

初期液状化から残留変形発生過程を評価できる室内試験の提案とその利活用方法

日本大学 学生会員 ○齋藤 和寿
日本大学 正会員 仙頭 紀明

1. はじめに

近年、重要構造物の設計において、液状化による変形量予測を目的とした有効応力解析が実施されている。現状では、土の繰返し非排水三軸試験に準拠して液状化強度曲線を求め、これをフィッティングすることで解析パラメータを決定している。しかし、液状化強度は繰返しせん断による疲労破壊的強度であり、液状化に至るまでの剛性低下過程を評価できないことが指摘されている¹⁾。そこで本研究では、初期液状化に至る過程、その後の剛性回復挙動及び残留変形を評価可能なひずみ制御試験を提案する。さらに、その利活用方法として、提案試験結果に基づく解析パラメータの決定方法と、決定した解析パラメータを用いてオンライン実験の再現解析を実施し、不規則波に対する初期液状化から残留変形に至るまでの挙動の検証例を示す。

2. 提案試験の概要と実験条件・結果

図-1 に筆者らが提案する室内試験の概要を示す。本試験はひずみ制御であり、Step1 から Step3 で構成される。Step1 は液状化発生に至る剛性低下挙動を、Step2 は大ひずみ領域におけるダイレイタンスによる剛性回復挙動を、Step3 は液状化後の残留変形を把握することを目的とする。Step1 では、せん断ひずみ両振幅 0.2% で繰返しせん断を行い、各サイクルのせん断剛性（割線剛性）が初期の 10% 以下に達した時点、もしくは繰返し回数が 50 回に達した時点で終了とする。Step2 ではせん断ひずみ両振幅を 0.4% から 0.8%、1.6%、3.2%、6.4%、12.8% まで増大させ、各ひずみ振幅において 3 回せん断する。Step3 では再圧密体積ひずみを求めるために排水、または、残留せん断ひずみを求めるためにせん断応力が 10 kPa に達するまで非排水単調せん断を行う。実験には中空ねじりせん断試験機を用いた。試料には豊浦砂を使用し、目標相対密度を 60% とした。空中落下法により作製した供試体を飽和させ、B 値が 0.95 以上であることを確認した後に有効拘束圧 100 kPa で等方圧密し、提案試験を実施した。なお、ひずみ速度は 1%/min とし、Step3 では排水を行い、再圧密体積ひずみを求めた。図-2 に Step1 のみの実験結果を、図-3 に Step1 及び Step 2 の実験結果を示す。実験結果の詳細については次章で述べる。

3. 試験結果の利活用方法その 1：提案試験結果に基づく解析パラメータの決定方法

提案試験結果に基づく解析パラメータの決定方法を以下に示す。解析パラメータは Step1 の繰返し回数に対する剛性低下の傾向をフィッティングすることで決定する。なお、解析パラメータの決定方法の詳細については文献 2) を参照されたい。提案試験の再現解析は 1 要素で

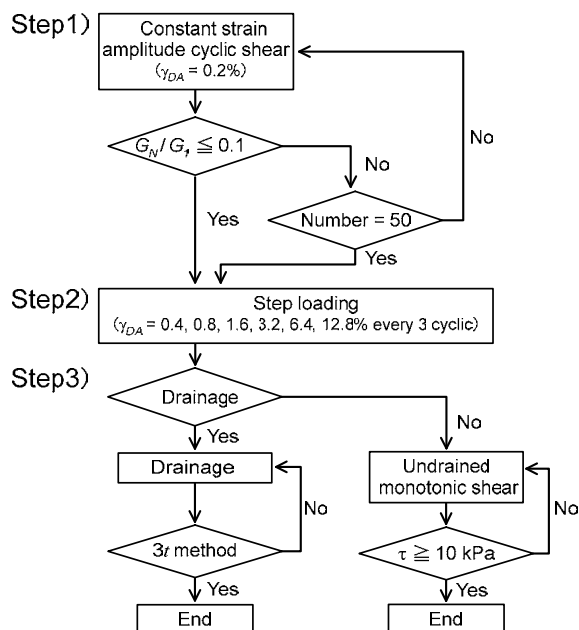


図-1 提案試験の概要

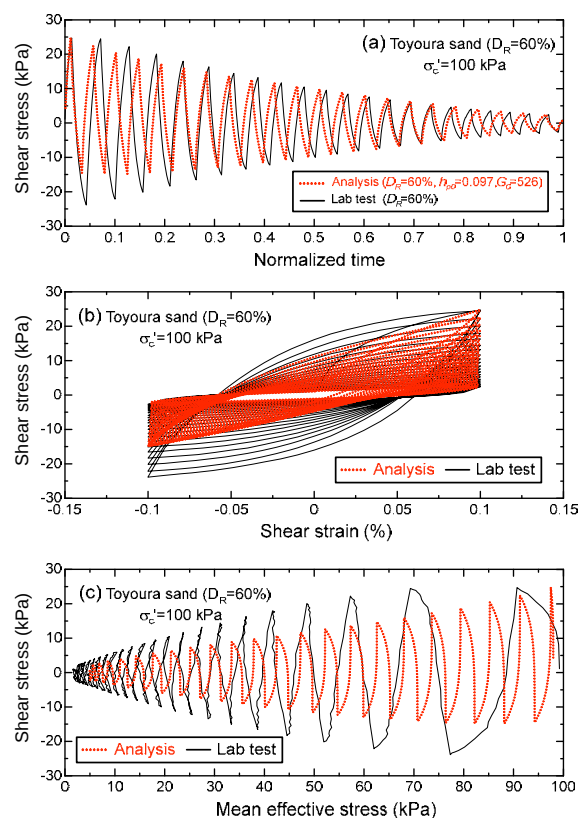


図-2 Step1 の実験結果と解析結果

キーワード 液状化、ひずみ制御、有効応力解析、オンライン実験、残留変形

連絡先 〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原 1 番地 日本大学工学部土木工学科 地盤防災工学研究室 TEL 024-956-8710

実施し、解析コードにはFLAC8.0、構成則にはPM4Sand Version3.1³⁾を用いた。解析結果を図-2と図-3に示す。図-2からStep1における実験結果の剛性低下傾向を十分に再現できていることが確認できる。ただし、本研究では、液状化に伴う剛性低下を再現することに主眼をおいて解析パラメータを設定しているため、図-2(c)の有効応力経路は解析が実験に比べて緩やかに有効応力が減少している。次に、図-3に示すStep1及びStep2の結果から、解析ではせん断ひずみ振幅の増大に伴い、顕著なサイクリックモビリティが生じているが、実験では発生していない。この理由として、本研究で用いた解析パラメータは、Step1の結果に基づき設定しているため、Step2の挙動までは十分に再現できていないと考えられる。また、Step3終了時に発生した体積ひずみは、実験では2.95%、解析では1.60%となった。以上のことから、本提案試験は初期液状化に至るまでの剛性低下過程と大ひずみ領域におけるダイレイタンスーによる剛性回復挙動、その後の残留変形量を評価可能である。また、Step1の試験結果に基づく解析パラメータの決定方法の利点及び課題が明らかとなった。

4. 試験結果の活用方法その2：オンライン実験の再現解析による不規則波に対する挙動の検証

ここでは、提案試験結果に基づき決定した解析パラメータを用いて実施した、オンライン実験の再現解析⁴⁾による不規則波に対する挙動の検証例を以下に示す。なお、実験の詳細については文献4)を参照されたい。解析では、3章で決定した解析パラメータを使用し、オンライン実験で得られた図-4(a)のせん断ひずみ履歴を要素に与えた。図-4より、実験結果と解析結果は過剰間隙水圧上昇過程に違いは見られるものの、初期液状化に達するタイミングはほぼ同じであり、液状化に至るまでのせん断応力の応答も概ね再現できている。ただし、解析では実験で発生していない顕著なサイクリックモビリティを示している。また、再圧密時に発生した体積ひずみは、実験では2.88%、解析では1.59%となった。以上のことから、試験結果から決定した解析パラメータを用いたオンライン実験の再現解析は、不規則波に対する初期液状化から残留変形に至るまでの挙動の検証に有効であることが明らかとなった。

5. まとめ

本研究では、ひずみ制御に基づく試験を提案し、その利活用法を示した。今後は、緩い砂や密な砂を対象に試験を実施する予定である。

<謝辞> 土木学会 地震工学委員会「性能設計に対応した繰返しせん断試験検討小委員会」（委員長：渦岡良介）において、試験法に関する貴重な意見を頂きました。ここに記して謝意を示します。

<参考文献> 1) Kazama, M., Yamaguchi, A. and Yanagisawa, E.: Liquefaction resistance from a ductility viewpoint, Soils and foundations, Vol. 40, No. 6, pp. 47-60, 2000. 2) 齋藤和寿, 松能直登, 仙頭紀明: 定ひずみ制御試験による液状化解析パラメータ決定の可能性について, 土木学会第74回年次学術講演会, pp. 1111-1112, 2019. 3) Boulanger RW, Ziotopoulou K.: PM4Sand (Version3.1): A sand plasticity model for earthquake engineering applications, Report No. UCD/CGM-17/01, Center for Geotechnical Modeling, University of California, Davis, CA, 2017. 4) 横山諒宜, 齋藤和寿, 仙頭紀明: 余震が液状化に及ぼす影響に着目したオンライン実験, 令和元年度土木学会東北支部技術研究発表会（投稿中）。

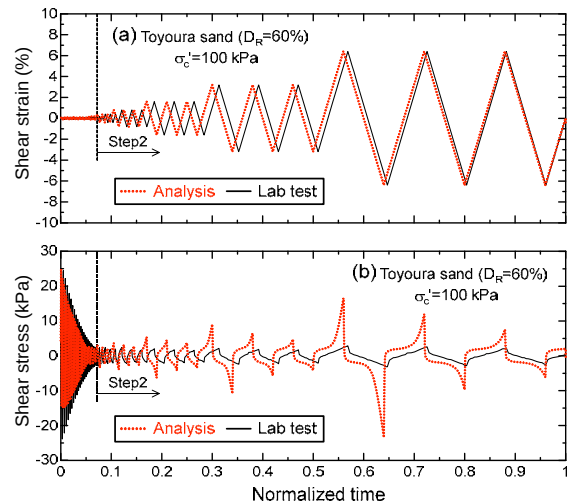


図-3 Step1 及び Step2 の実験結果と解析結果

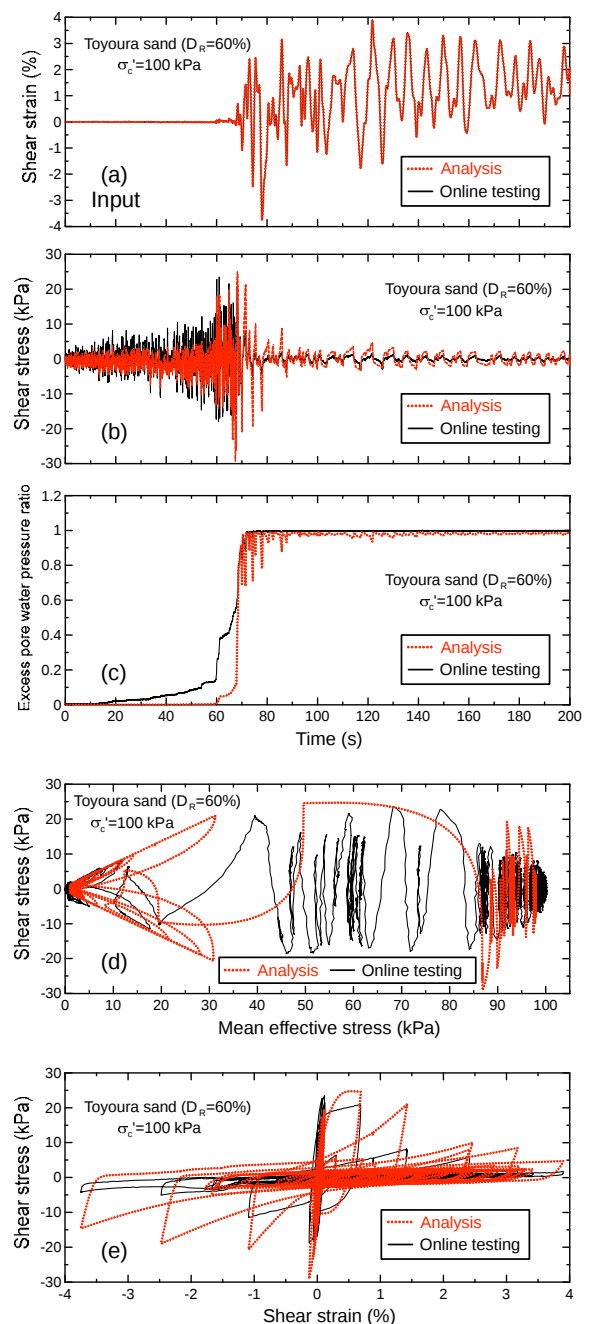


図-4 オンライン実験の再現解析結果