

消散エネルギーを用いた豊浦砂の再液状化特性の定式化

東京大学大学院 学生会員 ○山崎 佑太郎
 同上 学生会員 青柳 悠大
 同上 フェロー会員 古関 潤一

1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震後の液状化によって、過去の地震で液状化が発生した地点と同じ地点で再液状化が確認されている。しかしながら、複数回液状化現象については詳しく解明されていないため、近い将来想定される大地震に向けた複数回液状化現象の対策が必要とされている。本研究では、豊浦砂で作製した中空円筒供試体に対して、多層リングせん断試験装置で一次元圧縮と定体積繰返しせん断試験を、各液状化段階で様々な両振幅せん断ひずみを設定して複数回実施した結果¹⁾をもとに、消散エネルギーを用いた豊浦砂の再液状化特性の定式化の予測精度について、実測値との比較により検討した。

2. 消散エネルギーの正・負の効果

図1に各液状化段階で様々なせん断ひずみ履歴を与えた試験¹⁾における応力-ひずみ関係から算出した消散エネルギーの正・負の効果を両対数軸で示し、次の段階での再液状化までの繰返し回数を図中の数字で示す。本分析では、文献²⁾に基づいて、繰返し载荷中の有効応力経路が変相線に初めて到達するまでの消散エネルギーを正の効果、それ以降を負の効果とし定式化を行った。

消散エネルギー E は、以下のように E_1 として算出する場合(ケース1)と、 E_2 として各段階において平均有効主応力 p' で正規化して算出する場合(ケース2)の2通りで定義した。

$$E_1 = \sum \Delta W = \int \tau d\gamma$$

$$E_2 = \frac{\sum \Delta W}{p'} = \int \frac{\tau_{Ave} - \Delta \tau}{p' - \Delta p'} d\gamma$$

3. 再液状化特性の定式化の概要

図1中の再液状化までの繰返し回数を6つの範囲に分け、試験から得られた正規化前の正・負の効果の関係を以下のような最小二乗法による近似直線でそれぞれ表したものを、図中に点線で示す。

$$\log(\sum \Delta W^{(+)}) = \log b + a \log(\sum \Delta W^{(-)}) \quad (1)$$

式(1)より各範囲で求めた定数 a と、その範囲での繰返し回数の代表値との関係を片対数軸で図2に示す。繰返し回数の代表値は、対数軸で表した各範囲の平均値 x_{Ave} を用いた。各範囲での最小の繰返し回数を x_{min} 、最大の繰返し回数を x_{max} とすると以下の式(2)のように表される。

$$\log x_{Ave} = (\log x_{min} + \log x_{max})/2 \quad (2)$$

試験で得られた再液状化までの繰返し回数の実測値と、近似直線を用いた定式化によって得られた計算値を比較するため、ケース1では正規化前の再液状化までの繰返し回数5.1-200回の範囲で平均した定数 a_1 、ケース2では

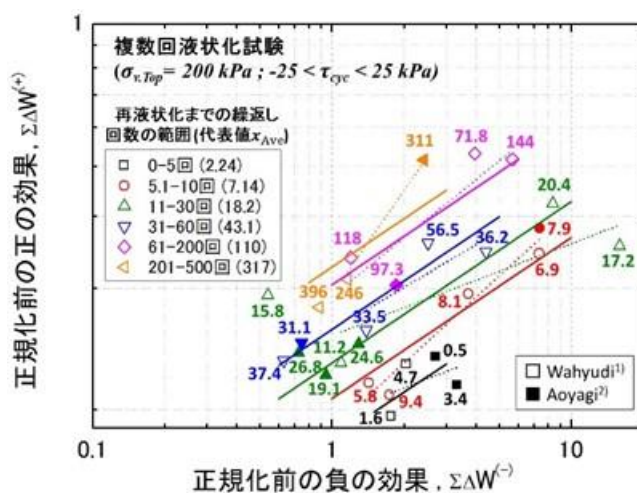


図1 正規化前の正・負の効果の関係と近似直線

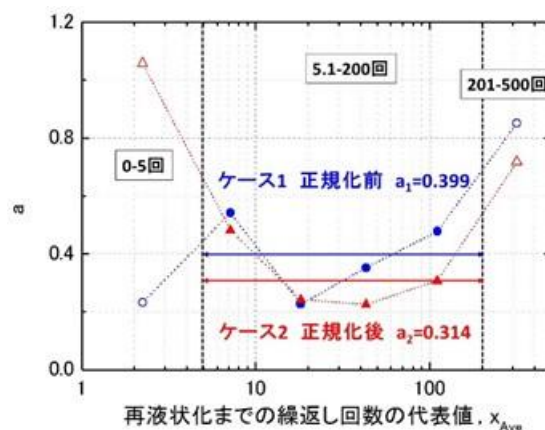


図2 定数 a と繰返し回数の代表値

キーワード 再液状化, せん断履歴, 消散エネルギー

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷7丁目3-1 東京大学工学部1号館B1F 土質地盤研究室

正規化後の同様の範囲で平均した定数 a_2 をそれぞれ用いて、2 ケースについて予測精度の比較を行った。ここで、繰返し回数 5.1-200 回の範囲を用いたのは、全ての範囲を用いるよりも高い相関関係が見られたためである³⁾。

以上のように設定した定数 a の一定値をもとに新たに近似直線を引き、 y 軸との交点の位置を求めることで各範囲における変数 b を求めた。このように決定した 2 つの数 a , b をもとに、ケース 1 の新たな近似直線を繰返し回数の範囲毎に表すと図 1 中に実線で示したようになる。

図 3 に各範囲の再液状化までの繰返し回数の代表値と変数 b の関係を両対数軸で示す。図より、代表値と変数 b の関係は直線的になり、近似直線は図中に示した形式で表される。

以上の定式化による計算値を求める際には、まず図 2 で示した定数 a の一定値 a_1 , a_2 と正規化前後の正・負の効果の実測値を式(1)に代入することによって、各実測値における変数 b_i を求めた。次に、この値を図 3 に示した関係式に代入し、再液状化までの繰返し回数の計算値 x を $x = x_{Ave}$ として求めた。

4. 定式化結果と実測値の比較

図 4 にケース 1 の計算値と再液状化までの繰返し回数の実測値の関係を両対数軸上に示す。図の中央の線は実測値と計算値が 1:1 の関係であることを表し、その上下の線で囲まれた領域は実測値に対して計算値がそれぞれ 1/2 倍から 2 倍の関係に収まる領域を表している。図より、ケース 1 の計算値は実測値と比較して、最大で 25 倍、最小で 1/8 倍であった。

図 5 に同様にケース 2 の計算値と実測値の関係を示す。ケース 2 の計算値は実測値と比較して、最大で 2.5 倍、最小で 1/5 倍であり、ケース 1 と比較すると予測精度が向上したことがわかる。したがって、消散エネルギーを平均有効主応力 p' で正規化することで、予測精度が向上した。

5. 結論

液状化過程中的の消散エネルギーについて、正・負の効果で定義し近似直線に基づいた定式化を行うことで、再液状化までの繰返し回数の実測値と計算値の間で相関関係が確認された。特に、平均有効主応力 p' で正規化した場合では相関性が増加し、定式化による予測精度が向上することがわかった。

参考文献 : 1) Wahyudi ら(2015): Multiple-liquefaction Behavior of Sand in Cyclic Simple Stacked-Ring Shear Tests, International Journal of Geomechanics, ASCE 2) Aoyagi ら(2017) : Analysis of Multiple Liquefaction Characteristics of Toyoura Sand Based on Dissipated Energy, The 3rd International Conference on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (in press) 3) 山崎ら(2017) : 平均有効主応力で正規化した消散エネルギーに基づく豊浦砂の再液状化特性の定式化, 第 52 回地盤工学研究発表会(投稿中)

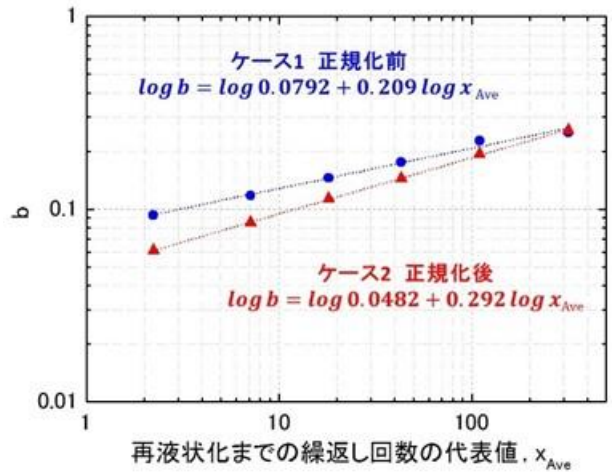


図 3 変数 b と繰返し回数の代表値

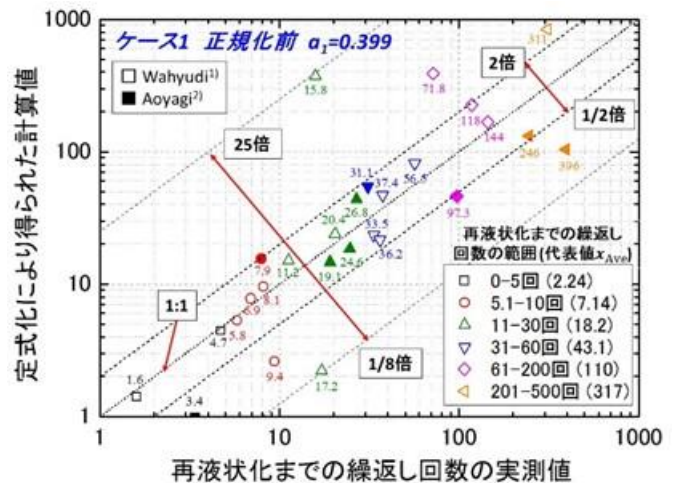


図 4 実測値と計算値の比較(正規化前)

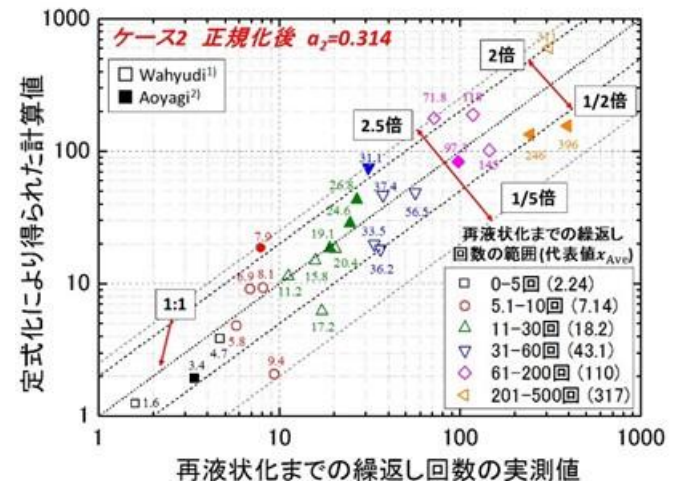


図 5 実測値と計算値の比較(正規化後)