

原位置サンプリング試料を用いた非排水繰返し三軸試験結果のエネルギー的観点での評価

東北大学 学 ○山口輝大 正 加村晃良 フ 風間基樹

1. はじめに

地盤物性に、不均質性・不確実性があるため、それを考慮した信頼性設計が行われるようになってきた。しかし、これまで静的物性に関しては検討されているものの、液状化の予測・判定に使われる非排水せん断特性の信頼性に関しては、検討は行われてこなかった。本研究では、この点について土木研究所が2011年東北地方太平洋沖地震の後に実施した土質試験結果をエネルギー的観点に基づいて検討した結果を報告する。

2. 本検討で用いた実験データ

本検討では、土木研究所の実施した東日本大震災時に液状化した14地点、54深度、総数227本の非排水繰返し強度試験結果のうち、液状化強度曲線が無理なく描ける表1に示す9地点、14深度、51供試体の実験データを用いた。試験の終了条件は、両振幅軸ひずみ $\epsilon_{DA}=5\%$ に達した時である。報告書では、原位置試料に対して一連の室内試験供試体の細粒分含有率(Fc)が±20%、乾燥密度 ρ_d が±0.2g/cm³、初期せん断剛性率 G_0 が0.5~1.5倍の範囲内にあるものを対象とすることで、供試体のばらつきはその範囲内にあるものと判断している。表1に選んだデータはすべて土木研究所のこの判断基準を満たしたものである。これらの液状化強度曲線14本を図1に示す。

応力比のばらつきの程度を検討するため、複数の試験結果をもとに近似された液状化強度曲線を真値とした偏差を求めた(表1の右端欄)。表1を見ると、Fcが小さいほど、また、繰返し回数Nが少ないほど、応力比のばらつきが大きくなることがわかる。

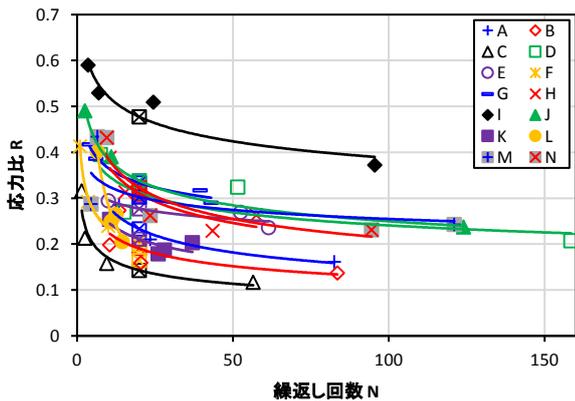


図1 検討に用いた14地点の液状化強度曲線 (DA=5%までの繰返し回数と応力比の関係)

3. 応力比一定試験の累積損失エネルギーでの評価

図2は表1の51供試体の繰返しせん断試験における正規化累積損失エネルギーと各サイクルにおける最大過剰間隙水圧比の関係を描いたものである。試験終了時の正規化累積損失エネルギーの平均値の違いは、Cの

4試料の0.024が最小、Iの4試料の0.225が最大で、約10倍の差がある。各サイクルにおける過剰間隙水圧比が0.4の時点で比較した場合は、Cの4試料の0.0015が最小、Iの4試料の0.041が最大であり、差は約27倍となる。したがって、CとIの R_{L20} の0.143~0.477(3.34倍)に比較して、ある過剰間隙水圧比までの累積損失エネルギーの方が感度の良い指標であることがわかる。

表1 非排水繰返しせん断試験 供試体の諸元

識別番号	繰返し回数N	応力比 R	液状化強度 R_{L20}	正規化累積損失エネルギー(NDE)	最大過剰間隙水圧比	細粒分含有率 Fc(%)	N1	R_{L20} の NDE	偏差 ΔR	
A	1	82.5	0.161	0.233	0.154	0.887	3.9	0.084	0.002	
	2	23.5	0.210		0.089	0.912			44.2	-0.013
	3	11.5	0.257		0.080	0.935			51.9	-0.013
	4	13.5	0.285		0.094	0.800			44.6	0.026
B	1	83.5	0.137	0.190	0.062	0.986	3.2	0.033	0.003	
	2	20.5	0.159		0.033	0.981			3.5	-0.030
	3	10.5	0.198		0.033	0.957			11.9	-0.025
	4	13.5	0.273		0.059	0.968			8.1	0.064
C	1	56.5	0.117	0.143	0.020	0.988	11.3	0.022	0.007	
	2	9.5	0.158		0.023	0.971			15	-0.014
	3	2.5	0.213		0.022	0.954			17	-0.027
	4	1.5	0.316		0.031	0.949			19.3	0.043
D	1	158.5	0.207	0.312	0.301	0.959	1.7	0.194	-0.017	
	2	15.0	0.270		0.091	0.939			85	-0.057
	3	51.5	0.324		0.239	0.923			89.5	0.056
	4	7.5	0.395		0.124	0.826			78.8	0.029
E	1	61.5	0.236	0.277	0.274	0.925	3.7	0.185	-0.014	
	2	52.5	0.269		0.265	0.932			87.1	0.015
	3	10.0	0.294		0.087	0.921			84	-0.002
F	1	10.0	0.239	0.199	0.051	0.990	2.7	0.063	0.004	
	2	3.5	0.292		0.038	0.935			3.2	-0.010
	3	1.0	0.413		0.037	0.872			37.1	0.006
G	1	43.0	0.290	0.333	0.369	0.770	0.9	0.262	-0.011	
	2	39.5	0.317		0.349	0.746			99.1	0.012
	3	6.0	0.386		0.103	0.798			98.6	-0.005
	4	4.0	0.417		0.090	0.709			98.3	0.004
H	1	43.5	0.229	0.311	0.234	0.906	2.3	0.143	-0.026	
	2	57.5	0.263		0.240	0.942			44.3	0.025
	3	15.5	0.313		0.139	0.976			35.8	-0.018
	4	10.5	0.388		0.116	0.830			33.7	0.023
I	1	95.5	0.372	0.477	0.640	0.605	0.0	0.370	-0.018	
	2	24.5	0.509		0.313	0.576			98.9	0.044
	3	7.0	0.529		0.130	0.630			99.5	-0.017
	4	3.5	0.590		0.107	0.638			99	-0.007
J	1	124.0	0.237	0.338	0.477	0.917	2.4	0.221	-0.003	
	2	11.0	0.390		0.149	0.861			18.8	0.012
	3	2.5	0.490		0.078	0.759			16.8	-0.009
K	1	26.0	0.179	0.211	0.036	0.951	4.4	0.078	-0.019	
	2	28.0	0.187		0.052	0.984			34.3	-0.008
	3	37.0	0.203		0.083	0.978			43.3	0.020
	4	10.5	0.254		0.055	0.990			41.3	0.009
L	1	14.5	0.205	0.164	0.038	0.969	11.1	0.024	-0.009	
	2	11.0	0.250		0.064	1.033			1.9	-0.015
	3	12.5	0.264		0.065	0.979			18.9	0.024
	4	6.5	0.401		0.071	0.952			1.6	0.001
M	1	121.0	0.243	0.303	0.402	0.948	10.7	0.046	-0.007	
	2	4.5	0.287		0.043	0.795			11.1	-0.068
	3	6.5	0.434		0.073	0.846			1.1	0.092
N	1	94.5	0.231	0.323	0.310	0.943	10.2	0.141	0.014	
	2	23.5	0.262		0.159	0.990			5.7	-0.048
	3	9.5	0.432		0.114	0.977			5.7	0.041

Key Words: 液状化 液状化強度曲線 原位置サンプリング試料 累積損失エネルギー

〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06, 東北大学 建築・社会環境工学科 地盤工学分野

図3はそれぞれの供試体の応力比とその試験の際に費やされた正規化累積損失エネルギーの関係を示したものである。図中で、繰返し回数20回における応力比 R_{L20} は、マーカー内に×印を付けて示した。

図4に R_{L20} とそれに相当する正規化累積損失エネルギーの関係図を示す。この14ケースでは、 R_{L20} に相当する正規化累積損失エネルギーは0.022~0.370（約16.8倍）の違いがあり、 R_{L20} の比率約3.34倍の範囲より5倍程度感度が良いことがわかる。これは正規化累積損失エネルギーで液状化抵抗を評価する優位性である。

図3を詳しく見ると、同一深度における応力比が異なる試験において、 $\varepsilon_{DA}=5\%$ の試験終了条件に至るまでに費やすエネルギーに違いがあることがわかる。これは、供試体の物性のばらつきの影響以外に、応力比の影響が考えられる。つまり、応力比振幅の大小によって、供試体の材料としての破壊モードが異なることが考えられる。具体的に言えば、応力比が大きいほど局所的なせん断面の破壊が卓越すると解釈できる。逆に、応力比が小さいと、供試体内部全体でせん断に抵抗できるため、累積損失エネルギーが大きくなると解釈できる。

また、図2において、GやIなどの F_c が100%に近い供試体は、試験終了時までの最大過剰間隙水圧比が0.6~0.8となっていることがわかる。これは、 F_c が100%に近い粘性土供試体は繰返しせん断を受けても、有効応力がゼロ付近に至らないまま $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達したからである。一方、 F_c が20%以下の供試体でも過剰間隙水圧比が十分上がらず、0.9以下で試験が終了したケースが4つある。具体的には、液状化強度 R_{L20} が比較的大きいJとMの応力比の大きい試験ケースである。先に述べたように、応力比振幅を大きくしたことで局所的なせん断面の破壊が卓越したものと考えられる。これらの試験供試体では、有効応力がゼロに近づくような液状化とは異なる破壊モードで試験が終了したと考えられる。

4. まとめ

原位置試料による室内試験結果の分析から以下の結論が得られた。

- 1) 土材料の液状化抵抗を表す指標として、応力比一定試験の繰返し回数20回における応力比 R_{L20} よりも、累積損失エネルギーのほうが5倍程度感度の良い指標であることがわかった。
- 2) 応力比一定試験において、両振幅軸ひずみ5%発生を試験終了条件とすると、試験終了時までに過剰間隙水圧比が0.9に達しないものがある。これは、 F_c が100%に近い試料と F_c が20%以下で比較的液状化抵抗の大きい試料に大きな応力比を作用させたケースである。これらの試験供試体では、有効応力がゼロに近づくような液状化とは異なる破壊モードで試験が終了したと考えられる。

5. 参考文献

- 1) 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の評価法に関する再検討, 土木研究所資料, 第4352号, 2016.3.

- 2) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳沢栄司, 地盤に入力された累積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, No.631/III-48, pp.161-177, 1999.
- 3) 山口輝大, 加村晃良, 金鍾官, 風間基樹, 原位置サンプリング試料を用いた非排水繰返し三軸試験結果の信頼性とランダム地震動入力の影響について, 第15回日本地震工学シンポジウム, GO12-02-08, 2018.

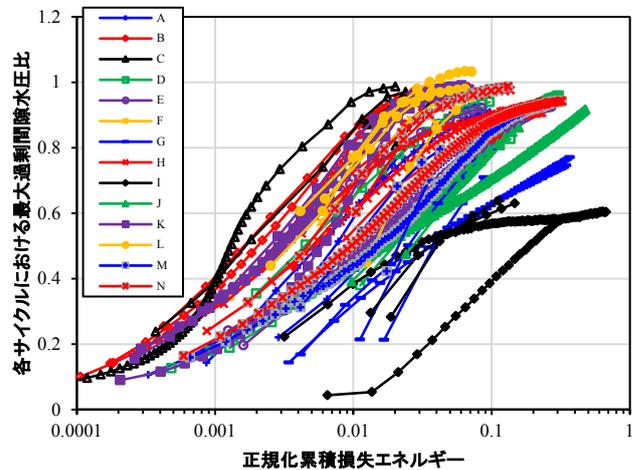


図2 応力比一定試験の正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係

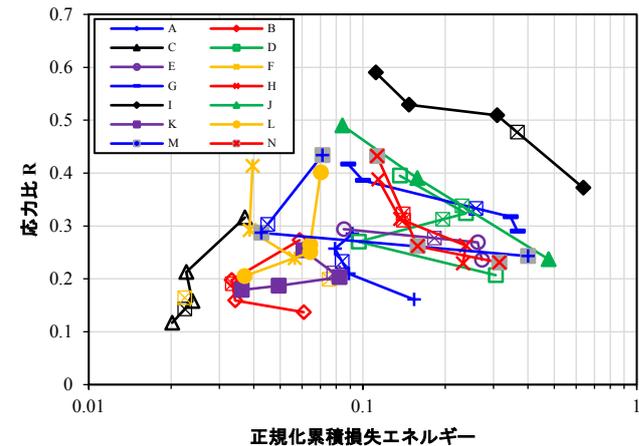


図3 応力比一定試験の正規化累積損失エネルギーと応力比, R_{L20} の関係

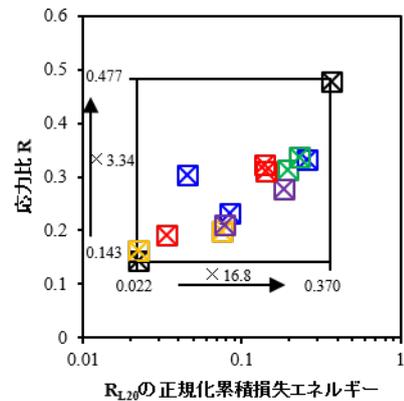


図4 R_{L20} と R_{L20} に相当する正規化累積損失エネルギーの関係