

DOI: 10.11779/CJGE201606017

# 双排桩加预应力锚索加固边坡锚索轴力 地震响应特性研究

范 刚<sup>1, 2</sup>, 张建经<sup>\*1, 2</sup>, 付 晓<sup>1, 2</sup>, 吴金标<sup>1, 2</sup>, 田 华<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学土木学院岩土工程系, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031;  
3. 核工业西南勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610061)

**摘 要:** 利用大型振动台, 设计并进行了双排抗滑桩加预应力锚索加固边坡的模型试验, 试验结果表明: 锚索轴力的变化体现了坡体稳定性发展过程, 小震作用下锚索并未开始工作, 在地震的扰动下所有锚索均出现预应力损失。随着输入地震波强度增大, 坡肩部分出现局部失稳, 锚索开始受力导致轴力增加, 直至边坡整体出现失稳趋势, 所有锚索均开始受力引起轴力增加, 随后边坡与锚索形成新的平衡体系。在新的平衡体系下, 锚索轴力在地震扰动作用下继续降低。试验中最大锚索预应力损失比例为 16.28%, 因此锚索预应力施加初始值应为设计值的 1.2 倍左右。坡腰抗滑桩以上#2 锚索动态响应峰值较大, 坡腰抗滑桩与坡脚抗滑桩之间 7 号锚索轴力动态响应峰值较大, #4, #5, #6 号锚索轴力动态响应峰值随高程增加而增大。同一工况下坡面所有锚索轴力的动态响应峰值出现时间接近, 且锚索轴力的动态响应峰值出现时间随着输入地震波强度的增大而提前, 锚索轴力动态响应峰值出现时间在激励地震波的峰值时间附近。在预应力锚索抗震设计时应采用“分区设计”的思想, 即根据不同区域内锚索的动态响应特征对边坡拟加固区域进行锚索设计分区, 在不同分区内做针对性的锚索设计。

**关键词:** 锚索; 预应力损失; 动态响应; 边坡; 振动台试验

中图分类号: TU413

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)06-1095-09

**作者简介:** 范 刚 (1987-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土工程抗震方面的研究。E-mail: fg113112@126.com。

## Axial force of anchor cables in slope reinforced by double-row anti-slide piles and pre-stressed anchor cables

FAN Gang<sup>1, 2</sup>, ZHANG Jian-jing<sup>1, 2</sup>, FU Xiao<sup>1, 2</sup>, WU Jin-biao<sup>1, 2</sup>, TIAN Hua<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Southwest Jiaotong University, Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Ministry of Education, Chengdu 610031; 3. Southwest Geotechnical & Design Institute of China Nuclear Industry, Chengdu 610061)

**Abstract:** A large scale shaking table test on slope reinforced by double-row anti-slide piles and pre-stressed anchor cables is designed. The results show that change of axial force of anchor cables reflects the development of slope stability. Under the effect of small earthquake, the anchor cables do not start to work, and with the disturbance of earthquake, the prestress of pre-stressed anchor cables decreases. When the amplitude of input earthquake increases, because of the local instability in slope shoulder part, the anchor cables will begin to bear load and the axial force increases until the whole slope has instability trend. Under this condition, all the anchor cables will start to bear load and axial force increase, then a new balance will be developed and due to the disturbance of earthquake, the prestress of all anchor cables will continue to decrease in the new balance. In the test, the maximum prestress loss ratio is 16.28%, so the initial prestress value should be 1.2 times the designed value. In the part over the middle anti-slide pile, the peak value of dynamic response of anchor cable No. 2 is the largest. In the part between middle anti-slide pile and anti-slide pile in the toe of slope, the peak value of dynamic response of anchor cable No. 7 is the largest, and the peak values of anchor cables, No. 4, 5, 6 increase with the increasing elevation. Under the same loading condition, the occurrence time of peak of dynamic response value of all anchor cables is close, and it will be shorter when the input seismic wave amplitude increases. It is near that of input seismic wave. In the design process of pre-stressed anchor cables, the idea of zoning should be adopted, that is to say, the

基金项目: 交通运输部建设科技项目 (2013318800020); 国家重点基础研究发展计划 (“973” 计划) 项目 (2011CB013605)

收稿日期: 2015-04-22

\*通讯作者

design of the pre-stressed anchor cables in different zones should be based on the different dynamic response laws.

**Key words:** anchor cable; prestress loss; dynamic response; slope; shaking table test

## 0 引言

预应力锚索作为一种常见的边坡加固措施,因其经济节约、施工快捷等优点,已被广泛运用于工程的加固治理<sup>[1-3]</sup>。目前,静力作用下预应力锚索的研究较多<sup>[4-8]</sup>,但地震作用下预应力锚索抗震性能的研究较少。苏华友等<sup>[9]</sup>研究了施工开挖期岩石开挖爆破震动对紫坪铺工程引水发电洞进水口高陡边坡预应力锚索的影响;杨苏杭等<sup>[10]</sup>分析了爆破荷载下锚索的动态响应特性,但是爆破震动与地震存在本质差别,相关研究成果尚无法运用到预应力锚索的抗震设计中。叶海林等<sup>[11]</sup>对地震作用下单排抗滑桩加预应力锚索加固边坡进行了振动台试验研究。但是,当滑坡下滑力较大,单排抗滑桩加预应力锚索无法保证滑坡的稳定时,往往采用双排抗滑桩加预应力锚索对滑坡进行加固支护。关于双排抗滑桩加预应力锚索加固边坡时预应力锚索的抗震设计方法、锚索轴力动态响应特征等方面的研究仍鲜见报端,有待进一步的研究<sup>[12]</sup>。振动台是研究工程构筑物地震响应最直接的方法,本文利用大型振动台模型试验,对双排抗滑桩加预应力锚索加固边坡时预应力锚索轴力的动态响应特征、预应力变化及不同位置预应力锚索动态响应同步性进行详尽分析,并对预应力锚索加固边坡提出设计建议。

## 1 工程概况

### 1.1 基本情况

该边坡原型为某重点工程边坡,雨季期间边坡后缘开始出现裂缝,雨季结束后滑坡向北西方向滑动,滑坡体移动速度为1~2 mm/d。受滑坡体挤压影响,坡体下部场地局部已砌护完成的人工边坡遭到了一定破坏。

### 1.2 工程地质条件

滑坡平面上呈圈椅状,高度150 m左右,地形坡角约为38°,滑坡体体积约 $47.8 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,属中型滑坡,滑移方向为347°,为推移式滑坡。

滑坡范围内出露地层为第四系和志留系(基岩)。第四系主要为冲坡积层和坡残积层,以黏土、粉质黏土、碎石夹黏土、块石为主,厚度3.8~16.5 m;基岩主要为志留系下统龙马溪组二段( $S_1ln^2$ )的泥质页岩。滑带土为薄层软塑一流塑状含碎石粉质黏土。滑坡体范围内不断裂构造和褶皱构造,存在的构造主要为层理和节理裂隙。

### 1.3 水文地质条件

滑坡区域无常年存在的地表水,滑坡范围内地下水可划分为第四系孔隙水和基岩裂隙水两大类型。第四系孔隙潜水的主要补给来源为大气降水和基岩裂隙水,地下水的排泄途径除蒸发外,还有径流、下降泉等方式。水位受季节影响明显,在春夏季水位较高,秋冬季水位较低。

基岩裂隙水赋存于岩体裂隙中,在覆盖层较薄地段,基岩裂隙水直接受大气降水补给,覆盖层较厚地段,地下水主要接受侧向补给及上部第四系孔隙水的少量补给。基岩裂隙水以向沟谷低凹处排泄为主要方式,在地形发生变化或遇隔水层时,以泉的形式出露地表。

滑坡体稳定水位最大为13.30 m,平均埋深约5 m。

## 2 试验概况

### 2.1 试验设备

试验在中国核动力研究设计院的大型地震模拟试验台上进行,该振动台拥有6个自由度,包括3个平动自由度和3个转动自由度,台面尺寸6 m×6 m,最大负载600 kN,水平向最大位移±150 mm,垂直向最大位移±100 mm。满载时水平向最大加速度1g,垂直向0.8g,空载时水平向最大加速度3g,垂直向2.6g,频率范围0.1~80 Hz。试验模型箱内空尺寸为3.5 m×1.5 m×2.5 m(长×宽×高)。

### 2.2 试验模型及传感器布置

试验模型及传感器布置如下图1所示。试验边坡模拟材料根据室内试验确定的配合比现场搅拌,试验材料质量配比为河砂:黏土:石膏:水:重晶石粉=5:3:2.5:1.4:4。潜在滑动面材料采用原型边坡泥化夹层原样经室内重塑得到。试验模型采用分层制作的方法,模型分层制作时每一层的厚度为20 cm,每一层模型制作完成并在表面打毛之后再制作下一层模型。模型的制作过程由模拟材料密度控制,即根据密度来确定制作每一层模型时所需的材料用量。

模型边坡由双排抗滑桩加预应力锚索进行加固,为方便测试元件安装,锚索采用薄铁片模拟。试验模型中共设置七排预应力锚索,按#1~#7自上而下进行编号,每排3根锚索,其中每排中间一根锚索为监测锚索。两排抗滑桩之间四排,坡腰抗滑桩以上3排,相邻锚索水平间距25 cm,垂直间距如图1所示。锚索锚固段均深入边坡最深潜在滑动面以下,锚固段长

8 cm, 锚固角度为 20°。试验模型箱及震动台面如图 2 所示, 图 3 为制作完成的试验模型。

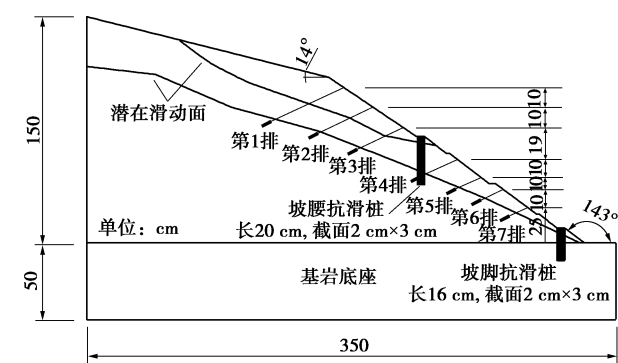


图 1 试验测点布置剖面图  
Fig. 1 Layout of measuring points



图 2 试验模型箱及震动台面  
Fig. 2 Test box and shaking table



图 3 制作完成的试验模型  
Fig. 3 Test model

在边坡砌筑过程中利用 PVC 管预留锚索施工孔, 如下图 4 所示。边坡模型砌筑完成后在预留孔内放入锚索, 锚索锚固段 (长度 8 cm) 已提前预制, 如下图 5 所示。之后拔出 PVC 管, 在预留孔内锚固段周围填入含水率为 10% 的河砂, 按一定夯击次数将锚固段周

围砂子夯实, 夯击次数由现场抗拔试验确定, 夯击完成后整个锚索锚固段均被砂子包裹, 锚索自由端处于自由悬空状态。



图 4 预留锚索施工孔  
Fig. 4 Pre-reserved construction holes for anchor cables



图 5 预制的锚索  
Fig. 5 Prefabricated anchor cable

试验模型中锚索抗拔力根据原型边坡锚索抗拔力设计值经相似比折算后得到。在锚索端头连接螺杆和轴力计, 将螺杆上的螺帽与格构梁刚性连接, 通过旋转螺杆上的螺帽对锚索施加预应力并利用动态数据采集仪对锚索轴力进行实时监测, 预应力施加过程根据轴力监测数据进行控制。预应力施加目标值由原型边坡锚索预应力设计值确定。

两排抗滑桩分别位于坡脚和坡腰, 截面尺寸为 2 cm x 3 cm, 坡脚抗滑桩长为 16 cm, 坡腰抗滑桩长为 20 cm, 抗滑桩采用有机玻璃进行模拟。根据经相似比折减后的格构梁抗弯刚度, 选择 PVC 板模拟格构梁。

试验模型制作完成后取样测定边坡及泥化夹层的物理力学参数, 如表 1 所示。试验中, 在地震波水平加载方向试验模型与模型箱之间铺设厚度为 5 cm 的塑料泡沫以模拟吸波材料, 减轻反射波对试验精度的影响<sup>[13]</sup>。

根据相似理论<sup>[14]</sup>, 选取几何尺寸、密度和加速度作为相似比推算控制量, 确定几何尺寸相似比为 100, 密度相似比为 1, 加速度相似比为 1, 推导得到其余物理量相似常数如表 2 所示。

表 1 试验模型参数

Table 1 Model parameters					
材料	密度	弹模	内摩擦角	黏聚力 $c$	泊松比
	$\rho /(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$E/\text{MPa}$	$\varphi /(^{\circ})$	$/\text{kPa}$	$\nu$
边坡模型	2.5	9.8	40	6	0.25
基岩底座	2.7	10.1	42	7.4	0.25
泥化夹层	1.8	0.012	12	0.75	0.25
抗滑桩	2.7	301	按弹性材料处理		0.20
锚索	2.5	290	按弹性材料处理		0.20

表 2 试验相似常数

Table 2 Similarity constants									
物理量	密度	加速度	尺寸	时间	弹模	频率	内摩擦角	黏聚力	作用力
相似比	1	1	100	10	100	0.1	1	100	1000000

2.3 加载工况

试验中输入的加载波形为按照时间相似率压缩处理之后的汶川地震清平波和 El Centro 地震波,经归一化和时间轴压缩后的水平方向清平波和 El Centro 地震波如下图 6,7 所示。试验中地震波采用双向输入,输入方向分别为垂向和边坡倾向方向,试验加载工况如表 3 所示。

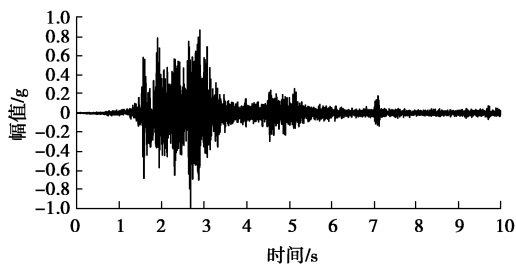


图 6 汶川地震清平波

Fig. 6 Qingping seismic wave of Wenchuan Earthquake

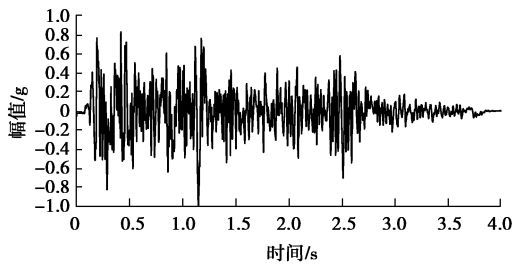


图 7 El Centro 波

Fig. 7 El Centro seismic wave

3 试验结果分析

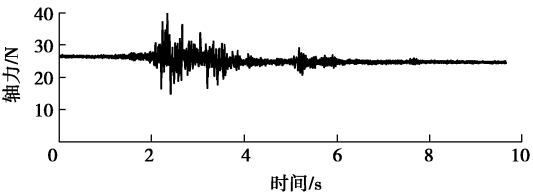
3.1 锚索轴力时程分解方法

0.7g 清平波作用下#1~#7 锚索轴力时程如下图 8 所示,可以看出轴力时程与输入加速度时程具有类似

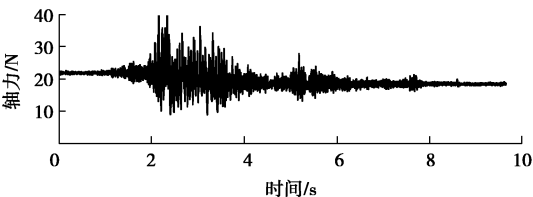
的形态。

表 3 试验加载工况表

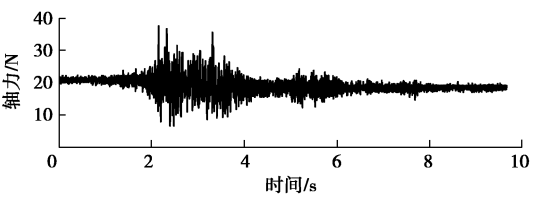
Table 3 Loading conditions					
工况	波形	幅值 /g	工况	波形	幅值 /g
1	白噪声	0.05	6	El Centro 波	0.33
2	清平波	0.15	7	白噪声	0.05
3	El Centro 波	0.15	8	清平波	0.50
4	白噪声	0.05	9	El Centro 波	0.50
5	清平波	0.33	10	白噪声	0.05
			11	清平波	0.70
			12	El Centro 波	0.70
			13	白噪声	0.05
			14	清平波	0.90
			15	El Centro 波	0.90



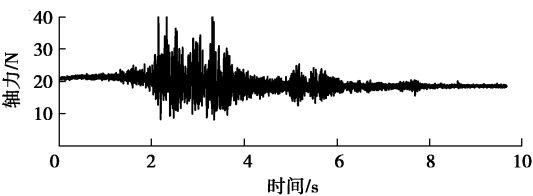
(a) #1锚索



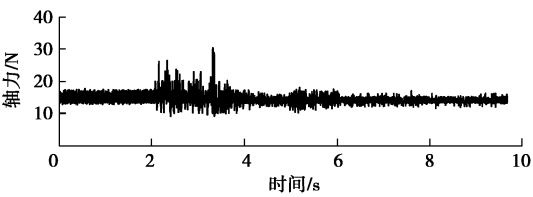
(b) #2锚索



(c) #3锚索



(d) #4锚索



(e) #5锚索

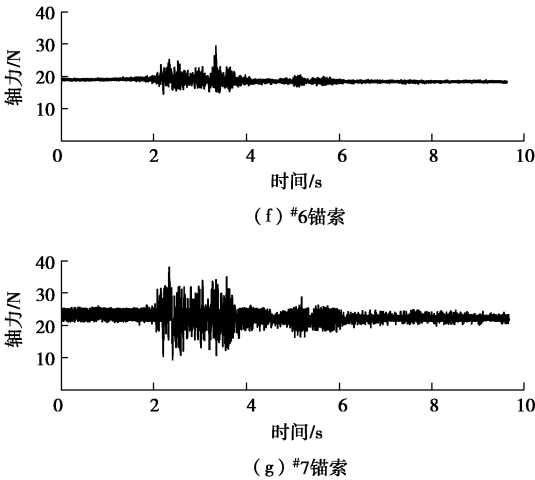


图 8 0.70g 清平波作用下#1~#7 号锚索轴力时程

Fig. 8 Time history of axial force of anchor cables No. 1~7 under 0.70g Qingping seismic wave

试验中实测锚索轴力时程包含了“基线”及“震荡”两个部分, 利用“滑动平均法”可以将锚索轴力时程分解为“基线”和“震荡”两部分, 如图 9 所示。“基线”是在地震作用下锚索轴力整体的变化趋势, 其可以作为判定地震作用前后锚索轴力变化的依据; 而“震荡”是锚索轴力在地震作用下的动态响应曲线, 其数值在 0 上下波动, 表征了地震作用下锚索轴力的动态变化。

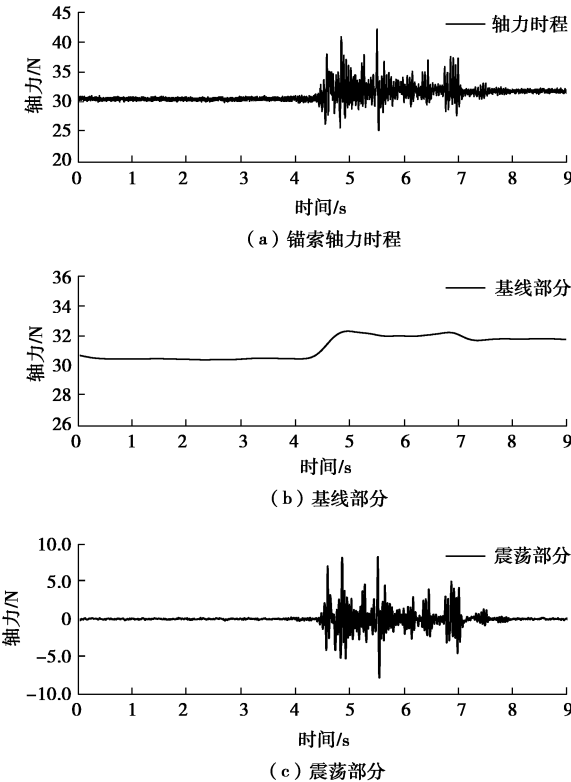


图 9 滑动平均法分解结果

Fig. 9 Decomposition results

3.2 轴力基线分析

试验前对锚索施加 30 N 的预应力, 在每一次地震波激励前锚索已经处于一定的受力状态。根据前文介绍的“滑动平均法”分解得到所有工况下各个锚索轴力的基线。定义锚索轴力变化值为基线初始值减去基线终点值, 因试验过程中预应力锚索轴力不断发生变化, 每一个工况锚索轴力初始值均不同, 因此试验结果中锚索轴力变化值可比性不强。本文采用锚索轴力变化幅度进行分析, 定义锚索轴力变化幅度为轴力变化值与基线起始值的比值, 锚索轴力变化幅度为正说明锚索轴力减小, 出现了预应力损失, 锚索轴力变化幅度为负说明地震作用后锚索轴力增加。不同幅值地震波作用下锚索轴力变化如下表 4, 5 所示, 各个锚索轴力基线变化幅度如图 10, 11 所示。

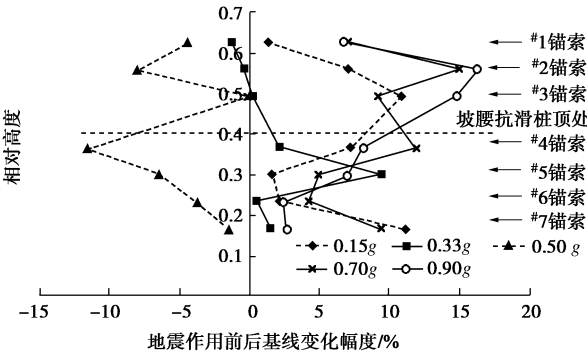


图 10 清平波作用下锚索轴力基线变化幅度

Fig. 10 Change of baseline amplitude of axial force under Qingping seismic wave

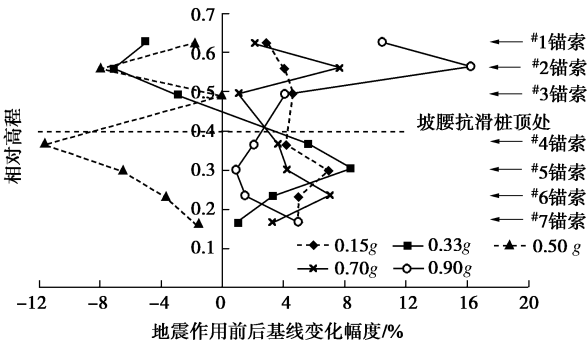


图 11 El Centro 地震波作用下锚索轴力基线变化幅度

Fig. 11 Change of baseline amplitude of axial force under El Centro seismic wave

锚索轴力时程基线部分表征了锚索轴力在地震作用下的整体变化情况, 可以体现锚索轴力总体水平在地震作用过程中的波动状态。对比图 10, 11 可以看出, 清平波和 El Centro 波作用下锚索轴力基线变化幅度具有类似的变化规律。以清平波为例, 0.15g 地震作用下, 7 根锚索轴力均减小, 说明锚索出现预应力损失。0.33g 地震作用下, 顶部#1、#2 锚索轴力增大 (图 11

表 4 汶川清平波作用前后锚索轴力预应力初始值及残余值  
Table 4 Initial and residual values of anchor pre-stress before and after action of Qingping wave (N)

相对高度	锚索编号	0.15g		0.33g		0.50g		0.70g		0.90g	
		初始值	残余值	初始值	残余值	初始值	残余值	初始值	残余值	初始值	残余值
0.63	#1	29.7	29.3	31.5	31.9	31.0	32.4	26.5	24.6	19.1	17.8
0.56	#2	24.1	22.4	23.1	23.2	22.1	23.9	22.1	18.8	19.1	16.0
0.49	#3	22.3	19.9	20.6	20.5	20.7	20.7	20.5	18.6	18.7	15.9
0.37	#4	22.6	21.0	19.5	19.1	20.9	23.3	20.8	18.3	19.0	17.5
0.30	#5	13.4	13.2	11.2	10.1	12.6	13.4	15.7	14.9	16.7	15.5
0.23	#6	19.0	18.6	18.3	18.2	18.5	19.2	19.3	18.5	18.1	17.7
0.17	#7	21.0	18.7	15.6	15.4	18.8	19.1	23.9	21.7	21.5	20.9

表 5 El Centro 地震波作用前后锚索轴力预应力初始值及残余值  
Table 5 Initial and residual values of anchor pre-stress before and after action of El Centro wave (N)

相对高度	锚索编号	0.15g		0.33g		0.50g		0.70g		0.90g	
		初始值	残余值	初始值	残余值	初始值	残余值	初始值	残余值	初始值	残余值
0.63	#1	35.0	34.0	30.7	32.3	31.0	31.6	27.6	27.0	21.2	19.0
0.56	#2	24.9	23.9	21.5	23.0	22.1	23.9	24.5	22.6	23.6	19.8
0.49	#3	21.7	20.7	19.4	20.0	20.7	20.7	21.6	21.4	19.9	19.1
0.37	#4	24.3	23.3	20.4	19.2	20.9	23.3	22.7	21.9	19.8	19.4
0.30	#5	14.4	13.4	11.3	10.3	12.6	13.4	15.7	15.0	16.5	16.4
0.23	#6	20.2	19.2	19.3	18.7	18.5	19.2	20.5	19.1	18.2	17.9
0.17	#7	20.1	19.1	18.7	18.5	18.8	19.1	23.0	22.3	25.3	24.0

中, El Centro 波作用下#1, #2, #3 锚索轴力增大), 表明此时坡肩附近开始出现下滑趋势, #1, #2 两根锚索(或 El Centro 波作用下#1, #2, #3 三根锚索)开始承受坡体下滑力, 而同时其余 5 根(或 4 根)锚索附近坡体稳定, 在地震作用下轴力进一步损失。0.50g 地震作用下, 7 根锚索轴力均增大, 表明此时整个坡体在地震作用下出现了滑动的趋势, 7 根锚索均开始承担坡体的下滑力, 抵抗坡体的变形。0.70g 和 0.90g 地震作用下 7 根锚索轴力均又减小, 此时滑体、预应力锚索之间又形成了新的力学平衡, 边坡又暂时处于稳定状态, 同时在地震作用下预应力锚索轴力又出现损失。所有工况加载完成后, 预应力锚索的最大预应力损失比例为 16.29% (清平波作用下), 因此, 建议锚索预应力施加初始值应达到设计值的 1.2 倍左右。

综上, 在小幅值地震波作用下, 由于边坡的自稳作用, 预应力锚索并不发挥作用, 反而因为地震对系统的扰动导致预应力锚索出现预应力损失<sup>[15]</sup>。当地震强度进一步增大, 坡肩出现滑动破坏趋势, 激发该区域的预应力锚索开始抵抗坡体下滑力, 锚索轴力增大, 同时, 未出现滑动趋势的区域内锚索轴力进一步损失。当地震强度达到一定程度, 整个坡体出现滑动破坏趋势, 所有锚索全部开始抵抗坡体变形, 轴力均出现不同幅度的增大, 随后边坡达到新的平衡状态, 在更大

幅值的地震作用下, 预应力锚索轴力又出现新一轮的损失。锚索轴力变化过程反映了坡体稳定性的发展过程。

3.3 动态峰值响应分析

选取锚索轴力时程震荡部分的峰值进行分析, 该峰值为锚索轴力的动态响应峰值。#1~#7 锚索的动态响应峰值如图 12, 13 所示。

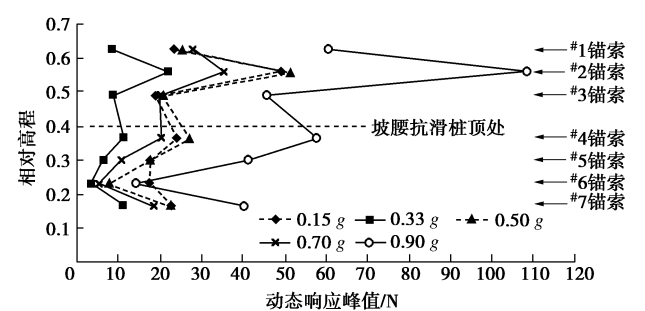


图 12 清平波作用下锚索轴力动态响应峰值  
Fig.12 Peak value of dynamic response of axial force under Qingping seismic wave

从图 12, 13 可以看出, 不同地震波作用下, 虽然锚索轴力动态响应峰值存在差别, 但是沿高程的变化规律相同。以清平波为例, 坡腰抗滑桩上部的#1、#2、#3 锚索中, #1、#3 锚索轴力的动态响应峰值接近, #2



锚索轴力的动态响应峰值最大, #2 锚索轴力动态响应峰值与#1、#3 锚索的倍数关系如下图 14 所示。图 14 中曲线表明, 随着输入地震波幅度的增大, #2 锚索轴力与#1、#3 的倍数关系先增大后减小, 0.50g 时最大, 说明#2 锚索的工作性能在 0.50g 地震波以前随输入地震波幅值的增大而增强, 此阶段锚索处于良好的工作阶段, 0.70g 和 0.90g 地震波作用下, 因地震波的反复扰动作用, 预应力锚索的抗震性能降低, #2 锚索与#1、#3 锚索之间轴力动态响应峰值差距减小。

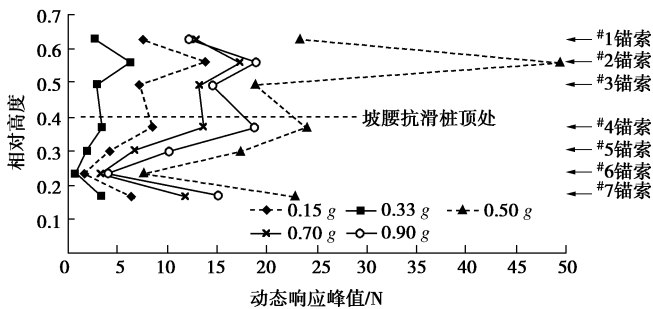


图 13 El Centro 地震波作用下锚索轴力动态响应峰值

Fig. 13 Peak value of dynamic response of axial force under El Centro seismic wave

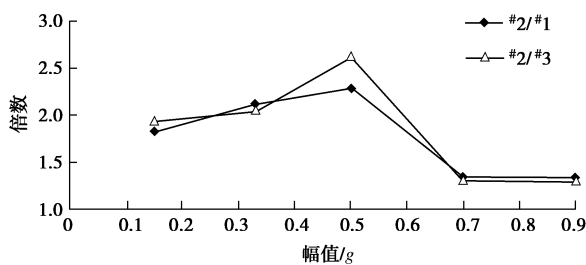


图 14 #2 锚索轴力动态响应峰值与#1、#3 的倍数关系

Fig. 14 Multiple relationship of peak values of dynamic response of axial force between anchor cables No.2 and No.1, No.3

坡脚抗滑桩与坡腰抗滑桩之间的#4~#7 锚索中, 随着高程的降低, #4~#6 锚索轴力的动态响应峰值逐渐降低, 但是坡脚附近#7 锚索轴力的动态响应峰值较#6 锚索出现突增, 且#7 锚索轴力的动态响应峰值与#4 接近。

对比分析坡腰抗滑桩上下#3 和#4 锚索的动态响应峰值发现, 坡腰抗滑桩上部#3 锚索轴力动态响应峰值略小于坡腰抗滑桩下部#4 锚索, 说明坡腰抗滑桩的存在影响了临近的锚索受力状态, 抗滑桩上下附近锚索具有不一样的受力响应特征。

综合上述分析发现, 坡脚与坡腰抗滑桩之间区域以及坡腰抗滑桩以上区域锚索轴力的动态响应峰值随高程的变化规律差别较大。坡脚与坡腰抗滑桩之间位于坡脚的#7 锚索轴力动态响应峰值较大, #4~#6 锚索

轴力动态响应峰值随着高程的增加而增大, 高程最大的#4 锚索轴力动态响应峰值与#7 锚索接近。坡腰抗滑桩以上, #2 锚索轴力动态响应峰值最大, #1、#3 基本相等。分析#2 锚索和#7 锚索动态响应峰值较大的原因如下: 坡脚抗滑桩抵抗了边坡沿原有潜在滑动面剪切滑出的趋势, 导致原有潜在滑动面的剪出口上移, 在原有剪出口上部薄弱部位形成新的潜在滑动面和剪出口, 推测新的剪出口位于#7 锚索附近, 因此, 在地震作用下#7 锚索需承担更大的下滑力, 导致#7 锚索轴力的动态响应峰值较大。同理, 在坡腰抗滑桩上部, 坡腰抗滑桩的存在抑制了上部坡体沿浅表潜在滑动面剪出破坏的趋势, 剪出口上移, 但是由于#3 锚索距离坡腰抗滑桩较近, 新的剪出口位置移动至#3 锚索上部, #2 锚索附近, 所以#2 锚索轴力的动态响应峰值较大。

由于受试验条件限制, 试验模型经输入地震波反复激励后, 在每一个工况加载前锚索的初始工作状态并不相同。因此, 不同位置处锚索轴力的动态响应峰值与输入地震波幅值之间并无明显的关系。

值得注意的是, 锚索的动态响应峰值与边坡的变形或位移直接相关。图 12, 13 表明, #2 锚索动态响应峰值最大, #6 最小。结合坡面锚头的位移监测数据, #2 锚索的锚头位移在坡腰抗滑桩上部#1~#3 锚索中局部最小, 而#6 锚索的锚头位移在#4~#7 锚索中局部最大。锚索动态响应峰值较大表明锚索工作性能优异, 限制了边坡的动态响应, 坡面位移较小, 反之, 坡面位移较大。

### 3.4 锚索动态响应同步性分析

不同幅值清平地震波作用下锚索轴力的动态响应峰值出现时间如下图 15 所示。从图中可知, 在同一工况下, 7 根锚索轴力的动态响应峰值出现时间十分接近, 即 7 根锚索几乎在同一时刻取得轴力动态响应峰值。随着输入地震波幅值的增大, 锚索轴力的动态响应峰值出现时间缩短, 0.15g 地震作用下峰值出现时间约为 2.7 s, 0.90g 地震作用下峰值出现时间约为 2.0 s。时间轴经相似比压缩处理后的清平波水平向第一峰值出现在 1.87 s, 第二峰值出现在 2.66 s, 垂直方向第一峰值出现在 1.90 s, 第二峰值出现在 2.90 s, 可见锚索轴力动态响应峰值出现时间与输入地震波峰值出现时间相近。

### 3.5 桩背土压力分析

汶川地震波作用下抗滑桩受荷段的土压力峰值分布如图 16, 17 所示。

当输入地震波峰值为 0.15g 时, 抗滑桩受荷段地震土压力的响应峰值在受荷段中部最大, 在受荷段底部和顶部最小。在 0.33g 地震作用下, 桩身受荷段的

地震土压力响应峰值变化趋势与 0.15g 相同,但受荷段中部的土压力响应峰值较 0.15g 出现一定幅度的增大,坡脚抗滑桩增加了 13.68%,坡腰抗滑桩增加了 10.53%。另外,受边坡地质条件及支护结构差异性的影响,坡脚抗滑桩受荷段的桩背土压力响应峰值整体上大于坡腰抗滑桩。

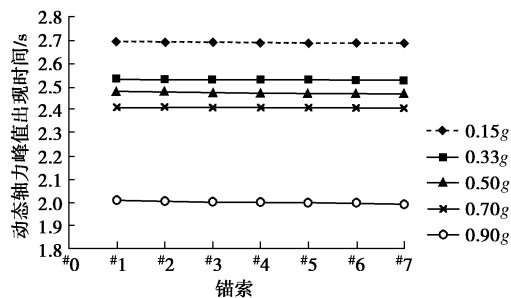


图 15 不同幅值清平波作用下锚索动态响应峰值出现时间

Fig. 15 Occurrence time of peak value of dynamic response of anchor cables under Qingping seismic wave

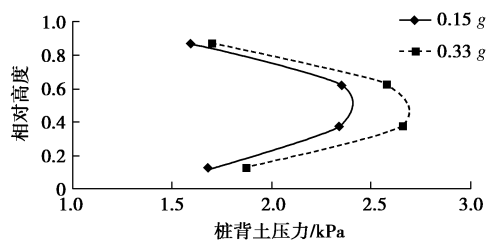


图 16 坡脚抗滑桩桩背土压力

Fig. 16 Earth pressures on anti-slide pile at toe of slope

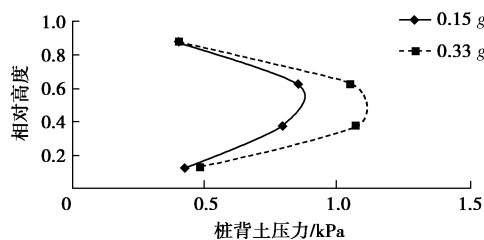


图 17 坡腰抗滑桩桩背土压力

Fig. 17 Earth pressures on anti-slide pile at middle of slope

## 4 讨 论

目前,预应力锚索设计时,在具有同等工程地质条件的区域内,所有预应力锚索均按同等受力状态进行考虑。但是本文的研究表明,同一区域内不同位置处锚索轴力的动态响应特征差别较大,且某一根预应力锚索失效可能引发支护体系中其他锚索的连锁反应,导致整个支护体系功能丧失。因此,以往在预应力锚索的设计时按同等受力状态进行考虑是不合理、不安全的。在锚索抗震设计时应充分考虑不同位置处锚索轴力的地震响应特征,在拟加固边坡工程地质分区的基础上,进一步进行锚索抗震设计分区,在不同

的设计分区内进行针对性的抗震设计,以保证预应力锚索支护措施的可靠性,进而保证加固边坡的地震稳定性。

## 5 结 论

(1) 在小震作用下坡体尚处于稳定状态时,所有锚索均出现预应力损失。随着输入地震波幅值增大,坡肩部分锚索先开始承担下滑力,轴力增加,直至所有锚索均开始承担坡体下滑力,随后边坡与锚索形成新的平衡体系,在新的平衡状态下,锚索轴力在地震的扰动作用下继续损失。

(2) 地震作用下预应力锚索的最大预应力损失比为 16.29%,因此施工时锚索预应力施加初始值应为设计值的 1.2 倍左右。

(3) 坡腰抗滑桩以上#2 锚索轴力动态响应峰值较大;坡腰抗滑桩与坡脚抗滑桩之间坡脚处 7 锚索轴力动态响应峰值较大,随着高程增加,#6, #5, #4 锚索动态响应峰值逐渐增大。

(4) 同一工况下坡面所有锚索几乎在同一时刻取得动态响应峰值。随着输入地震波强度增大,所有锚索轴力的动态响应峰值出现时间缩短,锚索轴力取得动态响应峰值的时间与输入地震波的峰值时间接近,且轴力时程具有与输入地震波相似的波形。

(5) 在锚索抗震设计时应采用“分区设计”的思想,以保证拟加固边坡的稳定性。

## 参考文献:

- [1] KEEFER D K. Statistical analysis of an earthquake -induced landslide distribution: the 1989 Loma Prieta, California event[J]. Engineering Geology, 2000, **58**(3/4): 231 - 249.
- [2] 高大水, 曾 勇. 三峡水久船闸高边坡锚索预应力状态监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(5): 653 - 656. (GAO Da-shui, ZENG Yong. Monitoring analysis of pre-stress state of anchor cable of high slope in the TGP Permanent ship locks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, **20**(5): 653 - 656. (in Chinese))
- [3] 李 宁, 张 鹏, 于 冲, 等. 锦屏左岸拱肩槽边坡稳定性及预应力锚索加固措施研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(1): 36 - 42. (LI Ning, ZHANG Peng, YU Chong, et al. Research on stability of left abutment slope of Jinping Hydro-power Station and reinforcement measurements of pre-stressed anchorage cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(1): 36 - 42. (in Chinese))
- [4] 郑文博, 庄晓莹, 蔡永昌, 等. 地震作用下预应力锚索对岩



- 石边坡稳定性影响的模拟方法及锚索优化研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(9): 1668 - 1676. (ZHENG Wen-bo, ZHUANG Xiao-ying, CAI Yong-chang, et al. Modeling of pre-stressed anchors in rock slope under earthquake and optimization of anchor arrangement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(9): 1668 - 1676. (in Chinese))
- [5] 卢萌盟, 卫明山, 沈俊, 等. 全长黏结式预应力锚索加固基坑仿真试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(1): 92 - 96. (LU Meng-meng, WEI Ming-shan, SHEN Jun, et al. Simulation tests on pit foundation reinforced by full-length-bonding pre-stressed cables[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(1): 92 - 96. (in Chinese))
- [6] 郑明新, 蒋新龙, 殷宗泽, 等. 预应力锚索抗滑桩工程效果的数值计算评价[J]. 岩土力学, 2007, **28**(7): 1381 - 1386. (ZHENG Ming-xin, JIANG Xin-long, YIN Zong-ze, et al. Evaluation of effectiveness of pre-stressed anti-slide cable piles by numerical simulations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, **28**(7): 1381 - 1386. (in Chinese))
- [7] 邓东平, 李亮, 赵炼恒, 等. 基于锈胀开裂的预应力锚杆(索)使用寿命预测研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(8): 1464 - 1472. (DENG Dong-ping, LI Liang, ZHAO Lian-heng, et al. Prediction of service life of pre-stressed anchorage bolt (cable) due to corrosion expansion[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(8): 1464 - 1472. (in Chinese))
- [8] 韩侃, 李登科, 吴冠仲. 预应力锚索锚固力拉拔试验分析[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(增刊 1): 387 - 389. (HAN Kan, LI Deng-ke, WU Guan-zhong. Pull-out tests on anchoring force of pre-stressed anchor cables[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(S1): 387 - 389. (in Chinese))
- [9] 杨苏杭, 梁斌, 顾金才, 等. 锚固洞室抗爆模型试验锚索预应力变化特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, **25**(增刊 2): 3749 - 3756. (YANG Su-hang, LIANG Bin, GU Jin-cai, et al. Research on characteristics of prestress change of anchorage cable in anti-expulsion model test of anchored cavern[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, **25**(S2): 3749 - 3756. (in Chinese))
- [10] 苏华友, 张继春. 紫坪铺进水口高陡边坡锚索抗爆破振动分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(11): 1916 - 1918. (SU Hua-you, ZHANG Ji-chun. Analysis of blasting vibration effect on pre-stressed cable of high slope in Zipingpu project[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(11): 1916 - 1918. (in Chinese))
- [11] 叶海林, 郑颖人, 李安洪, 等. 地震作用下边坡预应力锚索振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, **31**(增刊 1): 2847 - 2854. (YE Hai-lin, ZHENG Yin-ren, LI An-hong, et al. Shaking table test studies of pre-stressed anchor cable of slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, **31**(S1): 2847 - 2854. (in Chinese))
- [12] 赖杰, 郑颖人, 刘云, 等. 地震作用下双排抗滑桩支护边坡振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(4): 680 - 686. (LAI Jie, ZHENG Ying-ren, LIU Yun, et al. Shaking table tests on double-row anti-slide piles of slopes under earthquakes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(4): 680 - 686. (in Chinese))
- [13] 曲宏略, 张建经. 地基条件对挡土墙地震土压力影响的振动台试验研究[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(7): 1228 - 1233. (QU Hong-lüe, ZHANG Jian-jing. Shaking table tests on influence of site conditions on seismic earth pressures of retaining wall[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(7): 1228 - 1233. (in Chinese))
- [14] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998: 112 - 119. (YUAN Wen-zhong. The similarity theory and static model test[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998: 112 - 119. (in Chinese))
- [15] 郑静, 朱本珍. 边坡锚索结构的失效因素与破坏类型[J]. 铁道工程学报, 2010, **136**(1): 10 - 13. (ZHENG Jing, ZHU Ben-zhen. Failure factor and failure damage type of slope anchor structure[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, **136**(1): 10 - 13. (in Chinese))