

砂の内部構造変化を考慮した弾塑性モデルの検討

東北学院大学工学部環境建設工学科 学生会員 ○石橋紘希 増子悟志 新田悠生
東北学院大学工学部環境建設工学科 フェロー会員 飛田善雄

1. 序論

砂の力学は、従来、土の等方性を前提として議論されることが多かった。しかし、砂地盤は堆積時に土粒子長軸方向が水平を向き、粒子間接点の分布などに起因して異方性を有し、複雑な応力条件下のせん断挙動特性の把握および構成モデルの構築にあたっては、異方性の影響を考慮することが不可欠である。

本研究では、Li&Dafalias(2000)¹⁾が提案した構成モデル(以下 L&D モデル)を用いる。このモデルは、数多くの構成モデルの中で有効拘束圧および密度依存性を比較的簡単な関係式で表現できるモデルである。このモデルに、異方性を取り込むための数学的方法について考察を加える。

2. 異方性および内部構造の重要性

異方性の主軸方向は原則的には鉛直・水平の方向である。しかし、色々な地質学的な要因によって、異方性の主方向が傾斜したり、水平面内でも異方性を持ったり、三次元的異方性を示すこともある。これらの異方性は総称して、地盤または土の構造異方性と呼ばれている。さらに、土は一つの粒状体であるから、裁荷に伴う内部応力の変化によって、粒子のかみ合い状態に変化が生じ、構造異方性が誘発される。このように、応力によって生じる構造異方性を応力誘導異方性といい、これに対し、裁荷以前から土が本来持っている構造異方性を固有異方性という。

複雑な応力条件下のせん断挙動特性の把握および構成モデルの構築にあたっては、異方性の影響を考慮することが不可欠である。

また、多くの微視的観察に基づく研究で、粒子間力を伝える「力の鎖」と呼ばれる特殊な内部構造が存在し、その重要性が指摘されている。力の鎖は外力を受けると土粒子が自ら粒子間を伝える特殊な構造を形成する。さらに、力の鎖は内部に大きな間隙を有し、力の鎖という構造単位ですべりや回転をするといった特徴を持つ。

本研究では異方性および内部構造の重要性を理解す

るために、チョークを用いて簡単な模型実験で再現した。結果を図1に示す。赤い矢印の方向は最大圧縮応力の方向である。チョークの様子を観察してみると、楕円のような構造を形成しているのが分かる。さらに、最大圧縮応力方向と楕円の長軸の方向が一致するような構造を形成しているのが分かる。

3. L&D モデルの特徴

L&D モデルは、せん断変形が卓越した状態で、せん断応力の変化がなくダイレイタンシーも生じない限界状態(Critical state)の存在を仮定し、限界状態での間隙比と有効拘束圧の一意的な関係を利用して、状態変数 ψ を定義する。

$$\psi = e - e_c = e - \left| e_r - \lambda_c \left(p' / p_a \right)^\xi \right| \quad (1)$$

ここで e_r は $p' = 1[\text{kPa}]$ 時における限界状態比、 p_a は大気圧、 λ_c と ξ は物性パラメータである。この状態変数 ψ に塑性係数、ダイレイタンシー係数が依存しているという定式化を行うことにより、密度および有効拘束圧依存性を簡潔に表現している。L&D モデルでは、状態変数 ψ が重要な役割を果たし、 ψ が正の時には緩い砂の挙動を示し、 ψ が負の時には密な砂の挙動を示す。

4. 異方性の導入

Li and Dafalias(2012)²⁾は、異方性を導入するにあたり、異方性の程度を表すパラメータ A を定義した。

$$A = \mathbf{F} \cdot \mathbf{N} \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{F}$ は異方性の構造の方向を表すテンソル量、 $\mathbf{N}$ は載荷方向を表すテンソル量である。テンソル量の内積を取り、スカラー量 A を異方性の指標とした。この A を用いて ψ に代わる新たな状態変数 ζ を定義する。

$$\zeta = \psi - \psi_A \quad \psi_A = e_A(A - 1) \quad (3)$$

ここで、 ψ_A は異方性を考慮した状態変数、 e_A は異方性を考慮した限界状態時の間隙比である。

異方性を導入する場合、応力ひずみ関係に直接異方性を導入するような方法(飛田他)³⁾もある。L&D(

キーワード：弾塑性モデル、異方性、ダイレイタンシー、力の鎖

東北学院大学 〒985-8537 多賀城市中央一丁目 13-1, Tel : 022-368-7396

2012)モデルでは、内部構造を表現するテンソルと載荷応力状態を表現するテンソルの内積により定義されるスカラー変数を用いて異方的挙動を表現するという間接的かつ巧みな手法を用いたことになる。

5. 異方性を導入したモデルの解析結果

本研究では、三軸圧縮における非排水せん断挙動において、供試体の切出し角度の違いがせん断挙動に与える影響に関するモデルの計算結果の代表例を示す。

図2～図4は、間隙比を $e = 0.75$ ，初期有効拘束圧を $p_0 = 1000[\text{kPa}]$ で一定にして、切出し角度の値を変化させたときの非排水せん断時の計算結果である。計算に必要なパラメータの値等は Li and Dafalias(2012)と同様である。

図2は $F - \gamma$ 関係の挙動である。切出し角度が $\alpha = 0$ の時は、異方性のパラメータ F は単調に増加してゆく傾向が見られる。逆に、切出し角度が $\alpha = \frac{\pi}{2}$ の時は弱軸方向に力が作用するため、構造はせん断初期に等方性に向かう。そのため $F - \gamma$ 関係を見てみると、ひずみ5%付近で $F=0$ となっている。その後、外力に抵抗するような構造を形成する。外力に抵抗する構造を形成する過程で F が増加してゆく傾向が見られる。

図3は $p' - q$ 関係の挙動である。どの切出し角度においても、初期に有効拘束圧が低下する傾向が見られる。これはせん断に伴う負のダイレイタンシーにより、有効拘束圧が低下するためである。また、切出し角度が小さいほど、有効拘束圧の減少量が小さい。

図4は $q - \gamma$ 関係の挙動である。切り出し角度が $\alpha = 0$ の時は、外力に抵抗できる構造の形成が容易なためせん断応力が増加していく傾向がある。逆に切りだし角度が $\alpha = \frac{\pi}{2}$ の時は、等方性を示した後、異方性に向かうためなだらかに限界状態へ向かう。以上よりこのモデルは過去の研究の結果と一致するような解析結果を示すことに成功している。

構成モデルに異方性を表現する適切なスカラーパラメータを導入する方法により、異方性を考慮した挙動の再現が可能であることが確認できた。しかし、この方法は三軸圧縮に限定しているなどその適用性に制限があり、さらに広範な構成モデルを開発していくためには、砂の微視的構造の変化に基づく詳細な研究が必要である。

6. 参考文献

- 1) Li and Dafalias(2000):Dilatancy for cohesionless soil, Geotechnique, 50, 4, pp. 449-460
- 2) Li and Dafalias(2012):Anisotropic Critical State

Theory:Role of Fabric, J.Engrg.Mech. ASCE,138,3, 263-275

- 3) 飛田他(2003):工学材料の異方的挙動の簡易な表現方法：修正応力法の地盤材料への適用，応用力学論文集，土木学会，6，407-418

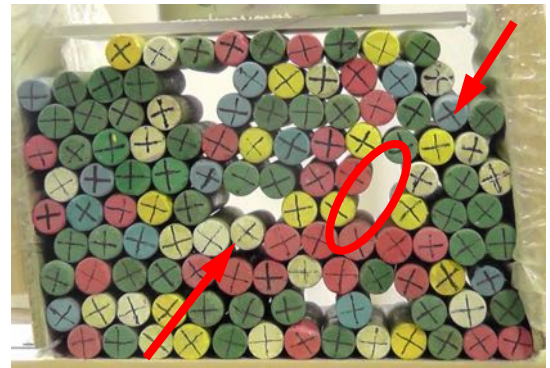


図1 実験写真

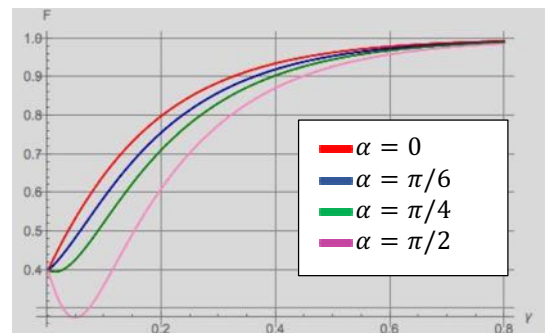


図2 $F - \gamma$ 関係

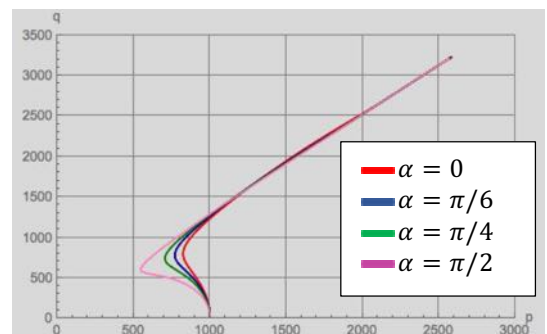


図3 $p' - q$ 関係

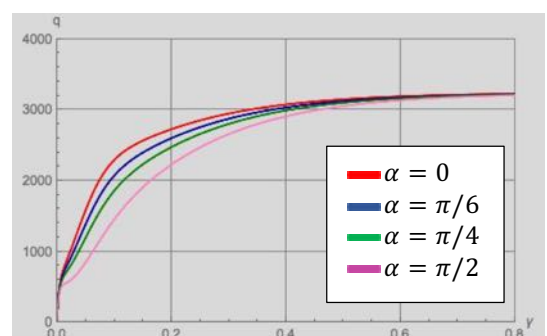


図4 $q - \gamma$ 関係