

軟弱な砂地盤と粘土地盤の増幅・減衰特性に関する数値解析的検討

軟弱地盤, 地震応答, 弾塑性

名古屋大学

学生会員 ○福永俊樹

名古屋大学

国際会員 中井健太郎, 野田利弘

(財)地震予知総合研究振興会

国際会員 浅岡顕

1. はじめに

国土が狭い日本は, 国土の約 75%を山地が占めており, 社会経済活動の中心は古くから軟弱な沖積平野に集中している. また, 特に東京, 名古屋, 大阪などの太平洋沿いの大都市圏において港湾部の埋立てが盛んに行われ, 高速道路や空港などの社会インフラの多くは, このような堆積年数の若い人工地盤に立地されている. このように, 日本の重要な社会資本は, 地震被害が懸念される軟弱地盤上に多く蓄積されており, 地震被害を最小限にとどめるためには, 地震時に地盤がどのように揺れるのかを正確に把握することが重要であることは論を俟たない. ところが, 一言で軟弱地盤と言っても, 砂質土から粘性土まで様々であり, その振動特性は大きく異なる. そこで本報では, 軟弱な砂地盤と粘土地盤の振動特性(増幅・減衰特性)の違いについて数値解析結果を示す. 用いた解析コードは, 砂から中間土, 粘土までを同じ理論的枠組で記述する弾塑性構成式(SYSカムクレイモデル¹⁾)を搭載した動的/静的水〜土骨格連成有限変形解析コード^{2,3)}である.

2. 砂地盤と粘土地盤の振動特性の比較

解析は, 簡単のため, 鉛直方向の一次元モデルを用いて深さ 20m の均質地盤を仮定した. 地盤側面には周期境界を設け, 左右両方向に同じ地盤が無限に続いている条件としている. 水理境界は, 地表面が水位面と一致するように水圧ゼロとし, 下端面は両側面と合わせて非排水境界とした. また, 地盤底面には粘性境界を設定し, 基盤の密度 ρ は $2.0(\text{g}/\text{cm}^3)$, 圧縮波速度 V_p は $1500(\text{m}/\text{sec})$, せん断波速度 V_s は $300(\text{m}/\text{sec})$ とした. 地震動は, 地盤底面の全節点の水平方向に, 中央防災会議が定める東海・東南海・南海 3 連動型地震波を入力した(図 1 参照). 地盤は典型的な砂地盤と粘土地盤を想定し, 砂質地盤は密度の大小でも比較した. 解析に用いた材料定数および初期状態を表 1 に示す. これらは, 九州地方の海上埋立地盤の物理特性を参考にしながら, 同地盤から採取した不攪乱試料の力学挙動を SYS カムクレイモデルで再現することで決定している. 表 1 に示すように, 弾塑性パラメータにおいて, 砂は粘土に比べて圧縮指数 $\bar{\lambda}$ および膨潤指数 $\bar{\kappa}$ が小さい

表 1 解析に用いた定数

		緩詰め砂	中密砂	粘性土
弾塑性	圧縮指数 $\bar{\lambda}$	0.05		0.27
	膨潤指数 $\bar{\kappa}$	0.0022		0.05
	境界状態定数 M	1.1		1.7
	NCL の切片 N	2.1		2.5
	ポアソン比 ν	0.3		0.3
発展則	正規圧密土化指数 m	0.1		10.0
	構造劣化指数 a	5.0		0.3
	構造劣化指数 b	1.0		1.0
	構造劣化指数 c	1.0		1.0
	構造劣化指数 c_s	1.0		0.1
	回転硬化指数 b_r	3.0		0.01
	回転硬化境界定数 m_b	0.9		1.0
物性	土粒子密度 $\rho_s(\text{t}/\text{m}^3)$	2.70		2.65
	透水係数 $k_d(\text{cm}/\text{sec})$	1.0×10^{-3}		1.0×10^{-6}
初期値	比体積 v_0	2.1	1.8	2.9
	構造の程度 I/R^*	15.0	1.2	20.0
	静止土圧係数 K_0	1.0		1.0
	異方性の程度 K_β	1.0		1.0
	第1固有周期(sec)	0.53	0.55	2.38
	第2固有周期(sec)	0.23	0.24	1.04

ことに加え, SYS カムクレイモデルに関するこれまでの知見から, 発展則パラメータに関しては, 砂は粘土に比べて構造劣化速度および異方性の発展速度が大きく過圧密解消速度が小さいとしてモデル化が可能である. また, 密度と初期状態の関係は, 密度が小さいほど構造の程度は大きくて過圧密比は小さいとして記述できる. 表 1 には, 有限要素離散化された速度型運動方程式と水〜土骨格連成式からなる支配方程式に対して定式化した一般固有値問題⁴⁾から算出した地盤の初期固有周期も示している. 砂質地盤に比べて粘土地盤の固有周期が大きい. これは SYS カムクレイモデルでは土骨格の弾性変形に対して, 非線形等方 Hooke 則を仮定し, 体積弾性係数 \bar{K} とせん断弾性係数 \bar{G} は次式で与えられるが, 粘土の方が砂よりもせん断弾性係数 \bar{G} が小さいことからおおむね理解できる.

$$\bar{K} = \frac{J(1+e_0)}{\bar{\kappa}} p', \quad \bar{G} = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \bar{K} \quad (J: \text{ヤコビアン}, e_0: \text{初期間隙比}, \bar{\kappa}: \text{膨潤指数}, p': \text{平均有効応力}, \nu: \text{ポアソン比}) \quad (1)$$

図 1 に, 各地盤の地表面での加速度応答, フーリエ振幅スペクトルおよび水平変位量を示す. 粘土地盤および密な砂質地盤はともに加速度が大きく増幅している点で共通だが, 水平変位量には大きな違いが見られ, 粘土地盤の方が大きい. 図 1(b)には, 地盤の第 1 および第 2 次の初期固有周期を矢印で示している. 固有周期帯において地盤は共振して加速度が増幅するが, 上述の通り, 粘土地盤の固有周期は砂質地盤の固有周期に比べて大きい. 粘土地盤は水平変位が大きくなりやすい(揺れやすい). さらに, 今回の入力地震波はもともと長周期成分を多く含むため, 固有周期の大きい粘土地盤の方が共振の程度が大きかった効果も含まれる. 続いて, 緩い砂質地盤を見てみると, 地震初期こそ加速度が増幅するものの, 最大加速度付近からは加速度が減衰している. 図 2 には, 緩い砂質地盤と粘土地盤の鉛直方向中央部における地震中の p' の経時変化を示す. 粘土地盤ではほとんど変化していないが, 緩い砂質地盤は地震中に p' が

減少し、最終的にはゼロ付近となつて液状化を示している。図3には、中央部要素における要素挙動（応力ひずみ関係）を示す。粘性土地盤ではほぼ弾性的な応答を示すのに対し、液状化した砂質地盤は塑性変形が卓越する。この履歴減衰効果によって、緩い砂質地盤では加速度が減衰したことがわかる。なお、図2中には、地震中の固有周期の経時変化も示す。式(1)から、地震中の p' の減少に伴って剛性が低下するため、地盤の固有周期は次第に増加する。

3. 粘性土地盤で生じる減衰現象

2. では粘性土地盤において地震波が増幅することを示した。ここでは、粘性土地盤で地震動が減衰する事例を示す。このため、2. と同様に鉛直方向の一次元モデルを用いて、入力地震動の大きさが粘性土地盤の振動特性に及ぼす影響について検討した。具体的には、3連動地震波の加速度を仮想的に0.5倍、1.0倍、1.5倍、…8.0倍とし、入力地震波と粘性土地盤通過後の最大加速度との関係を調べた。

図4から、加速度が小さい範囲では、応答加速度は入力加速度よりも大きい、次第にその増幅率は低減し、最終的には入力地震動よりも小さくなる（減衰する）ことがわかる。図5は、粘性土中央部要素における要素挙動（応力-ひずみ関係）を示す。図3でも示したように、加速度が小さい範囲では粘性土地盤は、弾性的な応答が支配的であるが、加速度が大きくなると塑性変形が支配的になると、粘性土地盤であっても加速度は減衰することがわかる。なお、図4

で示した増幅率に上限値がある上に凸の曲線は、観測記録や数値計算によって示される既往の結果⁵⁾ともよく似ている。

4. おわりに

工学的基盤から上層の表層に向かうとせん断波速度 V_s は小さくなり、深部から伝播する地震動は、隣り合う層のインピーダンス比に起因する速度変化や地表面での波の反射、そして共振現象によって、概して増幅すると考えられている。本報では、砂地盤と粘性土地盤の揺れの特性について数値解析事例を示すとともに、地盤の状態と外力の大きさによっては砂質地盤であっても粘性土地盤であっても地震波の減衰現象が生じることを示した。軟弱地盤で地震波の減衰が生じるのは、土の塑性変形進展に伴う履歴減衰効果ということができる。本稿は、地盤工学会東日本大震災対応調査研究委員会「地盤変状メカニズム研究委員会（委員長：浅岡顕）」に関連する研究報告である。

参考文献 1) 浅岡顕他 (2011): 細粒分を多く含む砂質系表層土の..., 日本地震学会 2011 年度秋季大会予稿集, pp.56. 2) Asaoka et al. (2002): An elasto-plastic description of ...,S&F,42(5), 47-57. 3) Noda et al. (2008): Soil-water coupled finite deformation analysis..., S&F, 48(6), 771-790. 4) 清水亮太他 (2010): 固有振動解析による..., 第22回中部地盤工学シンポジウム論文集, 51-56. 5) 吉田望 (2010): 地盤の地震応答解析, 鹿島出版会, 11-15.

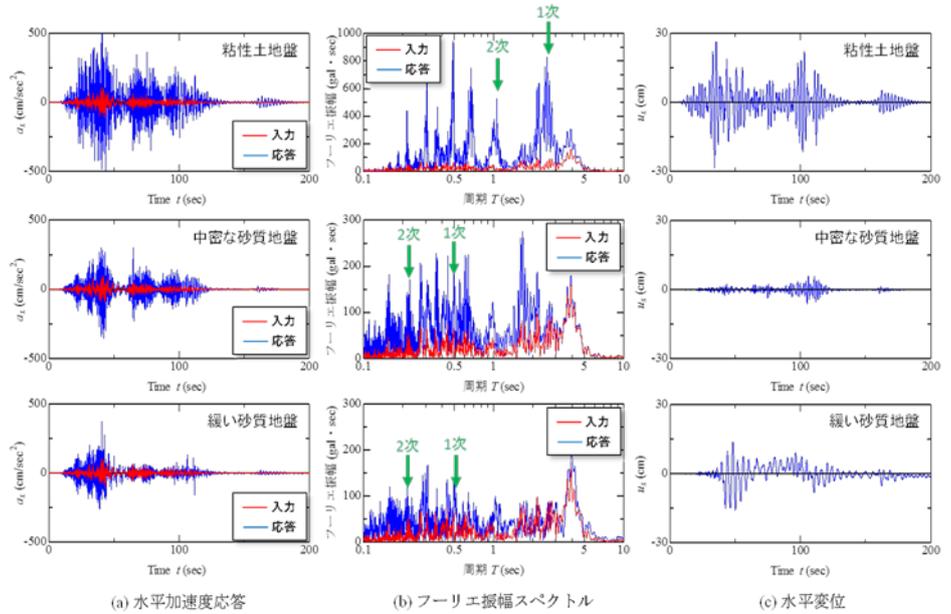


図1 3つの異なる地盤の振動特性

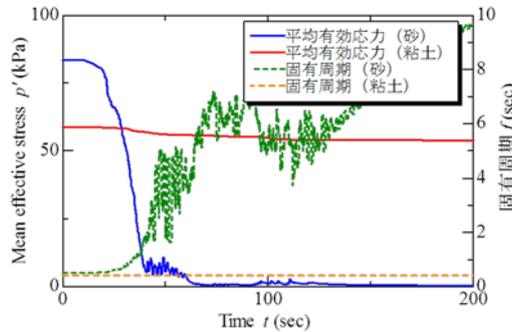


図2 地震中の p' の変化と固有振動数

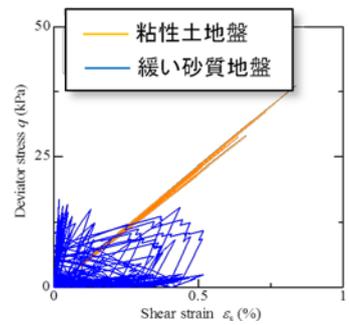


図3 地盤中央部での要素挙動

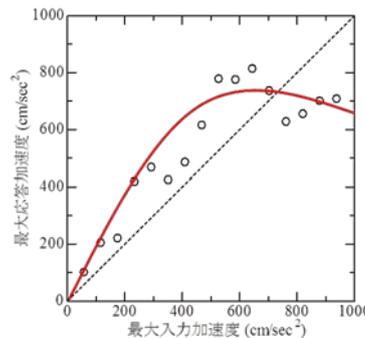


図4 加速度の増幅率

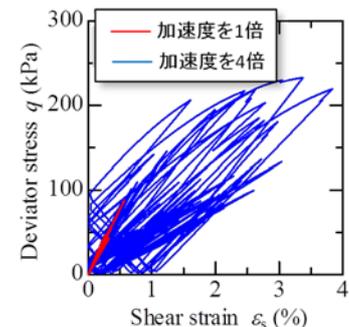


図5 地盤中央部での要素挙動