

累積損失エネルギーを用いた砂の非排水繰返し載荷後の圧縮特性の把握

名古屋大学 学生会員 ○小川大貴, 村上孝弥, 潮崎彰太
名古屋大学 正会員 中井健太郎 野田利弘

1. はじめに

東日本大震災では、東京湾沿岸部を中心とする広範囲の埋立地盤で液状化被害が発生した。液状化被害は地震中の不安定現象だけに留まらず、地震中から地震後にかけての地盤沈下も生じている。繰返し載荷後の圧縮特性を把握する研究はこれまでも精力的に行われており、例えば Nagase and Ishihara は、単純せん断試験機を用いた非排水繰返しせん断を行い、再圧密時の体積ひずみ量は繰返しせん断中の最大せん断ひずみと相関が高いことを示してきた¹⁾。ところが、従来実施されている応力制御方式による繰返しせん断では、液状化到達後にひずみが急増してしまうため、液状化到達後に多数回の繰返し載荷履歴を与えることができない。つまり、土の「疲労破壊的」な強度を与えているため、液状化するかしないかの判定を行うのが主目的であり延性的な性質を評価するものにはなっていない。南海トラフ地震のように、継続時間の長い海溝型地震が危惧される中、多数回の繰返し載荷履歴（液状化履歴）を与えた時の非排水繰返しせん断特性およびその後の圧縮特性を把握することは重要である。そこで本報では、変位制御方式による非排水繰返しせん断試験を実施し、繰返し載荷後の圧縮特性の把握を試みた。

2. 実験結果

試験に用いた試料は三河珪砂 6 号である。供試体を拘束圧 100kPa（側圧 300kPa、背圧 200kPa）で等方圧密した後、変位振幅一定・変位制御非排水繰返し三軸試験を実施した。載荷速度は 4%/min（4mm/min）である。所定の回数の繰返し載荷を与えた後は、軸ひずみ 0%の状態で載荷を止め、応力状態を保ったまま排水コックを開いて体積変化量を計測した。

2.1 繰返し回数の影響

変位振幅 0.5%で実施した場合の非排水繰返しせん断挙動を図 1 と図 2 に示す。初期相対密度はともに 70%（比体積 $v_0=1.76$ ）で、繰返し回数が異なる。繰返し回数の増加とともに有効応力は減少し、最終的にはほぼ $q = p' = 0$ となって液状化に達する。せん断応力～せん断ひずみ関係を見てみると、繰返し初期の応力ひずみ曲線は上に凸のカーブを描いているが、有効応力が $q = p' = 0$ 近くまで減少した後は q と p' の増加（塑性膨張）を伴いながら下に凸のカーブ（サイクリックモビリティ）を描く。繰返し回数が多くなるにつれて、 q の最大値は次第に小さくなり（剛性低下）、やがてほぼゼロとなる。

図 3 には繰返し回数が異なるときの繰返し載荷後の圧縮量を示す。横軸は正規化累積損失エネルギー²⁾で整理している。正規化累積損失エネルギーとは、応力ひずみ曲線の描くループの面積を累積したもの（1 サイクル間に費やされた損失エネルギーの総和）を拘束圧で除して正

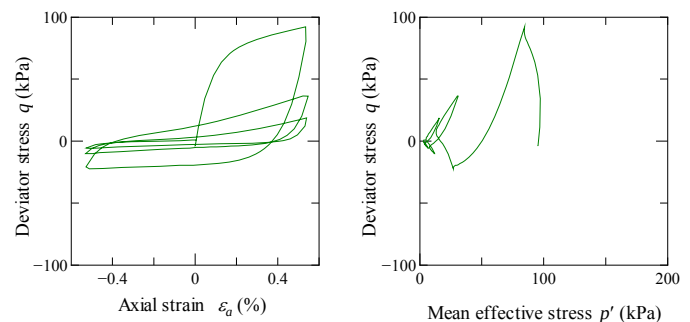


図 1 非排水繰返しせん断挙動（繰返し回数小）

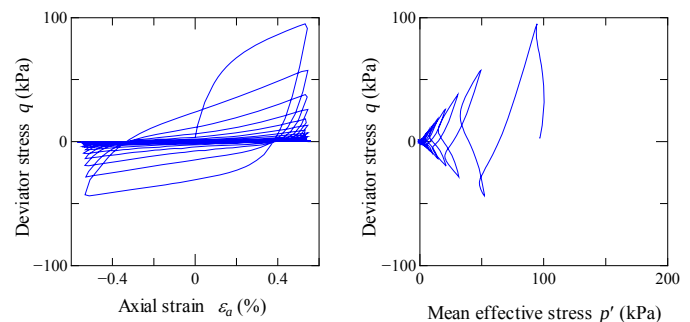


図 2 非排水繰返しせん断挙動（繰返し回数大）

規化したものである。既往研究によると、要素試験法の種類によらずほぼ一義的に決まること、液状化に達するまでのエネルギー消費量は応力履歴によらず一定と見なせることなどが明らかになっているが、液状化後の圧縮特性との関連性はほとんど議論されていない。正規化累積損失エネルギー（繰返し回数）の増加とともに体積ひずみ量は増加し、最大で 10%にも達することがわかる。また、本実験は変位振幅一定条件下で実験を実施しているため、繰返し載荷後の体積ひずみ量は、従来のように最大せん断ひずみ量で関連付けられるものではないことも示唆している。また、正規化累積損失エネルギーと繰返し載荷後の圧縮量にはよい相関があり、変位振幅の違いによらずほぼ一意の関係にあることもわかる。図 4 は繰返し回数が異なる試験結果の圧縮特性（比体積～有効応力関係図）である。非排水繰返しせん断後に拘束圧を 5.0kPa まで下げた後で排水コックを開き、排水コックを開いたままゆっくりと拘束圧を上げている。繰返し回数が多いとコックを開けた時の体積圧縮量が大きい、その後の圧縮特性（圧縮線の勾配）は両者で大きな違いはない。また、この時の $v \sim \ln p'$ 図上での勾配を算出してみると約 0.05 となっており、これは別途実施した等方除荷試験から得られる膨潤指数とほぼ等しい。

2.2 密度の影響

図 5 は、初期密度が異なるときの繰返し載荷後の圧縮特性であり、図中には与えた正規化累積損失エネルギーも記載している。 p' の減少量が正確には異なるが、初期密度が大きいほど p' 減少のためにはより大きなエネルギーを必要とすることがわかる。また、繰返し載荷後の圧縮線の勾配を見てみると、初期密度によらずほぼ等しい。

3. おわりに

本稿では、変位振幅一定・変位制御非排水繰返し三軸試験を実施し、液状化の程度が異なる時の繰返し載荷後の圧縮挙動の把握を試みた。その結果、1) 変位振幅一定で繰返し載荷を与えることによって液状化到達後も多数回の繰返し履歴を与えることができ、液状化履歴が大きいほど圧縮量が大きくなること、2) 相対密度 70%に揃えた珪砂 6 号では体積ひずみ量が最大で 10%にまで達すること、3) 正規化累積損失エネルギーと繰返し載荷後の圧縮量にはよい相関があること、4) 初期密度によらず繰返し載荷後の圧縮線の勾配はほぼ等しいこと、5) またその勾配は膨潤指数にほぼ等しいこと、を示した。本稿は、地盤工学会東日本大震災対応調査研究委員会「地盤変状メカニズム研究委員会（委員長：浅岡顕）」に関連する研究報告である。

参考文献 1) Nagase, H. and Ishihara, K. (1974): Liquefaction-induced compaction and settlement of sand during earthquake, Soils and Foundations, Vol.28, No.1, pp.65-76. 2) 風間基樹, 柳澤栄司, 増田昌昭 (1998): 定ひずみ制御繰返し三軸試験による液状化強度評価の可能性, 地盤工学学会誌, 第 46 巻, 第 4 号, pp.21-24.

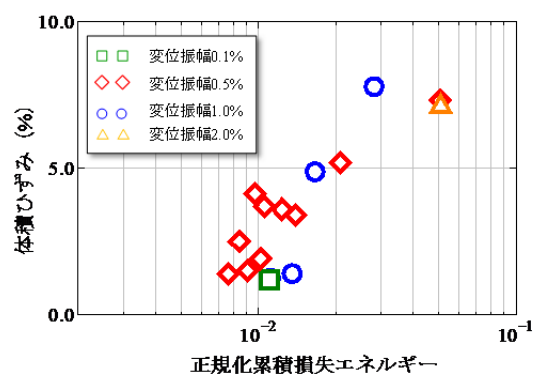


図 3 累積損失エネルギーと体積ひずみ量

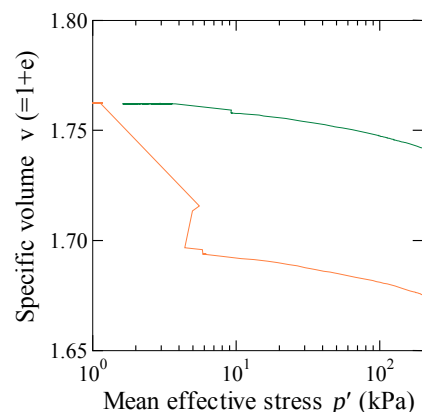


図 4 繰返し回数が異なる時の圧縮挙動

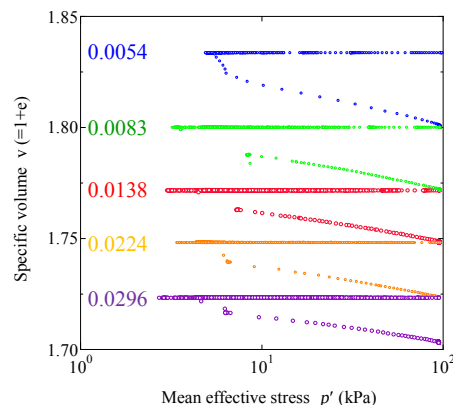


図 5 初期密度が異なる時の圧縮挙動