

III-170

排水条件下の砂の繰返し載荷試験とその解析

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

3次元応力下の単調な応力経路下の砂に適用されていた等硬化型の弾塑性モデル(t_{ij} -sand model)¹⁾は、繰返しを含むより一般的な応力条件下の変形・強度特性が説明可能な移動硬化型のモデル(kinematic t_{ij} -sand model)²⁾に拡張されている。ここでは、種々の応力条件下の砂の繰返し三軸試験を行い、移動硬化型モデルの解析結果等と比較することにより、モデルの適用性について検討した。

実験およびモデルの概要

実験では、飽和した豊浦砂（初期間隙比 $e_0 \approx 0.68$ ）を排水条件下の種々の応力経路にそって繰返しせん断している。試験機は自動計測制御型三軸試験機を用い、段階载荷の応力制御法で行い、各段階でひずみ速度が $1.0 \times 10^{-4}/\text{min}$ 以下になった後に次の段階応力を与えている。実験①～④の応力経路を図-1(a)～(d)に示し、载荷の順序を表-1にまとめている。ここに、実験①、②は平均主応力一定条件下の試験であり、③は側圧一定条件下、④は軸圧一定条件下の繰返し载荷試験である。

解析に用いた移動硬化型のモデル(kinematic t_{ij} -sand model)²⁾では、従来の等硬化型のモデル(t_{ij} -sand model)¹⁾の土質パラメータに1つパラメータ(ξ)をつけ加えただけで、繰返し载荷や主応力軸の回転の影響すなわち応力誘導異方性が表現可能となっている。表-2に移動硬化型モデルの土質パラメータをまとめるが、 ξ を除き他のパラメータは等硬化型モデルのそれ¹⁾と同じである。また、主応力軸の回転を含まない単調な応力経路下では両モデルの応力～ひずみ関係は一致する。この移動硬化型の特徴は以下のようにまとめられる。

- 1) 力学量 t_{ij} を用いることにより、変形・強度特性におよぼす中間主応力の影響が妥当に考慮できる。
- 2) 塑性ひずみ増分を t_{ij} 空間で関連流動則を満足する成分と等方的な圧縮成分に分けることにより、塑性流動方向の応力経路依存性が表現できる。
- 3) ひずみ硬化パラメータに t_{ij} に基づいた仕事相当量 W^p を使うことにより、正・負の両ダイレイタンスー特性が説明できる。
- 4) 土質パラメータは等方圧縮後の側圧一定三軸圧縮载荷・除荷試験よりすべて決定することができる。
- 5) t_{ij} に基づいた応力比テンソル(x_{ij})空間で移動硬化則を考えることにより、繰返し载荷時や主応力軸回転時の砂の挙動すなわち応力誘導異方性が表現できる。

表-1 実験①～④の応力経路

Test①	$O_1C_3E_3C_3E_3C_3E_3C_3 \dots$ in Fig. 1(a)
Test②	$O_1C_2O_1E_2O_1C_4O_1E_4O_1C_4 \dots$ in Fig. 1(b)
Test③	$O_1C_2O_1E_2O_1C_4O_1E_4O_1C_4 \dots$ in Fig. 1(c)
Test④	$O_1C_2O_1E_2O_1C_4O_1E_4O_1C_4 \dots$ in Fig. 1(d)

表-2 豊浦砂の土質パラメータ

G_c	0.84×10^{-2}
C_0	0.60×10^{-2}
n	0.3
$R_f(\sigma_1/\sigma_3)_f(\text{comp.})$	4.7
$D_f^p(d\sigma_y/d\epsilon_1)_f(\text{comp.})$	-0.6
α	0.85
ξ	0.3

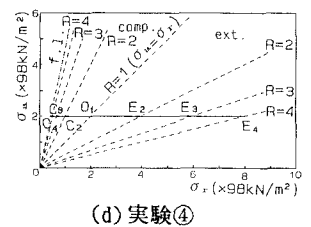
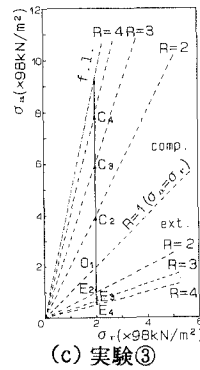
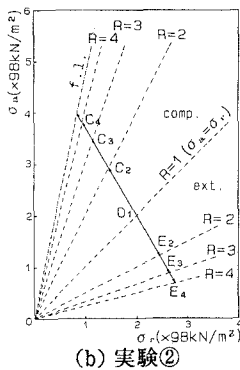
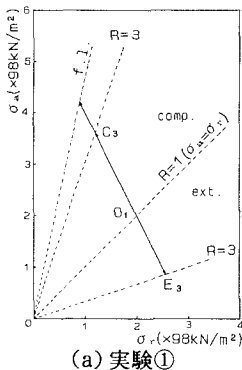


図-1 実験①～④の応力経路

実験結果と解析結果の比較

図-2～5は、実験①～④の(a)図：主応力比(σ_1/σ_3)～軸ひずみ(ϵ_a)関係および(b)図：主応力比～体積ひずみ(ϵ_v)関係の実測値(プロット)と移動硬化モデルによる解析結果(実線)を示す。図-2の等しいせん断振幅の平均主応力一定試験をみればわかるように、解析結果では各サイクルで同じ軸ひずみ同じ体積ひずみがでることになるが、実測値は繰返し回数の増加とともに体積圧縮し間隙比が小さくなるため、繰返しサイクルの増加とともに発生するひずみ量が小さくなる。解析では単調載荷時の土質パラメータと同じ値を常に用いており、間隙比の変化を考慮していないため、例えば図-2(b)に示すように解析値は繰返し載荷時の体積ひずみを過大に評価する。しかし、同じ平均主応力一定条件下の繰返し試験でも図-3に示すように応力振幅が変化する試験では軸ひずみ、体積ひずみとも解析結果は実測値とよい対応をしている。さて、図-6は実験①に対応する移動硬化モデルの解析結果と等方硬化モデルの解析結果を示すが、等方硬化モデルでは最初の載荷時の結果は同じでも繰返し載荷時の応力～ひずみ挙動は説明できないことがわかる。図-4、5は側圧一定および軸圧一定条件下の繰返し載荷試験結果と解析結果を示す。モデルは側圧一定条件下では圧縮側から伸張側に、軸圧一定条件下では伸張側から圧縮側に応力状態が変化する時の軸ひずみの大きさを過小評価しているが、体積ひずみの傾向を含めてモデルはこのような平均主応力も変化する時の砂の繰返し載荷特性をよく表現している。図-7は実験③に対応する移動硬化モデルおよび等方硬化モデルの解析結果の比較を示す。

以上、移動硬化モデルは等方硬化モデルでは難しい繰返しを含む種々の応力経路下の応力～ひずみ挙動が説明可能である。今後は構成モデルの中で繰返しによる間隙比の変化の影響も考慮できるより精妙なモデルに拡張していきたい。

文献

- 1) Nakai (1989): S & F, 29(1), 119-137.
- 2) Nakai, Fujii & Taki (1989): Proc. NUMOG III, vol. 1, 36-45.

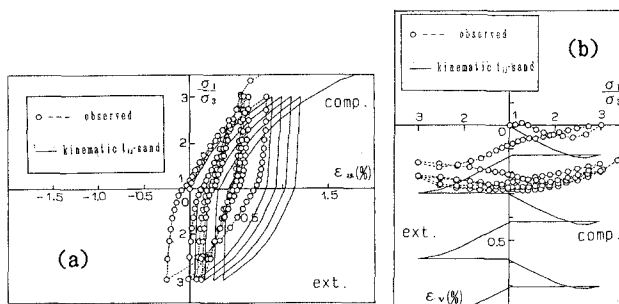


図-2 実験①の実測値と解析結果の比較

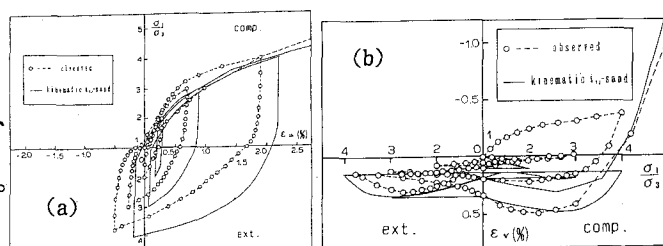


図-3 実験②の実測値と解析結果の比較

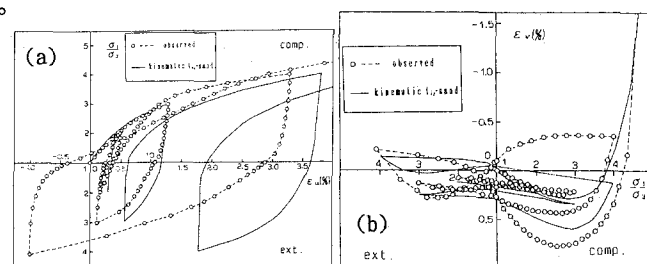


図-4 実験③の実測値と解析結果の比較

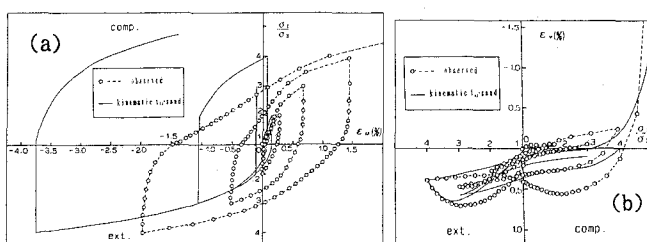


図-5 実験④の実測値と解析結果の比較

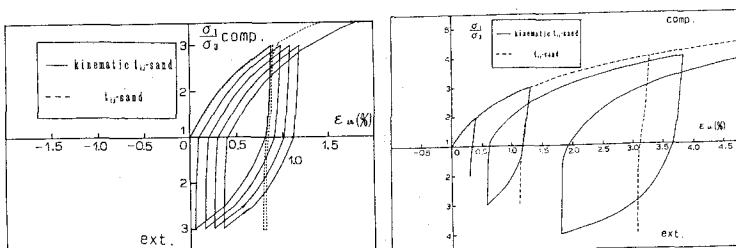


図-6 移動硬化モデルと等方硬化モデルによる解析結果の比較

図-7 移動硬化モデルと等方硬化モデルによる解析結果の比較