

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

- 繰返し三軸試験を用いた GMP モデルの適用性 -

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

-Applicability of GMP Model Using Cyclic Triaxial Test-

○井上佳奈¹ 山田雅一² 道明裕毅² 明石舞香¹ 関根さやか¹

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

Abstract: This paper conducted a study on excess pore water pressure model (GMP model) by Green et al. The cyclic triaxial test data was used for the study. As result of examination, generally good accuracy was confirme.

1. はじめに

液状化に関する過剰間隙水圧モデルの研究は数多く報告されている(例えば1)~6)。Green ら⁴⁾は、砂質土地盤に対して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)。この GMP モデルは、単一のパラメータから地震時に地盤内に発生する過剰間隙水圧を推定することが可能であり、簡易なモデルである。

本報告では、繰返し三軸試験結果を用いた液状化過程における過剰間隙水圧と塑性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、地震時の液状化発生を予測するために、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 との関係から式(1)で求められる。

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

基準化累積塑性ひずみエネルギーは、試験結果から得られる応力-ひずみ関係の各サイクルでの履歴曲線の面積である(例えば6)。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、非排水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、 r_u と W_s 関係のカーブフィッティングパラメータであり、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(2)で求められる。

$$PEC = \frac{W_{S,r_u=0.65}}{0.4225} \quad (2)$$

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

本研究で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。

3.2 供試体の作製方法

供試体は円柱供試体(直径 5cm, 高さ 10cm)を JGS 0520 に準拠して、細粒分を含まない砂においては空中落下法、細粒分を含んだ砂においては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

供試体作製後、 CO_2 および脱気水を通し飽和させ、背圧を 100kN/m^2 与え、間隙水圧係数 B 値が 0.96 以上であることを確認した。有効拘束圧 49kN/m^2 で等方応力を載荷し、排水量がほぼ一定値に収束するまで圧密した。載荷周波数 1Hz の一定応力振幅による非排水繰返し載荷を両振幅軸ひずみが 5% に達するまで行った。試験に用いた有効拘束圧 σ'_0 、載荷応力比、および試験結果から得られた液状化強度 R_{20} を Table 2 に示す。

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。

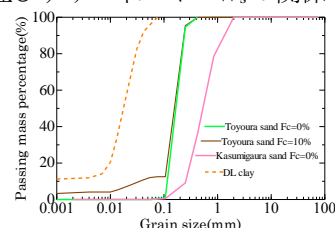


Fig.1 Grain size distribution of soils

Table 1 Physical properties of samples

Sample	Soil particle density $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	Maximum void ratio e_{max}	Minimum void ratio e_{min}
Toyoura sand	2.631	0.96	0.61
Kasumigaura sand	2.755	0.94	0.61

Table 2 Test condition

CASE	Sample	Dr(%)	Fc(%)	σ'_0	Shear stress ratio	R_{20}
a	Toyoura sand	60	0	49	0.20	0.21
b	Kasumigaura sand				0.20	0.20
c	Toyoura sand	80	10		0.23	0.22
d		60	0		0.23	0.26
e					0.22	0.21

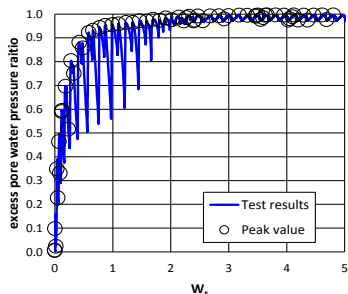
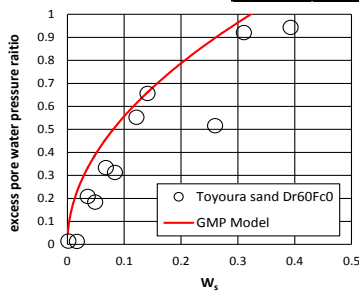
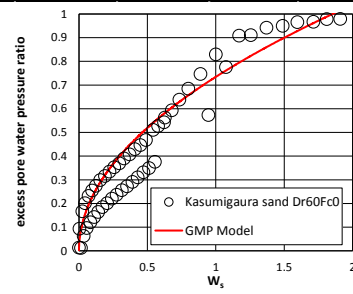


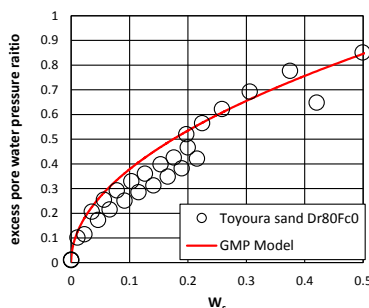
Fig.2 Test result example



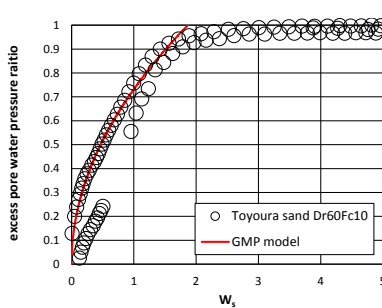
(a) Toyoura sand (Dr60%, Fc0%)



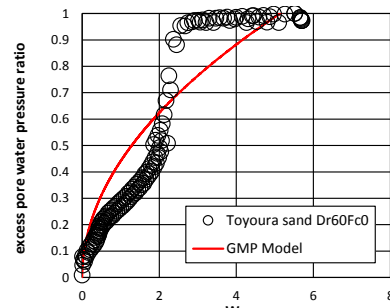
(b) Kasumigaura sand (Dr60%, Fc0%)



(c) Toyoura sand (Dr80%, Fc0%)



(d) Toyoura sand (Dr60%, Fc10%)



(e) Toyoura sand (Dr60%, Fc0%)

Fig.3 Relation between r_u and W_s

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、繰返し三軸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、Greenら⁴⁾の提案した 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 モデルは概ね良い相関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 50 回以上の試験結果を示す。同図より、他の試験結果と異なり、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

なる傾向を示すことが分かる。この要因については、今後検討する予定である。

5. まとめ

本報告では、繰返し三軸試験結果を対象に、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、概ね良い対応を示すことが確認された。

[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, C. P. (2000). "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, 383-390.
- 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) 小澤飛翔 他: 中空ねじりせん断試験と繰返し三軸試験における液状化特性の評価に関する研究-ひずみ変動勾配を用いた試験方法の相違に関する検討-, 第 60 回日本大学理工学部学術講演会, pp. 192-193, 2016