

阵列式位移计在动力测试中的应用^①

薛丽影^{1,2}, 倪克闯^{1,2}

(1. 中国建筑科学研究院地基所, 北京 100013; 2. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013)

摘要:阵列式位移计(SAA)是一种基于微电子机械系统测试原理测试加速度和位移的传感器,具有精度高、可重复利用、自动实时采集等特点。该仪器装置可满足静态下岩土工程的变形测试要求,如边坡滑移、隧道、路基沉降、桥梁挠度等变形监测,也适用于动态下的加速度、位移、温度的测试。国内首次将阵列位移计(SAA)应用在大型振动台试验中,对桩基和刚性复合地基以及地基土在地震动作用下加速度和位移等动力响应进行研究。表明加速度动力系数在砂层中放大,软土中减小。随着输入地震动峰值的增大,地基土中不同深度测点的峰值加速度动力系数均有所降低,说明在累加地震作用下土体传递地震波的能力减弱。

关键词:阵列式位移计(SAA); 动力测试; 加速度动力系数; 成层土

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-1093-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.1093

Application of Shape Acceleration Array in Dynamic Test

XUE Li-ying^{1,2}, NI Ke-chuang^{1,2}

(1. Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;

2. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China)

Abstract: Shape Acceleration Array (SAA) is a sensor based on the microelectromechanical systems (MEMS) testing principle used to test acceleration and displacement with high accuracy, reusability, and automatic real-time acquisition. The instrument device can meet the deformation testing requirements of static geotechnical engineering such as sliding slope, tunnel, embankment settlement, and deflection and deformation monitoring of bridges and is also used for testing of dynamic acceleration, displacement, and temperature. This study is the first domestically to use SAA in a large-scale shaking table test. Moreover, acceleration, displacement, and other dynamic responses of pile, rigid composite foundation, and soil are studied relative to ground motion. The results show that the acceleration dynamic coefficient increases in sand and decreases in soft soil. As the input seismic peak increases, the peak acceleration dynamic coefficient of measuring points at various depths is reduced, which indicates that in the cumulative effect of the earthquake, the ability of the soil to pass seismic waves is weakened.

Key words: Shape Acceleration Array (SAA); dynamic test; acceleration dynamic coefficient; layered soils

0 引言

目前进行地基基础地震动力相互作用试验研究采用最多的是振动台试验。通过对模型动力相似关系和人工边界的合理模拟,可以深入考察地基基础地震反应动力规律,探讨地基基础地震动力反应特性,并为建立有效的数值模拟技术和实用的抗震设计方法提供试验基础^[1]。

通常振动台试验中对于加速度和位移测量多采用加速度计。在结构的动力测试中加速度计的应用技术已经很成熟,但埋设在土体中的加速度计首先对防水要求很高,其次在土填埋过程中易倾斜或位移,以及在振动过程中易产生偏转,造成测量误差。本文试验采用加拿大的阵列式位移计

(Shape Acceleration Array, SAA)来测量土体和桩身的加速度和位移,能够有效解决以上问题,取得很好的效果。

阵列式位移计(SAA)相对于传统的位移及加速度传感器而言,具有天生的优势:(1)可同时测试基体材料的加速度与位移反应,克服多传感器采集过程中的信号耦合的问题;(2)可测试 2D 及 3D 加速度场及位移场,用户可全面、直观的观测到被测体在受荷过程中的变形及内力反应规律;(3)SAA 可以采用无线信号传输技术,从而克服线路导致的采集时滞问题;(4)抗干扰能力及信号稳定性强;(5)耐腐蚀性、耐久性优于传统的传感器,更适宜在恶劣试验条件下使用。

① 收稿日期:2014-08-20

基金项目:中国建筑科学研究院青年基金项目:阵列位移传感器(SAA)在岩土工程变形监测中的应用技术研究(20131602331030001)

作者简介:薛丽影(1978—),女,实验室主任,主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: xlydjs@163.com

1 阵列式位移计(SAA)原理与应用实例

1.1 阵列式位移计(SAA)原理

如图 1 所示,这是一种基于微电子机械系统测试原理的测试加速度和位移的新型传感器,该方法具有精度高、可重复利用、可以自动实时采集等特点。每个测试单元即为一节,长度一般为 20~50 cm。变形测试方法如图 2 所示,每节设置有一个微型加速度传感器,可测试得到传感器在三个方向上与重力加速度方向的夹角 $\theta(x,y,z)$ 方向的角度分别为 $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 。如对于 X 方向而言,可得到测试单元在该方向上传感器末端相对于基点端的相对位移 Δx ,在 X 方向的角度发生变化时,相对位移之差即为角度变化引起的变形量。对于多节传感器,前一节的末端即为后一节的基点端,进行变形累加后得到多节单元的总变形量。在每个测试传感器近端有固定节用于连接电缆,远端有固定点用于基点的固定;每个节点采用复合接头进行连接;每个分阵列安装有微处理器和数字式温度传感器,温度测试主要是为补偿地温对传感器的影响。通过试验和验证,传感器每 32 m 的测试精度为 ± 1.5 mm,温度适宜范围 $-30\sim 50$ $^{\circ}\text{C}$,可承受 100 m 深度的水压,可水平或者竖直,也可任意角度埋设。该仪器装置可满足静态下岩土工程的变形测试要求,如边坡滑移,隧道、路基沉降,桥梁挠度等变形监测,也适用于动态下的加速度、位移、温度的测试,具有实时动态监测功能。实时动态监测 3D 效果图如图 3 所示。



图 1 阵列式位移计(SAA)

Fig.1 Shape Acceleration Array(SAA)

1.2 应用实例

国内外部分应用实例如表 1 所示。国外在 10 年前开始使用该测试技术,主要用于大坝变形监测、混凝土开裂引起的结构变形监测、隧道掘进过程变形监测等,同时应用到振动台测试中。2006 年 Abdoun 在日本国立防灾科学技术研究所(NIED)的台面尺寸 14.5 m $\times$ 15 m 的振动台上运用 SAA,取得良好的加速度、位移测试效果[2]。2007 年 Dobry 等人在纽约州立大学布法罗分校开展振动台试验,利用 SAA 研究地震作用下倾斜场地饱和砂土及其基础的反应[3]。

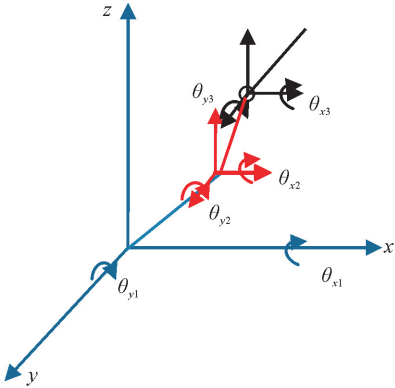


图 2 变形测试示意图

Fig.2 Schematic of deformation testing

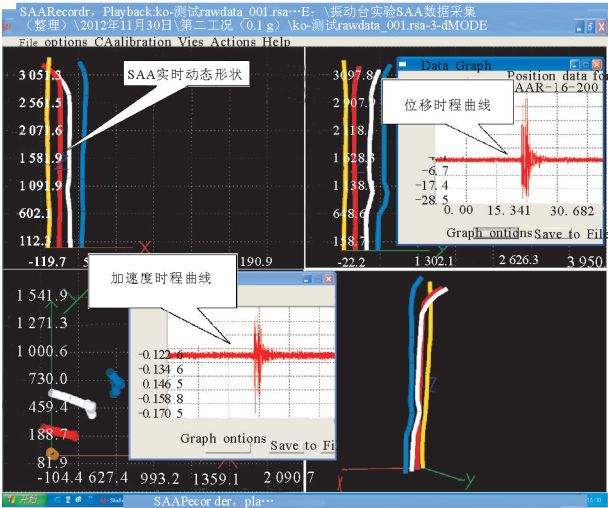


图 3 实时动态监测 3D 效果图

Fig.3 3D display of real-time dynamic monitoring

表 1 SAA 部分应用实例

Table 1 Several SAA application examples

序号	国家	项目	监测内容
1	加拿大	新不伦瑞克大坝	混凝土开裂引起的结构变形
2	秘鲁	安塔米纳大坝	大坝变形监测
3	美国	田纳西州奇克莫加大坝	混凝土结构变形监测
4	加拿大	尼亚加拉隧道	隧道掘进过程变形监测
5	荷兰	科恩隧道	隧道掘进过程变形监测
6	德国	莱茵河大坝	涡轮机井施工监测
7	加拿大	魁北克大坝	水电大坝变形监测
8	瑞士	瓜亚塔卡大坝	水电大坝变形监测
9	日本	振动台试验	加速度、位移测试
10	美国	振动台试验	饱和砂土及其基础的动力反应
11	中国	威红铁路鲁木山隧道进口路堑边坡	深层水平位移
12	中国	云南蛮金公路边坡滑坡	深层水平位移
13	中国	哈尔滨一大连高速铁路路基冻胀变形监测	铁路路基冻融变形监测
14	中国	国贸三期基坑	基坑围护结构变形监测
15	中国	海床沉积位移随暴风变化研究	海床沉积变形监测

近几年国内将该测试技术应用到铁路、公路、基坑等的变形监测中。威红铁路鲁木山隧道进口路堑边坡在 2012 年 6 月底连续降暴雨,发生较大变形。该传感器通过变形监测为铁路安全运营提供了及时的数据^[4]。铁路部门将它应用在了哈大铁路路基变形的长期动态监测中。

本文在国内首次将阵列位移计(SAA)应用在大型振动台试验中,利用该项测试技术对桩基和刚性复合地基以及地基土在震动作用下加速度和位移等动力响应进行研究。

2 试验方案

2.1 模型设计

本次试验采用自行设计的层状剪切土箱,层状剪切模型箱的净尺寸:长 3.2 m,宽 2.4 m,高 3 m。

试验模拟的地基为水平成层地基,模型地基土分三层,顶层和底层为砂土,中间层为淤泥质软土。从上到下各土层的厚度分别为 1.4 m、0.8 m、0.8 m,用于模拟软硬互层的地基。

试验模型与原型比例为 1 : 8,试验模型桩直径为 60 mm,长度 2 100 mm,桩距 180 mm。桩基和复合地基各布置 6 根桩。

2.2 传感器布置

在试验中,共布置了 4 根 SAA,两根分别跟桩基与复合地基的边桩固定,其余两根分别埋置于土体中。本文所用 SAA 单根长度 3.2 m,每根共分 16 节,每节长度 20 cm,节点处编号从下至上为测点 1~测点 16。SAA 底端固定在剪切箱上,布置详图见图 4。土体中布置了四个防水加速度计 A1~A4^[5],A1、A2 对应 SAA 测点 7,A3、A4 对应 A 测点 14,通过对比加速度计与其相应位置测点的动力响应,可以验证其可靠性。

3 试验结果

3.1 SAA 的可靠性

比较箱内不同深度的两组测点(第一组中 A1,A2,Acc-7-SAA54822 和第二组 A3,A4,Acc-14-SAA54822)的加速度时程,可反映出土箱沿着振动方向边界的影响;比较测点 Acc-7-SAA54822 与 Acc-7-SAA54814 的加速度时程,可反映出土箱垂直于振动方向边界的影响。(注:Acc-7-SAA54822、Acc-7-SAA54814 分为 SAA54822、SAA54814 的 16 个节点中与 A1、A2 相对应的测点 7。)

振动台面输入幅值 0.4 g 的 Taft 波时箱内同一深度处各测点加速度记录的波形如图 5 所示,傅里叶谱如图 6 所示。从图中可以看出,同一深度条件下测试数据有以下特点:

- (1) 同一工况各测点的加速度时程波形几乎相同;
- (2) 同一工况各测点的加速度持时基本相同;
- (3) 同一工况各测点的加速度频谱成分基本一致。

由上述分析可知,试验土箱的边界效应较小,且能较好地消除边界上地震波的反射或散射效应。同时,通过对比分析 SAA 节点和普通加速度计的加速度时程和频谱特性,验证了 SAA 的可靠性。

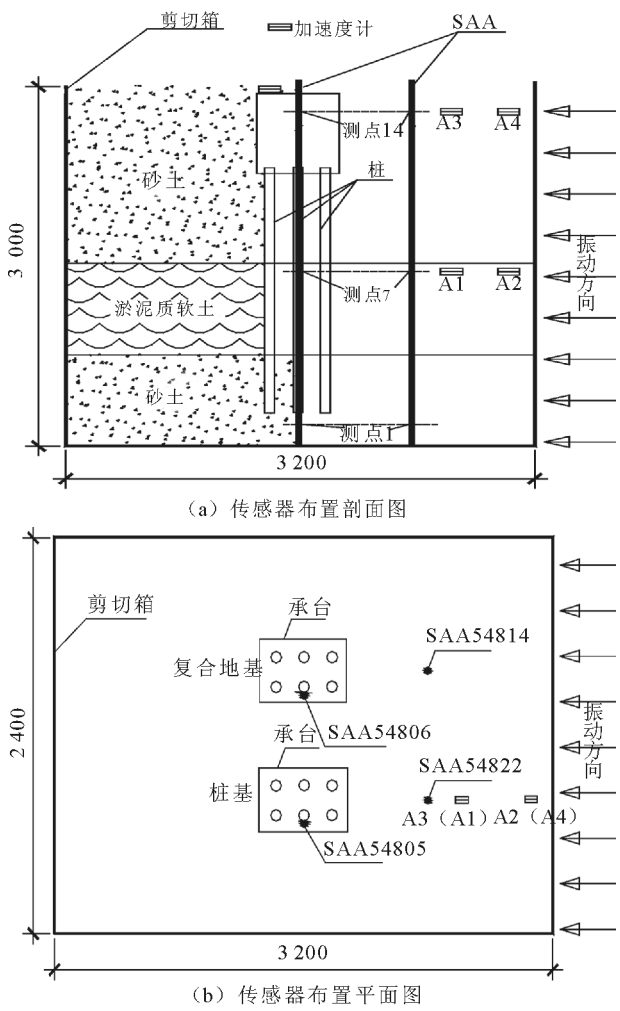


图 4 传感器布置图

Fig.4 Diagram of sensor arrangement

3.2 模型地基的动力反应特性

(1) 土体中加速度动力系数

土体中的加速度动力系数定义为测点加速度峰值与箱内土体底部测点地震动峰值的比值。在 Taft 波作用下,根据 SAA 测试数据绘制的箱内土体加速度动力系数沿深度分布,见图 7。

从图中可看出,随着输入加速度峰值的增大,底部往上各测点的加速度动力系数变化趋势基本一致。地震波从箱底向上传递过程中的变化规律:在下部砂层中逐渐放大,在软土层中逐渐减少,在上部砂层中再逐渐放大。这种现象是因为软黏土的阻尼较大对地震波的高频成分过滤效果显著,起到了隔震的作用。

从图中可看出,随着输入地震动峰值的增大,箱内土体中各测点的加速度动力系数均有降低,即土体的加速度动力系数随着输入峰值的增大而减小。其原因是在小震激励下,土的结构性破坏小,土体基本上处于弹性状态,土体的耗能较小,因而对输入地震波的放大效应明显;随着地震动激励逐渐增强,土体软化,塑性变形加大,土体传递地震波的能力

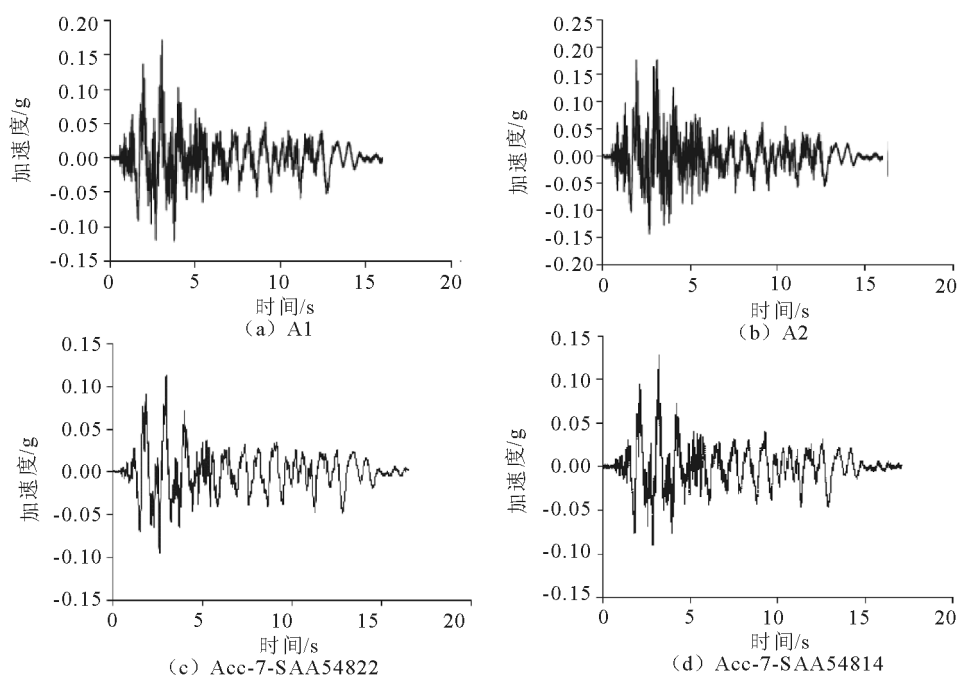


图 5 0.4 g Taft 波同一深度各测点的加速度时程曲线

Fig.5 Acceleration time-history curves of 0.4 g Taft wave at the same depth of different points

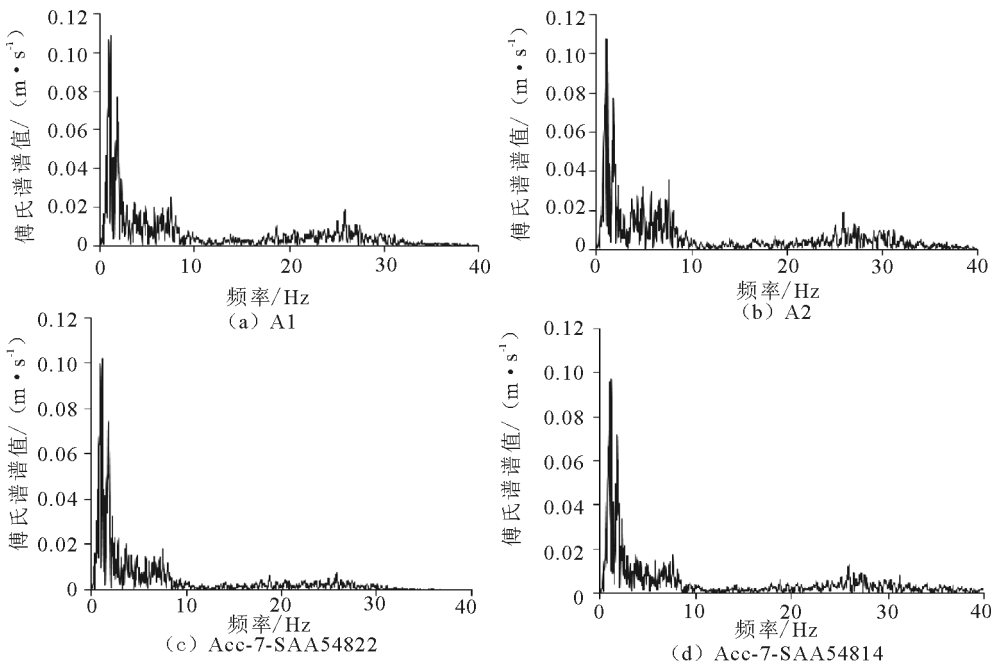


图 6 0.4 g Taft 波同一深度各测点的傅里叶谱

Fig.6 Fourier spectra of each point of 0.4 g Taft wave at the same depth

减弱,使地震波的放大效应减弱。0.1 g Taft 波作用下的加速度放大效应在上部砂层较其他工况明显,分析其原因,小震激励下上部砂层较松散,反应较大,随着震级增大,砂层逐渐密实,反应减小。

由图 8 可看出,在地震波从下往上传递过程中,下层砂土加速度峰值变化明显,中层淤泥以及上层砂土加速度峰值变化较小。中间淤泥质软土起到了明显的隔震作用,地震波能量在淤泥层中耗散较多,向上传递减少。

(2) 桩身

通过对比桩基与复合地基桩身加速度动力系数沿深度的曲线,可知桩基桩身和复合地基桩身加速度动力系数变化趋势基本一致,均为从箱底向上传递中,在底部砂土层逐渐放大,进入淤泥层时则减小,进入上部砂土层时又逐渐放大,地震波在土体与桩身结构上传递的变化趋势基本一致。

(3) 土体与桩身动力反应的差异

① 在下部砂层中,土体的测点加速度峰值略大于桩身

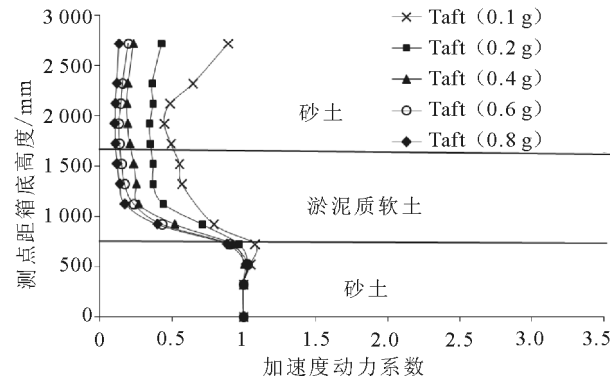


图 7 土体加速度动力系数与测点深度的关系
Fig.7 Relationship between acceleration dynamic coefficient of soil and depth of measuring points

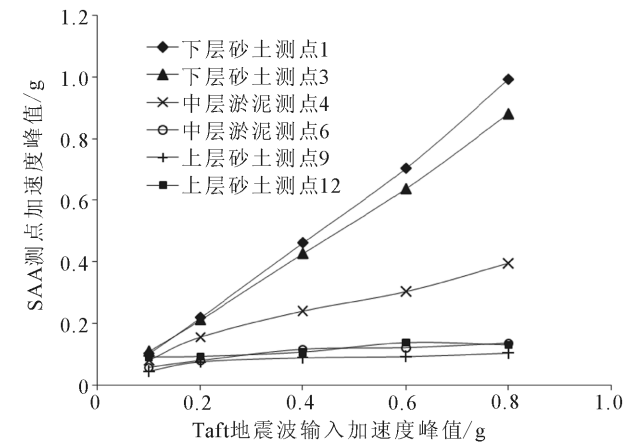


图 8 SAA 测点加速度峰值跟输入加速度峰值的关系
Fig.8 Relationship between PGA of SAA measurement points and input PGA

对应测点的加速度峰值,其原因可能是桩端嵌固影响所致。

② 在小震(0.1 g)作用下,淤泥层及上层砂土中的土体测点加速度峰值大于桩身对应测点的加速度峰值;在大震(0.4~0.8 g)作用下,淤泥与上层砂土交互处土体测点加速度峰值小于桩身对应测点的加速度峰值。分析其原因,小震时桩身的运动主要表现为随着土层的变形整体运动,桩土变形协调一致;大震时由于砂土的“放大”效应,使得上层砂土与淤泥的交界处的桩身与土体不同动力反应,因桩身刚度大于土体刚度,使桩身加速度峰值大于土体的加速度峰值。

③ 在上层砂土范围内,复合地基桩身测点加速度峰值略大于桩基桩身对应测点的加速度峰值。原因可能是由于桩基桩顶同上部结构嵌固,动荷载下在上部结构惯性力的作用下使桩基桩顶附近变形大于与上部结构之间通过垫层连接的复合地基。

4 结论与建议

本文成功将阵列式位移计(SAA)应用在振动台试验中,分析了成层土中桩基与复合地基以及地基土的地震动力响应的规律。初步结论如下:

(1) 通过对比分析阵列式位移计(SAA)节点和普通加速度计的加速度时程和频谱特性,验证了阵列式位移计SAA在动力测试中的可靠性。

(2) 加速度动力系数在砂层中放大,软土中减小。中间淤泥质软土对土体的加速度峰值以及动力系数影响显著。

(3) 随着输入地震动峰值的增大,地基土中不同深度测点的峰值加速度动力系数均有降低,即本次试验条件下,随着输入峰值的增大,在累加地震作用下,土体非线性特性明显时,土体传递地震波的能力减弱,土体的加速度动力系数减小。

(4) 在相同工况下,土体的各测点加速度峰值略大于桩身相对应各测点的加速度峰值;复合地基桩身各测点加速度峰值略大于桩基桩身相对应的各测点的加速度峰值。

参考文献(References)

[1] 倪克闯.成层土中桩基与复合基地震作用下工作性状振动台试验研究[D].北京:中国建筑科学研究院,2013:14.
NI Ke-chuang.Table Test of Pile and Composite Foundations' Dynamic Behavior in Layered Soils Subjected to Earthquake Excitation [D].Beijing:China Academy of Building Research, 2013:14.(in Chinese)

[2] Abdoun T, Abe A,Bennett V,et al.Wireless Real Time Monitoring of Soil and Soil-structure Systems[J].Geotechnical Special Publication,2007;161.

[3] Dobry R,Thevanayagam S,Medina C,et al.Mechanics of Lateral Spreading Observed in a Full-scale Shake Test[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2010,137 (2):115-129.

[4] 吕宾林,吴敏敏,王金文.边坡变形阵列位移传感监测技术[J].铁道建筑,2012(12):111-113.
LV Bin-lin,WU Min-min,WANG Jin-wen.Array of Displacement Monitoring of Slope Deformation[J].Railway Engineering,2012(12):111-113. (in Chinese)

[5] 庄海洋.土-地下结构非线性动力相互作用及其大型振动台试验研究[D].南京:南京工业大学,2006:172.
ZHUANG Hai-yang.Study on Nonlinear Dynamic Soil-underground Structure Interaction and Its Large-size Shaking Table Test[D].Nanjing:Nanjing University of Technology, 2006: 172.(in Chinese)