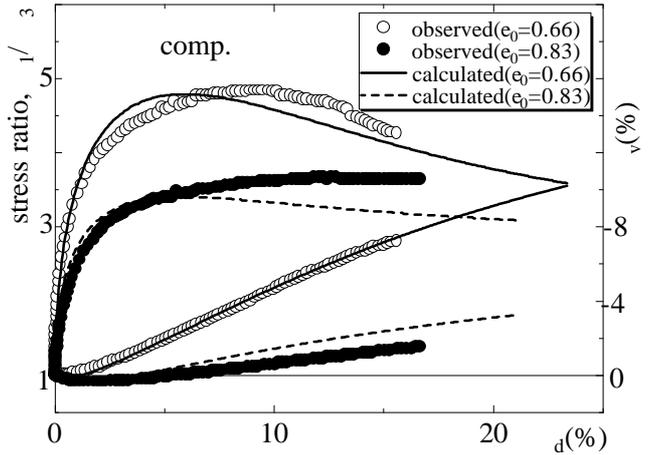


Fig.3 応力～ひずみ関係(M^* が変化しない場合)

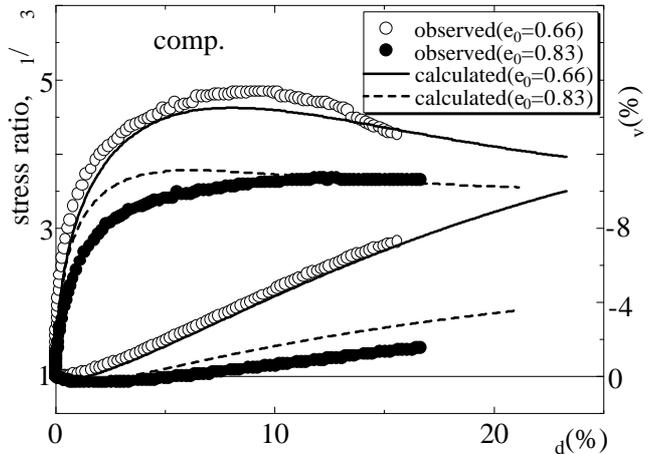


Fig.4 応力～ひずみ関係(M^* が変化する場合)

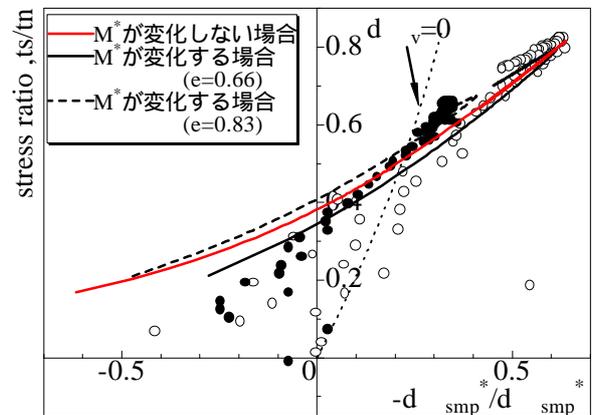


Fig.5 応力比～ひずみ増分比関係

Table.1 土質パラメータ

	Toyoura Sand	
	M^* が変化しない場合	M^* が変化する場合
	0.035	0.035
	0.0045	0.0045
$e_{NC}(p=98kPa)$	1.024	1.024
$R_{CS}(comp.)$	2.8	3.5
	2	2
a	50	50