

正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧の関係に及ぼす入力波形の影響

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○山本 昌徳 井澤 淳 神澤 拓 小島 謙一

1. はじめに

近年、エネルギーに基づく液状化判定法の優位性が示されており、早期の設計実務への導入も期待されている。この場合、液状化発生の有無だけでなく、高架橋や土構造物の設計に必要な地盤強度・剛性の低下や発生する過剰間隙水圧の算定も必要となる。土の非排水繰返し载荷試験における過剰間隙水圧比や地盤剛性と正規化累積損失エネルギーとの関係には一意性があるとの報告も有り¹⁾、入力エネルギーからそれらを推定する手法の構築が期待される。本稿では、正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧の関係に与える入力ひずみ振幅や規則波・不規則波の影響について考察を行った。

2. 一定ひずみ繰返しせん断試験

累積損失エネルギーの入力ひずみ振幅依存性を検討するため、「一定ひずみ振幅の繰返し载荷試験（以降、定ひずみ試験）」を実施する。なお、この試験は中空ねじりせん断試験機により実施した²⁾。

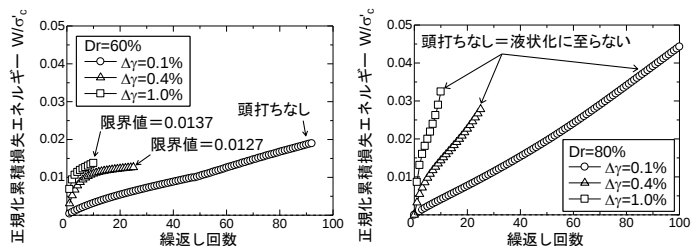
図1に $D_r=60\%$ と 80% の豊浦砂に対して $\Delta\gamma=0.1\%$ 、 0.4% 、 1.0% のひずみ振幅で実施した定ひずみ試験から得られた繰返し回数と正規化累積損失エネルギー (W/σ'_c) の関係を示す。 $D_r=60\%$ と 80% の両ケースでひずみ振幅 $\Delta\gamma=0.1\%$ 、 0.4% 、 1.0% に応じて異なる W/σ'_c の最大値が得られた。

図2に繰返し時による剛性低下率 (G/G_0) と正規化累積損失エネルギーの関係を示す。 $D_r=80\%$ のケースで $\Delta\gamma=0.4\%$ 、 1.0% の試験結果は一意性が認められるが、 $D_r=60\%$ のケースでは異なる傾向を示しており、 W/σ'_c と G/G_0 の関係は入力ひずみ振幅依存性がある可能性がある。

図3に W/σ'_c と過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma'_c$) の関係を示す。 $D_r=60\%$ と 80% の両ケースで $\Delta\gamma=0.4\%$ 、 1.0% の試験結果は一意性が認められる。一方、 $\Delta\gamma=0.1\%$ の試験結果は载荷途中で水圧が低下する傾向を示しており、試験結果の一意性にはある程度以上のひずみレベルが必要であることが分かる。

3. ハイブリッド試験

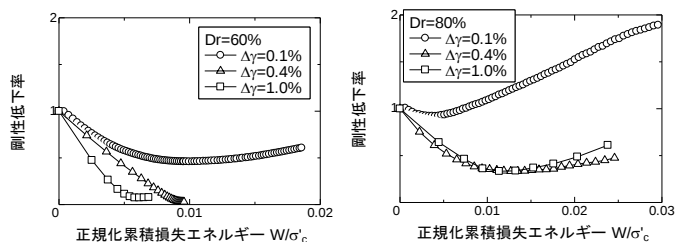
2章で、 W/σ'_c と $\Delta u/\sigma'_c$ の関係にはひずみ振幅依存性がある可能性を指摘した。設計に用いる入力波は様々なひずみ振幅の波を含んだ不規則波であるため、 W/σ'_c と $\Delta u/\sigma'_c$ の関係に与える不規則波の影響を検討する。本稿では、鉄道総研で開発したハイブリッド試験装置を用い、図4に示す地盤に対して検討した^{3,4)}。入力地震動は鉄道標準⁵⁾のスペクトルI、II地震動 (G1地盤) を入力した。試験対象層は深さ4~6mに位置する豊浦砂層



(a) 豊浦砂 $D_r=60\%$

(b) 豊浦砂 $D_r=80\%$

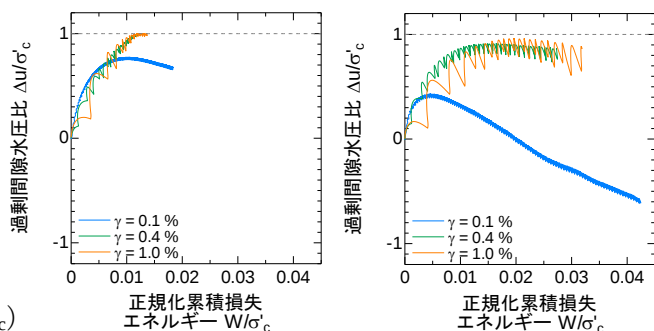
図1 繰返し回数と正規化累積損失エネルギーの関係



(a) 豊浦砂 $D_r=60\%$

(b) 豊浦砂 $D_r=80\%$

図2 剛性低下率と正規化累積損失エネルギー



(a) 豊浦砂 $D_r=60\%$ 層

(b) 豊浦砂 $D_r=80\%$ 層

図3 正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係

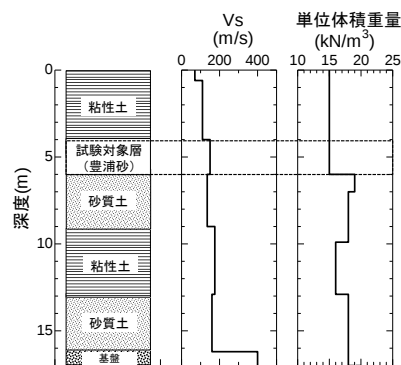


図4 検証対象地盤

キーワード 正規化累積損失エネルギー、過剰間隙水圧

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38 (公財) 鉄道総合技術研究所 TEL: 042-573-7394

($Dr=60, 80\%$) である。

図 5、6 に加速度、せん断ひずみ、過剰間隙水圧比の時刻歴をそれぞれ示す。どちらの入力波においても、 $Dr=60\%$ のケースでは $\Delta u/\sigma'_c=1.0$ に達しているのに対し、 $Dr=80\%$ のケースでは 0.9 程度に収まっている。

図 7 に定ひずみ試験 ($\Delta\gamma=0.4, 1.0\%$) とハイブリッド試験の結果から得られた W/σ'_c と $\Delta u/\sigma'_c$ の関係を示す。同じ入力エネルギーに対して発生した $\Delta u/\sigma'_c$ は、定ひずみ試験結果の方が大きな値となった。特にスペクトル I で顕著であり、これは $\Delta u/\sigma'_c$ の増加に寄与しないと考えられる小さなひずみレベルの地震動が含まれるためである。

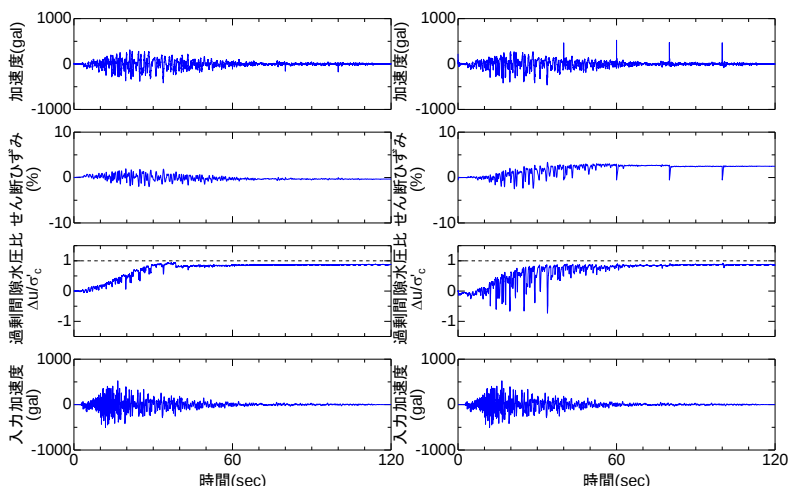
ここで、各試験結果の $\Delta u/\sigma'_c=0.6$ のときの累積損失エネルギー（以降、 $W_{0.6}$ ）で累積損失エネルギー W を正規化し、 $\Delta u/\sigma'_c$ との関係を図 8 に示した。ひずみ振幅の大きさ、規則波・不規則波の違いによらず、 W/σ'_c と $\Delta u/\sigma'_c$ の最大値との関係に一意性が認められる。 $W_{0.6}$ を基準とすることで、小さなひずみレベルの影響を抑え、一意な W/σ'_c と $\Delta u/\sigma'_c$ の関係を得られる可能性があることが分かった。

4. まとめ

本稿では、累積損失エネルギーと過剰間隙水圧の関係に与える入力ひずみ振幅の影響について考察を行った。その結果、ある程度以下のひずみ振幅の繰返しは過剰間隙水圧の増加に寄与しないこと、適切な値で累積損失エネルギーを正規化することで、過剰間隙水圧比との関係に与える入力ひずみ振幅や規則波・不規則波の影響を抑制できることが分かった。今後、正規化手法について更に検討し、種々の地盤、地震動に対する適用性を広げていきたい。

参考文献

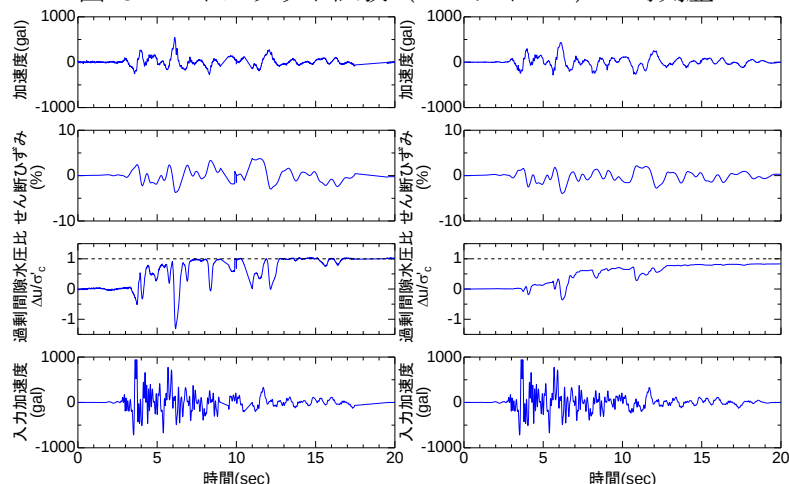
1) 国生剛治: エネルギーによる液状化判定法の適用性検討と FL 法との対比, 地盤工学会ジャーナル, Vol. 8, No. 3, 2013. 2) 井澤ら: 非線形動的解析のための地盤の変形特性試験に関する一考察 その 1, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2015. 3) 井澤ら: ハイブリッド地盤応答試験によるエネルギー法を用いた液状化判定法の精度検証, 第 53 回地盤工学会研究発表会, 2018. 4) 山本ら: 海溝型地震時のエネルギー法を用いた液状化判定の適用性に関する検討, 第 54 回地盤工学研究発表会, 2019 (投稿中). 5) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012.



(a) 豊浦砂 $Dr=60\%$ 層

(b) 豊浦砂 $Dr=80\%$ 層

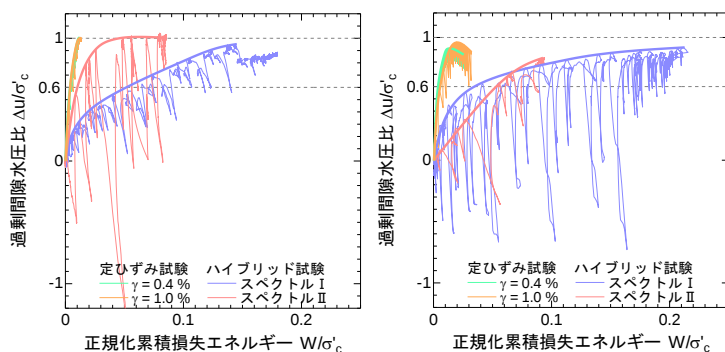
図 5 ハイブリッド試験 (スペクトル I) の時刻歴



(a) 豊浦砂 $Dr=60\%$ 層

(b) 豊浦砂 $Dr=80\%$ 層

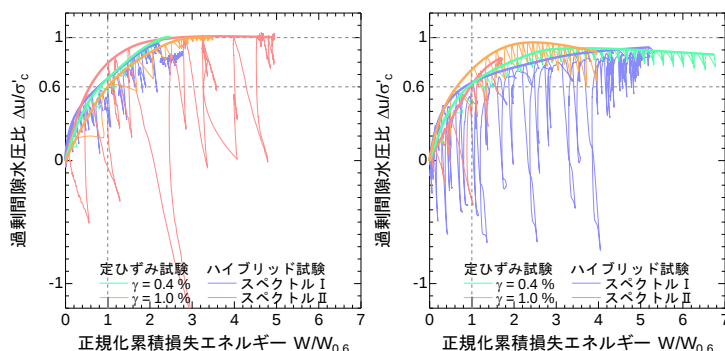
図 6 ハイブリッド試験 (スペクトル II) の時刻歴



(a) 豊浦砂 $Dr=60\%$ 層

(b) 豊浦砂 $Dr=80\%$ 層

図 7 正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係



(a) 豊浦砂 $Dr=60\%$ 層

(b) 豊浦砂 $Dr=80\%$ 層

図 8 正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係