

粘土の弾粘塑性繰返し構成式を導入した多層地盤の液状化解析

○ 岐阜大学大学院 学生会員 金海 博樹 岐阜大学学部生 久保田 由美子
京都大学 正会員 岡 二三生 岐阜大学 正会員 八嶋 厚

1. はじめに

本研究では、兵庫県南部地震の際に観測されたポートアイランドにおける鉛直アレー解析記録について数値解析的に考察を加えた。とくに、沖積粘土層の挙動については、弾粘塑性モデルを用いた解析を実施した。従来は、沖積粘土層も砂の繰返し弾塑性構成式を用いて表現してきたが¹⁾、本研究ではOkazaki²⁾によって提案された弾粘塑性繰返し構成式を用いている。

2. 粘土の弾粘塑性繰返し構成式

ここでは、粘土の弾粘塑性繰返し構成式について、重要な項目のみを取り出して紹介しておく。

正規圧密領域と過圧密領域を分ける過圧密境界面 f_b は次式で与えられる。

$$f_b = \bar{\eta}_{(0)}' + M_m^* \ln(\sigma_m' / \sigma_{mb}') = 0 \quad (1)$$

ここで応力比 $\bar{\eta}_{(0)}'$ は $\bar{\eta}_{(0)}' = \{(\bar{\eta}_{ij}^* - \bar{\eta}_{ij(0)}^*)(\bar{\eta}_{ij}^* - \bar{\eta}_{ij(0)}^*)\}^{1/2}$ 、平均有効応力は $\sigma_m' = \frac{1}{3}\sigma_{kk}'$ 、応力比テンソルは $\bar{\eta}_{ij}^* = \frac{S_{ij}}{\sigma_m'}$ 、圧密終了時の応力比テンソルは $\bar{\eta}_{ij(0)}^* = \frac{S_{ij(0)}}{\sigma_m'}$ 、 $S_{ij} = \sigma_{ij}' - \sigma_m' \delta_{ij}$ 、 M_m^* は変相応力比、 σ_{mb}' は圧密降伏応力である。

静的降伏関数 $f_y = 0$ は以下のように与えられる

$$f_y = \{(\bar{\eta}_{ij}^* - x_{ij}^*)(\bar{\eta}_{ij}^* - x_{ij}^*)\}^{1/2} - R_{D1} = 0 \quad (2)$$

(R_{D1} : 非繰返し等方硬化パラメータ)

ここで x_{ij}^* は非線形移動硬化パラメータと呼ばれ、その発展則は次の通りである。

$$dx_{ij}^* = B_1^* (A_1^* d\epsilon_{ij}^{vp} - x_{ij}^* d\gamma^{vp*}) \quad (3)$$

$$\text{ここで } d\gamma^{vp*} = \sqrt{d\epsilon_{ij}^{vp} d\epsilon_{ij}^{vp}}, \quad d\epsilon_{ij}^{vp} = d\epsilon_{ij}^{vp} - \delta_{ij} dv^{vp}$$

塑性ポテンシャル関数 f_p は以下のように定義される

$$f_p = \{(\bar{\eta}_{ij}^* - \bar{\eta}_{ij(0)}^*)(\bar{\eta}_{ij}^* - \bar{\eta}_{ij(0)}^*)\}^{1/2} + \bar{M}^* \ln\left(\frac{\sigma_m'}{\sigma_{ma}'}\right) = 0 \quad (4)$$

ここで $\bar{M}^*$ は過圧密領域で $\bar{M}^* = -\eta^* / \ln(\sigma_m' / \sigma_{mc})$ 、 σ_{mc}' は $\sigma_{mc}' = \sigma_{mb}' \exp\left(\frac{1+\epsilon}{1-\kappa} v^{vp}\right) \exp\left(\frac{\eta^*}{\bar{M}^*}\right)$ となる。

粘塑性流動則は次式で定義される。

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \langle \Phi_{ijkl}(F_1) \rangle \frac{\partial f_p}{\partial \sigma_{kl}'} \quad \langle \Phi_{ijkl}(F_1) \rangle = \begin{cases} 0 & (F_1 \leq 0) \\ \Phi_{ijkl}(F_1) & (F_1 > 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$F_1 = f_{y1} = \{(\bar{\eta}_{ij}^* - \bar{\eta}_{ij(0)}^*)(\bar{\eta}_{ij}^* - \bar{\eta}_{ij(0)}^*)\}^{1/2} - R_{D1} \quad (6)$$

3. 沖積粘土層の液状化強度試験の再現

沖積粘土層より採取した試料を用いた液状化試験が神戸市により実施されている³⁾。この試験結果に合うモデルのパラメータを決定した(表-1)。図-1より提案モデルは試験結果をよく再現している。

4. 鉛直アレー解析

本研究の解析に用いたモデルはGL-83m以浅の地盤を一系列の柱状にしたものを用いた(80節点、39要素)。拘束条件は、底面節点が拘束、側面は等変位境界である。また、地下水位以深の側面と底面は非排水境界、地下水位面(GL-2.3m)は排水境界とした。GL-19mからGL-27mまでの沖積粘土層を弾粘塑性構成式を用いて解析を行い、GL-61mからGL-79m洪積粘土層は、非常に硬いので、それ以外の層と同様に弾塑性構成式を用いて解析を行った。入力加速度は兵庫県南部地震におけるポートアイランドでのGL-83mの補正された東西方向の観測記録を用いた。図-2～図-4は本研究の地表面における加速度の時刻歴(図-2)と埋土層のGL-8.2mの過剰間隙

圧比 $\frac{U_w}{\sigma'_{v0}}$ (図-3)、図-4は本研究の弾粘塑性構成式の沖積粘土層のせん断応力～ひずみ関係である。そして図-5は参考文献¹⁾の地表面における加速度の時刻歴、図-6は埋土層のGL-8.2mの過剰間隙水圧比 $\frac{U_w}{\sigma'_{v0}}$ である。図-7に沖積粘土層を砂の繰返し弾塑性構成式を用いた際のせん断応力～ひずみ関係を表す。

表-1 沖積粘土層の解析に用いたパラメータ

c	初期間隙比	1.750	参考文献3
λ	圧縮指数	0.390	参考文献3
κ	膨張指数	0.050	参考文献3のCより一桁小さい値で仮定した
ν	ポアソン比	-0.611	参考文献3
$\frac{k}{\gamma_w}$	透水係数/水の単位体積重量 ($m^2/(\text{tf} \cdot \text{sec})$)	$1.0E-8$	標準的な値
g	重力加速度 (m/sec^2)	9.8	
ρ	質量密度 (g/cm^3)	0.173	参考文献3
M_m	変相応力比	0.890	参考文献4
M_f	破壊応力比	0.980	参考文献4
B_1	移動硬化パラメータ	20.0	初期値として仮定をした
M_0	粘塑性パラメータ	17.0	図-1より
C_{01}	粘塑性パラメータ	$3.0E-7$	図-1より
C_{02}	粘塑性パラメータ	$7.5E-8$	図-1より

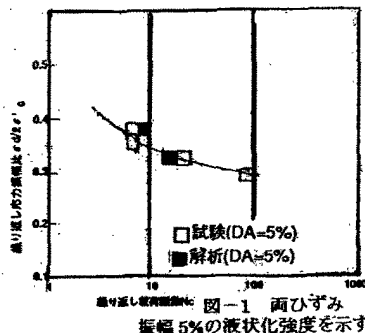


図-1 両ひずみ
振幅5%の液化強度を示す

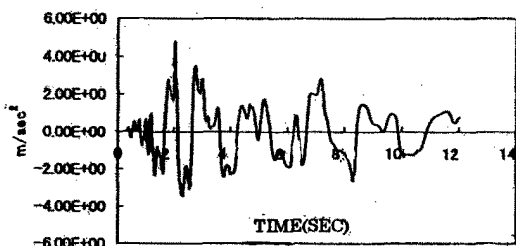


図-2 本研究の地表面での加速度時刻歴

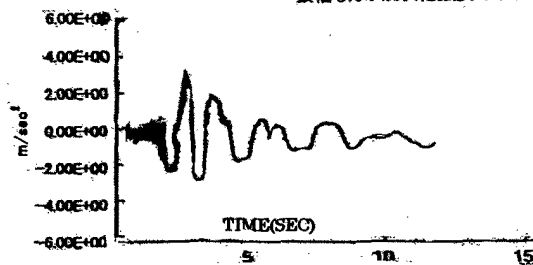


図-5 文献1の地表面での加速度時刻歴

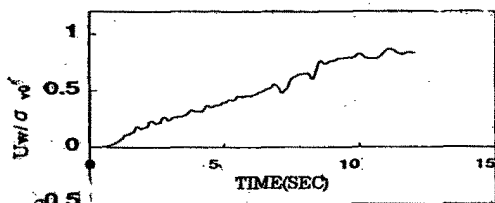


図-3 本研究のGL-8.2mの過剰間隙水圧比時刻歴 (U_w/σ'_{v0})

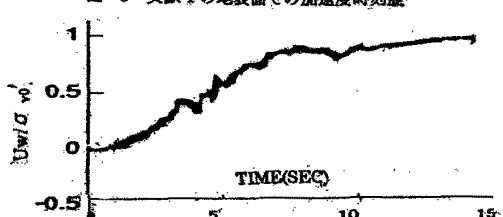


図-6 文献1のGL-8.2mの過剰間隙水圧比時刻歴 (U_w/σ'_{v0})

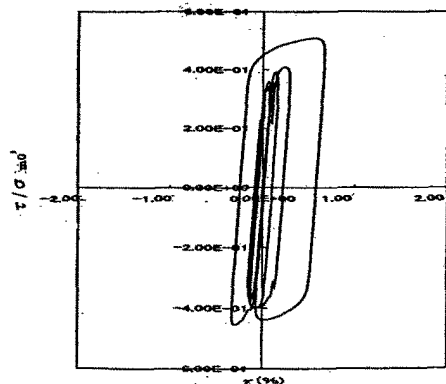


図-4 本研究の沖積粘土層のせん断応力～ひずみ関係

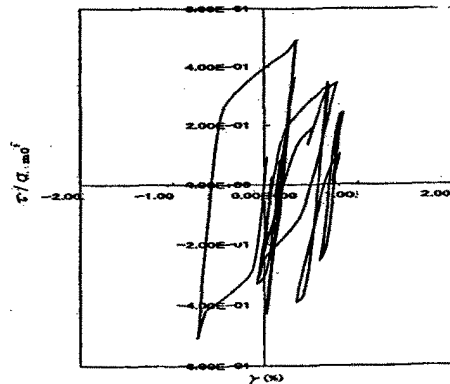


図-7 砂のモデルでの沖積粘土層のせん断応力～ひずみ関係

参考文献

- 1) 田口 洋輔 液化化による地盤・基礎構造物の3次元挙動に関する研究、岐阜大学博士論文、1997
- 2) Fusao Oka Cyclic elasto-viscoplastic constitutive model for clay based on the non-linear hardening rule, 1992
- 3) 神戸市開発局 兵庫県南部地震による埋地地盤変状調査(ポートアイランド、六甲アイランド)、1995
- 4) 井合 進、一井 康二、森田 年一 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察、港湾技研資料、1995