

液状化履歴による異方性の発展を考慮した再液状化現象のシミュレーション

液状化 地震応答解析 異方性

名古屋大学 国際会員 酒井崇之 中野正樹
 東北大学 国際会員 山田正太郎

1 はじめに

砂地盤は、過去の地震により液状化が起こった後でも、その後の地震で再び液状化することがある。この現象は「再液状化」と呼ばれる。砂地盤が液状化した後、発生した過剰間隙水圧の消散とともに排水し、密度が増す。密度の大きい砂地盤は、小さい砂地盤にくらべて液状化しにくいいため、一度液状化した地盤は再液状化しにくいはずである。しかし、実際には地盤の再液状化現象は多数確認されている。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、合計85個所で再液状化が確認され、中には計4回の液状化が確認された。本報では、液状化中に発展する応力誘導異方性に着目し、再液状化現象のシミュレーションを実施した。なお、解析には、複合負荷弾塑性構成式²⁾を搭載した水～土骨格連成有限変形解析コードGEOASIA³⁾を用いた。

2 複合負荷弾塑性構成式による再液状化現象の再現

山田ら⁴⁾は、液状化中（サイクリックモビリティ中）に発展する応力誘導異方性に着目した実験的な研究を実施した。この研究では、液状化中に異方性は目まぐるしく変化し、異方性が発展しているほど、ある方向にせん断した際に緩い砂のような挙動を呈するため、液状化強度が低下することを示した。この要素試験を、複合負荷弾塑性構成式を用いて再現する。図1に砂の繰返し非排水せん断試験のシミュレーション結果を示す。砂が液状化したときに示すサイクリックモビリティが表現できている。サイクリックモビリティ中において、点[a],[b],[c],[d],[e]で荷重を止めて、排水条件に切り替えることによって等方応力状態において水圧を消散させた後に、単調非排水せん断を行うといった一連のプロセスのシミュレーションを実施した結果を図2に示す。また、図3,4は点[a],[c]で荷重を止めた後に、排水条件に切り替えることによって等方応力状態において水圧を消散させた後に、再度繰返し非排水せん断を行うといった一連のプロセスのシミュレーションを実施した結果をそれぞれ示す。点[a]で止めた場合は、伸張側に強くなるように異方性が発達しているため、圧縮方向にせん断した際には、緩い砂に似た挙動を示す。一方、伸張側にせん断した際は、密詰砂に似た挙動を示す。そのため、点[a]で止めた際は、非排水繰返しせん断を実施すると、圧縮側で大きく有効応力が低下するため、液状化しやすくなる。一方で、点[c]で止めた際は、圧縮側、伸張側ともに似たような挙動を示す。そのため、点[a]で止めた場合よりも、液状化に至る繰返し回数が小さい。

3 複合負荷弾塑性構成式を搭載したGEOASIAによる再液状化現象の再現

図5に計算で用いた粘土と砂の互層地盤の有限要素メッシュ図を示す。二次元平面ひずみ条件で、横1要素とし、側方に周期境界、底面に粘性境界を与えた。地盤は下層が厚さ5mの粘土地盤であり、上層が厚さ10mの砂地盤である。砂地盤については、相対密度が50%のケースについて、解析を行った。砂・粘土のそれぞれの構成則応答については、文献5)を参照されたい。

図6は解析手順を示している。地震動の入力パターンを2通り設け、1パターン目はそのままの振幅で地震動を入力して（以下、eq-100と呼ぶ）、その後、1年間圧密を行い、次に振幅を0.25倍した地震動を入力した（以下、req-25と呼ぶ）。

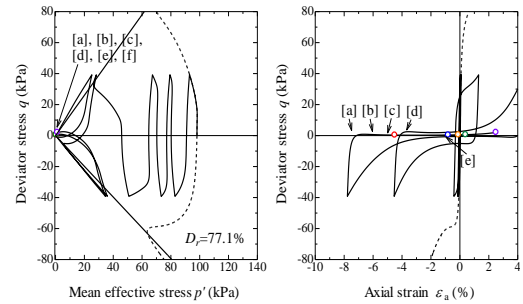


図1 液状化の要素シミュレーション

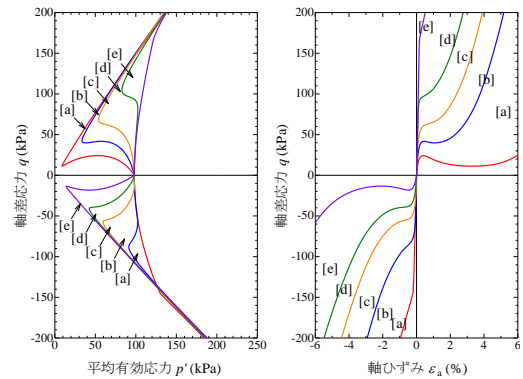


図2 液状化履歴後の単調非排水試験のシミュレーション結果

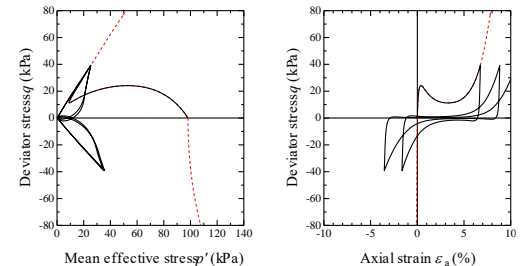


図3 液状化履歴後の繰返し非排水試験のシミュレーション結果 (点[a]で止めた後に再荷重したケース)

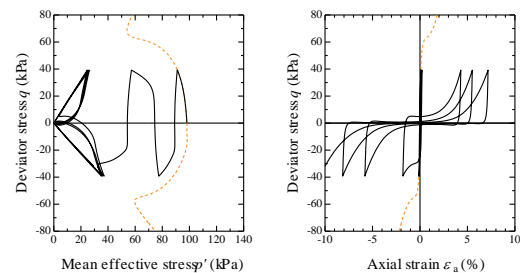


図4 液状化履歴後の繰返し非排水試験のシミュレーション結果 (点[c]で止めた後に再荷重したケース)

ぶ)。2 パターン目は地震履歴がない状態で振幅を 0.25 倍した地震動を入力した (以下, eq-25 と呼ぶ) を入力した。まとめると, eq-100・req-25・eq-25 の 3 つの解析結果がある。eq とは過去に地震履歴がないことを, req とは過去に地震履歴があることを表し, 数字で入力する地震動の大きさ(%)を表現している。なお, 入力地震動も図 6 に併せて示す。

図 7 は, 地震直後の過剰間隙水圧比分布を示す。なお, 分布図の下に示しているのは, 地震直前における砂層の要素 8 の比体積である。eq-100 において, 砂地盤は全ての深さで液状化した。req-25 と eq-25 を比較すると, eq-25 では, まったく液状化が発生していない。一方, req-25 では, 一度地震を受けて液状化し密度が大きくなり, さらに一度目の加振よりも地震動が小さいにもかかわらず液状化が発生した。また, 液状化しなかった土要素についても, eq-25 と比較して水圧が上昇した。

図 8 に要素 No.8 の 1 度目の加振(eq-100)、地震後圧密、2 度目の加振(req-25)中における挙動を示す。 β_{12} は SYS Cam-clay model⁶⁾で異方性を表すテンソル β の(1,2)成分である。 β_{12} が正の値の時, 図 1 で点[a]で荷重を止めたときに近い状態になっており, τ が大きくなる方向にせん断されるとき, 大きく塑性圧縮し, τ が小さくなる方向にせん断されるときは, 塑性変形しづらくなる。なお, 初期の β_{12} は 0 である。まずは, 1 度目の加振(eq-100, 黒線)の挙動を見る。加振が進むにつれて過剰間隙水圧比(EPWPR)は増加し, ほぼ 100%になっていることから, 液状化したことがわかる。また, 液状化が発生した後, せん断ひずみが大きく進展していく。この際, 塑性変形の進展に伴い, β_{12} は発展していく。次に地震後の圧密挙動(オレンジ線)を見ると, 地震後, 水圧が消散するのに伴い, 平均有効応力が回復し, 比体積が減少する。また, 1 度目の加振(eq-100)において生じた β_{12} は水圧が消散した後も残存し, 約 0.4 の値を取っている。これは, 図 1 での[a]点で荷重を止めた状態に近い。最後に 2 度目の加振(req-25, 赤線)を見ると, β_{12} が残存していることから, せん断応力 τ が負から正へ変化する時に, 塑性圧縮挙動が顕著にみられた。つまり, 比体積が減少して密な状態になっているにも関わらず, 地震によって発展した異方性によって, せん断応力 τ が負から正へ変化する時に, 平均有効応力 p' が大きく減少するため, 液状化に至った。なお, τ が正から負へ変化する時には, ほとんど平均有効応力の減少は見られない。

4 おわりに

本研究では, 液状化中に発展する誘導異方性に着目し, 再液状化のシミュレーションを実施した。その結果, 液状化中に発展する誘導異方性が地震後に残存することにより, 液状化後の水圧の消散に伴い密度が大きくなっているのにも関わらず, 再液状化が起きることを示せた。今後は, 地震動の特性と異方性の残存方向に着目する。また, 地盤上に構造物が存在する場合の再液状化解析を実施したいと考えている。

謝辞

本研究は, 科学研究費補助金 (基盤(B): 課題番号 19H02402, 基盤(A): 課題番号 17H01289) の支援を受けて実施した。

参考文献

- 1) 若松加寿江(2012):2011年東北地方太平洋沖地震による地盤の再液状化, 日本地盤工学会論文集 第12巻 第5号, pp.69-88.
- 2) Yamada, S. 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.
- 3) Noda, T. et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soils and Foundations, 48(6), pp.771-790.
- 4) Yamada, S. et al. (2010): Effects on reliquefaction resistance produced by changes in anisotropy during liquefaction, Soils and Foundations 50(1), pp.9-25.
- 5) 山田ら(2019): 複合負荷弾塑性構成式の提案, 計算工学講演会論文集, 24, E-04-02.
- 6) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. (2000): Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, Soils and Foundations, 40(2), pp.99-110.

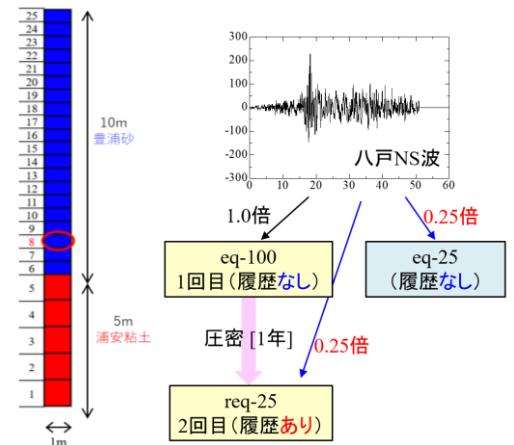


図 5 解析断面

図 6 解析手順

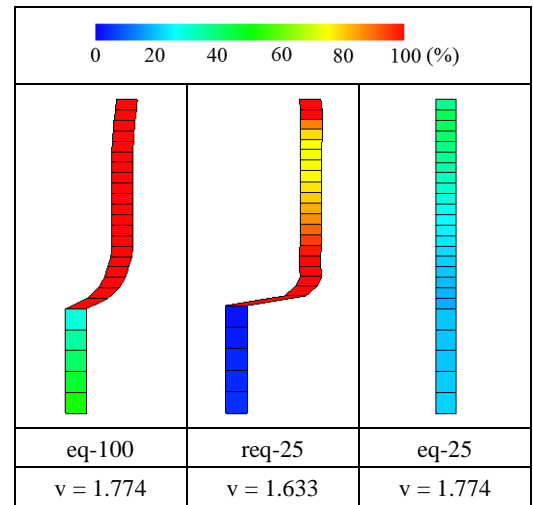


図 7 地震直後の過剰間隙水圧比分布

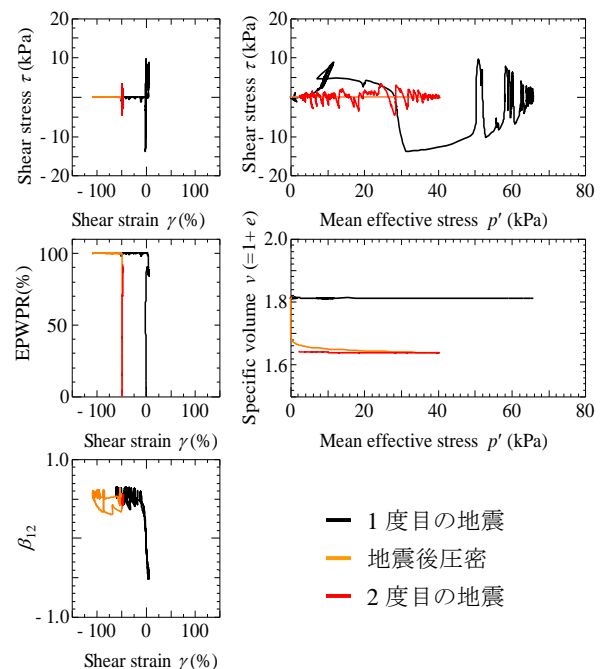


図 8 要素 8 の挙動