

液状化を受けた砂の変形挙動を表現する弾塑性モデルの開発

東北学院大学工学部環境建設工学科 学生会員 ○新田悠生, 佐藤文也
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

砂のような粒状体は、内部構造に影響を受けて様々な変形挙動を示す。特に、非排水条件で大きなせん断を受けた砂は除荷時に間隙水圧が上昇し、ほぼ等方応力状態で流動する。液状化時および液状化後の挙動を考えるうえで大事な挙動である。砂が外力に抵抗するときには「力の鎖(force chain)」と呼ばれる特殊な構造を土粒子が自ら構成するという性質があるということが知られている。

これまで Li & Dafalias(以下, L&D)¹⁾ が提案したモデルを用いて、砂の様々な基本的挙動を解析し、その有用性を示してきた²⁾。液状化後の挙動についてもスカラー量である内部変数を取り入れることにより、おおよその挙動を示すことができた。³⁾

本研究では、L&D モデルによる砂の基本的な挙動の解析結果を示し、その計算結果について、力の鎖の観点から考察を加える。

2. L&D モデルの特徴

L&D モデルは、砂のような粒状体を表現する目的で提案された数多くのモデルのうち、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、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ス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、ダイレイタンス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。また、弾性係数 G 、 K は、密度および有効拘束圧依存性を考慮して次式で定義する。

$$G = G_0 \frac{(2.97 - e)^2}{1 + e} \sqrt{p' / p_a} \quad K = G \frac{2(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)} \quad (2)$$

ここで ν はポアソン比で定数としている。式(2)において e 、 p' は変数として考えるので、载荷中に e 、 p' の変化があれば G 、 K は変化することになる。

3. 砂の内部構造について

砂のような粒状体では間隙比が内部構造を示す第一義的なパラメータとして認知されている。L&D モデルでは状態変数 ψ に密度依存性が含まれている。その次に2階の構造テンソルが提案された。粒子間接点の方向、粒子の重心を結ぶ線分、間隙の形状などが微視的観察対象となっている。しかし、点としての性質であるテンソルでは限界があり、構成モデルの定式化に至る有義な関係は未だ導き出せていない。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(柱とも呼ばれる)(force chain)(図 1)⁴⁾」の存在が指摘されている。力の鎖の特徴をまとめると以下ようになる。

- ・ 外力を受けると、土粒子自らが粒子間力を伝える特殊な構造、すなわち力の鎖を形成する。
- ・ 力の鎖は内部に大きな間隙を有している。力の鎖が形成されると個々の粒子間のすべりや回転ではなく、力の鎖という構造単位で変形する。
- ・ 力の鎖が容易に形成されるかどうかは、砂に与えられた乱れの大きさに依存する。

本研究では、上記のような特徴を持つ力の鎖の観点から L&D モデルの計算結果の考察を行う。

4. L&D モデルによる非排水せん断挙動の考察

本研究では、非排水せん断挙動において、初期有効拘束圧と初期間隙比の値の違いがせん断挙動に影響に関するモデルの計算結果の代表例を示す。

図 2(a)は、間隙比を $e = 0.75$ と一定にして、初期有効拘束圧の値を変化させたときの $p' - q$ 空間の挙動である。拘束圧が大きくなるほど、負のダイレイタンスーが卓越し、有効拘束圧の低下が大きくなることを示している。

図 2(b)は、初期有効拘束圧を $p' = 1000$ と一定にし

キーワード：弾塑性モデル、液状化、状態変数、弾性係数、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

て、間隙比が変化した場合の $p' - q$ 空間での挙動を示している。間隙比が大きいほど有効拘束圧の低下が大きいことを示している。

図3は、液状化後の非排水せん断挙動を示している。この計算においては、内部構造の劣化を、安定指数 S を用いて表現し、 S とせん断開始後に発生したせん断ひずみ γ の間に関係式を設定し、液状化を受けた砂が非排水せん断時に、抵抗をほとんど示さない領域を経由した後、急激にせん断抵抗を回復する挙動を示している。この計算結果より、適切な関数関係を与えることにより、液状化後の非排水せん断挙動をL&Dモデルにより再現できることが示された。³⁾

5. 力の鎖に基づく非排水せん断挙動の解釈

適当な関数関係を与えることにより、様々な挙動を再現できることは示された。しかし、その定式化にできる限り物理的考察を行いたい。力の鎖を中心に、図2および、図3の結果について考察する。

力の鎖の発達に正のダイレイタンスと強く関連することを考えると、有効拘束圧の大きい場合には、力の鎖が発達しにくいことが図2(a)よりわかる。有効拘束圧が大きい場合には、粒子間力のばらつきも大きくなる。このことが力の鎖の発達を妨げるものと推察される。図2(b)は間隙比が大きいほど、力の鎖の発達が遅れることを示している。これは容易に理解できる。間隙比が大きいということは、単位体積の中の粒子が少なく、粒子接点も少なくなる。このことは力の鎖が発生しにくいことを示している。

液状化を受けた砂は内部構造が乱されており、せん断抵抗に寄与する力の鎖は未発達である。力の鎖が未発達な内部構造はせん断抵抗を発揮することができず、流体のように挙動する。(図3参照)大きなせん断を受けた時点で、粒状体の流れに特有の挙動であるジャミング(jamming)が発生し、力の鎖の形成が可能となり、せん断抵抗を示すものと考えることができる。

以上より、力の鎖の観点から、複雑なせん断変形挙動を解釈する可能性が示された。しかし、考察は不十分であり、砂の多くの変形挙動を力の鎖を介して説明する研究を進めていきたい。

6. 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応用力学論文集, Vol. 11pp. 411-422, 200

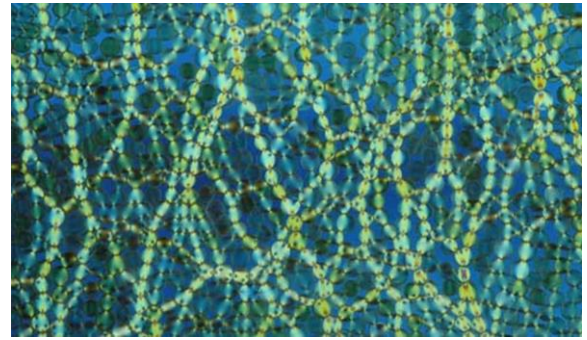
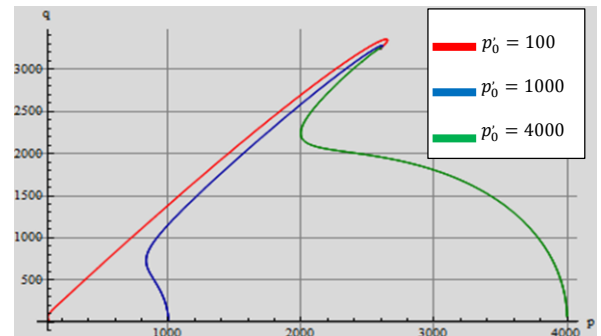
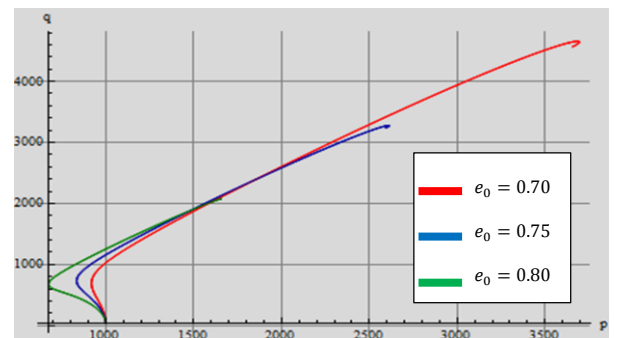


図1 力の鎖(force chain)



(a) 有効拘束圧依存性の計算結果



(b) 初期間隙比依存性の計算結果

図2 非排水せん断時の $p' - q$ 関係

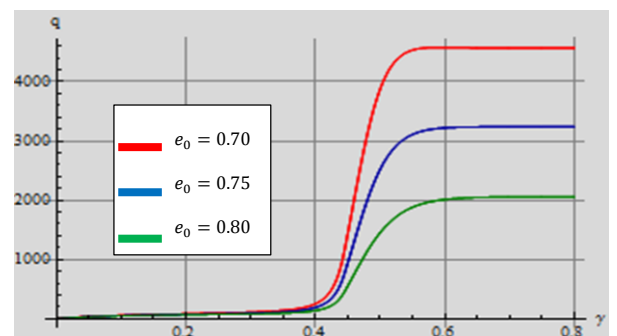


図3 液状化を受けた砂の $q - \gamma$ 関係
(初期有効拘束圧一定)

- 3) <https://www.aps.org/about/physics-images/archive/chains.cfm>
- 4) 似内, 服部, 飛田 (2015) 構造劣化を起こした砂の変形挙動, 土木学会東北支部技術研究発表会, III—18