

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4 エネルギー～体積ひずみ関係の検討

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

Part 4 Considerations on relationship between Energy and Volumetric Strain

○堂野前 大貴¹, 山田 雅一², 安達 俊夫², 道明裕毅³, 山田峻作³

*Daiki Dounomae¹, Masaichi Yamada², Toshio Adachi², Yuki Domyo³ Yamada Shunsaku³

Abstract: The purpose of this study is to establish for evaluation between damage in sand deposits following liquefaction based on energy balance. In this paper, the relationship accumulate plastic strain energy, and maximum volumetric strain are investigated by performing hollow cylindrical torsional shear tests.

1. はじめに

既報その1¹⁾, その2²⁾ 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及び過剰間隙水圧比の関係について報告した。また2011年の東北地方太平洋沖地震により、東京湾沿岸で液状化した砂に非塑性の細粒土が含まれていたことから、前報その3³⁾ では非塑性の細粒分を含む砂における規準化累積塑性ひずみエネルギーと過剰間隙水圧比の関係について報告した。

本報その4では、エネルギーを基に累積塑性ひずみエネルギーと地盤の沈下量を推定する際に用いる体積ひずみとの関係⁴⁾に着目し、非塑性細粒分を含む砂における規準化累積塑性ひずみエネルギーと体積ひずみとの関係について検討し報告する。

2. 試験概要

本試験では、粗粒土として豊浦砂を、非塑性細粒土として DL クレイ ($\rho_s=2.659\text{g/cm}^3$)を用いた。Fig.1 に各試料の粒径加積曲線を示す。Table1 には試験条件および液状化強度を示した。なお、豊浦砂の物理的性質については既報その3を参照されたい。ここで定義した液状化強度 R_{15} は、繰返し回数 15 回でせん断ひずみの両振幅が 7.5%に達した時のせん断応力比である。また供試体は、粗粒土の相対密度を 40%として、細粒分含有率を $F_c=0\%$, 5%, 10%, 20%とした。所定の質量で十分に混合した後、JGS 0550 に準拠してドライタンピング法により供試体を作製した。

供試体は二酸化炭素、脱気水および背圧で飽和させ、 B 値が 0.96 以上であることを確認した後、有効拘束圧 σ'_0 を 49kN/m^2 として等方圧密を行った。圧密終了後、中空ねじりせん断試験機により、高精度な荷重載荷システム⁵⁾を用いて正弦波の一定応力振幅で繰返し載荷を行った。試験はせん断ひずみがゼロになったことを確認してから終了させ、体積ひずみは試験終了後に供試体からの間隙水の排水量を差圧計で計測し、ほぼ一定値に収束することを確認して求めた。

3. 累積塑性ひずみエネルギー

本報告では液状化過程における累積塑性ひずみエネルギーと体積ひずみの関係について検討する。液状化

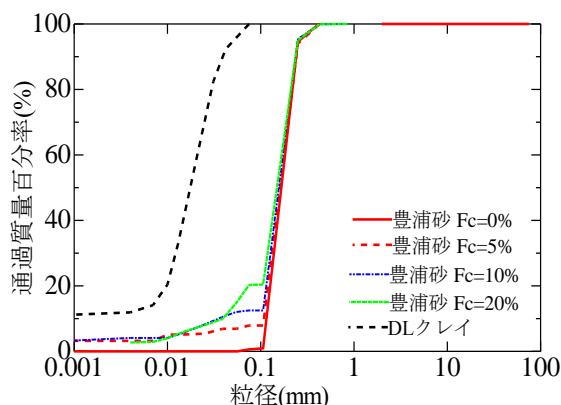


Fig.1 Grain size distribution of soils samples

Table1. Test conditions

試料	相対密度 D_r (%)	細粒分含有率 F_c (%)	液状化強度 R_{15}
豊浦砂	40	0	0.16
		5	0.25
		10	0.29
		20	0.22

過程における累積塑性ひずみエネルギー W_p はせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係から、次式で求める。

$$W_p = \Sigma(\tau \times \Delta\gamma) \quad (1)$$

ここで、 τ はせん断応力 (kN/m^2)、 $\Delta\gamma$ はせん断ひずみ増分である。本報告では、累積塑性ひずみエネルギーを有効拘束圧 σ'_0 で規準化した累積塑性ひずみエネルギー W_p/σ'_0 で検討を行う。

4. 試験結果

本試験より得られた体積ひずみ ϵ_v と規準化累積塑性ひずみエネルギー W_p/σ'_0 の関係を Fig.2 に示す。同図より、いずれの試験結果においても ϵ_v は W_p/σ'_0 に比例して増大し、ある W_p/σ'_0 値に達してからほぼ一定値に収束することが見て取れる(このときの体積ひずみを最大体積ひずみ $\epsilon_{v\max}$ とする)。一方、粗粒土に対する試験

結果においても同様の傾向を確認することができる。従って、非塑性細粒土を含んだ砂においても、 $F_c=0\%$ の試験結果と同様に ϵ_v と W_p/σ'_0 の関係は 2 つの線形区間で表すことが可能である。また ϵ_{vmax} は、非塑性細粒土を含んだ砂では $F_c=0\%$ の試験結果に比べて小さくなることが認められた。

以上より、地盤の液状化に伴う沈下量をひずみエネルギーにより評価⁶⁾するため、本試験で得られた $W_p/\sigma'_0 \sim \epsilon_v$ 関係を既報⁶⁾と同様に式(2)、(3)で表す。

$$\epsilon_v = a \times (W_p/\sigma'_0) \quad (\epsilon_v < \epsilon_{vmax}) \quad (2)$$

$$\epsilon_v = \epsilon_{vmax} \quad (\epsilon_v \geq \epsilon_{vmax}) \quad (3)$$

ここに、 a は再圧密勾配である。 ϵ_{vmax} 以降の ϵ_v は(3)式に示すように ϵ_{vmax} で一定とした。砂の種類による影響と細粒分含有率を考慮するために液状化強度 R_{15} と最小間隙比 e_{min} を用いて³⁾、非塑性細粒土を含んだ砂を対象に ϵ_{vmax} と a を検討する。

Fig.3 に ϵ_{vmax} と e_{min}/R_{15} の関係を、Fig.4 に a と e_{min}/R_{15} の関係を示す。両図中には既報⁶⁾で報告した $F_c=0\%$ 、5%、10%の豊浦砂($Dr=60\%$)と、 $F_c=0\%$ の豊浦砂($Dr=80\%$)、霞ヶ浦砂 a($Dr=60\%,80\%$)および霞ヶ浦砂 b($Dr=60\%$)の試験結果を併せ示した。両図より、 ϵ_{vmax} と e_{min}/R_{15} の関係と、 a と e_{min}/R_{15} の関係の試験結果は相関が良く、両図に示した全試験結果から式(4)、(5)に示す曲線が得られ、それぞれ図中に実線で示した。

$$\epsilon_{vmax} = 0.0053 \times (e_{min}/R_{15})^{1.55} \quad (4)$$

$$a = 0.031 \times (e_{min}/R_{15})^{3.53} \quad (5)$$

Fig.3 と Fig.4 より、細粒土を含んだ砂においても液状化強度 R_{15} と最小間隙比 e_{min} を用いて、一義的に最大体積ひずみ ϵ_{vmax} と再圧密勾配 a を求められる。このことから、細粒土を含んだ砂においても式(4)、(5)より、ひずみエネルギーを基に体積ひずみを評価できると言える。

5. まとめ

細粒土を含んだ砂について中空ねじりせん断試験から得られた体積ひずみ～規準化累積塑性ひずみエネルギーの関係について検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 体積ひずみは、規準化累積塑性ひずみエネルギーに比例して増大し、ある規準化累積塑性ひずみエネルギー値に達すると、ほぼ一定値に収束する傾向が見られた。
- 2) 体積ひずみと規準化累積塑性ひずみエネルギーの関係は、砂の種類、相対密度、細粒分含有率に関わらず、液状化強度と最小間隙比から推定できる可能性が示唆された。

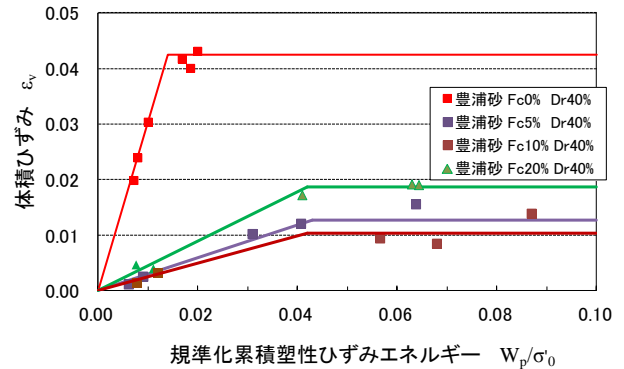


Fig.2 Relationships between volumetric strain and energy

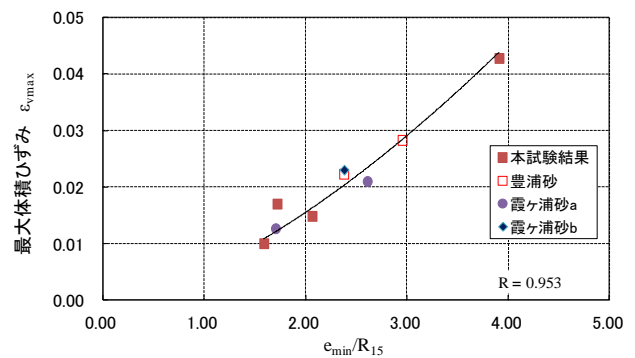


Fig.3 Relationships between ϵ_{vmax} and e_{min}/R_{15}

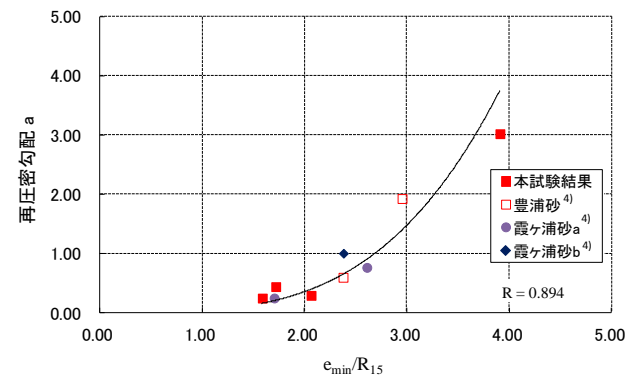


Fig.4 Relationships between a and e_{min}/R_{15}

【参考文献】

- 1) 藤森圭祐他：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～最大せん断ひずみ関係の検討—,平成 24 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,pp.187 - 188, 2012.
- 2) 道明裕毅他：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～過剰間隙水圧関係の検討—,平成 24 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,pp.189 - 190, 2012.
- 3) 小林剛,日野翔太：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—,平成 25 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,pp.163 - 164,2013.
- 4) 下村・安達・酒匂: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,Vol.75,No.650, pp.807-815, 2010.4.Vol.75,No.650, pp.807-815,2010.4.
- 5) 道明裕毅他：中空ねじりせん断試験システムの開発,平成 25 年度日本大学理工学部学術講演会論文集,pp.157 - 158, 2013.
- 6) 藤森圭祐他：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 累積塑性ひずみエネルギーと体積ひずみ関係—,第 47 回地盤工学研究発表会,pp.1555 - 1556,2012.