

文章编号: 1008-2786-(2018)1-073-08

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000303

# 不同地下水位碎石土斜坡对震动的差异性动力响应

梁双庆<sup>1,3</sup>, 苏立君<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;

2. 中国科学院青藏高原地球科学卓越创新中心, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘 要:** 基于室内小型振动台试验研究不同地下水位碎石土斜坡动力响应规律及变形破坏特征, 对边坡的工程抗震设计有参考作用。结果表明, 地下水具有一定的减震作用。有地下水边坡中下部的水平及竖直加速度峰值表现出局部高程减弱的趋势, 边坡上部的水平及竖直向加速度峰值表现出高程放大的趋势。输入相同振动强度条件下, 随着地下水位的增加, 动力响应减弱区域增大, 减震能力增强; 地下水位越高, 边坡顶部加速度放大系数越小。无地下水斜坡变形破坏主要发生在坡顶; 有地下水斜坡变形破坏主要发生在坡脚。地下水位及振动强度的增加, 加剧坡脚破坏的程度。

**关键词:** 碎石土斜坡; 振动台试验; 地下水位; 动力响应; 加速度峰值

**中图分类号:** P642

**文献标志码:** A

地震诱发滑坡是一种重要的地质灾害, 造成人员伤亡和建筑物的破坏<sup>[1]</sup>。强震不仅造成大量的同震滑坡, 也导致坡体表面及内部产生大量裂隙, 坡体表面产生大量松散物质, 在降雨和地下水的双重作用下, 在震后长时间内滑坡发生概率提高<sup>[2]</sup>。碎石土斜坡是一种由人工杂填土、残坡积物、崩塌或古滑坡堆积物等组成结构松散体, 在地震作用下易发生变形破坏<sup>[3]</sup>。

地震作用下边坡的动力响应特性是影响边坡变形破坏机制的最主要因素, 也是边坡动力稳定性分析的基础, 不仅与输入的地震波性质有关, 而且与岩土体性质密切相关<sup>[4]</sup>。刘汉香<sup>[5]</sup>, 许强<sup>[6]</sup>探讨地震作用下上硬、下软和上软、下硬两种岩性组合结构斜坡模型加速度动力响应规律; 杨国香<sup>[7]</sup>研究顺层及均质结构岩质边坡的动力加速度响应特征; 杨峥<sup>[8]</sup>研究含反倾软弱夹层斜坡的动力变形破坏特征; 范

刚<sup>[9]</sup>研究含泥化夹层的顺层岩质边坡动力响应特征; Lin ML<sup>[10]</sup>研究均质砂质边坡的动力响应特征; 徐光兴<sup>[11]</sup>研究了土质边坡的动力特性与动力响应规律。

据统计, 我国 90% 的边坡失稳都与地下水及地表水的活动有关。在长时间一定强度的持续降雨或在一定持续时间的强降雨作用下, 碎石土斜坡浅表层土层饱和, 不断下渗<sup>[12,13]</sup>。地下水渗流作用导致细颗粒运移, 易引起土体坍塌, 堵塞排泄管道, 导致地下水位不断上升, 饱水区扩大, 在一定动力载荷作用下土体局部软化, 以及超孔隙水压力作用, 强度减弱易产生变形破坏, 发生大规模滑坡<sup>[14]</sup>。国内外对于地震和地下水耦合作用下碎石土边坡动力响应的研究较少, 通常假定坡体具有均匀的渗流特性, 适用于砂土和黏土边坡, 但不适用于碎石土边坡<sup>[15,16]</sup>。因此, 研究地下水条件下碎石土斜坡的动力响应更

收稿日期 (Received date): 2016-1-10; 改回日期 (Accepted date): 2017-12-26

基金项目 (Foundation item): “一带一路”国际合作团队项目 (苏立君); 中科院百人计划项目 (苏立君); 一带一路国际合作研究计划 (131551KYSB20160002)。[“Belt & Road” International Cooperation Team Project of CAS (Su Lijun); “Hundred Talents Program” of CAS (Su Lijun); International Partnership Program (131551KYSB20160002)]

作者简介 (Biography): 梁双庆 (1983-), 男, 黑龙江人, 博士, 主要研究方向: 滑坡灾害监测预警。[Liang Shuangqing (1983-), male, born in Heilongjiang, Ph. D., research on landslide monitoring and early warning] E-mail: lsq1983@imde.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding author): 苏立君 (1976-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: 滑坡机理。[Su Lijun (1976-), male, Ph. D., professor, specialized in landslide mechanism] E-mail: sulijun1976@163.com

符合实际。

为科学合理地阐述碎石土斜坡在强震作用下变形破坏问题,本文进行振动台模拟试验,较系统地研究强震动力作用下,有地下水碎石土边坡的动力响应规律和变形破坏特征。

## 1 振动台试验概况

本次物理模拟试验采用中科院山地所自行研发二维振动台设备,主要组成部件包括台面基座、激震电动机、调频箱、振动弹簧、模型箱(图1)。调频范围 0.5 ~ 50 Hz, 竖直  $Z$  方向输入的最大加速度为 0.6 g, 水平  $X$  方向输入的最大加速度为 0.8 g。分析竖直平面内相互垂直的两个简谐运动合成作用下,斜坡加速度、速度的动力响应特征。

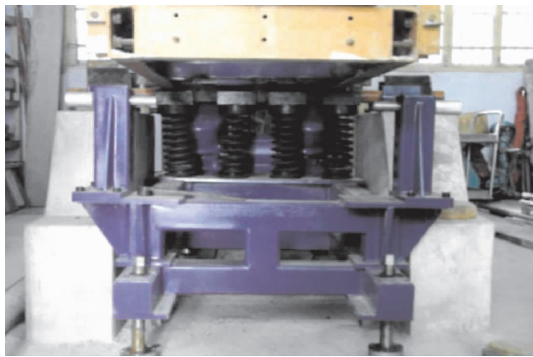


图1 振动台组成

Fig. 1 The shaking table of two-dimension

碎石土的物理力学性质特殊,在应力水平较低时,应变就开始出现非线性,很难找到一种能解决该问题的模拟材料<sup>[11]</sup>。因此,本试验采用碎石土作为模型材料,相似关系主要考虑动力条件下边坡模型材料力学特征的相似性,以模型长度、密度和加速度为控制量,相似比采用 Meymand (1998) 相似法则<sup>[10]</sup>;为原型与模型的相似比,模型试验相似常数如表1,为保证模型试验设计的合理性,选取振动频率为 25 Hz,振动载荷强度为 0.1、0.2、0.4 g,与振动时间选为 20 s。

模型材料为碎石土,考虑到振动台台面及模型箱尺寸很大,斜坡模型材料采用斜坡土体是现实可行的。假设边坡内摩擦角的强度作用远大于粘聚力的作用<sup>[16, 17]</sup>。采用碎石土斜坡的宽度级配如表2。含水率为 12%,容重为 19.60 kN/m<sup>3</sup>,渗透率为  $2.3 \times 10^{-3}$  cm/s,内摩擦角为 39.6°,粘聚力 40.08 kPa。

表1 模型试验相似常数

Tab. 1 Similarity coefficients of model test

物理量	相似关系	相似比
长度	$C_l$	$\lambda$
密度	$C_\rho$	1
加速度	$C_a$	1
速度	$C_v = (C_l C_a)^{1/2}$	$\lambda^{-1/2}$
位移	$C_u = C_l$	$\lambda$
粘聚力	$C_c = C_l C_\rho C_a$	$\lambda$
内摩擦角	$C_\varphi = 1$	1
振动频率	$C_\omega = (C_a / C_l)^{1/2}$	$\lambda^{-1/2}$
时间	$C_t = (C_l / C_a)^{1/2}$	$\lambda^{1/2}$

表2 实验材料级配

Tab. 2 The graduation of experiment material

粒径 (mm)	<30	<20	<10	<5	<2	<1	<0.5	<0.25	<0.075
累积质量 百分比(%)	100	90.95	85.52	76	48.79	40	28.75	14.63	4.32

模型箱宽为 0.57 m, 高为 1.2 m, 长为 1.8 m, 采用钢架结构固定边界, 侧壁为有机玻璃与钢化玻璃双层结构, 中间夹高弹性胶条, 以消除试验过程中产生的边界效应<sup>[18]</sup>(图2)。

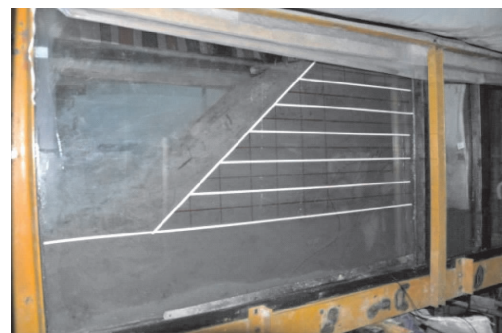


图2 模型箱组成

Fig. 2 The model box

本试验模型为概念模型,并无具体的斜坡原型。主要特征为:(1)斜坡高 0.6 m,下垫层高 0.3 cm;(2)坡面角度 45°;(3)斜坡宽 0.57 m;(4)斜坡坡顶长 0.45 m,坡底长 1.05 m(图3)。

为了研究不同振动强度下斜坡的动力响应,振动台输入二维振动波,方向为  $X$  和  $Z$  向,振动强度峰值为 0.1、0.2、0.4 g,振动时间 20 s;为了研究不同地下水位下斜坡的动力响应,共设计 3 个地下水位(0, 15, 30 cm),共计 9 个模型进行振动台模型试验研究。

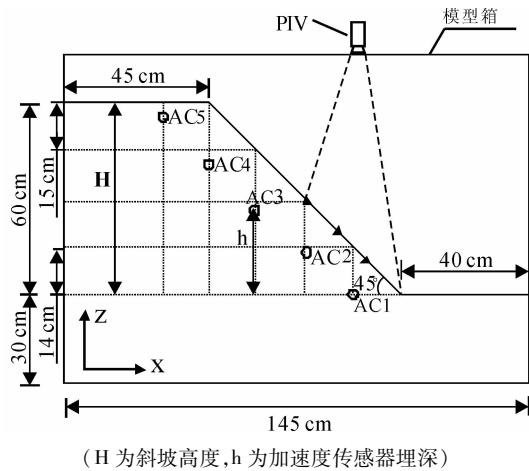


图3 斜坡模型及传感器布置

Fig. 3 Slope model and sensor arrangement

本试验一共埋置了五个双向加速度传感器。具体布置为每个模型边坡的中间位置布置一个竖直剖面,每两个传感器间距为 14 cm,位置如图 3。在振动台的台面固定一个加速度传感器,以监测试验过程中输入加速度的变化。

采用高清摄像机记录斜坡坡脚的运动过程,采用粒子图像测速法 (PIV) 通过测量颗粒在很短时间间隔内的运动过程,在坡体表面选取 3 个速度监测点,高程分别为 10、20、30 cm,布置于坡面的中间位置,分析坡脚的动力响应特征。

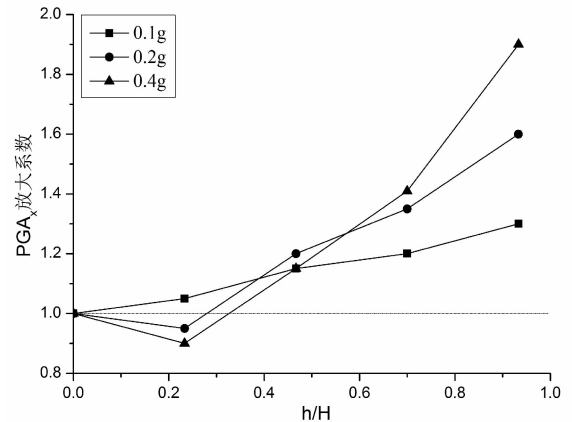
## 2 斜坡的动力响应规律

为了研究碎石土斜坡动力响应规律,在斜坡内部不同高程埋置了加速度传感器,从下向上依次为 AC1, AC2, AC3, AC4, AC5, 同时观测斜坡加速度在不同高程垂直方向和水平方向上的动力响应特性。本文引入加速度峰值 (PGA) 放大系数,为斜坡内任意点响应加速度峰值与 AC1 加速度峰值的比值。当 PGA 放大系数大于 1,斜坡内的加速度响应相对于坡脚放大;当 PGA 放大系数小于 1,斜坡内的加速度响应相对于坡脚被减弱。 $h/H$  为加速度传感器埋设深度 (相对于坡脚的垂直高度) 与斜坡高度的比值。

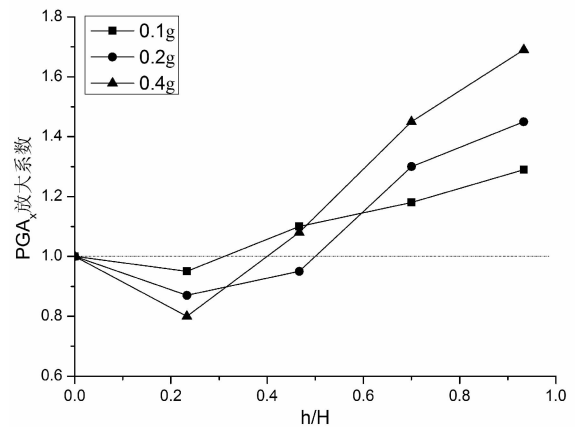
### 2.1 斜坡水平向加速度动力响应规律

如图 4(a),当地下水位为 0 cm 时,随高程增大,斜坡水平向 PGA 放大系数整体趋势为高程增大,当  $h/H$  小于 0.5 时,随着地下振动强度的增高,水平向 PGA 放大系数随高程的增加出现先下降后上升的

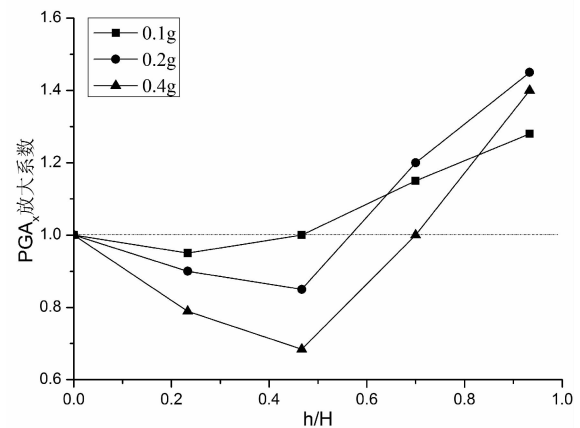
趋势,振动强度越高,下降的幅度越大,即 AC2 传感器的 PGA 放大系数  $< 1$ ; 当  $h/H$  大于 0.5 时,水平向 PGA 放大系数随高程增大,振动强度越大,坡体上部水平向高程放大效果越明显。当振动强度为 0.4 g 时,坡顶高程放大效果最明显。如图 4(b),当地下水位为 15 cm,随高程增大,斜坡水平向 PGA 放大系数为先减小后增大。大致以  $h/H$  为 0.5 为界,当



(a) 地下水位 0 cm



(b) 地下水位 15 cm



(c) 地下水位 30 cm

图4 斜坡水平向加速度动力响应特征

Fig. 4 Characteristics of horizontal acceleration responses for slope model

$h/H$  小于 0.5 时,水平向 PGA 放大系数出现高程减弱现象。相同振动强度条件下,高程减弱区域及减弱能力明显大于无地下水的情况。随着振动强度的增加,同一高程水平向 PGA 放大系数减小,且振动强度为 0.2 g 时水平向 PGA 放大系数高程减弱区域最大,振动强度为 0.4 g 时,高程减弱效果最明显;当  $h/H$  大于 0.5 时,水平向 PGA 放大系数随高程增加呈上升的趋势,PGA 放大系数  $>1$ ,随着振动强度的增加,同一高程水平向 PGA 放大系数增大,振动强度为 0.4 g 高程放大效果最明显。相同振动条件下,坡顶加速度放大效果明显低于无地下水的情况。

如图 4(c),当地下水位为 30 cm,随高程增大,斜坡水平向 PGA 放大系数为先减小后增大。大致以  $h/H$  为 0.7 为界,当  $h/H$  小于 0.7 时,水平向 PGA 放大系数出现高程减弱区域,随着振动强度的增加,同一高程的水平向加速度放大系数呈减小趋势,振动强度为 0.4 g 时水平向 PGA 放大系数高程减弱区域最大,减弱效果最明显;当  $h/H$  大于 0.7 时,水平向 PGA 放大系数增大,但坡顶高程水平向 PGA 放大系数与振动强度呈非线性关系,当振动强度为 0.2 g 高程放大效果更明显。

上述试验结果表明,地下水具有减震作用,斜坡水平向 PGA 放大系数随高程增加,呈先减小,后增大的趋势。地下水位越高、振动强度越大,斜坡下部水平向加速度高程减弱的能力越强,减震效果越明显。坡体上部水平向 PGA 放大系数呈高程放大,随地下水位升高,坡体上部同一高程水平向 PGA 减小,坡顶高程放大效果随振动强度的增加,呈先增大后减小的趋势。坡体上部高程放大效果,主要取决于坡体中下部的振动响应。即地下水位越高,减震效果越明显,主要由于含水砾石土过滤了大部分高频地震波,保留低频部分,导致加速度动力响应减弱<sup>[19]</sup>。

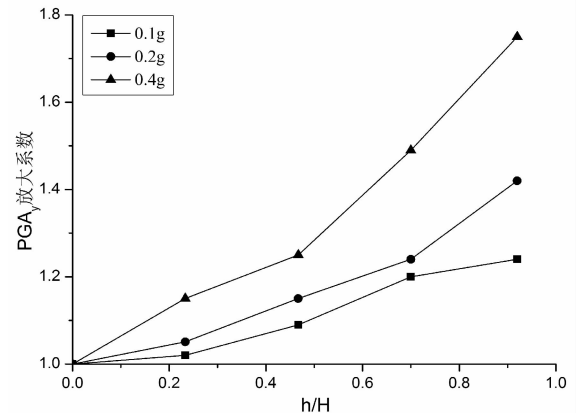
## 2.2 斜坡竖直向加速度动力响应规律

如图 5(a),当地下水位为 0 时,斜坡竖直加速度随高程呈放大趋势。随着振动强度的增加,斜坡同一高程竖直向 PGA 放大系数增大,振动强度为 0.4 g 时,坡顶高程放大效果最明显。

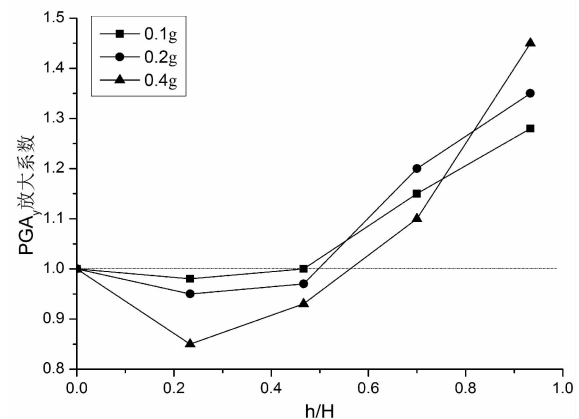
如图 5(b),当地下水位为 15 cm,随高程增加,斜坡竖直向 PGA 放大系数呈先下降后上升趋势。当  $h/H$  小于 0.5 时,随着振动强度的增加,斜坡同一高程竖直向 PGA 放大系数减小,地下水减震效果最明显。当  $h/H$  大于 0.5 时,随着振动强度的增

大,竖斜坡同一高程竖直向 PGA 放大系数增大,当振动强度为 0.4 g 时,坡顶高程放大效果最明显。

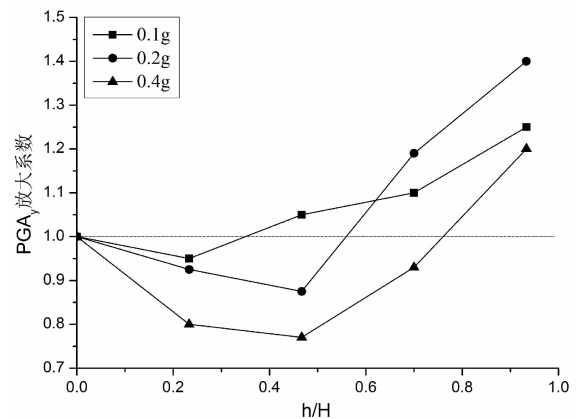
如图 5(c),当地下水位为 30 cm 时,斜坡竖直向 PGA 随高程先减小后增大。当  $h/H$  小于 0.7 时,随着振动强度的增加,同一高程竖直向加速度放大系数呈减小趋势,振动强度为 0.4 g 时,竖直向 PGA 放大系数高程减弱区域最大,地下水减震效果最明



(a) 地下水位 0 cm



(b) 地下水位 15 cm



(c) 地下水位 30 cm

图 5 斜坡竖直向加速度动力响应特征

Fig. 5 Characteristics of vertical acceleration responses for slope model

显。当  $h/H$  大于 0.7 时,斜坡上部竖直向 PGA 放大系数随高程增大,随振动强度的增加,坡顶高程放大效果呈先增大后减小的趋势,当振动强度为 0.2 g 时,坡顶加速度动力响应最明显,主要取决于坡体中下部竖直向加速度的响应。

上述试验结果表明,地下水的存在对于斜坡竖直向加速度动力响应同样具有重要影响,与对水平向的影响相似。

### 3 斜坡的动力破坏

当地下水位高于坡脚,振动荷载易造成坡脚发生较大幅度的变形,引发坡体出现很大的沉降,最终导致滑坡发生。2008 年汶川地震后,降雨不断发生,震后边坡土质疏松,坡体表面及内部大量裂隙,使地下水位升高,在余震作用下,有地下水边坡与无地下水边坡出现不同的动力响应规律和变形破坏形式<sup>[16]</sup>。地下水位以上,土骨架间存在毛细压力,可达 1 个大气压以上,联结土颗粒<sup>[13]</sup>。随着地下水位的上升,斜坡饱水面积增大,土体抗剪强度不断降低,塑性应变区域不断向上扩展,在动力作用下,易发生变形破坏。

本实验采用 PIV 分析坡脚速度的动力响应特征,以高清摄像机记录坡体的变形破坏现象,验证加速度传感器记录的坡体内部加速度动力响应规律是否准确。PIV 的视窗为  $30 \times 30$  cm,图 6 与图 8 中的 30、20、10 cm 分别代表相应高程(与坡脚垂直距离)的特征点。

#### 3.1 地下水位对斜坡动力破坏的影响

以振动强度为 0.4 g,地下水位为 0、15、30 cm 为例,分析地下水位对斜坡动力破坏的影响。

当地下水位为 0 时,坡体下部水平向速度较小,速度动力响应规律表现高程放大效应,但速度较小,30 cm 高程监测点的最大速度约为 0.01 m/s,放大效果不明显(6-a)。当受到底部振动荷载波扰动时,斜坡上部受到的约束少,运动剧烈,坡顶产生倾角接近直立的拉张裂缝,与水平地震力的作用与高程放大效应有关,坡顶易发生破坏,并且坡面也产生了水平向的拉张裂缝(图 7-a)。

当地下水位为 15 cm 时,坡脚水平向速度响应规律表现为高程减弱(图 6-b),但减弱效果不明显,高程为 10 cm 监测点的最大速度约为 0.01 m/s,振动荷载扰动时,坡体发生变形,坡脚处向临空面运动(图 7-b)。

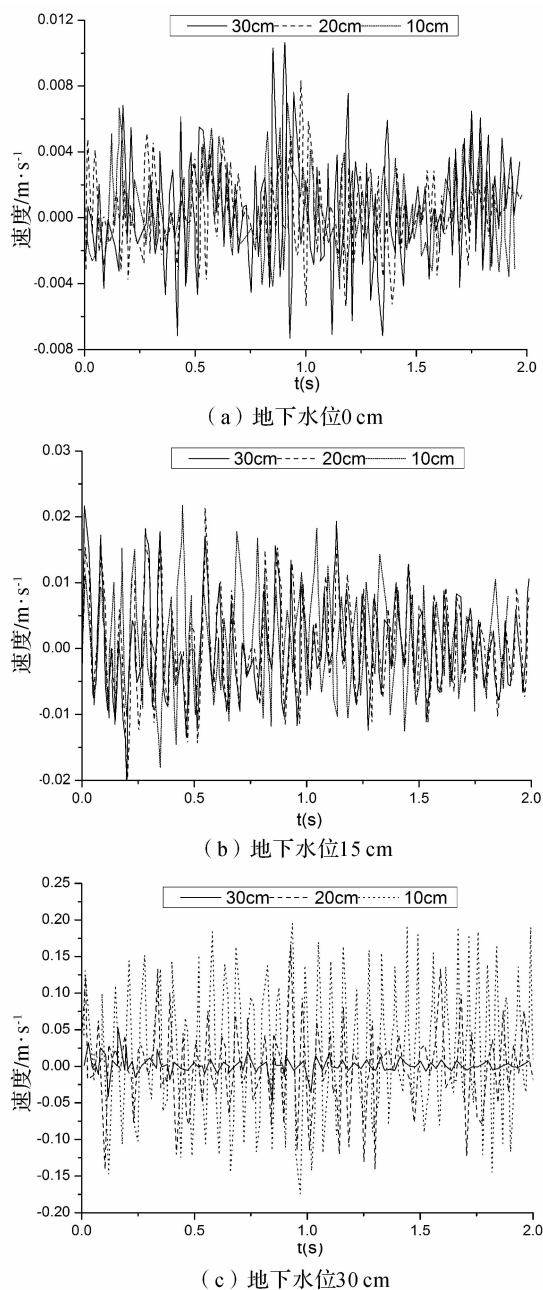


图 6 0.4 g 振动荷载作用下坡脚水平向速度变化

Fig. 6 Change of horizontal velocity of slope toe under vibration intensity of 0.4 g

当地下水位为 30 cm 时,振动荷载作用下,地下水位以下产生超孔隙水压力,坡脚水平向速度较大(6-c),高程为 10 cm 监测点的最大速度约为 0.18 m/s,响应规律为高程缩小,缩小效果明显,地震扰动时,坡体下部水平向运动剧烈,易发生坡脚变形破坏(图 7-c)。因此,当振动强度相同时,随着地下水位升高,坡脚水平向速度增大,水平向速度的动力响应规律为高程缩小,加剧坡脚变形破坏。



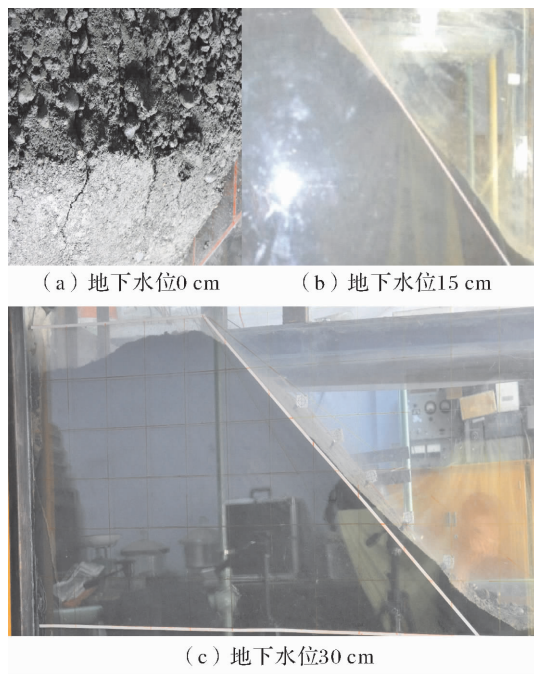


图7 0.4 g 振动强度作用下斜坡动力破坏特征

Fig.7 Characteristics of dynamic failure of slope model under vibration intensity of 0.4 g

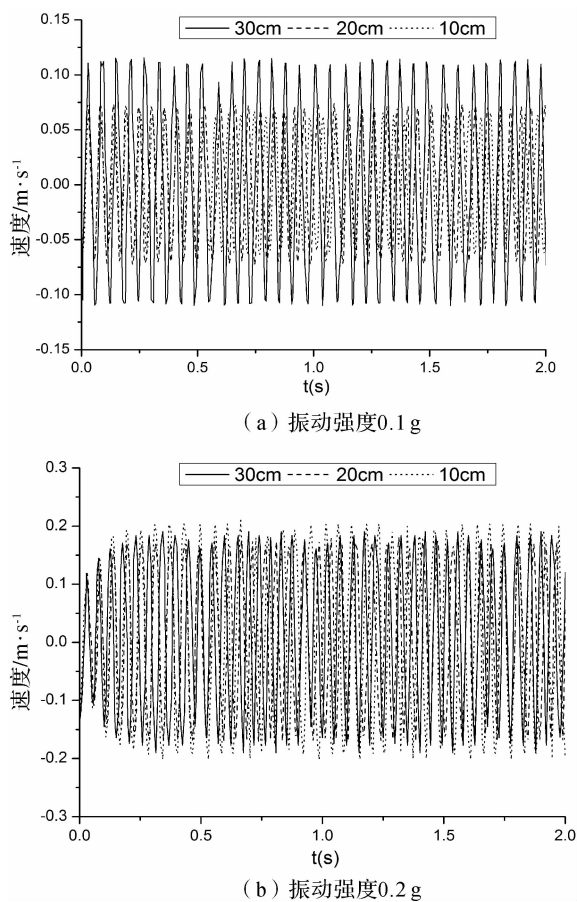


图8 地下水位 15 cm 坡脚水平向速度变化

Fig.8 Change of horizontal velocity of slope toe under groundwater level of 15 cm

### 3.2 振动强度对斜坡动力破坏的影响

以地下水位 15 cm, 振动强度为 0.1、0.2、0.4 g 为例。振动强度为 0.1 g 时, 坡体下部水平向速度响应规律为高程放大, 30 cm 高程监测点的最大速度约为 0.11 m/s, 放大效果较明显 (8-a)。在受地震波扰动时, 坡体顶部易发生变形破坏, 产生了水平向的拉裂缝 (图 9-a)。

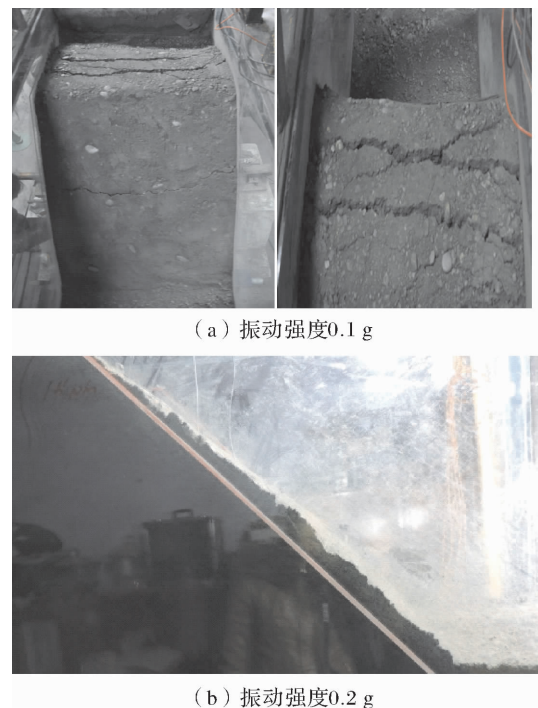


图9 地下水位 15 cm 斜坡动力破坏特征

Fig.9 Characteristics of dynamic failure of slope model at 15 cm in depth

振动强度为 0.2 g 时, 坡体下部水平向速度基本相同 (8-b), 高程放大效果不明显, 三个高程监测点的最大速度约为 0.2 m/s, 坡体下部整体向临空面运动, 受地震波作用时, 坡脚处发生变形 (图 9-b)。当振动强度为 0.4 g 时, 地下水位以下土体产生超孔隙水压力现象, 坡脚发生严重变形破坏 (图 6, 7-c)。因此, 随着振动强度的增加, 坡脚水平向速度增大, 并呈高程缩小趋势, 加剧坡脚变形破坏。

坡脚表面质点的速度沿高程的分布规律实际上是边坡内质点沿水平向和竖直向动力响应合成, 临空面方向运动无约束。无地下水情况下, 坡脚区域速度放大系数较小, 呈高程放大趋势与坡体内部加速度传感器所测得的 PGA 放大系数相吻合。随地下水位及振动强度的增大, 坡体中下部 PGA 放大系

数高程缩小明显,与PIV处理坡脚表面速度在该区域高程变化趋势也吻合,合理解释了不同地下水位对碎石土斜坡动力响应的影响。

综上,地下水影响区域,土体的内摩擦角、粘聚下降。在振动作用下,坡体内部孔隙水压力升高,地下水影响区域内碎石土的有效应力减小,强度进一步降低,在地震与重力作用下发生变形破坏,竖直方向表现为震陷现象,水平方向表现为坡脚处朝向临空面的运动(图7,9)。

## 4 结论

1. 无地下水条件下,碎石土斜坡内部加速度峰值放大系数呈明显的高程放大。斜坡水平加速度峰值放大系数明显高于竖直向。随振动强度的增加,坡体内部同一高程水平及竖直加速度峰值放大系数增加,振动强度越大,放大效果越明显。

2. 地下水的存在,使土体强度下降。由于水平向的加速度由下向上传递,传递过程中地下水影响范围内坡脚处的水平位移逐渐增大,表现为坡脚变形大;综合竖直与水平加速的综合作用,使得坡顶破坏程度降低,既对地震波传递的减震作用。

3. 地下水条件下,碎石土斜坡内部水平及竖直向加速度出现局部高程减弱现象;地下水位越高,高程减弱区域越大,坡顶加速度动力响应效果越弱;随振动强度的增加,高程减弱区同一高程水平或竖直向加速度峰值放大系数越小;高程减弱效果越明显。坡顶高程放大效果与振动强度呈非线性关系。

4. 无地下水碎石土斜坡顶部易发生破坏。地下水存在时,碎石土斜坡易发生坡脚破坏;振动强度及地下水位的增大,加剧坡脚破坏的程度;振动强度越大,坡脚破坏越严重。

## 参考文献 (References)

[1] ZHANG Jian, CUI Peng, ZHANG Bingkun, et al. Earthquake induced landslide displacement attenuation models and application in probabilistic seismic landslide displacement analysis [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, **9**(2): 177-187

[2] TANG Chuan, ZHU Jing, QI Xing, et al. Landslides induced by the Wenchuan earthquake and the subsequent strong rainfall event: A case study in the Beichuan area of China [J]. Engineering Geology, 2011, **122** (1-2): 22-23.

[3] 宁军. 碎石土滑坡稳定性分析及治理设计探讨[J]. 道路工程, 2014, **4**(81): 22-26. [NING Jun. Discussions on gravel soil

landslide stability analysis and treatment design [J]. Road Engineering, 2014, **4**(81): 22-26.]

[4] 吴世明. 土动力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 236. [WU Shiming. Soil dynamics [M]. Beijing: China Building Industry Press, 2000: 236.]

[5] 刘汉香, 许强, 王龙, 等. 地震频率对岩质斜坡加速度动力响应规律的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(1): 125-133. [LIU Hanxiang, XU Qiang, WANG long, et al. Effect of frequency of seismic wave on acceleration response of rock slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(1): 125-133.]

[6] 杨峥, 许强, 刘汉香, 等. 地震作用下含反倾软弱夹层斜坡动力变形破坏特征研究[J]. 振动与冲击, 2014, **33**(19): 134-139. [YANG Zheng, XU Qiang, LIU Hanxiang, et al. Dynamic deformation and failure of slopes with an anti-dip weak interlayer under earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, **33** (19): 134-139.]

[7] 杨国香, 伍法权, 董金玉, 等. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31** (4): 697-702. [YANG Guoxiang, WU Faquan, DONG Jinyu, et al. Study on failure mechanism and dynamic response rules of rock slope under earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(4): 697-702.]

[8] 杨峥, 许强, 刘汉香, 等. 地震作用下含反倾软弱夹层斜坡动力变形破坏特征研究[J]. 振动与冲击, 2014, **33**(19): 134-139. [YANG Zheng, XU Qiang, LIU Hanxiang, et al. Dynamic deformation and failure of slopes with an anti-dip weak interlayer under earthquakes[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, **33** (19): 134-139.]

[9] 范刚, 张建经, 付晓, 等. 含泥化夹层顺层岩质边坡动力响应大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, **37**(4): 691-699. [FAN Gang, ZHANG Jian-jing, FU Xiao, et al. Large scale shaking table test on dynamic response of bedding rock slope with siltized intercalation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, **37**(4): 691-699.]

[10] LIN ML, WANG KL. Seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test [J]. Engineering Geology, 2006, **86**: 118-133.

[11] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27** (3): 624-632. [XU Guangxin, YAO Lingkan, GAO Zhaoning, et al. Large scale shaking table model test study on dynamic characteristics and dynamic responses of slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(3): 625-631.]

[12] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(11): 2264-2271. [XU Jiancong, SHANG Yuequan. Influence of permeability of gravel soil on debris landslide stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(11): 2264-2271.]

[13] 李显平. 碎石土的颗粒特征及其优先流研究进展[J]. 中国科技信息, 2012, **6**: 58-59. [LI Xianping. The characteristics of debris' grain composition and study on debris preferential flow

- [J]. China Science and Technology information, 2012, **6**: 58 – 59. ]
- [14] 许建聪, 尚岳全. 降雨作用下碎石土滑坡解体变形破坏机制研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 106 – 112. [XU Jiancong, SHANG Yuequan. Study on mechanism of disintegration deformation and failure of debris landslide under rainfall [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 106 – 112. ]
- [15] 宋波, 黄帅, 蔡德钩, 等. 地下水位变化对砂土边坡地震动力响应的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, **33**(S1): 2698 – 2706. [SONG Bo, HUANG Shuai, CAI Degou, Ye Yangsheng. Seismic dynamic response of sand slope induced by variations of groundwater level [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, **33**(S1): 2698 – 2706. ]
- [16] 宋波, 黄帅, 叶阳升, 等. 地下水对罕遇地震下砂质边坡动力响应和破坏模式的影响[C]. 第三届全国工程风险与保险研究学术研讨会交流材料, 2014: 36 – 42. [SONG Bo, HUANG Shuang, YE Yangsheng, et al. Study on dynamic response and failure mode of sand slope under rare earthquake [C]. The Third National Academic Conference on Engineering Risk and Insurance, 2014: 36 – 42. ]
- [17] 徐光兴. 地震作用下边坡工程动力响应与永久位移分析[D]. 西南交通大学博士学位论文, 2011: 20 – 21. [XU Guangxing. Research on the dynamic responses and permanent displacement of slope under earthquake [D]. Southwest Jiaotong University Doctor Degree Dissertation, 2011: 20 – 21. ]
- [18] 梁双庆, 苏立君, 王洋. 不同坡面角度碎石土斜坡动力响应特征研究[J]. 振动冲击, 2016, **35**(21): 153 – 158. [LIANG Shuangqing SU Lijun, WANG Yang. Characteristics of dynamic response of gravel soil slope with different angles of inclination [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, **35**(21): 153 – 158. ]
- [19] 李培振, 任红梅, 吕西林, 等. 液化地基自由场振动台模型试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, **28**(2): 172 – 178. [Li Peizhen, Ren Hongmei, Lu Xilin, et al. Shaking table test on free field considering soil liquefaction [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, **28**(2): 172 – 178. ]

## Seismic Dynamic Response of Gravel Soil Slope Induced By Variations of Groundwater Level

LIANG shuangqing<sup>1,3</sup>, SU Lijun<sup>1,2,3\*</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. CAS Center for Excellence in Tibetan Plateau Earth Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the laboratory small-scale shaking table test, the dynamic response laws, deformation and failure characteristics of gravelly soil slopes at different groundwater levels were studied, which can be used as references for the seismic design of slopes. Tests revealed that the groundwater contained in slope served vibration absorption. The horizontal and vertical accelerations of the middle and lower parts of the slope with groundwater showed a tendency of decreasing with height downward, whereas in the upper part of the slope it presented an upward trend. Under the condition of the same vibration intensity, with the ascent of groundwater level, the weak zone of dynamic response increased and the shock absorption capacity increased. The higher the groundwater level, the smaller the acceleration amplification coefficient was found at the top of the slope. No groundwater slope occurred deformation and failure mainly in the top of the slope; Deformation in the groundwater slope took place and come to failure mainly in the slope foot. The increase of groundwater level and vibration strength aggravated the degree of foot damage.

**Keywords:** gravel soil slope; shaking table test; groundwater level; dynamic response; peak of acceleration