

自然堆積粘土地盤の遅れ破壊シミュレーション

名古屋大学 正会員 ○山田 正太郎, 野田 利弘

学生会員 矢藤 彰悟

(財)地震予知総合研究振興会 フェロー会員 浅岡 顕

1. はじめに

本稿では、慣性力を考慮した水～土骨格連成有限変形解析によって、自然堆積粘土地盤が示す遅れ破壊現象の破壊前、破壊中、破壊後挙動を再現する。

2. 解析条件

解析には、骨格構造の変化を記述する SYS Cam-clay model¹⁾を搭載した水～土骨格有限変形解析コード GEOASIA²⁾を用いた。図1に解析に用いた有限要素メッシュと境界条件を示す。計算は二次元平面ひずみ条件下で行った。剛で摩擦のある帯状基礎に載荷する問題を想定した。基礎に相当する節点間に線形制約条件³⁾(長さ不変・角度不変)を課すことで、剛で摩擦のある基礎を表現した。加えて、僅かな数値誤差によって、基礎の非対称な運動を防ぐために、基礎中央節点の水平変位を拘束するとともに、節点間の方向不変条件を用いた。解析に用いた材料定数は、典型的な粘土の弾塑性挙動(過圧密解消が構造劣化に比べて速く、異方性の発達が遅い)が再現されるように与えた。支持力計算に先立って、初期に構造と異方性の発達した正規圧密地盤から地表面荷重(98.1kPa)を除荷した後、定常状態に落ち着くまで圧密計算を行った。解析は、この地表面荷重のない過圧密な地盤に対して行った(材料定数および初期値の詳細は文献⁴⁾に譲る)。基礎中央節点に載荷速度 0.015kPa/sec で荷重制御により鉛直載荷を行った。鉛直荷重(=載荷重/基礎の断面積)が125kPa, 126kPa, 127kPa, 128kPa, 129kPa, 130kPaに達した後、載荷を止めて荷重を放置した。

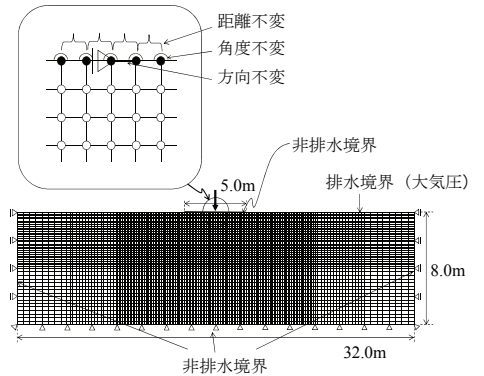


図1 有限要素メッシュと境界条件

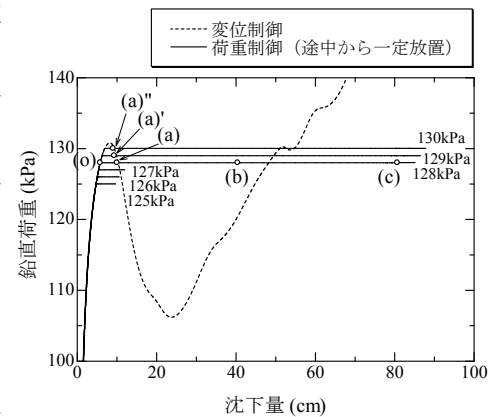


図2 鉛直荷重～沈下関係

3. 解析結果

図2に鉛直荷重～沈下量関係を示す(図2～5における(a)～(c), (a)', (a''))の記号は互いに対応している)。放置荷重が127kPa以下と128kPa以上で、沈下量に明らかな違いが生じていることが分かる。図3に基礎中央部での放置時間～変位速度関係を示す。放置荷重128kPa以上のケースでは、はじめは徐々に沈下が収束する方向に向かうが、途中から沈下速度が急増し、その後再び沈下が収束に向かうことが分かる。図4に放置荷重128kPaの場合のせん断ひずみ分布を示す。放置荷重128kPaの場合は、遅れ破壊が発生したことが分かる。図2と3から分かるように、放置荷重128kPa以上の全てのケースにおいて遅れ破壊が発生する。一方、放置荷重127kPa以下のケースについては圧密が単調に収束に向かう。このように、遅れ破壊が生じるか否かを左右する荷重の閾値が存在することは、三軸供試体を対象にした実験によって古くから確かめられている⁵⁾。これまで、飽和土が示すこのような現象は、土のレオロジー特性として、粘塑性構成式などによって説明されてきた^{6),7)}。これに対し、ここで示す結果は、遅れ破壊現象、および、遅れ破壊を生じるか否かの荷重の閾値の存在が、土骨格に時間依存的な性質を持たせなくても水～土骨格連成の効果として再現可能であることを示している。図5に放置荷重128kPa

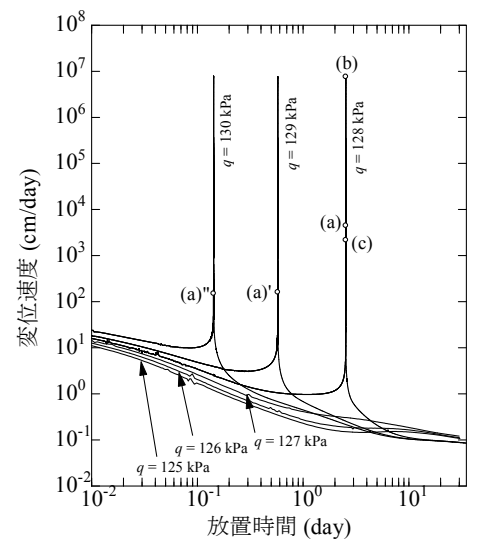


図3 時間～変位速度関係

キーワード 慣性力, 水～土骨格連成, 自然堆積粘土, 遅れ破壊

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 TEL 052-789-4621

のときの、遅れ破壊が発生する時刻付近における、基礎中央節点の鉛直方向の加速度、速度、変位の時刻歴を示す。これらの図が示す通り破壊中の挙動は加速度運動を伴う。一般に、支持力問題は準静的な問題として取り扱われることが多いが、遅れ破壊現象のように荷重制御下にある支持力問題の破壊中の挙動を再現するためには慣性力を考慮した解析手法が必須である⁸⁾ことを図5は示している。なお、図4において、放置荷重 128kPa 以上のケースで、速度が一旦急増してから再び収束に向かう挙動は、加速度運動収束後に、再び準静的に圧密が進行することを示している。

次に、遅れ破壊が生じる場合と生じない場合の特徴について変位制御問題との関係を調べながら述べたい。図2の鉛直荷重～沈下量関係には、破線で変位制御（荷重速度： 10^{-5} cm/sec）による結果も示してある。計算の対象とする地盤は、変位制御下において荷重低下を示すことが分かる。変位制御時のピーク荷重に至るまでの荷重時間が、変位制御の場合と荷重制御（荷重速度：0.015kPa/sec）の場合とではほぼ等しくなるような荷重速度を採用している。また、荷重中に間隙水のマイグレーションがほとんど生じないような速い荷重速度となっている。図2および図3において、放置荷重 128kPa の点(a), 129kPa の点(a)', 130kPa の点(a)''は、それぞれのケースで加速度運動が開始する時点を示している。図2では、これらの点の変位制御問題の鉛直荷重～沈下量関係の近傍に位置していることを見て取れる。このことは、荷重放置中に静的な力のつり合いが取れなくなって遅れ破壊が発生することを示唆している。遅れ破壊が発生しない放置荷重 125kPa や 126kPa のケースでは、圧密中に、変位制御問題の鉛直荷重～沈下量関係に達していないことが分かる。ただし、放置荷重 127kPa のケースでは、圧密中に同曲線に達しているが、遅れ破壊が発生していない。これは、放置荷重 127kPa のケースでは、荷重を放置してから圧密しながら同曲線に達するまでに時間を要した（約 21 日）ことにより、排水による強度増加の効果が現れたためである。静的な力のつり合いが保てなくなり加速度運動を伴う破壊が生じることを示すために、変位制御による急速荷重時の荷重～沈下曲線との比較を行ったが、同曲線は荷重速度に依存するため⁴⁾、あくまでも目安として見る必要がある点に注意しておく。

なお、紙幅の都合上、具体的には示さないが、地盤内の要素挙動について調べると、荷重放置中に構造劣化の効果で圧縮中にもかかわらず硬化から軟化に転じる要素の存在を確認することができる。放置中に軟化する要素が増えてくることによって、静的な力のつり合いが保てなくなり破壊が生じる。

4. おわりに

本稿では、遅れ破壊現象の、破壊前、破壊中、破壊後の挙動を、慣性力を考慮した水～土骨格連成有限変形解析によって再現できることを示した。また、同解析手法では、遅れ破壊が生じるか否かを左右する荷重の閾値の存在が自ずと示されることを示した。なお、発表では、初期不整を有する場合は、非対称な破壊モード（図6）が現れ、遅れ破壊の荷重の閾値が低下することも示す。

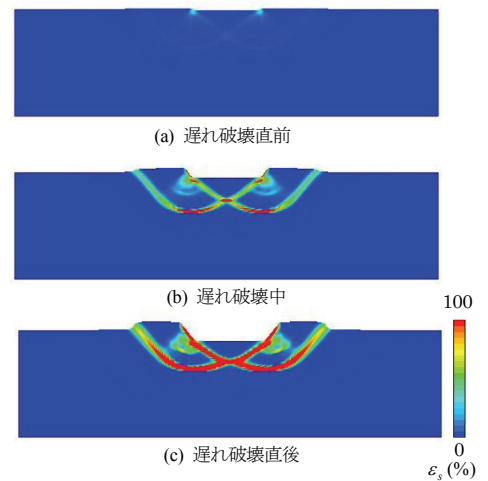


図4 せん断ひずみ分布
(放置荷重：128kPa)

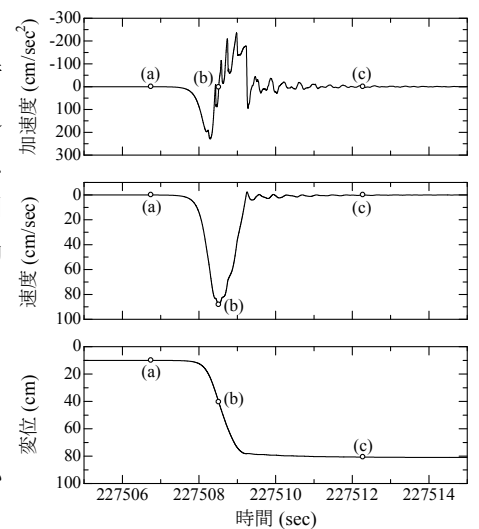


図5 加速度・速度・変位の時刻歴
(放置荷重：128kPa)

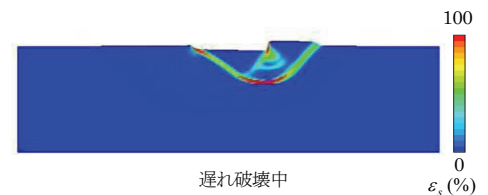


図6 非対称な破壊モード
(地盤が初期不整を有する場合)

参考文献) 1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, **42**(5), 47-57. 2) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M. (2008). "Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model." *Soils and Foundations*, **45**(6), 771-790. 3) Asaoka, A., Noda, T. and Kaneda, K. (1998b): Displacement/traction boundary conditions represented by constraint conditions on velocity field of soil, *Soils and Foundations*, **38**(4), 173-181. 4) Noda, T., Asaoka, A. and Yamada, S. (2007): Some bearing capacity characteristics of a structured naturally deposited clay soil, *Soils and Foundations*, **47**(2), pp. 285-301. 5) 村山朔郎, 柴田徹 (1956): 粘土のレオロジー的特性について, *土木学会論文集*, **40**, 1-31. 6) Sekiguchi, H. (1977): Reological characteristics of clays, *Proc. 9th ICSMFE*, Tokyo, **1**, 289-292.. 7) Adachi, T., Oka, F. and Miura, M. (1987): An overstress elasto-viscoplastic theory for clay failure, *Proc. 8th ARC, SMFE*, **1**, 5-8. 8) 山田正太郎, 野田利弘, 矢藤彰悟, 浅岡顕 (2012): 慣性力を考慮した自然堆積粘土地盤の支持力解析, 第47回地盤工学研究発表会講演概要集.