

塑性ひずみエネルギーに基づく過剰間隙水圧モデルの検討

- 中空ねじり試験を用いた GMP モデルの適用性 -

Study on Excess Pore Water Pressure Model Based on Plastic Strain Energy

- Applicability of GMP Model Used to Cylindrical Torsional Test -

○明石舞香¹ 山田雅一² 道明裕毅² 井上佳奈¹ 関根さやか¹

Maika Akashi¹, Masaiti Yamada², Yuki Domyo², Kana Inoue¹, Sayaka Sekine¹

Abstract: This paper conducted a study on excess pore pressure model (GMP model) by Green et al. The cylindrical Torsional Test data were used for the study. As a result of examination, generally good accuracy was confirmed.

1. はじめに

液状化で発生する過剰間隙水圧モデルに関する研究は数多く報告されている(例えば1)~6)。Green ら⁴⁾は、地盤内の塑性ひずみエネルギーに基づく過剰間隙水圧モデルを提案している(以下、GMP モデルと呼ぶ)。

前報⁷⁾では、繰返し三軸試験結果に対する GMP モデルの適用性について検討を行った。

本報告では、中空ねじりせん断試験結果を用いた液状化過程における過剰間隙水圧とひずみエネルギーの関係について、GMP モデルの適用性の検討を行う。対象とするデータは、砂の種類、砂の相対密度、および細粒分含有率を変えて行った試験結果である。

2. GMP モデル

Green ら⁴⁾は、塑性ひずみエネルギーに基づいた単一のパラメータからなる GMP モデルを開発した。以下に GMP モデルの概略を示す。

GMP モデルにおいて、過剰間隙水圧比 r_u は、土の単位体積当たりの損失エネルギーを有効拘束圧で除した基準化累積塑性ひずみエネルギー W_S と、疑似エネルギー容量 PEC の関係から式(1)で求められる。

$$r_u = \sqrt{\frac{W_S}{PEC}} \quad (1)$$

ここで、PEC は実験から得られる定数である。 W_S は、式(2)から算出することができる。

$$W_S = \frac{1}{2\sigma'_{mo}} \sum_{i=1}^{n-1} (\tau_{i+1} + \tau_i)(\gamma_{i+1} - \gamma_i) \quad (2)$$

ここで、 σ'_{mo} = 初期平均有効応力、 τ_i = 荷重増分 i ステップでのせん断応力、 γ_i = 荷重増分 i ステップにおけるせん断ひずみである。

PEC は、 W_S の平方根に対して r_u をプロットすることにより、繰返し試験データによって決定することが可能である。

PEC の物理的意味合いは、カーブフィッティングパラメー

タで過剰間隙水圧 (あるいはせん断ひずみ) が急増するまでの損失エネルギーにほぼ等しい。この PEC は式(3)で求められる。

$$PEC = \frac{W_{S,r_u=0.65}}{0.4225} \quad (3)$$

ここで $W_{S,r_u=0.65}$ は、 $r_u=0.65$ に対応する W_S の値である。

3. 試験概要

3.1 試験試料

本研究に用いた試料は豊浦砂と霞ヶ浦砂であり、細粒分は非塑性シルトである DL クレイ($\rho_s = 2.659 \text{ g/cm}^3$)を用いた。各試料の粒径加積曲線を Fig.1 に示す。また、各試料の物理的性質を Table 1 に示す。

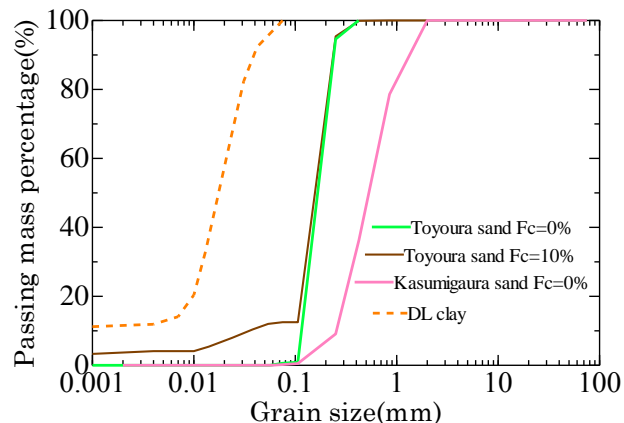


Fig.1 Grain size distribution of soil

Table1 Physical Properties of samples

Sample	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	e_{\max}	e_{\min}
Toyouura sand	2.631	0.98	0.61
Kasumigaura sand	2.755	0.94	0.61

Table 2 Experiment condition

CASE	Sample	Dr(%)	Fc(%)	$\sigma'_0(\text{kN/m}^2)$	R_{15}
1	Toyouura sand	60	0	49	0.20
2			10		0.27
3			80		0.26
4	Kasumigaura sand	60	0		0.24

1:日大理工・学部・建築 2:日大理工・教員・建築

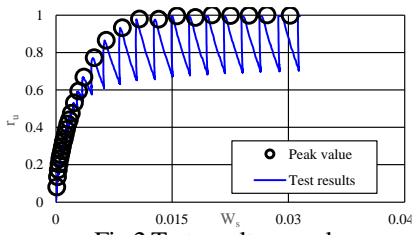
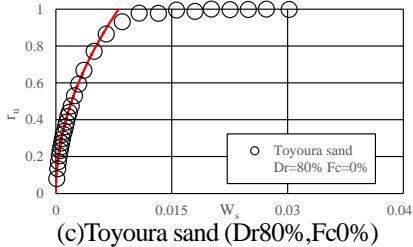
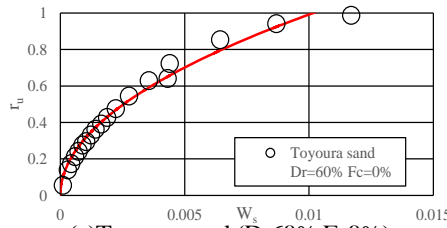


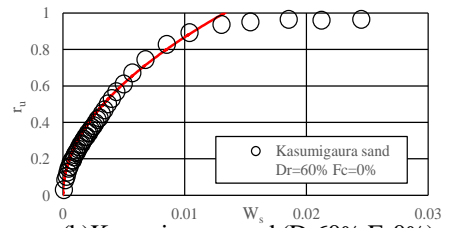
Fig.2 Test result example



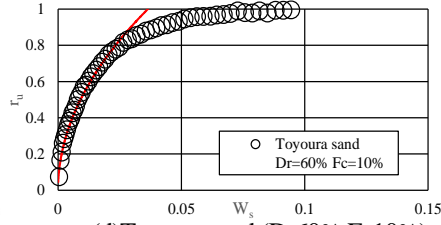
(c) Toyoura sand (Dr=80%,Fc=0%)



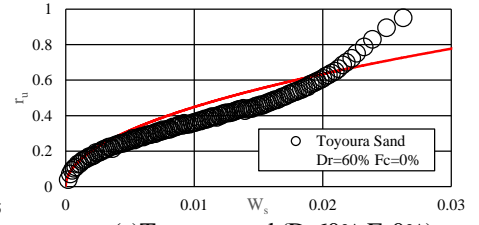
(a) Toyoura sand (Dr=60%,Fc=0%)



(b) Kasumigaura sand (Dr=60%,Fc=0%)



(d) Toyoura sand (Dr=60%,Fc=10%)



(e) Toyoura sand (Dr=60%,Fc=0%)

Fig.3 Relation between r_u and W_s

3.2 供試体の作製方法

供試体は中空円筒供試体(外径 10cm,内径 6cm,高さ 10cm)を JGS 0550 に準拠して空中落下法とドライタンピング法により作製した. 各試料の相対密度 D_r と細粒分含有率 F_c を Table 2 に示す. ここで定義した相対密度は粗粒土のみを考慮したものである.

3.3 試験方法

Table 2 に試験結果により得られた液状化強度 R_{15} を示す. 供試体は炭酸ガス, 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, Table 2 に示した有効拘束圧 σ'_0 で等方圧密を行った. 圧密終了後, 中空ねじりせん断試験機による高精度な載荷荷重システムを用いて正弦波の一定応力振幅で繰返し載荷を行った. せん断ひずみの両振幅が 15%に達した後, ひずみ値がゼロクロスした後試験を終了させた.

4. 試験結果

Fig.2に試験結果から得られた過剰間隙水圧比 r_u と基準化累積塑性ひずみエネルギー W_s の関係の一例を示す. 同図中に試験結果を実線で示し, 各サイクルのピーク値を○印のプロットで示した. 同図に示したように, 本報では, 試験結果から得られた各サイクルにおける過剰間隙水圧比のピーク値を対象とし⁴⁾, r_u と W_s の関係を検討する.

Fig.3(a)~(e)に, 中空ねじりせん断試験から得られた過剰間隙水圧比 r_u - 基準化ひずみエネルギー W_s 関係を示す. なお, 試験結果については, 過剰間隙水圧の各サイクルにおけるピーク値をプロットで示した. また, 同図中には Green⁴⁾らの GMP モデルを実線で併せ示した.

同図(a), (b)より, 砂の種類を変えた場合の試験結果に対し, プロットで示した試験結果と実線で示した GMP モデルは概ね良い相関があることが見て取れる.

同図(c)には相対密度を変えた試験結果, 同図(d)には非塑性細粒分を含んだ砂の試験結果を示す. いずれの結果についても, プロットで示した試験結果と実線で示した GMP モデルは概ね良い関係があることが見て取れる.

一方で, 同図(e)に液状化が発生する(過剰間隙水圧比 r_u が 95%に達する)までの繰返し回数が大きかった試験結果を示す. この結果については, r_u が 95%に達するまでの繰返し回数が 50 回以上の試験結果であり, 他の試験結果とは異なり, プロットで示した試験結果と実線で示した GMP モデルは異なる傾向となった. この要因については, 今後詳細な検討をする予定である.

5. まとめ

本報告では, 中空ねじりせん断試験結果を対象に, エネルギーに基づく過剰間隙水圧モデル(GMP モデル)の適用性の検討を行った. 砂の種類, 相対密度, 細粒分含有率を変化させた試験結果に対し, 概ね良い相関が得られることを確認した.

[参考文献]

- 1) Seed, H.B., Martin, P.P. and Lysmer: Pore Water Pressure Change during Soil Liquefaction, Jour. GED, ASCE, Vol.102, No. GT4, pp.323-346, 1976
- 2) Ishihara, K. and Towhata, I.: Effective Stress Method in One-dimensional Soil Response Analysis, Proc. 7th WCEE, pp.73-80, 1980
- 3) Yamazaki, F., Towhata, I. and Ishihara, K.: Numerical mode for liquefaction problem under multi-directional shearing on horizontal plane, Fifth International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, pp.339-406, 1985.
- 4) Green, R. A., Mitchell, J. K., and Polito, An energy-based excess pore-water pressure generation model for cohesionless soils. Proc., John Booker Memorial Symp. Developments in Theoretical Geomechanics, D. W. Smith and J. P. Carter, eds., Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp.383-390, 2000
- 5) 下村修一 他: エネルギーのつり合い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
- 6) 道明裕毅 他: 中空ねじりせん断試験による砂質土の過剰間隙水圧とひずみエネルギーの関係, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp.157-158, 2013
- 7) 井上佳奈 他: 塑性ひずみエネルギーに基づく過剰間隙水圧モデルの検討, 第 61 回理工学部学術講演会, 2017