

繰返し載荷に伴う地盤の固有周期変化に着目した振動特性の把握

名古屋大学 学生会員 ○福永俊樹

名古屋大学 正会員 野田利弘 中井健太郎

1. はじめに

国土が狭く、その7割以上を山地が占めるわが国では、産業・経済活動の多くが古くから沖積平野や人工埋立地等の軟弱地盤上で行われてきており、今後もその傾向はより大きくなることが考えられる。他方、わが国は世界有数の地震大国であり、1995年の兵庫県南部地震や2011年の東北地方太平洋沖地震では多くの人命と資産が失われた。地盤工学分野において地震災害を最小限に留めるには、地震時に地盤に何が起こるのかを正確に把握することが必要である¹⁾。本報では、繰返し載荷に伴う地盤の固有周期変化に着目して、軟弱な砂地盤と粘土地盤の振動特性の把握を試みる。用いた解析コードは、砂から粘土さらに中間土までを同じ理論的枠組みで記述可能な土の弾塑性構成式(SYSカムクレイモデル²⁾)を搭載した動的/静的水～土骨格連成有限変形解析コード³⁾**GEOASIA**である。

2. 計算条件

解析には、横1m、縦20mの20要素1次元メッシュを用い、側面に周期境界を設けることで水平成層地盤を想定した。底面には粘性境界を設定し、基盤の密度 ρ は2.0(g/cm³)、圧縮波速度 V_p は1000(m/sec)、せん断波速度 V_s は300(m/sec)とした。地震動は底面の2節点の水平方向のみに入力した。地盤の材料パラメータは典型的な砂と粘土を想定して決定した(表1)。これまでの知見から、砂は粘土に比べて弾塑性パラメータにおいて圧縮指数 $\tilde{\lambda}$ 、膨潤指数 $\tilde{\kappa}$ が小さく、発展則パラメータにおいて構造劣化速度と異方性進展速度が大きく、過圧密解消速度が小さいとしてモデル化できる。表1には初期地盤の第1、第2、第3固有周期を、図1には第1、第2、第3固有モードを掲載する。これは、有限要素離散化された速度型運動方程式と水～土骨格連成式に対して定式化した一般固有値問題から算出した⁴⁾。表1から砂質土地盤に比べて粘性土地盤の固有周期が大きいことがわかる。このことは、SYSカムクレイモデルは土骨格の弾性変形に対して非線形等方Hooke則を仮定しており、体積弾性係数とせん断弾性係数は式(1)で与えられるが、粘土の方が砂よりもせん断弾性係数が小さいことから概ね理解できる。

表1 材料パラメータと固有周期

		緩詰め砂	粘性土
弾塑性性	圧縮指数 $\tilde{\lambda}$	0.05	0.27
	膨潤指数 $\tilde{\kappa}$	0.012	0.065
	限界状態定数 M	1.0	1.7
	NCLの切片 N	1.98	2.5
	ポアソン比 ν	0.3	0.3
発展則	正規圧密土化指数 m	0.06	10.0
	構造劣化指数 a	2.2	0.2
	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	2.5	0.001
初期値	回転硬化限界定数 m_b	0.7	1.0
	比体積 v_0	1.94	2.30
	構造の程度 $1/R_0^*$	5.0	5.0
	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 T_1	1.27	2.85
	第2固有周期 T_2	0.55	1.24
	第3固有周期 T_3	0.35	0.79

$$\tilde{K} = \frac{J(1+e_0)}{\tilde{\kappa}} p', \quad \tilde{G} = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \tilde{K} \quad (1)$$

ここに、 J はヤコビアン、 e_0 は初期間隙比、 $\tilde{\kappa}$ は膨潤指数、 p' は平均有効応力、 ν はポアソン比である。

3. 緩い砂質土地盤と粘性土地盤の振動特性

緩い砂質土地盤と粘性土地盤に対し、それぞれの第1固有周期と等しい最大加速度 50(gal)の正弦波を 150 秒間入力した。図2に緩い砂質土地盤の底面と地表面での加速度時刻歴を示す。加速度は大きく三度、増加と減少を繰り返している。図3に応答加速度が大きくなる、加振後2秒、44秒、86秒時点における平均有効応力 p' のコンター図（地盤の水平方向の変形量は10倍に拡大）

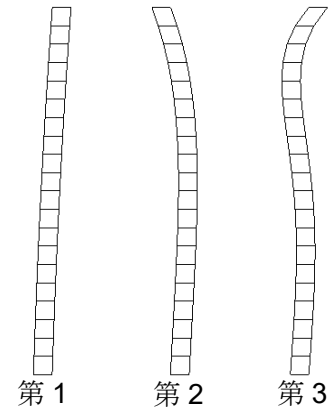


図1 固有モード

を示す。緩い砂質地盤は加振中にほぼ $p'=0$ となって液状化を生じている。図4には固有周期の経時変化を示すが、式(1)からわかるように、平均有効応力の減少に伴って地盤の剛性は低下し、固有周期は次第に大きくなる。図2と図4を比較すると明らかなように、入力波の周期（点線）と地盤の第1、第2、第3固有周期が近くなった時に応答加速度が増幅している。さらに、この時の変形の様子（図3）に着目すると、図1で示した固有モードとそれぞれが類似していることから、入力波の周期と地盤の固有周期が一致した際には、対応する固有モードで振動しながら加速度が増幅することもわかる。続いて、図5に粘性土地盤の底面と地表面での加速度時刻歴を示す。粘性土地盤は砂質地盤よりも地震波の増幅の程度が大きい。紙面の都合から図は省略するが、粘性土地盤は砂質地盤と比べて加振中の平均有効応力の変化が小さい（固有周期の変化が小さい）ためである。しかしながら、繰返し载荷に伴う塑性変形の進展によって、粘性土地盤であっても徐々に地盤の固有周期が変化して入力波の周期から外れてくるため、応答加速度は次第に小さくなる。

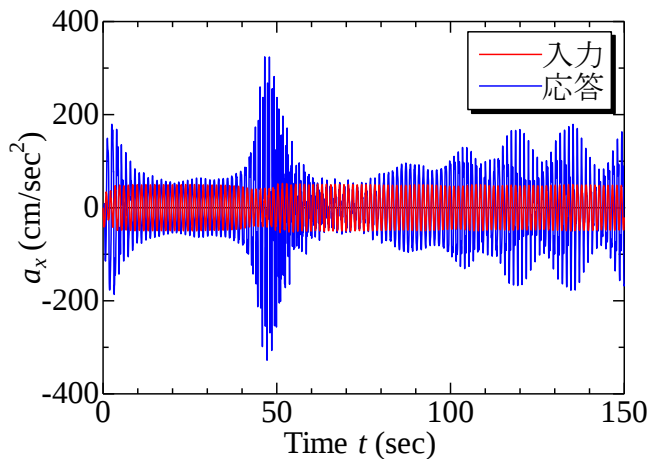


図2 加速度時刻歴

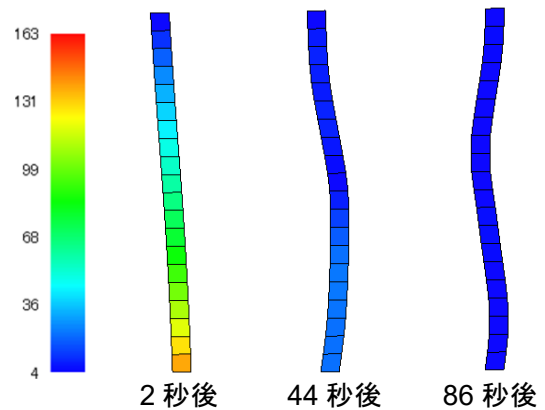


図3 平均有効応力分布

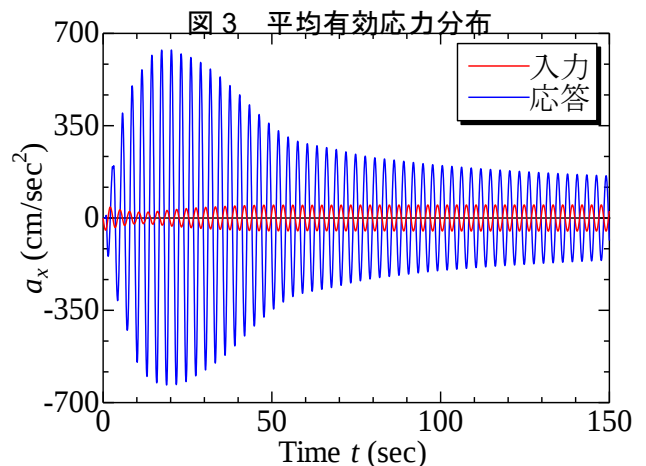
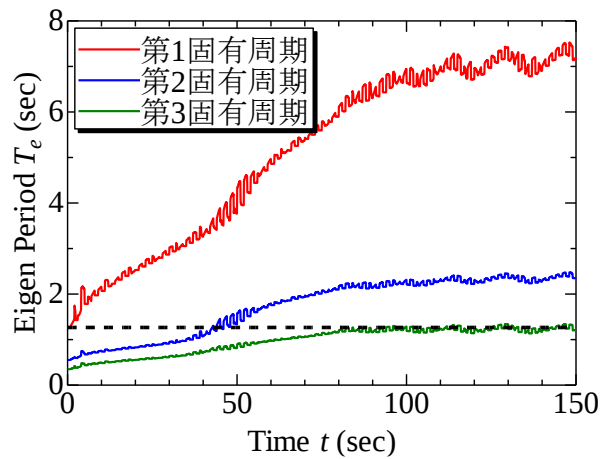


図5 加速度時刻歴



4. おわりに 図4 固有周期の経時変化

地震波が工学的基盤から上層に入射した際には、せん断波速度の違いや地盤内での反射により一般に増幅することが知られている。本報では、砂質土地盤と粘性土地盤ではその振動増幅特性が異なること、また、地震波の周期と地盤の固有周期が一致した際には共振により増幅の程度は大きくなるが、その時の振動は対応する固有モードで地盤が揺れることを示した。地盤の地震時挙動を把握するには地震波の大きさだけでなく、地盤の種類や地震波と地盤の周期特性に着目することが重要である。

参考文献 1) 福永俊樹他 (2012): 軟弱な砂地盤と粘土地盤の増幅・減衰特性..., 第 47 回地盤工学研究発表会, 848-849 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.