

応力履歴に依存しない硬化則を用いた砂の弾塑性 FEM 要素解析

東京大学大学院 学生会員 ○彭 芳楽

東京大学工学部 フェロー会員 龍岡 文夫

東京大学工学部 正 会員 M.S.A.Siddiquee

Bangladesh University of Engineering and Technology (元東京大学大学院) S.J.M. Yasin

はじめに：弾塑性モデルでは、塑性ひずみを求めるためには降伏関数・硬化則・流れ則が必要である。多くの砂の弾塑性モデルでは、一貫して降伏している場合、異なる応力状態間で生じる塑性せん断ひずみ γ^p あるいは塑性体積ひずみ ε_{vol}^p は応力履歴に依存しないと仮定し、 γ^p あるいは ε_{vol}^p を硬化パラメータにしている。しかし、豊浦砂の三軸試験と平面ひずみ圧縮試験^{1),2)}によると、 γ^p と ε_{vol}^p の両方とも応力履歴に強く依存する。破壊状態に近い応力経路をとるほど、依存性が大きくなる。この事実は、境界値問題の数値解析で大きな意味を持つ^{3),4)}。本稿では、応力履歴に依存しない硬化パラメータと硬化則に基づいて応力経路の効果を考慮できる砂の弾塑性モデルを提案し、密な砂の平面ひずみ圧縮試験を一要素モデルで FEM 解析した。

砂の構成モデル：提案するのは「応力履歴に依存しない修正された塑性ひずみエネルギーに基づく硬化則を用いた、等方ひずみ硬化・軟化非関連流れ則による弾塑性モデル」である。図 1a に示す応力経路に従った豊浦砂平面ひずみ圧縮試験結果²⁾から、塑性エネルギー W^p を若干修正した。

$$W^{p*} = \int \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p / (s / p_a)^n \quad (1)$$

(n, r, a, b, h は材料定数) を求め、これと応力状態量として $X=t/s + r.LN(s)$ の関係を示したのが図 1b である。全ての応力経路に対してほぼ一義的な $W^{p*} \sim X$ 関係が得られている。この関係は、

$$X = a \times LN(W^{p*} / b + h) \quad (2)$$

で表される (図 1b)。これを、応力経路に依存しない硬化則として用いた⁵⁾。

図 2 は、上記平面ひずみ圧縮試験結果から得られた stress-dilatancy 関係であり、平均的關係は次式となる。

$$t / s = m \cdot (-d\varepsilon_{vol}^p / d\gamma^p) + c \quad (3)$$

ここに、 m, c は材料定数である。

砂の一要素 FEM 解析：内部摩擦角 ϕ の異方性および拘束圧の依存性を考慮した Mohr-Coulomb タイプの降伏関数と、(3)式に適合する Drucker-Prager タイプの塑性ポテンシャルを採用した。また、弾性変形特性の初期及び誘導異方性を考慮した。また、ピークに達するとすべり層が瞬時に発生し始めると仮定し、ピーク以後はすべり層

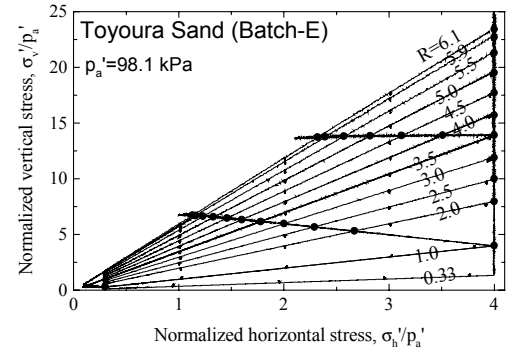


図 1a 平面ひずみ圧縮試験での応力経路

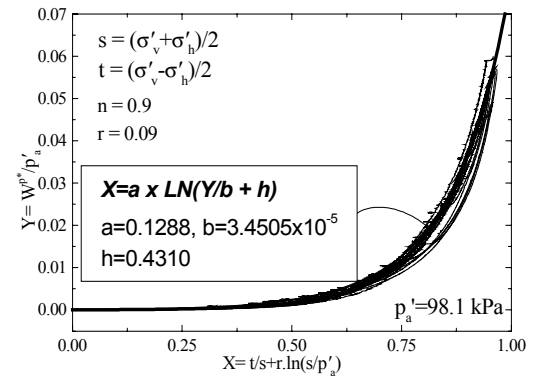


図 1b $W^{p*} \sim X = t/s + r.LN(s)$ 関係

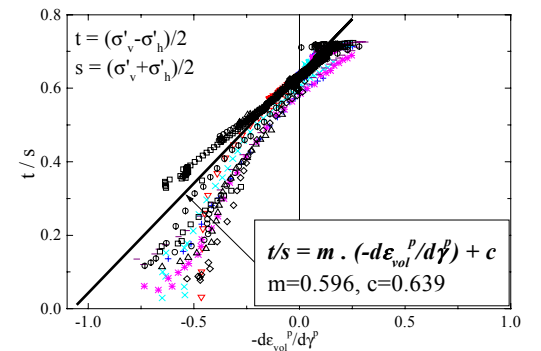


図 2 Stress-dilatancy 関係

内にはひずみ軟化する応力・ひずみ関係を用いた。すべり層の幅は砂の特性値として、すべり層が各 FEM 要素に占める面積率を考慮した上で要素内でのひずみの連続性を仮定して、ひずみの局所化を近似的に表現した。動的緩和法(Dynamic Relaxation)とリターンマッピング法(Return Mapping Scheme)を結合した弾塑性 FEM 解析を行った。砂の変形の時間効果は無視した。

図 3 は、上記の平面ひずみ圧縮試験の結果と上記モデルによるシミュレーションの比較である。実験結果とシミュレーション結果の間に若干の相違はあるが、実験結果で見られる「ひずみの応力経路依存性」が良く再現できている。図 4 と 5 は、FEM 解析による砂の変形強度特性に対する拘束圧依存性と異方性のシミュレーションである。実際の現象を良く再現している。

まとめ: 応力経路に依存しない硬化則にも基づいた砂の弾塑性モデルを提案した。提案モデルは、ひずみの応力経路依存性を考慮できることが示された。このモデルを用いて一要素の FEM 解析を行った。今後、砂地盤上の基礎の支持力などの境界値問題に対して、上記 FEM 解析法を適用する予定である。

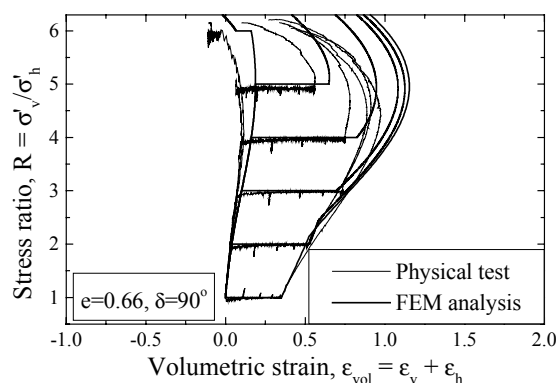
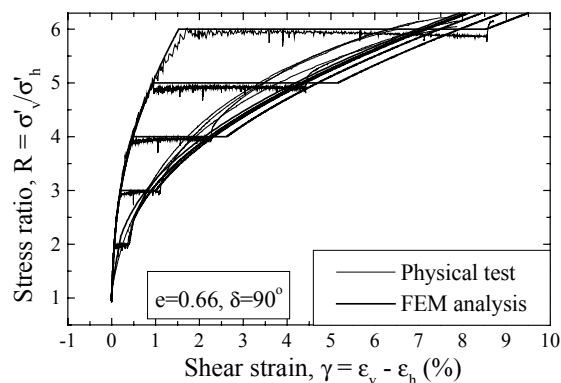


図 3 実験値と解析値の比較

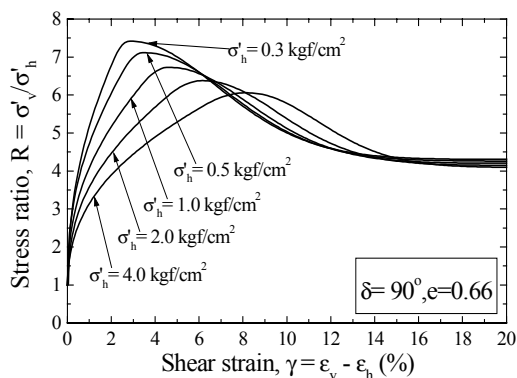


図 4 拘束圧依存性の検討(FEM 解析)

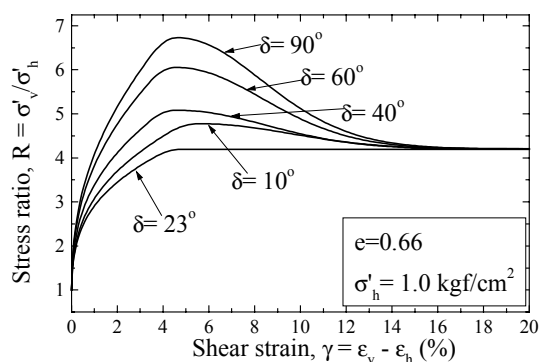


図 5 強度異方性の検討(FEM 解析)

参考文献: 1) Nakai, T. (1989): An isotropic hardening elasto-plastic model for sand considering the stress path dependency in three-dimensional stresses, Soils and Foundations; 2) Yasin, S.J.M. and Tatsuoka, F. (1999): Stress history-dependent deformation characteristics of dense sand in plane strain, Soils and Foundation (accepted); 3) Peng, F.L., Kotake, N., Tatsuoka, F., Hirakawa, D. and Tanaka, T. (1999): Plane strain compression behaviour of geogrid-reinforced sand and its numerical analysis, Soils and Foundation (accepted); 4) Siddiquee, M.S.A., Tatsuoka, F., Hoque, E., Tsubochi, T., Yoshida, O., Yamamoto, S. and Tanaka, T. (1994): FEM simulation of footing settlement for stiff geomaterials, Proc. of Int. Symposium Pre-Failure Deformation of Geomaterials, Balkema, Vol. 1, pp.531-537.5). 彭・龍岡・Siddiquee・Yasin (2000): 砂の塑性硬化モデル化、第 35 回地盤工学研究発表会 (岐阜)