余震による液状化を対象とした 非排水繰り返し中空ねじりせん断試験

小林 孝彰¹・佐々 真志²・渡辺 啓太³・山崎 浩之⁴

¹ 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: kobayashi-t@pari.go.jp

² 正会員 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (同上)

E-mail: sassa@pari.go.jp

³ 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (同上)

E-mail: watanabe-k84x3@pari.go.jp

⁴ 正会員 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 (同上)

E-mail: yamazaki@pari.go.jp

本震で発生した過剰間隙水圧が残留する地盤が、余震を受けて液状化する状況を想定し、2種類の応力制御による非排水繰り返し中空ねじりせん断試験を行った。段階载荷試験では、試験前半に一定振幅の正弦波によって目標とする過剰間隙水圧比を発生させた。その後、段階的に振幅が増加するせん断応力波形を与え、過剰水圧が再上昇するせん断応力レベルを評価した。不規則波载荷試験では、2011年東北地方太平洋沖地震の地震動に基づいた本震、余震波形を連続して与えた。両試験の比較より、段階载荷試験より求まる水圧が再上昇するせん断応力比の閾値を用いることで、不規則波に対しても水圧上昇程度を予測できる可能性を示した。

Key Words : *liquefaction, cyclic torsional shear tests, aftershocks, residual excess pore pressure*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、地震動が長時間継続することにより、沿岸域を中心に甚大な液状化被害をもたらした¹⁾。加えて、本震後30分余りの間に複数回発生したマグニチュード7を超える余震も、液状化被害拡大の要因であると考えられる。このように本震と余震が連続して作用する条件下での液状化メカニズムに対する理解は未だ乏しく、現状の液状化予測手法^{2,3)}ではそのリスクが考慮されていない。先の地震での液状化被害の大きさを考慮すると、余震の影響を適切に評価可能な手法の検討が必要である。

同地震における余震の影響に着目した研究として、上田ら⁴⁾は千葉県浦安市の事例を対象とした有効応力解析による検討を行っている。間隙水の移流を考慮した解析により、過剰水圧が残る地盤においては、余震によって液状化および二次液状化のリスクが高まることを示している。また、余震による作用が液状化後の地盤変状に多大に影響することも知られている。Maharjanら⁵⁾は盛土直下の液状化層を対象とした遠心模型実験を行い、特に地盤内に不透水層が介在する場合に余震の影響が顕著に

なり、盛土の沈下が増大することを示した。またOkamuraら⁶⁾の遠心模型実験では、余震の規模が小さくとも、その影響によって側方流動による変状が2倍程度になるという結果が得られている。

筆者らはこれまでに、液状化予測判定手法の高度化を目的として、本震・余震を含む長継続時間地震動下の液状化に着目した研究を行ってきた^{7,8)}。砂層地盤を対象とした一連の模型振動台試験では、本震を一定とした上で、本震・余震間の静穏期の長さ、及び余震の最大加速度を段階的に変化させ、過剰水圧発生にもたらす影響を定量的に評価した。その結果、層厚20m程度の均一な砂層地盤を想定した場合、東北地方太平洋沖地震で見られたような30分以内の静穏期の中では、静穏期の長さによる影響は小さく、余震の最大せん断応力比によって過剰水圧の上昇がある程度予測できることを示した。また過剰間隙水圧の伝播・消散を考慮した有効応力解析手法により模型振動台試験の結果を対象とした解析を実施し、その妥当性を検証した。これを受けて本研究では、現象のより精緻な観察を目的とし、余震による液状化を想定して2種類の応力制御による非排水繰り返し中空ねじりせん断試験（段階载荷試験、不規則波载荷試験）を行った。

2. 試験概要

(1) 試験手順

供試体は外径 100mm, 内径 60mm, 高さ 100mm の中空円筒形であり, 乾燥状態の試料を空中落下させて形成した. 供試体の相対密度(Dr)は 45%および 80%に設定した. 有効拘束圧 20kPa で予圧密し, 炭酸ガスによる置換を経て脱気水を通水した. 背圧 100kPa を加えて供試体の飽和を促し, 間隙水圧係数 B 値が 0.95 以上であることを確認した. また全ての試験において, 載荷時の有効拘束圧は等方的に 100kPa とした. 試験全体を通じて非排水条件を保ち, 後述する 2 種類の載荷試験を応力制御によって行った.

(2) 試料

試料には飯豊硅砂 7 号を用いた. 同試料の物性は, 土粒子密度 2.652g/cm³, 最大乾燥密度 1.651g/cm³, 最小乾燥密度 1.328g/cm³, 平均粒径 0.18mm である. 上記の条件で求めた同試料の液状化強度曲線を図-1 に示す.

図-1 液状化強度曲線 (有効拘束圧 100kPa)

3. 段階載荷試験

(1) 入力せん断応力波

段階載荷試験では, 本震で発生した過剰間隙水圧 (以下, 残留過剰間隙水圧) の程度に応じた, その後の余震における液状化挙動を評価することを目的とした. 試験ケースの一覧を表-1 に示す. 載荷前半に一定振幅の正弦波を 0.1Hz で載荷し, 目標とする過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_v = 0.40, 0.60, 0.75$ の三段階) を発生させた. その際の繰返しせん断応力比(R)は, 事前に求めた液状化強度曲線 (図-1) から, 100 回の繰返し回数に相当する程度に設定した (Dr 45%: $R=0.12$, Dr 80%: $R=0.18$). Case 7 に関しては例外であり, 載荷前半における繰返しせん断応力比の影響を評価するため, 20 回の繰返し回数に相当する $R = 0.23$ に設定した. 載荷後半では, 過剰間隙水圧の再上昇が起こるせん断応力レベルを評価するため, 段階的に振幅が増加するせん断応力波形 (図-2) を与えた. 20 波ごとせん断応力比が 0.02 増加する波形となっており, これを試料が液状化するまで載荷した. なおここでは, 試験全体を通じて非排水条件を保っており, 本震・余震間で排水, 再圧密が発生しない状況を想定している.

(2) 試験結果と考察

試験結果のうち, 相対密度 45% のケースに関して, 後半の段階載荷部分における過剰間隙水圧比の時刻歴を図-3 に示す. 載荷前半で残留した 3 段階の過剰水圧比に応じて, 異なるせん断応力比で水圧の再上昇が起こる様子が見て取れる. その後, せん断応力比の増加に伴って水圧上昇の傾きが増加し, 最終的に液状化に至った. 図-4 に示す相対密度 80% のケースに関しても, 残留過剰間隙水圧比に応じた同様の挙動が見られた. また載荷前半のせん断応力比を変化させた Case 4 ($R=0.18$) と Case 7 ($R=0.23$) では, 余震中の液状化挙動に大きな差が見られ

表-1 段階載荷試験ケース一覧

ケース名	相対密度 (%)	初期拘束圧(kPa)	載荷条件		
			前半	残留過剰間隙水圧比	後半
Case 1	45	100	正弦波 R 0.12	0.40	段階載荷
Case 2				0.60	
Case 3				0.75	
Case 4	80	100	正弦波 R 0.18	0.40	段階載荷
Case 5				0.60	
Case 6				0.75	
Case 7	80	100	正弦波 R 0.23	0.40	段階載荷

図-2 入力せん断応力波形 (段階载荷試験)

図-3 過剰間隙水圧比 (段階载荷試験, Dr 45%)

図-4 過剰間隙水圧比 (段階载荷試験, Dr 80%)

なかった。次に、段階载荷試験における全ての試験結果に対して、液状化（過剰間隙水圧比 1.0 で判定）が発生したせん断応力比を残留過剰間隙水圧比ごとにまとめたものが図-5 である。両相対密度において概ね線形の関係が見られるものの、残留過剰間隙水圧比が大きくなるとせん断剛性の低下が顕著になり、若干の非線形性が見られた。相対密度 80%、残留過剰間隙水圧比 0.75 の Case 6 に着目すると、せん断応力比 0.12 で液状化に至っている。液状化強度曲線（図-1）によれば、これは 1000 回程度の繰り返し载荷回数に相当する、非常に低い外力レベルである。この結果から、特に過剰水圧が残留しやすい地盤状況下においては、小規模な余震が連続することでも液状化に至る可能性があると考えられる。

図-5 残留過剰間隙水圧比と液状化が発生したせん断応力比の関係 (段階载荷試験)

4. 不規則波載荷試験

(1) 入力せん断応力波

不規則波載荷試験では、2011年東北地方太平洋沖地震における茨城県ひたちなか市の基盤観測波形に基づき、等価線形解析 SHAKE によって作成した本震および余震波形を載荷した。不規則波載荷試験のケース一覧を表-2に示す。試料の相対密度は 80% とし、有効拘束圧は等方的に 100kPa とした。載荷前半に当たる本震の波形は全ケースで共通とし(図-6)、本震終了時点で過剰間隙水圧比が 0.6 程度残留するよう、最大せん断応力比(R_{max})を 0.25 に調節した。一方で、載荷後半の余震波形に関しては、最大せん断応力比が 0.19, 0.23, 0.25 となるよう、全体の振幅を三段階に変化させた(図-7)。なお両波形の時間スケールは、主要周波数成分が前述の段階載荷と同様の 0.1Hz 程度になるよう、実時間の約 10 倍とした。

(2) 試験結果と考察

前半の本震載荷中における過剰間隙水圧比の時刻歴を図-8に示す。入力波形が同一であるため、全ケースで同様の挙動を示し、本震終了時に過剰間隙水圧比が 0.6 程度まで上昇した。次に、後半の余震載荷中の過剰間隙水圧比の時刻歴を図-9に示す。余震の主要部である 200 秒付近において、Case 9, Case 10 が液状化に至る結果となった。せん断応力比が最も低い Case 8 ($R_{max}=0.19$)では、僅かな水圧上昇に留まった。ここで、同条件の段階載荷試験(相対密度 80%, 残留過剰間隙水圧 0.60)の結果を参照すると、水圧の再上昇が顕著になるせん断応力比として、0.16 が得られる(図-5)。このせん断応力比 0.16 をプロットしたものが図-7の破線であり、200 秒付近の 3 つの半波だけがこれを超えていることが分かる。また Case 8 に関しては、余震の主要部以降において過剰水圧

の再上昇が見られなかった。これが余震の主要部以降にせん断応力比 0.16 を超える波が存在しないことと対応することから、段階載荷試験で求めた閾値が、不規則波試験においても有効であるものと考えられる。

本試験と同様の方法を用い、液状化をもたらす外力レベルを残留過剰間隙水圧に応じて評価することで、余震による液状化のリスクを適切に判断できるものと考えられる。

5. おわりに

余震による液状化を対象として、2 種類の応力制御による非排水繰返し中空ねじりせん断試験を行った。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- ・段階載荷試験により、相対密度の異なる試料に対して、残留過剰間隙水圧の程度に応じた、水圧の再上昇が発生する余震のせん断応力レベルを評価した。
 - ・載荷前半の繰返しせん断応力比が異なる場合でも、その際の残留過剰間隙水圧が同等であれば、余震中の液状化挙動に大きな差がないことを明らかにした。
 - ・残留過剰間隙水圧比が 0.75 程度になるとせん断剛性の低下が顕著になり、上記の係数に若干の非線形性が見られた。
 - ・段階載荷試験から求めた水圧の再上昇が発生するせん断応力比を閾値とすることで、不規則波に対しても水圧上昇程度を予測できる可能性を示した。
- 今後、様々な地震波形に対して同様の検討を行い、残留過剰間隙水圧に応じた挙動を評価することで、余震による液状化の発生条件を体系的に整理できると考えられる。

表-3 不規則波載荷試験ケース一覧

ケース名	相対密度 (%)	初期拘束圧 (kPa)	載荷条件		
			前半	残留過剰間隙水圧比	後半
Case 8	80	100	本震 R_{max} 0.25	0.60	余震 R_{max} 0.19
Case 9					余震 R_{max} 0.23
Case 10					余震 R_{max} 0.25

図-6 入力せん断応力波形（不規則波載荷，本震， Dr 80%）

図-7 入力せん断応力波形（不規則波載荷，余震， Dr 80%）

図-8 過剰間隙水圧比（不規則波載荷，本震， Dr 80%）

図-9 過剰間隙水圧比（不規則波載荷，余震， Dr 80%）

参考文献

- 1) 高橋重雄, 他 33 名: 2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 港湾空港技術研究所資料, No.1231, 2011.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.132-149, 2012.
- 3) 国土交通省: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (2007 年版) 部分改訂, 液状化予測判定法の改定, https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk5_000017.html, 2013.
- 4) 上田恭平, 井澤淳, 室野剛隆, 井合進: 余震の発生が地盤の液状化挙動に及ぼす影響に関する解析的検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地盤工学), Vol.70, No.4, pp. 578-585, 2014
- 5) Maharjan, M. and Takahashi, A.: Liquefaction-induced deformation of earthen embankments on non-homogeneous soil deposits under sequential ground motions, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.66, pp.113-124, 2014
- 6) Okamura, M. *et al*: Effects of sand permeability and weak aftershocks on earthquake-induced lateral spreading, *Soils and Foundations*, Vol.41, No.6, pp.63-77, 2001
- 7) 佐々真志, 山崎浩之, 後藤佑介, 深津圭佑, 菊池喜昭, 野津厚: 地震動の連成による砂質地盤の液状化機構と予測・対策の安定性, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.912-917, 2014
- 8) 小林孝彰, 佐々真志, 渡辺啓太, 山崎浩之: 連続した地震動作用下の地盤液状化に関する実験と解析, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.71, No.2, pp. 1101-1106, 2015.

(2016.2.4 受付)

UNDRAINED CYCLIC TORSIONAL SHEAR TESTS ON LIQUEFACTION RESISTANCE OF SAND UNDER SEQUENCED EARTHQUAKE MOTIONS

Takaaki KOBAYASHI, Shinji SASSA, Keita WATANABE, and Hiroyuki YAMAZAKI

This study investigates liquefaction resistance of sand under sequenced earthquake motions by cyclic torsional shear tests. Two series of stress-controlled tests, “step loading” and “irregular wave loading”, have been performed. These tests consisted of two different loading phases. In the step loading tests, certain levels of excess pore pressure were first achieved by ordinary, sinusoidal wave loadings. Subsequently, the step loading, which increases cyclic shear stress ratio in steps, was applied. This was done to evaluate the shear stress level at which excess pore pressure restarts to rise in an aftershock. In the irregular wave loading tests, these loading processes were replaced by applying irregular waves based on the record in the 2011 Tohoku Earthquake. The approach in this study effectively evaluates the risk of liquefaction associated with sequenced earthquake motions.