

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

電力中央研究所 正会員 ○沢津橋 雅裕, 石丸 真
セレス 平賀 健史
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、従来は液状化しないと考えられてきた岩ずりに対しても液状化評価が求められるようになってきている。しかし、これらの試料を用いた要素試験や模型実験の事例が少なく、合理的な評価が難しい場合がある。筆者らは、岩ずりに対する非排水繰返し大型三軸試験を実施し、最大せん断ひずみや累加せん断ひずみ、正規化累積損失エネルギーと残留体積ひずみの関係を取得し、正規化累積損失エネルギーと残留体積ひずみに良い相関があることを示した¹⁾。本研究では、この相関関係の適用性を既報^{2), 3)}の遠心力模型実験に対して検証することを試みた。つまり、要素試験から得られた関係式に基づき次元地震応答解析による正規化累積損失エネルギーから求めた沈下量と、遠心力模型実験での沈下量を比較した。

2. 要素試験方法

文献¹⁾で報告した試験の概要を以下に述べる。

本研究では、大型三軸試験機を用いて非排水繰返し載荷試験を実施した。本試験で用いた試料は、細粒分を比較的多く含む岩ずり（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 $F_c = 6.5\%$ ）である。締固め度 $D_c = 98\%$ ($\rho_d = 1.65\text{Mg/m}^3$) になるように、直径 300mm , 高さ 600mm の供試体を5層に分けて締固めて作製した。試験においては、作製した供試体を二酸化炭素法で飽和させ、背圧 200kPa のもとで B 値が 0.95 以上になるのを確認した後に、非排水繰返し載荷を実施した。載荷条件は初期有効拘束圧 $\sigma'_c = 50, 100\text{kPa}$, 周波数 0.01Hz の正弦波とした。基本的には軸ひずみ両振幅 DA が 5% 以上になるまで繰返し載荷を行ったが、一部の試験においては、ひずみ履歴を変化させるた

めに $DA2\%$, 3.5% 以上になったら繰返し載荷を終了した。なお、 DA が 2% 以上になった時点で、過剰間隙水圧比は 95% 以上に到達している。試験後に供試体から排水し、残留体積ひずみを測定した。

3. 要素試験結果と残留体積ひずみ

図1に非排水繰返し三軸試験の応力ひずみ関係の一例を示す。繰返し載荷によって有効応力がゼロになっても軸ひずみが急増せず、せん断応力の載荷とともに剛性が回復してひずみが徐々に増加していくサイクリックモビリティが観察された。

図2, 3, 4に、残留体積ひずみ ε_v に関する最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$, 累加せん断ひずみ $\Sigma|\Delta\gamma|$, 正規化累積損失エネルギー $\Sigma W/\sigma'_c$ の関係をそれぞれ示す。 $\Sigma|\Delta\gamma|$ と $\Sigma W/\sigma'_c$ は以下の式をもとに算出した。

$$\Sigma|\Delta\gamma| = \int |d\gamma/dt| dt = 1.5 \int |d\varepsilon_a/dt| dt \quad (1)$$

$$\Sigma W/\sigma'_c = \int \sigma_d/\sigma'_c d\varepsilon \quad (2)$$

ここに、 γ : せん断ひずみ、 ε_a : 軸ひずみ、 σ_d : 軸差応力、 σ'_c : 拘束圧である。式(1)においては、ポアソン比 $\nu = 0.5$ を仮定して、軸ひずみをせん断ひずみに変換している。

最大せん断ひずみ $\gamma_{\max}$, 累加せん断ひずみ $\Sigma|\Delta\gamma|$, 正規化累積損失エネルギー $\Sigma W/\sigma'_c$ のいずれも ε_v に対して正の相関関係があるが、決定係数 R^2 の観点から

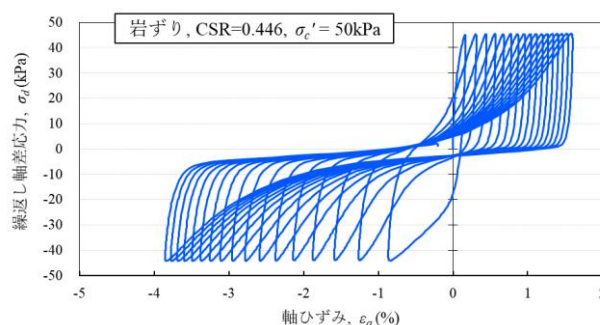


図1 非排水繰返し三軸試験の応力ひずみ関係

キーワード 岩ずり, 液状化, 沈下, 大型三軸試験, ひずみ履歴, 損失エネルギー

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 一般財団法人 電力中央研究所 TEL 080-3024-6682

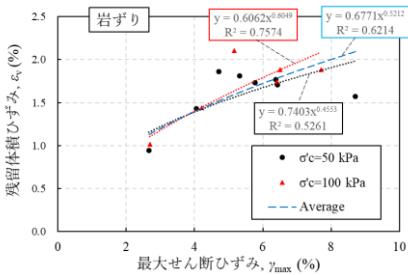


図2 最大せん断ひずみと
残留体積ひずみ

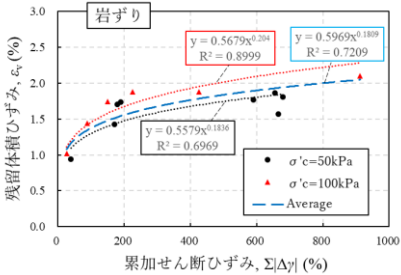


図3 累加せん断ひずみと
残留体積ひずみ

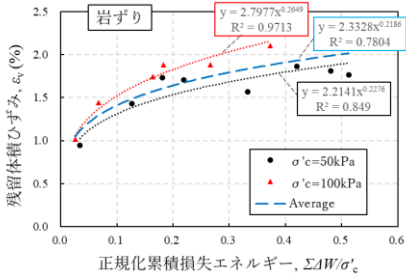


図4 正規化累積損失エネルギーと
残留体積ひずみ

表1 エネルギーに基づく沈下量予測結果 (30G)

層 番号	正規化累積損失 エネルギー $\Sigma W/\sigma'_c$ (-)	残留体積 ひずみ ε_v (%)	沈下量 (mm)
1	0.004	0.71	7.1
2	0.081	1.35	13.5
3	0.068	1.29	13.0
4	0.045	1.19	11.9
5	0.034	1.12	11.2
6	0.035	1.12	11.2
7	0.045	1.19	11.9
8	0.058	1.25	12.5
9	0.069	1.30	13.0
合計		1.17(平均)	105.1
遠心力模型実験結果(30G) ²⁾		0.72	65

は、 $\Sigma W/\sigma'_c$ との相関関係が最も強いことが読み取れる。拘束圧で場合分けしない場合の $\Sigma W/\sigma'_c$ を用いた ε_v (%) の近似式は以下の通りとなった。

$$\varepsilon_v = 2.3328 (\Sigma W/\sigma'_c)^{0.2186}$$

(3)

4. 遠心力模型実験に対する適用性検証

要素試験から得られた正規化累積損失エネルギー $\Sigma W/\sigma'_c$ と残留体積ひずみ ε_v の関係式の適用性を、文献 2), 3)での遠心力模型実験に対して検証することを試みた。具体的には、文献 3)における一次元地震応答解析で算出された地盤各層ごとの $\Sigma W/\sigma'_c$ を、式 (3)に代入することで ε_v を求め、それに各層の層厚をかけて和をとることで模型地盤の沈下量を予測し、実際の沈下量^{2), 3)}と比較した。

沈下量の予測結果と遠心力模型実験の沈下量の比較を表 1, 2 に示す。遠心力模型実験での残留体積(鉛直) ひずみ ε_v は、水圧消散後の地表面沈下量を加振前の地盤高さで除したものである。式(3)と地震応答解析の組み合わせから得られる ε_v は遠心加速度 30G で 1.17%, 50G で 1.14%であり、実際の遠心力模型実験における ε_v よりも 0.3~0.5%程度大きい。要素試験と地震応答解析を組み合わせることで予測される液状化による沈下量は、遠心力模型実験よりも保守的な評価になるものの、ある程度の精度を有しているといえ

表2 エネルギーに基づく沈下量予測結果 (50G)

層 番号	正規化累積損失 エネルギー $\Sigma W/\sigma'_c$ (-)	残留体積 ひずみ ε_v (%)	沈下量 (mm)
1	0.001	0.55	5.5
2	0.027	1.06	10.6
3	0.069	1.30	13.0
4	0.070	1.30	13.0
5	0.061	1.26	12.6
6	0.049	1.21	12.1
7	0.041	1.16	11.6
8	0.035	1.12	11.2
9	0.032	1.10	11.0
10	0.032	1.10	11.0
11	0.035	1.12	11.2
12	0.040	1.15	11.5
13	0.044	1.18	11.8
14	0.049	1.21	12.1
15	0.055	1.24	12.4
合計		1.14(平均)	170.6
遠心力模型実験結果(50G) ³⁾		0.88	133

る。

5. まとめ

本研究では、岩ずりに関して、要素試験から得られた正規化累積損失エネルギーと残留体積ひずみの関係式および地震応答解析を組み合わせることで、遠心力模型実験での沈下量を評価することを試みた。その結果として、本評価手法が、遠心力模型実験の結果よりも保守的な評価になることを示した。

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）における岩ずりの室内要素試験結果を使用しました。

参考文献

1) Sawatsubashi, M. *et al.*: Evaluation of liquefaction potential of rock debris using energy method. *Proc. of 17th WCEE*, September 2020, Sendai, Japan (in press)
2) 石丸他：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
3) 石丸他：エネルギーに基づく岩ずり埋立地盤の液状化予測、土木学会第 75 回年次学術講演会、2020