

密度・拘束圧依存性を考慮した二重硬化モデルの適用性

東北学院大学工学部 (学) 薄井 良平, 三塚 保法, 永野 友基
東北学院大学工学部環境建設工学科 (正) 飛田 善雄, (正) 山口 晶

はじめに

砂の構成モデルに関する研究の目標は地盤の応力・変形解析への適用である。解析の実務では簡単で使いやすく、適用性の広い構成モデルが望まれている。

砂の構成モデルを用いた液状化解析や要素試験における砂地盤の地震時の挙動の検討の多くは、非排水条件が卓越し、密度が変化しないことを前提としてモデル化を行っている。しかし、このようなモデル化を行うと、地震時の繰返し載荷による有効拘束圧の変化や地震終了後の排水による密度変化の影響を考慮することができない。このことは、信頼性の高い液状化解析を行う上での障害の一つになっている。

砂の挙動が密度と有効拘束圧に依存することを表現するためのモデルはいくつか提案されている。本研究では、Li and Dafalias(2000)¹⁾が提案したモデルを取り上げ、その構成モデルに塑性圧縮挙動を導入したLi(2002)²⁾が提案した二重硬化モデルの適用性の検証を行った。

Li and Dafalias(2000)モデルは、せん断挙動を対象とするモデルであるために、応力比一定経路での塑性圧縮挙動を表現することができない。実地盤において、飽和砂地盤が液状化後に応力比一定経路に近い経路を取ることがあり、応力比一定経路での塑性圧縮挙動が解析結果に及ぼす影響を検討しておくことが必要である。

本研究では、塑性圧縮挙動を考慮した二重硬化モデルを対象として、側圧一定 3 軸圧縮試験、非排水試験の載荷条件における挙動を、Li and Dafalias モデルと比較・検討を行い、塑性圧縮挙動が及ぼす影響について検証した。また、応力比一定経路における挙動も検討することで、一般的な経路における適用性を確認した。

Li and Dafalias(2000)モデルにおけるひずみ増分、応力増分の表現

Li and Dafalias(2000)は、間隙比および拘束圧の影響を取り入れており、3 軸圧縮単調載荷試験結果を精度よく表現している。主な特徴として、限界状態の概念を利用して、状態変数を定義し、変相線および応力・ひずみ曲線の密度・拘束圧依存性の表現を可能としている。

Li and Dafalias(2000)モデルにおけるひずみ増分と応力増分は次式のように表現される。

$$\begin{Bmatrix} d\gamma^* \\ d\varepsilon_v^* \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/3G + 1/K_p & -\eta/K_p \\ d^*/K_p & 1/K - d^*\eta/K_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dq \\ dp' \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 G はせん断弾性定数、 K_p と d^* はそれぞれ

せん断に関する塑性係数とダイレイタンス係数、 K は体積圧縮弾性係数、 η は応力比である。

二重硬化モデルの定式化

塑性圧縮挙動については、正規圧密粘土で観察される $e - \log p'$ 関係の線形性を仮定し、その塑性体積変化に伴って塑性せん断ひずみが応力比に応じて発生するという定式化も可能であるが、本研究では Li(2002)に従って、応力比が変化するせん断挙動と同様の定式化を行なう。

応力比一定の圧縮経路で満足すべき挙動を列挙すると、以下の様になる。なお、上添え字“ p ”は塑性挙動を、下添え字“ 2 ”は圧縮挙動における量をそれぞれ表現している。

- 1) 等方圧縮時においては、せん断ひずみは発生しない。
- 2) 圧縮応力が増加するに伴って、与えられた平均応力増分 Δp により発生する塑性体積ひずみ増分は小さくなる。すなわち、 p が大きくなると塑性係数 K_{p2} は大きくなる。
- 3) 応力比 η が 0 でないとき、塑性体積ひずみ増分 $\Delta \varepsilon_{v2}^p$ に従って塑性せん断ひずみ増分 $\Delta \gamma_2^p$ が生じ、応力比 η が大きいほど $\Delta \gamma_2^p / \Delta \varepsilon_{v2}^p$ (すなわち、ダイレイタンス係数 D_2 の逆数) $= (1/D_2)$ は大きくなる。

以上の要求を満たす定式化を行う。Li(2002)は、繰返し載荷時のヒステリシス特性を表現するために、境界曲面モデルに基づく定式化を行っているが、ここでは単調載荷時の挙動に限定して定式化する。すなわち、降伏曲面内は弾性変形のみが生じるとする。

Li(2002)によると塑性ひずみ増分は、マトリックス表示で次式のように表現される。

$$\begin{Bmatrix} d\gamma^p \\ d\varepsilon_v^p \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1/K_{p2} \\ 0 & \sqrt{2}D_2/\sqrt{3}K_{p2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} dq \\ dp' \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式(2)において、 K_{p2} と D_2 はそれぞれ圧縮に関する塑性係数とダイレイタンス係数である。

式(1)及び式(2)の和をとり、 dq と dp' について整理することで塑性圧縮挙動を取り入れた二重硬化モデルを次式のように表現できる。

$$\begin{Bmatrix} dq \\ dp' \end{Bmatrix} = \frac{1}{A} \begin{bmatrix} 3G\sqrt{6}D_2K_pK + 3K_{p2}(K_p - d^*K\eta) & -9GK(K_p - K_{p2}\eta) \\ -9d^*GK_{p2}K & 3K(3G + K_p)K_{p2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\gamma \\ d\varepsilon_v \end{Bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 $A = (3G + K_p)(\sqrt{6}D_2K + 3K_{p2}) - 3d^*K(3G + K_{p2} + \eta)$ である。

ある。

計算結果

図-1, 図-2, 図-3 までの結果は, Li and Dafalias モデルと二重硬化モデルを比較した結果である。図-1 及び図-2 は初期間隙比 0.740, 初期拘束圧 1500kPa の条件下で側圧一定 3 軸圧縮試験を行った比較結果で, それぞれ $q-\gamma$ 関係, $\varepsilon_v-\gamma$ 関係を示している。また図-3 は, 初期間隙比 0.730, 初期拘束圧 1500kPa の条件下で非排水試験を行った比較結果の $q-\gamma$ 関係を示している。

図-4 では, 初期間隙比 0.740, 初期拘束圧 30kPa の条件下で応力比一定試験を行った結果の $e-p'$ 関係と, 同じ条件で剛性の低下を考慮して, 液状化後の大きな体積圧縮が生じた場合を想定した結果を示した。

図-1, 図-2, 図-3 より, 側圧一定 3 軸圧縮試験や非排水試験のようにせん断挙動が卓越する経路では, 塑性圧縮挙動の影響は極めて小さいことがわかる。しかし, その結果を詳細に比較すると, 図-2 のように二重硬化モデルの方が, 体積ひずみの最大値が大きいことから, 二重硬化モデルの方が圧縮性が大きく, その影響が多少見られるという妥当な結果が得られた。

図-4 では, せん断弾性係数の値を 1/10 倍として液状化後の体積圧縮挙動を模式化した。

まとめ

- 1) 側圧一定 3 軸圧縮試験および非排水試験は, せん断挙動が卓越する経路なので, 塑性圧縮挙動を取り入れた影響は小さい。
- 2) せん断挙動のみを対象とした Li and Dafalias モデルでは表現できない応力比一定経路を二重硬化モデルで再現することができた。応力比一定経路において, 剛性を低下することで, 液状化後の大きな体積圧縮を表現できる可能性を示すことができた。実際の液状化後の体積変化は, 間隙水圧消散の早い段階で大きな圧縮が卓越し, 剛性が速やかに回復するので, より実際の挙動に近づけるためには詳細な検討が必要である。

参考文献

- 1) Li, X.L. and Dafalias, Y.F.: Dilatancy for cohesionless soil, Geotechnique, Vol.50, No.4, pp.449-460, 2000
- 2) Li, X.L. : A sand model with state-dependent dilatancy, Geotechnique, vol.52, No.3, pp.173-186, 2002
- 3) 三塚保法: 密度変化を考慮した砂の構成モデルに関する研究: 単調載荷時の表現, 東北学院大学土木工学科卒業論文, 2006

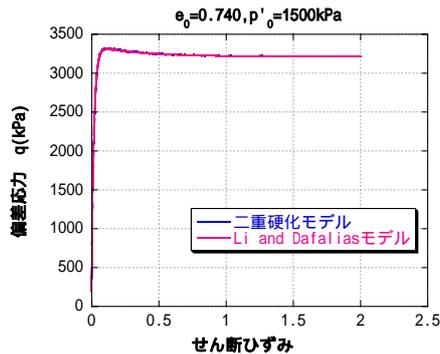


図-1 側圧一定三軸圧縮試験における $q-\gamma$ 関係

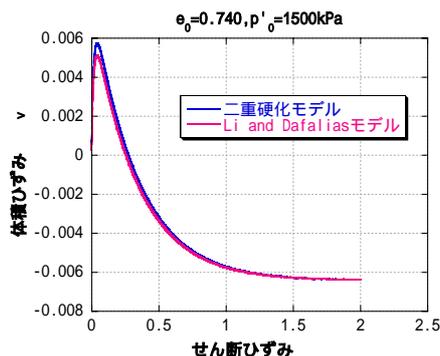


図-2 側圧一定三軸圧縮試験における $\varepsilon_v-\gamma$ 関係

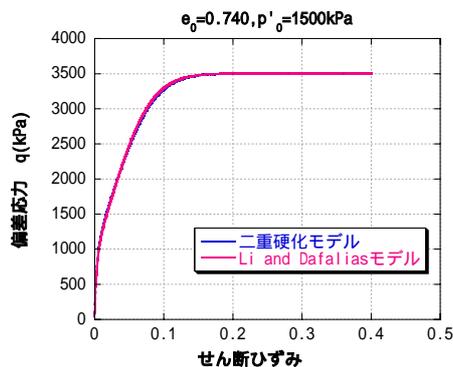


図-3 非排水試験における $q-\gamma$ 関係

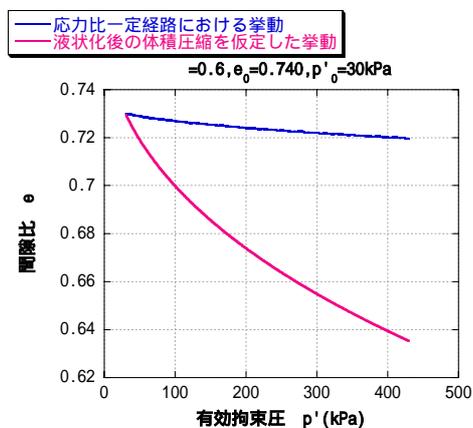


図-4 液状化後の体積圧縮を仮定した挙動の表現