

動的運動を伴う自然堆積粘土地盤の破壊シミュレーション

Simulation of the failure of a naturally deposited clayey soil with dynamic motion

矢藤彰悟¹, 山田正太郎¹, 野田利弘², 浅岡 顕³

- 1 名古屋大学大学院・工学研究科・s-yamada@civil.nagoya-u.ac.jp
- 2 名古屋大学・減災連携研究センター
- 3 公益財団法人地震予知総合研究振興会

概 要

水～土骨格連成有限変形解析により、自然堆積粘土地盤上の帯状基礎に対し支持力解析を行った。支配方程式が慣性項を有する動的問題に対応可能な手法と、慣性項を無視したいわゆる準静的な手法の二つの解析手法を用いて計算を行った。変位制御下において変形の局所化を伴って荷重低下を引き起こすような地盤に対し、荷重制御で載荷を行うと、準静的な解析手法では、荷重が極限支持力に達した時点で計算を続行できなくなるが、慣性項を有する動的問題に対応可能な手法では、動的運動を伴って地盤が破壊してゆく様子を再現できることを示した。

キーワード：動的運動、慣性力、支持力、自然堆積粘土

1. はじめに

地盤の破壊は変形を通じて発生する。ただし、時間的な観点から言うと、多くの破壊現象は、ある瞬間を境に急速に進行して、終局的な状態へ至る。降雨や地震による盛土の崩壊、掘削壁面の崩壊、浸透破壊、地中空洞の陥没、斜面崩壊などいずれも主要な変形はごくごく短い間に進行する。このような破壊挙動は当然のように加速度運動を伴って進行するため、慣性力を無視して力のつり合いを求める（準）静的な解析手法では、破壊中の挙動を数値計算によって再現することはできない。一方、Noda et al.¹⁾は速度型運動方程式と慣性項を有する水～土骨格連成式を支配方程式とする水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA** を開発し、動的問題と静的問題を区別することなく解析することを可能にしている。慣性力を考慮することの重要性は地震応答解析のような典型的な動的問題では広く認識されているが、上記のような破壊問題に対してはほとんど認識されていない。そこで、本論文では、上記解析コードを用いて自然堆積粘土地盤の支持力解析を実施することにより、これまで（準）静的問題として取り上げられてきた問題においても慣性力を考慮した動的問題に対応可能な解析手法が不可欠となる場合があることを示す。

2. 解析条件

解析には、動的問題に対応可能な手法として支配方程式

に慣性力を考慮した水～土骨格有限変形解析コード **GEOASIA**¹⁾を用いた。一方、（準）静的な解析手法としては、**GEOASIA**²⁾の前身となる慣性力を考慮していない解析コードを用いた。前者が速度型の運動方程式を時間積分して時々刻々の運動を求めるのに対し、後者は慣性項を捨象した速度型の力のつり合い式を時間積分して運動を求める。また、水～土骨格連成式においても、前者は慣性項を有するが、後者は有さない。なお、いずれの解析コードも土骨格の構成式には、骨格構造の変化を記述する弾塑性構成式 **SYS Cam-clay model**³⁾を搭載している。

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⁴⁾（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。また、僅かな数値誤差によって、基礎の非対称な運動が発生するのを防ぐために、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て基礎の傾斜を拘束した。解析に用いた材料定数は、典型的な粘土の弾塑性挙動（過圧密解消速度が構造劣化速度に比べて速く、異方性の発展が遅い）が再現されるように表 1 と表 2 に示すように与えた。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。支持力解析は、この地表面荷重のない過圧密な地盤に対して行った（初期地盤の与え方の詳細は文献⁵⁾に譲る）。載荷方法は変位制御と荷重制御の二つの方法を用いた。変位制御で載荷する

場合は、鉛直強制変位を、基礎中央節点に地盤内部で間隙水の移動がほとんど生じることのないような速い速度($1.0 \times 10^5 \text{cm/sec}$)で与えた。荷重制御で載荷する場合は、荷重を基礎中央節点に載荷速度が $1.5 \times 10^2 \text{kPa/sec}$ となるように鉛直に与えた。なお、荷重制御の載荷速度は、変位制御問題において、ピーク荷重をピークに達するまでの時間で割ることによって決定している。(つまり、極限荷重に達するまでの時間が変位制御と荷重制御でほぼ等しくなるようにしている。)

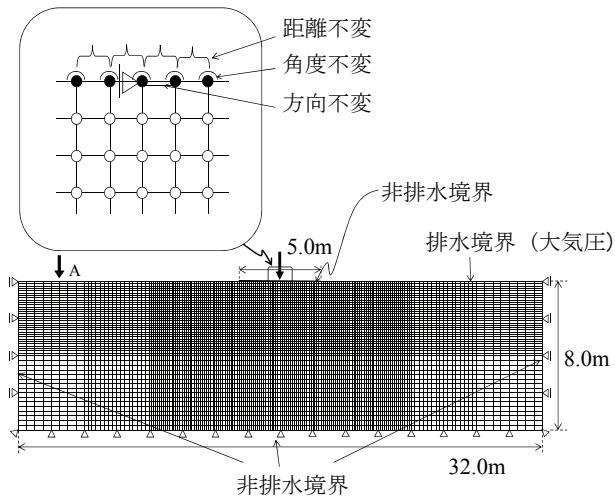


図1 有限要素メッシュと境界条件

表1 地盤の材料定数

〈弾塑性パラメータ〉	
圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.23
膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.01
限界状態定数 M	1.15
NCLの切片* N	2.75
ポアソン比 ν	0.1
〈発展則パラメータ〉	
構造低位化指数 a ($b=c=1.0$)	0.2
正規圧密土化指数 m	5.0
回転硬化指数 b_r	0.001
回転硬化限界定数 m_b	1.0
透水係数 k (cm/sec)	2.8×10^{-7}
土粒子の密度 ρ_s (g/cm^3)	2.75

* $q=0, p'=98.1 \text{kPa}$ における繰返し粘土の正規圧密線上の比体積

表2 地盤の初期値

構造の程度 $1/R_0^*$	4.0
過圧密比 $1/R_0$	1.0
異方性の程度 ξ_0	0.75
側圧係数 $\sigma_{h0}'/\sigma_{v0}'$	0.5

以下では、変位制御および荷重制御の両問題に対し、慣性項を省略して力のつり合いを求めるいわゆる(準)静的

な解析手法²⁾(慣性項なし)と、運動方程式を忠実に時間積分してゆく動的問題に対応可能な解析手法¹⁾(慣性項あり)で解析を実施することにより、加速度運動を伴う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となることを示す。

3. 変位制御による帯状基礎の支持力解析

慣性項の有無が、変位制御問題に与える効果について比較する。図2に荷重～沈下関係を、図3にせん断ひずみ分布を示す。第一に、慣性項の有無が解析結果にほぼ影響を与えていないことが分かる。これは、基礎を等速で押し込む変位制御問題では、地盤内において実質的に無視して構わない程度の加速度しか生じないためである。また、この地盤は変位制御下において荷重低下を示すと共に、変形が局所化して円弧状のすべり線を形成することが分かる。このような特徴は、構造の発達した自然堆積粘土が非排水せん断時に塑性圧縮を伴う軟化挙動を示す際に現れやすい⁵⁾。また、荷重低下後も変位を与え続けると、荷重が再上昇の様子が見て取れる。これは、基礎両脇の地盤の隆起から分かるように、すべり土塊を持ち上げるために生じる現象で、有限変形の効果といえる。

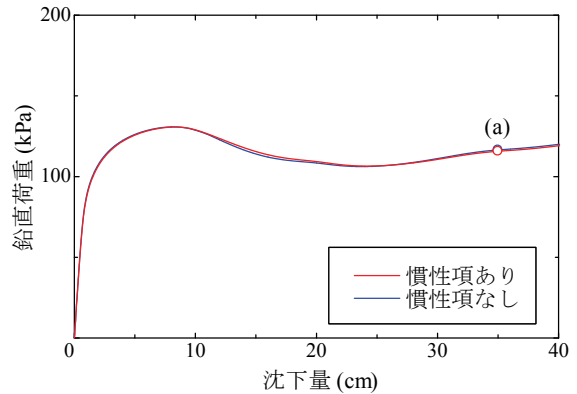


図2 荷重－沈下関係 (変位制御)

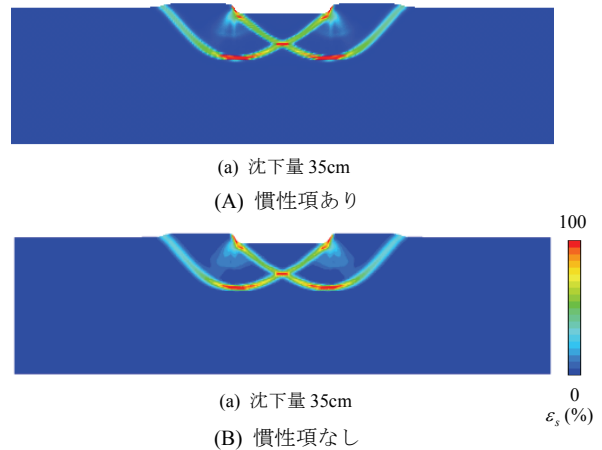


図3 せん断ひずみ分布 (変位制御)

4. 荷重制御による帯状基礎の支持力解析

次に、荷重制御問題に与える慣性項の効果について示す。図4に荷重～沈下関係を示す。同図には、変位制御問題（慣性項あり）の結果も示している。慣性項を考慮しない（準）静的な解析手法では、図中の点(a)、すなわち変位制御問題において荷重がピークを示す点までしか解析を実行することができない。一方、動的問題に対応可能な解析手法では、変位制御問題における荷重のピーク点を過ぎてからも解析を継続することが可能であり、荷重がほぼ一定のまま

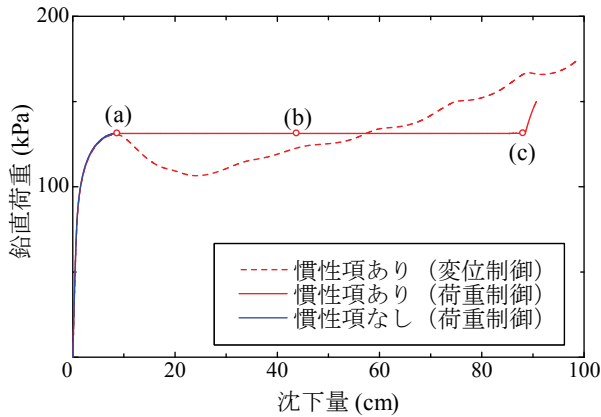


図4 荷重～沈下関係（荷重制御）

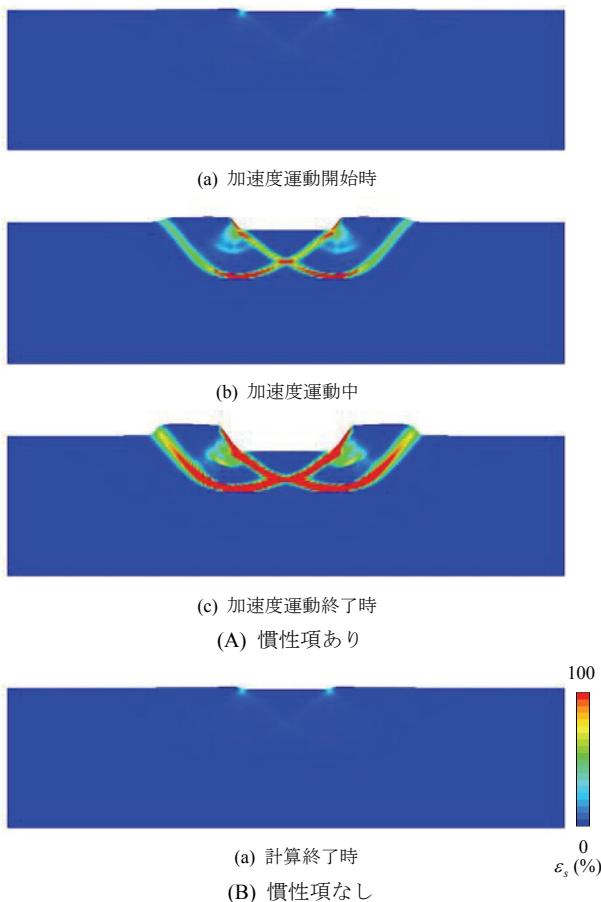


図5 せん断ひずみ分布（荷重制御）

沈下が発生し、その後、再び荷重が増加を始める。次に、図5にせん断ひずみ分布を示す。慣性項ありの場合については、図4の点(a)～(c)に相当する時点のせん断ひずみ分布を、慣性項なしについては、計算終了時のせん断ひずみ分布を示す。慣性項を有する解析手法では、変形が局所化し、変位制御問題と同様な円弧状のすべり線が発現していることが見て取れる。一方、慣性項がない場合では、計算終了時点では、変形の局所化がまだ生じていないことが分かる。図6に、基礎中央節点の鉛直方向の加速度、速度、変位（下向きを正）の時刻歴を示す。ただし、（準）静的解析については速度のみを示す。図6(A)より、動的問題に対応可能な手法では、変位制御問題の荷重のピーク点を過ぎると加速度運動が始まることが分かる。加速度はピークを示した後、負に転じ、加速と減速を繰り返しながら再び値がほぼ零へ収束する。この加速度運動に対応して、速度はピークを示した後、零へと収束する。この間、変位は単調に増加し、約80cmの沈下を生じる。この運動に要する時間は僅か2,3秒である。図4における荷重一定のまま生じる沈下のほとんどは、このごく短い時間に発生している。一方、図6(B)では、（準）静的解析でも、速度が急増

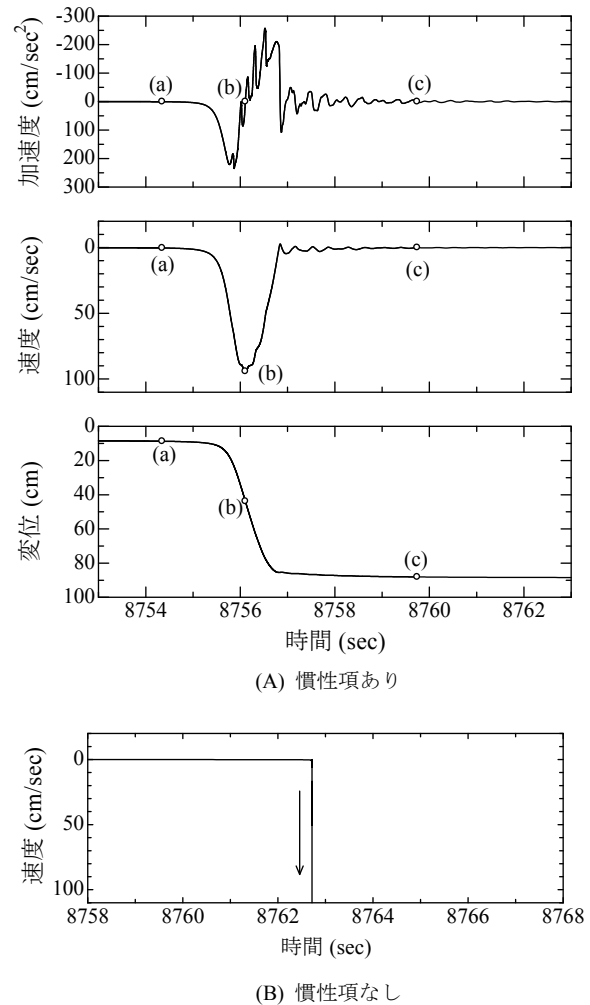
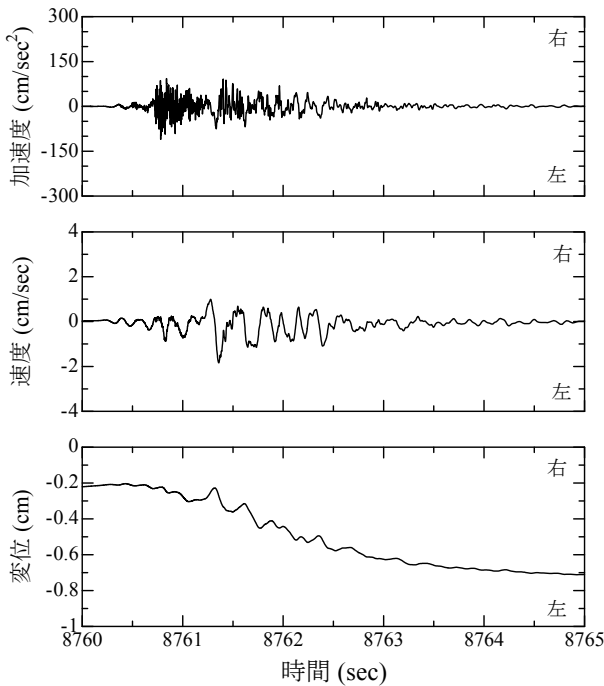
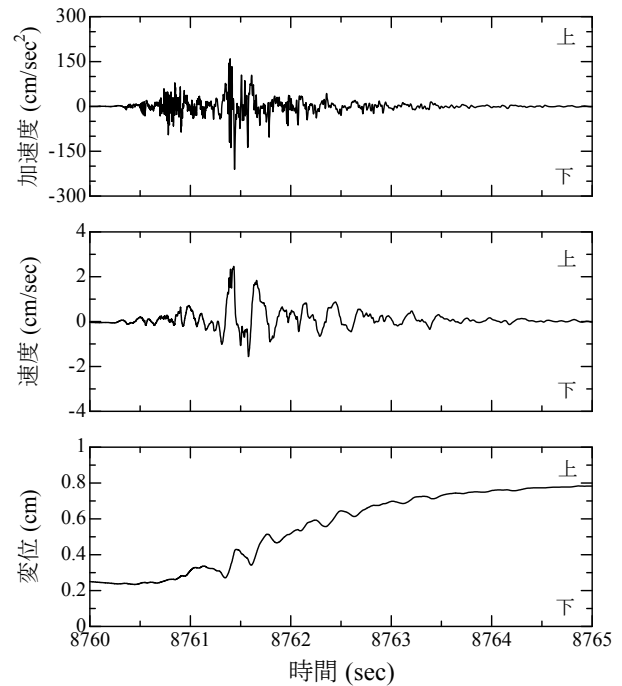


図6 基礎中央節点における鉛直方向の加速度・速度・変位の時刻歴（荷重制御）



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図7 地盤の破壊に伴う周辺地盤の振動 (基礎中央から左へ12.5m離れた地点)

し、破壊しかけていることが分かる。しかし、速度の増加は慣性項を考慮する場合に比べて急激であり、すぐに発散して、計算が破綻する。慣性項を考慮する解析手法における速度変化は、最大で約0.25gの加速度を伴うものであるが、(準)静的解析に比べれば緩やかな変化であることが分かる。これはもちろん慣性力が運動の変化を抑える方向に働くためである。図5では、破壊後は基礎両脇の地盤の盛り上がりを確認できるが、有限変形解析では、この盛り上がりが加速度運動から再び静的な運動へ戻る際に有意に働くものと考えられる。

次に、図4において、変位制御問題と荷重制御問題を比較してみると、変位制御問題の荷重のピーク点(点(a))までは同じ挙動を示していることが分かる。荷重制御問題では、変位制御問題のピーク以降に加速度運動を生じることから、静的には受け持てない分の外力によって、加速度運動が引き起こされていると理解することができる。視点を改めて、基礎と共に加速度運動する人から見れば、慣性力という見かけの力が力のつり合いを保つのに不足する力を補っているともいえる。加速度運動開始(点(a))までの挙動が変位制御問題に一致する一方で、加速度運動終了(点(c))後の挙動は、変位制御問題の荷重～沈下関係と一致しないことが分かる。これは加速度運動を伴う破壊現象と、静的に進行する破壊現象とでは、土エレメントは異なる応力履歴を受けるためである。

最後に、破壊が生じる時刻付近における、基礎中央から左に12.5m離れた地点での鉛直方向の加速度応答について図7に示す。破壊の発生とほぼ同時刻に基礎周辺の地盤

が振動していることが分かる。これは、破壊の衝撃が地盤内を伝播してゆく様子を捉えたものである。付加的ではあるが、動的問題に対応可能な手法では、解析結果にこのような挙動まで現れる。

5. 結論

本稿では、自然堆積粘土の支持力問題を例に挙げ、加速度運動を伴う破壊現象の破壊中の挙動を数値的に再現するためには、慣性力を考慮した動的問題に対応可能な解析手法が必須であることを示した。

参考文献

- 1) Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-slay model, *Soils and Foundations*, Vol. 45, No. 6, pp. 771-790, 2008.
- 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.: Soil-water coupled behaviour of saturated clay near/at critical state, *Soils and Foundations*, Vol. 34, No. 1, pp. 91-106, 1994.
- 3) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol. 42, No. 5, pp. 47-57, 2002.
- 4) Asaoka, A., Noda, T. and Kaneda, K.: Displacement/traction boundary conditions represented by constraint conditions on velocity field of soil, *Soils and Foundations*, Vol. 38, No. 4, pp. 173-181, 1998.
- 5) Noda, T., Asaoka, A. and Yamada, S.: Some bearing capacity characteristics of a structured naturally deposited clay soil, *Soils and Foundations*, Vol. 47, No. 2, pp. 285-301, 2007.