

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.049



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 含建筑桩基的顺层岩质边坡桩锚支护体系 振动台模型试验研究

吴曙光<sup>1</sup>, 毛振南<sup>1</sup>, 潘林<sup>2</sup>, 薛尚铃<sup>3</sup>, 徐革<sup>3</sup>

(1. 重庆大学土木工程学院; 库区环境地质灾害防治国家地方联合工程研究中心, 重庆 400045;  
2. 重庆电力高等专科学校发展规划与质量保障处, 重庆 400053; 3. 中冶赛迪工程技术股份有限公司, 重庆 400013)

**摘要:** 基于 Buckingham  $\pi$  定理, 对具有建筑桩基的顺层岩质边坡桩锚支护体系开展振动台模型试验, 通过分析预应力锚索、建筑桩基的应变以及边坡坡顶加速度, 研究支护体系的动力响应规律。结果表明, 预应力锚索的应变在地震波加速度达到峰值时达到最大值, 且上排锚索受力大于下排锚索, 随着地震幅值的增大, 最上排锚索锚固段率先发生滑移破坏失去锚固作用; 建筑桩基应变最大值点位于滑动面以下一定深度, 且远离边坡坡面的建筑桩基受力大于邻近边坡坡面的建筑桩基; 坡顶各点峰值加速度随地震波幅值增大整体表现为线性增大, 但在 Wenchuan-Wolong 波 (0.55g) 和 Sin 波 (0.4g) 工况时, 各点峰值加速度相对有所下降, 随着地震波幅值增大, 各点峰值加速度放大系数在汶川波和正弦波作用下并非单调变化, 而是表现为先减小后增大波动变化特点。

**关键词:** 建筑桩基; 顺层岩质边坡; 桩锚挡墙; 振动台; 模型试验

中图分类号: TU473.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)02-0011-12

## Shaking table model test study of pile-anchor support system for bedding rock slope with building pile foundation

WU Shuguang<sup>1</sup>, MAO Zhennan<sup>1</sup>, PAN Lin<sup>2</sup>, XUE Shangling<sup>3</sup>, XU Ge<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering; National Joint Engineering Research Center of Geohazards Prevention in the Reservoir Areas, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. Development Planning and Quality Assurance Department, Chongqing Electric Power College, Chongqing 400053, P. R. China; 3. CISDI Engineering Co., Ltd., Chongqing 400013, P. R. China)

**Abstract:** Based on Buckingham  $\pi$  theorem, a shaking table model test is carried out for the bedding rock slope with building pile foundation. Strain value of building pile foundation and the acceleration of the slope top, the seismic dynamic response of the system is studied base on the prestressed anchor cable. The results indicate that the strain of the anchor cable changes with the seismic wave, and the strain of the anchor cable reaches the maximum when the seismic wave reaches the peak, indicating that the upper cable force is larger than the lower.

收稿日期: 2021-10-29

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1505501); 重庆市住房和城乡建设委员会科研项目(2020-22)

作者简介: 吴曙光(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程研究, E-mail: wushuguang@cqu.edu.cn。

Received: 2021-10-29

**Foundation items:** National Key R & D Program of China (No. 2018YFC1505501); Scientific Research Project of Chongqing Municipal Commission of Housing and Urban-rural Development (No. 2020-22)

**Author brief:** WU Shuguang (1975-), PhD, associate professor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: wushuguang@cqu.edu.cn.

When the seismic amplitude increases, the upper anchor cable slips, and the anchoring effect decreases. The maximum strain of building pile foundation is located at a certain depth below the sliding surface, and the stress of building pile foundation far away from the slope is greater than that near the slope. The peak accelerations of slope top increase linearly with the seismic amplitude, but under the condition of Wenchuan-Wolong wave (0.55g) amplitude and Sin wave (0.4g) amplitude, there is a decreasing tendency among the peak acceleration at each point. With increase of seismic amplitude, the peak acceleration amplification coefficient of each point under Wenchuan and Sin earthquake does not change monotonously, but decreases first, and then increases.

**Keywords:** building pile foundation; bedding rock slope; pile-anchor retaining wall; shaking table; model test

顺层岩质边坡广泛存在于自然界和实际工程中<sup>[1]</sup>,稳定性通常较差,边坡失稳时常沿着软弱结构面发生滑动<sup>[2]</sup>,在地震作用下,边坡稳定性进一步降低,严重危害坡后建筑安全。预应力桩锚挡墙对边坡的稳定性和变形具有较好的控制效果,文献[3-5]指出预应力桩锚挡墙在地震工况下表现出了优于其他支护结构的抗震性能。

目前,大多数研究将边坡和支挡结构分开进行研究。顺层岩质边坡地震动力响应的研究集中在边坡稳定性分析和破坏机理上,文献[6-9]采用不同的计算方法对地震作用下边坡的安全系数进行研究,文献[10-13]对边坡在地震作用下的破坏机理进行研究。在预应力桩锚挡墙方面的研究,文献[14-17]通过试验对预应力桩锚挡墙的受力机理进行分析,文献[18-23]对地震作用下预应力桩锚挡墙的设计方法和受力机理进行研究。

综上所述,目前关于顺层岩质边坡和预应力桩锚挡墙地震动力响应的综合研究较少,该研究有利于促进对坡地建筑及其场地的地震响应规律的认识,进而对建筑基础和边坡支护提出更合理的抗震设计措施。鉴于此,笔者开展预应力桩锚挡墙模型试验,模型坡后为含建筑桩基的顺层岩质边坡,从预应力锚索、建筑桩基、边坡的地震动力响应对模型试验进行分析。

## 1 试验

### 1.1 模型相似比设计

基于 Buckingham  $\pi$  定理,采用量纲分析法,求解模型试验的相似常数。模型试验主要物理量见表 1,选取几何尺寸  $L$ 、密度  $\rho$ 、弹性模量  $E$  作为基础物理量,各个物理量的幂因式为

$$[a, m, T, \varphi, c] = [L]^{r_1} [\rho]^{r_2} [E]^{r_3} \quad (1)$$

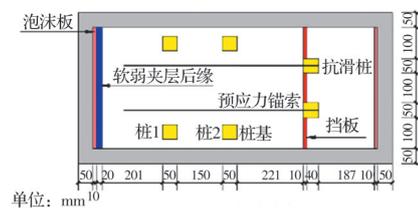
由于试验的重力加速度不能改变,故应满足  $C_a = 1$ ,采取人工质量模型。试验模型设计参考重庆云阳某医院基坑边坡工程,其基坑边坡高约 12.30 m,结合现有模型箱尺寸初步设定模型的尺

寸相似比  $C_L = 0.04$ 、 $C_\rho = 1$ 、 $C_E = 0.04$ ,其余相似常数根据定理计算得到,计算结果见表 1。

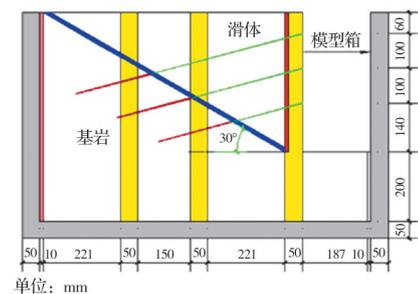
表 1 模型试验物理量相似常数  
Table 1 Similarity constant of model test

物理量	换算关系	相似常数
长度 $L$	$C_L$	0.04
密度 $\rho$	$C_\rho$	1
弹性模量 $E$	$C_E$	0.04
加速度 $a$	$C_a$	1
质量 $m$	$C_m$	$6.4 \times 10^{-5}$
时间 $T$	$C_T$	0.2
内摩擦角 $\varphi$	$C_\varphi$	1
黏聚力 $c$	$C_c$	0.04

试验模型箱尺寸为  $950 \text{ mm} \times 600 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ ,模型示意图如图 1 所示,通常在工程设计中考虑滑体沿过坡脚的软弱结构面破坏,同时希望重点研究滑体沿过坡脚这一结软弱构面破坏时整个体系的动力响应特点,故在模型制作上做了简化处理,只制作了过坡脚的这一层软弱夹层。模型中锚索锚固段长 220 mm,直径 20 mm,入射角为  $15^\circ$ 。在试验



(a) 试验模型俯视图



(b) 试验模型侧视图

图 1 试验模型图

Fig. 1 Test model diagram

前对模型箱侧壁采用甘油适当润滑以减小边界效应的不利影响,在模型箱前后贴上 10 mm 厚的泡沫板用以吸波。

### 1.2 试验材料及模型制作

参考唐晓松<sup>[24]</sup>等的研究,试验岩体的配合比为普通砂:石膏粉:滑石粉:水泥:水=0.64:0.1:0.05:0.02:0.19,软弱结构面的配合比为普通砂:石膏粉:滑石粉:水=0.73:0.02:0.05:0.2,普通砂主要成分为石英,目数 40 目。试验前测定相似材料的抗剪强度,相似材料物理参数见表 2。试验预应力锚索采用 4 mm 的铝丝,铝丝的弹性模量约为 15 GPa,图 2 为测得的铝丝应力-应变曲线。

表 2 相似材料物理参数

Table 2 Physical parameters of similar materials

相似材料	重度/ (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模 量/MPa	泊松 比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/(°)
基岩和滑体	24.2	60	0.21*	14.34	39.83
结构面	22.5	24	0.25*	1.8	27

注:\*表示取值为经验值。

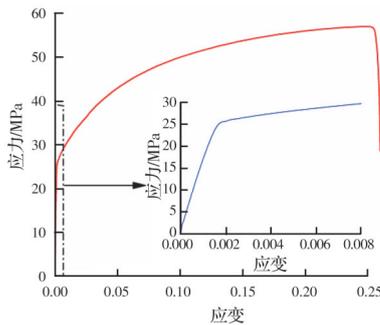


图 2 铝丝应力-应变曲线

Fig. 2 Strain-stress curves of aluminum wire

采用石膏制作建筑桩基,其配比为石膏:水=1:0.5。采用砂、水泥等通过现浇的方式制作桩板挡墙,其配比为砂:水泥:水:早强剂=1:1:0.4:0.025。建筑桩基与桩板挡墙内部均采用配有 4 mm 铁丝。桩板挡墙模板和建筑桩基模板如图 3 所示。



图 3 桩板挡墙和建筑桩基模板

Fig. 3 Mould of pile sheet retaining wall and building pile foundation

制作完成的桩板挡墙和建筑桩基模型如图 4、图 5 所示。

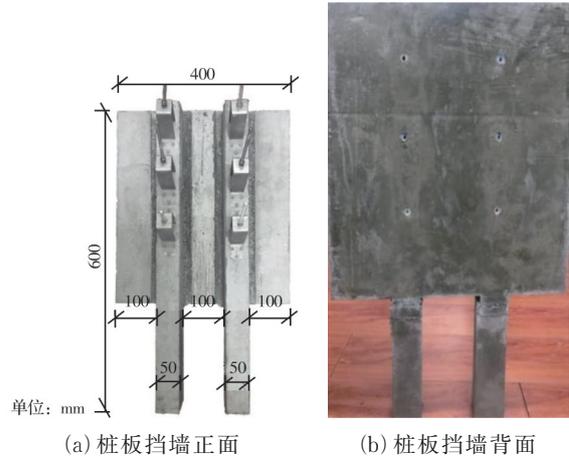


图 4 桩板挡墙模型

Fig. 4 Model of pile sheet retaining wall

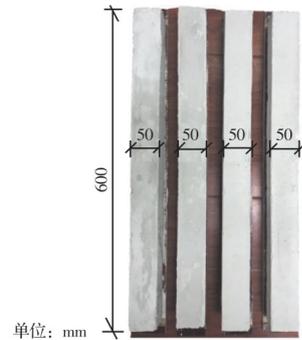


图 5 建筑桩基模型

Fig. 5 Model of building pile foundation

锚索锚固段采用水泥砂浆利用 PVC 管作为模具浇筑而成,锚固段配比为砂:水泥:水=1:1:0.6,直径 2 cm。

制作试验模式时按图 1 对桩板挡墙、建筑桩基进行定位,采用配制好的相似材料对其位置进行固定,每填筑 5 cm 厚材料便采用木槌夯实处理,当材料填筑至锚索锚固段末端时,开始安装预应力锚索,沿各锚索锚固段与自由段交接处形成软弱结构面的坡面后,开始铺设软弱结构面材料,厚度约 10 mm,完成后继续按上述步骤填筑岩体相似材料,填筑时注意避免压弯锚索,完成后将锚索自由段与锚头固定。图 6 为试验模型制作过程的记录,制作完成的模型见图 7、图 8。

### 1.3 预应力施加方案和地震波选择

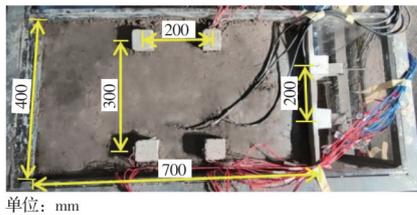
设计如图 9 所示的锚头来进行预应力施加,图 10 为实物图。锚索穿过抗滑桩上预留孔与锚头上的螺杆通过细铁丝连接,旋转螺母来施加预应力,通过锚索自由段的应变换算预应力的的大小。

试验采用重庆大学岩土实验楼的小型地震模拟振动台,见图 11,其主要参数见表 3。



图 6 模型制作过程

Fig. 6 Manufacturing process of model



单位: mm

图 7 试验模型俯视图

Fig. 7 Top view of test model

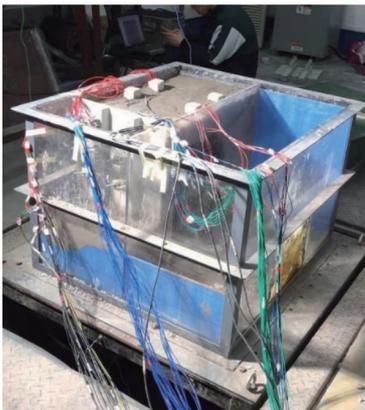


图 8 试验模型

Fig. 8 The test model

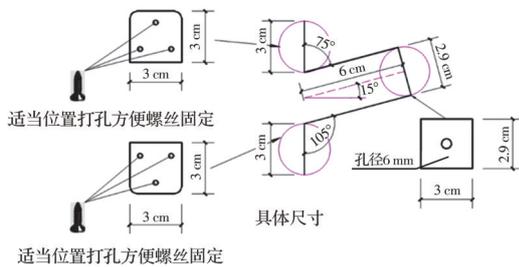


图 9 预应力锚索锚头设计图

Fig. 9 Design of anchor head of prestressed anchor cable

试验模拟的原型工程位于重庆,选用中国西南地区典型的天然地震波 Wenchuan-Wolong 波进行试验,考虑到波形不同可能对试验结果造成影响,同时选用 Sin 波进行试验形成对照,最终试验采用 0.05g~0.8g Wenchuan-Wolong 波和 0.3g~0.7g 的 Sin 波,根据表 1 中  $C_T=0.2$  对地震波持时进行压缩。地震波施加方向为图 1 的水平方向,即垂直



图 10 预应力锚索锚头实物图

Fig. 10 Anchor head of prestressed anchor cable



图 11 振动台

Fig. 11 Vibration table

表 3 振动台主要参数

Table 3 Main parameters of vibration table

台面尺寸	最大加 速度/g	最大速度/ (mm/s)	最大位 移/mm	工作频 率/Hz
1.2 m× 1.2 m	±1.2/2 (1 000 kg/500 kg)	±500	±100	800

注:最大加速度一栏中“/”前后与括号内“/”前后的质量相互对应。

于边坡走向的方向,地震波施加方案如表 4 所示,图 12 给出了试验采用 0.8g 的 Wenchuan-Wolong 波和 0.7g 的 Sin 波的加速度时程曲线。

表 4 地震波加载方案

Table 4 Loading scheme of seismic wave

地震波类型	加速度	持时/s
Wenchuan-Wolong	0.05g~0.8g, 每次增幅 0.05g	32
Sin	0.3g~0.7g, 每次增幅 0.1g	20

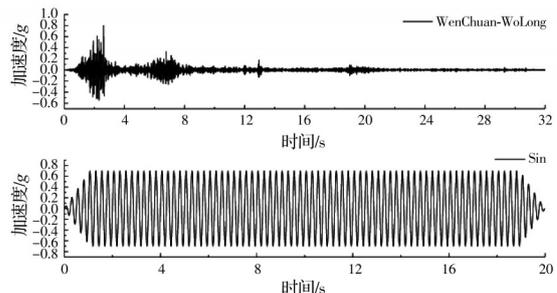


图 12 试验中用到的 Wenchuan-Wolong 波和 Sin 波

Fig. 12 Wenchuan-Wolong earthquake and Sin wave

## 2 试验现象及分析

### 2.1 模型试验宏观现象

在 Wenchuan-Wolong 波作用下,模型仅轻微晃动,未出现明显变形和裂缝;在 Sin 波作用下,模型随地震波幅值的增加晃动幅度急剧增大。输入 Sin 波(0.6g)后,滑体有向下滑动趋势,坡体后缘缝隙明显增大,如图 13 所示;随后输入 Sin 波(0.7g)后,滑体与建筑桩基脱离向下滑动,滑体顶部出现张拉裂缝,如图 14 所示。

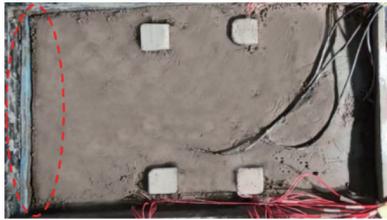


图 13 Sin 波(0.6g)对应的模型破坏情况

Fig. 13 Broken model corresponding to Sin wave(0.6g)

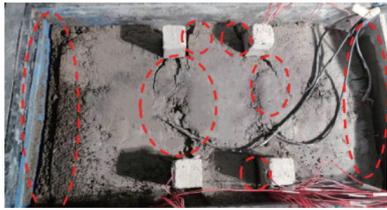


图 14 Sin 波(0.7g)对应的模型破坏情况

Fig. 14 Broken model corresponding to Sin wave(0.7g)

结束试验后清理上部滑体,发现锚索自由段两端均出现一定程度向下的弯曲,这是滑体相对桩板挡墙的挡板和基岩向下滑动导致的,表明地震作用下滑体与桩板挡墙变形不协调。进一步清理发现,锚索锚固段相对基岩滑出,失去锚固作用;远离挡墙的建筑桩基在结构面下约 53 mm 处被折断。锚索的变形破坏图见图 15 和图 16。建筑桩基折断破坏图见图 17。

### 2.2 预应力锚索动应变响应

模型仅在试验开始前通过旋转螺母来施加预应力,因此除了实验开始时的第 1 个工况,每个工况



图 15 破坏后的锚索自由段

Fig. 15 Broken free segment of prestressed anchor cable



图 16 破坏后的锚索锚固段

Fig. 16 Broken consolidated segment of prestressed anchor cable



图 17 折断后的建筑桩基

Fig. 17 Broken building pile foundation

测出的锚索应变是前面工况锚索应变的叠加,为了更准确地分析每次地震波输入对模型产生的影响,将每个工况应变片测量数值减去该工况地震波输入前读数,以应变增量来分析预应力锚索动力响应。按图 18 对各应变片进行了编号,其中 1 号、7 号、11 号和 15 号应变片在实验中损坏。

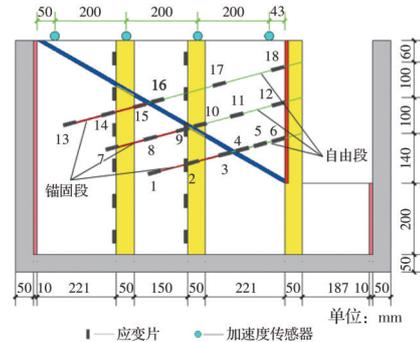


图 18 锚索应变片测点编号

Fig. 18 Test point number of anchor cable

在各 Wenchuan-Wolong 波工况下,预应力锚索的应变增量几乎在 0 附近波动,其动力响应及规律不明显。因此,只对模型刚开始输入 Sin 波的 0.3g 工况,模型破坏前的 Sin 波(0.6g)工况和模型破坏时的 Sin 波(0.7g)工况进行分析。

Sin 波(0.3g)作用下各锚索自由段的应变时程曲线见图 19。试验用锚索是预制的,由于模型尺寸较小不便于套管定位,且套管的存在不利于相似材料的堆筑,故锚索自由段未设套管,尽管模型制作时已采用甘油对锚索进行适当润滑,自由段锚索与

岩体之间依旧存在摩擦,导致同一道锚索自由段各点受力不一致,靠近结构面处测点应变峰值更大,可以通过比较每道锚索自由段最大的峰值应变来分析预应力锚索自由段的受力特点。3道锚索的应变峰值大小表现为上锚索>中锚索>下锚索,表明在 Sin 波作用下,预应力锚索受力特点为上大下小。每道锚索自由段 3 个应变测点中应变峰值最大点均为接近结构面处的点,而在 Sin 波输入结束后,该点应变为负值,其原因是滑体的潜在滑动趋势造成了锚索在 Sin 波输入初期接近结构面处的受力较大,同时在 Sin 波作用下滑体做循环往复的运动,对锚索有回压作用,产生了一定的压应变。而接近桩板挡墙位置锚索应变峰值最小,这是由 Sin 波作用下桩板挡墙的反压以及锚索应力松弛共同造成的。

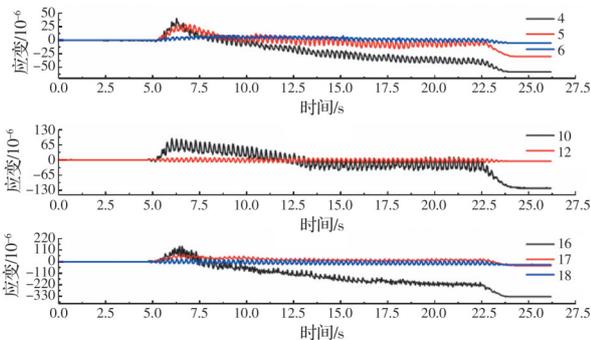


图 19 Sin 波(0.3g)作用时锚索自由段应变

Fig. 19 Strain of anchor cable free section corresponding to Sin wave (0.3g)

Sin 波(0.6g)作用下各锚索自由段的应变时程曲线见图 20。Sin 波输入初期,每道锚索自由段的 3 个应变测点中,依旧是靠近结构面的测点应变峰值最大,靠近桩板挡墙的测点应变峰值最小。随着 Sin 波持续输入,下锚索 4 号、6 号点应变持续增大,地震波输入结束后有较大的残余应变,5 号点可能由于锚索与土体的摩擦,在整个地震波输入过程中应变变化幅值较小。中锚索 12 号点最终产生了较大的压应变,其原因是该点接近桩板挡墙,在 Sin 波作用下,桩板挡墙的往复运动导致该点受压。上锚索 16 号、17 号点应变峰值较中、下锚索同位置测点都偏小,且这两点应变随地震波输入的变化幅度均不及中、下锚索,在地震作用下,边坡坡面的高程放大效应导致滑体和桩板挡墙上部的往复运动幅度更大,使得上锚索锚固体与基岩之间有一定的相对滑动,锚固作用有所减弱,最终导致上述现象。

Sin 波(0.7g)作用下各锚索自由段的应变时程曲线见图 21。中、下锚索自由段在靠近结构面处应

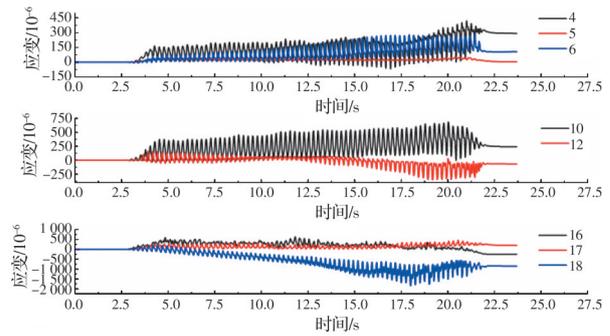


图 20 Sin 波(0.6g)作用时锚索自由段应变

Fig. 20 Strain of anchor cable free section corresponding to Sin wave (0.6g)

变大于上锚索,且下锚索 4 号点应变随 Sin 波的输入有增大的趋势。分析认为在 Sin 波(0.7g)作用下,上锚索锚固体与基岩直接产生了较大的相对滑动,导致上锚索锚固作用大幅减弱,锚索受力由上、中锚索主要受力转变为中、下锚索提供抵抗地震荷载的锚固力。3 道锚索靠近桩板挡墙的 3 个应变测点,上锚索最大,中锚索次之,下锚索最小。出现该现象的原因是滑体在地震作用下相对挡墙下沉,同时滑体模型上部密实度不及下部,导致滑体上部下沉更多,最终应变关系变现为上锚索>中锚索>下锚索。

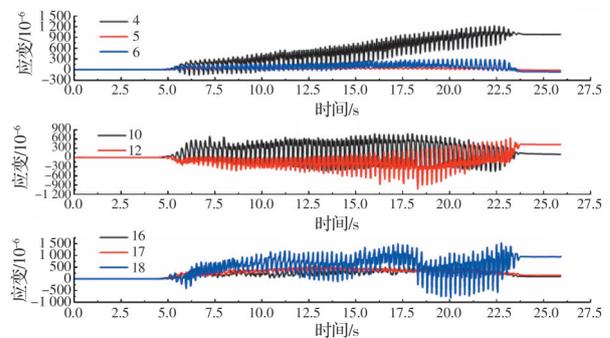


图 21 Sin 波(0.7g)作用时锚索自由段应变

Fig. 21 Strain of anchor cable free section corresponding to Sin wave (0.7g)

根据上述 3 个工况下锚索自由段的应变时程曲线分析可得,含有建筑桩基的顺层岩质边坡预应力桩锚支护体系,随着输入的地震波峰值加速度的增大,受力最大的上锚索锚固段与基岩之间开始产生相对滑动,导致其锚固作用减弱,锚索体系受力由中、上锚索转移至中、下锚索主要受力。在静力作用下,支挡结构北侧土压力无论是按三角形分布还是按矩形分布或是梯形分布考虑,其下部受力都大于上部受力,当考虑地震作用时,根据本节的试验分析,锚索体系受力最大的为中、上部锚索,因此当考虑地震作用时,应当注意对上部锚索的设计和施

工进行强化。

图 22~图 24 为各道锚索在 0.3g、0.6g 和 0.7g Sin 波作用下的应变时程曲线,由于三道锚索锚固段均有应变片损坏,只能对剩余各点的应变大小进行分析以粗略判断锚固段轴力分布情况。各锚索锚固段的应变时程曲线总体表现为接近结构面的测点应变峰值更大,锚固段端点的应变峰值最小,由此判断预应力锚索锚固段轴力不是均匀分布的,总体表现为从锚固段端点到结构面处逐渐增大。

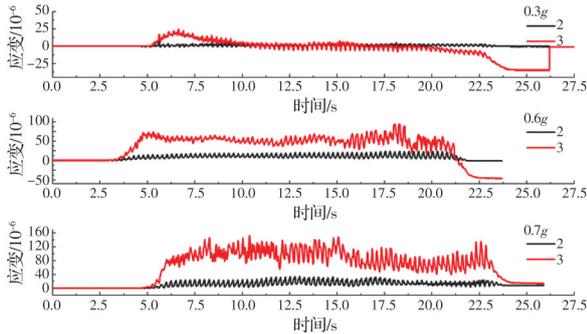


图 22 下锚索锚固段应变

Fig. 22 Strain of anchorage section for the lower anchor cable

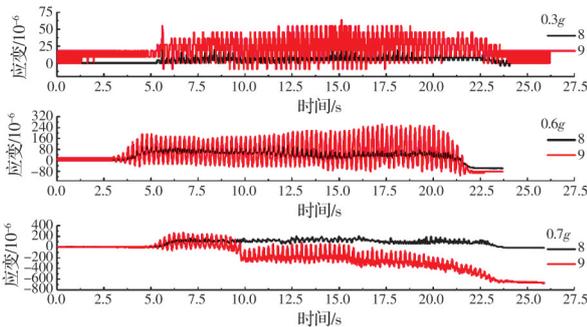


图 23 中锚索锚固段应变

Fig. 23 Strain of anchorage section for the middle anchor cable

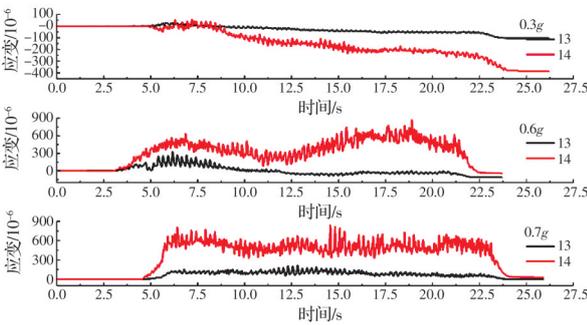


图 24 上锚索锚固段应变

Fig. 24 Strain of anchorage section for the upper cable

### 2.3 建筑桩基动应变响应

按图 25 对建筑桩基各应变片进行编号,其中 27 号、32 号、33 号测点在结构面之上,桩 1 和桩 2 为图 1 俯视图中靠下一排的 2 根建筑桩基,桩 2 邻近桩板挡墙,桩 1 离桩板挡墙较远,选取 Wenchuan-Wolong (0.8g)、Sin(0.3g)和 Sin 波(0.7g)3 个工况的试验

结果对建筑桩基的动力响应进行分析。

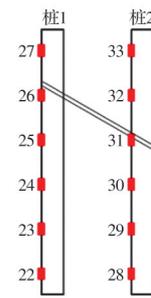


图 25 建筑桩基应变片测点编号

Fig. 25 Test point number of building pile foundation

Wenchuan-Wolong 波(0.8g)作用下建筑桩基的应变时程曲线见图 26。在整个地震波输入期间,建筑桩基应变存在两个明显的峰值,且与 Wenchuan-Wolong 波自身的两个峰值出现时间基本相同,表明建筑桩基的动力响应与地震波的变化规律存在明显对应关系。

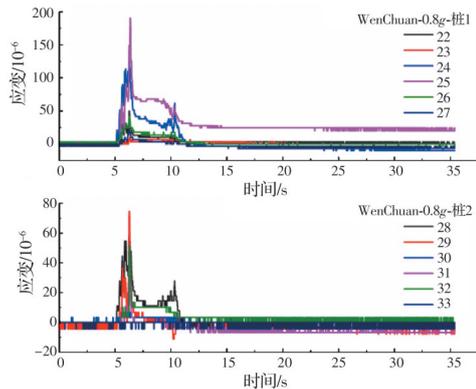


图 26 Wenchuan-Wolong 波(0.8g)对应的建筑桩基应变  
Fig. 26 Strain of building pile foundation corresponding to Wenchuan-Wolong earthquake (0.8g)

Sin 波(0.3g)作用下建筑桩基的应变时程曲线见图 27。地震波输入初期,桩 1、桩 2 应变迅速攀升至峰值然后逐渐减小。其原因可能是地震作用下建筑桩基与滑体逐渐脱开,桩基与滑体之间的不协调变形导致桩基所受荷载降低。分别对桩 1、桩 2 各应变测点进行分析,其中桩 1 的 24 号、25 号测点和桩 2 的 29 号测点的应变响应和变化幅值均大于其余各点,在 Wenchuan-Wolong 波(0.8g)工况中也出现了同样的现象,表明在地震作用下建筑桩基受力最大点出现在结构面以下的位置。造成该现象的原因是在地震作用下,考虑结构面至桩底这一部分,其上部的岩土体变形更大,对桩基的约束作用减弱,因此,在地震工况下,建筑桩基的计算应考虑其嵌固点位置位于结构面以下一定距离。

Sin 波(0.7g)作用下建筑桩基的应变时程曲线见图 28。桩 1 的 24 号点应变值在地震波输入期间

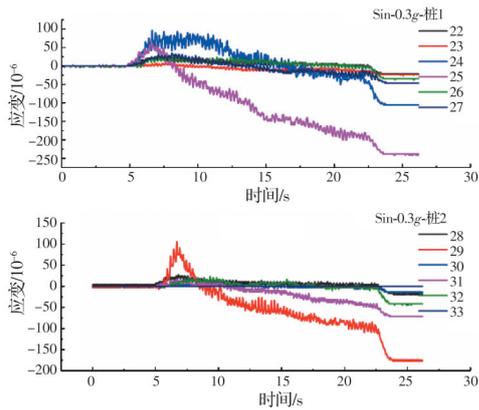


图 27 Sin 波 (0.3g) 对应的建筑桩基应变

Fig. 27 Strain of building pile foundation corresponding to Sin wave (0.3g)

多次正负交替变化,根据实验结束后清理发现的桩 1 折断位置,可知在 Sin 波 (0.7g) 或之前 Sin 波工况作用下桩 1 在 24 号点与 25 号点之间的某处折断。桩 1 折断后,折断位置以上部分的桩继续承担地震荷载,所以邻近折断位置的 25 号点应变存在增大趋势。桩 2 嵌固段的 29 号点和结构面以上的 32 号点应变变化规律不同于 Sin 波 (0.3g) 工况时的情况,两个点的应变在短时间内攀升至峰值之后,略微下降并开始在一定范围内波动,出现该现象的原因是桩 1 折断后,桩 1 原本承担的一部分荷载转移至桩 2 承担。

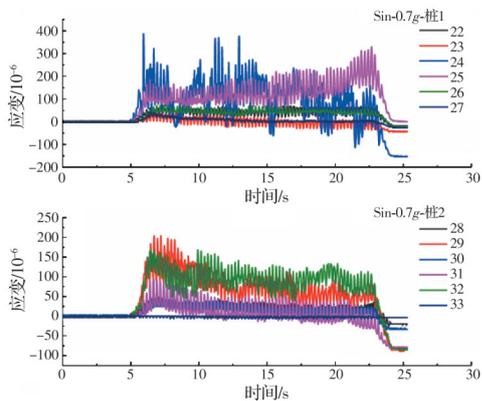


图 28 Sin 波 (0.7g) 对应的建筑桩基动力响应

Fig. 28 Strain of building pile foundation corresponding to Sin wave (0.7g)

综合 3 个工况的分析可知,桩 1、桩 2 应变最大点均位于结构面以下,表明地震作用下桩基嵌固点不应从结构面处开始计算,应考虑其位于结构面以下一定距离。3 个工况中,桩 1 各点应变普遍大于桩 2,说明地震作用下,远离边坡的建筑桩基受力最大,造成这种现象的原因可能是地震作用下滑体前缘结构面处由于剪切破坏产生了较大的变形,地震作用被这一部分的变形削弱,从而使桩 2 在应变响

应上的表现不及桩 1。

各 Wenchuan-Wolong 波工况下建筑桩基各点应变最大值和上下锚索自由段中间测点应变最大值见图 29、图 30 (11 号测点应变片损坏,故只有 2 个点的数据)。在 0.55g 工况之前,建筑桩基各点应变最大值随输入的地震波加速度的增大而增大,在 0.55g 工况时,多点应变最大值存在明显的突增,结合锚索自由段应变数据,可以推断出现该现象的原因可能是在 0.55g 工况前锚索与岩土材料之间没有达到最佳接触状态,当输入 Wenchuan-Wolong 波 (0.55g) 时,锚索重新调整位置以达到最佳接触状态,在这一过程中锚索与桩基之间所受荷载重新分配,从而表现出锚索应变最大值突降,轴力下降,同时建筑桩基应变最大值突增,受荷增大。

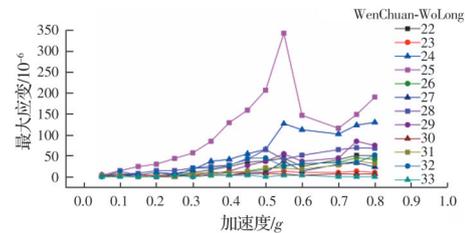


图 29 桩基各点应变随 Wenchuan-Wolong 波幅值变化

Fig. 29 Strain of building pile foundation varies with the amplitude of Wenchuan-Wolong earthquake

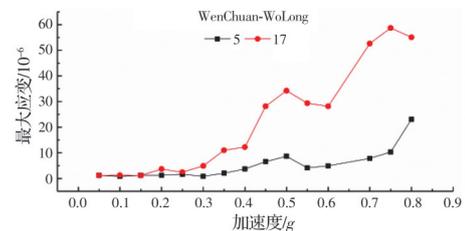


图 30 锚索自由段应变随 Wenchuan-Wolong 波幅值变化

Fig. 30 Strain of anchor cable varies with the amplitude of Wenchuan-Wolong earthquake

各 Sin 波工况下建筑桩基各点最大应变变化曲线见图 31,该阶段下建筑桩基受力最大点由 25 号点转移至 24 号点,反映出在 Sin 波作用下建筑桩基嵌固点有下移趋势。输入 Sin 波 (0.6g) 时,建筑桩基多点应变有突增的现象,尤其是 24 号点增幅明显,而在 Sin 波 (0.7g) 工况下,24 号点最大应变骤降,25 号点应变还在继续增大,由此推断建筑桩基在 Sin 波 (0.6g) 工况下被折断。

## 2.4 边坡加速度动力响应

模型坡顶加速度传感器的布置见图 32。选取 Wenchuan-Wolong 波 (0.8g) 和 Sin 波 (0.3g) 两个典型工况分析模型坡顶峰值加速度动力响应,其余工况将结合加速度放大系数进行综合分析。

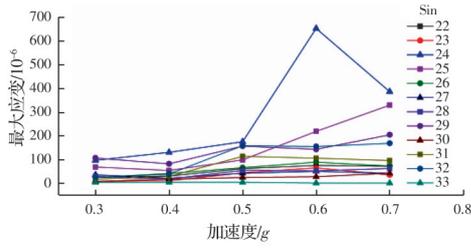


图 31 桩基各点应变随 Sin 波幅值变化

Fig. 31 Strain of building pile varies with the amplitude of Sin wave

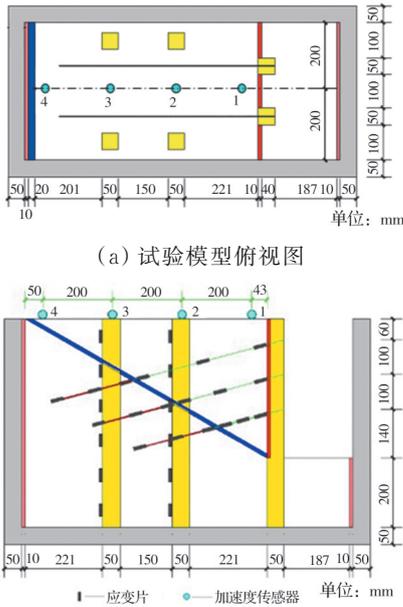


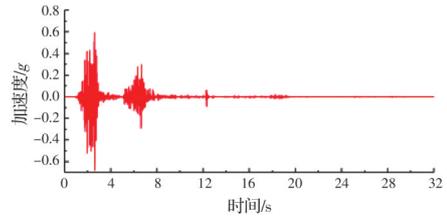
图 32 传感器布置图

Fig. 32 Sensor layout

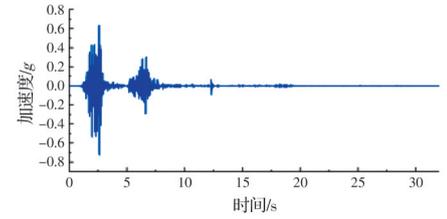
Wenchuan-Wolong 波(0.8g)工况下坡顶 4 个测点的加速时程曲线见图 33,与 Wenchuan-Wolong 波波形图对比可以发现,地震波达到峰值时坡顶加速度动力响应也达到峰值,两者基本同步,除此之外还发现各点加速度峰值均出现在 y 轴负半轴,而地震波峰值出现在 y 轴正半轴。

Sin 波(0.3g)工况下坡顶 4 个测点的加速度时程曲线见图 34,4 个点的加速度动力响应与 Sin 波波形有良好的一致性,反映出模型此时完整性较强,没有损伤或损伤很小。此时,各测点加速度峰值均处于 y 轴正半轴,且正半轴峰值均大于负半轴,表明该工况下坡顶加速度动力响应有正向增大趋势。

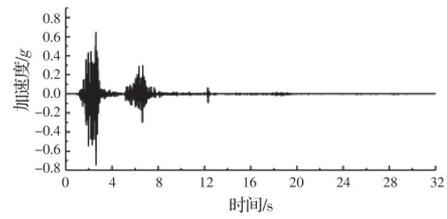
各 Wenchuan-Wolong 波工况下坡顶 4 个测点的峰值加速度变化曲线见图 35,各点峰值加速度随地震波加速度的增大总体表现为线性增大,且各点变化较为一致。在 Wenchuan-Wolong 波(0.55g)工况下,各点峰值加速度有所下降,这是锚索在重新调整位置以与岩土材料达到最佳接触所造成的模型动力响应削弱,在锚索与岩土体达到最佳接触后,



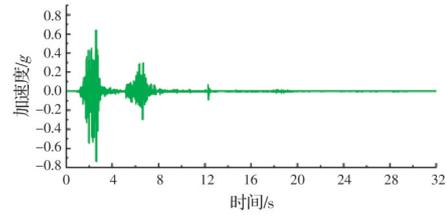
(a) 1号点



(b) 2号点



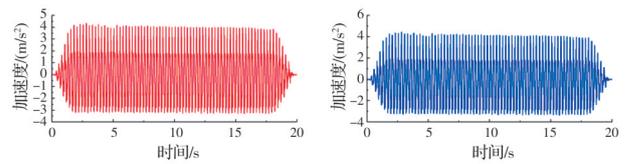
(c) 3号点



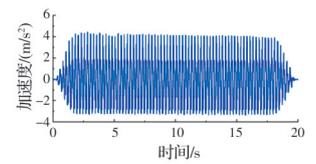
(d) 4号点

图 33 Wenchuan-Wolong 波(0.8g)坡顶加速度时程曲线

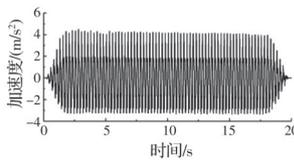
Fig. 33 Acceleration curve of slope corresponding to Wenchuan-Wolong earthquake (0.8g)



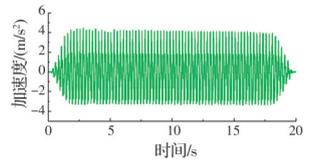
(a) 1号点



(b) 2号点



(c) 3号点



(d) 4号点

图 34 Sin 波(0.3g)坡顶加速度时程曲线

Fig. 34 Acceleration curve of slope corresponding to Sin wave (0.3g)

之后的工况各点峰值加速度继续表现为线性增大,但其变化斜率比 0.55g 之前的工况小。

各 Wenchuan-Wolong 波工况下坡顶 4 个测点的 PGA 放大系数变化曲线见图 36。不难发现在

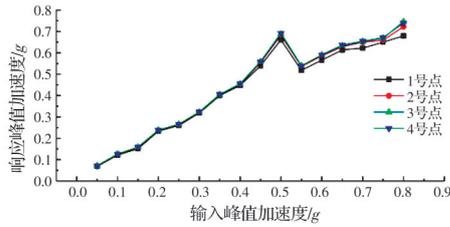


图 35 Wenchuan-Wolong 波对应的各点峰值加速度

Fig. 35 Peak acceleration corresponding to Wenchuan-Wolong earthquake

Wenchuan-Wolong 波作用下,PGA 放大系数并不是单调变化的,而是在  $0.05g \sim 0.2g$ 、 $0.2g \sim 0.35g$ 、 $0.35g \sim 0.5g$  这 3 个范围内存在阶段性地减小再增大,在  $0.5g$  工况之后,PGA 放大系数一直呈现减小的趋势,该变化规律与唐晓松<sup>[24]</sup>等的研究成果相似,由于试验模型由人工堆砌而成,存在分析中反复提到的支护结构与岩土材料之间的接触问题,所以试验比唐晓松等的模型多了 2 个 PGA 放大系数减小再增大的循环过程。在  $0.05g \sim 0.15g$  这 3 个 Wenchuan-Wolong 波工况下,各材料之间互相调整位置达到最佳接触,因此,在  $0.2g$  工况时 PGA 放大系数有所增加,在后续试验中,模型受到地震波持续的激励作用,各材料之间进一步进行调整,于是出现了图 36 表现的 PGA 放大系数出现多个先减小后增大的阶段。

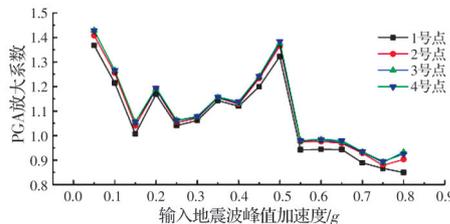


图 36 Wenchuan-Wolong 波对应的各点 PGA 放大系数  
Fig. 36 PGA amplification coefficients corresponding to Wenchuan -WoLong earthquake

各 Sin 波工况下坡顶 4 个测点的加速度及 PGA 放大系数变化曲线见图 37 和图 38。各点峰值加速度总体表现为逐渐增大,在  $0.3g \sim 0.4g$  阶段,测点的峰值加速度增幅缓于后续工况,同时 PGA 放大系数在  $0.4g$  工况有所减小,在后续工况逐渐增大,但

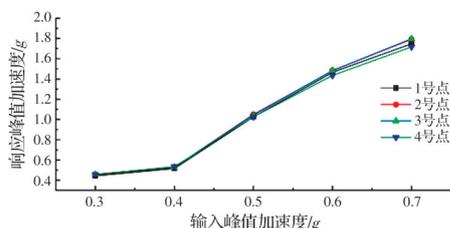


图 37 Sin 波对应的各点峰值加速度

Fig. 37 Peak acceleration corresponding to Sin wave

后续每一工况 PGA 放大系数增量均不及前一工况。

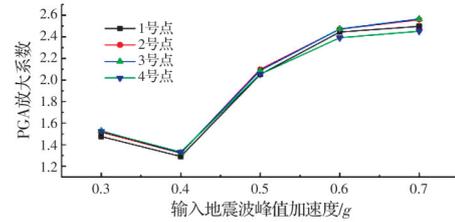


图 38 Sin 波对应的各点 PGA 放大系数

Fig. 38 PGA amplification coefficients corresponding to Sin wave

### 3 结论

开展含建筑桩基的顺层岩质边坡桩锚支护体系振动台模型试验,从预应力锚索应变、建筑桩基应变,边坡加速度地震动力响应 3 个方面进行分析,得出以下结论:

1) 试验锚索自由段未加套管,导致锚索自由段各点轴力不一致,自由段轴力分布规律为,从桩板挡墙处到结构面处轴力逐渐增大;在输入的地震波峰值加速度较小时,各道锚索的轴力大小规律均表现为上锚索 > 中锚索 > 下锚索;随着地震波峰值加速度的增加,上锚索锚固段从基岩拔出,使上锚索失去锚固作用,轴力下降不及中、下锚索,在考虑地震作用时,需对上锚索的设计和施工进行强化。

2) 地震作用下顺层岩质边坡场地建筑桩基嵌固点位于结构面以下一定深度;远离边坡坡面的建筑桩基所受的地震作用更大,邻近边坡的建筑桩基所受的地震作用被其附近岩土材料的变形所削弱;随着输入的地震波峰值加速度的提高,岩土体对建筑桩基的嵌固作用减弱,嵌固点计算位置下移,远离坡面的建筑桩基率先折断,其应变表现为明显的正负交替,所受的荷载一部分转移到邻近坡面的建筑桩基,该处桩基各点应变增大。

3) Wenchuan-Wolong 波作用下边坡坡顶加速度动力响应与地震波输入同步,随输入地震波峰值加速度的增加模型 4 点峰值加速度总体表现为线性增大,但各点 PGA 放大系数不是单调变化,而存在 3 个先减后增的循环过程,该变化规律与前人研究基本相似;Sin 波作用下边坡坡顶加速度动力响应也与地震波输入同步,随输入地震波峰值加速度的增加,模型 4 点峰值加速度总体呈现增大趋势,PGA 放大系数在  $0.4g$  工况下有所减小,后续逐渐增大,但增长率有所放缓。

4) 预应力锚索、建筑桩基与边坡是相互关联、相互影响的。Wenchuan-Wolong 波 ( $0.55g$ ) 工况

下,锚索锚固段与岩土体产生相对滑动以达到最佳接触,锚索自由段5号点、17号点应变突然下降,同时建筑桩基各测点应变突增,边坡坡顶峰值加速度、PGA放大系数骤降,表明了体系间各部分是相互影响、相互作用的。

### 参考文献

- [1] 冯君. 顺层岩质边坡开挖稳定性及其支护措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.  
FENG J. Study on stability and support of consequent bedding rock slope [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese)
- [2] 朱赛楠, 殷跃平, 李滨. 大型层状基岩滑坡软弱夹层演化特征研究: 以重庆武隆鸡尾山滑坡为例[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1638-1647.  
ZHU S N, YIN Y P, LI B. Evolution characteristics of weak intercalation in massive layered rockslides—A case study of Jiweishan rockslide in Wulong, Chongqing [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26(6): 1638-1647. (in Chinese)
- [3] 汤涌. 汶川大地震边坡工程设施震害分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
TANG Y. Seismic damage analysis of slope engineering facilities in Wenchuan earthquake [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [4] 曲宏略, 张建经, 杨长卫. 边坡挡土结构的抗震机理与设计理论[M]. 北京: 科学出版社, 2016.  
QU H L, ZHANG J J, YANG C W. Seismic mechanism and design theory of slope retaining structure [M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)
- [5] GUO D P, HAMADA M. Lessons learnt from seismic damage induced by the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 226/227/228: 889-896.
- [6] 李海波, 肖克强, 刘亚群. 地震荷载作用下顺层岩质边坡安全系数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2385-2394.  
LI H B, XIAO K Q, LIU Y Q. Factor of safety analysis of bedding rock slope under seismic load [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2385-2394. (in Chinese)
- [7] 吴永, 何思明, 罗渝. 震后暴雨型岩质滑坡启动机理[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 135-139.  
WU Y, HE S M, LUO Y. Failure mechanism of post-earthquake rock landslide under rainfall [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 135-139. (in Chinese)
- [8] MATHEWS N, LESHCHINSKY B A, OLSEN M J, et al. Spatial distribution of yield accelerations and permanent displacements: A diagnostic tool for assessing seismic slope stability [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 126: 105811.
- [9] FAN G, ZHANG L M, ZHANG J J, et al. Time-frequency analysis of instantaneous seismic safety of bedding rock slopes [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2017, 94: 92-101.
- [10] 言志信, 张森, 张学东, 等. 顺层岩质边坡地震动力响应及地震动参数影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(Sup2): 3522-3528.  
YAN Z X, ZHANG S, ZHANG X D, et al. Study of dynamic response of bedding rock slope under earthquake and influence of ground motion parameters [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(Sup2): 3522-3528. (in Chinese)
- [11] 高乐. 地震耦合作用下顺层岩质边坡动力响应研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.  
GAO L. Study on dynamic response of bedding rock slope under coupling earthquakes [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)
- [12] 李祥龙, 唐辉明, 王立朝. 顺层岩体边坡地震动力破坏离心机试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(4): 729-736.  
LI X L, TANG H M, WANG L C. Centrifuge modelling tests on dynamic failure of bedding rock slopes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(4): 729-736. (in Chinese)
- [13] DENG Z Y, LIU X R, LIU Y Q, et al. Model test and numerical simulation on the dynamic stability of the bedding rock slope under frequent microseisms [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2020, 19(4): 919-935.
- [14] 曾德荣, 李霖. 抗滑桩锚索联合体系特性研究[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(2): 78-82.  
ZENG D R, LI L. Study of the property of structure combined prestressing cables with drilling piles [J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 2001, 20(2): 78-82. (in Chinese)
- [15] 曾云华, 郑明新. 预应力锚索抗滑桩的受力模型试验[J]. 华东交通大学学报, 2003, 20(2): 15-18.  
ZENG Y H, ZHENG M X. Force distribution rule of retaining piles with prestressing cables [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2003, 20(2): 15-18. (in Chinese)
- [16] XU M, TANG Y F, LIU X S, et al. A shaking table model test on a rock slope anchored with adaptive anchor cables [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 112: 201-208.
- [17] HUANG Y, XU X, LIU J J, et al. Centrifuge modeling of seismic response and failure mode of a slope reinforced by a pile-anchor structure [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2020, 131: 106037.

- [18] QU H L, LUO H, HU H G, et al. Dynamic response of anchored sheet pile wall under ground motion: analytical model with experimental validation [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2018, 115: 896-906.
- [19] 张国军, 孙博. 基于地震作用的预应力锚索抗滑桩边坡加固应用优化研究[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(9): 148-153.  
ZHANG G J, SUN B. Seismic action-based study on optimization of application of anti-slide pile with prestressed anchor cable to slope reinforcement [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50(9): 148-153. (in Chinese)
- [20] 赖杰, 郑颖人, 方玉树, 等. 预应力锚索支护边坡地震作用下动力响应研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(Sup2): 1768-1773.  
LAI J, ZHENG Y R, FANG Y S, et al. Analysis on dynamic performance of slope supported with prestressed anchorage cable under earthquake [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2011, 7(Sup2): 1768-1773. (in Chinese)
- [21] 贾志波, 陶连金, 史明. 地震作用下预应力锚索边坡的稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2020, 41(11): 3604-3612, 3631.  
JIA Z B, TAO L J, SHI M. Stability analysis of prestressed anchor cable slope under seismic loads [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(11): 3604-3612, 3631. (in Chinese)
- [22] 杨泽君. 锚拉式桩板挡墙结构的地震易损性与安全风险研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.  
YANG Z J. Study on seismic fragility and safety risk of anchored sheet pile retaining wall [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019. (in Chinese)
- [23] 刘贵. 预应力锚索加固边坡动力稳定性分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.  
LIU G. The stability analysis of slope which reinforced by prestressed anchor cables under seismic action [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [24] 唐晓松, 王永甫, 赖杰. 地震边坡稳定性分析与抗震设计[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2016.  
TANG X S, WANG Y F, LAI J. Stability analysis and seismic design of seismic slope [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 2016. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)