

排水および非排水条件下の砂の繰返し載荷特性

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○湯浅健司
 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 武馬雅志
 名古屋工業大学学生 鈴木文喜

修正応力 t_{ij} を用いた砂の等方硬化型弾塑性モデル¹⁾を提案し、一般的な応力条件下のひずみ特性を統一的に説明するとともに、移動硬化型のモデル²⁾(Kinematic t_{ij} -sand model)に拡張することにより繰返し載荷時の応力～ひずみ特性を説明している。しかしこのモデルでも、繰返し載荷を受けたことによる間隙比の減少によって応力～ひずみ挙動が変化することが説明できない。したがってここでは排水及び非排水条件下の種々の繰返し載荷試験を行うとともにこのような繰返し載荷時の砂の挙動も説明可能なモデルに拡張する。

モデルおよび実験の概要

従来の移動硬化型弾塑性モデル²⁾(Kinematic t_{ij} -sand model)は、応力比空間で移動硬化則を取り入れることにより繰返し載荷特性や主応力軸の回転の影響をも考慮できるモデルとなっている。しかし例えば排水条件で平均主応力一定の圧縮・伸張試験を行ってから初期と同じ応力状態に戻した場合間隙比は初期状態よりも小さくなっており、さらにこのような繰返し載荷を行うごとに間隙比は小さくなるが、各サイクルで発生する塑性体積ひずみ増分は減少していく(例えば図-5参照)。ここではこのような間隙比の変化の影響をモデルの中で考慮する。まず砂を等方圧密した時、間隙比 e と $\ln t_N$ (t_N : 平均応力)の間に厳密には直線関係は成り立たないが、非常にゆるい砂では直線関係が成り立つとして粘土と同様の正規圧密線(NCL)を考える。そして一般の密詰め砂は試料作成時に何らかの繰返し載荷によって間隙が減少しているものと考え、いまある砂が図-1、2に示すように塑性体積ひずみ ε_v^p が生じ応力比 X 、平均応力 t_N の状態(A点)にあるとする。ところで、現在の塑性体積ひずみに対応するNCL上の平均応力を t_{N1} とすると、 t_{N1} は塑性体積ひずみを用いて次式で表される。

$$t_{N1e} = t_{N0} \exp\left(\frac{1+e_0}{\lambda-\kappa} \varepsilon_v^p\right)$$

一方、現在の応力状態は図-2の降伏曲面の足 t_{N1} を用いて表すことができる。

$$t_{N1} = t_N \exp\{g(X^* + n)\} : g(z) = \frac{-\alpha}{1-\alpha} \ln \left| 1 - (1-\alpha) \frac{z}{M^*} \right|$$

さて正規圧密状態にある砂では $t_{N1} = t_{N0}$ となるが密な砂や繰返し載荷を受けた砂では $t_{N1}/t_{N0} < 1$ となるのでこの比を従来の硬化パラメーターにかけることにより間隙比の減少によるひずみの硬化特性を説明する。次に、繰返し載荷時には図-2の降伏曲面において t_{N1} だけでなく移動硬化時の降伏曲面の t_N 軸との交点の t_{N2} も新たにひずみ硬化を表す指標とする。このとき t_{N2} は次式で与えられる。

$$t_{N2} = t_{N1} \exp\{-g(2n)\}$$

すなわち応力状態が n 軸よりも外側にある時(載荷時)は t_{N1} を硬化パラメーターとして用い、 n 軸よりも t_N 軸側にある時(除荷時)は t_{N1} を用いれば過大評価となるため t_{N2} を硬化パラメーターとして用いる。土質パラメーターは本研究発表会別報³⁾に示す。

実験はすべてコンピューターによる自動制御計測三軸試験機を用いて、飽和した豊浦砂($e_0 \approx 0.68$)を作成し、

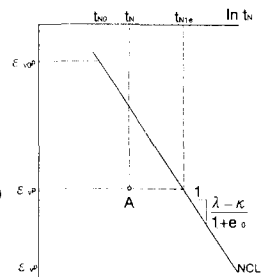


図-1 $\varepsilon_v^p \sim \ln t_N$ 関係における t_{N1}

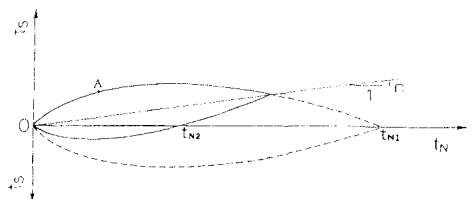


図-2 降伏曲面における t_{N1} 、 t_{N2}

排水試験では応力制御で行い、実験は図-3の応力経路図に示すように平均主応力196kPa一定のもとで O_1 から圧縮側に応力比4(C_4)、伸張側に応力比4(E_4)そして等方状態に戻る(O_1)のを1cycleとしてこれを7cycle繰返した。もう一つの実験は同様にして応力比3で繰返したものである。非排水試験はひずみ制御で行い、排水量が常に0になるように側圧制御する等体積試験で行っている。実験は全て初期応力 $\sigma_v = \sigma_1 = 196\text{kPa}$ の等方状態から行き、軸ひずみ ε_a を0.4と-0.4の間で繰返した実験(EA0.4)、同様に $\varepsilon_a \pm 1$ (EA1)、 $\varepsilon_a \pm 2$ (EA2)、 $\varepsilon_a \pm 3$ (EA3)の計4つの実験を行った。

実験と解析結果

図-4は排水条件下で単調にせん断破壊させたものと応力比4まで圧縮・伸張を3回繰り返して破壊させた実験を主応力比 σ_1/σ_3 ～体積ひずみ ε_v 関係にまとめたものであるが、単調・繰返し載荷によらず最終的(Critical state)では体積ひずみはほぼ同一になることがわかる。

次に、図-5は応力比4の排水繰返し試験を軸ひずみ ε_a ～主応力比 σ_1/σ_3 関係、主応力比 σ_1/σ_3 ～体積ひずみ ε_v 関係でまとめたものであり、また図-6は応力比3の排水試験を同様にまとめたものである。これを見ると応力比4の場合は体積ひずみの圧縮性の進行が応力比3の場合と比べ大きく見られ、逆に応力比3の場合はある程度まで圧縮した後は定常状態にあるといえる。また拡張したモデルの解析結果は繰返し載荷を受けたことによる体積ひずみの出にくさ等々を表現していると言える。しかし、まだ応力比3の繰返しでは定常状態は表現できていない。次に図-9は非排水繰返し載荷試験を応力経路 p ～ q 、軸ひずみ ε_a ～主応力比 σ_1/σ_3 関係、軸ひずみ ε_a ～偏差応力 q 関係でまとめたものである。非排水試験の解析結果との比較は当日示す。

文献 1) Nakai(1989): S&F, 29(1), 119-137

2) Nakai, Fujii&Taki(1989): Proc. NUMog III, vol. 1, 36-45

3) 武馬, 中井, 湯浅(1994): 「間隙比および拘束

応力の変化を考慮した砂の構成モデル」本研究発表会

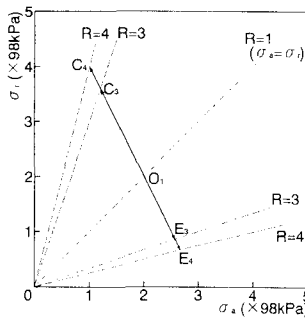


図-3

排水条件下の実験の応力経路

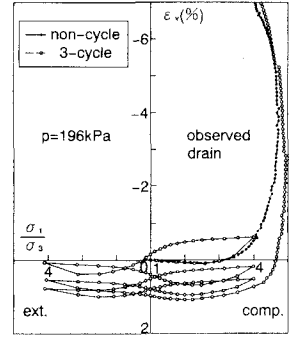


図-4

単調・繰返し載荷のせん断実験

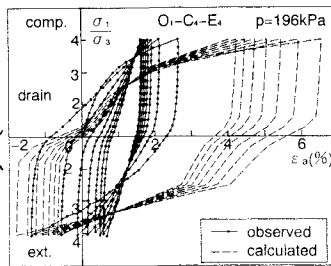


図-5 応力比4の繰返し載荷実験と解析

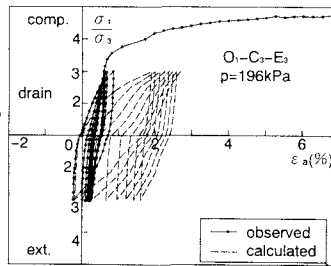


図-6 応力比3の繰返し載荷実験と解析

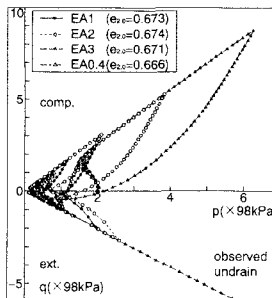
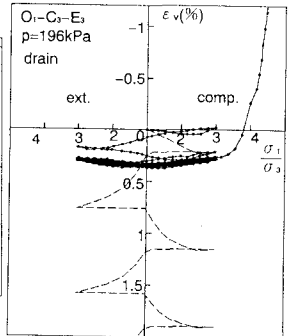


図-7 非排水条件下の繰返し載荷実験

