

## Ⅲ-A16

## 小さな振幅での繰返し载荷を受ける砂の応力～ひずみ挙動のモデル化

名古屋工業大学 大学院(学) ○檜尾 正也

名古屋工業大学(正) 中井 照夫 星川 拓哉

名古屋工業大学(学) 水島 俊基 吉田 英生

## はじめに

これまでの研究から、繰返し载荷を受ける砂は、その繰返し载荷の与え方によってダイレイタンシー特性は異なり、また、除荷後の再载荷時にも弾塑性挙動を示す事が分かっている。従来のモデルでは、再载荷時は弾性域としているため、このような挙動を表現できない。そこで、本研究では、再载荷時には弾塑性挙動をするものとしてモデルを拡張し、実測値との比較検討を行った。

拡張した *kinematic  $t_{ij}$ -sand model*

すでに提案されている砂の構成モデル<sup>1)</sup>の後続負荷条件を見直した。橋口<sup>2)</sup>による移動硬化の発展則を参考に、応力比空間における降伏曲面の中心を表す  $n_{ij}$  の変化を次式で表した。

$$dn_{ij} = b_r \left\| d\varepsilon_{ij}^p \right\| X^* \left( m_b \frac{(x_{ij} - n_{ij})}{X^*} - n_{ij} \right) \quad b_r, m_b: \text{土質パラメータ} \quad (1)$$

この拡張に伴って、塑性ひずみ増分の大きさを決める正值の比例係数  $\Lambda$  は次のように与えられる。

$$\Lambda = \frac{df}{h'} = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_{ij}} d\sigma_{ij} - \frac{K}{C_p} \left( 1 + \frac{1}{\sqrt{3}} U_{ic}^* \right) \langle dt_N \rangle}{\frac{1}{C_p} \left( \frac{\partial g}{\partial t_{kk}} + U_{FR}^* \left\| \frac{\partial g}{\partial t_{lm}} \right\| \right) - b_r \cdot X^* \frac{\partial f}{\partial n_{st}} \left\| \frac{\partial g}{\partial t_{qr}} \right\| \left( m_b \frac{x_{st} - n_{st}}{X^*} - n_{st} \right)} \quad (2)$$

さらに、下負荷面の発展則、すなわち式(2)中の  $U_{FR}^*$  を  $\Delta e$  の単調関数として次式で表す。

$$U_{FR}^* = c \left[ F(X) - F(X_f) \right] \left( \frac{t_{N1e} - t_{N1min}}{t_{N1} - t_{N1min}} \right)^d \Delta e - F(X_f) \quad c, d: \text{土質パラメータ} \quad (3)$$

これらの拡張によって、塑性変形が生じている場合は常に  $n (= \sqrt{n_{ij}n_{ij}})$  が変化し、 $n$  は回転硬化限界  $m_b$  を

上回ることはないため、破壊基準を越えて降伏曲面が存在することがなくなる。また、応力状態が弾性域から弾塑性域に変化する場合に、応力～ひずみ関係は滑らかに推移する。

## 試験結果と解析結果の比較

実験<sup>3)</sup>は密詰め( $e_{196} \approx 0.66$ )の豊浦砂を用い、平均応力一定( $p = 196 \text{ kPa}$ )の三軸圧縮および三軸伸張条件下で行った。試験は主応力比  $R (= \sigma_1/\sigma_3)$  の振幅を 0.5 にして、 $R = 1.0 \Rightarrow 1.5, 1.5 \Rightarrow 2.0, 2.0 \Rightarrow 2.5, 2.5 \Rightarrow 3.0, 3.0 \Rightarrow 3.5$  と各 5 回づつの繰返しせん断を与え、その後破壊させる経路で行った。

図-1 は三軸圧縮条件下での主応力比  $(\sigma_1/\sigma_3) \sim$  体積ひずみ  $(\varepsilon_v)$  関係図であり、図中の○プロットは今回の繰返し試験結果であり、●プロットは単調な経路でせん断した時の試験結果、◇プロットは今回の繰返し試験において各段階での最初の载荷部分をつなぎあわせたものである。また、図-2 は図-1 の繰返し载荷部分を拡大したものとなっている。同様に図-3 は図-1 に、図-4 は図-2 と対応した解析結果であり、繰返し载荷を実線、単調な载荷を破線で示している。図-5、図-6 は三軸伸張条件下での実測値であり、三軸圧縮条件下での実測値と同様の整理を行っている。また図-7、図-8 は、図-5、図-6 に対応する解析結果である。

キーワード：砂、繰返し载荷、構成式、三軸試験

連絡先(住所：名古屋市昭和区御器所町、電話・FAX：052-735-5485)

これらの図から、解析結果は単純なせん断経路の応力～ひずみ挙動をうまく表現でき、また除荷後の再載荷時の塑性ひずみの発生も表現できるのがわかる。しかし、拡張モデルでも応力比レベルが小さい場合の繰返し載荷時に、実測された体積膨張の表現に問題を残している。

今回の拡張によって、再載荷時の弾塑性挙動の表現や、弾性域から弾塑性域になる場合の滑らかな応力～ひずみ関係を表現することは出来るが、ストレス～ダイレイタンスー関係を応力履歴や密度によらないと仮定しているため、提案モデルでは実験で見られるような繰返し載荷の影響や密度の違いによるダイレイタンスー特性(特に応力比レベルの小さい場所に見られる体積膨張)の違いを表現することはできていない。

今後は、このことを表現するために、応力履歴や密度に応じて変化するストレス～ダイレイタンスー関係(塑性ポテンシャルの形状の変化)の定式化が必要である。

#### 《参考文献》

- 1) 星川・中井・檜尾(1998)：密度及び拘束応力の変化を考慮した砂の構成モデル, 土木学会論文集, No.596/Ⅲ-43号, 掲載予定
- 2) 橋口・上野・陳(1996)：下負荷面および回転硬化の概念に基づく土の弾塑性構成式, 土木学会論文集, No.547/Ⅲ-36号, pp.127-144
- 3) 檜尾・中井・星川 (1998)：応力比振幅を変えた繰返し載荷時の砂のダイレイタンスー特性, 第33回地盤工学研究発表会

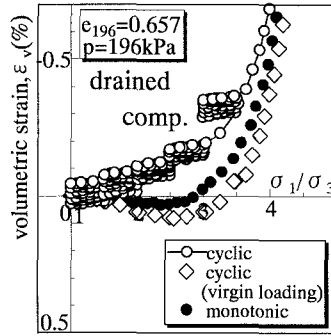


図-1 応力比～体積ひずみ関係図 (圧縮条件, 実測値)

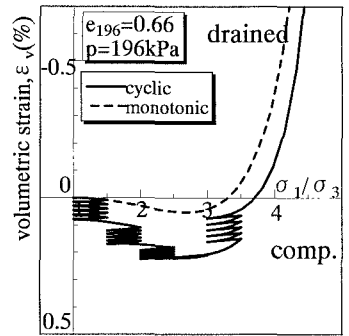


図-3 応力比～体積ひずみ関係図 (圧縮条件, 解析値)

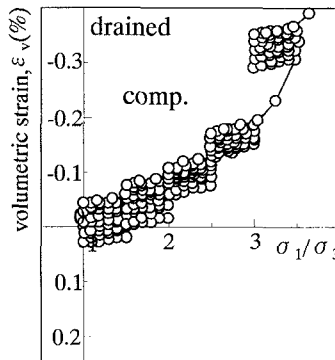


図-2 応力比～体積ひずみ関係の拡大図 (圧縮条件, 実測値)

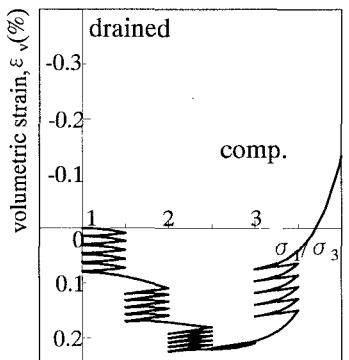


図-4 応力比～体積ひずみ関係の拡大図 (圧縮条件, 解析値)

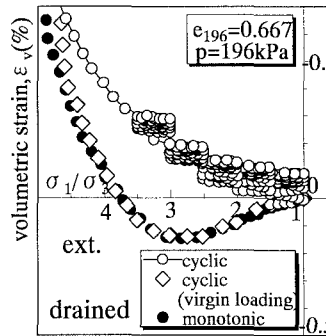


図-5 応力比～体積ひずみ関係図 (伸張条件, 実測値)

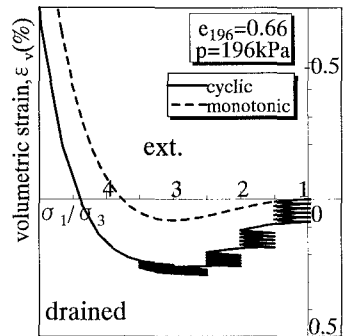


図-7 応力比～体積ひずみ関係図 (伸張条件, 解析値)

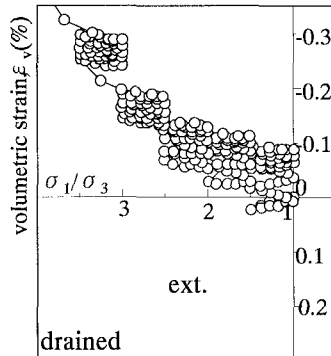


図-6 応力比～体積ひずみ関係の拡大図 (伸張条件, 実測値)

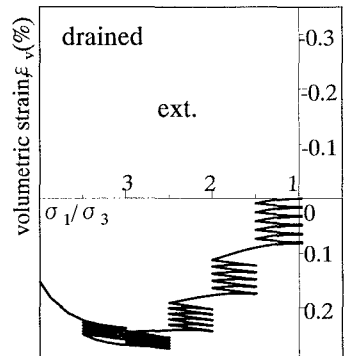


図-8 応力比～体積ひずみ関係の拡大図 (伸張条件, 解析値)