山砂の繰返し三軸試験によるエネルギー法を用いた液状化抵抗の評価

京都大学大学院　学生会員　○上本　貴央，平川　翔也
京都大学大学院　正会員　ピパットポンサー・ティラポン，宮崎　祐輔

1. はじめに

現在存在する液状化の予測法には簡易判定法，詳細判定法，模型振動台実験や原位置液状化試験を用いる方法などが存在する．応力やひずみの値を用いるエネルギー法には計算負荷がそこまで大きくないことに加え地震動の繰り返し回数や波形の違いに関わらない評価が可能であるという長所が存在する[1)]が，適用例が少なく実用にまで至っていない．そこで，本研究では東北太平洋沖地震以降着目されている盛土の液状化[2)]抵抗を評価することを目的に，繰返し三軸試験によるエネルギー法の利用を検討している．その初期段階として，模型地盤に用いる山砂（広島県呉市産）に対して繰返し三軸試験を実施した．得られた応力・ひずみの値を用いてエネルギー法により分析し，液状化判定とその妥当性について検討した．

2. 実験概要

本実験の供試体材料には，広島県呉市産の山砂を使用した．以下では，広島砂と呼ぶ．広島砂の物性値を**表 1** に示す．実験ケースとして，Dr = 45%, 55%, 65%の 3 種類に対して繰返し応力比（Cyclic Stress Ratio，以下 CSR とする）を 3 種類ずつ変えた計 9 ケースの実験を行った．実験ケースを**表 2** に示す．ケース名は，A-1, A-2…，と呼称する．p が平均応力，p'が有効平均応力とする．

3. 分析方法

図 1 に，A-2 で得られた応力ひずみ関係を示す．また，**図 2** に 1 サイクルの取り方，**図 3** に損失エネルギーを算出する際に用いた面積（図中，斜線部）の定義例を示す．本実験の分析法においては，応力・ひずみ関係のグラフからサイクル分析をし，各サイクルに累積基準化損失エネルギーの計算を行う．そして，後述する各指標値に到るまでのサイクル数を分析する．以上から，各指標値に到るまでに発生したエネルギーの大きさを計算する．本研究では任意のサイクルまでの累積した損失エネルギー$\sum \Delta W$を初期有効応力p_i'で基準化して扱う．

4. 実験結果

繰返し三軸試験の結果を代表して，**図 4** に，A-2 における u/p, $\Delta u/p'$, ε_{DA} の挙動を示す．図より，$u/p = 0.95$, $\varepsilon_{DA} = 2.5\%$に到達する時点では，平均有効応力が十分低

表 1　広島砂の物性値

土粒子密度 ρ_s [g/cm^3]	2.628
細粒分含有率 FC [%]	9.2
最大間隙比 e_{max} [-]	1.003
最小間隙比 e_{min} [-]	0.441
最大乾燥密度 ρ_{dmax} [g/cm^3]	1.72
最適含水比 w [%]	13.9
透水係数 k [m/s]	2.4×10^{-5}

表 2　実験条件およびケース名

実験条件		繰り返し応力比（CSR）		
相対密度（D_r）	ケース	A	B	C
45%	1	0.13	0.15	0.18
55%	2	0.15	0.18	0.20
65%	3	0.15	0.18	0.20

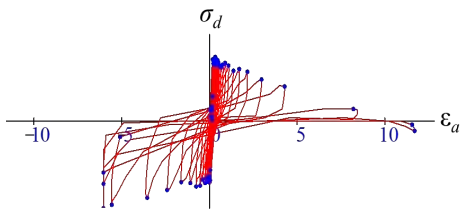

図 1 応力ひずみ関係（A-2）

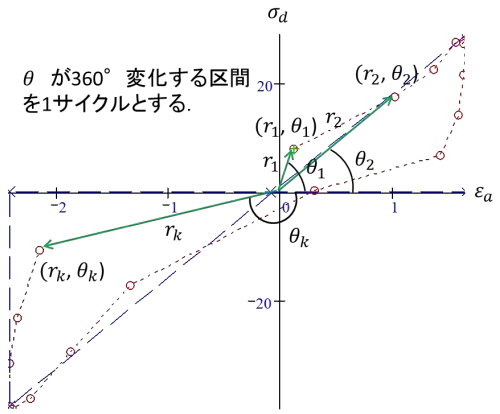

図 2 単一サイクルの取り方

キーワード：液状化，三軸繰返し載荷試験
連絡先：〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2-334　ＴＥＬ 075-383-3231

© Japan Society of Civil Engineers

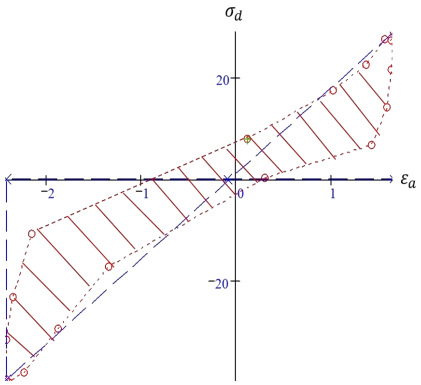

図 3 損失エネルギー ΔW 算出に用いた面積の定義例

下しておらず，液状化発生と評価するには早い時点であることが伺える．よって，本実験ではこれら以外の指標も導入することで，液状化抵抗を評価することとした．**図 4** の結果を踏まえて，平均有効応力が十分低下したとみなせる範囲まで指標を改善した．以上から，液状化発生の指標として，ε_{DA} = 5%, 10%，$\Delta u/p'$ = 0.95, 1.0, u/p = 1.0 に，それぞれ到達するまでに発生したエネルギーの大きさを用いた．**表 3** に，これらの指標を用いて計算された，各ケースにおいて液状化が発生したと考えられるエネルギー範囲（以下，液状化範囲と呼称する）を整理した．表より，繰返し三軸試験によって推測される液状化範囲は 0.0220 ~ 0.0516 であるとわかった．さらに，**図 5** に過剰間隙水圧比 $\Delta u/p'$ と基準化累積損失エネルギーの関係を示した．この図より，液状化が起こるまでのエネルギーの大きさは Dr や CSR によって大きくは変わらないことを推測することができる．

5. まとめ

広島県呉市産の山砂に対して，繰返し三軸試験を行うことで液状化が発生する範囲とエネルギーの関係を整理できた．また，本実験の成果として，u/p や $\Delta u/p'$ の変化が D_r や CSR が異なるケースにおいても大きくは変わらなかったことから D_r や CSR に依存しない比較を行える可能性が存在することが確認できた．今後は，盛土の液状化実験を実施することで，模型実験において確認される液状化挙動と本繰返し三軸試験の結果を比較する．

参考文献

1) 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.465-468, 2013.

2) 国土交通省，東北地方整備局：北上川等堤防復旧技術検討会報告書　資料編，pp.50-54, 2011.

表 4　各ケースにおける液状化範囲

ケース名	Min	Med	Max
A-1	0.0193	0.0566	0.0897
B-1	0.0118	0.0346	0.0483
C-1	0.0201	0.0296	0.0301
A-2	0.0276	0.0420	0.0474
B-2	0.0127	0.0271	0.0674
C-2	0.0166	0.0313	0.0437
A-3	0.0296	0.0399	0.0427
B-3	0.0293	0.0374	0.0385
C-3	0.0308	0.0561	0.0569
平均値	0.0220	0.0394	0.0516
標準偏差	0.0075	0.0107	0.0178

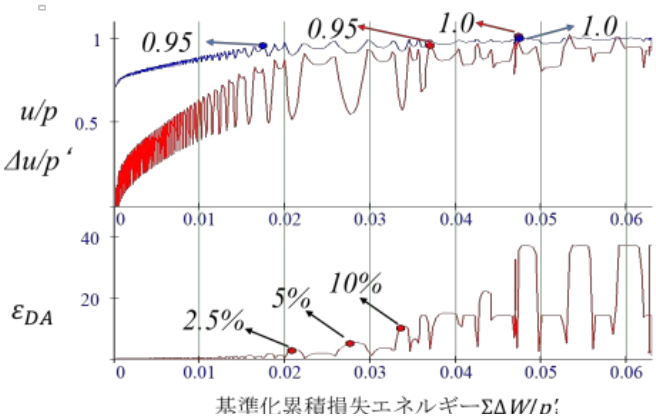

図 4　ケース A2 における諸値のエネルギーによる変化

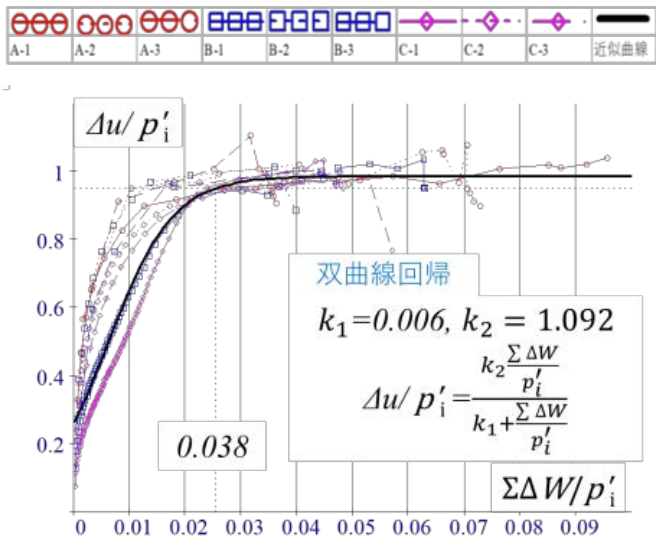

図 5　$\Delta u/p'$-基準化累積損失エネルギー間関係と凡例

© Japan Society of Civil Engineers