

エネルギーに基づく岩ずり埋立地盤の液状化予測

電力中央研究所	正会員	○石丸 真，沢津橋 雅裕
セレス		平賀 健史
ニュージェック	正会員	鈴木 達也，大橋 豊
電源開発	正会員	中村 智
関西電力	正会員	横田 克哉

1. はじめに

原子力発電所の新規制基準適合性審査においては、従来、液状化しにくいとされてきた礫質土や岩ずり等の地盤に対しても、液状化判定や液状化の影響を考慮した安定性評価が求められている。しかしながら、礫質土や岩ずりでは要素試験や模型実験の事例が少ないことから、合理的な評価が難しい可能性がある。

本研究では、合理的な液状化評価に資することを目的とし、岩ずりを用いた遠心力模型実験¹⁾に対して、エネルギーに基づく液状化予測手法^{例えば 2)}の適用性を検証した。

2. 岩ずりの物性値³⁾

本研究で用いた試料は、最大粒径 $D_{\max}=53.0\text{mm}$ 、平均粒径 $D_{50}=4.42\text{mm}$ 、均等係数 $U_c=55.7$ 、細粒分含有率 $F_c=6.5\%$ の凝灰角礫岩ずりである。室内要素試験の供試体（ $\phi 300 \times h 600\text{mm}$ ）および地盤模型は、 $\rho_d=1.65\text{Mg/m}^3$ （締固め度98%）になるように、適宜分割して締固めて作製した。図-1に動的変形特性を示し、図-2には液状化強度試験における正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比の関係を示す。図-2より、正規化累積損失エネルギーが0.02以上で過剰間隙水圧比が概ね0.95以上となっていることが確認できる。なお、液状化強度（ $DA=5\%$ 、 $N_c=20$ 基準）は、拘束圧 $\sigma'_v=50\text{kPa}$ で0.29、 $\sigma'_v=100\text{kPa}$ で0.44である。

3. 遠心力模型実験

図-3 に、地盤模型の形状と計測器配置図を示す。剛土槽（内寸：幅 900×高さ 300×奥行 300mm）内に前述の岩ずりと、遠心加速度に応じた粘度の粘性流体（シリコンオイル）を用いて飽和地盤模型を 2 体作製した。その後、遠心加速度をケース 1) は 30G、ケース 2 は 50G として、2 ケースの振動実験を行った。入力波は周波数 60Hz の正弦波 40 波（前後に各 4 波のテーパー付き）とした。各ケースの土槽底面で計測された水平加速度の最大値（実規模換算値、以降のデータは全て実規模換算した値で示す）は、ケース 1：12.01m/s²、ケース 2：13.73m/s²であった。

ケース 1 における加振終了までの水平加速度の時刻歴応答を図-4 に示す。図より、地盤深部（AC2-H）では土

層底面より増幅しており、加振終了まで減衰していない
 様子が確認できる。一方、地表面の水平加速度は、加振開

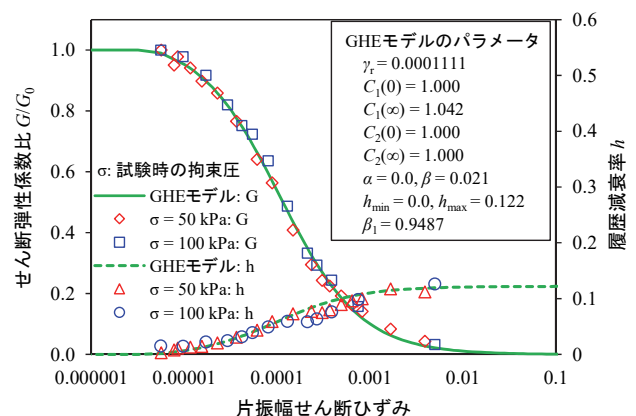


図-1 岩ずりの動的変形特性

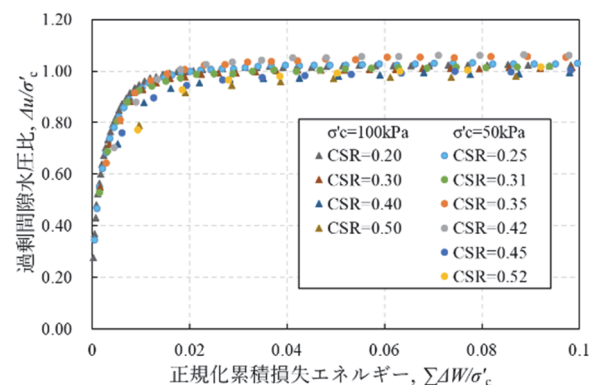


図-2 正規化累積損失エネルギーと過剰間隙水圧比³⁾

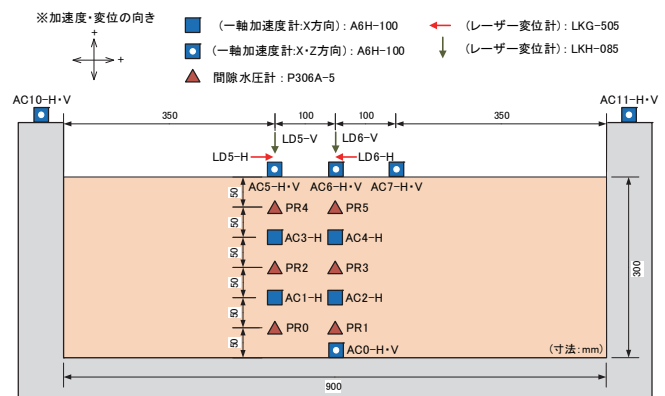


図-3 地盤模型と計測器配置図¹⁾

キーワード 岩ずり，液状化，損失エネルギー，遠心力模型実験，地震応答解析

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 電力中央研究所 地球工学研究所 地震工学領域

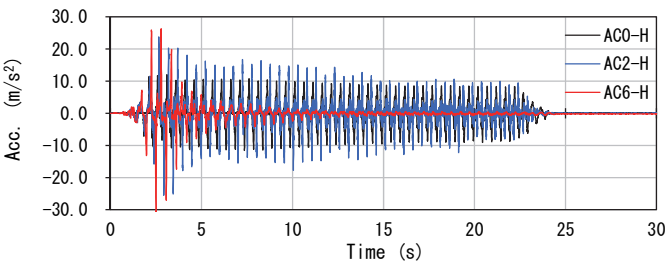


図-4 水平加速度の時刻歴応答（ケース 1）

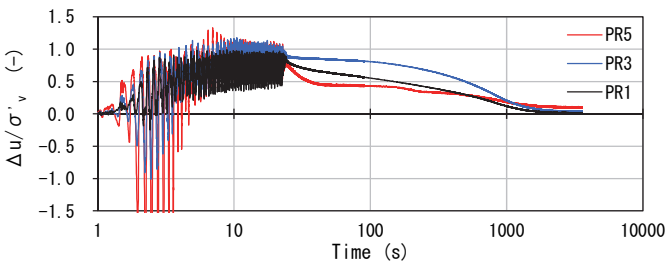


図-5 過剰間隙水圧比の時刻歴応答（ケース 1）

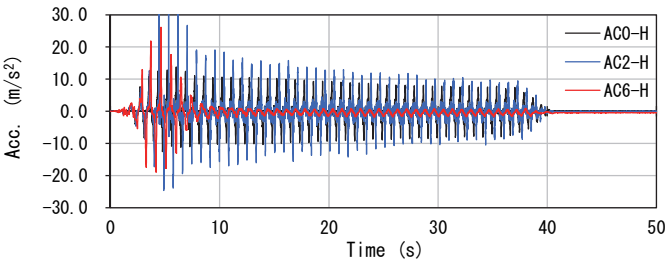


図-6 水平加速度の時刻歴応答（ケース 2）

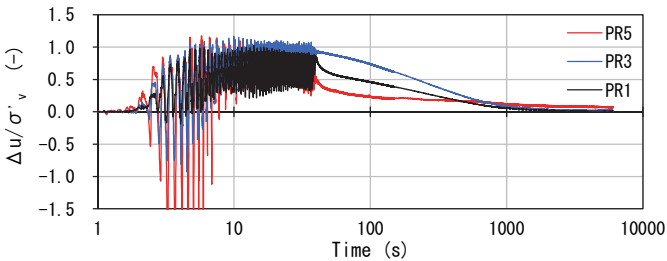


図-7 過剰間隙水圧比の時刻歴応答（ケース 2）

始から約 4 秒までは過大なスパイク状の応答が見られるが、その後、ほぼ一定振幅の大幅に低減した値になっていることがわかる。図-5 には、ケース 1 における水圧消散までの過剰間隙水圧比の時刻歴応答を示す。図より、いずれの深度も水圧比はほぼ 1 に達していることが確認できる。なお、地盤中央より上部では加振開始から約 4 秒までは大きな負圧が発生しており、加速度のスパイク状の応答との関係が推測される。

ケース 2 についても、水平加速度と過剰間隙水圧比の時刻歴応答を図-6、図-7 にそれぞれ示すが、ケース 1 と概ね同様の傾向である。なお、水圧消散後の地盤模型中央の沈下量は、ケース 1 で 65mm、ケース 2 で 133mm であり、これを加振前の地盤高さで除した残留鉛直ひずみは、それぞれ 0.72%、0.88%である。

4. エネルギーに基づく液状化予測

上記の遠心力模型実験に対して、土槽底面の水平加速度波形と 2 章で示した物性値を用いて、逐次積分法による一次元地震応答解析（全応力非線形解析）を行い、下式に基づき正規化累積損失エネルギー $\sum \Delta W / \sigma'_v$ を算出した。

$$\sum \Delta W / \sigma'_v = \int_0^t \tau(\gamma) \dot{\gamma}(t) dt / \sigma'_v \tag{1}$$

ここに、 τ ：せん断応力、 γ ：せん断ひずみ、 σ'_v ：初期鉛直有効応力、 t ：時間である。

得られた各層（層厚 1.0m）の $\sum \Delta W / \sigma'_v$ を表-1 に示す。これより、地表面に近い第 1 層を除く全ての層で $\sum \Delta W / \sigma'_v$ は 0.02 以上となっていることが確認できる。したがって、図-2 との比較からほぼ全層で液状化と判断され、これは図-5、図-7 の遠心力模型実験の結果とも整合している。

5. おわりに

本研究では、岩ずり埋立地盤を想定した遠心力模型実

表-1 地震応答解析による正規化累積損失エネルギー

層番号	層中心深度 (m)	初期鉛直 有効応力 (kPa)	正規化累積損失エネルギー	
			ケース1	ケース2
1	0.5	5.1	0.004	0.001
2	1.5	15.3	0.081	0.027
3	2.5	25.5	0.068	0.069
4	3.5	35.6	0.045	0.070
5	4.5	45.8	0.034	0.061
6	5.5	56.0	0.035	0.050
7	6.5	66.2	0.045	0.041
8	7.5	76.4	0.058	0.035
9	8.5	86.5	0.069	0.032
10	9.5	96.7		0.032
11	10.5	106.9		0.035
12	11.5	117.1		0.040
13	12.5	127.3		0.044
14	13.5	137.4		0.049
15	14.5	147.6		0.055

験を対象に、過剰間隙水圧の上昇に着目して、エネルギーに基づく液状化予測手法の適用性を検証した。別報⁴⁾では、表-1 に示したエネルギーを用いて、液状化後の残留沈下量を評価した結果について報告する。

謝辞

本論文では、2018 年度原子力リスク研究センター共通研究（北海道電力、東北電力、東京電力ホールディングス、中部電力、北陸電力、関西電力、中国電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電、電源開発、日本原燃）における、岩ずりの遠心力模型実験結果を使用しました。

参考文献

1) 石丸ほか：岩ずり地盤の液状化を対象とした遠心力模型実験、土木学会第 74 回年次学術講演会，2019。
2) 風間ほか：地盤に投入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) 沢津橋ほか：エネルギー法に基づく岩ずり埋立地盤の液状化特性評価，第 55 回地盤工学研究発表会，2020。
4) 沢津橋ほか：エネルギーに基づく岩ずり埋立地盤の液状化後の沈下量評価，土木学会第 75 回年次学術講演会，2020。