

密度、拘束応力依存性を考慮した砂の構成モデル

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○武馬 雅志
 名古屋工業大学 正会員 中井 照夫
 名古屋工業大学 学生会員 赤堀 智幸

これまでに、一般応力条件下にある砂の応力・ひずみ挙動を説明できるモデルとして、 t_{ij} を用いた等方、移動硬化型弾塑性モデル(t_{ij} -sand model、kinematic t_{ij} -sand model)^{1),2)}を提案している。しかしこのモデルでも、ある限られた間隙比の範囲でその土質パラメーターが決められているため、それが大きく変化する場合の砂の変形・強度特性を説明するのが困難であった。したがってここでは、従来から提案しているモデルの特徴を生かしつつ、砂でも限界状態線(CSL)の存在することに着目し、間隙比や拘束応力が大きく異なっても砂の応力・ひずみ挙動が説明可能なモデルを提案する。

1. 砂の間隙比、拘束応力依存性のモデルにおける評価方法

一般に、砂は間隙比(e)や拘束応力(p)の大きさにより応力・ひずみ関係は異なることが知られている。また、砂においても粘土と同様、限界状態線(CSL)の存在が実験的に示されている^{3,4)}。ところが砂の限界状態(CS)での間隙比(e)と拘束応力($\ln p$)との間では、粘土のような直線関係は認められず、図-1に示すように間隙比(e)と拘束応力($\ln(t_N+m)$ 、 m :パラメーター)との間に直線関係が成り立つようである。また、せん断時に負のダイレイタンシーしか生じない正規圧密状態線(NCL)が正規圧密粘土同様、CSLと平行に存在すると仮定する。すなわち、NCL上のO点からせん断した砂は、正規粘土のようにCSL上のB点に向かって体積圧縮を伴いひずみ硬化するが、通常の砂のように初期状態がNCLよりも下側(例えばO'点)にある砂は、C点まで圧縮した後、体積膨張し最終的には同じB点で限界状態($X=X_{CS}$)になると考える。

さて、塑性ポテンシャル ψ については、砂は密度、拘束応力によらず応力比($X=t_s/t_N$)とひずみ増分比($-d\varepsilon_{SMP}^p/d\varepsilon_{SMP}^p$)の間にユニークな関係があるので、従来の降伏関数と同じように次式で与える。

$$\psi = \ln t_N + g(Z) \quad (1)$$

$$g(Z) = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \ln \left| 1 - (1-\alpha) \frac{Z}{M^*} \right|, \quad Z = X^* + n \quad (\alpha \neq 1)$$

一方、降伏関数は図-1に示す関係でCSLとNCLが平行な2直線になることから次式で与える。

$$f = \ln(t_N+m) + g(Z) - \ln(t_{Nl}+m) = 0 \quad (2)$$

図-2はせん断途中の、ある応力状態A点(平均応力 $t_{Nl}+m$ 、応力比 $Z=X^*+n$)での移動硬化型モデルの降伏曲面および塑性ポテンシャルを表す。(2)式より、 $t_{Nl}+m$ は次式となる。

$$t_{Nl}+m = (t_N+m) \cdot \exp\{g(Z)\} \quad (3)$$

ところで、塑性体積ひずみ ε_v^p が与えられたとき、その塑性体積ひずみに対応するNCL上の平均応力 $t_{Nle}+m$ は、図-1より次式で表される。

$$t_{Nle}+m = \exp \left\{ \frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \cdot \varepsilon_v^p + \ln(t_{N0}+m) \right\} \quad (4)$$

つまり、O点からせん断した場合には(3)式の $t_{Nl}+m$ は上式の $t_{Nle}+m$ と一致するが、O'点のようにせん断前に $\varepsilon_{v(2)}^p$ なる塑性体積ひずみが生じており、より密な状態にある砂では図-2に示すように $t_{Nl}+m < t_{Nle}+m$ となる。したがって、ここでは密度や拘束応力の影響を $t_{Nl}+m$ と $t_{Nle}+m$ との比

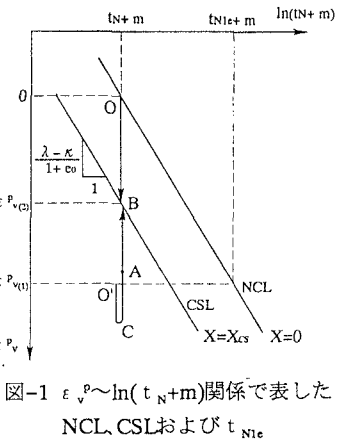


図-1 $\varepsilon_v^p \sim \ln(t_N+m)$ 関係で表した NCL、CSL および t_{Nle}

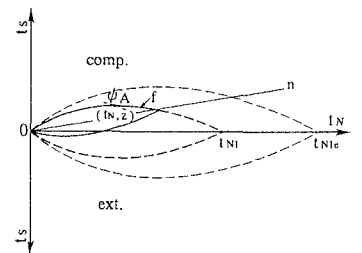


図-2 $t_s \sim t_N$ 関係で表した降伏関数、塑性ポテンシャルおよび t_{Nl} 、 t_{Nle}

(t_{N1+m}/t_{N1e+m})で評価する。

ところで従来のモデル⁵⁾では、硬化パラメーターとして正・負のダイレイタンスーを表現するために、ひずみ硬化時には t_{ij} に基づく塑性仕事相当量 W^p を、ひずみ軟化時、あるいは初期状態がNCL上にあるような非常にゆるい砂では、粘土の硬化パラメーターである塑性体積ひずみ ε_v^p を用いていた。しかし、今回のモデルでは密度、ひずみ硬化、軟化に関係なく、硬化・軟化パラメーターとして塑性体積ひずみ ε_v^p を用いる。橋口⁶⁾の方法を参考に、塑性ひずみの大きさを決める係数 Λ ⁷⁾の中で密度等の影響を考慮する。すなわち、 t_N の比(t_{N1+m}/t_{N1e+m})を用いて、拘束応力や間隙比が砂の剛性や強度に与える影響、さらに正・負の両ダイレイタンスー特性、破壊後のひずみ軟化現象をうまく表現することが可能となる。

具体的には、

$$\Lambda = \frac{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{pq}} d\sigma_{pq} - K < dt_N \right) \cdot G^l}{\frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon_{ii}} + a \cdot \frac{1}{t_N} \cdot \ln G} \quad (5)$$

$$G = (t_{N1+m} / t_{N1e+m})$$

ここで、パラメーター a は間隙比(e)と破壊応力比(ϕ_d)の関係から、また l はある拘束応力、間隙比のもとで行ったせん断試験のひずみの大きさより決定することができる。

2. モデルによる解析結果

図-3は、同じ拘束応力(p_0)で初期間隙比(e_0)を変えた時の側圧一定三軸圧縮試験の解析結果を示す。なお $e_0=1.01$ はNCL上からの解析結果である。破壊時のひずみの大きさ、強度、ダイレイタンスー特性におよぼす密度の影響をモデルはよく説明している。図-4は、同じ初期間隙比(e_0)で拘束応力(p_0)を変えた時の解析結果であるが、拘束応力の差異による応力～ひずみ特性の違いが表現されている。

図-5は、同じ初期拘束応力のもとで初期間隙比の異なる砂の破壊時の内部摩擦角(ϕ_d)～初期間隙比(e_0)関係の実測値と解析結果である。実験、解析とも同じ条件下で行っているが、解析結果は間隙比が小さくなるほど破壊応力比が大きくなる実測値の傾向をよく表している。

解析で用いた砂の土質パラメーターは $\lambda=0.185$ 、 $\kappa=0.055$ 、 $N=1.01$ 、 $\phi'_{cs}=31^\circ$ 、 $\alpha=0.85$ 、 $a=0.4$ 、 $l=0.3$ である。なお N は正規状態の基準値($p_0=98\text{kPa}$)での間隙比である。これらのパラメーターは間隙比や拘束応力の大きさによらない土質パラメーターである。

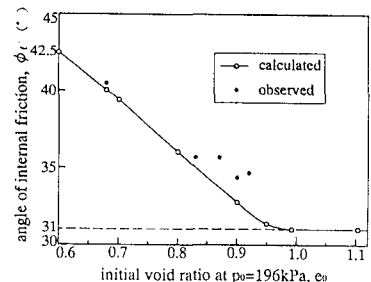
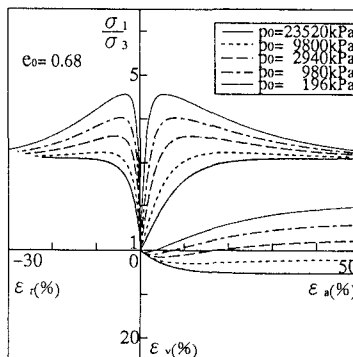
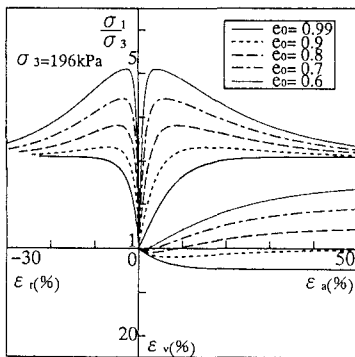


図-3 初期間隙比を変えた側圧一定排水三軸試験の解析結果

図-4 初期拘束応力を変えた側圧一定排水三軸試験の解析結果

図-5 三軸試験の初期間隙比(e_0)～内部摩擦角(ϕ_d)関係

参考文献

- 1) Nakai (1989): S & F, 29(1), 119-137.
- 2) Nakai, Fujii & Taki (1989): Proc. NUMOG III, 36-45.
- 3) Ishihara (1993): Géotechnique, 43(3), 351-415.
- 4) Desrues (1993): Presentation at 3rd Workshop in Aussois.
- 5) Nakai, Buma & Yuasa (1994): 地盤の破壊とひずみの局所化に関するシンポジウム, 143-148.
- 6) Hashiguchi, K. (1980): J. Appl. Mech., ASME, Vol. 102, No.2, pp.266-272.