

不規則波を用いた中空ねじり液状化試験による砂の内部損失エネルギーの検討

中央大学理工学部 正会員 國生 剛治
中央大学大学院 金子 陽輔
中央大学理工学部 学生会員 ○岡田 侑子

1. 目的

従来の液状化判定法は力の釣り合いに基づいた応力法(FL法)が標準方法として使われてきた。一方で、2011年東北地方太平洋沖地震のように継続時間の長い海溝型地震や1995年兵庫県南部地震のように地殻内で起きる短く激しい揺れの直下地震に対しても統一的に液状化判定を行えるエネルギー法が提案されている¹⁾が、実務の場で使われるまでには至っていない。本研究では、中空ねじりせん断試験機を用いて砂の非排水繰返しせん断試験を不規則波で行い、過去に行った正弦波での試験結果と比較することで、エネルギー法の有用性について検討した。

2. 試験条件

試料は平均粒径 $D_{50}=0.19\text{mm}$ 、細粒分含有率 $F_c=0\%$ の千葉県富津砂を用いた。試験装置は供試体内径 60mm、外径 100mm、高さ 100mm の空圧制御式中空ねじりせん断試験機である。供試体はウェットタンピング法により所定の相対密度となるように作成し、B値が 0.95 以上であることを確認した後、有効拘束圧 $\sigma_{vc}'=98\text{kPa}$ 、背圧 196kPa で等方圧密する。圧密終了後、非排水条件にし、応力制御にて最大せん断応力 τ_{max} の不規則波を加えることで液状化試験を行う。今回は、砂を $D_r \approx 30\%$ 、50%に調整し実験を行った。

実験で使用した不規則波のせん断応力時刻歴を図-1に示す。(a)は2011年東北地方太平洋沖地震のK-NET浦安EW、(b)は2003年十勝沖地震のK-NET北見EW、(c)、(d)、(e)は1995年兵庫県南部地震の関西電力高砂発電所EW、神戸ポートアイランド地表NS、神戸ポートアイランドGL-32.4m NS、(f)は2007年新潟県中越沖地震のK-NET柏崎EWの加速度時刻歴から再現した地震波の例を示している。荷重の制御を正確に行うために、実際の地震波よりも載荷波形の時間軸を約10倍長くして行った。載荷波形の詳細な再現性は必ずしも良好ではないが、大きな変化は類似していた。

3. 試験結果とエネルギー的分析

試験結果から、繰返し載荷1サイクル中に供試体で失われる損失エネルギーは、図-2の斜線部分の履歴面積で表われ、それらを1サイクル目から各サイクルまで累積することにより任意のサイクルまでの累積損失エネルギー ΔW を計算することができる。同様に図中に三角形で示す1サイクル当りのひずみエネルギーを各サイクルまで累積することにより任意のサイクルまでの累積ひずみエネルギー W を計算できる。

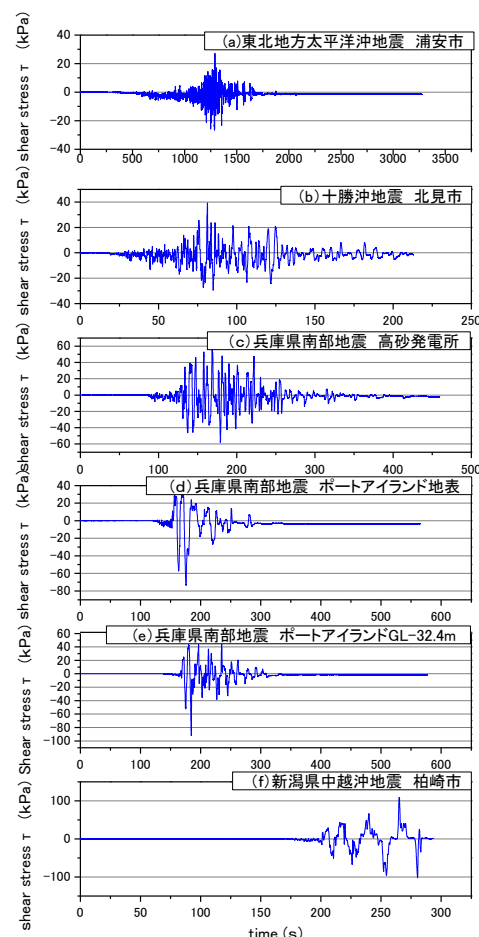


図-1 せん断応力の時刻歴

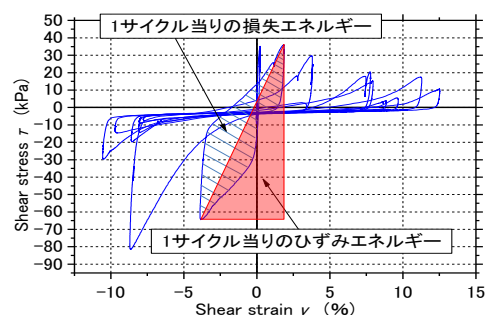


図-2 損失エネルギー、ひずみエネルギー

キーワード 液状化、不規則波、中空ねじり試験 損失エネルギー

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部都市環境学科地盤工学研究室 Tel 03-3817-1799

図-3は得られた累積損失エネルギー ΔW を有効拘束圧 σ_c' で除して無次元化した基準化損失エネルギー $\Delta W/\sigma_c'$ を横軸にとり、縦軸には対応する水圧上昇率 $\Delta u/\sigma_c'$ をとった不規則波による実験結果を示している。波形ごとに多少のバラツキはみられるものの、 $\Delta W/\sigma_c'=0.02\sim 0.04$ でほぼ $\Delta u/\sigma_c'=1.0$ に上昇する非常に良い相関関係がある。すなわち、損失エネルギーは液状化発生までの非常に良い指標であることが分かる。

図-4は両振幅せん断ひずみが $\gamma_{DA}=3, 7.5, 15\%$ に達するまでの $\Delta W/\sigma_c'$ と繰返し回数 N_c または時刻 t を縦軸と横軸にとって、両対数グラフ上にプロットしている。図中の(a)が正弦波における実験結果であり、 N_c に関わらず縦軸のエネルギー値は一定であると判断できる。つまり、 D_r 及び F_c が同じ条件であれば、あるひずみ値に至るまでの損失エネルギーは、継続時間や繰返し回数によらずほぼ一定であり、液状化発生に伴うひずみ増加が損失エネルギーにより一意的に評価できるといえる。一方で、図中の(b)については不規則波における実験結果であり、あるひずみに達するまでのエネルギー値のバラツキが大きいものも存在する。全体的に見れば地震波の違いによらず、同じひずみ増加がほぼ同じ損失エネルギーに対応していることが読み取れる。

次に、このように算出した損失エネルギーを液状化判定で地震波エネルギーと比較するためには、砂の内部損失エネルギーに対してどれだけの外部エネルギーが必要かを知必要がある。そこで、中空ねじり試験の結果から累積損失エネルギー ΔW と外部から与えた累積ひずみエネルギー W との関連を検討した。

図-5は W/σ_c' を縦軸、 $\Delta W/\sigma_c'$ を横軸にとった不規則波の試験結果を載せている。また、図中に示す実線カーブは過去に行った三軸試験より得られた D_r や F_c を変えた実験結果から算出した近似線²⁾であり、正弦波では一意的な関係(図中の式)が得られている。不規則波についても正弦波のカーブにきわめて近いが、詳細に見ると、波形ごとに若干違う経路をたどっているようである。不規則波については波形ごとに少し異なる傾向も見られるものの、今後マグニチュードや継続時間などが及ぼす影響の大きさについて検討が必要である。しかし大局的には、正弦波、不規則波によらず、内部損失エネルギーとそれに対して外部から与えられるエネルギーの間にほぼ一意的関係が成り立つと言えよう。

4. まとめ

$D_r=30\%$ 、50%クリーン砂の不規則波による試験から得られた $\Delta W\sim\Delta u$ 、 $\Delta W\sim\gamma_{DA}$ 関係と $\Delta W\sim W$ 関係は、波形の大きな違いに関わらず、ほぼ一意的であることが明らかになった。したがって、正弦波の試験から得られた結果を使って累積ひずみエネルギーを外部からの地震波エネルギーとみなして、この $\Delta W\sim W$ 関係を用いることにより、エネルギーによる簡易な液状化判定が行えることが示された。

参考文献：1) 國生剛治(2012):「内部損失エネルギーと地震波動エネルギーによる液状化判定法の可能性」第47回地盤工学研究発表会

2) 國生剛治(2012):「エネルギー的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, 463-47

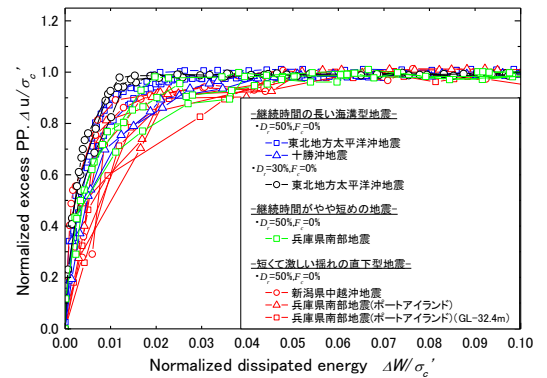


図-3 損失エネルギーに対する水圧上昇率の関係

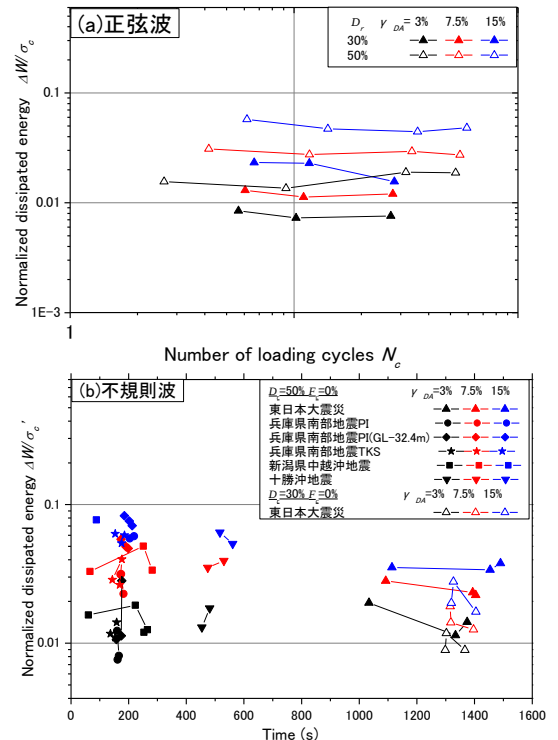


図-4 $\gamma_{DA}=3, 7.5, 15\%$ に達するための繰返し回数または時間と損失エネルギーの関係

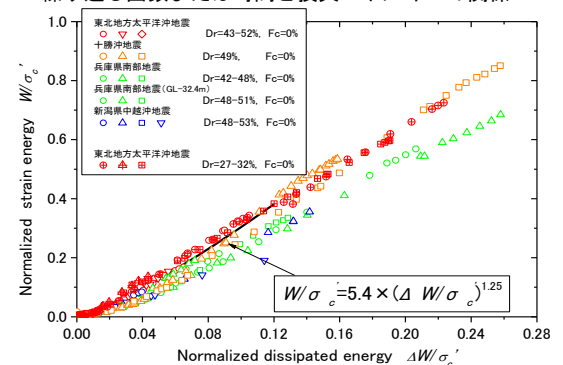


図-5 損失エネルギーに対するひずみエネルギーの関係