東北学院大学工学部環境建設工学科	(学)	○似内	聖矢
東北学院大学工学部環境建設工学科		服部	貴洸
東北学院大学工学部環境建設工学科	(正)	飛田	善雄

1. はじめに

地震時の飽和砂地盤の液状化現象や緩斜面の流動 現象などを一つの構成モデルで表現しようとする試 みは数多くの研究者によりなされているが、いまだ 十分なレベルには達していない。多くのモデルは、 地震時の繰り返し載荷による有効拘束圧の変化や、 地震終了後の間隙水の移動による密度の変化が砂骨 格の変形挙動に及ぼす影響が表現できないモデルを 使用している。本研究では砂のような粒状態の挙動 を表現する目的で提案された数多くのモデルのう ち、Li&Dafalias¹⁾(以下、L&D)が提案したモデル を拡張して、砂の内部構造に「安定性」の概念を導 入し、液状化後の挙動の再現を試みた結果を報告す る。

2. Li&Dafalias モデルの特徴

L&D モデルは、密度および拘束圧の影響を取り入 れており、多様な条件での多様な挙動を表現すること が検討されている²⁰。主な特徴として、限界状態の概 念、変相線の密度・拘束圧依存性の表現、応力-ひず み曲線の密度・拘束圧依存性の表現が可能である。

限界状態の概念の定義と密度・拘束圧依存性の表現 について説明する。砂を様々な初期間隙比から様々な 方法でせん断した場合、最終的に、拘束圧 p'と偏差応 力qは、q = Mp'で指定される直線上に位置すること となり、最終的な状態での間隙比を限界間隙比 e_c と定 義する。この限界間隙比 e_c と拘束圧 p'の関係は一意 的に定まるとする概念を限界状態の概念という。

L&D モデルは、状態変数 *ψ* により密度・拘束圧依 存性を表現している。

$$\psi = e - e_c = e - \left| e_{\Gamma} - \lambda_c (p' / p_a)^{\zeta} \right| \tag{1}$$

ここで e_{Γ} はp'=1kPaにおける限界間隙比、 p_a は大気 圧、 λ_c と ζ は物性パラメータである。L&D モデルで は、状態変数 ψ が重要な役割を果たし、 ψ が正で大き いときには緩い砂の挙動を示し、小さくなり負になると密な砂の挙動となる。また、L&Dモデルで重要な役割を果たすせん断弾性係数*G*は密度依存性、有効拘束圧依存性を考慮し、次式で定義される。

$$G = G_0 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \sqrt{p' \cdot p_a}$$
(2)

3. 液状化により構造劣化を起こした砂の特異 な挙動へのモデルの拡張

繰返しせん断力を受けると、砂の変形挙動は、排水 試験においては負のダイレイタンシー、非排水試験に おいては過剰間隙水圧の上昇をもたらす。液状化した 砂地盤は、ゆるやかな勾配であっても、斜面の流動現 象をもたらす。また、間隙圧消散時に大きな沈下をも たらす。これらの現象を対象とした実験的研究も進め られ、液状化した砂の内部構造との関連性が強く指摘 されている。ここで、砂の内部構造について記す。あ る外力に対し砂粒子が抵抗できているのは、砂粒子が その外力に対し抵抗できるような構造を形成するか らである。この砂粒子の構造の安定性を、"安定度"と いう言葉で表現し、L&D モデルに導入することで、液 状化の挙動を表現することを試みる。構造の安定性は 載荷方向によって異なるがここではスカラー量とし て扱う。今回 L&D モデルを拡張するにあたって、剛 性回復を次の2パターンで考えた。

- 液体状になった地盤内の砂粒子同士が流動により 結びつき偶発的に構造をつくる場合。
- ② 液状化後、間隙水圧が消散する際に、砂粒子同士の距離が近くなり必然的に構造をつくる場合。

この2パターンにおいて、前者は非排水条件であ り後者は排水条件であるため L&D モデルに導入する にはそれぞれ別々にプログラムを作成する必要があ る。

構造の安定度を"*s*"という新たな内部変数で表現 する。この内部変数*s*を、①ではロジスティック方

キーワード:弾塑性モデル、密度・拘束圧依存性、ダイレイタンシー、状態変数 *〒985-8537 多賀城市中央1丁目13番1号、Tel 022-368-7396 程式とよばれる関数を使用し(図.1)、②は比較的用 いやすい指数関数 e^x の関数を使用した(図.2)。構造 が最も安定しているときの値をs=1、構造が完全に 乱されたときをs=0とした。内部構造が残存してい るか、消失しているのかで、剛性回復の早さは異な る。つまり内部構造が比較的残存しているときの安 定度sは1に近い数値になるということである。今 回はs=1、0.5、0の3つの状態について計算した。 そして、sの初期値から徐々に値が上昇していき、sが1に達した時点で、s=-定とした。

式(2)の中で、 G_0 が構造の安定性を表現していると 考え、また、式(1)より e_{Γ} は ψ の式に重要な役割を はたしていることがわかる。本研究では、この2つ のパラメータを変化させることで液状化後の挙動の 再現を試みた。 G_0 は $G_0 = 1.25e^{4.605s}$ と定式化し、 e_{Γ} は $e_{\Gamma} = 0.85e^{0.094s}$ と定式化した。このように定式 化することで、sが上昇するに伴い、 e_{Γ} と G_0 の値が 緩やかに上昇するようになる(ここで、s=0の時、 $e_{\Gamma}=0.85$ 、 $G_0=1.25$ とし、s=1の時、 $e_{\Gamma}=0.934$ 、 $G_0=125$ とする)。

4. 液状化後のせん断挙動および沈下挙動の計 算

非排水条件のせん断抵抗・せん断ひずみ関係のグラフ(図.3)は、緑が *s*=1、青が*s*=0.5、赤が*s*=0の挙動を表現している。安定度が高ければ初期の段階で応力が上昇しており、安定度が低ければ大きな流動を示した後、せん断抵抗が回復する挙動が見られた。排水条件の体積ひずみ・有効拘束圧関係のグラフ(図.4)は安定度が高ければ体積変化は小さく、安定度が低いときは、有効応力が回復する過程で、体積変化が大きくなることが計算できている。ここで、グラフ上、圧縮体積ひずみを下方向に表現するため、負の値としている。

これらのことより、L&Dモデルを基本として、安定 度を変化させることにより、多様な挙動が表現でき る可能性を示すことができた。現時点では、モデル 化は完結しておらず、せん断初期から、繰り返し載 荷時の挙動、液状化後の挙動を一貫して表現するた めには、さらなる研究が必要である。

5. 参考文献

1) Li and Dafalias : Dilatancy for cohesionless soil,

Geotechnique, 50, 4, pp.449-460, 2000

 2) 飛田善雄、三塚保法、山口晶、吉田望:密度と拘束圧依存性 を考慮した砂の構成モデルの検証 Vol. 11. pp. 411-422、2008



図.1 非排水条件の安定度・せん断ひずみ関係













図.4 排水条件の体積ひずみ・有効拘束圧関係