

原位置試料の液状化エネルギー容量と液状化強度比の関係

谷本俊輔¹, 國生剛治²

1 土木研究所 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 主任研究員

2 中央大学 名誉教授

概要

近年, エネルギーに基づく新しい液状化判定法の開発・実用化に向けた研究が活発に進められている。この手法について検討する上では, 液状化進行過程における土の各種状態量と累積損失エネルギーの間の一意性を見い出せるか否かがポイントとなるが, 再構成試料に比べて多様性を有する原位置採取試料を対象とした系統的な研究事例が少ない。本報では, 多種多様な原位置採取試料の繰返し三軸液状化試験データを対象として, 累積損失エネルギーと F_L 法で用いられる液状化強度比, さらに N_L 値との関係について分析を行った。その結果, 繰返し三軸試験では伸張側にひずみが蓄積する特性により一見して一意性がないように見える累積損失エネルギーではあるが, それに補正を加えることにより応力振幅や繰返し回数に関わらず液状化強度比とほぼ一意的関係があることを見出した。一連の検討から得られた関係式は, 土の密度・粒度・コンシステンシー・年代効果などに依らず, エネルギーによる液状化判定に適用できる。

キーワード: 液状化判定法, 液状化エネルギー容量, 液状化強度比, N 値, 原位置試料

1. はじめに

応力およびその安全率 (F_L) を指標とした従来の液状化判定法に代わるものとして, 近年では, エネルギーに基づく新しい液状化判定法 (以下, エネルギー法という) の開発・実用化に向けた研究が活発に進められている。

液状化判定は, 液状化に対する土の「抵抗」の大きさと地震動による繰返しせん断の「作用」の大きさを対比することにより行われるが, これらのうち抵抗に関しては, 非排水繰返しせん断試験において, 液状化強度を決定する際の指標となる過剰間隙水圧やひずみ振幅が土の材料内部で消費される累積損失エネルギーと密接に関連していることが確認されており^{例えは 1)2)3)4)}, 任意の繰返し応力振幅, 繰返し回数や不規則波の波形形状に対し, エネルギーという明確な物理的意味を持ったスカラー値が液状化強度や液状化の進行度合いを代表する指標となり得るものと考えられている。これとあわせて, 「抵抗」と対比する地盤への繰返しせん断の「作用」についても, エネルギーとして評価する手法が種々提案され, その検証例も蓄積されつつある⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。これらに加えて, 液状化の進行過程における土の剛性等の状態量の推移を累積損失エネルギーによって連続的に評価することができれば, 液状化の判定法のみならず, 各種構造物に対する液状化の影響評価法も含めた一連の液状化予測手法として体系化することができる可能性がある。

上述したエネルギー法の構想から分かるように, この手法の成否を握るポイントは, 液状化進行過程における土の各種状態量と累積損失エネルギーの間に, 地震時の応力波形の振幅や載荷繰返し回数などに依らない一意的関係を見い出せるか否かにある。この点に関する前述の既往研究では主として室内調整試料が対象とされてきたが, 実験室で比較的扱いやすい工業用珪砂や単粒砂等の地盤材料に比べると, 原位置の地盤材料は粒度組成や堆積構造, 堆積年代等の面において圧倒的な多様性を有する。したがって, 現場で実用に耐えうる液状化予測手法としてのエネルギー法の成否を検討する上では, 多種多様な原位置試料の液状化挙動をエネルギーの視点から系統的に分析することが必要不可欠である。

また, 実用的な液状化判定法を確立する上では, 解析手法だけではなく, 地盤の調査・試験方法や解析手法への反映方法を一体的に整備することも重要である。これは, F_L に基づく従来の液状化判定法においても強く意識されてきた点であり, 個々のサイトにおける不攪乱試料の採取～室内液状化試験の実施には種々の困難が伴うことから, 液状化判定法の開発黎明期から今日にわたり, 標準貫入試験 N 値から間接的に液状化強度を推定する手法が常に一対として整備されてきた^{例えは 11)12)13)14)15)}。こうした技術の発展経緯から, 実地盤の液状化強度に関する既往データの多くは, N 値と関連付けられて蓄積されている。 N 値を用いた液状化強度の間接的推定の信頼度

には様々な議論があるが、少なくともエネルギー法の実用化を進める上での一段階として、液状化発生までの間に要する累積損失エネルギー（液状化エネルギー容量）と液状化強度比 R_L 、さらには標準貫入試験に基づく換算 N 値 N_1 との関係を検討しておくことは、工学的に重要である。

こうした背景から、本報では、多種多様な原位置採取試料の液状化試験データを対象として、液状化エネルギー容量と液状化強度比、 N_1 値の関係について分析を行った結果について報告する。

2. 分析の方法

2.1 分析対象としたデータ

本報では、文献 15) に示されている原位置採取の液状

化試験データを対象に分析を行った。

試料はいずれも固定ピストン式シンウォールサンプラーまたはロータリー式三重管式サンプラーにより採取されている。また、試料採取を行ったボーリング孔の近傍では、別途パイロットボーリング孔を設け、液状化試験結果との対比等を目的とした標準貫入試験および PS 検層が行われている。

原位置から採取した試料の液状化試験として、地盤工学会基準 JGS 0541 に基づく繰返し非排水三軸試験が行われている。これとあわせて、全ての供試体について、初期せん断剛性の測定と物理試験が行われている。なお、初期せん断剛性は微小ひずみ域で軸差応力を繰返し与えたときの応力-ひずみ関係から、ポアソン比を 0.5 とし算出されている。また、標準貫入試験で得られた乱れた試料に対しても、液状化試験供試体との対比を目的と

表 1 材料のばらつき等の影響が比較的小さいデータ

地点名	試料名	標準貫入試験		液状化試験						
		換算 N 値 N_1	細粒分含有率 FC (%)	供試体名	採取深度 G.L.-(m)	細粒分含有率 FC (%)	液状化繰返し回数 ($\epsilon_{DA}=5\%$) N_L (回)	繰返し応力比 CSR	液状化エネルギー容量 ($\epsilon_{DA}=5\%$) $\Sigma \Delta W / \sigma_c'$	液状化強度比 ($\epsilon_{DA}=5\%$) R_L
上蛇	A	3.9	59.7	2-2-1-3	6.50 ~ 6.62	52.4	82.5	0.161	0.154	0.233
				2-2-1-4	6.62 ~ 6.74	44.2	23.5	0.210	0.089	
				2-2-1-5	6.74 ~ 6.86	51.9	11.5	0.257	0.080	
				2-2-1-2	6.38 ~ 6.50	44.6	13.5	0.285	0.094	
本新	B	3.2	3.6	4-2-1-8	5.90 ~ 6.02	12.2	83.5	0.137	0.062	0.190
				4-2-1-3	5.30 ~ 5.42	3.5	20.5	0.159	0.033	
				4-2-1-2	5.18 ~ 5.30	11.9	10.5	0.198	0.033	
				4-2-1-10	6.10 ~ 6.22	8.1	13.5	0.273	0.059	
本新	C	11.3	14.2	4-2-3-5	8.48 ~ 8.60	18.6	56.5	0.117	0.020	0.143
				4-2-3-6	8.60 ~ 8.72	15.0	9.5	0.158	0.023	
				4-2-3-4	8.36 ~ 8.48	17.0	2.5	0.213	0.022	
				4-2-3-3	8.24 ~ 8.36	19.3	1.5	0.316	0.031	
請方	D	1.7	75.8	6-2-2-2	7.22 ~ 7.34	72.3	158.5	0.207	0.301	0.312
				6-2-2-1	7.10 ~ 7.22	85.0	15.0	0.270	0.091	
				6-2-2-3	7.34 ~ 7.46	89.5	51.5	0.324	0.239	
				6-2-2-4	7.46 ~ 7.58	78.8	7.5	0.395	0.124	
佐原イ	E	3.7	82.9	7-2-2-6	8.58 ~ 8.70	96.8	61.5	0.236	0.274	0.277
				7-2-2-3	8.22 ~ 8.34	87.1	52.5	0.269	0.265	
				7-2-2-5	8.46 ~ 8.58	84.0	10.0	0.294	0.087	
下大野	F	2.7	19.8	10-2-1-5	3.48 ~ 3.60	26.3	10.0	0.239	0.051	0.199
				10-2-1-6	3.60 ~ 3.72	3.2	3.5	0.292	0.038	
				10-2-1-3	3.24 ~ 3.36	37.1	1.0	0.413	0.037	
下石崎	G	0.9	98.8	11-2-3-4	7.86 ~ 7.98	99.2	43.0	0.290	0.369	0.333
				11-2-3-1	7.50 ~ 7.62	99.1	39.5	0.317	0.349	
				11-2-3-3	7.74 ~ 7.86	98.6	6.0	0.386	0.103	
				11-2-3-2	7.62 ~ 7.74	98.3	4.0	0.417	0.090	
猿江	H	2.3	32.8	12-2-3-5	4.98 ~ 5.10	46.1	43.5	0.229	0.234	0.311
				12-2-3-2	4.62 ~ 4.74	44.3	57.5	0.263	0.240	
				12-2-3-3	4.74 ~ 4.86	35.8	15.5	0.313	0.139	
				12-2-3-4	4.86 ~ 4.98	33.7	10.5	0.388	0.116	
幕張	I	0.0	99.2	13-1-1-1-6	3.60 ~ 3.72	98.8	95.5	0.372	0.640	0.477
				13-1-1-1-5	3.48 ~ 3.60	98.9	24.5	0.509	0.313	
				13-1-1-2-6	3.60 ~ 3.72	99.5	7.0	0.529	0.130	
				13-1-1-2-5	3.48 ~ 3.60	99.0	3.5	0.590	0.107	
幕張	J	2.4	13.9	13-1-6-5	14.48 ~ 14.60	17.1	124.0	0.237	0.477	0.338
				13-1-6-4	14.36 ~ 14.48	18.8	11.0	0.390	0.149	
				13-1-6-6	14.60 ~ 14.72	16.8	2.5	0.490	0.078	
舞浜	K	4.4	25.5	14-2-1-6	4.60 ~ 4.72	7.2	26.0	0.179	0.036	0.211
				14-2-1-5	4.48 ~ 4.60	34.3	28.0	0.187	0.052	
				14-2-1-3	4.24 ~ 4.36	43.3	37.0	0.203	0.083	
				14-2-1-4	4.36 ~ 4.48	41.3	10.5	0.254	0.055	
舞浜	L	11.1	10.1	14-2-3-2	7.82 ~ 7.94	12.6	14.5	0.205	0.038	0.164
				14-2-3-7	8.40 ~ 8.52	1.9	11.0	0.250	0.064	
				14-2-3-3	7.94 ~ 8.06	18.9	12.5	0.264	0.065	
				14-2-3-8	8.52 ~ 8.64	1.6	6.5	0.401	0.071	
舞浜	M	10.7	8.4	14-2-5-2	10.82 ~ 10.94	7.6	121.0	0.243	0.402	0.303
				14-2-5-1	10.70 ~ 10.82	11.1	4.5	0.287	0.043	
				14-2-5-4	11.06 ~ 11.17	1.1	6.5	0.434	0.073	
舞浜	N	10.2	12.0	14-2-6-3	11.49 ~ 11.61	16.5	94.5	0.231	0.310	0.323
				14-2-6-1	11.25 ~ 11.37	5.7	23.5	0.262	0.159	
				14-2-6-4	11.80 ~ 11.92	5.7	9.5	0.432	0.114	

した物理試験が行われている。

文献 15)には 52 試料 227 供試体の液状化試験データが収録されているが、分析にあたっては、以下 1)~5)のいずれかに該当するデータを除外した。

- 1) 両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達することなく試験を終了したもの、あるいは、1 サイクル目で $\varepsilon_{DA}=10\%$ を超えたもの。これは、本報における液状化エネルギー容量と液状化強度比を $\varepsilon_{DA}=5\%$ で定義したことによる。
- 2) 繰返しせん断中に軸差応力の振幅を一定に保持することができなかつたもの。具体的には、地盤工学会基準 JGS 0541 の軸差応力に関する規定を満たさないもの。
- 3) 繰返しせん断中にネッキングによりひずみが急増した。これに該当する供試体から液状化エネルギー容量を導くのは不適切であることによる。
- 4) 標準貫入試験が行われていないもの。この場合、液状化エネルギー容量と換算 N 値 N_1 の対比ができないうことによる。
- 5) 繰返し応力比 (CSR で表す) と液状化発生時の繰返し回数との関係が右上がりとなり、液状化強度比を定義するのが困難なもの。

これらのいずれにも該当しないデータの数は 49 試料 190 供試体であった。以降、本報ではこれらを全データと呼ぶこととする。

さらに、原位置試料を対象とした室内試験データには、地盤材料の空間的ばらつきに起因する供試体物性のばらつきや、採取～運搬～整形過程における乱れの影響などが含まれる点に注意を要する。上述した全データは、これらの要因を考慮した取捨選択等が全く行われていない。そこで、材料のばらつき等の影響が比較的小さいデータとして、次の条件 6)~9)の全てに合致する供試体を選別した。

- 6) 標準貫入試験試料と液状化試験供試体における細粒分含有率 FC の差が 20%以内であること。
- 7) 標準貫入試験試料と液状化試験供試体における乾燥密度 ρ_d の差が $\pm 0.2\text{g/cm}^3$ 以内であること。
- 8) 原位置 (PS 検層) に対して、液状化試験供試体の初期せん断剛性 G_0 が 0.5~1.5 倍以内であること。
- 9) 繰返し応力比と $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達したときの繰返し回数 N_L の関係が概ねきれいな右下がりの傾向を有すること。

これにより、表 1 に示す 14 試料 51 供試体を選別された。以下、これらを選別データと呼び、A~N の試料名を付すこととする。

選別データの条件 6)~8)の指標と数値範囲については議論の余地があるが、その考えを以下に補足する。まず、条件 7)については、標準貫入試験で採取された乱れた試料自体の密度には意味がないものの、原位置では地下水水位で飽和度 $S_r=100\%$ であったものと仮定すれば、乱れた試料の土粒子の密度 ρ_s と自然含水比 w_n から現場密度を推定することができる。ただし、この手法による ρ_d

の推定精度については十分に検証されていないことも考慮し、許容範囲を広めに設定している。また、条件 6)~8)の数値範囲はかなり広く感じられるかもしれないが、条件 6)~8)のみによって全データから約半数の 92 供試体が除外されている。室内調整試料とは異なり実地盤は大きなばらつきを有するが、こうした材料を扱わなければならないことも事実であり、過度な絞り込みを行うことで地盤の特性を見誤る可能性も考えられる。このような考えに基づいて、各項目の数値範囲を設定している。

「材料のばらつき等の影響が比較的小さい」と述べたのは、全データに対する相対的な意味によるものであり、絶対的なばらつきの大きさは、選別データであっても小さいものではないことに注意を要する。

2.2 データ整理方法

本報に示す液状化強度比 R_L は、特記しない限り、繰返し回数 20 回で両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ を生じさせる繰返し応力比としている。また、各供試体が $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達したときの繰返し回数を、液状化繰返し回数 N_L と呼んでいる。

繰返し非排水三軸試験で測定された軸差応力 σ_d 、軸ひずみ ε_a (いずれも圧縮側を正とする) から、次式により単位体積当たりの累積損失エネルギー $\Sigma\Delta W$ を算出した。

$$\Sigma\Delta W = \int \sigma_d d\varepsilon_a \quad (2.1)$$

これを試験前の圧密応力 σ'_c で除した $\Sigma\Delta W/\sigma'_c$ を正規化累積損失エネルギーと呼ぶ。また、 $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達したときの正規化累積損失エネルギーを液状化エネルギー容量 $\Sigma\Delta W/\sigma'_c (\varepsilon_{DA}=5\%)$ と呼ぶこととする。

液状化エネルギー容量と換算 N 値 N_1 の対比にあたっては、 N_1 を次式により算出した。

$$N_1 = \frac{170N}{\sigma'_v + 70} \quad (2.2)$$

σ'_v は有効上載圧 (kN/m^2) である。また、細粒分の影響を考慮した N_1 の補正を行うにあたり、細粒分含有率 FC が標準貫入試験試料と液状化試験供試体のそれぞれについて得られているが、本報では標準貫入試験結果と液状化エネルギー容量の関係に着目し、標準貫入試験試料の粒度試験から得られた細粒分含有率 FC を用いることとした。これに対応し、本報に示す細粒分含有率 FC および塑性指数 IP は、全て標準貫入試験試料の物理試験から得られた値としている。

3. 正規化累積損失エネルギーの一意性に関する検討

3.1 代表的試料での正規化累積損失エネルギー

國生 7)の実験では、同一材料の場合、正規化累積損失エネルギーと両振幅軸ひずみの関係は繰返し応力比 CSR や液状化発生時の繰返し回数 (以下、液状化繰返し回数という) N_L に依存せずほぼ一意的であることが確認されている。ただし、この実験で対象とされているのは非塑

性シルトを配合した富津砂による再構成試料であり、それらの液状化強度比の範囲は $R_L \leq 0.22$ と限定的である。そこで、ここでは、多様な原位置試料においても上記のような一意性が見いだされるか否かを確認する。

材料のばらつき等の影響が小さい選別データを対象に、両振幅軸ひずみ ε_{DA} と正規化累積損失エネルギー $\Sigma \Delta W / \sigma'_c$ の関係を図 1 左に、対応する軸差応力 $\sigma_d \sim$ 軸ひずみ ε_a 関係を図 1 右に示す。なお、いずれの供試体も概ね $\varepsilon_{DA} = 10\%$ に達するまで試験が行われており、図 1 ではその全範囲をプロットしている。これらの図では、液状化強度比 R_L の小さいものから順に 14 試料を並べ、かつ、各試料でも繰返し応力比 CSR の小さいものから順に並べて表示している。試料 G, I は粘性土 ($I_p = 35 \sim 50$) であり、その他は砂質土 ($I_p = 0 \sim 16$) である。

これらを注意深く眺めると、右側の $\sigma_d \sim \varepsilon_a$ ループの特徴と左側の $\Sigma \Delta W / \sigma'_c \sim \varepsilon_{DA}$ カーブの関係について、以下の点を指摘することができる。

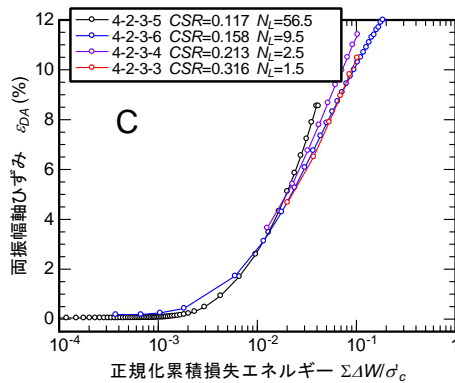
1) 液状化強度比 R_L が大きくなるにつれてある一定のひずみ発生に要するエネルギーが大きくなる。すなわち、

$\Sigma \Delta W / \sigma'_c \sim \varepsilon_{DA}$ カーブは土の密度や粒度、コンシステンシー、年代効果などにより変化する。

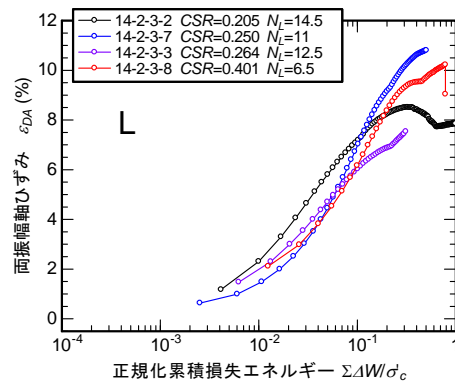
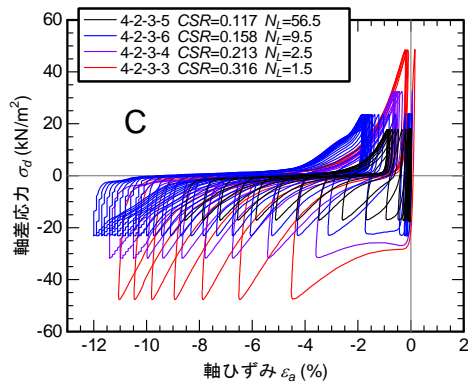
2) $\sigma_d \sim \varepsilon_a$ ループはひずみが圧縮側よりも伸張側に大きく累積する場合は圧倒的に多い。また、これに対応して同一試料内での $\Sigma \Delta W / \sigma'_c \sim \varepsilon_{DA}$ カーブの一意性が失われ、 CSR (あるいは N_L) の違いによる差異が目立つようになる。この傾向は、砂質土・粘性土に共通する。

3) 同一試料内での $\Sigma \Delta W / \sigma'_c \sim \varepsilon_{DA}$ カーブが CSR (あるいは N_L) によって異なるケースでは、繰返し応力比 CSR が小さい (液状化繰返し回数 N_L が大きい) 場合ほど、一定のひずみ振幅に達するために必要なエネルギーが大きくなるものが多い。

そこで、試験データに見られる $\Sigma \Delta W / \sigma'_c \sim \varepsilon_{DA}$ カーブの非一意性と伸張ひずみの累積の関係について、さらに分析を加えることとした。



$R_L (\varepsilon_{DA}=5\%) = 0.143, FC = 14.2\%, IP = 0 (NP), N_L = 11.3$, 沖積層



$R_L (\varepsilon_{DA}=5\%) = 0.164, FC = 10.1\%, IP = 0 (NP), N_L = 11.1$, 沖積層

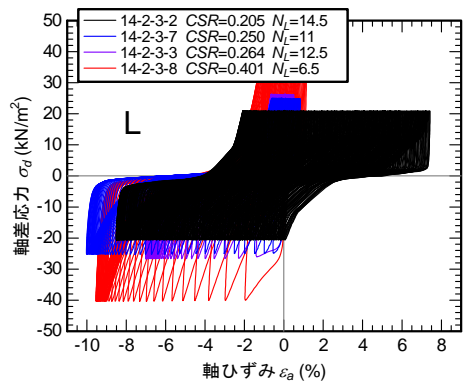


図 1 (a) 三軸液状化試験のエネルギー～両振幅ひずみ関係 (左) と応力～ひずみループ (右)

: 砂質土 $R_L (\varepsilon_{DA}=5\%) = 0.143 \sim 0.164$

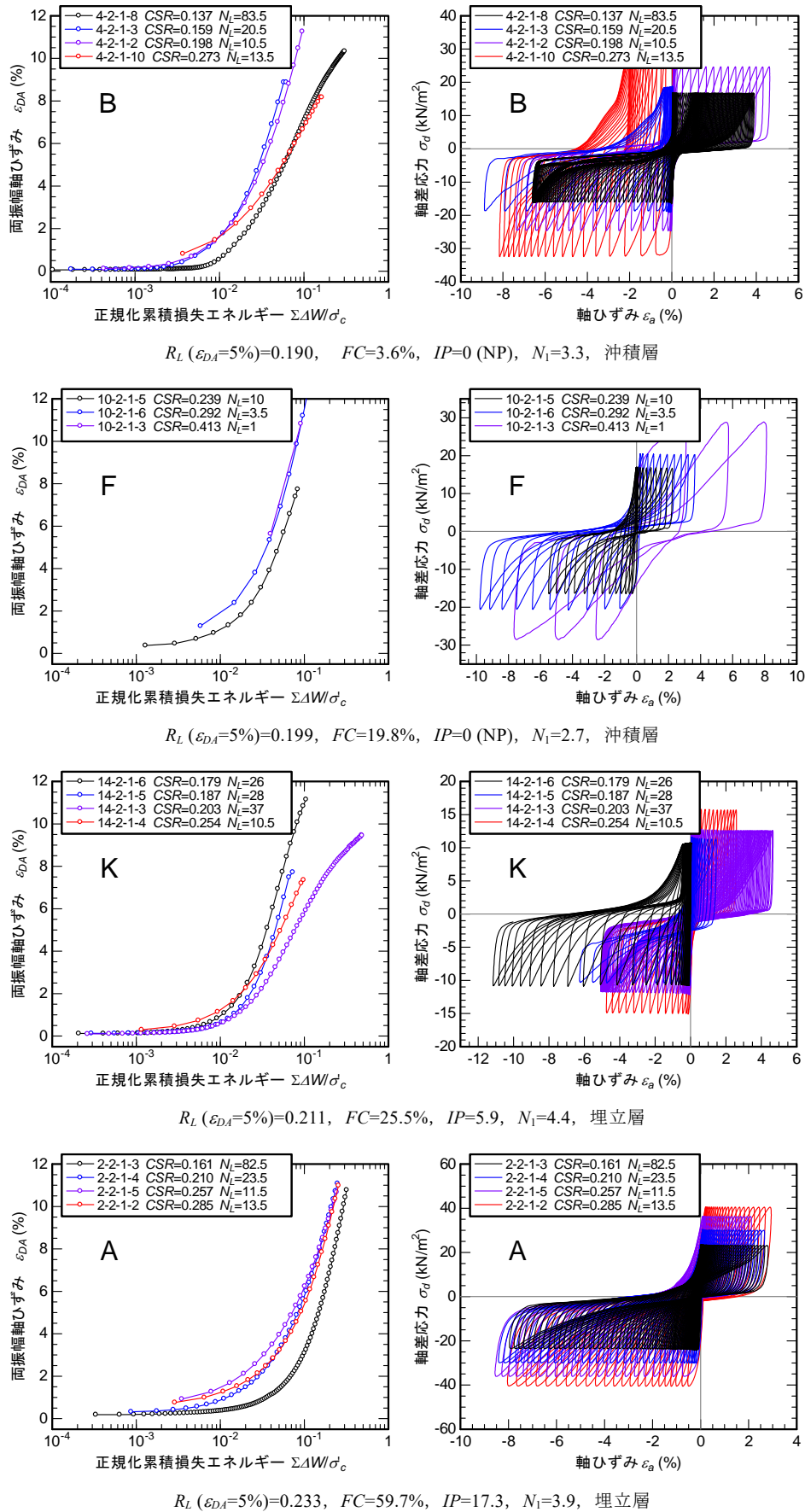


図 1 (b) 三軸液状化試験のエネルギー～両振幅ひずみ関係 (左) と応力～ひずみループ(右)

: 砂質土 $R_L(\varepsilon_{DA}=5\%) = 0.190 \sim 0.233$

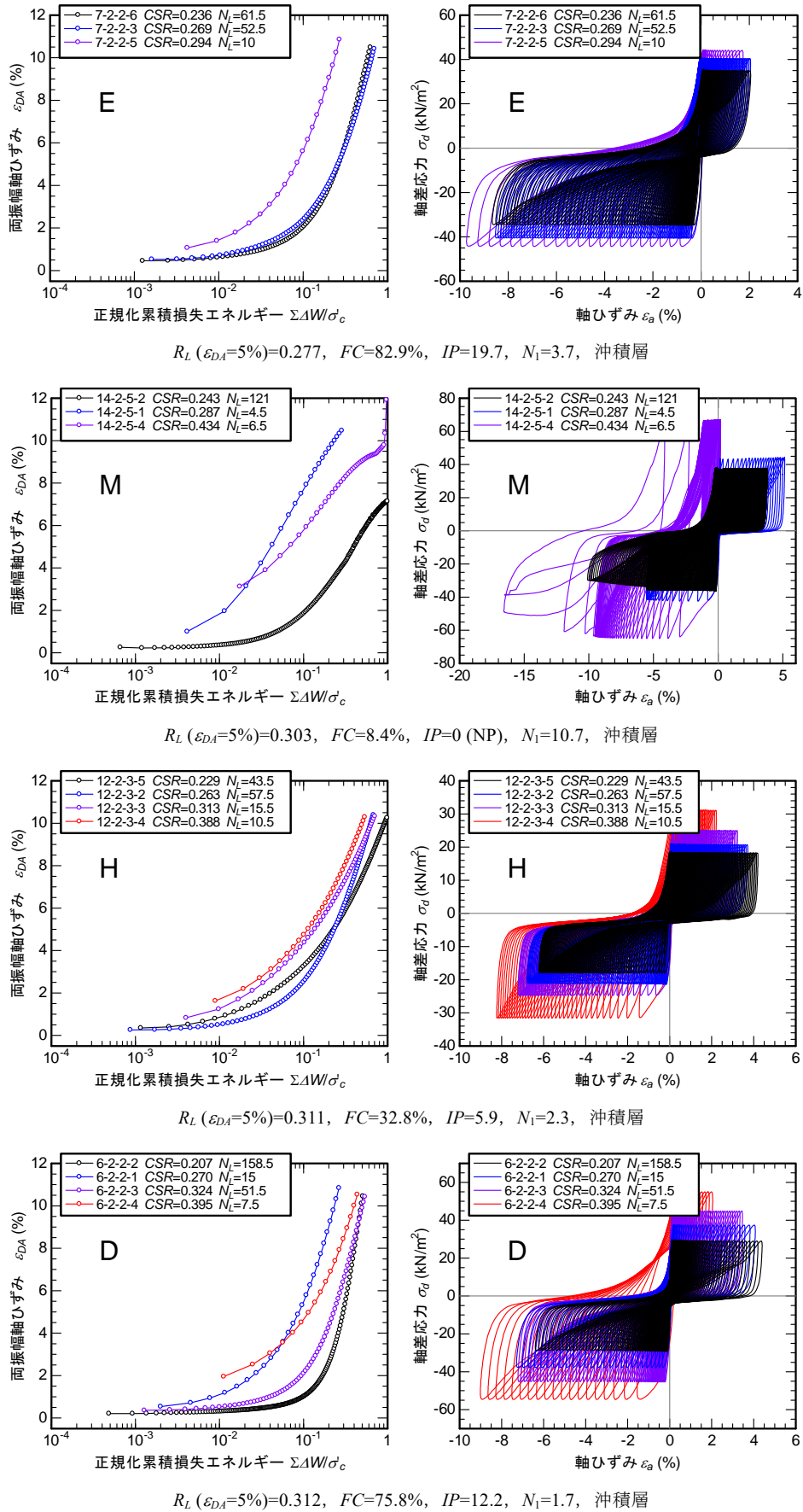


図 1 (c) 三軸液状化試験のエネルギー～両振幅ひずみ関係 (左) と応力～ひずみループ(右)

: 砂質土 $R_L(\varepsilon_{DA}=5\%) = 0.277 \sim 0.312$

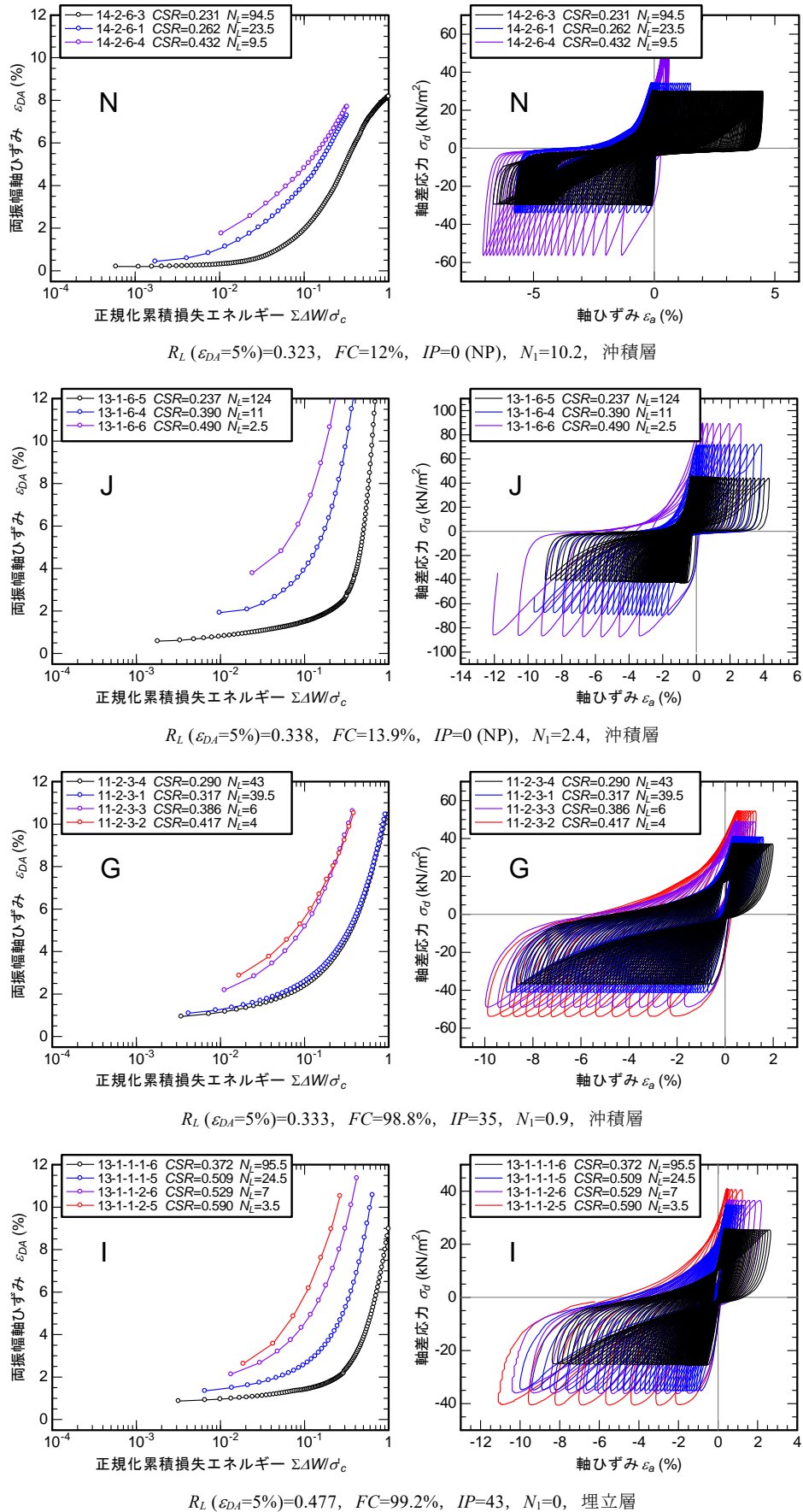


図 1 (d) 三軸液状化試験のエネルギー～両振幅ひずみ関係 (左) と応力～ひずみループ (右)

: 砂質土 $R_L (\varepsilon_{DA} = 5\%) = 0.323, 0.338$, 粘性土 $R_L (\varepsilon_{DA} = 5\%) = 0.333, 0.477$

3.2 三軸試験における伸張ひずみの累積の影響

図2の上段では、各供試体が両振幅軸ひずみ $\epsilon_{DA}=2, 5, 10\%$ に達したときの正規化累積損失エネルギー $\Sigma\Delta W/\sigma_c$ を、対応する液状化繰返し回数 N_L ($\epsilon_{DA}=5\%$) に対して、試料ごとに片対数グラフにプロットしている。また、同図下段では、各供試体が両振幅軸ひずみ $\epsilon_{DA}=2, 5, 10\%$ に達したときの中立軸ひずみ ϵ_{mean} を、対応する液状化繰返し回数 N_L ($\epsilon_{DA}=5\%$) に対して、供試体ごとに片対数グラフにプロットしている。ここで、中立軸ひずみとは同一ループでの圧縮側と伸張側のピークひずみの平均値であり、軸ひずみ ϵ_a と同様に圧縮側を正(伸張側を負)としている。(a), (b), (c)はそれぞれ $R_L \leq 0.233$ の砂質土、 $R_L \geq 0.277$ の砂質土、粘性土に対応している。大半の中立軸ひずみは伸張側に累積する傾向が明らかである。

図2上段のグラフの比較により、 N_L と $\Sigma\Delta W/\sigma_c$ が右上がりの関係、すなわち、液状化繰返し回数が大きい(CSRが小さい)ものほど一定のひずみ振幅 ϵ_{DA} に到達するための損失エネルギーが増加する傾向を示すものが多く、この傾向は粘性土も含めて R_L が大きいものほど、また、

両振幅軸ひずみ ϵ_{DA} が5%, 10%と大きくなるにつれて目立つようになることが分かる。

一方、図2下段のグラフの比較から、砂質土 $R_L \leq 0.233$ においては ϵ_{mean} が幅広く分布し明瞭な傾向は読み取れないものの、砂質土 $R_L \geq 0.277$ と粘性土のように R_L が大きな試料に着目すると、 N_L が小さい試料ほど中立軸ひずみ ϵ_{mean} が伸張側に移動する傾向を示すものが多く認められる。そしてこれらの傾向はパラメータである両振幅軸ひずみ ϵ_{DA} が大きくなるほど顕著となる。

図3では、図2の上段と下段の同一プロット点の中立軸ひずみ ϵ_{mean} に対するエネルギー $\Sigma\Delta W/\sigma_c$ の直接的関係を $\epsilon_{DA}=2, 5, 10\%$ について示している。(a), (b), (c)はそれぞれ $R_L \leq 0.233$ の砂質土、 $R_L \geq 0.277$ の砂質土、粘性土($R_L=0.333, 0.477$)に対応している。(a)の液状化強度の小さな砂質土については、中立軸ひずみ ϵ_{mean} が負側に大きく成長するものが多いにも関わらず、エネルギー $\Sigma\Delta W/\sigma_c$ は ϵ_{mean} によらずほぼ一定の小さな値に留まっている。(b)の液状化強度の大きな砂質土については、プロットのばらつきはあるものの、同一のプロット記号で示

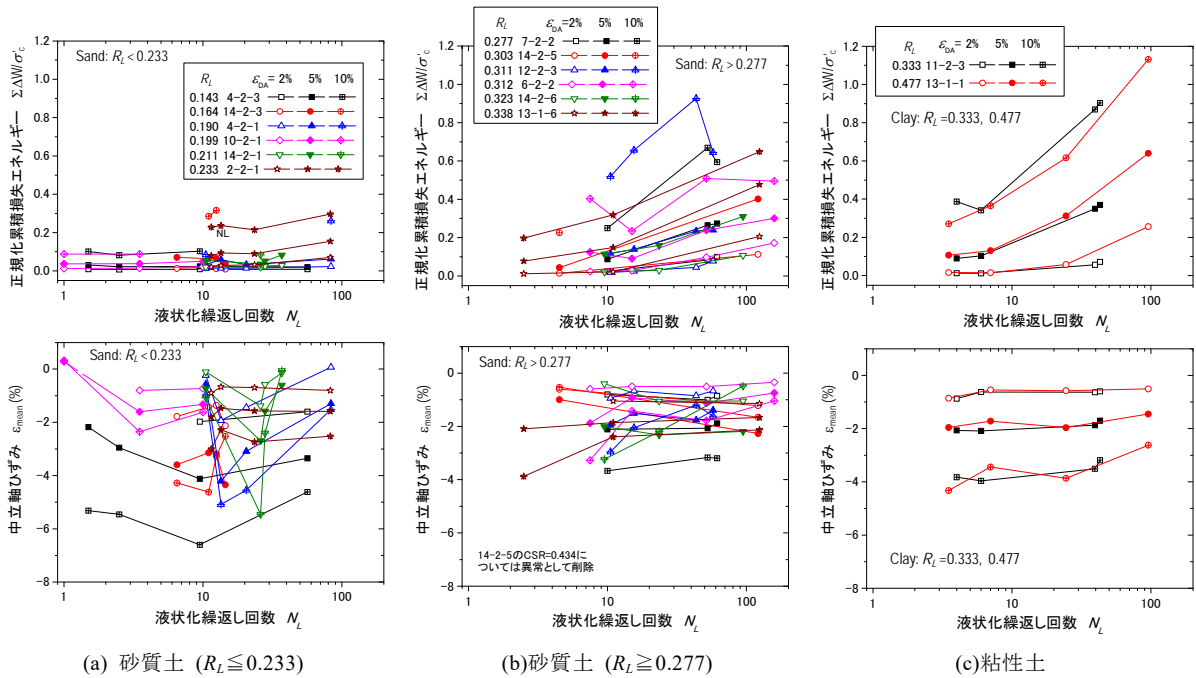


図2 繰返し回数 N_L に対する正規化累積損失エネルギー(上段)と中立軸ひずみ(下段)の関係

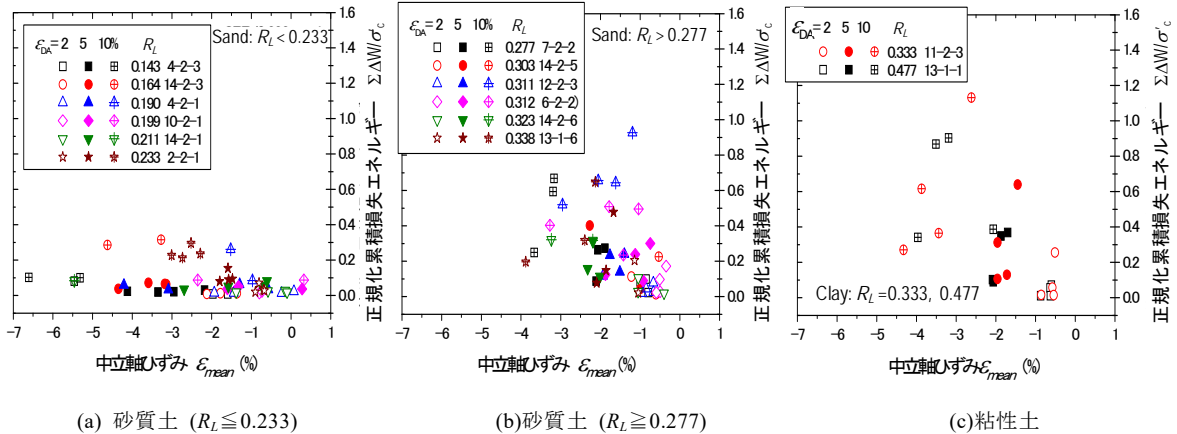


図3 中立軸ひずみと液状化エネルギー容量の関係

した同一試料での関係は左下がりとなり、 ε_{mean} が負側に大きく累積するほどある両振幅ひずみに達するためのエネルギーが小さくなる傾向を示すものが多く認められる。つまり、同一試料で伸張側にひずみが偏るほど、同じ両振幅ひずみに達するまでのエネルギーは小さくなることを意味している。そして、この傾向は $\varepsilon_{DA}=2\%$ では目立たないが、 $\varepsilon_{DA}=5, 10\%$ となるほど明瞭になることも分かる。(c)の粘性土では(b)で述べた傾向がさらに明瞭な形で表れていることが読み取れる。

繰返し三軸試験では、軸差応力の振幅が正負で対称であったとしても、三軸圧縮と三軸伸張での強度の違いに起因し、圧縮側に比べ伸張側に大きなひずみが発生しやすい特性があることは良く知られている。以上の分析より、この特性が R_L や N_L が異なると損失エネルギー $\Sigma \Delta W/\sigma'_c$ と両振幅軸ひずみ ε_{DA} の間の一意性が成り立たなくなる大きな要因であると考えられる。

3.3 中空ねじり試験における累積損失エネルギー

中空ねじり単純せん断試験では、正負のせん断応力振

幅が対称形であれば一方向的なひずみの累積は生じにくく、三軸試験に比べて地震時の地盤の応力状態に近い。ここでは、繰返し三軸試験において $\Sigma \Delta W/\sigma'_c$ と両振幅軸ひずみ ε_{DA} の間の一意性が成り立たなくなる原因が伸張側へのひずみの累積によることを検証するため、繰返し中空ねじりせん断試験のデータを確認する。なお、原位置試料では、ねじりせん断試験のための中空供試体の作製が容易でないこともあり、原位置試料を対象としたデータの蓄積が少ないことから、再構成試料を対象とした2シリーズの中空ねじり試験の結果を確認する。

図4は、中詰から緩詰の富津砂を対象とした國生らによる中空ねじり試験のデータである⁴⁾。原論文でも述べられているように、同図(a)からは、横軸にとった損失エネルギー $\Sigma \Delta W/\sigma'_c$ に対して両振幅せん断ひずみ γ_{DA} が相対密度 $D_r=30\%, 50\%$ ごとにCSRや N_L の違いに関わらずほぼ一意的な関係が保たれていることが分かる。また(b)からは、 $\gamma_{DA}=3\%, 7.5\%, 15\%$ に達するまでに要するエネルギー $\Sigma \Delta W/\sigma'_c$ が異なる有効拘束圧 $\sigma'_c=49, 98, 196$ kPaの下での実験で液状化繰返し回数 N_L に関わらずほぼ一定

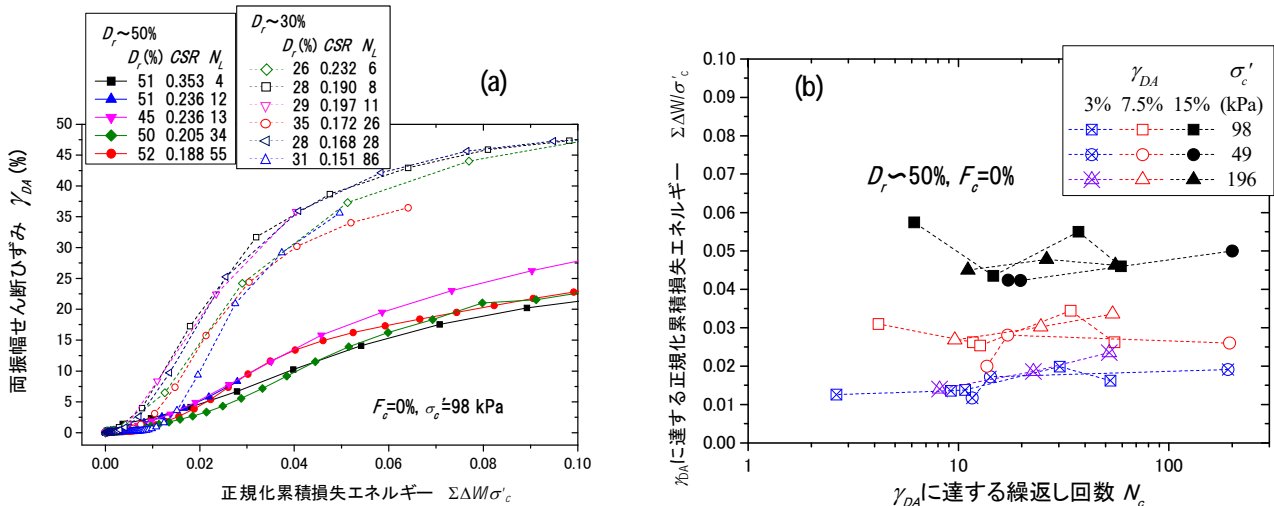


図4 中空ねじり液状化試験による室内調整富津砂（緩詰・中詰）の損失エネルギー～両振幅せん断ひずみ関係（左）と一定ひずみに達する繰返し回数～損失エネルギー関係（右）⁴⁾

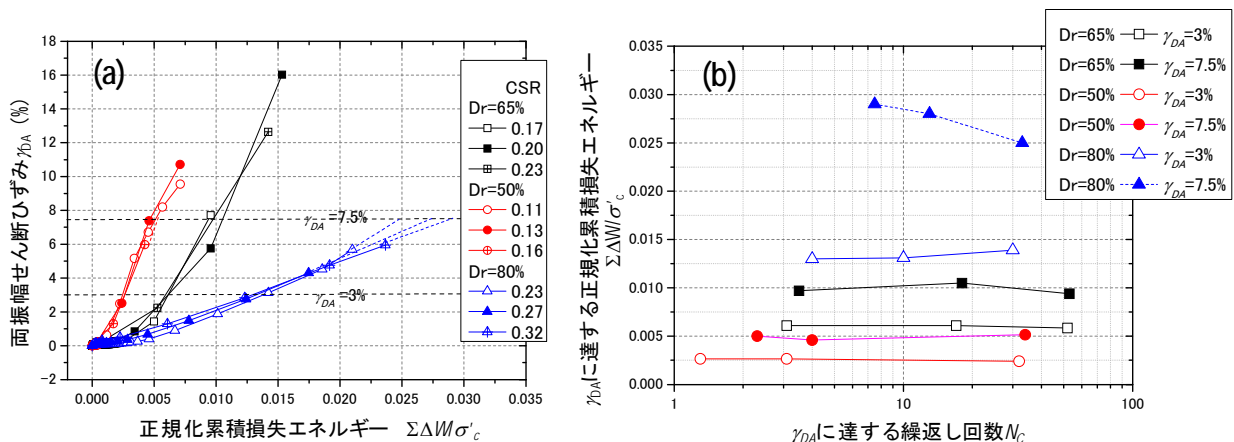


図5 中空ねじり液状化試験による室内調整豊浦砂（中詰・密詰）の損失エネルギー～両振幅せん断ひずみ関係（左）と一定ひずみに達する繰返し回数～損失エネルギー関係（右）

値をとることが分かる。

また、図5は、中密～密詰（相対密度 $D_r=50, 65, 80\%$ ）の豊浦砂を対象とした酒匂らの中空ねじり試験データ¹⁰⁾である。同図(a)からは、CSR や N_L の違いに関わらず、 $\Sigma\Delta W/\sigma'_c$ に対し3種類の相対密度ごとにせん断ひずみ γ_{DA} がほぼ一意的な関係が保たれていることが分かる。また(b)からは、富津砂の試験データと同様に、両振幅せん断ひずみ $\gamma_{DA}=3\%, 7.5\%$ に達するまでのエネルギー $\Sigma\Delta W/\sigma'_c$ が、 N_L に関わらずほぼ一定値をとることが分かる。

原位置試料については今後のさらなるデータの蓄積と検証が必要となるものの、上記の結果より、少なくとも室内調整試料については、正負対称の応力状態で繰返しせん断を与えた場合、CSR や N_L の違いに関わらず $\Sigma\Delta W/\sigma'_c \sim \epsilon_{DA}$ 関係の一意的性が保たれることが分かる。

4. 繰返し三軸試験データに基づく液状化エネルギー容量の評価

液状化エネルギー容量 $\Sigma\Delta W/\sigma'_c (\epsilon_{DA}=5\%)$ と繰返し応力比 CSR の関係に対して、三軸試験における伸張ひずみの偏りが影響を及ぼした原因としては、例えば次のような可能性が考えられる。

- CSR が小さい（液状化繰返し回数 N_L が多い）供試体では、伸張側への継続的なひずみの偏りが、履歴ループ面積の増大（過剰なエネルギー損失）をもたらした可能性が考えられる。このため、ひずみの偏りが無い理想的な試験条件の場合は、液状化エネルギー容量がより小さな値を示していた可能性がある。
- CSR が大きい（液状化繰返し回数 N_L が少ない）供試体では、1 サイクルあたりの伸張側へのひずみの累積量が過大となり、これによって過少な繰返し回数で $\epsilon_{DA}=5\%$ に達した可能性がある。このため、ひずみの偏りが無い理想的な条件の場合は $\epsilon_{DA}=5\%$ に達するときの繰返し回数が多くなり、結果的に液状化エネルギー容量がより大きな値を示していた可能性が考えられる。

こうした可能性を考慮すると、繰返し三軸試験による液状化試験データから理想的な条件に近い液状化エネルギー容量を得るためには、CSR が過大なデータと過小なデータを避けるのがよいと考えられる。そこで、以降では便宜的に、 $CSR=R_{L20}$ および $CSR=R_{L15}$ に対応する液状化エネルギー容量に着目することとする。 $CSR=R_{L20}$ および $CSR=R_{L15}$ に着目したのは、上述の考察に立脚しつつ、各種の液状化判定法（我が国の土木分野、建築分野、あるいは海外）における液状化強度比の定義方法との整合性を意識したことによる。

4.1 液状化エネルギー容量と繰返し応力比 CSR の関係

繰返し三軸試験による液状化試験データから、液状化エネルギー容量 $\Sigma\Delta W/\sigma'_c (\epsilon_{DA}=5\%)$ と繰返し応力比 CSR の

関係について詳しく調べるため、図6に示すようなデータ整理を行った。すなわち、同一試料の $\Sigma\Delta W/\sigma'_c (\epsilon_{DA}=5\%) \sim CSR$ 関係を、式(4.1)により最小二乗近似した。

$$\Sigma\Delta W/\sigma'_c (\epsilon_{DA}=5\%) = a \cdot \left(\frac{R_{L20}}{CSR} \right)^b \quad (4.1)$$

この式は、液状化エネルギー容量 $\Sigma\Delta W/\sigma'_c (\epsilon_{DA}=5\%)$ と繰返し応力比 CSR の関係を両対数軸で直線近似するものであり、フィッティングの結果として2つのパラメータ a, b が得られる。このうち、パラメータ b は液状化エネルギー容量の CSR への依存度合いを表すものであり、零に近い場合ほど依存度合いが低いことを意味する。また、パラメータ a は、 $CSR=R_{L20}$ （すなわち、液状化繰返し回数 $N_L=20$ 回）に対する液状化エネルギー容量である。

パラメータ b と R_{L20} の関係を図7に示す。なお、ここでは材料のばらつき等の影響を含んだ全データと、ばらつき等の影響を除去した選別データに対する計算結果をまとめてプロットしている。

まず、 $R_{L20} \leq 0.25$ 程度の範囲では b が零に近い値を示しており、液状化エネルギー容量が CSR にあまり依存しない傾向が認められる。このことは、 $R_L \leq 0.22$ 程度の範囲で得られている國生の実験データにおいて、液状化エネルギー容量が CSR によらず一意的であったりことよく合致している。ただし、 $R_{L20} \geq 0.25$ の範囲では、 R_{L20} が大きくなるほど b が増加し、液状化エネルギー容量の CSR 依存性が強まる傾向が認められる。

4.2 液状化エネルギー容量と R_L の関係

図8に、 $\epsilon_{DA}=5\%$ 、 $CSR=R_{L20}$ に対応した液状化エネルギー容量 a と R_{L20} の関係を示す。この図では、材料のばらつき等の影響を含んだ全データと、その影響を除去した選別データ、さらには國生⁷⁾による再構成試料のデータもあわせてプロットしている。全データで見ても、 $a \sim R_{L20}$ 関係は良好な右上がりの相関を有しており、さらに選別データに絞り込むとばらつきが小さくなっている。また、特筆すべき点として、液状化エネルギー容量 a と R_{L20} の関係が、細粒分含有率 FC や原位置試料・再構成試料の違いに関わりなく概ね一意的であり、かつ、國生

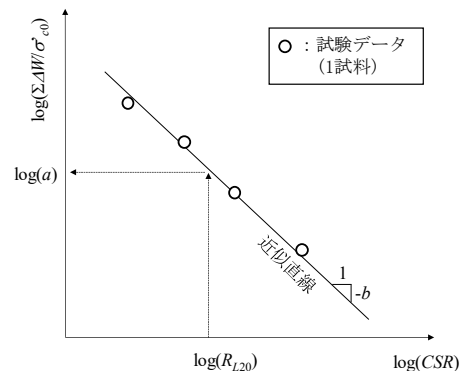


図6 液状化エネルギー容量と繰返し応力比 CSR の関係に関するデータ整理方法の概念図

7)が再構成試料に対して得た次の実験式とも調和的であることを挙げるができる。

$$\sum \Delta W / \sigma'_c (\varepsilon_{DA} = 5\%) = 0.032 - 0.48R_{L20} + 2.4R_{L20}^2$$

$$= (0.008 + 2.4(R_{L20} - 0.1)^2) \quad (4.2)$$

液状化エネルギー容量と液状化強度比 R_L との間に、細粒分含有率 (粒度組成) によらず、かつ、再構成試料～原位置不攪乱試料にわたってほぼ共通する関係性が見出されたことは、今後のエネルギー法の実用化を図る上で重要な知見であると言える。

ただし、選別データに着目すると、國生の実験式によるエネルギー容量はやや小さめの値を与えていることも確認される。そこで本研究では、式(4.2)を次のように修正することとした。

$$\sum \Delta W / \sigma'_c (\varepsilon_{DA} = 5\%) = 0.043 - 0.70R_{L20} + 3.5R_{L20}^2$$

$$= (0.008 + 3.5(R_{L20} - 0.1)^2) \quad (4.3)$$

これは、 R_L の小さい範囲における國生の実験データとの整合性に配慮して式(4.2)の定数0.008および0.1を固定した上で、液状化判定上重要となる $R_L \leq 0.4$ の範囲の選別データに対して最小二乗近似を行うことにより回帰したものである (決定係数 $R^2=0.92$)。

次に、式(4.1)に戻って $\varepsilon_{DA}=5\%$ 、 $CSR=R_{L15}$ に対応した液状化エネルギー容量 $a \cdot (R_{L20}/R_{L15})^b$ と R_{L15} の関係を図9に示す。 $N_L=20$ 回あるいは15回に関わらず $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達するためのエネルギー容量は本来一定のはずであり、同じエネルギー容量に対する R_{L15} は R_{L20} より大きくなっていることが図8との比較により確認できる。また、液状化エネルギー容量と液状化強度比の関係が細粒分含有率 FC の違いに関わりなくほぼ一意的であり、同様の方法で最小二乗近似を行ったところ、次式が得られた (決定係数 $R^2=0.92$)。

$$\sum \Delta W / \sigma'_c (\varepsilon_{DA} = 5\%) = 0.035 - 0.54R_{L15} + 2.7R_{L15}^2$$

$$= (0.008 + 2.7(R_{L15} - 0.1)^2) \quad (4.4)$$

4.3 液状化エネルギー容量と換算 N 値 N_1 の関係

最後に、液状化エネルギー容量 a と換算 N 値 N_1 の関係について検討する。なお、図10に示すように、ここで検討対象としたデータの N_1 値は全データで0~23程度、選別データで0~11程度、 FC はいずれも5~100%と広範囲にわたっている。

文献15)では、液状化強度比 R_{L20} と換算 N 値 N_1 の関係として、式(4.5)が提案されている。

$$R_{L20} = \begin{cases} 0.0882 \sqrt{\frac{0.85N_a + 2.1}{1.7}} & (N_a < 14) \\ 0.0882 \sqrt{\frac{N_a}{1.7}} + 1.6 \times 10^{-6} (N_a - 14)^{4.5} & (N_a \geq 14) \end{cases} \quad (4.5a)$$

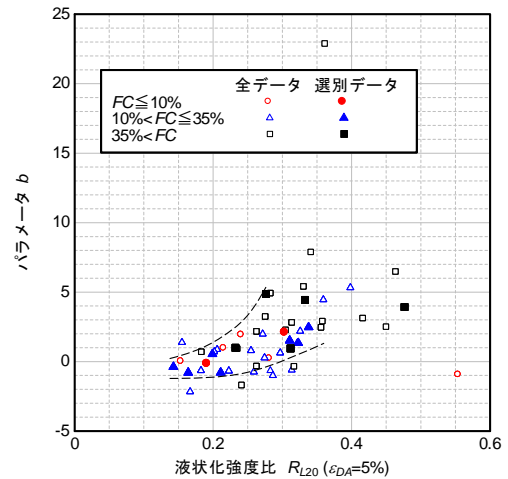


図7 パラメータ b と R_{L20} の関係

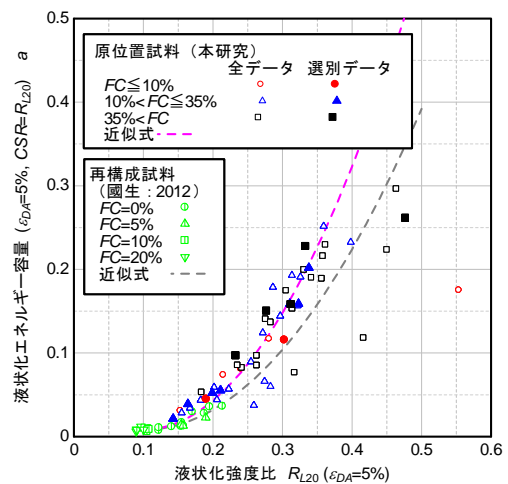


図8 液状化エネルギー容量 ($\varepsilon_{DA}=5\%$, $CSR=R_{L20}$) と R_{L20} の関係

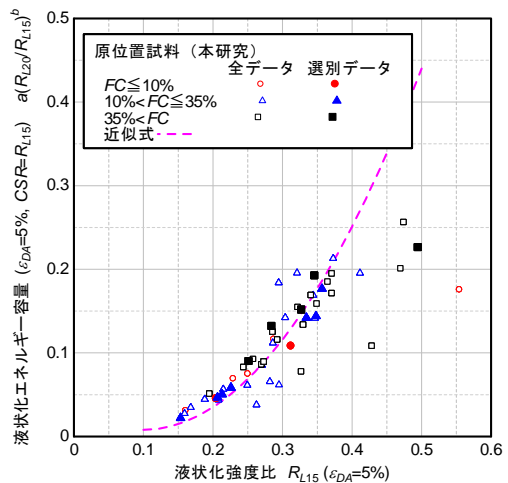


図9 液状化エネルギー容量 ($\varepsilon_{DA}=5\%$, $CSR=R_{L15}$) と R_{L15} の関係

$$N_a = c_{FC} (N_1 + 2.47) - 2.47 \quad (4.5b)$$

$$c_{fc} = \begin{cases} 1 & (FC < 10\%) \\ (FC + 20)/30 & (10\% \leq FC < 40\%) \\ (FC - 16)/12 & (FC \leq 40\%) \end{cases} \quad (4.5c)$$

ここに、 N_a は粒度の影響を考慮した補正 N 値、 c_{fc} は細粒分含有率による N 値の補正係数である。式(4.3)および(4.5)を組み合わせることで N_1 値から算出される液状化エネルギー容量 $\Sigma\Delta W/\sigma'_c$ と、採取試料による $CSR=R_{L20}$ のときの液状化エネルギー容量 a の関係を、図 11 で比較する。

図 11 の全データを見ると、実験値と計算値の関係は著しいばらつきを有する。これに対し、地盤材料のばらつきの比較的小さい選別データに限定すれば、両者の対応関係が 1:1 に近づくものの、標準貫入試験データを基にした液状化エネルギー容量の推定には大きな不確実性が伴うことが分かる。この主要因は式(4.5)により N_1 値から R_L を介してエネルギーを算出する過程でのデータのばらつきに起因するものである。つまり、エネルギー法であっても実地盤の液状化特性を N_1 値から推定する限りは推定精度に誤差が含まれることとなることから、精度よく把握するためには、原位置試料に対する室内試験を実施するのが望ましいと言える。

5. まとめ

本報では、エネルギーに基づく液状化判定法の実用化に向けた一検討段階として、液状化エネルギー容量、液状化強度比および換算 N 値 N_1 の関係について分析を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- 1) 原位置試料の液状化エネルギー容量 $\Sigma\Delta W/\sigma'_c$ ($\varepsilon_{DA}=5\%$) は、密度や粒度、コンシステンシー、年代効果等を反映し、多様性を有する。
- 2) 液状化強度比 R_L が大きい場合、繰返し三軸試験で得られる液状化エネルギー容量～両振幅軸ひずみの関係が繰返し応力比 CSR (あるいは液状化繰返し回数 N_L) によって異なる。一方、原位置地盤での地震時応力状態をより忠実に再現できる繰返し中空ねじり試験の結果にはその傾向が認められない。
- 3) 繰返し三軸試験では繰返し中空ねじり試験と異なり、伸張側に軸ひずみが累積する特性があり、 R_L が大きな試料で載荷応力振幅が大きくなるほどその傾向が強まる。三軸試験結果での液状化エネルギー容量～両振幅軸ひずみの非一意性は、この伸張側へのひずみの累積挙動と密接に関わっていることを、多くの原位置採取試料の三軸試験データに基づいて示した。
- 4) 上記 3) に述べた特性を考慮し、同一試料に関する一連の試験データから繰返し応力比 $CSR=R_{L20}$ に対応する液状化エネルギー容量を算出して液状化強度比 R_{L20} と対比したところ、原位置試料の液状化エネルギー容量～ R_{L20} 関係は、 $R_{L20} \leq 0.22$ 程度の範囲の再構成試料に対して得られた國生の実験式と概ね調和

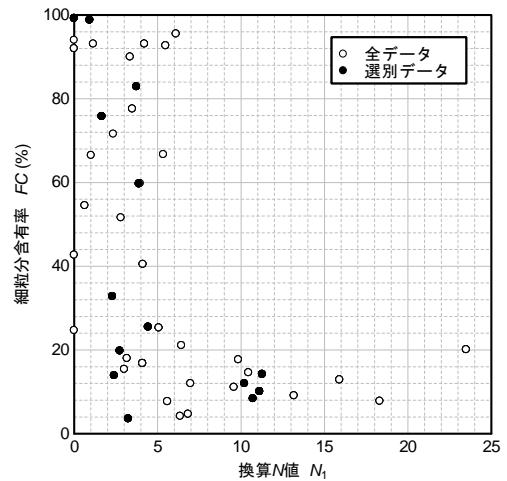


図 10 検討対象データの N_1 値および FC の範囲

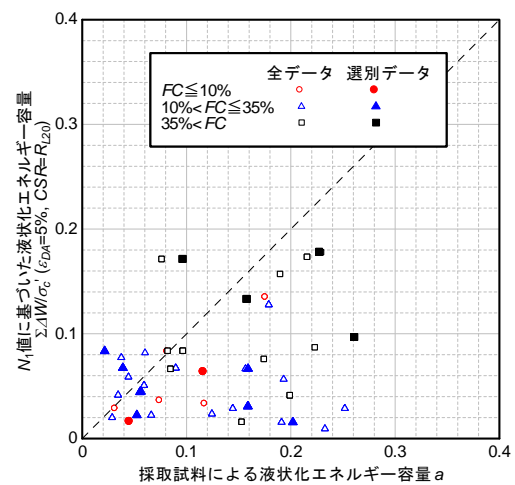


図 11 N_1 値に基づいた液状化エネルギー容量と採取試料による液状化エネルギー容量 ($\varepsilon_{DA}=5\%$, $CSR=R_{L20}$)

的であった。ただし、國生の式から求まる液状化エネルギー容量は試験データに対してやや小さめの値を与えることから、國生の実験式と原位置試料の両者に適合する修正式を提示した。あわせて、 $CSR=R_{L15}$ に対応する液状化エネルギー容量と 15 回強度 R_{L15} の関係を調べ、その相関式も提示した。

- 5) 上記 4) の液状化エネルギー容量～ R_L 関係と、既往の $R_L \sim N_1$ 関係式を組み合わせることで、 N_1 に基づいた液状化エネルギー容量の算出することができる。ただし、その推定精度には当然ながら N_1 から R_L を介してエネルギーを推定する過程で生じる不確実性が伴うこととなる。

以上のように、一見エネルギーの一意性が成り立たないように見える繰返し三軸試験結果から、一意的なエネルギー～液状化強度比関係を算出することが可能であり、これを用いて従来の F_L 法の強度データからエネルギー法による液状化エネルギー容量を算出できる。

今後は、繰返し三軸試験データに基づく液状化エネルギー容量の求め方について、さらなる検証が必要となる。

また、伸張側へのひずみ累積の問題の無い繰返し中空ねじりせん断試験による原位置試料の試験データの蓄積も、課題として挙げられる。

謝辞

3.3 節に示した繰返し中空ねじり試験データの一部は、日本大学短期大学部建築・生活デザイン学科酒匂教明教授から提供いただいた。ここに深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) Towhata, I. & Ishihara, K.: Shear work and pore water pressure in undrained shear, *Soils & Foundations*, Vol.25, No.3, pp.73-84, 1985.
- 2) Yanagisawa, E. & Sugano, T.: Undrained shear behaviors of sand in view of shear work, *Proc. Intern. Conf. on SMFE (Special Volume on Performance of Ground and Soil Structures during Earthquakes)*, New Delhi, India, Balkema Publishers, pp.155-158, 1994.
- 3) Figueroa, J. L., Saada, A. D., Liang, L. & Dahisaria, N. M.: Evaluation of soil liquefaction by energy principles, *Journal of Geotech. Eng.*, ASCE, 120 (9), pp.1554-1569, 1994.
- 4) 國生剛治, 金子陽輔, 岡田侑子: 正弦波・不規則波繰返し載荷による砂の損失エネルギーと液状化挙動, *地盤工学ジャーナル*, Vol.13, No.3, pp.205-221., 2018.9.
- 5) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳沢栄司: 地盤に入力された累加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*, 631, III-48, pp.161-177, 1999.9.
- 6) 下村修一, 安達俊夫, 酒匂教明: エネルギーの釣合に基づく地盤の地震時挙動の評価に関する研究—飽和砂地盤の損傷程度及び入力エネルギーの評価—, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.75, No.650, pp.807-815, 2010.4.
- 7) 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, 2013.8.
- 8) 三森祐貴, 國生剛治: エネルギーによる液状化判定法と FL 法との比較—種々の地震動・地盤条件での検討—, *地盤工学ジャーナル*, Vol.9, No.4, pp.603-618., 2014.
- 9) 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: 補遺, *地盤工学ジャーナル* Vol.11, No.3, pp.283-293., 2016.
- 10) (公社) 地盤工学会 エネルギーに基づく液状化予測手法に関する研究委員会: エネルギーに基づく液状化予測手法に関するシンポジウム 委員会活動報告及び論文集, 2019.3.
- 11) 龍岡文夫, 岩崎敏男, 常田賢一: N 値—有効拘束圧—平均粒径を用いた飽和砂質土の非排水動的強度の簡易推定法, 第13回土質工学研究発表会発表講演集, pp.477-480, 1978.6.
- 12) 岩崎敏男, 常田賢一, 木全俊雄: 地震時における砂質地盤の液状化判定法と耐震設計への適用に関する研究, *土木研究所資料*, 第 1729 号, 1981.9.
- 13) 佐々木康, 松本秀鷹, 近藤益央: 室内土質試験に基づく液状化強度 —細粒分含有率の影響—, *土木研究所資料*, 第 2590 号, 1988.2.
- 14) 松尾修: 道路橋示方書における地盤の液状化判定法の現状と今後の課題, *土木学会論文集*, No.757/III-66, pp.1-20, 2004.
- 15) 佐々木哲也, 石原雅規, 谷本俊輔, 林宏親, 江川拓也, 鷺見浩司, 川口剛: 細粒分を含む砂の液状化強度特性に関する再検討, *土木研究所資料*, 第 4253 号, 2016.3.

Empirical correlation between liquefaction energy capacity and cyclic resistance ratio for in-situ intact samples

Shunsuke TANIMOTO¹ and Takaji KOKUSHO²

- 1 Senior Researcher, Soil Mechanics and Dynamics Research Team, Geology and Geotechnical Engineering Research Group, Public Works Research Institute
- 2 Professor Emeritus, Department of Civil & Environment Eng., Chuo University

Abstract

Development of energy-based method for liquefaction potential evaluations for practical use is undertaken in recent years. To find uniqueness between liquefaction behavior and the cumulative dissipated energy during the liquefaction process is important to establish the energy-based method. In this study, correlations between the cumulative dissipated energy and cyclic resistance ratio (CRR) in the stress-based method (F_L -method) obtained from a series of undrained cyclic triaxial tests on various intact samples from in situ were investigated. As the result, the dissipated energy is found to be almost uniquely correlated to CRR by correcting the energy, though the energy is apparently dependent on cyclic stress ratio in cyclic triaxial tests, because axial strain tends to accumulate on extension side. The obtained correlation can be applied to the energy-based liquefaction potential evaluation irrespective of the density, grain-size, consistency and the aging effect of soils.

Key words: liquefaction potential evaluation, liquefaction energy capacity, cyclic resistance ratio, SPT-N value, in-situ intact sample