

# 種々な地震波形を用いた繰返しねじりせん断試験による液状化強度特性の影響評価

石川 敬祐<sup>1</sup>・安田 進<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 東京電機大学 理工学部建築・都市環境学系 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: ishikawa@g.dendai.ac.jp

<sup>2</sup>フェロー会員 東京電機大学 理工学部建築・都市環境学系 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

本研究では、強震観測網で観測された種々な地震波形を用いた繰返しねじりせん断試験を行ない、波形形状や継続時間が液状化強度やその特性に及ぼす影響を一般的に用いられる正弦波による試験結果と比較検討したものである。地震波形には、海溝型地震動として東日本大震災時の浦安と原町、内陸直下型地震動として2016年熊本地震の益城の前震と本震である。試験結果より、地震波荷重の不規則性に関する補正係数 $C_2$ は有効波数と相関があることがわかり、益城本震波と原町波では $C_2$ は2倍程度の違いがあることがわかった。エネルギー的観点から液状化強度特性を評価すると、正弦波では繰返し回数の違いによらずほぼ同様であるのに対して、地震波形の違いによる試験結果ではそのエネルギー量は10倍程度の違いがあることがわかった。

**Key Words:** Liquefaction, cyclic torsional shear test, seismic motion, cumulative dissipation energy

## 1. はじめに

近年、我が国で主だった液状化被害が生じた地震としては、2011年3月11日に宮城県沖を震源とする東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)や2016年4月14日・16日に熊本地方を震源とする2016年熊本地震が挙げられる。防災科学技術研究所の強震観測網で公開されている地震観測記録<sup>1)</sup>によると次のような特徴があることがわかる。前者は、マグニチュードが $M_w=9.0$ の巨大な海溝型地震であることから、震源から350kmほど離れた東京湾岸域の浦安市(K-NET浦安)での観測記録による主要動は、継続時間が100~150秒と非常に長く、さらに約29分後に茨城県沖を震源とする比較的に大きな余震が生じ、この最大加速度も本震の最大加速度の半分程度が作用していた。また、本震の震源に近い福島県南相馬市のK-NET原町は、主要動の継続時間が約150秒程度と非常に長いことに加えて、大きな加速度が短時間に3段階に亘って作用していた。一方、後者は、内陸直下型の地震であることから、甚大な被害が生じたKiK-net益城の前震や本震では、地表最大加速度が1Gを超えるような激震が作用していた。また、この地震では短期間に激震が複数回発生した

観測史上例が無いことが特徴であった。ただし、地震動の継続時間は数十秒と東日本大震災のような巨大海溝型地震と比べるとその作用時間は短い。

将来的に発生する可能性が考えられている南海トラフの巨大地震では、東日本大震災と同じような長時間継続する地震動が作用することが考えられ、東京湾岸エリアの埋立地と同様な液状化被害が東日本地域から西日本地域において発生する可能性が懸念される。今後の液状化予測や対策を検討していく中で、海溝型の長時間継続地震動や内陸直下型の激震が発生した際の液状化予測には、それぞれの地震動の影響を適切に考慮することが必要と考えられる。

そこで本研究では、強震観測網で観測された種々な地震波形を用いた繰返しねじりせん断試験を実施し、波形形状や継続時間が液状化強度やその特性に及ぼす影響を一般的な液状化試験で用いられる正弦波と比較し、従来の応力法に加えてエネルギー的観点からも評価をおこなった。

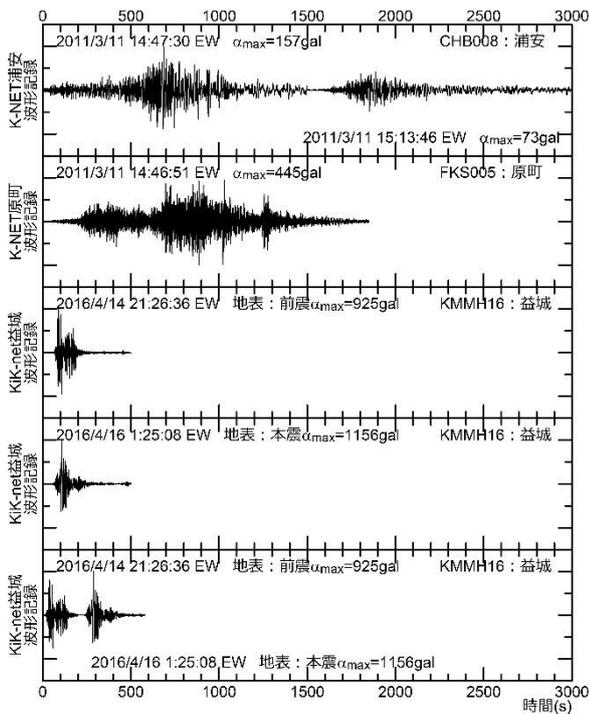


図1 試験に用いた各種地震波形<sup>1)</sup>

## 2. 試験方法

本試験は、繰返し中空ねじりせん断試験装置を用いて実施した。供試体の寸法は、外径100mm、内径60mm、高さ100mmの中空円筒形である。試料は、豊浦砂を用い、土粒子の密度 $\rho_s=2.650\text{g/cm}^3$ 、最大・最小間隙比はそれぞれ $e_{\max}=0.973$ 、 $e_{\min}=0.604$ である。各供試体の作製方法は、空中落下法を用いて供試体作成時の相対密度を70%とした。供試体作製後には、二酸化炭素と脱気水を用いて、間隙水圧係数B値にて飽和度を確認し、B値が0.95以上であることを確認した後、有効拘束圧( $\sigma_c'$ )を50kPa、背圧を200kPaの等方応力状態で圧密した。圧密終了後に非排水条件で応力制御にて載荷試験を実施した。供試体へ作用させるせん断応力の載荷方法は、一般的な正弦波荷重、東日本大震災時に観測されたK-NET浦安(本震と約29後の最大余震をつなぎ合わせた波形)とK-NET原町、2016年熊本地震時に観測されたKiK-net益城の地表観測記録(前震及び本震、前震と本震をつなぎ合わせた波形)の5種類の地震波荷重を用いている。なお、K-NET浦安の観測地点では液状化による噴水や噴砂は確認されていない。正弦波荷重は、載荷速度が0.1Hzの応力制御として一様な応力振幅荷重を与え、過剰間隙水圧比( $U/\sigma_c'$ )が0.95もしくは頭打ちになるまで載荷している。一方、地震波荷重は、図-1に示すように観測地震波形の時間軸を10倍に引き伸ばした波形形状である。また、地震波形の方向成分は、各地震記

録のうち最大加速度を観測した地震波形としている。地震波荷重は、波形形状を保ったまま波形振幅を段階的に変化させて数回試験を実施することで液状化強度比を求めることとした。なお、地震波荷重として観測地震動の形状をせん断応力に置き換えて作用させることに関しては、地震時に液状化対象層に加わる繰返しせん断力の波形が、地表面での加速度波形とほぼ同様の形状をしているものと考えている。

## 3. 試験結果

各地震波荷重による繰返しねじりせん断試験結果の内、液状化に至った試験結果の代表例を図-2～図-4に示す。図-2は東日本大震災・浦安波、図-3は東日本大震災・原町波、図-4は熊本地震・益城本震波の結果である。

図-2の東日本大震災・浦安波の試験結果では、最大せん断応力の6割程度のせん断応力が作用する600秒付近から過剰間隙水圧が上昇し始め、最大せん断応力が作用した後(730秒)に過剰間隙水圧比が0.95に達する。この時点での両振幅せん断ひずみの最大値は1.3%程度である。両振幅せん断ひずみが7.5%に達するのは1000秒付近であり、過剰間隙水圧が有効拘束圧に達し有効応力が失われた状態でせん断応力が作用した際にせん断ひずみが生じる結果となっている。また、1500秒以降の余震を再現した波形が作用すると入力したせん断応力は本震の半分程度の大きさなのにも関わらず、大きなせん断ひずみが生じる結果となっている。

次に、図-3の東日本大震災・原町波の試験結果では、浦安波よりさらに大きなせん断応力の振幅回数が増えた結果であるが、最大せん断応力の6割程度のせん断応力が作用する700秒付近から過剰間隙水圧が上昇し始め、最大せん断応力が作用する付近(900秒)において過剰間隙水圧比が0.95に達する。この時点での両振幅せん断ひずみの最大値は3.9%程度である。両振幅せん断ひずみが7.5%に達するのは910秒付近となり、過剰間隙水圧が有効応力に達する時点と両振幅せん断ひずみが7.5%に達する時点はほぼ同時刻となっている。また、1020秒付近に最大せん断応力と同程度のせん断応力が作用した際には両振幅せん断ひずみが10%を超えるようなせん断ひずみが生じる結果となっている。

図-4の熊本地震・益城本震波は、内陸直下型の地震波形であることから図-2や図-3の海溝型地震波と比べて地震動の継続時間は短く、作用する入力波

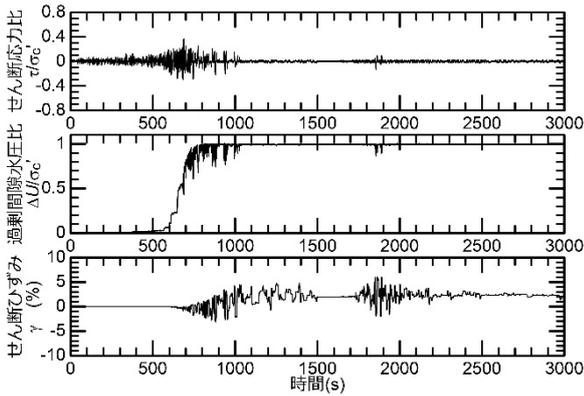


図2 東日本大震災・浦安波を用いた液状化試験結果

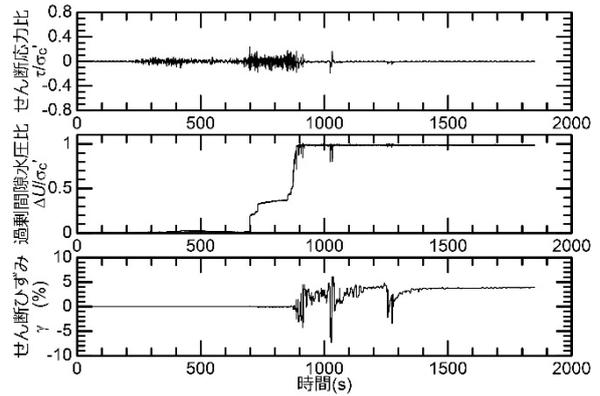


図3 東日本大震災・原町波を用いた液状化試験結果

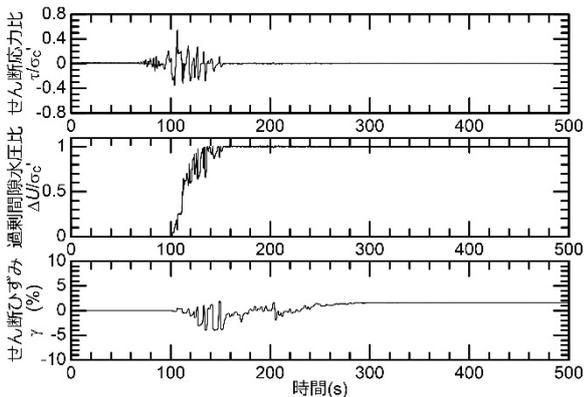
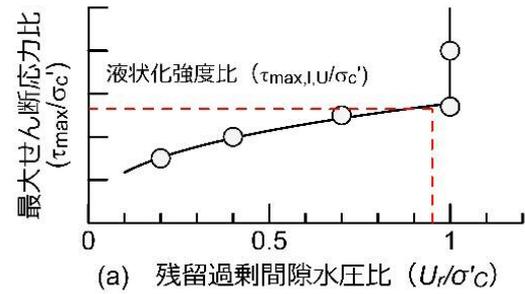


図4 熊本地震・益城波・本震を用いた液状化試験結果

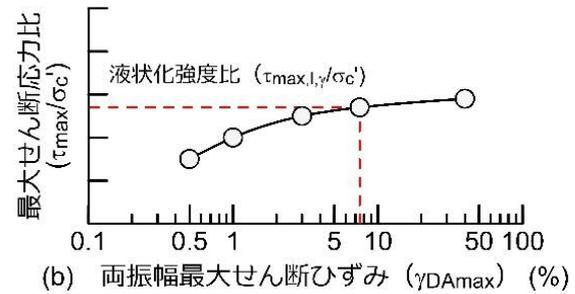
数が少ない。このことより、入力せん断応力振幅は海溝型のそれに比べて大きい値を設定している。過剰間隙水圧は、他の地震動と同様に最大せん断応力の6割程度のせん断応力が作用する100秒付近から上昇し始め、最大せん断応力が作用する110秒付近で急上昇し、その後数波の繰返しせん断を受けて120秒付近で過剰間隙水圧比が0.95に達する。この時点での両振幅せん断ひずみの最大値は3.7%程度である。これ以降に作用するせん断応力は、最大せん断応力の半分程度が1波生じる程度の波形であり、これ以上のせん断ひずみを増加させるような結果とはならないことが特徴である。

#### 4. 応力法による液状化強度の比較

ここでの液状化強度比は、石原・安田の考え方<sup>2)</sup>に準じて整理した。地震波荷重による繰返しねじりせん断試験結果の代表例は図-2～図-4に示すとおりであり、地震波荷重の载荷が終了した段階の過剰間隙水圧比に着目すると、上昇した状態となっており、この過剰間隙水圧比を残留過剰間隙水圧比( $U_r/\sigma_c'$ )とする。また、この時に加えたせん断応力振幅の経



(a) 残留過剰間隙水圧比 ( $U_r/\sigma_c'$ )



(b) 両振幅最大せん断ひずみ ( $\gamma_{DAmax}$ ) (%)

図5 液状化強度比の求め方

時変化中の最大せん断応力比 ( $\tau_{max}/\sigma_c'$ ) で代表することとし、この値を縦軸に、そして先に求めた残留過剰間隙水圧比の値を横軸にとり、図-5 (a) の模式図のとおり整理する。応力レベルを段階的に変化させた複数の試験結果から整理した最大せん断応力比と残留間隙水圧比の関係より、 $U_r/\sigma_c'=0.95$ となる点の最大せん断応力比を過剰間隙水圧比で評価した場合の液状化強度比 ( $\tau_{max,l,U}/\sigma_c'$ ) と定義した。また、せん断ひずみに関しては、経時変化中の両振幅最大せん断ひずみ ( $\gamma_{DAmax}$ ) を横軸にとり、縦軸は  $\tau_{max}/\sigma_c'$  とし、図-5 (b) の模式図のとおり整理する。この関係より、 $\gamma_{DAmax}$  が7.5%となる点の最大せん断応力比をせん断ひずみで評価した場合の液状化強度比 ( $\tau_{max,l,\gamma}/\sigma_c'$ ) と定義した。

正弦波荷重においては、繰返し回数が20回時の過剰間隙水圧比 ( $U/\sigma_c'$ ) と繰返しせん断応力比 ( $\tau_d/\sigma_c'$ ) をプロットし、地震波荷重と同様に  $U/\sigma_c'=0.95$  時の  $\tau_d/\sigma_c'$  を液状化強度比 ( $\tau_{d,l,U}/\sigma_c'$ ) と

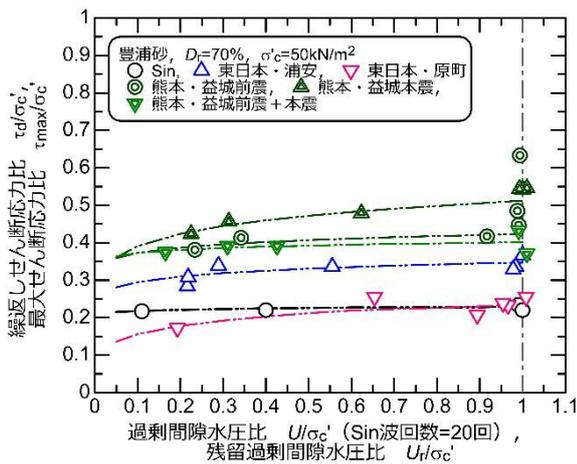


図6 液状化試験結果（過剰間隙水圧比で整理）

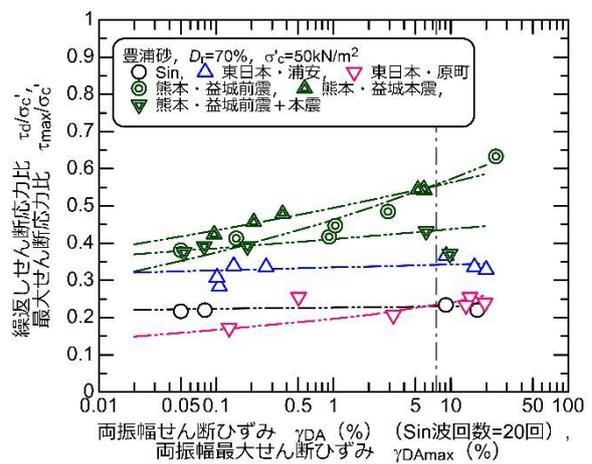


図7 液状化試験結果（両振幅せん断ひずみで整理）

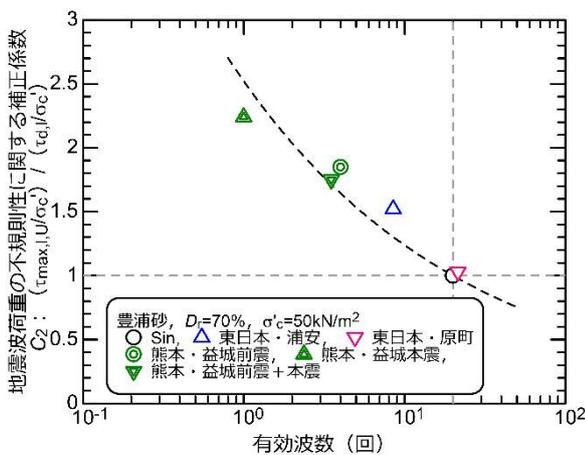


図8 有効波数と地震波荷重の不規則性に関する補正係数の関係（過剰間隙水圧比）

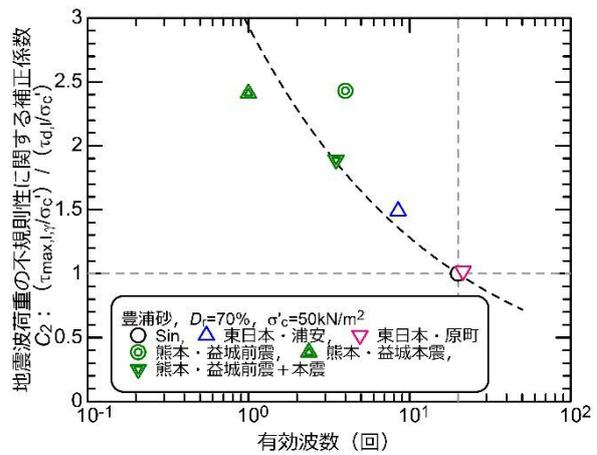


図9 有効波数と地震波荷重の不規則性に関する補正係数の関係（両振幅せん断ひずみ）

定義した。また、せん断ひずみによる評価も過剰間隙水圧比と同様に繰返し回数が20回時の両振幅せん断ひずみ ( $\gamma_{DA}$ ) と繰返しせん断応力比 ( $\tau_d/\sigma'_c$ ) の関係より、 $\gamma_{DA}=7.5\%$  となる時の  $\tau_d/\sigma'_c$  を液状化強度比 ( $\tau_{d,l}/\sigma'_c$ ) と定義した。

図-6は残留過剰間隙水圧または過剰間隙水圧で整理した液状化試験結果を示し、図-7は両振幅せん断ひずみまたは両振幅最大せん断ひずみで整理した液状化試験結果である。図-6より、(残留)過剰間隙水圧比が0.95となる時点のせん断応力比は地震波形の違いにより異なることがわかる。その値は、正弦波が最も小さい値となり、ほぼ同じ値に海溝型地震動の原町波、次いで浦安波となっている。直下型地震動では熊本地震・益城波は前震と本震をつなぎ合わせた波形が最も小さくなり、前震波形、本震波形となっている。図-7の両振幅(最大)せん断ひずみが7.5%となる時点のせん断応力比でも同様な傾向となっている。その値は、正弦波と海溝型地震動の原町波がほぼ同じ値を示し、次いで浦安波となって

いる。直下型地震動では熊本地震・益城波は前震と本震をつなぎ合わせた波形が最も小さくなり、前震波形、本震波形となっている。せん断ひずみによる整理結果では、正弦波の形状に対して直下型地震動である熊本地震・益城波は傾きをより持つ傾向がある。これは、地震動の継続時間(繰返し波数)が関係していると考えられ、過剰間隙水圧が有効応力付近まで上昇した以後にある程度のせん断応力が作用しないとせん断ひずみが生じないためである。このことより、過剰間隙水圧で評価した際の液状化強度比とせん断ひずみで評価した際の液状化強度比には、海溝型地震動の原町波や浦安波に比べて差異が生じることがわかる。

次に、各地震波形の形状と継続時間の影響を考慮するために有効波数の概念<sup>3)</sup>を元に各地震波形による液状化強度比と有効波数の関係を図-8と図-9に示す。図-8は液状化強度比を過剰間隙水圧比で定義した結果であり、図-9は液状化強度比をせん断ひずみで定義した結果である。また、縦軸の地震波荷重の不規則性に関する補正係数 ( $C_2$ ) は、地震波荷重に

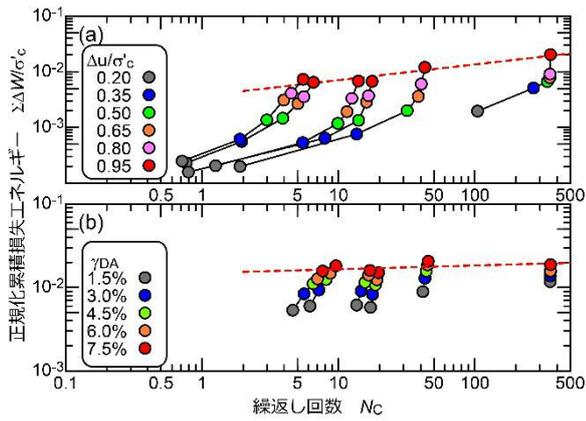


図 10 正弦波による液状化試験時の正規化累積損失エネルギー履歴

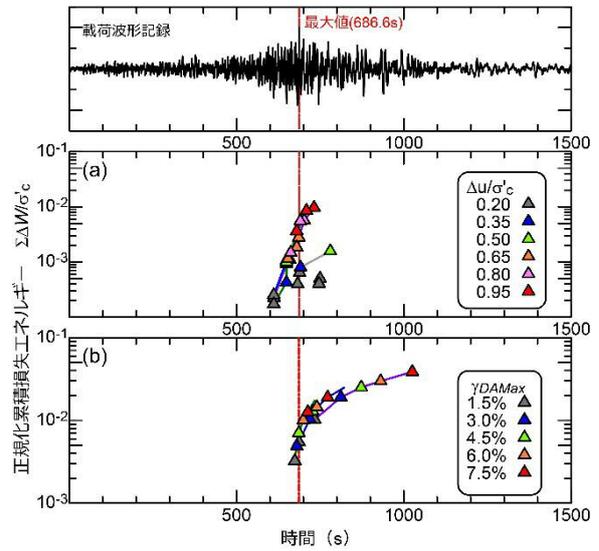


図 11 浦安波による液状化試験時の正規化累積損失エネルギー履歴

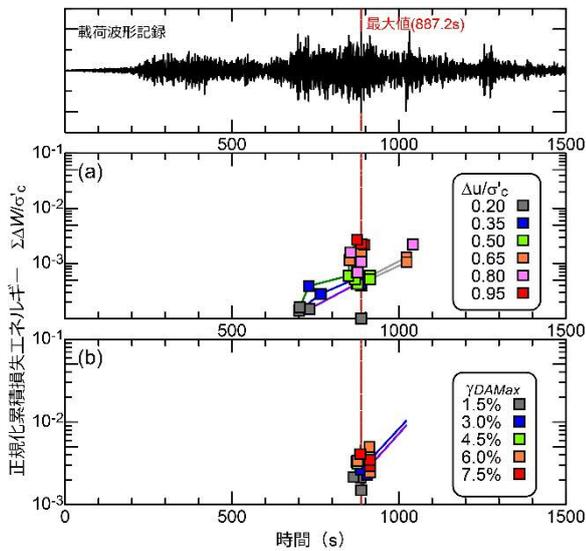


図 12 原町波による液状化試験時の正規化累積損失エネルギー履歴

対する液状化強度比と正弦波荷重に対する液状化強度比の比で表したものであり、岩崎ら<sup>4)</sup>の液状化判定時の  $C_1 \sim C_5$  の補正係数の  $C_2$  に該当する係数である。ここでの有効波数は、図-2～図-4 に示した地震波を用いた液状化試験の時刻歴図に示したように液状化を生じる際に有意な影響を及ぼすせん断応力成分とし、せん断応力の入力値の 6 割以上の半波の数の半分を有効波数として定義した。図-8 や図-9 より、有効波数が最も少ない益城本震波（有効波数 1 回）での  $C_2$  は 2.2～2.4 となり、有効波数が最も多い原町波（有効波数 21.5 回）での  $C_2$  は約 1.0 となっている。このように有効波数が増加するとともに  $C_2$  は低下することがわかり、両者の関係はある程度の相関があることがわかった。

## 5. エネルギー的観点からの液状化強度特性

これまで様々な研究によって、液状化過程中的の内部損失エネルギーに着目して液状化発生を評価できる可能性が示唆されてきている<sup>5), 6)</sup>。そこで、各種地震動波形を用いた液状化試験結果の応力-ひずみ関係から累積損失エネルギーを算定し、各地震波形の形状が液状化過程のエネルギー特性に及ぼす影響を分析した。図-10～15 は各波形を用いた液状化試験に対して過剰間隙水圧比や両振幅せん断ひずみがある値に達するまでの正規化累積損失エネルギーと繰返し回数（正弦波）または時間（地震波）を縦軸と横軸に示したものである。ここで、過剰間隙水圧比は 0.20, 0.35, 0.50, 0.65, 0.80, 0.95 となる時点抽出し、両振幅せん断ひずみは 1.5, 3.0, 4.5, 6.0, 7.5% となる時点抽出している。図-10 は、正弦波による実験結果であるが、繰返し回数が 20 回以下の場合には過剰間隙水圧比や両振幅せん断ひずみがある値になるための縦軸のエネルギー量はほぼ一定と判断できるが、繰返し回数が数百回と多くなると繰返し回数が少ない供試体に比べて同程度の状態となるためのエネルギー量は若干増加するようである。図-11 は浦安波、図-12 は原町波、図-13 は益城前震波、図-14 は益城本震波、図-15 は益城前・本震波の結果をそれぞれ示す。液状化に至った供試体の試験結果に着目すると、地震波の形状の違いはあるが過剰間隙水圧比やせん断ひずみがある値に達するために必要なエネルギー量はバラつきはあるが原町波を除き比較的同様な値となることがわかる。また、過剰間隙水圧比が 0.95 に達するエネルギー量と両振幅せん断ひずみが 7.5% に達するエネルギー量は異

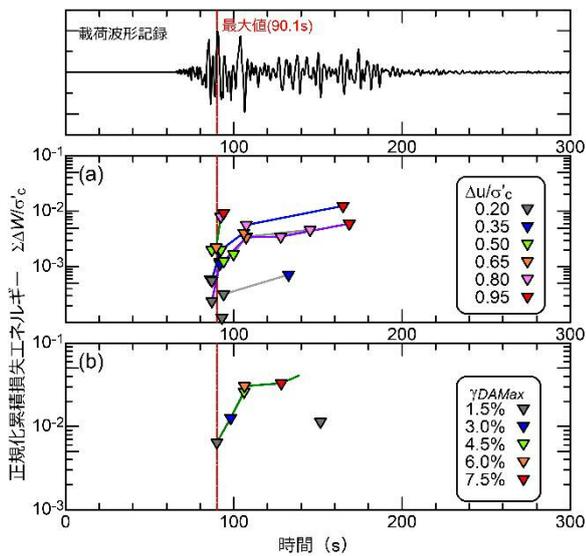


図 13 益城・前震波による液状化試験時の正規化累積損失エネルギー履歴

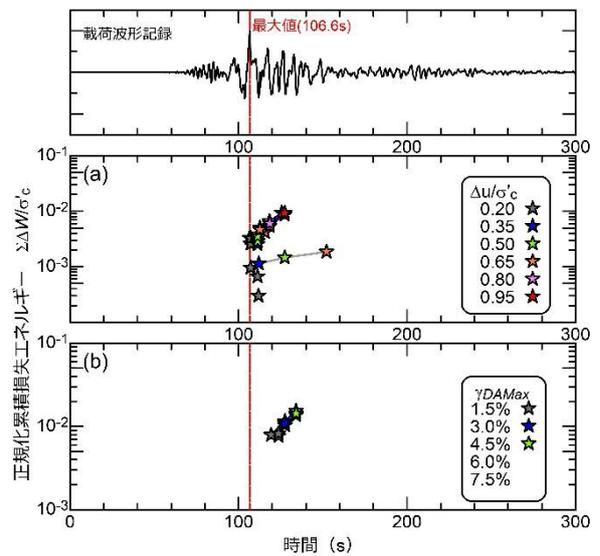


図 14 益城・本震波による液状化試験時の正規化累積損失エネルギー履歴

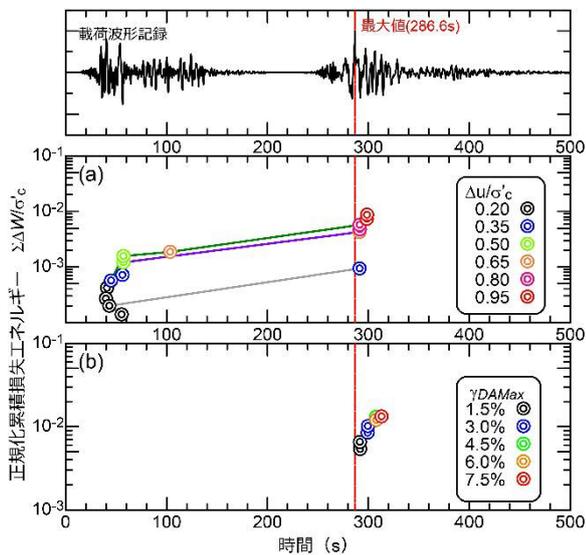


図 15 益城・複合波による液状化試験時の正規化累積損失エネルギー履歴

なることもわかった。

次に、各液状化試験で液状化に至った試験結果のみの時間とその際の正規化累積損失エネルギーを比較した関係を図-16 (過剰間隙水圧比が 0.95) と図-17 (両振幅せん断ひずみが 7.5%) に示す。図-16 より、各地震波形による液状化に至るまでのエネルギー量は、最大せん断応力が作用した以後に間隙水圧比が 0.95 に達する試験結果はほぼ一様となり、正弦波の繰返し回数が 20 回時のエネルギー量の近くに分布していることがわかった。一方、浦安波の一部や原町波の液状化に至るまでのエネルギー量が少ない試験結果では、最大せん断応力が作用する付近かそれ以前で過剰間隙水圧比が 0.95 に達した結果であった。図-17 より、正弦波の液状化に至るまで

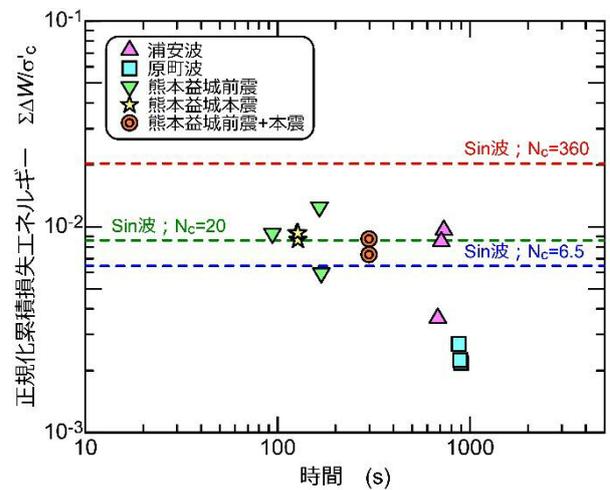


図 16 各波形で液状化に至った時刻とその際の正規化累積損失エネルギーの関係 (過剰間隙水圧比)

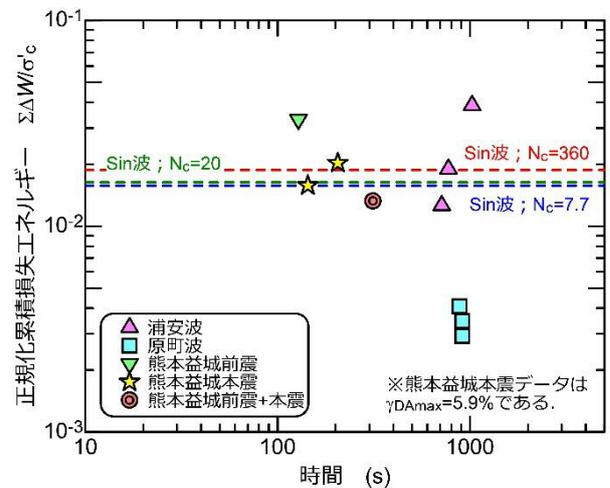


図 17 各波形で液状化に至った時刻とその際の正規化累積損失エネルギーの関係 (両振幅せん断ひずみ)

のエネルギー量は繰返し回数の違いによらずほぼ一

様であるのに対して、益城前震や本震のような繰返し回数が少ないものから浦安波や原町波のような繰返し回数が多い地震波形の違いによる試験結果を比較すると液状化に至るまでのエネルギー量は約10倍程度異なることがわかる。なお、益城本震波を用いた液状化試験結果では両振幅せん断ひずみが5%程度までしか得られていないことをお断りしておく。

## 6. まとめ

本研究は、強震観測網で観測された種々な地震波形を用いて繰返しねじりせん断試験を実施し、波形形状や継続時間が液状化特性に及ぼす影響を従来の応力法に加えてエネルギー的観点からも評価を行ったところ、以下のことが明らかとなった。

- 1) 観測地震波形を用いた液状化試験では、波形終了時に丁度液状化するような振幅で実験した場合に最大せん断応力比の0.6倍程度のせん断応力が作用すると過剰間隙水圧が発生し始めることがわかった。また、せん断ひずみは有効拘束圧を失った後にある程度のせん断応力が作用しないと発生しないことがわかり、継続時間の長い浦安波や原町波の方が大きなせん断ひずみが生じ易いことがわかった。
- 2) 地震波荷重の不規則性に関する補正係数  $C_2$  は有効波数と相関があることがわかり、益城本震波と原町波では  $C_2$  は2倍程度の違いがあることがわかった。
- 3) 地震波形を用いた液状化試験に対してエネルギー的観点から液状化強度特性を評価すると、正弦波の液状化に至るまでのエネルギー量は繰

返し回数の違いによらずほぼ同様であるのに対して、地震波形の違いによる試験結果を比較すると液状化に至るまでのエネルギー量は10倍程度の違いがあることがわかった。

**謝辞：**防災科学技術研究所の K-NET 及び KiK-net にて観測された地震動波形を使用させていただいた。繰返しねじりせん断試験は、東京電機大学学生の垂水秀樹氏、佐藤剛氏に協力いただいた。末筆ながら関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 防災科学技術研究所：強震観測網，<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/quake/>，20170826 閲覧
- 2) 石原研而，安田進：液状化に及ぼす地震波の不規則性と初期拘束圧の影響，土と基礎，Vol. 23，No. 6，pp. 29-35，1975.
- 3) 佐々真志，山崎浩之，後藤佑介：地震動波形と継続時間の双方を考慮した新たな液状化予測判定法とその検証，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol. 69，No. 2，I\_143-I\_148，2013.
- 4) 岩崎敏男，龍岡文夫，常田賢一，安田進：砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例，第5回日本地震工学シンポジウム講演集，pp. 641-648，1978.
- 5) 風間基樹，鈴木崇弘，柳澤栄司：地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用，土木学会論文集，No. 631，III - 48，pp. 161-177，1999.
- 6) 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，Vol. 8，No. 3，pp. 463-475，2013.

(2017. 8. 30 受付)

# EVALUATION OF LIQUEFACTION STRENGTH PROPERTY BASED ON CYCLIC TORSIONAL SHEAR TEST USING VARIOUS SEISMIC WAVEFORMS

Keisuke Ishikawa and Susumu Yasuda

In this study, a cyclic torsional shear test using various seismic waveforms observed by the strong-motion seismograph networks, K-NET and KiK-net, was performed. Furthermore, the effect of the waveform and its duration on the liquefaction strength and its characteristics were explored. The test results were analyzed and compared with those obtained using a general sine wave. The used seismic waveforms were typical waveforms of the 2016 Kumamoto earthquake (inland earthquake), and the 2011 Great East Japan Earthquake (subduction earthquake). The weighting factor concerning the irregular nature of seismic wave  $C_2$  exhibited a correlation with the significant wave number. Moreover, it proved that the respective  $C_2$  values of Mashiki main shockwave and the Haramachi wave differed by a factor of 2. The evaluation of the liquefaction strength property with respect to the cumulative dissipation energy showed that the sine wave becomes nearly identical against the difference in the cyclic number. Meanwhile, the test results concerning the seismic waveforms showed that the cumulative dissipation energy among them differed by a factor of 10.