

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
その 3 過剰間隙水圧とひずみエネルギーの関係

Study on Evaluation of damage in Liquefaction Based on the Energy Balance in Liquefiable Sandy Ground.

Part3 Considerations on relationship between Energy and Excessive Pore Water Pressures

○小林剛¹, 日野翔太¹, 山田雅一², 安達俊夫², 道明裕毅³

Tsuyoshi Kobayashi¹, Shota Hino¹, Masaichi Yamada², Toshio Adachi², Yuki Domyo³

Abstract: This report is to examine the relationship between the cumulative plastic strain energy and excess pore water pressure. Consequently, we propose a excess pore water pressure model for sand using the fine fraction content and minimum void ratio and liquefaction strength in this report.

1. はじめに

前報その¹⁾では規準化累積塑性ひずみエネルギーと最大せん断ひずみの関係について、前報その²⁾では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について報告した。本報告では、前報その²⁾で得られた過剰間隙水圧モデルに対して自然砂および非塑性細粒分を含む砂 (Fc=10%まで) に対して適用した検討結果について報告する。

2. 試験概要

本試験に用いた試料の物理的性質を Table.1 に示す。中空ねじりせん断試験の試験条件および液状化強度を Table.2 に示す。また、細粒土は非塑性のシルトである DL クレイを用いている。試験方法については文献^{3),4)}を参照されたい。

Table.1 Physical Properties of Samples

試料	土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)	最大間隙比 e _{max}	最小間隙比 e _{min}
豊浦砂	2.631	0.964	0.608
霞ヶ浦砂a	2.755	0.944	0.605
霞ヶ浦砂b	2.759	0.856	0.505
新潟砂	2.692	1.068	0.650

Table.2 Test Conditions

CASE	試料	相対密度 D _r (%)	細粒分含有率 F _c (%)	有効拘束圧 σ' (kN/m ²)	液状化強度 R ₁₅								
1	豊浦砂	40	0	49	0.16								
2			5		0.27								
3			0		0.20								
4		60	5		0.33								
5			10		0.27								
6			0		0.26								
7	霞ヶ浦砂a	60	0	98	0.24								
8		80			0.34								
9	霞ヶ浦砂b	40			0	98	0.17						
10		60					0.21						
11	80	0					98	0.26					
12								0.25					
13	新潟砂							60	0	49	0.34		
14								5			0.37		
											10		

3. エネルギーに基づく過剰間隙水圧モデル

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から、過剰間隙水圧モデルを検討した。過剰間隙水圧モデルの検討には豊浦砂での試験結果を用いた。また、提案した過剰間隙水圧モデルの妥当性を自然砂および自然砂に所定の細粒分を含んだ砂の試験結果に

対して検証した。ここで、各試験データにおいて検討に用いたデータは過剰間隙水圧比が 95%に達するまでのデータであり、各サイクルでの過剰間隙水圧比の最大値を取るデータを対象としている。試験データより、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次式で表わせるものとする。

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_0} = A \left(\frac{W_p}{\sigma'_0} \right)^{B+\beta} \tag{1}$$

ここで係数 A と指数 B は砂の種類による影響を考慮する項であり、最小間隙比 e_{min}、液状化強度 R₁₅ をパラメータとして用いた。また、補正指数 β は細粒分による影響を考慮するための項である。

豊浦砂 (F_c = 0%) での試験結果 (CASE1, 3, 6) に (1) 式を適用して、非線形最小二乗法で求めた係数 A および指数 B と、(e_{min}/R₁₅) の関係をそれぞれ Fig.1(a), (b) に示す。同図から得られた A と B の関係式をそれぞれ (2) 式と (3) 式に示す。

$$A = 2.7 \left(\frac{e_{min}}{R_{15}} \right)^{1.8} \tag{2}$$

$$B = 0.06 \left(\frac{e_{min}}{R_{15}} \right) + 0.4 \tag{3}$$

一方、細粒分が含まれた砂の液状化挙動は細粒分が含まれていない砂の挙動に比べて大きく変化するため、(1) 式の補正指数 β により補正する。豊浦砂での試験結果 (CASE2, 4, 5) に (1) 式を適用して、非線形最小二乗法で求めた指数と (3) 式より得られた指数 B の差を補正指数 β とし、細粒分含有率 F_c の関数として補正する。ここで、砂の種類による影響を考慮するため、F_c を R₁₅ で除したものをを用いた。β と F_c/R₁₅ の関係を図 1(c) に示し、同図より回帰した補正指数 β を (4) 式に示す。

$$\beta = 0.46 \left(\frac{F_c}{R_{15}} \right)^{0.63} \tag{4}$$

ここで、(1) 式による過剰間隙水圧比の計算結果が 1.0

1: 日大理工・学部・建築 2: 日大理工・教員・建築 3: 日大理工・院・建築

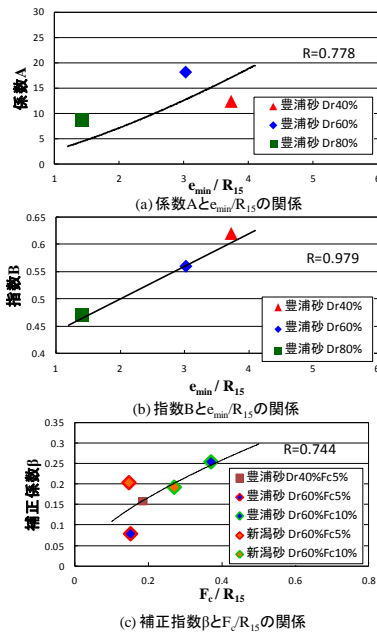


Fig.1 Factors for Determining Proposed Model

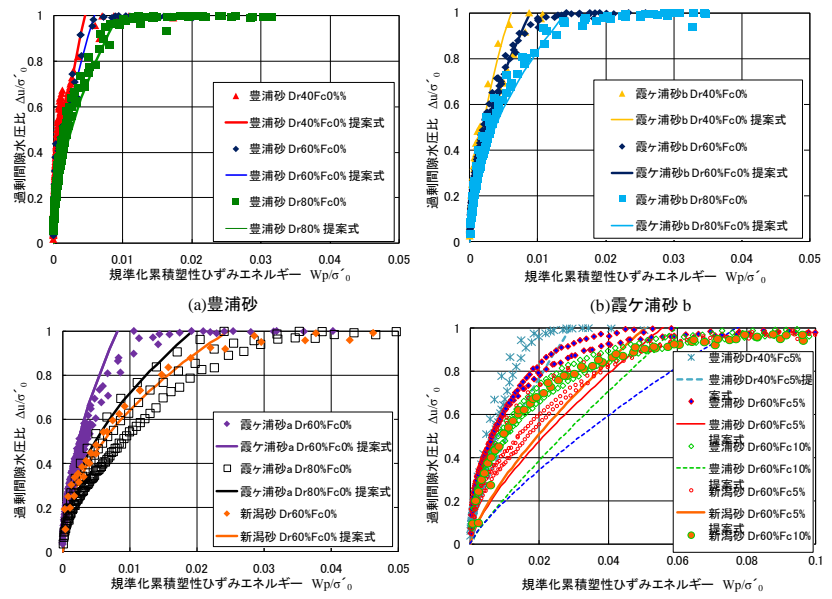


Fig.2 Relationships between $\Delta u/\sigma'_0$ and W_p/σ'_0

以上を示した場合は過剰間隙水圧比を 1.0 とする. この過剰間隙水圧モデルの提案式を CASE 7~14 の試験結果を用いて適用性を検討した. この(2)式と各試験結果を Fig.2 に示す. 同図(a)-(c)より本提案式と細粒分が含まれていない砂の試験結果は概ね良い対応を示していることが見てとれる. これより, 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砂の最小間隙比 e_{min} と液状化強度 R_{15} をパラメータとした(1)式によって表現できる可能性が示唆された.

一方, Fig.2(d)より細粒土を含んだ砂に対しては過剰間隙水圧比が 1.0 に達した時の規準化累積塑性ひずみエネルギーを概ね推定できているが, 液状化に至るまでの過程は試験結果と良い対応が見られない.

今後, 細粒土が含まれた砂に対する過剰間隙水圧モデルの補正方法に関して更なる検討が必要である.

4. 液状化時におけるひずみエネルギーの推定

前章の過剰間隙水圧モデルを基に, 荷重によって砂の過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_0$ が 1.0 に達するときの規準化累積塑性ひずみエネルギー(W_p/σ'_0)_Lについて検討を

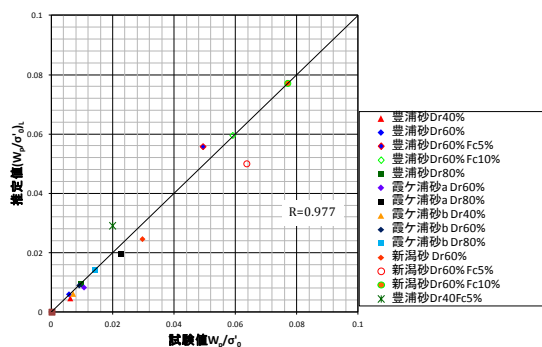


Fig.3 Comparison of Strain Energy to $\Delta u/\sigma'_0 = 1.0$

行った.

$\Delta u/\sigma'_0 = 1.0$ に達するときの(W_p/σ'_0)_Lは(1)式より(5)式で評価できる.

$$\left(\frac{W_p}{\sigma'_0}\right)_L = A^{-\frac{1}{B+\beta}} \quad (5)$$

(5)式から得られた推定値(W_p/σ'_0)_Lと試験値 W_p/σ'_0 間係を Fig.3 に示す.

同図より推定値と試験値は良い対応を示している. これより, 最小間隙比 e_{min} と液状化強度 R_{15} から過剰間隙水圧比が 1.0 に達する時の規準化累積塑性ひずみエネルギーを推定できる可能性が示唆された. 今後, これらの検討結果を基に, 過剰間隙水圧とひずみエネルギーの関係についてより詳細な検討を行う予定である.

5. まとめ

本報告では, 中空ねじりせん断試験による過剰間隙水圧と累積塑性ひずみエネルギーの関係について検討した. その結果, 以下の知見が得られた.

- 1) 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を基に砂の最小間隙比 e_{min} と液状化強度 R_{15} を用いた過剰間隙水圧モデルを定式化した.
- 2) 最小間隙比 e_{min} と液状化強度 R_{15} をパラメータとして用いることで, 砂質土における過剰間隙水圧比が 1.0 に達する時の規準化累積塑性ひずみエネルギーを推定できる可能性が示唆された.

参考文献

- 1) 藤森他: 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-その1 エネルギー~最大ひずみ関係の検討, 日本大学理工学部学術講演会論文集, 2012
- 2) 道明他: 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-その2 エネルギー~最大ひずみ関係の検討, 日本大学理工学部学術講演会論文集, 2012
- 3) 道明他: 中空ねじりせん断試験システムの開発, 日本大学理工学部学術講演会論文集, 2013
- 4) 所他: 非塑性細粒土を含む砂における液状化特性に関する研究-その1 液状化強度と継続時間の関係, 日本大学理工学部学術講演会論文集, 2013