

水平黏性土地基动力离心模型试验

陈正发¹, 于玉贞²

(1. 山东理工大学 建筑工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 从黏性土地基模型的制备、固结到 50 g 离心机加速度条件下对振动台激励的反应等方面, 介绍水平黏性土地基地震动力响应的离心模型试验方法和步骤。试验结果表明, 在地震动作用下, 所研究的黏性土地基土层从下到上最大地震峰值加速度逐渐增加, 说明该自由场地基土层从下到上对地震有放大作用。从土层的加速度反应谱可以看出, 在输入的 Parkfield 地震波作用下, 该地基的自然频率为 0.5 Hz, 地基对低频成分有放大作用, 而对大于 10 Hz 的频率成分几乎没有放大作用。由位移和孔压的变化曲线可知, 地基表层土在地震过程中发生的侧向位移最大, 而表层以下的土层侧向位移不大。地震过程中中下部土层的孔压增长量最大, 中上部土层的孔压增长量次之, 底部土层的孔压增长量最小。

关键词: 土力学; 黏性土地基; 地震; 离心模型试验; 振动台

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3283 - 05

DYNAMIC CENTRIFUGAL MODEL TEST ON HORIZONTAL CLAYEY GROUND

CHEN Zhengfa¹, YU Yuzhen²

(1. School of Architecture Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China;

2. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The study on dynamic response of clayey ground due to earthquake is presented using centrifugal shaking table. The details of the experiment are described including the preparation of model, consolidation of the clayey ground and dynamic centrifugal model at condition of 50 g centrifugal acceleration. The model test results indicate that the peak amplitude of the response acceleration increases from bottom to surface. From the results of the spectral amplification of acceleration, it can be seen that the range of low frequency below 10 Hz is amplified; and the resonance frequency of the concerned clayey ground is about 0.5 Hz with the action of input Parkfield Seismic wave. The lateral displacement of the surface layer is maximum; and the middle and bottom layers are not evident. The curves of pore pressure change show that the pore pressure increase of the middle stratum is maximum and the substratum is minimum.

Key words: soil mechanics; clayey ground; earthquake; centrifugal model test; shaking table

1 引言

目前, 室内土工振动试验设备主要有动三轴仪、共振柱仪、地面常规振动台和土工离心机振动台等。

动三轴仪和共振柱仪只能进行土体单元试验, 研究单一类型土的动力特性而不是地基土层或土工结构物的动力反应特性; 地面常规振动台可进行地基及土工结构物动力反应模型试验, 但模型与原型中的应力状态相差甚远。离心机振动台动力模型试验能

收稿日期: 2006 - 06 - 04; **修回日期:** 2007 - 02 - 04

基金项目: 山东理工大学科技基金资助项目(2006KJM09); 清华大学基础研究基金资助项目(JC2002007)

作者简介: 陈正发(1971 -), 男, 硕士, 1996年毕业于山东科技大学土木工程系建筑工程专业, 主要从事岩土工程方面的教学与研究。E-mail: chenzhengfa@tsinghua.org.cn

克服上述常规地面振动台试验的弱点，可以使模型与原型的应力与应变相等、变形相似、破坏机制相同，是研究岩土工程地震问题较有效、最先进的研究方法和试验技术^[1]。

早在 20 世纪 40 年代，前苏联就率先在离心机上进行了动力离心模型试验。直到 20 世纪 80 年代，用离心机模拟地震问题才在世界范围迅速发展起来^[2]。经过 20 多年的发展，离心机振动台模型试验技术已在岩土工程地震问题的研究中得到越来越广泛的应用。但由作者^[3]的研究可以看出，许多研究都是针对非黏性土的动力反应展开的，而针对黏性土地基在地震作用下的动力离心模型试验研究相对较少。Y. Yu 和 F. H. Lee^[4]研究了海相黏土地基的地震动响应，但所采用的输入地震波极小，且给出的响应信息只有加速度。实际上，对于黏性土地基在地震作用下的动力离心模型试验研究也是非常重要的。比如，1985 年美国密歇根州发生的地震就对坐落在厚软黏土地基上的墨西哥城造成了严重破坏。

本文旨在探索水平黏性土地基动力离心模型试验方法，并初步研究水平黏性土地基在地震作用下自由场的真实动力响应。

2 地基模型制备

试验采用的土样取自北京三元桥附近场地。经试验测定，土的最大干密度 $\rho_{d,max} = 1.65 \text{ g/cm}^3$ ，最优含水量 $w_{op} = 21\%$ ，塑性指数 $I_p = 16.3$ ，土粒比重 $G_s = 2.72$ 。

经过多次试验的反复对比，最终采用含水量为 $w = 50\%$ 的泥浆制样。其原因如下：首先， $w = 50\%$ 的泥浆具有一定的流动性，便于制样；其次，只有确保黏性土的流动性才能保证试样的高饱和度；再次， $w = 50\%$ 的泥浆，其黏稠度正好可以让加速度计等传感器在制样的过程中很好地定位。饱和黏性土样的制备采用自行研制的饱和黏性土真空搅拌机搅拌均匀。

试验采用 $500 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 的叠片式模型箱。在向模型箱里装土样之前，先在模型箱底部放一层厚度为 8 mm 、粒径为 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 的饱和粗砂层，在粗砂层上面放一层 2 mm 厚的细土工织物。为了使粗砂层达到排水目的，在粗砂中蛇行地放置一根外径为 4.5 mm 、内径为 3 mm 的硬塑料管，埋在粗砂中的塑料管段上每隔 3 cm 打 1 个直径为 2

mm 的小孔，塑料管的另一端从模型箱的一角伸出到土样模型的上表面。至此，水平黏性土地基模型下部的排水层完全建立，排水层的厚度约为 10 mm 。

在排水层的上表面平行放置 2 个加速度计和 1 个孔压传感器，然后向模型箱中放置搅拌均匀的饱和黏性土样。在地基模型的中间上下平行地放置 2 排加速度计和 2 个孔压传感器，模型的上表面放置 2 个加速度计。模型箱的外侧(远离作动器一侧)按上、中、下位置放置 3 个位移传感器，模型的顶部放一层 $\phi 2 \text{ mm}$ 厚的细土工织物，以用作排水层。模型尺寸和传感器的布置如图 1 所示。

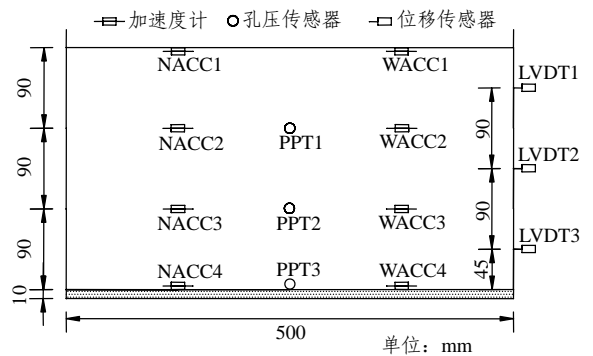


图 1 水平黏性土地基模型和传感器布置

Fig.1 Clayey ground model and layout of sensors

模型试样装配完成后，进行试样的固结。首先是在 1 g 下给模型以 2 kPa 的预压固结，等到地基模型有了一定的强度后，即可进行抽气固结。抽气固结不仅可以使地基模型在制样的过程中产生的孔隙气体很好地排出，进一步增大地基模型的饱和度，更为重要的是，抽气固结可以使地基模型的固结条件达到和离心机 50 g 时的固结条件即原型地基的固结条件相同，节省资金。抽气固结曲线如图 2 所示，所需固结时间约为 5 d 。

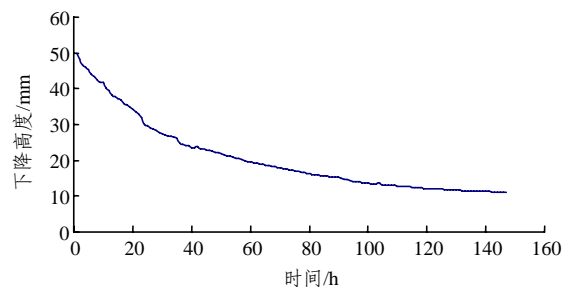


图 2 抽气固结曲线

Fig.2 Curve of consolidation by gasbleed

3 试验及结果分析

试验在清华大学土工离心机振动台上完成，该

振动台采用电液伺服控制。数据的采集、记录采用 DDS32 数据采集系统, 该系统能进行多通道(64 通道)高频(采样率 10 kHz)、实时采集记录数据。试验在 50 g 离心加速度环境下进行, 地震激励使用的是经过迭代的调峰 Parkfield 地震波曲线(如图 3 所示)。试验第 1 步进行离心机振动台系统检查, 检查无误后建立供油压力; 第 2 步为等质量迭代, 即用和试验模型(包括模型箱、传感器等附件)等质量的物体安装在振动台上进行地震波迭代, 其目的是为了获得试验激励用地震波; 第 3 步为正式试验, 即在 50 g 离心加速度条件下, 用迭代生成的地震波驱动振动台进行试验。详细的试验方法和试验步骤参见作者^[5]的研究成果。

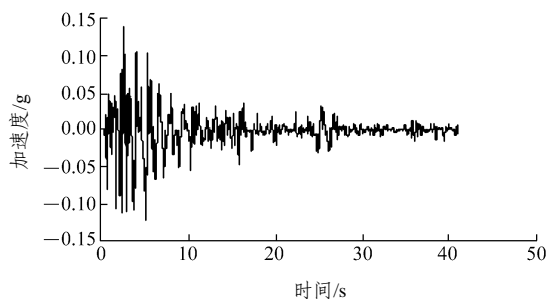


图 3 输入的 Parkfield 地震波曲线
Fig.3 Curve of input Parkfield seismic wave

从拆样结果看, 传感器的定位较好, 原来处于同一水平面的加速度计固结后仍然处于同一水平面, 且加速度计的方向也没有发生变化。对试验后土样的含水量进行了测量, 发现随着土层深度的增加含水量逐渐减小, 土层的平均含水量分别为: 上层土 $w_{上} = 38.6\%$, 中上层土 $w_{中上} = 31.3\%$, 中下层土 $w_{中下} = 27.7\%$, 下部土层 $w_{下} = 26.1\%$ 。证明土的密度随着土层深度的增加而增加, 孔隙比随土层深度减小。

3.1 加速度反应

图 4~7 所示为内排 4 个加速度计所测得的加速度时程曲线(原型, 以下同), 图 8~11 为外排 4 个加速度计所测得的加速度时程曲线。由图 4 和 7 的比较可以看出, NACC1 曲线的最大峰值加速度为 0.164 g, 而 NACC4 的最大峰值加速度为 0.124 g, 即土层表面的最大峰值加速度明显高于土层底部的最大峰值加速度。由图 8 和 11 的比较也可以看出, WACC1 的最大峰值加速度也明显大于 WACC4 的最大峰值加速度。比较图 4~7 的 4 个加速度时程曲线还可以发现, NACC1~NACC4 最大峰值加速度

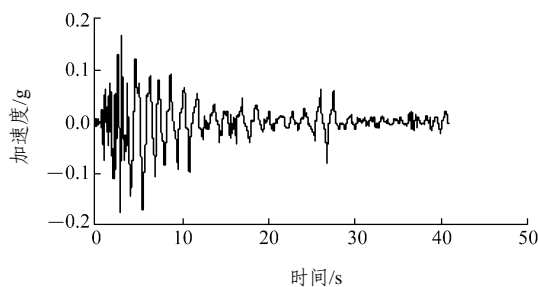


图 4 NACC1 加速度时程曲线
Fig.4 Time-history curve of acceleration for NACC1

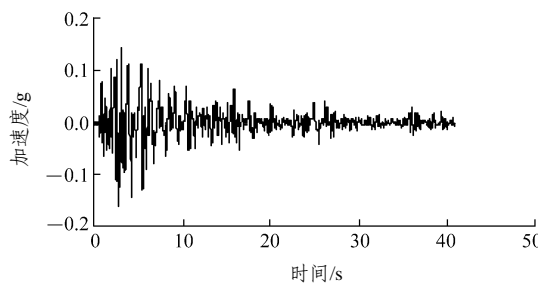


图 5 NACC2 加速度时程曲线
Fig.5 Time-history curve of acceleration for NACC2

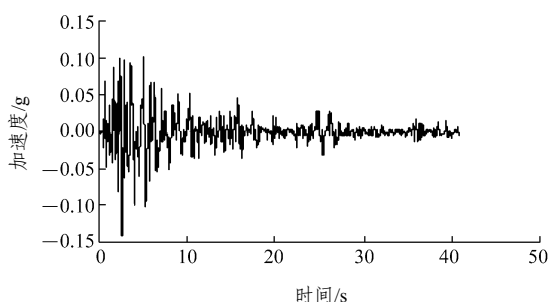


图 6 NACC3 加速度时程曲线
Fig.6 Time-history curve of acceleration for NACC3

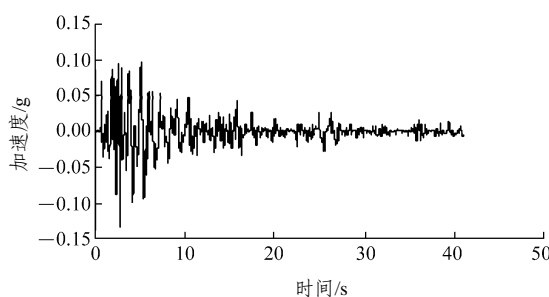


图 7 NACC4 加速度时程曲线
Fig.7 Time-history curve of acceleration for NACC4

逐渐减小, 即随着土层深度的增加, 最大峰值加速度逐渐减小。同时, 比较图 8~11 也可以发现有相同的规律。由此可以看出, 在黏性土地基中, 随着土层厚度的增加, 地震波的最大峰值加速度从下向

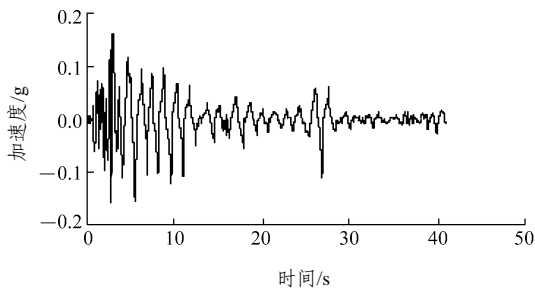


图 8 WACC1 加速度时程曲线

Fig.8 Time-history curve of acceleration for WACC1

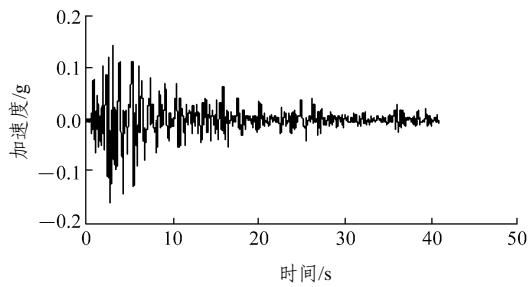


图 9 WACC2 加速度时程曲线

Fig.9 Time-history curve of acceleration for WACC2

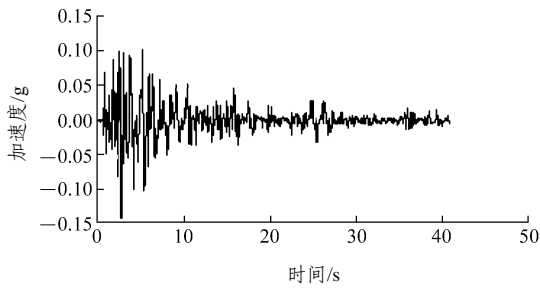


图 10 WACC3 加速度时程曲线

Fig.10 Time-history curve of acceleration for WACC3

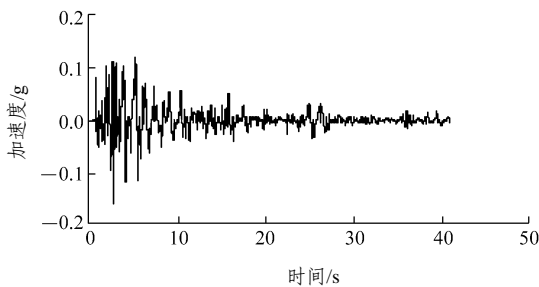


图 11 WACC4 加速度时程曲线

Fig.11 Time-history curve of acceleration for WACC4

上有放大的趋势。

分别比较图 4~7 和 8~11 中的 WACC1 和 NACC1, WACC2 和 NACC2, WACC3 和 NACC3, WACC4 和 NACC4 加速度时程曲线可以发现, 每一

对加速度时程曲线都差别不大, 从它们的加速度反应谱比较也可以得出相同的结论。这说明该黏性土地基水平层状较好, 因而可以看作一维问题, 即这里研究的是一维黏性地基土层在地震动作用下的动力响应。

图 12 所示为内排由下到上的加速度反应谱放大系数, 图 13 所示为外排由下到上的加速度反应谱放大系数。从图 12 和 13 可以看出, 0.5 Hz 对应的放大系数最大, 说明试验中的水平黏性土层在该 Parkfield 地震波作用下的自然频率为 0.5 Hz, 地基对低频成分有放大作用, 尤其对小于 1.0 Hz 的频率成分放大最为明显, 而对大于 10.0 Hz 的频率成分几乎没有放大作用。

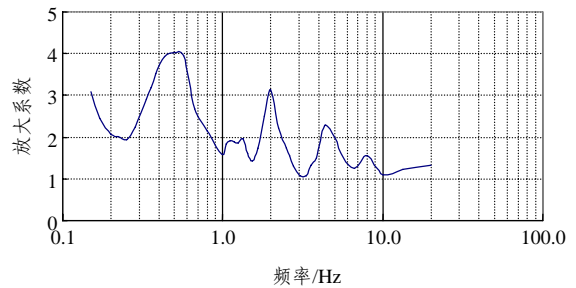


图 12 内排由下到上的加速度反应谱放大系数

Fig.12 Amplification coefficient of acceleration response spectra for NACC

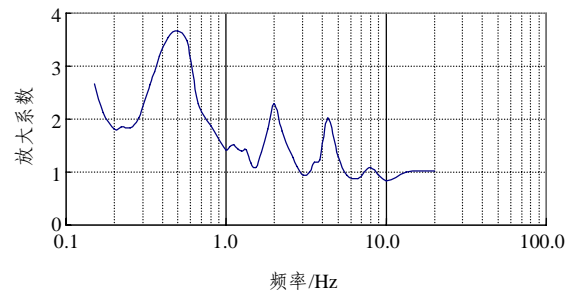


图 13 外排由下到上的加速度反应谱放大系数

Fig.13 Amplification coefficient of acceleration response spectra for WACC

3.2 位移和孔压变化

图 14 所示为 LVDT1, LVDT2, LVDT3 这 3 个位移传感器测得的位移变化曲线。从图中可以看出, 中部的 LVDT2 和下部的 LVDT3 只是在地震过程中有较小的波动变化, 而上部的 LVDT1 曲线却有较大的变化, 位移的最大变化量滞后于地震波最大峰值加速度对应的时刻, 最大位移发生后, 位移只发生较小的波动变化。因此, 从本试验的 3 个位移传感器测得的位移变化曲线可以看出, 水平黏性土地基的表层土在地震过程中发生的侧向位移最大, 而

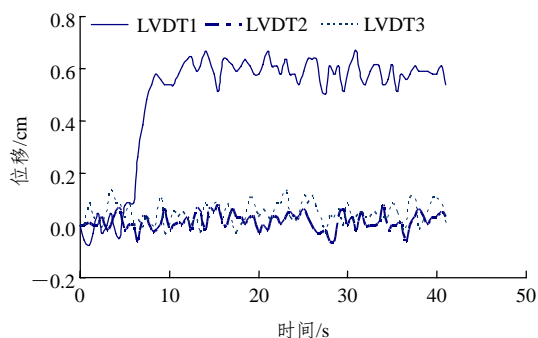


图 14 位移变化曲线

Fig.14 Curves of displacement change

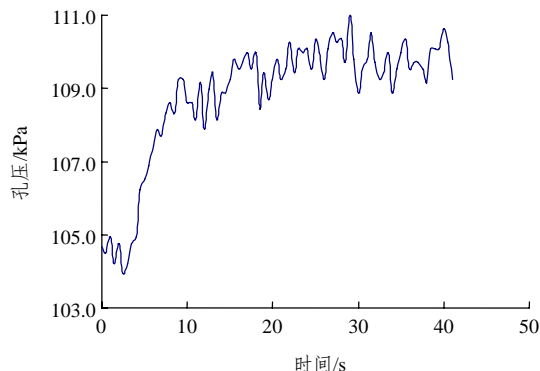


图 17 底部孔压变化曲线(PPT3)

Fig.17 Curve of pore pressure change for PPT3

表层以下的土层侧向位移不大。

图 15~17 所示为 3 个孔压传感器测得的孔压变化曲线。从图中可以看出, 在地震过程中, 上、中、下 3 个孔压均有增长, 以中下部土层的孔压增长量最大, 约为 12.3 kPa, 中上部土层中的孔压变化量次之, 约为 9.1 kPa, 土样底部的孔压增长量最小, 约为 6.0 kPa。但从 3 个孔压的初始值可以看出, 中上部土层中的孔压初始值最小, 中下部土层中的孔压初始值次之, 土层最底部的孔压初始值最大。因此, 试验测得的孔压结果基本上反映了黏性土地基在地震前后孔压的真实变化规律。

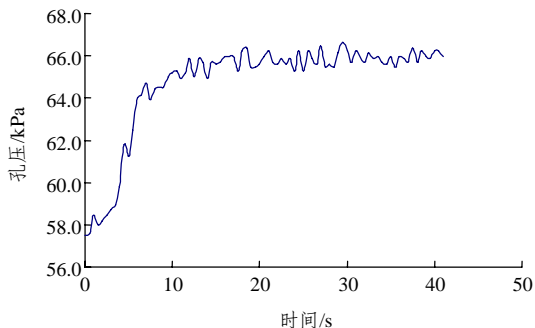


图 15 中上部孔压变化曲线(PPT1)

Fig.15 Curve of pore pressure change for PPT1

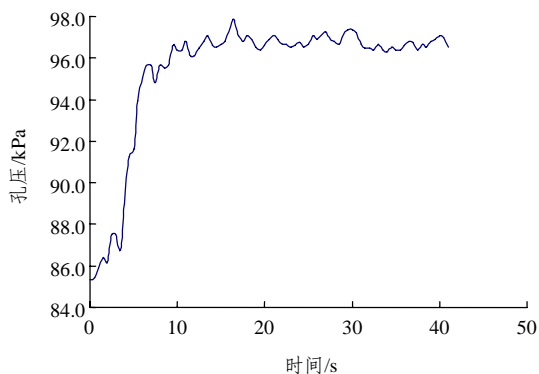


图 16 中下部孔压变化曲线(PPT2)

Fig.16 Curve of pore pressure change for PPT2

4 结 论

(1) 研究了离心机振动台试验中水平黏性土地基模型的制备方法和固结方法。试验结果表明, 所采用的方法可行有效。

(2) 在地震动作用下, 所研究的黏性土地基从下到上对地震有放大作用。黏性土地基对低频成分尤其是小于 1.0 Hz 的频率成分放大最为明显, 而对大于 10.0 Hz 的频率成分几乎没有放大作用。

(3) 对于所研究的水平黏性土地基, 在地震过程中, 表层土发生了较大的侧向位移, 表层以下土层侧向位移不大。而孔压增长量以中下部土层最大, 中上部土层中次之, 底层土中最小。

参考文献(References):

- [1] 王年香, 章为民. 混凝土面板堆石坝动态离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 504 - 507.(WANG Nianxiang, ZHANG Weimin. Dynamic centrifuge model test for concrete face rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 504 - 507.(in Chinese))
- [2] TAYLOR R N. Geotechnical centrifuge technology[M]. Glasgow: Blackie Academic and Professional, 1995: 168 - 169.
- [3] 陈正发, 于玉贞. 土工动力离心模型试验研究进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 4 026 - 4 033.(CHEN Zhengfa, YU Yuzhen. A review on development of geotechnical dynamic centrifugal model test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(Supp.2): 4 026 - 4 033.(in Chinese))
- [4] YU Y, LEE F H. Seismic response of soft ground[C]// PHILLIPS R, GUO P J, POPESCU R ed. Physical Modeling in Geotechnics: ICMG'02 Newfoundland. Canada: A. A. Balkema, 2002: 519 - 526.
- [5] 陈正发. 黏性土地基中地铁隧道动力离心模型试验系统开发[硕士学位论文][D]. 北京: 清华大学, 2005.(CHEN Zhengfa. Development of the test system for dynamic centrifuge modeling of subway tunnel in clayey ground[M. S. Thesis][D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.(in Chinese))