

小ひずみ領域での粘弾性特性を考慮した多層地盤の地震応答解析

京都大学大学院 学生会員 金 容成
京都大学大学院 正会員 岡二三生
京都大学大学院 正会員 小高猛司

1. はじめに

多層地盤の地震時の挙動を正確に把握するためには、砂層の液状化挙動のみならず、粘性土の地震動に対する役割も明確にすることが重要である。本報では、小ひずみレベルでは粘性土の弾性挙動を、また大ひずみレベルでは繰返し塑性を考慮できる繰返し粘弾—粘塑性構成モデルを用いて、多層地盤の地震応答有限要素解析を行った結果を示す。

2. 繰返し粘弾 - 粘塑性構成モデル

本報で用いた構成式は、Oka¹⁾の提案する繰返し粘塑性構成式に、3要素粘弾性モデルを組み込んだものである²⁾。詳細は文献2)を参照することとして、ここではその最終型のみを以下に示す。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2G_1} \dot{S}_{ij} + \frac{1}{\mu} (S_{ij} - 2G_2 e_{ij}^{ve}) + \frac{\kappa}{3(1+e)} \frac{\sigma'_m}{\sigma'_m} \delta_{ij} + C_{01} \frac{\langle \Phi'_1(F) \rangle \Phi_2(\xi) (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*)}{\sigma'_m \bar{\eta}_x^*} + C_{02} \frac{\langle \Phi'_1(F) \rangle \Phi_2(\xi)}{\sigma'_m} \left\{ \tilde{M}^* - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\bar{\eta}_x^*} \right\} \frac{1}{3} \delta_{ij}$$
$$\frac{\Phi'_1(F)}{\sigma'_m} = \exp \left\{ m_0' \left\{ (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) (\eta_{ij}^* - \chi_{ij}^*) \right\}^{\frac{1}{2}} \right\}, \quad \Phi_2(\xi) = 1 + \xi, \quad \xi = \frac{\bar{\eta}_x^* \tilde{M}_f^*}{G_3 \left\{ M_f^* - \frac{\eta_{mn}^* (\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*)}{\bar{\eta}_x^*} \right\}}, \quad \bar{\eta}_x^* = \left\{ (\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*) (\eta_{mn}^* - \chi_{mn}^*) \right\}^{\frac{1}{2}}$$

3. 要素シミュレーションによる粘弾性挙動特性の検討

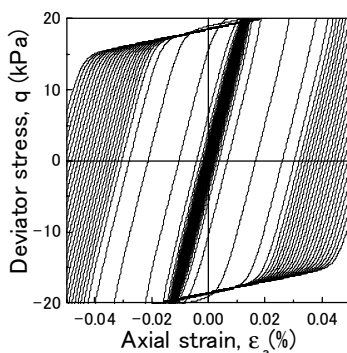


図 1: 応力 - ひずみ関係
(弾 - 粘塑性モデル)

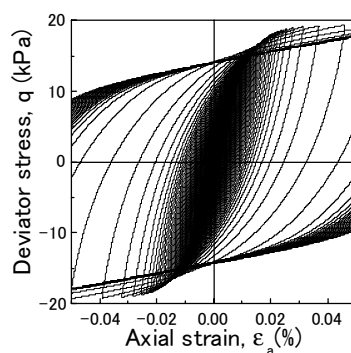


図 2: 応力 - ひずみ関係
(粘弾 - 粘塑性モデル)

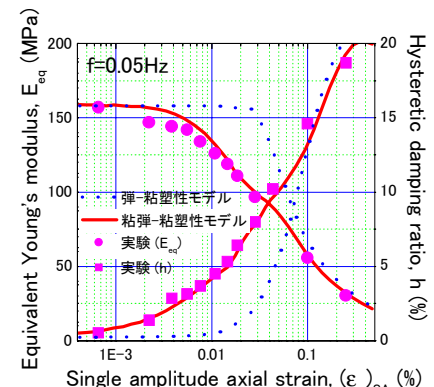


図 3: 等価ヤング率と履歴減衰率
のひずみ依存性

表 1: シミュレーションに用いたパラメータ

E	157(Mpa)	Mfc	1.3	G3	1.0
G1	52.69(Mpa)	Mfe	1.20	OCR	1.6
G2	17.56(Mpa)	Mmc	1.25	λ	0.195
1/μ	3.5E-05	Mme	1.15	κ	0.029
m'	45	B0	40	v	0.49
C01	4.0E-07	Bs	-5	e ₀	1.299
C02	2.5E-10	Bt	1.0	σ _m	196

上記の繰返し粘弾—粘塑性構成式を用いて粘性土の動的非排水三軸試験のシミュレーションを行い、粘弾性特性がせん断剛性及び履歴減衰率に及ぼす影響を検討した。図1および2は弾—粘塑性および粘弾—粘塑性構成モデルによる粘性土の応力—ひずみ関係をそれぞれ示す。図3は両モデルによる等価ヤング率と履歴減衰率のひずみレベル依存性を表す。計算には表1のパラメータを用いた。図2に示すように、3要素粘弾性モデルを組み込んだ粘弾—粘塑性モデルは0.1%以下の小ひずみレベルで曲線的なヒステリシスループを描き、図3の結果も室内実験と良く一致する。

Keywords: 粘弾 - 粘塑性, 構成式, 液状化, 粘性土, 有限要素法

連絡先 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町・TEL:075-753-5085・FAX:075-753-5086)

弾—粘塑性モデルは 0.02% まではほぼ弾性挙動を示すが、0.02 - 0.03% を越えると軸ひずみが顕著に増加し、粘塑性特性を表す。一方、粘弾—粘塑性モデルでは 0.02 - 0.07% のひずみ領域で粘弾性成分と粘塑性成分の過渡領域となり等価ヤング率と履歴減衰率の曲線が若干ゆがんでいる。いずれにしても、粘性土の小ひずみ領域での挙動を粘弾—粘塑性モデルは良く説明している。

4. 多層地盤の地震応答解析

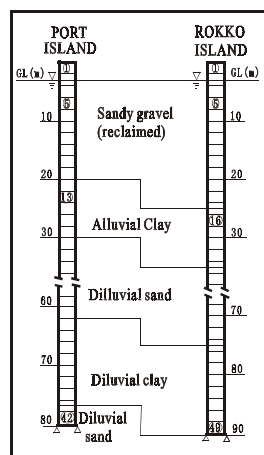


図 4: 有限要素メッシュ図

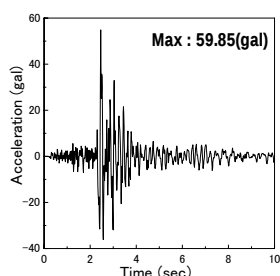
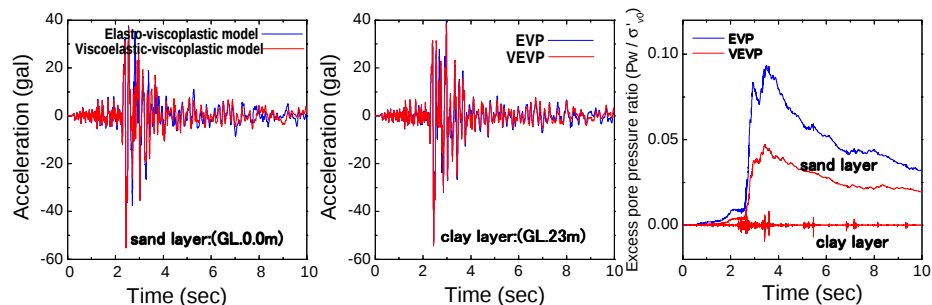
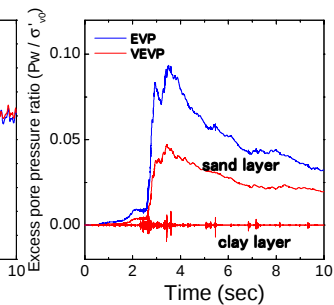


図 5: 入力地震波形

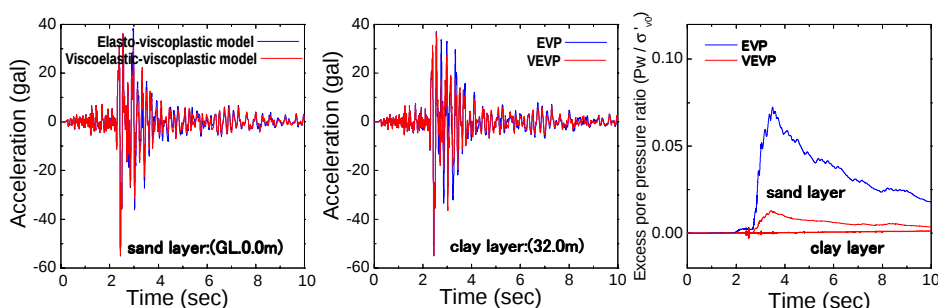


(a) Seismic response analysis

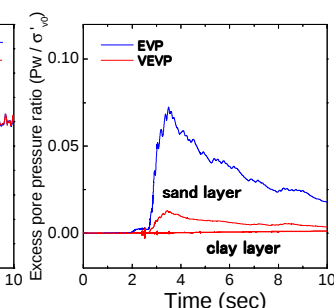


(b) Excess pore water pressure ratio

図 6: 神戸市ポートアイランドの地震時応答加速度，間隙水圧比の時刻歴



(a) Seismic response analysis



(b) Excess pore water pressure ratio

図 7: 神戸市六甲アイランドの地震時応答加速度，間隙水圧比の時刻歴

実地盤の液状化解析を行った。対象とした地盤は図 4 に示す神戸ポートアイランドと六甲アイランドであり、砂層間に厚い粘土層が介在している。以下で解析結果を示す要素番号はポートアイランドで 1, 5, 13 番、六甲アイランドは 1, 5, 16 番である。入力地震波は図 5 に示す兵庫県南部地震の余震記録の NS 成分を用い、解析では水平方向のみの加振とした。地震波の入力は、物体力として全要素に均等に加えている。図 6 および 7 に、ポートアイランドおよび六甲アイランドの地震時応答加速度、間隙水圧比の時刻歴を示す。地震発生 3 秒後から両モデルで解析結果は顕著に異なり、粘弾—粘塑性モデルにおいて顕著に減衰効果が現れている。地震前の PS 検層によると、六甲アイランドの -25m から -35m までの粘土層の剛性率は $G_0=7550(\text{kPa})$ であり、ポートアイランドの粘性土(-20m- -30m)は $G_0=54400(\text{kPa})$ であり、両者の差は大きい。地震応答結果でも六甲アイランドの方が粘性土の減衰効果が大きく現れている。間隙水圧比でも六甲アイランドの方が粘性土の減衰効果の影響を受けて砂層の間隙水圧の上昇が抑えられており、実際に六甲アイランドにおいては液状化が少なかったことを良く説明している。

5. まとめ

3 要素粘弾性項を組み込んだ繰返し粘弾 - 粘塑性モデルは小ひずみ領域での粘性土の粘弾性挙動を説明することができ、そのモデルを地震時の液状化解析で用いることにより、実地盤の粘弾性減衰特性を確認することができた。

参考文献

- 1) Oka, F.: A cyclic viscoplastic constitutive model for clay, Proc. of 6th Int. Sym. On Numerical Methods in Geomechanics, Balkema, 1, pp.293-298, 1988.
- 2) 岡二三生・小高猛司・金容成: 粘性土の繰返し粘弾—粘塑性構成式とその液状化解析への適用, 第 44 回地盤工学シンポジウム論文集, pp.67 - 72, 1999.