

砂の非排水繰返しおよび繰返しに伴う圧縮特性の定量的評価の試み

液状化, 圧縮, 繰返し三軸試験

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 国際会員 中井健太郎, 野田利弘

1. はじめに

平成 24 年 8 月 29 日, 内閣府より南海トラフ巨大地震の被害想定が発表された. この最大クラスの巨大地震が仮に発生すれば, 東海, 関西から中国・四国地方の広範囲にわたって非常に強い揺れが発生し, 甚大な被害が危惧される. これら太平洋岸の沖積平野や海上埋立て地盤は人口・産業が集中しているが, 同時に, 液状化の危険度も極めて高くなっており, 地震時被害をできる限り予測し, 適切な耐震対策を講じることが重要となる. 本報告では, 液状化特性の把握のための基礎的データの蓄積を目的として, 荷重方法・排水条件・振幅など, 各種荷重条件を系統的に変えた砂の繰返し三軸試験を実施するとともに, これら実験データの詳細な観察から, 液状化および液状化後の残留変形を定量的に評価できる指標を検討した.

2. 既往の研究

新潟地震(1964)やアラスカ地震(1964)で液状化被害が注目されて以降, 液状化過程および残留変形量に関する定量的評価を目的に, 様々な研究が行われてきている. 風間ら(1999)は累積損失エネルギー W (式(1))を提案し, この指標を用いることによって, 地盤材料の靱性・粘り強さが考慮でき, 地盤の塑性化の程度を定量的に評価できると述べている¹⁾. また, 例えば原ら(2000)は初期拘束圧で正規化した正規化累積損失エネルギー W/σ'_m は, 要素試験法の種類によらずほぼ一義的に決まること, つまり, 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みなせることを示した²⁾. Ishihara & Yoshimine(1992)は応力制御による単純せん断試験結果から, 相対密度が同じであれば, 再圧密時体積ひずみ ϵ_v と最大せん断ひずみ γ_{max} の間に一意の関係があることを明らかにした³⁾. 一方, 仙頭ら(2004)らは, 液状化後の再圧密量を評価するためには, W/σ'_m や γ_{max} では十分でなく, 累加せん断ひずみ γ_{acm} (式(3))を提案している⁴⁾. ここに, τ はせん断応力, γ はせん断ひずみである.

$$W = \oint_f \tau(\gamma) d\gamma = \int_0^t \tau(t) \dot{\gamma}(t) dt \quad (1)$$

$$\gamma_{acm} = \int_0^t |\dot{\gamma}(t)| dt \quad (2)$$

3. 実験方法

実験に用いた試料は三河珪砂 6 号である. 相対密度 70% に密度調整した供試体を拘束圧 100kPa (側圧 300kPa, 背圧 200kPa) で等方圧密した後, 応力振幅一定応力制御, および, ひずみ振幅一定ひずみ制御で非排水繰返し三軸試験を, 振幅や繰返し回数を系統的に変えて実施した. 実験結果の

一例を図 1 と図 2 に示す. ひずみ制御試験の特徴としては, 液状化 ($q = p' = 0$) 到達後も連続して繰返し履歴を与えることができるため, 液状化の程度を評価できることである⁵⁾. 全ての試験において, 繰返し荷重を止めた後で排水コックを開き, 繰返しに伴って生じる排水量を測定した.

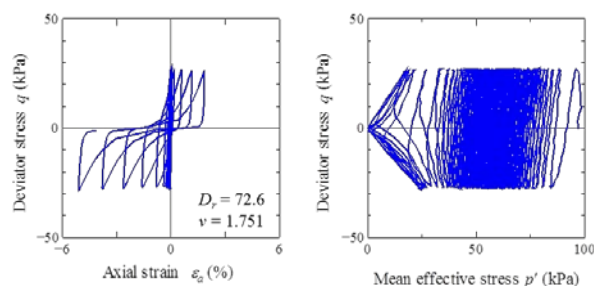


図 1 応力振幅一定応力制御非排水繰返し三軸試験

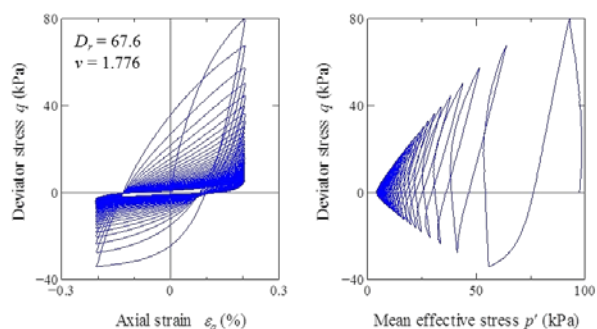


図 2 ひずみ振幅一定ひずみ制御非排水繰返し三軸試験

4. 従来指標の適用性の確認

本研究で実施した三軸試験結果をもとに, 2. で示した指標の適用性を確認した.

図 3 は W/σ'_m と過剰間隙水圧比の関係である. ひずみ振幅が大きい場合を除くと, 既往成果と同様に, W/σ'_m は荷重方法や振幅に依らず, 初期液状化と良い相関があることが確認できる. 図 4 は Ishihara & Yoshimine(1992)が示した γ_{max} と繰返し荷重後の ϵ_v の関係図³⁾ 上に, 本実験結果を重ねたものである. 同じ相対密度(70%)で比較すると, 応力制御試験結果については, γ_{max} は繰返し後の体積ひずみと良い相関がある. しかしながら, ひずみ制御試験の場合, γ_{max} は一定であるにも関わらず繰返し回数の増加とともに ϵ_v は大きくなってしまい, 一意の関係を得ることができない. 図 5 は γ_{acm} と繰返し荷重後の ϵ_v の関係である. ばらつきはある程度見られるものの, 既往成果と同様に γ_{acm} は荷重方法・振幅に依らず繰返し荷重後の体積変化量と良い相関があることを確認した.

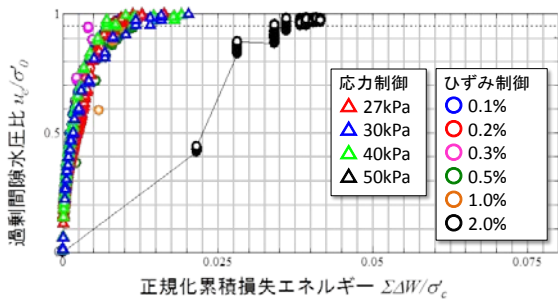


図3 正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比関係

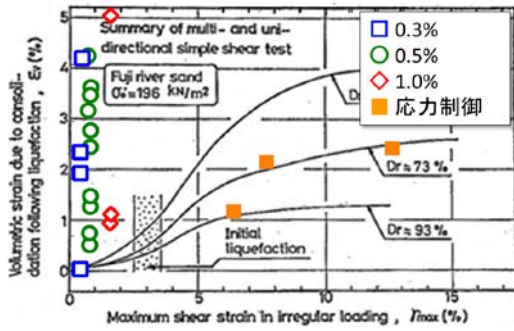


図4 最大せん断ひずみと体積ひずみ関係

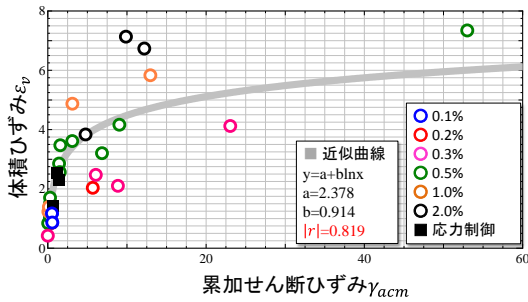


図5 累加せん断ひずみと体積ひずみ関係

5. 提案指標による連続的評価の試み

個々の現象に対して、従来指標の適用性が確認できた。しかしながら、液状化からその後の沈下までは一連の現象であり、連続的に評価できることが望まれる。そこで、本研究では新しい指標として式(3)を提案し、その適用性を確認した。なお、 W は図6(a)で示される、応力～ひずみ曲線の面積を累積しているが、提案指標は図6(b)で示される、応力比～ひずみ曲線の面積を累積したものである。

$$MS = \int_f \eta(\gamma) d\gamma = \int_f \frac{q(\gamma)}{p'(\gamma)} \cdot d\gamma \quad (3)$$

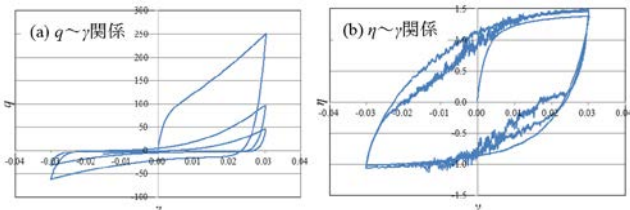


図6 応力ひずみ曲線と応力比ひずみ曲線の一例

図7と図8はそれぞれ、提案指標を用いて過剰間隙水圧比と繰返し载荷後の体積ひずみへの適用性を確認したも

のである。载荷方法・振幅に依らず、液状化およびその後の挙動が1つの指標で統一的に評価することができており、体積ひずみ量に関しては、 γ_{acm} による評価よりも高い相関を得ることができた。ただし、制御やセンサー精度の問題から、低拘束圧下での p' 値でバラツキが見られる。本研究では、 p' の誤差を応急的に改善するために、全試験結果に対して最小の p' が原点となるように補正してから応力比 η を計算していることに注意が必要である。

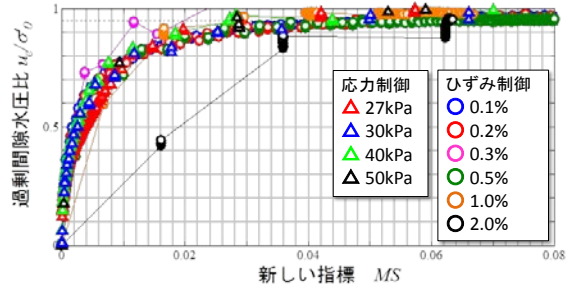


図7 新指標と過剰間隙水圧比関係

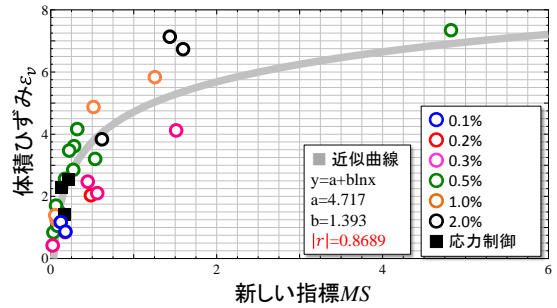


図8 新指標と体積ひずみ関係

5. おわりに

本稿では、繰返し三軸試験を行い砂質土の液状化と圧縮特性の関係の把握を試み、提案指標が、液状化挙動から繰返しに伴う体積変化(液状化後の残留変形、締め固め)までを連続的に評価できる可能性を示した。今後は、低拘束圧下での計測精度の向上を進めるとともに、更なる実験データを蓄積して検証を進める。

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) 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, 46(4), 21-24. 2) 原忠, 天野真輔, 國生剛治, 大石富彦 (2000): 三軸試験による砂礫材料の損失エネルギーの検討, 第55回年次学術講演会, III-A86. 3) Ishihara, K. and Yoshimine, M. (1992): Evaluation of Settlements in Sand Deposits Following Earthquakes, S&F, 32(1), 173-188. 4) 仙頭紀明, 風間基樹, 渦岡良介 (2004): 非排水繰返しせん断履歴後の再圧密実験と体積収縮特性のモデル化, 土木学会論文集, No.764, III-67, 307-317. 5) 中井健太郎, 野田利弘, 小川大貴, 村瀬恒太郎 (2013): 累積損失エネルギーに着目した砂の液状化後の圧縮特性, 第48回地盤工学研究発表会, 533-534.