

III-216 液状化時の過剰間隙水圧発生とエネルギー量の関係について

㈱フジタ技術研究所 正会員 中野浩之、斉藤悦郎

1. はじめに

本文ではエネルギー量を指標とした観点から液状化現象を解明するため、豊浦標準砂を用いた繰り返し三軸試験を実施し、得られた応力～ひずみ関係から2つのエネルギー量(損失エネルギー、弾性ひずみエネルギー)を求め、これらのエネルギー量と過剰間隙水圧の発生状況の関係を比較考察した。

2. 要素試験の方法と結果

繰り返し三軸試験の供試体(直径 $d_s=7.5\text{cm}$ 、高さ $h_s=15\text{cm}$)は乾燥砂を自由落下させ、炭酸ガス置換を施し、脱気水で飽和させて作製した。載荷は周波数 $f=0.1\text{Hz}$ の応力制御方式で行った。試験に用いた豊浦標準砂は $G_s=2.64$ 、 $e_{\max}=0.977$ 、 $e_{\min}=0.605$ であり、表-1に試験ケースと試験結果の一覧を示す。なお試験機・試験方法の詳細については前報告¹⁾を参照されたい。

3. エネルギー量の算出

一般に土は繰り返し載荷に伴い図-1に示すヒステリシスを描きながら、載荷時にひずみエネルギーを蓄え、除荷時にエネルギーを解放していく。このことから液状化試験の応力～ひずみ関係を用いて次の2つのエネルギー量を定義した。ひとつは、図-1(a)に示す斜線部分の面積で表される弾性力によって蓄えらるひずみエネルギー、もうひとつは(b)に示すサイクル毎に失われる損失エネルギーである。前者の弾性ひずみエネルギーが荷重の載荷状態に依存する「状態量」であるのに対して、後者の損失エネルギーはヒステリシスループによって囲まれた面積の和で表される「蓄積量」である。エネルギーの具体的な算出は、三軸試験で得られる軸応力と軸ひずみ(上限10%)の関係から、損失エネルギーについては応力がゼロの軸に対し半サイクル毎にループの面積を求め、弾性ひずみエネルギーについては各ループの除荷点と再載荷点の応力・ひずみ値に対して $1/2 \cdot \sigma \cdot \varepsilon$ で求めた。三軸試験の場合、ねじり試験と違い応力状態が圧縮と引張で異なるためひずみエネルギーも圧縮側に対して引張側が大きくなる。図-2には一例として、試験N0-18の場合の軸荷重 σ_d 、軸ひずみ ε_a 、過剰間隙水圧 Δu 、平均有効主応力 p' の経時変化、および上記の方法で算出した単位体積当りの弾性ひずみエネルギー E_p (J/m^3)と損失エネルギー E_L (J/m^3)をそれぞれ示す。

4. エネルギー量と過剰間隙水圧に関する考察

【損失エネルギーと過剰間隙水圧増加の関係】 前述した試験結果をもとに各ケースの損失エネルギー E_L と過剰間隙水圧 Δu の発生状況を比較した。図-3には相対密度 D_r 一定の条件下で拘束圧 σ_c を変えた場合の「 $E_L \sim \Delta u$ 」の関係を示し、図-4には σ_c 一定の条件下で D_r を変えた場合の関係を示す。通常、 Δu の発生は σ_c 、 D_r の他に応力比 R や繰り返し回数 N に影響を受けるが、損失エネルギー E_L で整理すると σ_c 、 D_r が同一条件のもとでは Δu は E_L に依存することがわかる。この関係は振動数が違う場合(N0-27)や載荷が不規則な場合(N0-26)でも同様であり Δu の発生(体積収縮)は E_L の関数で表現できる。

【弾性ひずみエネルギーと有効応力の回復の関係】 砂が密な場合には、非排水繰り返しせん断中にせん断応力 $\tau=0$ で有効応力が一時的にゼロになっても、さらにせん断応力が加わった場合、正のダイラテンシーにより負の過剰間隙水圧が発生し、せん断抵抗力が増加することが知られている。体積膨張はせん断応力が載荷中のみに生ずる「状態量」であることから、体積膨張に関係する量として前述した「状態量」のエネルギーである弾性ひずみエネルギー E_p に着目した。ここでは体積膨張の大きさの代わりに、載荷に伴い一時的に回復する平均有効主応力 p' の振幅値 p'_a を取り上げ、「 $E_p \sim p'_a$ 」の関係を求めてみた。図5、6に σ_c 、 D_r をそれぞれ変えた場合の結果を示す。これらの図を見ると有効応力の回復度は弾性ひずみエネルギー E_p に依存し、両者の間には一意的な関係があることがうかがえる。

以上のことから、今後エネルギー量を指標として間隙水圧のモデル化を行う場合、体積収縮については損失エネルギーを、体積膨張については弾性ひずみエネルギーをひとつの指標にできることが推測される。

5. まとめ

本研究では繰り返し三軸試験結果から、拘束圧 σ_c 、相対密度 Dr が一定状態にある飽和砂が地震荷重のような繰返しせん断を受けた場合
①過剰間隙水圧の発生量（または体積収縮に要する仕事量）は載荷中に要素内に蓄積されるエネルギーの損失量に依存すること、②密な砂に見られる有効応力の回復度（または体積膨張の際なされる仕事量）は弾性ひずみエネルギーに関係することを示した。

最後に、試験実施にあたりお世話になった福島伸二氏、望月美登志博氏、およびご助言を頂いた東京都土木技術研究所の小川好氏に感謝致します。

表-1 試験ケースと試験結果

NO	σ_c	Dr (%)	$\frac{2\sigma_d}{\sigma_c}$	N_s	N_{10}	NO	σ_c	Dr (%)	$\frac{2\sigma_d}{\sigma_c}$	N_s	N_{10}
1	1.0	65.2	0.200	4.2	4.9	18	1.0	81.5	0.298	6.4	11.5
4	1.0	75.5	0.190	59.5	61.5	19	1.0	56.5	0.173	8.6	9.2
5	1.0	57.1	0.289	0.7	1.3	29	1.0	71.3	0.170	26.0	27.4
7	1.0	78.6	0.171	150	150	26	1.0	73.0	0.15~0.27	—	—
8	1.0	63.3	0.171	6.3	7.1	27	1.0	75.7	0.243	5.2	7.3
9	1.0	35.7	0.173	1.1	1.2	22	0.5	59.0	0.175	7.7	8.3
11	1.0	56.9	0.142	23.6	24.1	38	0.5	75.8	0.247	6.4	8.4
12	1.0	28.6	0.143	6.6	6.8	21	1.5	58.8	0.200	2.0	2.4
14	1.0	32.3	0.190	0.6	0.8	37	1.5	76.7	0.330	2.8	4.8
15	1.0	75.9	0.291	3.9	6.2	32	2.0	37.1	0.123	7.1	7.3
16	1.0	33.3	0.126	17.1	17.3	23	2.0	58.9	0.171	10.0	10.5
17	1.0	76.0	0.195	47.1	49.5	36	2.0	78.1	0.250	4.8	7.3

N_s : 軸ひずみ $DA=5\%$ までの繰返し回数, N_{10} : 軸ひずみ $DA=10\%$ までの繰返し回数, N_{26} : 0.2Hz 載荷, N_{27} : 不規則波形
 σ_c 単位 $kgf/cm^2 = 98KPa$

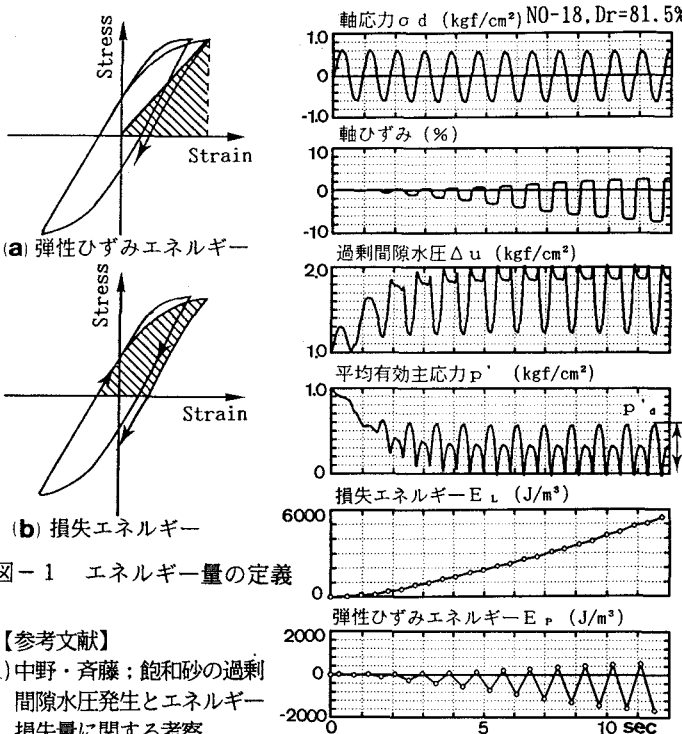


図-1 エネルギー量の定義

【参考文献】

- 1) 中野・斉藤：飽和砂の過剰間隙水圧発生とエネルギー損失量に関する考察, 第28回土質工学研究発表会

図-2 エネルギー量の経時変化

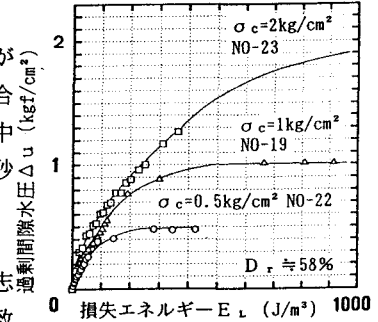


図-3 $\Delta u \sim E_L$ の関係 (拘束圧)

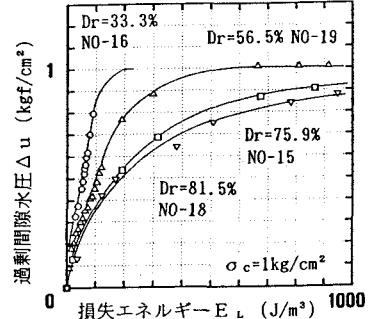


図-4 $\Delta u \sim E_L$ の関係 (相対密度)

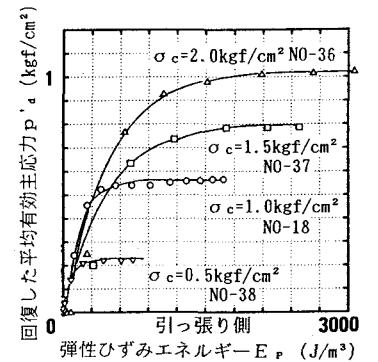


図-5 $p'_a \sim E_P$ の関係 (拘束圧)

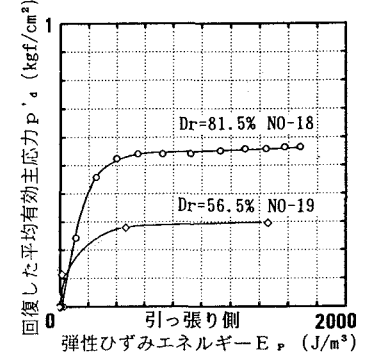


図-6 $p'_a \sim E_P$ の関係 (相対密度)