

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
愛知 県 正会員 湯浅 健司

既に三次元応力下の砂の応力・ひずみ挙動を統一的に説明できるモデルとして、 t_{ij} を用いた砂の等方および移動硬化型の弾塑性モデル(t_{ij} -sand model、Kinematic t_{ij} -sand model)^{1),2)}を提案するとともに、前報⁴⁾ではこれらのモデルを一般性を失うことなく密度や拘束応力の違いが砂の応力・ひずみ関係に与える影響を同一パラメーターを用いて表現可能なモデルに拡張した。ここでは、この拡張したモデルを用いて異方性、間隙比、拘束応力の異なる砂のせん断試験(三軸試験、平面ひずみ試験、単純せん断試験)を解析し、モデルがこれらの諸条件を変えた砂の強度の実測値(既発表^{5),6)}をよく説明できることを示す。

1. 拡張した弾塑性モデルの特徴

従来の砂の等方硬化型弾塑性モデル¹⁾では、SMP^{*}の概念に基づく修正応力 t_{ij} を用いることにより①変形・強度特性に及ぼす主間主応力の影響、塑性ひずみ増分($d\epsilon_{ij}^p$)を t_{ij} 空間で関連流れ則を満足する成分($d\epsilon_{ij}^{p(AF)}$)と等方的な圧縮成分($d\epsilon_{ij}^{p(C)}$)の和で与えることにより②応力比～塑性ひずみ増分比関係の応力経路依存性、ひずみ硬化則を規定するパラメーターとして t_{ij} に基づく塑性仕事相当量 W^p を用いることで③正・負の両ダイレタンシー特性、等が表現可能なモデルである。さらに移動硬化型モデル²⁾では、 t_{ij} に基づく応力比 x_{ij} 空間で移動硬化則を考えることにより④繰返し載荷時や主応力軸回転時の砂の応力・ひずみ挙動(応力誘導異方性)も考慮できる。また地盤や供試体(要素試験の場合)の形成過程にできる初期構造異方性(固有異方性)を表現するために、構造異方性テンソル b_{ij} ³⁾を応力比テンソル x_{ij} に導入することにより、パラメーターの数を増やすことなく、また一般性を失わずに⑤固有異方性が砂の変形・強度特性に与える影響を表現できるモデルへと発展させている。さらに前報⁴⁾では上述の特徴に加え⑥間隙比や拘束応力が砂の剛性や強度に及ぼす影響を同一の土質パラメーターを用いて評価できる構成モデルに拡張している。

図-1は砂の体積ひずみ ϵ_v ～平均応力 $\ln t_N$ 関係を示す。砂でも粘土同様、正規圧密状態線(NCL)が存在すると考え、図に示すように限界状態線(CSL)に平行なNCLを考える。そして初期間隙比、拘束応力から決まる一つの状態(図のO点あるいはO'点)とその拘束応力に対応するNCLとの間隙比差により、密度や拘束応力が砂の変形・強度特性に与える影響を評価する。図-2は一例として図-1のO点およびO'点からのせん断試験結果を示したものである。破線で示したピーク前のひずみ硬化域では従来の砂のモデル同様ひずみ硬化パラメーターとして dW^p を、破壊後の実線部分あるいはO点のように初期状態がNCL上にある場合には粘土のモデルの硬化パラメーター $d\epsilon_v^p$ を用いる。これにより正・負の両ダイレタンシーはもとより、密な砂をせん断した時に観察されるひずみ軟化現象も含めて説明できる。図-3は同じ拘

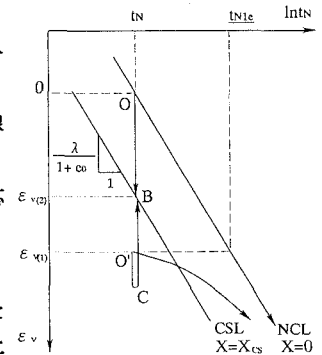


図-1 $\epsilon_v \sim \ln t_N$ 関係で表したNCLおよびCSL

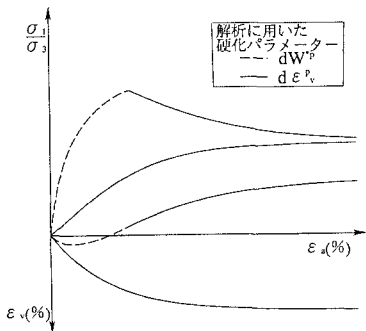


図-2 砂の応力～ひずみ関係とひずみ硬化パラメーター

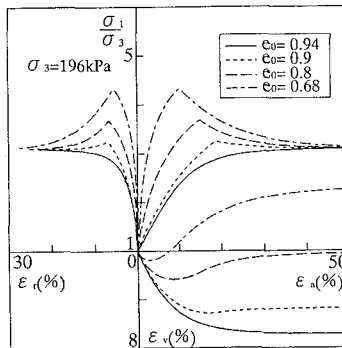


図-3 初期間隙比を変えた砂の応力～ひずみ関係

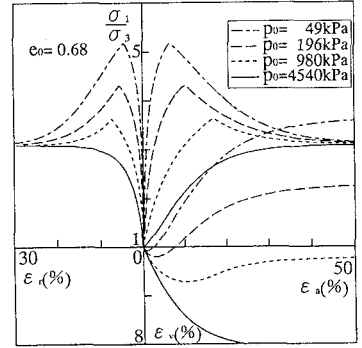


図-4 初期拘束応力を変えた砂の応力～ひずみ関係

束応力で初期間隙比を、図-4は同じ間隙比で初期拘束応力をそれぞれ変えた時の側圧一定三軸圧縮試験の解析結果を示す。ここに $\sigma_3=196\text{kPa}$ 、 $e_0=0.94$ はNCL上からの解析結果である。図-3、4とも強度、ダイラテンシー特性を含めて間隙比、拘束応力の影響をモデルは説明している。

2. 砂の強度の間隙比、拘束応力、異方性、試験方法の依存性

図-5は破壊時の移動硬化型モデルの降伏曲面(実線)と t_{Nf} に関する諸量を表す。 t_{Nf} は降伏曲面の $X=X_f$ (ピーク強度)での、 t_{NCS} はその時の体積ひずみ ε_v と残留強度 $X=X_{CS}$ に対応する t_N 値である。そしてこの t_{Nf} と t_{NCS} の比(t_{Nf}/t_{NCS})と現在の応力状態($t_N/Z=X'+n$)、間隙比(e)から決まる密度の程度を表す指標(t_{Nf}/t_{Nle})を利用して次式で砂のピーク強度が与えられると仮定する。

$$t_{Nf}/t_{NCS} = (t_{Nf}/t_{Nle})^l \quad (1)$$

ここでパラメーター l は例えば密度を変えたせん断試験の強度より決定される。また、図-5 t_{Nf} 、 t_{Nle} 、 t_{Nf}/t_{NCS} の説明図

$$X_f = \left(\frac{t_{Nf}}{t_{Nle}} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \cdot X_{CS} + \frac{M^*}{1-\alpha} \left\{ 1 - \left(\frac{t_{Nf}}{t_{Nle}} \right)^{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \right\} \quad (\alpha \neq 1) \quad X_f = X_{CS} + (-M^* \cdot l) \ln \left(\frac{t_{Nf}}{t_{Nle}} \right) \quad (\alpha = 1) \quad (2)$$

これにより、破壊時の応力比 X_f は非常にゆるい砂あるいは拘束応力がかかなり大きな砂では残留強度 X_{CS} と一致し、密になるほどまた拘束応力が小さくなるほど破壊時の応力比が大きくなる砂の強度特性を表現することができる。図-6は初期拘束応力、密度を変えた平均主応力一定三軸圧縮試験での破壊時の内部摩擦角 ϕ_f と初期拘束応力 p_0 、間隙比 e_0 との関係である。Bolton⁹⁾らによって報告されている砂の強度特性を解析結果はよく表現している。

図-7には $b_1/b_3=1.0$ すなわち等方性試料を、図-8は $b_1/b_3=0.9$ の異方性試料(水平堆積試料)を初期拘束応力 p_0 が同じ条件で間隙比を変えて行った種々のせん断試験(三軸圧縮試験、平面ひずみ試験、単純せん断試験)の解析結果を、龍岡らの実測値のグラフ⁶⁾に対応させて、破壊時の内部摩擦角 ϕ_f と初期間隙比 e_0 で整理している。この解析結果より(a)等方性、異方性試料によらず平面ひずみ強度は三軸圧縮強度よりも大きい。(b)平面ひずみ、三軸圧縮強度とも等方性試料より水平堆積試料の方が強度が大きい。(c)単純せん断試験では通常の方法で計算される強度(ϕ_{fs})は異方性の有無によって強度は異なっているが、水平堆積した異方性砂の内部摩擦角 $[\phi_f = \sin^{-1}((\sigma_{1f}-\sigma_{3f})/(\sigma_{1f}+\sigma_{3f}))]$ は等方性砂のそれと大きな差はない。(d)単純せん断試験では平面ひずみ条件にあるにも関わらず、通常の方法で計算される強度(ϕ_{fs})は三軸圧縮強度よりも小さい。(e)試験方法、異方性の有無に関わらず間隙比の減少により強度が増加する。等のことがわかるが、これらの傾向は既に報告されている実測値の傾向⁶⁾と対応している。

なお、本解析に用いた砂の土質パラメーターは $\lambda=0.084$ 、 $\kappa=0.01$ 、 $\phi_{CS}=30.8^\circ$ 、 $\alpha=0.85$ 、 $l=0.5$ 、 $p_0=98\text{kPa}$ 、 $N=1.0$ 、 $\xi=0.3$ である。モデルの拡張に際してパラメーターの数は増やしておらず、従来のモデル¹⁾²⁾と異なり間隙比、拘束応力によらない土質パラメーターである。

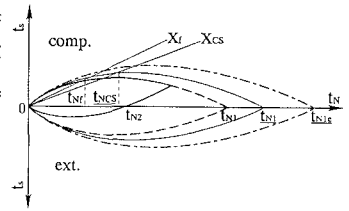


図-5 t_{Nf} 、 t_{Nle} 、 t_{Nf}/t_{NCS} の説明図

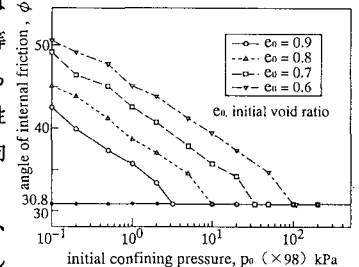


図-6 $\phi_f \sim p_0$ 関係

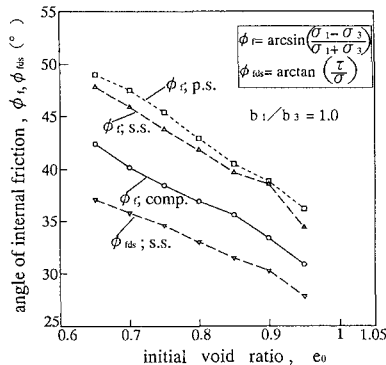


図-7 等方性砂の $\phi_f \sim e_0$ 関係

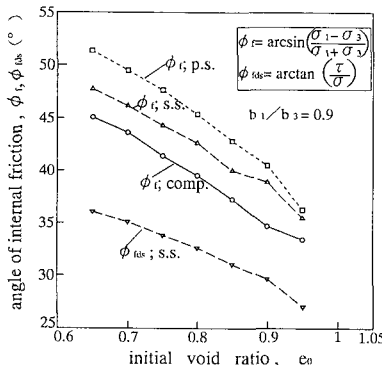


図-8 異方性砂の $\phi_f \sim e_0$ 関係

【参考文献】1) Nakai(1989): S & F, 29(1), 119-137. 2) Nakai, Fujii & Taki(1989): Proc. NUMOG III, 36-45. 3) Nakai & Funada(1992): Proc. NUMOG IV, 63-72. 4) 中井、湯浅、武馬 (1994): 第29回土質工学研究発表会. 5) Bolton(1986): Géotechnique, 36(1), 65-78. 6) 龍岡、ブラダン、林、堀井(1987): 土と基礎, 35(12), 55-60.