

[文章编号] 1002-8412(2012)05-0027-07

## 软粘土的地震行为研究

刘 军<sup>1</sup>, 马 亢<sup>2</sup>

(1. 江西省高速公路投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330025; 2. 厦门大学 建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

[提 要] 通过开展离心机动力试验,揭示了从基岩输出的地震波经过一定厚度的软粘土层传播到地表时,地震波高频成分将被过滤,地表运动的周期将变长,反映出土体在地震荷载的持续作用下将发生一定程度的软化,同时在一定的周期范围内,加速度反应谱幅值将得到不同程度的放大;最后开展了 ABAQUS 计算和理论分析以验证试验结论的合理性。该研究为自由场土体地震反应的基础性研究,成果对于结构抗震设计中场地选择以及土结动力相互作用研究具有一定的参考价值。

[关键词] 地震;软粘土层;放大效应;共振周期;土体软化;ABAQUS 计算

[中图分类号] TU47 [文献标识码] A

### Study on the Seismic Behavior of Soft Clay

Liu Jun<sup>1</sup>, Ma Kang<sup>2</sup> (1. Jiangxi Provincial Expressway Investment Group Co. Ltd., Nanchang 330025, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** By conducting centrifuge shaking table tests, revealed that when seismic wave originated from rock bed is transmitted to clay surface, high frequency components are filtered, and the effects of modulus reduction and stiffness degradation are manifested as an increase in the resonance periods of the clay layers with the level of shaking and with successive earthquakes. And during a range of period, spectral accelerations amplified in different degrees. Then ABAQUS back analysis and theoretical analyses are carried out to verify the results of centrifuge tests. This study is a basic research in the field of soil seismic response; the results can be referred for site choice of structure seismic resistant design and study of soil-structure dynamic interaction.

**Keywords:** earthquake; soft clay; scaling effect; resonance period; bending moment; ABAQUS back-analysis

**E-mail:** frogniuwa@163.com

### 1 引言

土体作为建筑物的地基,以及土坝、岸堤、挡土墙等岩土构筑物和天然边坡的材料,其地震反应行为和变形强度特征对这些建筑物地震破坏的影响很大,在某些情况下甚至起决定性作用;再者,作为地震波的传播介质,场地土的分布和动力学特性对地震波有着显著的放大作用,很大程度上决定着建筑物基础的地震反应水平,因此,研究软粘土在真实地震作用下的动力行为对于结构的抗震设计及土结动力相互作用机理具有重要的指导意义。不同于以往大多针对沙土液化问题的研究,专门针对软粘土场

地条件的地震行为研究在国内外开展的还十分有限。墨西哥城深软粘土地基的惨痛教训,即使对于距离震中数百公里的远场地震(>400km 以上),由于软粘土体的强烈放大作用,也会造成严重的破坏。图 1 为一典型 10 层楼房的震后垮塌。

自从软粘土在动荷载作用下强度持续降低等非线性行为首次被 Idriss<sup>[1]</sup>发表以来,对土的动力学特性尤其是围绕动剪模和阻尼比这两个基本动力参数的室内研究(主要包括大应变动三轴和小应变共振柱试验)逐步受到重视并在世界范围内广泛开展起来,其中研究工作开展的比较好的有 Hardin and Drnevich(1972), Vucetic and Dobry(1988), Ishihara(1996), Teachavorasinskun et al(2001), 以及我国的谢定义等<sup>[1-5]</sup>。他们从不同角度讨论了软土在各种应变水平及动载频率下的动力行为,然而在具有任

[收稿日期] 2011-12-09

[基金项目] 中国留学基金委项目(国家建设高水平大学公派研究生项目);国家自然科学基金“重大国际合作研究项目”(50620130440)

意频谱特性的真实地震荷载作用下,软土体的动力行为研究尚十分有限,很大程度上还依赖于小标准试样的动力试验成果。本文依托新加坡国立大学(NUS)岩土离心机实验室,基于1985年墨西哥城震灾背景,针对性地开展软粘土体的离心机地震模型试验,揭示了软粘土层的地震反应规律及其发生机理,同时开展了ABAQUS计算分析和理论分析以验证试验结论的合理性。我国沿海地区尤其是东南沿海软土、淤泥质土以及海洋松散层积物分布广泛,深刻了解软土的地震反应特性对于该地区大规模的城市建设和基础设施建设具有重要的指导意义。



图1 楼房震后垮塌

Fig. 1 Building Collapse after Mexico City earthquake

## 2 离心机动力试验成果

### 2.1 试验系统

试验是在新加坡国立大学(NUS)岩土离心机上完成的,试验加速度水平为50g。离心机模型试验最突出的优势是通过将工程模型置于高速旋转的离心机内,让模型承受若干倍于重力加速度的离心加速度作用,补偿因模型缩尺带来的原型构筑物自重的损失,使模型的应力状态保持与原型相同,以便能比较真实地模拟原型的性态,比通常在静力(重力加速度)条件下的物理模拟更接近实际,因此在岩土工程试验技术中占有重要地位,并得到越来越广泛的应用。同时,对试验室数据采集系统和传感器测试技术的难度要求也大大增加。试验前首先将振动台安装至离心机的负载吊蓝内并调试,试验安装细节可参见文献[6~9],如图2所示。除特别的说明外,本文均以原型单位作讨论。

### 2.2 土样制备

试验采用的软粘土是由高岭土粉末和水按质量比1:1.2混合搅拌而成的。首先,让其在真空搅拌机内充分搅拌4h,然后将混合均匀的高岭土灌入事

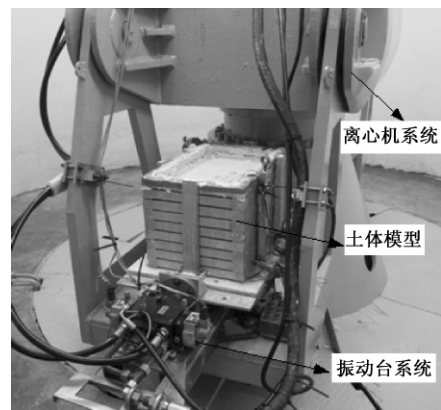


图2 软粘土的离心机-振动台模型试验布局

Fig. 2 Layout of centrifuge shaking table test for pile-raft-clay system

先装好橡皮袋(防漏水)的层状剪切模型箱内(各层间设有滑轮可自由相对滑动,目的是允许不同土层在地震过程中发生剪切变形见图3)。

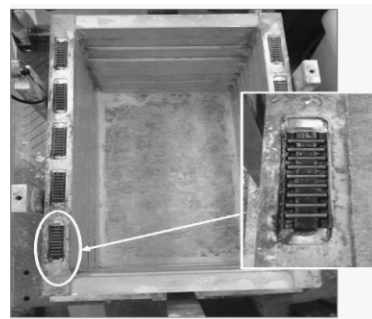


图3 层状模型剪切箱

Fig. 3 Laminar box

在此之前,需先在橡皮袋底部铺设一层约0.2m厚的沙层作为固结排水路径并插好排水软管,同时预埋好土底加速度传感器用于测量土底(输入)加速度反应,高岭土的基本工程性质见表1所示。

表1 高岭土的基本工程性质

Table 1 Geotechnical properties of kaolin clay

工程特性	高岭土
重度( $kN/m^3$ )	16
含水率	66%
液限	80%
塑限	40%
渗透系数( $m/s$ )	$1.36 \times 10^{-8}$
初始空隙比	1.74
内摩擦角	$25^\circ$

土样装好后,需要一个固结过程以获得期望的

强度和应力历史。通常土体的自然固结过程需要经历漫长的地质年代,首先将模型箱内的土样在重力条件下(1g)预固结一周左右,以形成少许初期剪切强度,然后启动离心机加速至 50g 进行超重力场条件下的固结过程。根据以往试验经验和 Terzaghi 一维固结理论计算可知,整个固结时间约为 10h,固结后需测量土体厚度以作后续分析,如图 4 所示。



图 4 固结后土体(50g)

Fig. 4 Clay layer after consolidation

### 2.3 输入地震动

本文根据新加坡深软粘土场地实测的历次地震反应(主要是由苏门答腊断层破断引起的远场地震),具有持时与周期都相对较长以及峰值强度较弱的典型远场地震特征。根据这些地震的反应谱,可人工合成本次研究的输入地震加速度时程曲线<sup>[10]</sup>。三次地震事件(小震、中震和大震)只是按比例缩放,峰值加速度(PGA)分别为 0.022g、0.052g 和 0.13g,其他性质如频谱特性和持时等均相同。

基于加速度时程曲线,二次积分后可得位移时程曲线,然后各自缩小 50 倍(离心机加速度为 50g),并转换为数字信号输至振动台的伺服作动器,这样模型试验就在期望的地震条件下进行,与原型在真实地震作用下的情况相一致,试验中留有专门通道信号予以验证。

在每次试验中,模型将连续被 6 次地震激励,由 2 个相同的地震系列 1 和 2 (cycle1 和 cycle2) 组成,每个地震系列又由小震(Small earthquake)、中震(Medium earthquake)和大震(Large earthquake) 3 次地震事件组成。图 5 为离心机试验所连续触发的地震事件。

### 2.4 试验成果分析

图 6 为土体中加速度传感器的布置情况:A1 位

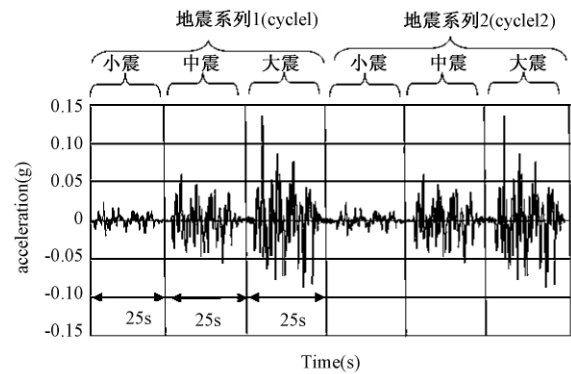


图 5 离心机试验所连续触发的地震事件

Fig. 5 Sequential triggered earthquake events for centrifuge tests

于土体底部测量底部加速度时程(输入地震动),A3 位于土表测量土表的地震反应。图 7 为一次典型离心机试验的实测结果(地震系列 1,大震)。

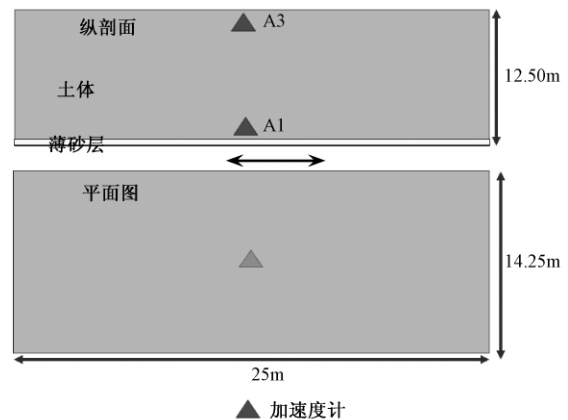


图 6 土体加速度计布置情况

Fig. 6 Position of accelerometers placed in clay sample

由图 7(a)和(b)可以看出,地震波从土体底部向土表传播时,总体上平均而言,土表的振动要大于土底输入的振动,证明土体对输入的地震波有一定的放大效应;同时土体对地震波具有过滤效应,地震波从土底传到土表时,高频成分基本被滤掉。

图 7(c)为对应于土体底部(base)与土表(surface)加速度时程的反应谱曲线。反应谱是描述对于特定地震的振动,具有任意固有周期和阻尼系数的单自由度系统(SDOF)的最大反应。对于受到具有一定强度、周期特性以及持续时间的地震振动,反应谱法是一种非常行之有效的方法用于确定土体(土表或土底)或结构的运动特性。从图 7(c)得到的土表和土底的反应谱曲线可以明显看出,与

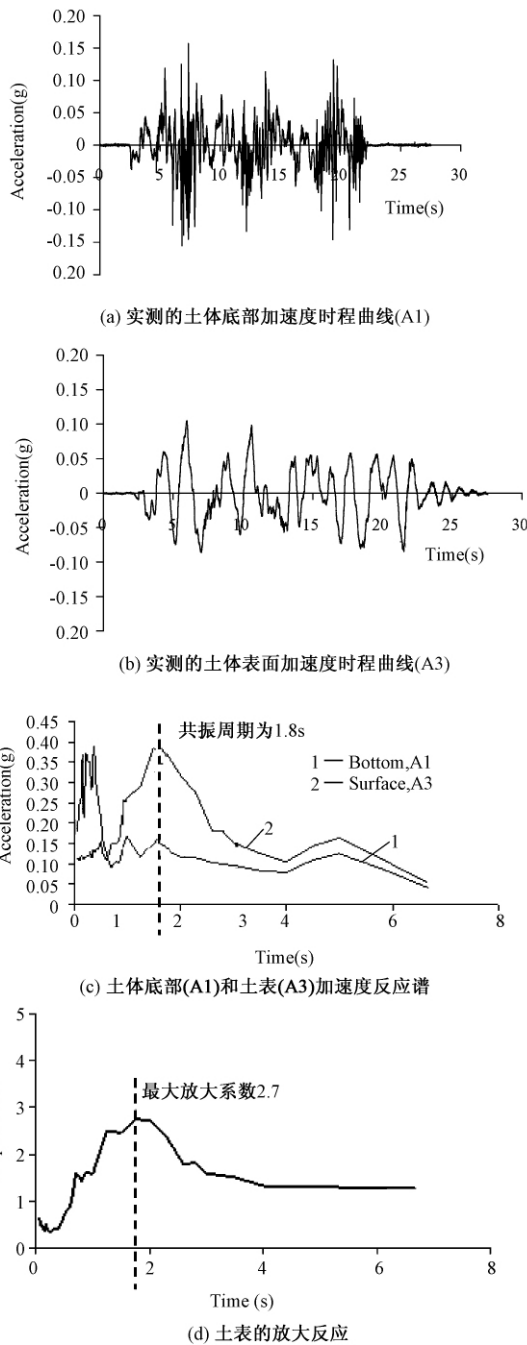


图7 试验实测加速度时程和反应谱  
 Fig.7 Measured acceleration time histories and response spectra

土体底部相比,土表的反应谱加速度幅值在固有周期1~3s范围内得到了显著的放大;将每一固有周期下的土表反应谱幅值与土底输入反应谱幅值的比值即放大系数绘于图7(d)中,可见,土表的最大放大系数约为2.7,发生于固有周期约为1.8s。本研

究中,将最大放大系数所对应的固有周期定义为土体的共振周期(Resonance period)。明显看出,从基岩输出的地震波经过一定厚度的软土传播到土表时,周期将从0.4s延长到1.8s,周期变长。

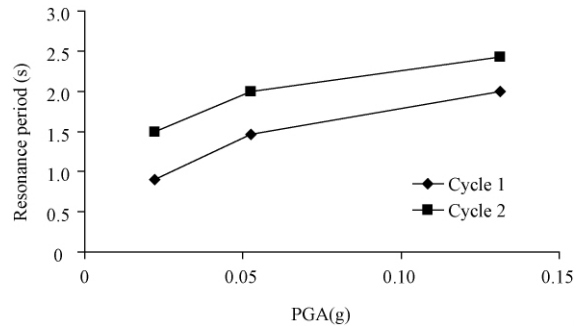


图8 土体的共振周期  
 Fig.8 Resonance period of clay surface

图8为土体表面(A3)在2个地震系列共6次连续地震事件的共振周期总结。可见,对于相同的地震事件(小震、中震或大震),系列2的周期值明显高于系列1,这说明土体从地震系列1到系列2的持续作用下,土体发生了软化以致强度(刚度)降低;同时,在每个地震系列中,土体的周期随着地震强度(PGA)增大而增大,这也是所期望的,因为强度大的地震将使土体内也将产生大的应变水平,由土动力学知识可知(如图10,应变水平越大,土体强度越弱),这将导致更低的土体强度,因此周期变长。

### 3 ABAQUS 计算分析

为了验证试验结果的合理性,采用ABAQUS 6.9软件对所有试验结果进行计算分析。ABAQUS软件是目前工程领域中最优秀的计算程序之一,以其卓越的非线性和计算稳定性闻名于世,并提供了许多接口,可供用户按需要进行二次开发。ABAQUS采用Newmark时间步长的积分算法分析动力问题。

#### 3.1 模型网格

考虑到研究对象的对称性,取半模型作计算分析。根据试验真实情况和原型尺寸,模型被离散为7678个20节点的实体单元(C3D20),如图9所示。为降低地震波传递造成单元的扭转效应,单元的最小尺寸应小于地震剪切波波长的1/10~1/8<sup>[11]</sup>。

#### 3.2 土的本构模型

土的本构模型采用ABAQUS内嵌的Hypoelastic模型,该模型假设材料的弹性模量和泊松比是应变

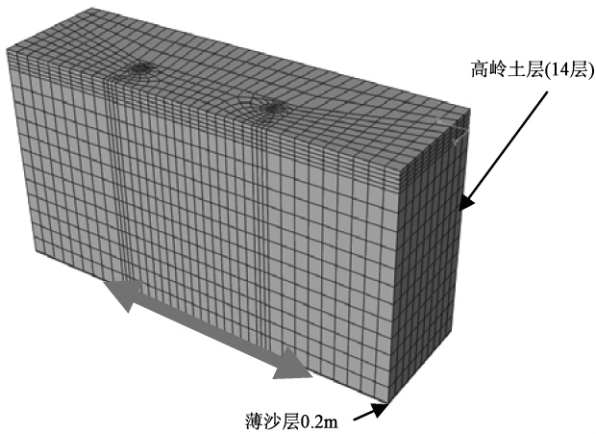


图 9 ABAQUS 3D 模型

Fig. 9 ABAQUS 3D Model

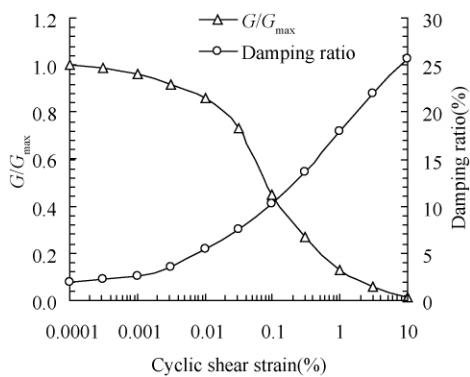


图 10 剪切模量比、阻尼比与剪应变水平的关系 (据 Vecetic)

Fig. 10 Relations between Shear modulus ratio, damping ratio and shear strain level (by Vecetic)

不变量的函数,其本构方程见式(1)。这对土体十分适合,因为土的强度与应变水平的关系十分紧密,它充分反映了土体的非线性行为。本文采用 Vecetic<sup>[12]</sup>提供的剪切模量与剪应变之间的关系曲线,见图 10 所示。

$$d\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left( d\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} d\varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (1)$$

其中  $d\sigma_{ij}$ ,  $d\varepsilon_{ij}$  分别为应力和应变张量,当  $i=j$ ,  $\delta_{ij}=1$ ; 当  $i \neq j$ ,  $\delta_{ij}=0$ 。

按 Viggiani<sup>[13]</sup> 提出的高岭土最大剪切模量的估算公式为:

$$G_{max} = 1964 (p')^{0.653} \quad (2)$$

$$p' = \frac{(1+2K_0)}{3} \sigma'_v, \sigma'_v = \gamma H \quad (3)$$

其中:  $\gamma$  为高岭土的有效重度 = 6kN/m<sup>3</sup>; 高岭土的

内摩擦角取:  $\phi = 25^\circ$ 。

$$K_0 = 1 - \sin\phi' \approx 0.58 \quad (4)$$

模型包括 14 层土,每层土的最大剪切模量  $G_{max}$  可由式(2)~式(4)确定,见表 2 所示。

表 2 各土层的最大剪切模量  $G_{max}$

Table. 2 The maximum shear modulus  $G_{max}$  of each layer of clay bed

层序	层厚(m)	$G_{max}$ (kPa)	各土层中点埋深(m)
1	0.5	2081	0.25
2	0.5	4265	0.75
3	1.0	6839	1.50
4	1.0	9707	2.50
5	1.0	12168	3.50
6	1.0	14406	4.50
7	1.0	16453	5.50
8	1.0	18382	6.50
9	1.0	20209	7.50
10	1.0	21952	8.50
11	1.0	23625	9.50
12	1.0	25237	10.50
13	1.0	26786	11.50
14	1.0	28298	12.50

### 3.3 模型边界条件

为了模拟地震过程中剪切模型箱各层的运动,即反映土体的剪切变形,线性多点约束(linear multi-point constraints)将用于模拟同高程的、与地震振动方向相垂直的、模型两端面内平行节点(振动方向)的运动一致性,如图 11 所示。

此外,在模型的 4 个垂直端面 and 底面内的各节点上,施加垂直位移约束(重力方向)用于限制模型只能沿着地震振动方向运动;另外,模型对称面将额外施加对称位移约束(法向)。

### 3.4 输入地震加速度

对于每次 ABAQUS 计算分析,采用相应试验中所实测的土底(加速度计, A1) 加速度时程,施加于模型底面内的所有节点作为输入地震动,然后将与试验模型中所埋传感器(土表加速度计, A3) 对应位置的节点计算结果提出,与试验结果作对比分析。

### 3.5 计算结果和试验结果对比

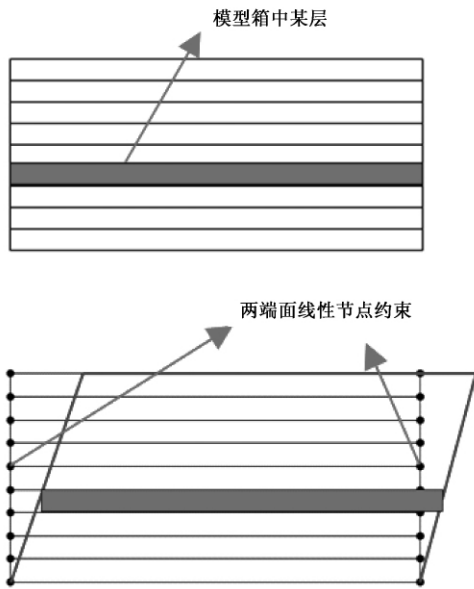


图 11 线性节点约束模拟模型箱的运动

Fig. 11 Linear multi-point constraints to simulate the movement of laminar box

对应于图 7,图 12 给出了 ABAQUS 的计算结果,以与试验实测结果作对比分析。可见,尽管存在一定的差异,但计算结果总体上能充分地反映试验实测的加速度时程和反应谱特征,确定的共振周期也与试验值吻合。

由 ABAQUS 计算得到的土体共振周期(地震系列 1) 汇总结果见图 13 所示,可见,计算结果能充分反映试验实测的土表加速度时程、反应谱特征以及共振周期等重要的工程设计参数,充分说明了试验结果是合理的。

#### 4 软土层周期的理论计算

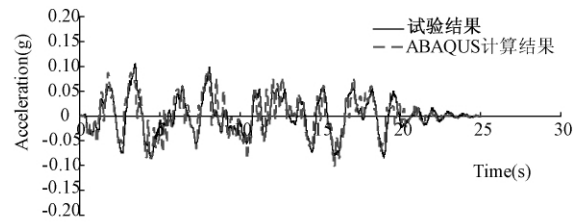
Ishihara<sup>[3]</sup>从土柱的共振理论分析得到,对于一定厚度的软土层,其一阶共振周期可由式(5)表达如下:

$$T_s = \frac{4l}{V_s} \quad (5)$$

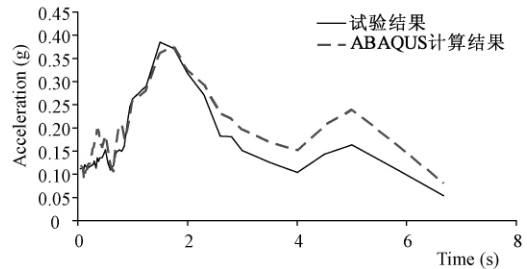
式中  $l$  为土体厚度;  $V_s$  为土体的剪切波速,且有:

$$V_s = \sqrt{\frac{G_s}{\rho_s}} \quad (6)$$

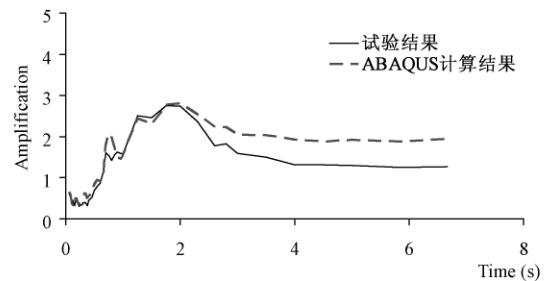
从式(5)可知,土层的周期与其剪切波速度呈反比。一般来说,对于强度高、宏观硬度大的土体其剪切波速较大,而对于淤泥或类似于本文研究的高岭土,其波速一般较低,处于 40 ~ 100 m/s 之间<sup>[14]</sup>,



(a) 加速度时程曲线对比(A3)



(b) 加速度反应谱对比(A3)



(c) 放大系数对比(A3)

图 12 ABAQUS 计算加速度时程和反应谱与试验结果对比

Fig. 12 Measured acceleration time histories and response spectra

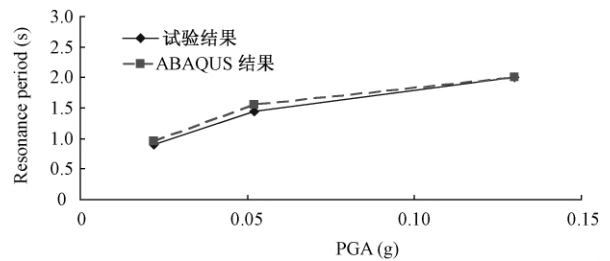


图 13 计算与实测土体共振周期比较

Fig. 13 Resonance period of clay

因此按式(5)计算的土体周期约在 0.5 ~ 1.25s 范围内,基本与试验确定的 0.9s 相吻合,而后随着地震持续的作用,土体的软化加剧,波速降低,试验实测的土体共振周期也随之延长,与式(5)给出的理论趋势相一致。

## 5 主要结论

本文通过开展软土层的离心机动力试验,深入讨论了土体在真实地震荷载下的动力行为,并开展 ABAQUS 计算和理论分析给予了验证和解释,本文取得的主要成果如下:

(1) 在地震的持续作用下,土体将发生一定程度的软化,表现为周期的持续增大,地震波从基岩破裂输出,经过一定厚度的软土层传播到地表时,在一定的周期范围内,加速度反应谱幅值将得到一定程度的放大,同时高频成分被滤去。

(2) 通过本文研究,得知土体的周期一般在 1 ~ 3s,这正处于中高层楼房(按  $T \approx 0.1N$  估算)的自振周期范围内,由于两者的周期相近,共振效应将十分显著,从而对建筑结构极为不利,墨西哥城地震的惨痛经验就是一个典型代表。因此,不同于超高层建筑(一般大于 50 层,一阶周期在 5s 以上),中高层建筑必须充分考虑场地的地震特性,在设计中需作某些特殊的考虑。本文研究为纯软粘土的基础性研究,成果和研究思路可为工程抗震设计中场地选择以及土结相互作用提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] Hardin B O and Drnevich V P. Shear Modulus and Damping in Soils: Measurement and Parameter Effects (Terzaghi Lecture) [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1972, 98(6): 603 ~ 624
- [2] Vucetic M and Dobry R. Degradation of Marine Clays under Cyclic Loading [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 1988, 114(2): 133 ~ 149
- [3] Ishihara K. Soil Behavior in Earthquake Geotechnics [M]. Clarendon Press, Oxford, 1996
- [4] Teachavorasinskun S, Thongchim P and Lukkunaprasit P. Shear Modulus and Damping Ratio of a Clay During Undrained Cyclic Loading [J]. Geotechnique, 2001, 51(5): 467 ~ 470
- [5] 谢定义. 土动力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987
- Xie Ding-yi. Soil Dynamics [M]. Xi'an: Xi'an Jiao Tong University Press, 1987 (in Chinese)
- [6] Banerjee S, Goh S H and Lee F H. Response of Soft Clay Strata and Clay-Pile-R Systems to Seismic Shaking [J]. Journal of Earthquake and Tsunami, 2007, 1(3): 233 ~ 255
- [7] 马亢. 地震条件下桩筏基础与土的动力相互作用机理研究 [D]. 成都: 四川大学, 2010
- Ma Kang. Dynamic Pile-Raft-Soil Interaction in Soft Clay condition during earthquakes [D]. Chengdu: Doctoral Dissertation of Sichuan University, 2010 (in Chinese)
- [8] Zhao P. Centrifuge Modelling of Seismic Amplification in Some Singapore Soil Conditions [D]. National University of Singapore, 1999
- [9] Niu J X. Centrifuge Modelling of Earthquake Effects on Sand and Soft Clay Strata [D]. National University of Singapore, 1997
- [10] Yu Y and Lee F H. Seismic Response of Soft Ground [A]. Proceedings of Physical Modelling in Geotechnics-ICPMG'02 [C]. St. Jhon's, Canada, 519 ~ 524
- [11] Snyder J L. Full Scale Test Lateral Load Tests of a 3x5 Pile Group in Soft Clays and Silts [D]. Brigham Young University, USA, 2004
- [12] Vucetic M. Normalised Behaviour of Offshore Clay under Uniform Cyclic Loading [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25: 33 ~ 41
- [13] Viggiani G and Atkinson J H. Stiffness of Fine-grained Soils at Very Small Strains [J]. Geotechnique, 1995, 45(2): 249 ~ 265
- [14] Elly Tenando. Strength Properties and Mineralogy of Singapore Old Alluvium [D]. National University of Singapore, 2003.

[作者简介] 刘军(1981~),男,硕士,工程师,主要从事高速公路建设及岩土地震工程等方面的研究