

## 密な砂の液状化強度や損失エネルギーに及ぼす大小異なる载荷履歴の影響

東京電機大学 正会員 石川 敬祐  
 東京電機大学 名誉会員 安田 進  
 東京電機大学大学院 学生会員 ○及川 晃介

## 1. はじめに

2016年熊本地震の特徴として、4月16日に発生した前震( $M=6.5$ )と4月16日に発生した本震( $M=7.3$ )といった短期間に複数回の強震動の作用が挙げられる。九州自動車道では、高速道路盛土の路面縦断・横断方向の亀裂や路面のうねりやカルバートボックスの段差や目地の開きによる土砂の流出の被害が発生した<sup>1)</sup>。高速道路盛土は、施工管理基準に則り締固め度が高い状態にあるが前震・本震とも1G前後の非常に強い地震動を受けたので、前震で剛性が低下したところに本震を受けた可能性もある。そこで本研究では、豊浦砂を用いた密な供試体に対して、大小異なる载荷履歴を受けた際の液状化強度の変化や液状化に至るまでのエネルギー特性を考察した。

## 2. 液状化試験概要

試料には豊浦砂( $\rho_s=2.646\text{g/cm}^3$ ,  $e_{\max}=0.981$ ,  $e_{\min}=0.606$ )を用いた。液状化試験は繰返し非排水三軸試験である。供試体の寸法は直径5cm, 高さ10cmとし、相対密度85%を目標に空中落下法により供試体を作成した。圧密時間は一律30分とし、有効拘束圧50kPa, 背圧200kPa, 载荷方法は0.1Hzの正弦波の応力制御で行った。Case0は、繰返し応力振幅比を変化させて、一般的な液状化試験を行った。2016年熊本地震は内陸直下型地震である為、繰返し回数10回を基準とする液状化強度比とした。Case1, 2は図1に示すように試験を行った。20波までは $R_L10$ の50%, 75%相当の繰返し応力比で試験を行う。20波以降は、非排水状態を保ったまま $R_L10$ 相当の繰返し応力比で試験を行った。

## 3. 液状化試験結果

## 3.1 繰返し回数と繰返し応力比の関係

図2にCase1, 2の応力ひずみ関係と有効応力経路を示す。Case1の20波までの試験結果を見ると有効応力に変化が殆どなく軸ひずみも出ていないが、Case2では有効応力が著しく減少して、軸ひずみが1%程度出ていることがわかる。これよりCase1に比べCase2は、载荷履歴の影響を大きく受けているといえる。図3にCase0~2に繰返し回数と繰返し応力比の関係を示す。なおCase1, 2は、20波を差し引いた繰返し回数である。Case0の液状化強度曲線に対して、Case1の両振幅ひずみ5%時の繰返し回数は増加し、Case2の両振幅ひずみ5%時の繰返し回数は幾分減少する傾向がみられた。これらより、Case1のように液状化強度比の半分程度の繰返し応力比を受けると履歴を受けていない液状化強度比に対して強くなる。それに対して、Case2のように液状化強度比の7割程度の繰返し応力を受けると液状化強度が弱くなることを確認した。

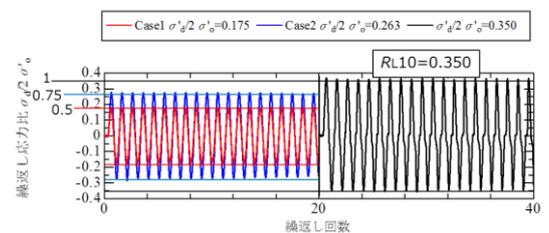


図1 試験条件

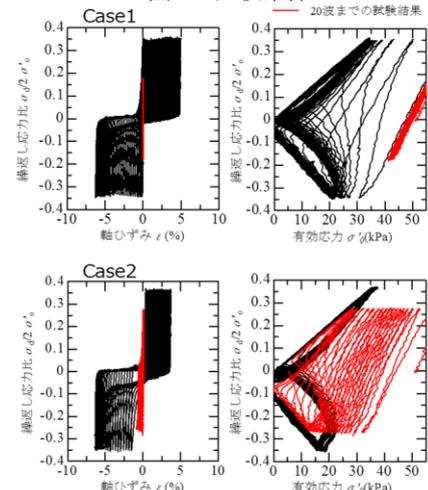


図2 Case1, 2の有効応力経路

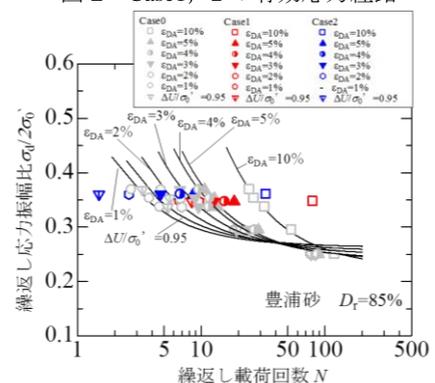


図3 繰返し回数と繰返し応力比の関係

キーワード 前震・本震, 载荷履歴, 液状化強度, 損失エネルギー

連絡先 〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂 東京電機大学 TEL 049-296-5819

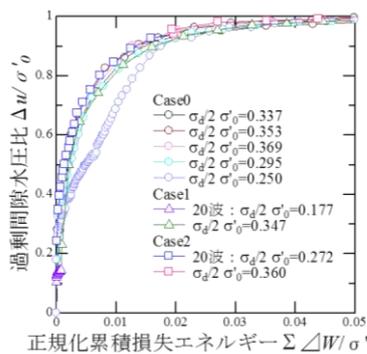


図4 過剰間隙水圧比と正規化累積損失エネルギーの関係

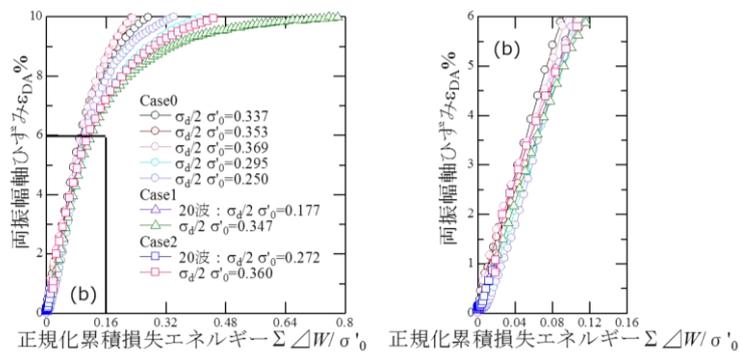


図5 両振幅軸ひずみと正規化累積損失エネルギーの関係

### 3. 2 正規化累積損失エネルギーによる载荷履歴の評価

図4は過剰間隙水圧比と正規化累積損失エネルギーの関係である。ここで累積損失エネルギー( $\Sigma\Delta W$ )は、応力ひずみ関係の履歴曲線の面積を累積して求めた<sup>2)</sup>。Case1の载荷履歴では、Case0の小さい繰返し応力比のように徐々に過剰間隙水圧が上昇し、Case2では履歴载荷時に過剰間隙水圧比が0.9近くまで上昇していることがわかる。これより、载荷履歴の違いで累積損失エネルギーによって過剰間隙水圧の増加の仕方が変化を確認することができた。図5は両振幅軸ひずみと正規化累積損失エネルギーの関係である。両振幅軸ひずみが5-10%の大きなひずみ域では、各Caseの累積損失エネルギーに対する軸ひずみの増加の仕方が変化している。Case0では繰返し応力比が小さいほど、同じ両振幅軸ひずみ時の正規化累積損失エネルギーは増している。またCase1は、Case0に比べ累積損失エネルギーは大きくなっている。なお両振幅軸ひずみ0-6%域を拡大した図を図5(b)に示すが、各Caseの累積損失エネルギーのバラつきは大ひずみ域に比べて少ない。図6に各過剰間隙水圧比と正規化累積損失エネルギーの関係を示す。Case1やCase2の载荷履歴の影響は、各過剰間隙水圧比の段階で大きな違いはないが、Case1はCase0に比べて累積損失エネルギーは幾分大きく、履歴载荷によって供試体骨格が強まったことが考えられる。図7に各両振幅軸ひずみと正規化累積損失エネルギーの関係を示す。図7に示している赤(Case1)と青(Case2)の矢印は、Case1, 2の20波目の正規化累積損失エネルギーから完全液状化(両振幅軸ひずみ5%)までに必要な同エネルギーである。黒(両振幅ひずみ5%)の矢印は载荷履歴を受けていない時の繰返し応力比0.350の同エネルギーである。Case0の完全液状化までの正規化累積損失エネルギーに対して、Case1, 2の同エネルギーを比べて表すとCase1では約1%、Case2では約22%の同エネルギーが载荷履歴により消費されている。Case1は1%程度の累積損失エネルギーの消費のため、载荷履歴の影響はほとんど受けていない。一方、Case2は载荷履歴により2割ほどのエネルギーを消費したため、完全液状化に至る際のエネルギー容量が減少し、Case0時の $\varepsilon_{DA}=4\%$ ほどのエネルギー容量で完全液状化に至ることがわかった。

### 4. まとめ

大小異なる载荷履歴を受けた密な砂の液状化強度は、载荷履歴の大きさによって液状化特性に変化が生じることがわかった。また累積損失エネルギーによりその違いを定量的に評価できることを確認した。

### 参考文献

- 1)細田ら:「平成28年熊本地震」による高速道路の土構造物における変状調査結果の報告, 第52回地盤工学学会研究発表, pp249-250, 2)國生剛治: エネルギーによる液状化判定法の適用性検討とFL法との対比, 地盤工学ジャーナル, 第8巻, 第3号, pp463-475, 2013

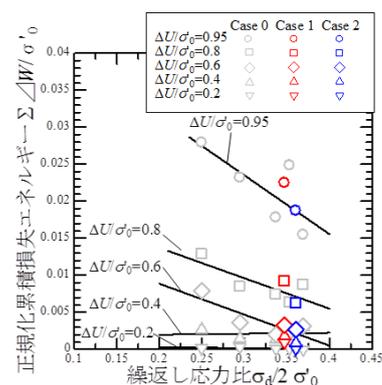


図6 各過剰間隙水圧比と

正規化累積損失エネルギーの関係

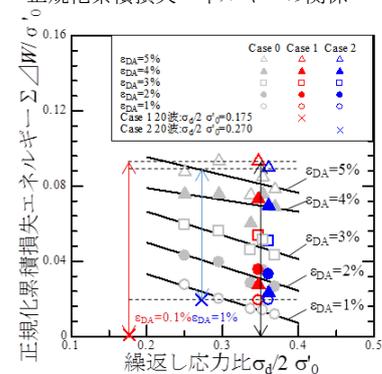


図7 各両振幅軸ひずみと

正規化累積損失エネルギーの関係