

エネルギーの釣合に基づく液状化地盤の損傷評価に関する研究 －円形せん断土槽実験のシミュレーション解析－

日大生産工 〇下村 修一 日大理工 安達 俊夫
日大短大 酒匂 教明 日大理工 山田 雅一

1. はじめに

著者らは地震時の液状化地盤の損傷程度（過剰間隙水圧の発生による有効応力の減少や地盤の軟化、地盤変形量）を簡易に評価するため、上部構造におけるエネルギーの釣合に基づく耐震設計法¹⁾を地盤分野に展開した、合理的な地盤の地震時挙動の評価法の構築を目指している^{2)～4)}。

本評価法は、式(1)に示すエネルギー平衡式が基になっている。

$$\int_0^t \{\dot{x}\}^T [M] \{\ddot{x}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T [C] \{\dot{x}\} dt + \int_0^t \{\dot{x}\}^T \{R\} dt = - \int_0^t \ddot{y} \{\dot{x}\}^T [M] \{i\} dt \quad (1)$$

ここに、 $[M]$ ：質量マトリックス、 $[C]$ ：粘性減衰係数マトリックス、 $\{R\}$ ：復元力ベクトル、 $\{\ddot{x}\}$ ：相対加速度ベクトル、 $\{\dot{x}\}$ ：相対速度ベクトル、 $\ddot{y}$ ：入力地動加速度及び $\{i\}$ ：成分が全て1のベクトルである。なお、相対加速度ベクトル及び相対速度ベクトルは入力地動加速度の設定位置に対して定義される。左辺第1項は運動エネルギー、左辺第2項は粘性減衰により吸収されるエネルギー（以下、粘性減衰エネルギーと呼ぶ）、左辺第3項は弾塑性ひずみエネルギー、右辺は入力エネルギーである。

また、式(1)は次のようにも表せる。

$$W_e + W_h + W_p = E \quad (2)$$

ここに、 W_e ：弾性振動エネルギー（ $= W_k$ ：弾性ひずみエネルギーと運動エネルギーの和であるが、地盤の弾性範囲は極めて小さいひ

ずみレベルのため、弾性ひずみエネルギーはゼロと見なせる）、 W_h ：粘性減衰エネルギー、 W_p ：累積塑性ひずみエネルギー及び E ：入力エネルギーである。

図1に本評価法のイメージ図、以下に地盤の損傷程度の評価手順を示す。なお、詳細は既報^{2)～4)}を参照されたい。

STEP① 地盤に入力する損傷に寄与するエネルギーを算出

STEP② 損傷に寄与するエネルギーの各層への分配量を算出

STEP③ 分配エネルギーから各層の液状化程度を評価

なお、損傷に寄与するエネルギーは累積塑性ひずみエネルギーが相当することになる。

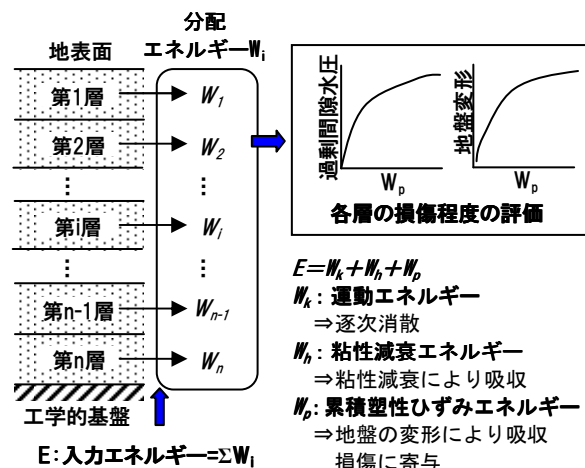


図1 本評価法のイメージ

既報⁴⁾では沈下量を対象に本評価法の有効性を確認した。本論文では円形せん断土槽実験を対象に、沈下量に加え液状化程度を示す指標の一つである過剰間隙水圧比のシミュレーション解析結果について報告する。

Study on Evaluation of Level of Damage Based on Energy Balance in Liquefied Sandy Ground

－ Simulation Analysis of the Circular Shear Box Test －

Shuichi SHIMOMURA, Toshio ADACHI, Noriaki SAKO and Masaichi YAMADA

2. 過剰間隙水圧と体積ひずみの評価法

2.1 過剰間隙水圧

図2は中空ねじりせん断試験装置を用いて行った飽和砂の一定応力振幅による非排水繰返し载荷試験及び仮動的実験によって得られた過剰間隙水圧比と累積塑性ひずみエネルギーを初期有効拘束圧で除した規準化累積塑性ひずみエネルギーの関係である。なお、仮動的実験とは地盤の地震時挙動の検討において、地震応答解析の土の復元力特性を室内要素実験に置き換えたものである。同図より、過剰間隙水圧比と規準化累積塑性ひずみエネルギーの関係は、液状化強度の近い相対密度50%と65%では大きな差は認められないが、相対密度80%は相対密度50%及び65%と明らかに傾向が異なり、過剰間隙水圧の上昇に必要な累積塑性ひずみエネルギー量が大きいことが分かる。また、同一の相対密度であれば、入力波形の違いによる影響はほとんど認められず、一定応力振幅の非排水繰返し実験と地震波を用いた仮動的実験の結果はほぼ同一傾向にあることから、過剰間隙水圧比と規準化累積塑性ひずみエネルギーの関係は入力波形や载荷方法の違いによらないことが分かる。そこで両者の関係を次式で近似した。

$$\begin{aligned} \frac{W_p^*}{\sigma_c'} \leq X & \quad \frac{\Delta u}{\sigma_c'} = \frac{1}{m} \left(\frac{W_p^*}{\sigma_c'} \right)^{0.4} \\ \frac{W_p^*}{\sigma_c'} > X & \quad \frac{\Delta u}{\sigma_c'} = 1.0 \end{aligned} \quad (3)$$

ここに、 X 、 m は地盤材料によって決まる係数であり、 X は最初に最大過剰間隙水圧に達する時の規準化累積塑性ひずみエネルギー、 m は過剰間隙水圧の上昇しやすさを表す。

図3に図2及び式(3)の提案式の係数 m と液状化強度 R_{15} の関係を示す。図3に示す係数 m と液状化強度 R_{15} の関係は式(4)で近似できる。

$$m = 0.019e^{8.6R_{15}} \quad (4)$$

ここに、 e ：自然対数の底である。

2.2 体積ひずみ

地表面沈下は過剰間隙水圧の消散に伴う再圧密沈下であり、地盤の各層に生じる鉛直方向のひずみを深度方向に積分することで求められ、半無限地盤で水平面内に均一に沈下が生じると仮定した場合、鉛直ひずみは体積ひずみと等価となる。そのため、沈下量の評価に当たっては体積ひずみと累積塑性ひずみエネルギーの関係が必要となる。

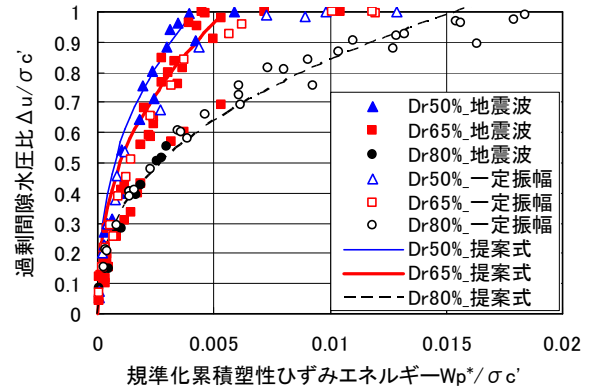


図2 過剰間隙水圧比 $\Delta u / \sigma_c'$ と規準化累積塑性ひずみエネルギー W_p^* / σ_c' の関係

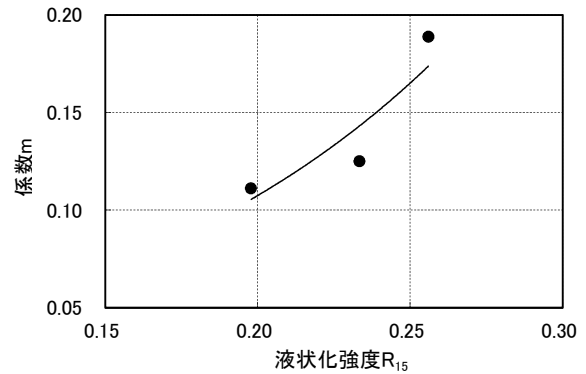


図3 係数 m と液状化強度 R_{15} の関係

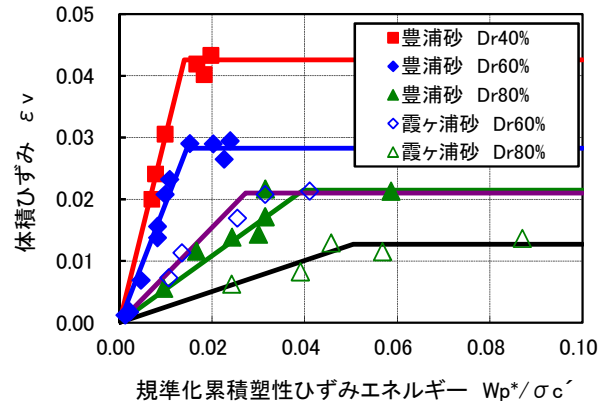


図4 体積ひずみ ε_v と規準化累積塑性ひずみエネルギー W_p^* / σ_c' の関係

図4は図2に示した試験結果と同様の試験装置及び試料作成方法で行った、一定応力振幅による非排水繰返し载荷試験によって得られた体積ひずみと規準化累積塑性ひずみエネルギーの関係である。両者の関係は砂の種類及び密度毎に下式のようなバイリニアの関係を示す。

$$\begin{aligned} \varepsilon_v &= a(W_p^* / \sigma_c') & (\varepsilon_v < \varepsilon_{v,\max}) \\ \varepsilon_v &= \varepsilon_{v,\max} & (\varepsilon_v = \varepsilon_{v,\max}) \end{aligned} \quad (5)$$

ここに、 a ：再圧密勾配、 $\varepsilon_{v,\max}$ ：最大体積ひずみである。

図5は再圧密勾配及び最大体積ひずみを液状化強度 R_{15} に対して示したものである。同図より液状化強度をパラメータとして再圧密勾配と最大体積ひずみを推定することが可能であることが分かる。推定式を以下に示す。

$$\varepsilon_{v,\max} = 0.003R_{15}^{-1.4} \quad (6)$$

$$a = 0.010R_{15}^{-3.1} \quad (7)$$

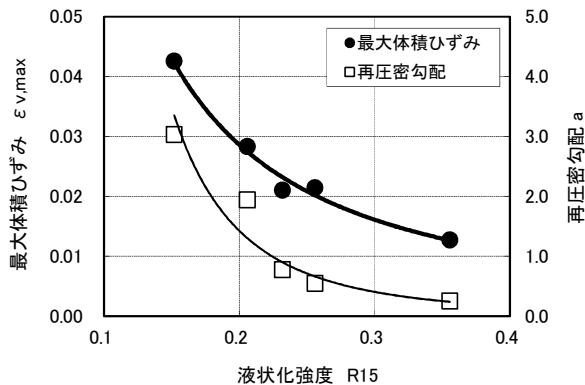


図5 最大体積ひずみ $\varepsilon_{v,\max}$ 、再圧密勾配 a 及び液状化強度 R_{15} の関係

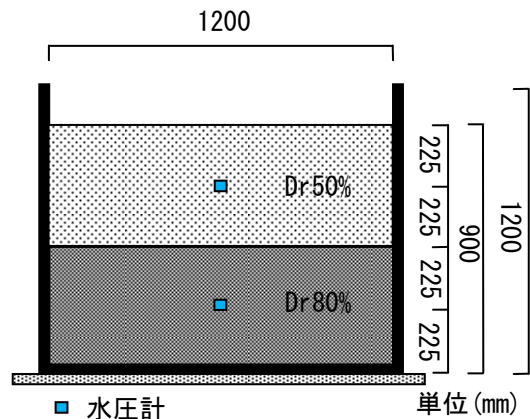


図6 セン断土槽及び模型地盤

3. 円形せん断土槽実験のシミュレーション解析

3.1 実験概要

本実験は内法寸法が高さ1.2m、直径1.2mの円形せん断土槽を用いて、飽和砂地盤の振動台実験を行ったものである。図6に示すように模型地盤は豊浦標準砂を用いて、上層は相対密度50%、下層は相対密度80%となるように作製した。各層の中間に間隙水圧計を設置し、地表面沈下量はレーザー変位計で計測した。

入力地震波は図7に示す1964年の新潟地震で地表面観測されたEW成分を用いた。

相似側には井合の相似側⁵⁾を用い、相似比を21.54とした。相似比適用後の地盤高さは約19.4mである。

図8に実験結果のうち、過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。同図より、上層は過剰間隙水圧比が1.0となり完全に液状化しているが、下層は過剰間隙水圧比が0.55程度と液状化に至っていない。地表面沈下量は相似則適用後で約42cmであった。

3.2 解析結果

表1に地盤モデルを示す。模型地盤は層厚約1mに等分割した。なお、粘性減衰定数はゼロとし、 $G/G_0 \sim \gamma$ 及び $h \sim \gamma$ 関係にはH-Dモデル⁶⁾を用いた。

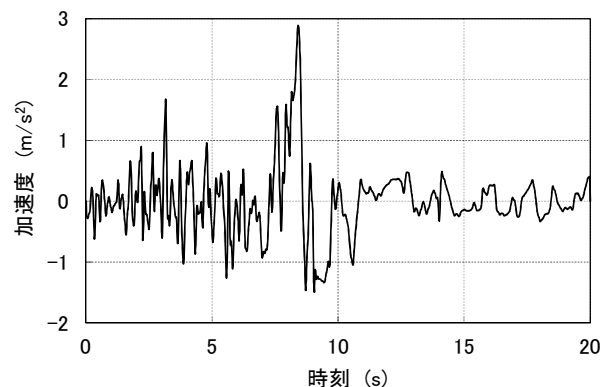


図7 入力地震波

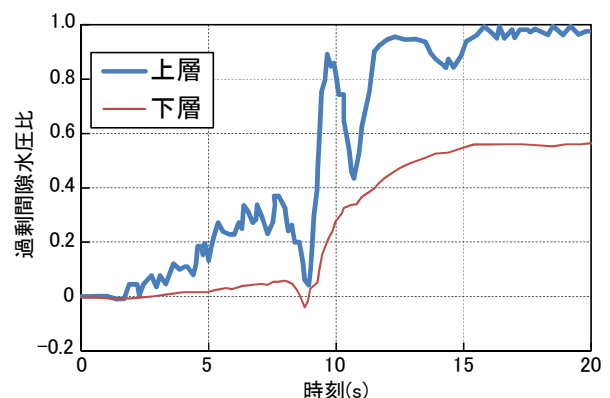


図8 過剰間隙水圧比の時刻歴

図 9, 10 に過剰間隙水圧比及び沈下量の実測値及び推定値の比較を示す。なお、沈下量については既報⁴⁾のシミュレーション結果を併記した。過剰間隙水圧比は完全液化化に達していない下層(Dr80%)の推定値が実測値を過大に評価するものの、安全側に評価している。沈下量については、推定値は実測値と良い対応を示していることが分かる。

5. おわりに

本論文では円形せん断土槽を用いた液化化実験結果を対象に、エネルギーの釣合に基づく地盤の損傷程度評価法を用いて過剰間隙水圧比と沈下量の推定を行った。その結果、過剰間隙水圧比の推定値は実測値を安全側に評価するもののやや過大な値を示す傾向にあるが、沈下量は実測値と推定値が良い対応を示すことを確認した。今後は過剰間隙水圧比の検証データを増やして推定精度を考察していく予定である。

「参考文献」

- 1) 秋山宏：建築物の極限耐震設計，東京大学出版会，1980. 9
- 2) 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，第 650 号，pp. 807-815，2010. 4
- 3) 下村修一，安達俊夫，酒匂教明：粘性減衰により吸収されるエネルギー及び多層地盤のエネルギー分配率の評価 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 その 2，日本建築学会構造系論文集，第 661 号，pp. 553-562，2011. 3
- 4) 下村修一，安達俊夫，朝枝亮太，酒匂教明：地盤の液化化による地表面沈下量の推定 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 その 3，日本建築学会構造系論文集，第 680 号，pp. 1545-1552，2012. 10
- 5) S., Iai : Similitude for shaking table test on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, Soil and Foundations, Vol. 29, No. 1, pp. 105-118, 1989
- 6) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P. : Shear modulus and damping in soils: design equations and curves, Proc. Of the American Society of Civil Engineers, Vol. 98, No. SM7, pp. 667-692, 1972.

表1 地盤モデル

	層厚(m)	Vs(m/s)	R15	$\gamma_{0.5} \times 10^{-4}$	hmax
上層	9.7	81	0.198	1.2	0.21
		106		2.0	
		121		2.6	
		131		3.1	
		140		3.5	
		147		3.9	
		153		4.2	
		159		4.5	
		164		4.8	
		169		5.1	
		190	0.256	5.4	
下層	9.7	195		5.6	
		199		5.9	
		203		6.1	
		207		6.4	
		211		6.6	
		214		6.8	
		217		7.0	
		221		7.2	
		224		7.4	

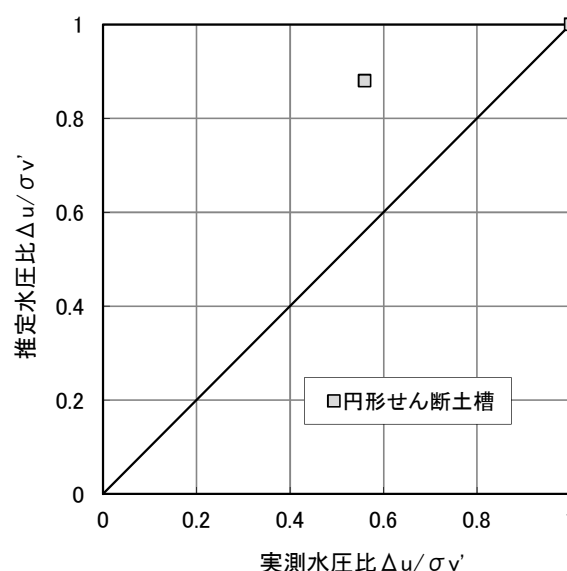


図9 推定水圧比と実測水圧比の比較

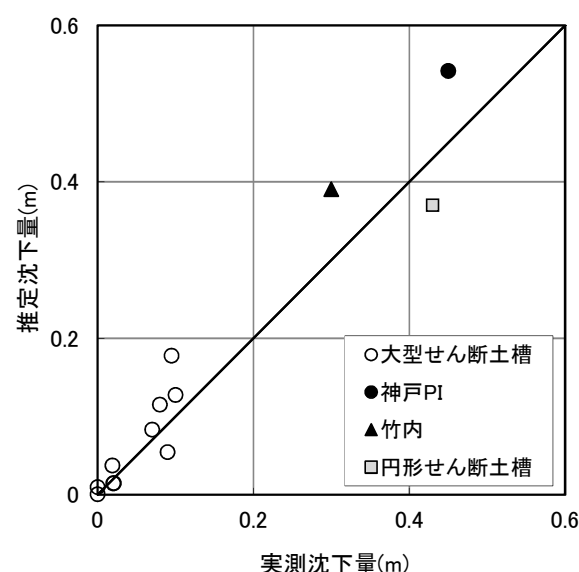


図10 推定沈下量と実測沈下量の比較