

堆积型滑坡地震响应的离心模型试验

涂杰文¹,刘红帅²,汤爱平¹,郑桐³

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150090 ;
2. 地壳运动监测工程研究中心,北京 100036 ;3. 中国地震局 工程力学研究所,黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要 :基于离心振动台模型试验 ,采用 Taft 波激励 ,不断增大其幅值 ,研究不同强度地震波作用下堆积型滑坡地震响应特征 ,对比分析了汶川地震清溪台站基岩波结果的异同 .结果表明 :坡面水平向和竖直向峰值加速度放大系数均随坡高增加而增大 ,呈现高程放大效应 ;坡体内水平向峰值加速度放大系数分布与坡面不同 ,坡面对输入地震波有反射作用并呈现坡面浅表放大效应 ;基岩水平向加速度随高程增加存在增大现象 ,与地震动输入相比 ,均有缩小现象 .同一高程处 ,坡面水平向与竖直向、坡体内及基岩水平向峰值加速度放大系数随地震波幅值的增大其变化规律不同 .

关 键 词 :地震 ;堆积型滑坡 ;振动台 ;地震响应 ;离心模型试验

中图分类号 :TU 411. 93 文献标志码 :A 文章编号 :1005 - 3026(2016)05 - 0736 - 05

Centrifuge Model Test on the Seismic Response of Colluvial Landslide

TU Jie-wen¹ ,LIU Hong-shuai² ,TANG Ai-ping¹ ,ZHENG Tong³

(1. School of Civil Engineering ,Harbin Institute of Technology ,Harbin 150090 ,China ;2. National Earthquake Infrastructure Service , Beijing 100036 , China ;3. Institute of Engineering Mechanics , China Earthquake Administration ,Harbin 150080 ,China. Corresponding author :LIU Hong-shuai ,E-mail :iem-lhs@ 163. com)

Abstract : Seismic response behaviors of colluvial landslide were discussed by inputting Taft wave with different intensities based on dynamic centrifuge model test. Results under Taft wave and Qingxi wave were comparatively analyzed. Results show that both the horizontal and vertical peak ground acceleration (PGA) amplification coefficients at slope surface increase with the increasing of height. The landslide shows an obvious altitude amplification effect. The distributions of horizontal PGA amplification coefficients in the landslide body are different from those of the landslide surface. The landslide surface has an obvious reflect effect on input seismic wave , and it shows the surface effect. The bedrock also has amplification effect along with the height of the landslide , and it has reductive effect compared with the input seismic waves. At the same height , the PGA amplification coefficients at landslide surface , landslide body and bedrock have different distributions with the increasing of earthquake amplitudes.

Key words : earthquake ; colluvial landslide ; shaking table ; seismic response ; centrifuge model test

边坡在地震作用下失稳而产生滑坡是世界上最为严重的地质灾害之一^[1]. 地震滑坡不仅会给人民的生命财产带来巨大损害 ,同时会引发地震次生灾害^[2]. 因此 ,地震作用下的边坡动力稳定性分析成为岩土地震工程的研究热点之一.

数值模拟和模型试验是研究边坡动力稳定性问题的两种主要手段^[3]. 数值模拟结果仍需实际地震或者模型试验的验证. 动力模型试验主要包括振动台模型试验和土工离心机模型试验两种 :前者因不能满足模型与原型应力、应变相同的要

求,其结果有可能与实际相差较大;后者可有效地克服常重力条件下小比尺模型试验的缺陷,能够再现原型的应力场及有关的变形过程^[4]。

目前,国内外学者开展了关于边坡的离心模型试验,其中以静力方面成果居多^[5-7]。与静力试验相比,离心振动台模型试验对设备要求苛刻,因而起步时间晚,数量少。总结已有的边坡离心振动台模型试验^[8-10]发现,研究对象多为均质的砂土或黏性土边坡。实际中常见的堆积型滑坡的离心振动台模型试验成果鲜有报道。

基于上述原因,在作者已完成的汶川地震清溪基岩(Qingxi)波试验成果^[11]的基础上,进一步分析了 Taft 波的相应成果,验证已得结果的可靠性,以便给出可靠的堆积型滑坡加速度响应规律,为滑坡的震害解释和抗震设计提供科学依据。

1 离心模型试验方案

1.1 相似律

试验在浙江大学土工离心机 ZJU-400 及专用振动台上完成。基于离心振动台设备的性能、模型箱尺寸及参考原型堆积型滑坡等因素,确定本次试验的离心加速度为 $50g$ ^[11]。试验中的关键物理量相对于原型的相似比例尺关系如表 1 中所示。

表 1 离心模型试验相似关系
Table 1 Similarity relation of the centrifuge model test

| 物理量 | 符号 | 量纲 | 比例尺 |
|--------|---------------|-----------------|------|
| 长度 | l | L | 1/50 |
| 应力 | σ | $ML^{-2}T^{-2}$ | 1 |
| 应变 | ε | - | 1 |
| 位移 | u | L | 1/50 |
| 加速度 | a | LT^{-2} | 50 |
| 时间(动力) | t | T | 1/50 |

1.2 试验模型与传感器布置

试验采用固壁式刚性模型箱,其内部尺寸为 $600\text{ mm}\times400\text{ mm}\times500\text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)。选取四川汉源背后山堆积型滑坡作为参考原型,依据所用离心机的承载能力及模型箱尺寸,简化为滑体(粉质黏土)和滑床(基岩),离心模型尺寸如图 1 所示^[11]。刚性模型箱的边界效应突出,为了减小其影响,在垂直于振动方向的模型箱内侧各设置 25 mm 厚的防爆油泥。

试验过程中,于坡顶布设了 LVDT 位移传感器,监测坡顶位移判断边坡静力变形稳定性。同时,于台面布设 A0 加速度传感器用于记录模型

的实际地震动输入;沿坡面不同高程布设 4 个水平向(竖直向)传感器 A2(A11), A3(A12), A4(A13)和 A5(A14)。与之相同高程坡体内部布设 4 个水平向传感器 A8, A9, A10 和 A6;于基岩坡脚附近、坡顶处分别布设水平向传感器 A1 和 A7。传感器的具体位置如图 1 所示。

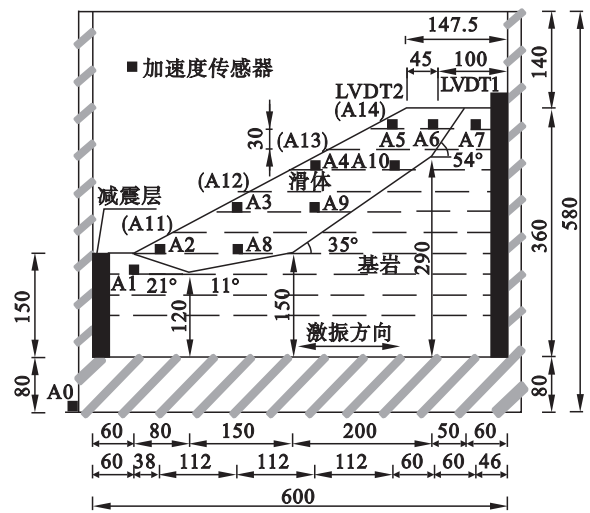


图 1 模型尺寸及传感器布置图(单位: mm)
Fig. 1 Model dimension and layout of sensors (unit: mm)

滑坡模型采用分层夯实法制作,分层厚度均为 30 mm。基岩采用水泥土(质量比:粉质黏土:水泥:石英砂:水 = 1:0.55:1:0.25),掺入水泥量 2% 的早强剂配置而成;滑体土取自背后山滑坡的粉质黏土并经 2 mm 筛过筛。基岩的密度为 1.90 g/cm^3 ,滑体干密度及含水量为 1.55 g/cm^3 和 18%。

1.3 地震动输入

用吊车将制作好的模型连同模型箱一起吊至振动台,用螺栓牢固联接。开启离心机后,分级平缓增大至 $50g$ 。待 LVDT 位移曲线变化稳定后,再对振动台台面施加不同幅值的 Taft 地震波。

试验过程中,将其峰值加速度分别调整至 $0.1g$ 、 $0.2g$ 、 $0.3g$ 和 $0.4g$,依次施加于振动台台面,利用 A0 传感器记录得到的实际地震动输入。下述分析结果均为依据相似关系换算给出的原型结果。

2 堆积型滑坡地震响应特征

本文采用无量纲化的峰值加速度(PGA)放大系数来分析地震波作用下堆积型滑坡的加速度响应特征。将滑坡不同位置处的 PGA 与输入地震动(A0 处)实测 PGA 的比值定义为 PGA 放大系数。

2. 1 滑坡坡面的水平向地震响应特征

图 2 为不同强度地震动作用下坡面水平向(实线)、坡面竖直向(圆点)、坡体水平向(虚线) PGA 放大系数沿高程的分布曲线。

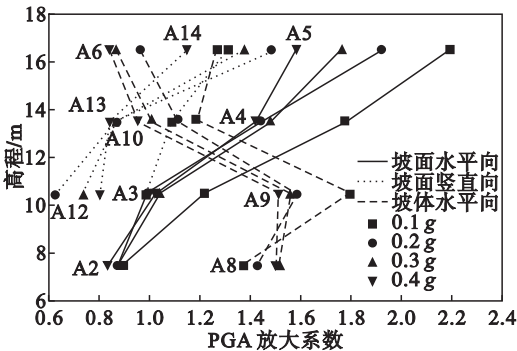


图 2 PGA 放大系数沿高程的分布情况
Fig. 2 Distribution of PGA amplification coefficients along with height

图 2(实线)表明不同强度的地震动作用下 , 沿坡面高程的增加 , 水平向 PGA 放大系数呈非线性增大 , 坡肩附近达到最大 , 最大值为 2.2 , 具有显著的高程放大效应 , 坡脚 A2 处 PGA 放大系数最小且均小于 1 , 这说明坡脚附近对输入地震动具有一定的抑制作用 . 坡脚处约 1/3 坡高范围 , 除 0.1 g 外 , 放大系数均小于 1 ; 坡肩 1/3 高程范围内附近受坡面和滑面反射、折射的叠加效应的影响 , 放大系数均呈现放大现象 .

2. 2 滑坡坡面的竖直向地震响应特征

图 2(圆点)说明不同强度地震动作用下滑坡坡面竖直向 PGA 放大系数沿高程的分布情况基本一致 . 滑坡对坡面竖直向加速度具有放大效应 , 沿高程向上 , 其呈非线性增大 , 在靠近滑坡顶部位置达到最大值 , 呈现高程放大效应 . 同水平向加速度一样 , 受坡脚抑制作用 , 坡脚处约 1/3 坡高范围 , 除 0.1 g 外 , PGA 放大系数均小于 1 ; 坡顶附近受坡面和滑面反射、折射的叠加效应的影响 , 竖直向 PGA 放大系数增至最大 , 可达 1.5 以上 . 对比坡面水平向和竖直向加速度放大系数 , 它们都呈现出显著的趋表放大效应 .

2. 3 滑坡坡体内的水平向地震响应特征

图 2(虚线)表明不同强度的地震动作用下 , 滑坡坡体内部水平向 PGA 放大系数表现为沿高程增加先增大后减小 . 近坡脚 1/3 高程范围的 PGA(A8 和 A9)放大系数大于 1 , 呈现放大效应 ; 坡肩 1/3 高程范围的水平向 PGA 放大系数(除 0.1 g 外)小于或接近 1 , 呈现缩小趋势 .

对比发现坡面和坡体内部水平向 PGA 放大系数沿高程的变化规律不同 . 表现为 : 坡面的坡脚

1/3 高程范围内水平向 PGA 放大系数小于 1 , 对输入地震动具有一定的抑制作用 , 而坡体内部的 PGA 放大系数大于 1 ; 坡面的坡肩 1/3 高程范围内水平向 PGA 放大系数均大于 1 , 对输入地震动具有明显的放大效应 , 而坡体内部的 PGA 放大系数小于或接近 1 , 呈缩小现象 . 此外 , 坡面水平向放大系数具有高程放大效应 , 而坡体内部的水平向放大系数沿高程增加具有先增大后减小的趋势 .

2. 4 基岩的水平向地震响应特征

以输入地震动峰值加速度为 0.4 g 的 TF - 4 工况为例进行阐述 , 图 3 给出的是滑坡基岩 A1 , A7 处及台面 A0 处的水平向加速度时程曲线 . 结果表明 : 不同强度地震动激励时基岩不同部位加速度时程曲线形状类似 , 其水平向加速度随高程增加而增大 , 与地震动输入相比 , 均有缩小现象 , 且沿高程的增速明显弱于坡面土体的增大现象 . A1(高程 6.0 m)和 A7(高程 16.5 m)的水平向 PGA 分别为 0.352 g 和 0.390 g , 与之对应的放大系数分别为 0.88 和 0.98 , 相比对应高程坡面土体(A2 和 A5)的水平向 PGA 放大系数的增幅明显减小 , 这是由于基岩的刚度远大于滑体的 , 在地震作用下处于弹性范围内所致 .

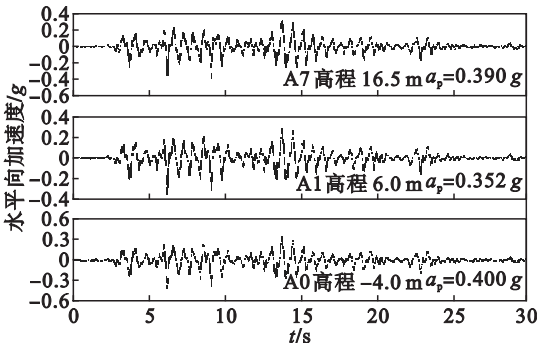


图 3 基岩和模型箱底部的水平向加速度时程
Fig. 3 Time history curves of horizontal acceleration at bedrock and the bottom of model box

2. 5 幅值对滑坡地震响应特征的影响

为了便于比较 , 选择处于同一高程的 A5 , A14 , A6 和 A7 分析地震波作用下坡面水平向、竖直向、坡体及基岩处水平向加速度响应特征 . 图 4 为不同强度地震波作用下各测点处 PGA 放大系数 .

图 4 的结果表明 , 滑坡坡面水平向(A5 处)与竖直向(A14 处)、坡体内部(A6 处)和基岩(A7 处)的水平向 PGA 放大系数呈现出不同的变化规律 . 当地震波强度不断增大 , 坡肩(A5)水平向 PGA 放大系数减小 , 竖向 PGA 放大系数则先增大后减小 , 坡体内部近坡表处(A6)不断减小 . 而基岩处(A7)水平向 PGA 放大系数基本与地震波强度无关 , 均接近 1 .

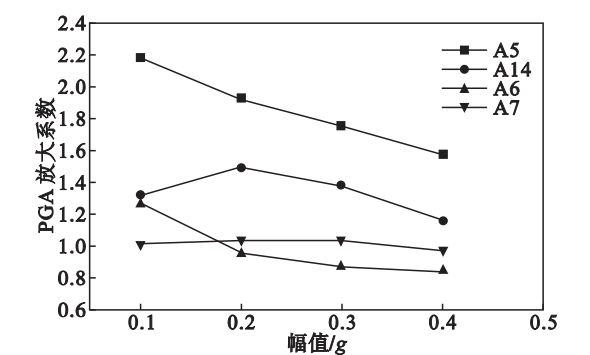


图 4 地震波作用下各测点处 PGA 放大系数
Fig. 4 PGA amplification coefficients of measuring points under Taft wave

3 滑坡坡体对输入地震动的影响

3.1 滑坡坡面对输入地震波的反射作用

图 5 为 TF-4 工况下坡面 A14 和 A5 测得的竖直向和水平向加速度时程曲线. 图 5 显示坡肩附近同一位置的竖直向和水平向 PGA 分别为 0.464 g 和 0.633 g, 竖直向 PGA 达到水平向 PGA 的 73.3%, 即所谓的波型转换现象.

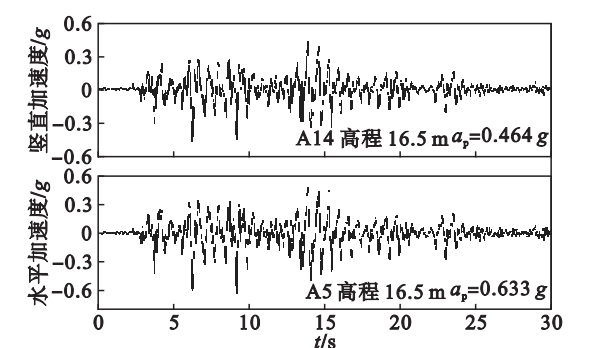


图 5 TF-4 工况 A14 和 A5 的竖直向和水平向加速度时程
Fig. 5 Time history of vertical and horizontal acceleration measured by A14 and A5 under case TF-4

为能够给出坡面不同部位竖直向与水平向加速度的关系, 引入无量纲比值 λ 表示地震动作用下坡面测得的竖直向 PGA 与其对应高程处的水平向 PGA 的比值. 各工况下 λ 汇总如表 2 所示.

表 2 各工况坡面处竖直向与水平向峰值加速度的比值 λ
Table 2 Specific value λ between vertical and horizontal PGA under different cases

| 高程/m | 0.1 g | 0.2 g | 0.3 g | 0.4 g |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 7.5 | — | — | — | — |
| 10.5 | 0.811 | 0.630 | 0.714 | 0.788 |
| 13.5 | 0.616 | 0.605 | 0.584 | 0.594 |
| 16.5 | 0.602 | 0.778 | 0.786 | 0.733 |
| 平均值 | 0.676 | 0.671 | 0.695 | 0.705 |
| 总平均值 | 0.687 | | | |

注: 试验中高程 7.5 m 处 A11 传感器已损坏, 故未比较.

分析表 2 可知, 滑坡坡面不同高程处的 λ 随着地震动强度的增大其变化情况不同. 坡脚处约 2/3 坡高范围的 λ 随峰值加速度的增大先减小而后增大, 而坡肩 1/3 高程范围内的 λ 表现为相反的变化情况. 峰值加速度为 0.4 g 时 λ 平均值最大, 最大值达到 0.705. 综合不同部位及不同峰值加速度的影响, λ 的平均值可达 0.687, 滑坡坡面对输入地震波的反射作用相当明显.

3.2 滑坡土体对输入地震动频谱的影响

图 6 为 TF-4 工况下传感器 A5、A3 以及模型箱底台面 A0 实测的水平向加速度的傅氏谱.

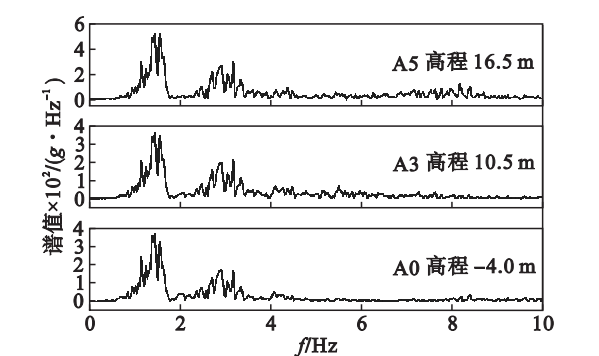


图 6 TF-4 工况下 A5、A3、A0 实测加速度傅氏谱曲线
Fig. 6 Fourier spectra curves of measured acceleration obtained by A5, A3 and A0 under case TF-4

图 6 显示从台面处输入地震波, 台面(A0)处的加速度傅氏谱谱值为 0.037 34 g/Hz, 经过滑坡基岩以及滑坡体的传播后, 使得坡面位置(A5 和 A3)傅氏谱谱值发生了改变, 其值分别为 0.052 04 g/Hz 和 0.035 91 g/Hz, 但其卓越频率与 A0 处大致相同, 均在 1.5 Hz 以及 3 Hz 附近.

4 讨 论

加速度响应规律是确定边坡地震系数的基础. 目前边坡和滑坡的稳定性评价规范采用拟静力法, 其地震系数多采用单一水平值表示. 本文试验结果表明, 滑坡内加速度呈非均匀分布, 且坡面和坡体内的分布规律明显不同. 因此规范规定水平值与实际不符, 且忽略了竖向地震动的影响, 亟需改进. 《建筑抗震设计规范》GB50011—2010 考虑抗震不利地段影响, 提出应提高地震动参数. 相应条文给出了修正系数. 按照条文规定, 本试验坡顶放大系数为 1.4. 由图 3 可知坡肩附近的 A5 最小放大系数为 1.58. 可见规范建议值水平向放大系数偏于危险, 且试验结果表明竖向与水平向地震动的比值平均值达到 0.687, 因此应考虑竖向地震动的影响.

地震动三要素包括峰值、频谱特性和持时,本文试验结果仅考虑了峰值的影响。为此,将本文输入 Taft 波的试验结果与输入清溪基岩波的试验结果^[11]进行对比,以相互验证结果的合理性和可靠性。需要说明的是 2 个离心振动台试验采用的是同一模型,只是输入地震波不同。为便于比较,选择峰值加速度 0.4 g 的工况为代表,分析 Taft 波和 Qingxi 波作用下坡面水平向、竖直向及坡体内水平向加速度响应特征。图 7 为不同类型地震波作用下 PGA 放大系数沿高程的分布曲线。

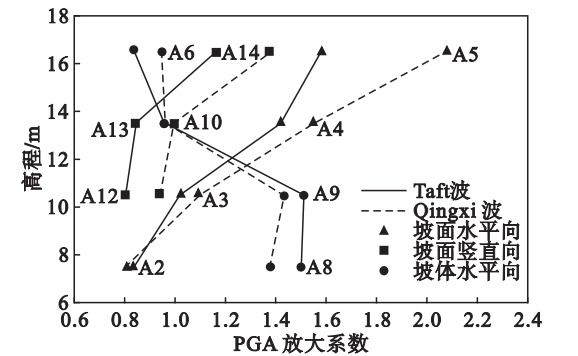


图 7 不同类型地震波作用下 PGA 放大系数沿高程分布
Fig. 7 Distribution of the PGA amplification coefficients along with height under different waves

从图 7 可看出,两种地震波作用下,坡面水平向 PGA 放大系数沿高程的分布规律相同,均随着高程的增大而增大。坡脚附近(A2)的 PGA 放大系数大致相等且均小于 1,然而在坡脚 1/3 高程以上时,Qingxi 基岩波作用均大于 Taft 波的;在坡面竖直向加速度响应方面,两种地震波作用下其沿高程的变化规律相同,均随着高程增大呈非线性增大,且 Qingxi 基岩波作用时 PGA 放大系数要比 Taft 波的大得多;坡体内部水平向加速度响应方面,两种地震波作用下其水平向 PGA 放大系数沿高程的分布规律基本相同,均呈波动性变化。但是在坡脚 2/3 高程范围内,Qingxi 基岩波作用的 PGA 放大系数要比 Taft 波的小,且随着高程增加两者差别越来越小,而在坡肩 1/3 范围内则相反。虽然上述规律基本相同,但 PGA 放大系数在数值上仍存在明显的差别。

5 结 论

1) 坡面对水平向和竖直向加速度具有显著的高程放大效应。受坡脚抑制,坡脚处约 1/3 坡高范围内,水平向和竖直向的 PGA 放大系数均较小;坡顶附近受坡面和滑面反射、折射的叠加效应影响,水平向和竖直向的 PGA 放大系数增至最大。

2) 滑坡坡体内部与坡面的地震响应特征明显不同。坡体内部的 PGA 放大系数先增大后减小,而坡面为非线性增大;基岩加速度响应存在增大现象,与地震动输入相比,则均有缩小现象。

3) 随着输入地震波强度的增加,坡面、坡体内部水平向 PGA 放大系数不断减小,而坡面竖直向 PGA 放大系数先增大后减小;基岩处水平向 PGA 放大系数基本与地震波强度无关,均接近 1。竖直向加速度和水平向加速度峰值的比值平均值可达 0.687,滑坡坡面对输入地震波的反射作用相当明显,即所谓的波型转换现象。

参考文献:

[1] Wang L P,Zhang G. Centrifuge model test study on pile reinforcement behavior of cohesive soil slopes under earthquake conditions[J]. *Landslides* 2014 ,11(2) 213 - 223.

[2] Keefer D K. Landslides caused by earthquakes [J]. *Geological Society of America Bulletin* ,1984 ,95(4) 406 - 421.

[3] 叶海林,郑颖人,杜修力,等.边坡动力破坏特征的振动台模型试验与数值模拟[J]. *土木工程学报* ,2012 ,45(9) : 128 - 135.

(Ye Hai-lin ,Zheng Ying-ren ,Du Xiu-li ,et al. Shaking table model test and numerical analysis on dynamic failure characteristics of slope[J]. *China Civil Engineering Journal* , 2012 ,45(9) :128 - 135.)

[4] Lee C J ,Chen H T ,Lien H C ,et al. Centrifuge modeling of the seismic responses of sand deposits with an intra-silt layer[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 2014 ,65 :72 - 88.

[5] Wang R ,Zhang G ,Zhang J M. Centrifuge modeling of clay slope with montmorillonite weak layer under rainfall conditions[J]. *Applied Clay Science* ,2010 ,50(3) : 386 - 394.

[6] Ling H ,Ling H I. Centrifuge model simulations of rainfall-induced slope instability[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* ,2012 ,138(9) :1151 - 1157.

[7] Sonnenberg R ,Bransby M F ,Bengough A G ,et al. Centrifuge modeling of soil slopes containing model plant roots[J]. *Canadian Geotechnical Journal* ,2012 ,49(1) : 1 - 17.

[8] Yu Y ,Deng L ,Sun X ,et al. Centrifuge modeling of a dry sandy slope response to earthquake loading [J]. *Bull Earthquake Engineering* 2008 ,6(3) 447 - 461.

[9] Wang L ,Zhang G ,Zhang J M. Nail reinforcement mechanism of cohesive soil slopes under earthquake conditions[J]. *Soils and Foundations* 2010 ,50(4) 459 - 469.

[10] Al-Defae A H ,Knappett J A. Centrifuge modeling of the seismic performance of pile-reinforced slopes [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* ,2014 ,63(14) :1 - 13.

[11] 涂杰文,刘红帅,汤爱平,等.基于离心振动台的堆积型滑坡加速度响应特征[J]. *岩石力学与工程学报* ,2015 ,34(7) :1361 - 1369.

(Tu Jie-wen ,Liu Hong-shuai ,Tang Ai-ping ,et al. Acceleration response of colluvial landslide based on centrifugal shaking table test[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* 2015 ,34(7) :1361 - 1369.)