

繰返し応力履歴の異なる飽和砂の累積損失エネルギーとポスト液状化評価

八戸工業高等専門学校 正会員 ○清原 雄康

1. はじめに

液状化の性能評価において、基準化累積損失エネルギーによる評価手法が検討されている。応力履歴の与え方によって所定のひずみや過剰水圧比の上昇過程が異なることが知られている。また、発生ひずみでのヤング率や履歴減衰率を評価する場合、設定軸差応力 σ_d の大きさもふまえての評価が必要である。

本研究では、応力履歴の異なる飽和砂の液状化強度試験や変形特性試験結果を、基準化累積損失エネルギーにより再整理し、変形挙動とエネルギーとの関係を把握する。さらに液状化後の試料土の剛性、強度回復効果を把握する。

2. 試験方法

(1) 試料土

本研究では、珪砂 7 号を用いた。試料土の諸性質を表 1 に示す。

(2) 繰返し三軸試験

相対密度 Dr : 60%を目標に $\Phi 5 \times 10 \text{cm}$ の供試体を、乾燥試料を用いて振動と突き棒による突固めで作製し、供試体設置後、 CO_2 通気・脱気水通水により飽和化を促進させ、背圧を 100kPa、拘束圧 σ'_c を 100kPa かけて B 値を確認、 σ'_c で等方圧密後、応力制御による繰返し载荷試験を行った。

表 2 に示すように、繰返し試験は液状化強度試験 (JGS0541) と変形特性試験 (JGS0542) をそれぞれ行った。変形特性試験では、繰返し軸差応力 σ_d を 12 波载荷した後、その都度排水 (等方圧密) を介する場合 (DC) と、排水を介さない場合 (DU) とに分けて、それぞれのサイクルで段階的に σ_d を増加させながら、液状化に至るまで試験を行った。さらに、DC、DU ではポスト液状化性能把握のため、繰返し試験後、それぞれの排水条件でひずみ制御単調载荷試験、その後、再度等方圧密試験も実施した。比較のために、液状化履歴のない圧密非排水単調载荷試験 (MC) も行った。

3. 試験結果

図 1 に液状化強度試験から得られた液状化強度曲線を示す。液状化強度比 R は 0.18 である。図 2 に液状化強度試験での各設定 σ_d における基準化累積損失エネルギー W ($=\Sigma \Delta W_i / \sigma'_c = \Sigma q_i \Delta H_i \times 1000 / \sigma'_c$, ΔH_i : 変位(m)) に対する片振幅ひずみ $(\epsilon_a)_{SA}$ を示す。液状化到達時の $(\epsilon_a)_{SA}$ は 0.7~2.9%で、1~2J/m²/kPa 程度のエネルギーを要した。 σ_d が大き

表 1 試料土の諸性質

土粒子密度(g/cm ³)	2.642
最小/最大間隙比	0.732/1.24
D_{50} (mm)	0.174
細粒分含有率 FC(%)	0.0

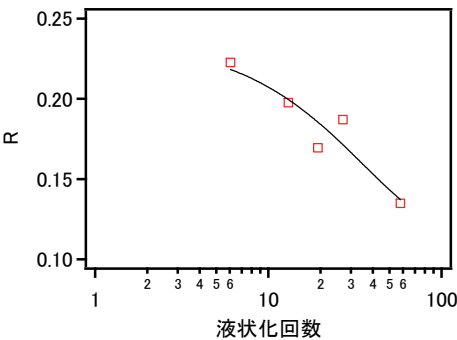


図 1 液状化強度曲線

表 2 飽和珪砂 7 号繰返し試験条件

	試験設定条件				供試体 作製時		圧密終了時		繰返し/ 単調後		再等方 圧密後	
	名称	拘束圧 σ'_c (kPa)	繰返し設定軸差応力 σ_d (kPa)	载荷 周波 数 Hz	間隙 比	Dr (%)	間隙 比	Dr (%)	間隙 比	Dr (%)	間隙 比	Dr (%)
液状化 強度試験	L30	103	28	0.5	0.94	58	0.93	61	0.93	61	-	-
	L35	94	32	0.5	0.87	72	0.86	75	0.86	75	-	-
	L40	100	38	0.5	0.93	60	0.92	62	0.92	62	-	-
	L45	105	41	0.5	0.94	58	0.93	61	0.93	61	-	-
	L50	104	46	0.5	0.96	55	0.95	58	0.95	58	-	-
変形特性と 単調試験	DC*	100	2.8,4.8,4.8,36,5.5	0.1	0.93	60	0.91	65	0.84	79	-	-
	DU**	100	3.7,4.9,14,14,24	0.1	0.94	60	0.91	64	0.91	64	0.79	89
単調試験	MC***	100	-	-	0.91	64	0.89	68	0.89	68	0.90	67

*段階間で排水を介しながら繰返し後単調载荷試験, **段階間で排水を介さず繰返し後単調载荷試験, ***液状化履歴無しで単調载荷試験.

い方が、液状化時の $(\epsilon_a)_{SA}$ は大きく、多くのエネルギーを要した。

また、図3に変形特性試験での W に対する $(\epsilon_a)_{SA}$ を示す。一般的に、液状化に至る時の $(\epsilon_a)_{SA}$ は2.5%と言われており、それとほぼ同じ傾向で液状化に至った。その時の W は、DCでは $0.86\text{J/m}^2/\text{kPa}$ 、DUでは $1.2\text{J/m}^2/\text{kPa}$ 程度であった。

図2の液状化強度試験と図3の変形特性試験とを比較して、液状化に至るまでの W はほぼ同じ範囲であるが、 $(\epsilon_a)_{SA}$ は変形特性試験の方が2倍程度大きく増加した。地震動継続中の排水条件、衝撃の大きさに応じた評価に影響が生じた。

図4に液状化前後の単調載荷試験結果を示す。DCではMCより強度、ヤング率とも向上し、残留ひずみ量も低下した。圧密を介することによる突固め効果が発揮されたものと思われる。DUではMCとほぼ同等まで強度回復した。

図5に変形特性試験から求めた $(\epsilon_a)_{SA}$ に対する等価ヤング率と履歴減衰率を示す。 $(\epsilon_a)_{SA}$ が微小レベルから1%付近に至るまでは、それぞれの载荷段階で、応力ひずみ関係が閉じたループを描く重弾性的な挙動であった。液状化後の単調載荷試験結果である図4の初期勾配から求めたヤング率も併せて示す。等方圧密を介したDCの方が、介さないDUより σ_d を大きく設定出来たが、発生ひずみに対するヤング率の低下は大きくなる傾向で整理された。MCでのヤング率は変形特性試験の液状化に至る大ひずみ付近の剛性とほぼ同じ値であった。軟化に伴う履歴減衰率はDCで6%、DUで10%に増加した。

変形特性を、基準化累積損失エネルギーに対してまとめた結果を図6に示す。 σ_d の効果も考慮され、図5の $(\epsilon_a)_{SA}$ を基準にした整理より、DC、DU間の差は小さくなり、一意的な傾向になる。

4. まとめ

繰返し応力履歴の違いで、液状化に至るまでの W は $0.85\sim 2\text{J/m}^2/\text{kPa}$ の差が生じた。変形特性試験では繰返し段階間の圧密条件の違いによって、液状化に至るまでのエネルギーに1.4倍の差が生じた。液状化後の単調載荷のピーク強度は液状化経験のない試料と比較してほぼ同等まで回復した。また、圧密を介すると圧密効果によりそれ以上に向上した。 W に対するヤング率の変化は排水条件によらず、一意的な関係で整理された。液状化後の剛性は、変形特性試験での $(\epsilon_a)_{SA}$ ：2~3%付近での等価ヤング率とほぼ同じ値であった。

謝辞：本研究はJSPS 科研費15H02263（代表：風間基樹先生）の助成を受けた。本校平成24年度、29年度卒業生の横道孝季、佐藤真保に実験補助をお願いした。ここに謝意を表します。

参考文献

1) 風間基樹、河合正、金鍾官、富田真之：累積損失エネルギーに基づく土の液状化抵抗評価の現行の液状化強度に対する優位性、第52回地盤工学研究発表会、pp.1521-1522、2017。2) 國生剛治：地震地盤動力学の基礎-エネルギー的視点を含めて-、鹿島出版会、2014。

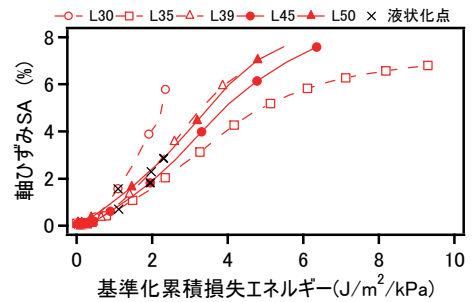


図2 Wに対する $(\epsilon_a)_{SA}$ の関係（液状化強度）

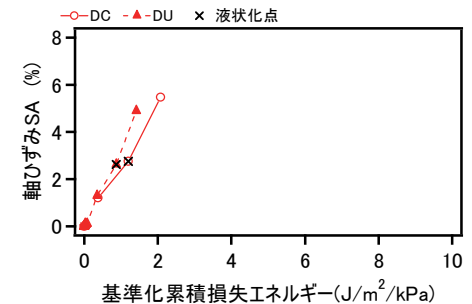


図3 Wに対する $(\epsilon_a)_{SA}$ の関係（変形）

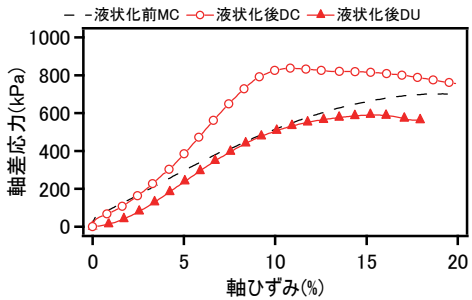


図4 液状化後の単調載荷試験結果

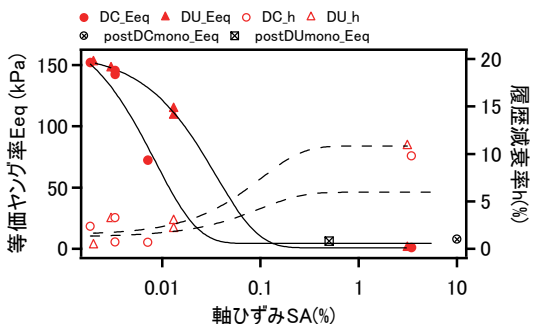


図5 変形特性試験結果

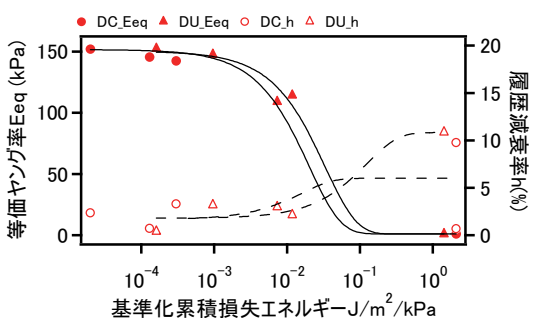


図6 基準化累積損失エネルギーでまとめた変形特性試験結果