

複合負荷弾塑性構成式を搭載した水～土骨格有限変形解析コードによる 土構造物—地盤系の地震応答解析

有効応力解析, 弾塑性体, 液状化

名古屋大学 国際会員 ○山田正太郎 野田 利弘

GEOASIA 研究会 国際会員 高稲 敏浩

地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡 顕

1. はじめに

著者ら¹⁾は, サイクリックモビリティに代表される土の複雑な力学挙動をより精緻に表現するために, SYS Cam-clay model²⁾と非関連 Drucker-Prager model が複合的な負荷状態を呈し得る弾塑性構成式を開発している. 境界値問題における同構成式の振る舞いの一例を示すために, 同構成式を水～土骨格有限変形解析コード **GEOASIA**³⁾に実装した上で, 浸透固化処理工法による改良を施した土構造物—地盤系の地震応答解析を実施した. 本稿ではその結果を示す.

2. 解析条件

図 1 に解析に用いた有限要素メッシュおよび境界条件を示す. いずれも飽和した粘土層, 砂層, 盛土からなる土構造物—地盤系に対し, 液状化対策として浸透固化処理工法による地盤改良を施す場合を対象とした. 既設の盛土への対策を想定し, 盛土要素を追加してから, 対策領域を改良体用の要素に置換し, 定常状態に落ち着くまで圧密放置した.

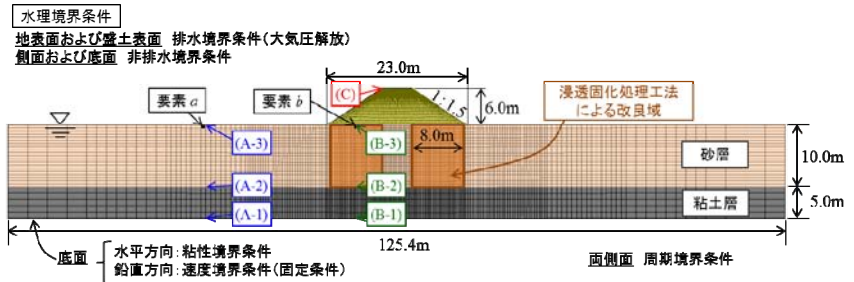


図 1 有限要素メッシュおよび境界条件

構成式には, 著者ら¹⁾の提案する複合負荷弾塑性構成式に異方性を考慮したモデルを用いた. 紙幅の都合上, モデルの詳細と使用した材料定数および初期値の具体値については割愛する. 砂層と盛土は豊浦砂に対する材料定数を用いた. 初期値は砂層を相対密度 60%, 盛土を相対密度 80%として与えた. 図 2 に同砂層に対する非排水繰返しせん断試験のシミュレーション結果を示す. サイクリックモビリティが描かれていることを見てとれる. 粘土層は浦安で採取した自然堆積粘土に対する材料定数と初期値を用いた. また, 浸透固化処理工法による改良部分の材料定数と初期値は, 仙頭ら⁴⁾が行った中空ねじりせん断試験結果を元に決めた. 図 3 に仙頭らによる実験結果とそのシミュレーション結果を示す.

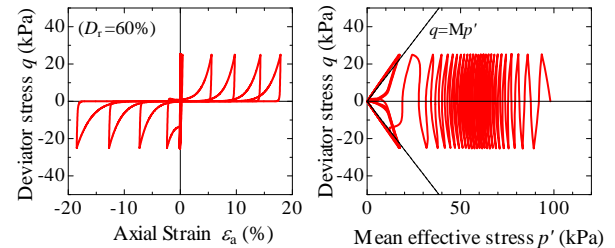
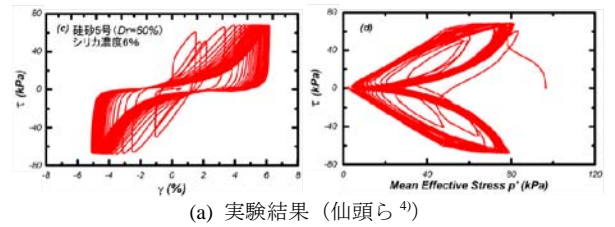
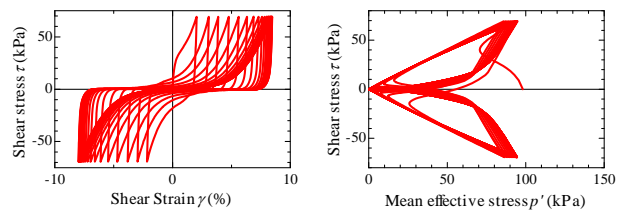


図 2 豊浦砂の液状化試験のシミュレーション結果



(a) 実験結果 (仙頭ら⁴⁾)



(b) 計算結果

図 3 改良砂の液状化試験のシミュレーション結果

上記地盤に対し, 底面水平方向に粘性境界 ($\rho=2.00\text{g/cm}^3$, $V_s=300\text{m/sec}$) を課し, 図 4 に示す地震波を入力した. 地震終了後は, 沈下が収束するまで圧密放置した.

3. 解析結果

図 5 にせん断ひずみ分布を示す. 入力が最大加速度に達するころより, 地表面でせん断ひずみが発生しはじめ, その後, せん断ひずみが卓越する領域が拡大している. 一方で, 改良域では対策効果が発揮され, せん断ひずみの発生が抑制されている. 図 6 に平均有効応力分布を示す. 砂層内の非改良域では, 平均有効応力が著しく低下し, 液状化に至っている. 図 7 に図 1 に示す各点での水平加速度応答を示す. 非改良域の地表面(A-3)では, 砂地盤が液状化に至るために, 6 秒付近から加速度が著しく減衰している. これと相反するように, 砂層と粘土層の境界面(A-2)では, 砂層が液状化したことに伴い, 6 秒付近から(A-1)に比べ揺れが増幅している. (A-3)では,

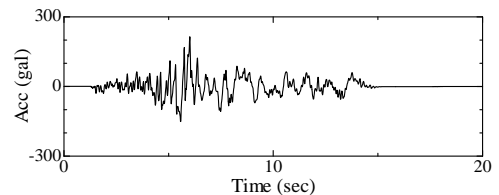


図 4 入力地震動

Seismic response analysis of a soil structure-ground system by using a soil-water coupled finite deformation analysis code that mounts the combined loading elasto-plastic constitutive model:

Yamada, S., Noda, T. (Nagoya University), Takaine, T. (GEOASIA Research Society) and Asaoka, A. (ADEP)

一般に液状化中の剛性回復時に見られると言われるスパイク状の応答も見られる。また、(A-3)では、入力が収まった後も、長周期的な揺れが継続している。一方で、改良域と盛土の境界面

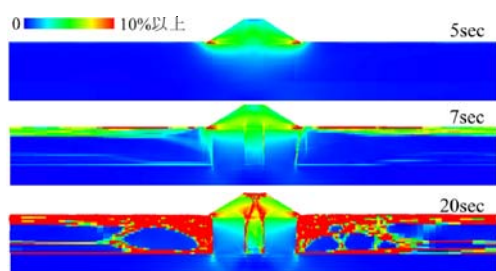


図5 せん断ひずみ分布

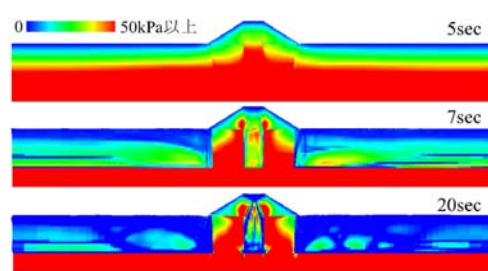


図6 平均有効応力分布

(B-3)や改良域と粘土層の境界面(B-2)では、改良域が液状化しないために、(A-3)や(A-2)で見られるような応答は表れていない。盛土天端(C)では、顕著な加速度の増幅が見られる。これは、改良域および密な砂からなる盛土が液状化に至らないことが一因となっている。

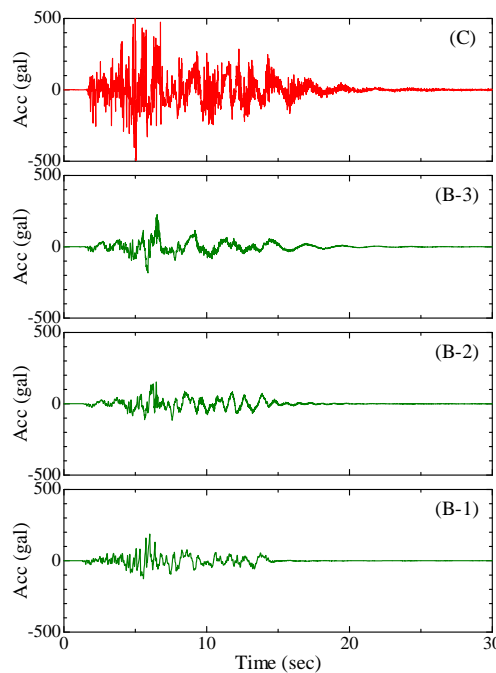
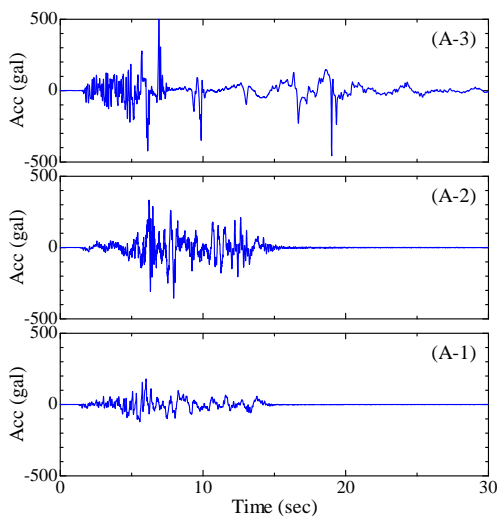


図7 水平加速度応答の時刻暦

図8に図1に示す要素aとbの挙動を示す(図中の○は地震開始時の状態を示している)。非改良域に位置する要素aは確かに液状化に至り、サイクリックモビリティを呈している。一方、改良域に位置する要素bは平均有効応力が増加し、せん断ひずみの増加も1%以内に収まっている。図9に時間-沈下曲線を示す(破線は入力が完了する時刻を示している)。非改良域の地

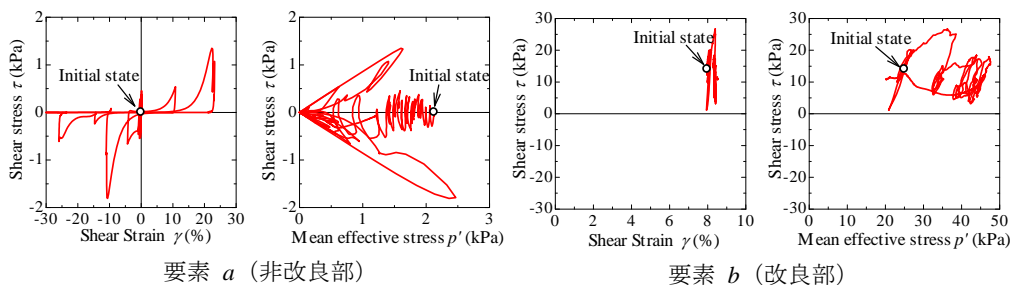


図8 要素挙動

表面(A-3)は若干隆起した後、液状化中に蓄積された過剰間隙水圧が地震後に消散することにより、最終的に60cm程度の圧密沈下を生じている。これに比べ、改良域と盛土の境界面(B-3)の沈下は対策効果により抑制されている。ただし、盛土部は液状化しないものの、地震中に大きな加速度が加わることで、最終的に40cm程度の沈下を生じている。

4. おわりに

上記の通り、複合負荷弾塑性構成式を搭載した地盤解析コードGEOASIAが、液状化時に一般に見られる地盤応答の主な特徴や、浸透固化処理工法による液状化対策効果を再現し得ることを示した。

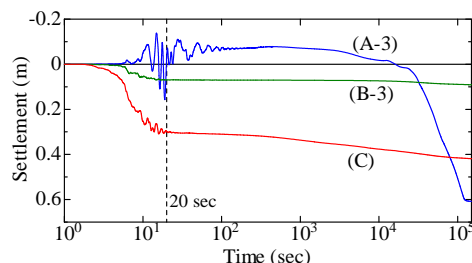


図9 時間-沈下関係

謝辞：本研究は科学研究費補助金（基盤研究(A)：課題番号 25249064，基盤研究(B)：課題番号 25289143）の補助を受けて実施した。

参考文献) 1) Yamada et al. (2013): Proposal of a new double hardening elasto-plastic constitutive model of soil skeleton based on integration of associated and non-associated flow rules, *Proc. of 15th ARC*, JPN-128. 2) Asaoka, A. et al. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *S&F*, **42**(5), 47-57. 3) Noda et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *S&F*, **48**(6), 771-790. 4) 仙頭ら(2015): 強震時における溶液型薬液改良砂の非排水繰返しせん断特性, 第50回地盤工学研究発表会講演概要集, 601-602.