

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2019.06.12

高边坡防护中 BFRP 锚固结构的振动台试验

武志信^{1 2 3}, 吴红刚^{2 3 4}, 谢显龙^{2 3 5}, 王 飞^{1 2 3}

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730070; 3. 中国中铁滑坡工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 4. 西部环境岩土及场地修复技术工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 5. 西南交通大学地球科学与工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 通过振动台试验, 对钢锚杆(索)与玄武岩纤维塑料增强筋(BFRP)锚杆(索)的应变峰值分布规律进行了分析, 并利用小波包工具对不同频带下锚杆(索)的应变响应情况进行研究。试验结果表明: (1) BFRP 锚杆(索)与坡体协同变形的效果较钢锚杆(索)更加明显; (2) BFRP 锚杆(索)上的应变值均要大于钢锚杆(索)上对应测点的应变值, 且单独对钢锚杆(索)及 BFRP 锚杆(索)而言, 锚杆(索)端部处的应变值均要大于锚杆(索)尾部处的应变值; (3) 对应变起影响作用的主要频段为第一频带(0.1 ~ 6.26 Hz)和第二频带(6.26 ~ 12.51 Hz), 土体对于高频(12.51 Hz 以上)地震波的吸收比较明显。其研究结果可为 BFRP 锚杆(索)加固高边坡的动力合理性设计提供科学依据。

关键词: 边坡工程; 振动台试验; 应变峰值; 小波包; 应变频谱特性

中图分类号: P642

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2019)06-0094-11

Shaking table test of traditional anchorage and BFRP anchorage in high slope protection

WU Zhixin^{1 2 3}, WU Honggang^{2 3 4}, XIE Xianlong^{2 3 5}, WANG Fei^{1 2 3}

(1. School of Civil Engineering Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 2. China Northwest Research Institute Co. Ltd. of CREC, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. China Railway Landslide Engineering Laboratory, Lanzhou, Gansu 730070, China; 4. Western Environmental Geotechnical and Site Rehabilitation Technology Engineering Laboratory, Lanzhou, Gansu 730070, China; 5. School of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: The peak strain distribution law of steel anchor (cable) rod and basalt fiber reinforced plastic (BFRP) anchor (cable) rod was analyzed by the shaking table test, and the strain response of anchor (cable) under different frequency bands was studied by using wavelet packet tool. The results showed that: (1) The synergistic effect of BFRP anchor (cable) rod and slope was more obvious than that of steel anchor (cable) rod; (2) The strain values on the BFRP anchor (cable) rod were larger than those on the corresponding point of the steel anchor (cable) rod. Furthermore, for steel anchor (cable) and BFRP anchor (cable) rod, the strain value at the head of the anchor (cable) rod was larger than that at the end of the anchor (cable) rod.; (3) The main frequency bands that affected the strain were the first frequency band (0.1 ~ 6.26 Hz) and the second frequency band (6.26 ~ 12.51 Hz). The absorption of high frequency (above 12.51 Hz) seismic waves were obvious. The research results can provide scientific basis for the

收稿日期: 2019-05-10; 修订日期: 2019-06-28

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFC1504901); 云南省交通运输厅(云交科教(2017)37号-(1)); 甘肃省自然科学基金项目(145RJZA068)

第一作者: 武志信(1993-)男, 甘肃白银人, 岩土工程专业, 硕士研究生, 主要从事岩土与地下工程研究。E-mail: 1169697283@qq.com

通讯作者: 吴红刚(1983-)男, 陕西宝鸡人, 岩土工程专业, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 主要从事岩土和边坡工程研究。E-mail: 271462550@qq.com

dynamic rationality design of BFRP anchor (cable) rod reinforcement of high slope.

Keywords: slope engineering; shaking table test; strain peak; wavelet packet; strain spectrum characteristic

0 引言

在实际锚固工程中,地震烈度较小的情形下常规预应力锚(索)杆能够表现出良好地抗震效果,可以很好地限制岩体变形,提高边坡的稳定性^[1-2]。但是在强震条件下,锚固岩体变形较大,常规预应力锚杆(索)一般难以继续限制其变形,此时锚杆(索)极易因其变形能力不足或瞬时冲击荷载作用下过载而被拉断,引发边坡失稳破坏^[3-4],而应用玄武岩纤维塑料增强筋(BFRP)这一新材料代替传统钢筋锚杆(索),可以充分利用其相对钢筋较高地抗拉强度和较低地弹性模量以及较好地应力传递特性和抗震、耐腐蚀、强度高、质量轻、与注浆体黏结性能良好等优点^[5-8],能够更好地适应坡体变形的能力,具有明显地边坡抗震效果。

在关于 FRP 锚杆的直径及灌浆体性能研究方面: BAENA M 等^[6]、贾新等^[9]、刘颖浩^[10] 等通过研究发现,在一定的锚固长度下,FRP 锚杆的黏结强度随锚杆直径的增大而减小,存在着明显的尺寸效应; BENMOKRANE B 等^[11] 通过对 AFRP 锚杆和 CFRP 锚杆与不同的灌浆材料之间黏结性能的研究,发现在灌浆料中添加硅粉和砂对提高黏结强度效果最佳,减水剂效果最差; CHENG Y M 等^[12] 通过 GFRP 锚杆和 CFRP 锚杆的现场拉拔试验表明,在水泥砂浆中添加膨胀剂可以增大锚杆的锚固性能。在 BFRP 锚杆与混凝土之间的黏结性能研究方面: 赵文等^[13] 对 BFRP 锚杆与水泥基质的黏结性能进行了试验研究,并发现水泥基强度越高,黏结强度也越高,且与混凝土的黏结强度大于与砂浆的黏结强度; 吴芳^[14] 通过拉拔试验研究了 BFRP 锚杆与混凝土之间的黏结锚固性能及黏结滑移本构关系,并与 GFRP 锚杆、变形钢筋的黏结性能进行了对比分析,并在试验以及已有试验研究的基础上,提出了 BFRP 锚杆黏结强度理论公式和锚固长度设计建议; 沈新等^[15] 运用 18 个中心拉拔试件研究了不同螺纹表面玄武岩纤维锚杆与混凝土之间的黏结性能; 谢晶晶^[16]、黄志怀等^[17]、刘纪峰等^[18] 通过 FRP 锚杆的强度试验,建议了 FRP 锚杆与水泥浆之间黏结强度值。在 BFRP 锚杆支护设计方法研究方面: 郭成鹏等^[19] 对玄武岩纤维杆体 BFRP 材料和灌浆料的力学性能(抗拉强度)进行了测试,并在此基础上,基于 FLAC^{3D} 进行了玄武岩纤维锚杆与灌浆料黏结性能的

数值模拟分析,并探讨了 BFRP 锚杆设计方法。

通过上述研究发现,国内外专家对于 BFRP 锚杆(索)的研究主要集中在其物理力学性能方面,而关于 BFRP 锚杆(索)应用在边坡支护中的研究还很滞后。鉴于此,为更加细致地研究 BFRP 锚杆(索)在高烈度地震区高边坡防护中地震响应及其频谱特征,本文以云南省功东高速公路的响水河(K5-K6)全风化玄武岩边坡为典型工点,并采用小波包变换这一同时能够表征地震波在时频两域局部特征能力的数学工具^[20],利用其可以对高频信息的信号能够进行更好的时频局部化分析的优点^[21],分别对 BFRP 锚杆(索)及钢锚杆(索)在不同频带下的应变响应情况进行了分析,旨在为 BFRP 锚杆(索)加固高边坡的动力合理性设计提供科学依据。

1 试验工点概况

试验工点响水河(K5-K6)全风化玄武岩边坡在云南省功东高速公路,项目沿线地形地貌复杂、地质条件变化大、沿线地层破碎、滑塌、崩塌、泥石流等地质灾害频发,水土流失严重,生态环境十分脆弱。同时,该地区受小江断裂带影响,全线地震基本烈度高达Ⅸ度,功东高速沿线地质灾害点及响水河边坡所在位置(图1)。



图1 功东高速沿线地质灾害点

Fig.1 Geological disaster point along Gong-Dong Expressway

响水河边坡所在坡体地势起伏较大,坡体两端冲沟发育,坡体及冲沟内树木遍布,植被较密,地层岩性为全风化玄武岩。坡体沿基岩有滑动痕迹,滑动方向与线路方向呈 30° ,可判断此处历史上发生过滑动。左侧冲沟紧挨坡体,右侧冲沟距坡体 200 m 左右,且右侧距坡体 5 m 处地形极易发育新的冲沟,对坡体稳定性威胁较大。

该坡坡高 36 m,开挖边坡为三级边坡,一级坡高为 8 m,二、三级边坡高度均为 10 m,设计坡率二级边坡为 1:0.75,三级边坡为 1:1,一级坡设置锚索桩板墙,抗滑桩截面尺寸 1.2 m $\times$ 1.6 m $\times$ 16 m,二级坡面采用锚索框架防护、三级坡面采用锚杆框架防护。响水河边坡开挖后及支护完成的效果分别如图 2(a)、(b)所示。

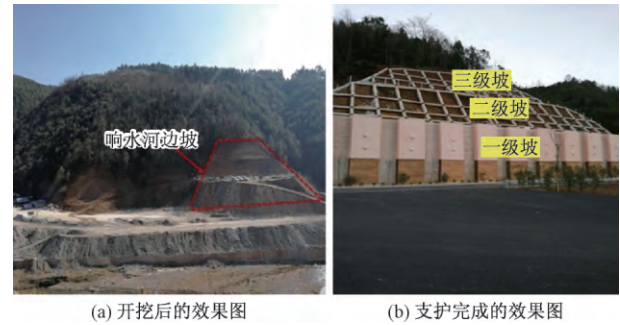


图 2 响水河边坡全貌图
Fig. 2 Overall view of Xiangshui River slope

2 振动台模型试验设计

本次振动台试验在甘肃省地震局黄土地震工程实验室进行,实验室振动台为 VPS~600ES~2 型垂直水平双向振动台,振动台尺寸为 4 m $\times$ 6 m。最大负荷质量 25 t;最大位移: X 向为 250 mm, Z 向为 100 mm;工作频率为 0.5~50.0 Hz。

2.1 相似关系设计

根据此次振动台试验条件和目的,相似关系借助因次分析法进行推导,选取几何尺寸 l ($C_L=20$) 和容重 γ ($C_\gamma=1$) 为基本控制量,其余物理量利用相似“ π 定理”导出,相似关系如表 1 所示。

经计算,基于容重相似,弹性模量和黏聚力相似比尺产生的“奇异”较大,在本次试验中模型材料并未完全满足相似比尺的计算要求。但是考虑到本次试验主要研究锚杆(索)的应变,故这些相似材料的次要参数可以忽略^[22]。试验工点全风化玄武岩与振动台试验模拟土层的主要物理参数如表 2 所示。

表 1 振动台试验模型相似参数
Table 1 Similar parameters of vibration table test model

物理量	相似关系	相似常数
长度 l	$C_L = L_p/L_m = 20$	20
容重 γ	$C_\gamma = \gamma_p/\gamma_m$	1.0
应力 σ	$C_\sigma = C_L C_\gamma$	20
弹性模量 E	$C_E = C_\sigma$	20
黏聚力 c	$C_c = C_\sigma$	20
内摩擦角 φ	$C_\varphi = \varphi_p/\varphi_m$	1.0
泊松比 μ	$C_\mu = \mu_p/\mu_m$	1.0
应变 ε	$C_\varepsilon = \varepsilon_p/\varepsilon_m$	1.0

注:表中 p 和 m 分别表示原形量和模型量。

表 2 全风化玄武岩与振动台试验模拟土层的主要物理参数
Table 2 Main physical parameters of soil simulated by fully weathered basalt and shaking table test

名称	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
全风化玄武岩	35	18
试验模拟土层	2.4	12.69

2.2 相似材料与模型制作

根据模型设计参数及多组材料配比试验结果,坡体选择以河砂为主要材料,石膏粉、黏性土为辅助材料,水为粘结材料。为使模型坡体滑动过程连续,本次试验选择用特氟纶薄膜模拟滑带。滑床及滑体部分均以黏性土、河沙、石膏及水为材料制作而成,其质量配合比为 5:10:1:1,其中,滑床部分土体压实度较高。抗滑桩采用松木桩模拟,桩长 80 cm,悬臂段和嵌固端桩长均为 40 cm。试验锚杆(索)分为钢锚杆(索)和 BFRP 锚杆(索)两种,其直径均为 5 mm。

模型箱框架为 20 mm 厚钢板焊接等边角钢而成,箱体内槽尺寸为 2 900 mm(长) $\times$ 1 400 mm(宽) $\times$ 1 850 mm(高)。水平振动方向前边为 30 mm 厚钢板,高为 900 mm,后边为 50 mm 厚聚苯乙烯防震泡沫,长边为 20 mm 厚透明有机玻璃,可便于观察试验过程中的模型变化情况。振动边界上的减震层采用 50 mm 厚的聚苯乙烯泡沫。在该试验模型中左幅为抗滑桩+钢锚杆(索)+框架结构对边坡进行支护,右幅为抗滑桩+BFRP 锚杆(索)+框架结构对边坡进行支护。制作完成的试验模型如图 3 所示。

2.3 测试断面及原件布置

考虑到模型箱边界效应的影响,将本次试验所用到的型号为 BE120-10A-P100 的应变片布置在左右两幅边坡中间一列锚杆(索)上,左幅边坡布置应变片的位置如图 4 中断面 1 所示,右幅边坡布置应变片的位置如图 4 中断面 2 所示。其中,左右两幅抗滑桩上各布置 2 列共 6 根长度为 135 cm 的锚索,二级坡上各布

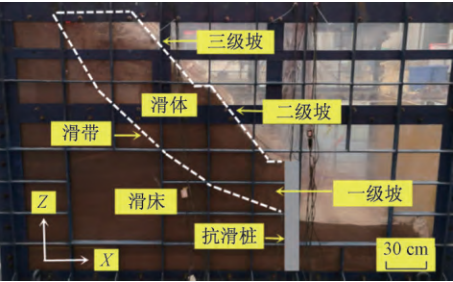


图 3 制作完成的试验模型箱

Fig. 3 The completed test model box

置 3 列 9 根长度为 135 cm 的锚索,三级坡上各布置 3 列 9 根长度为 60 cm 的全长锚固锚杆,左右两幅坡体中抗滑桩及锚杆(索)的布置形式如图 5 所示。

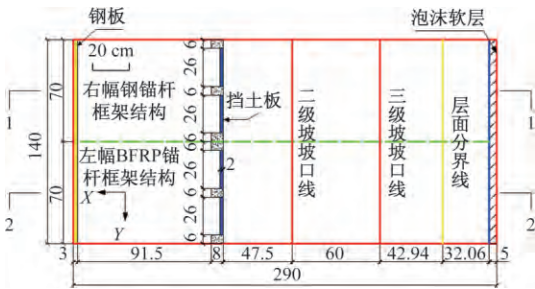


图 4 左右两幅边坡中应变片布置示意图(单位: cm)

Fig. 4 Schematic diagram of strain gauge layout in the left and right slopes (unit: cm)

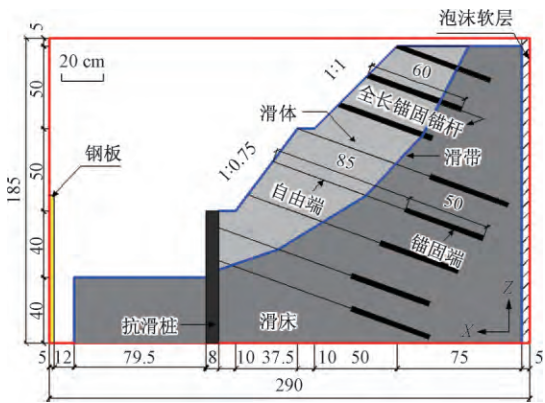


图 5 模型结构示意图(单位: cm)

Fig. 5 Schematic diagram of model structure (unit: cm)

2.4 加载制度设计

由于水平地震是诱发滑坡、导致支挡结构破坏的主要原因^[23],因此在该振动台试验中采用 EI-Centro 波进行 X 方向的加载方式,加载制度如表 3 所示。本文主要研究 EI-Centro 波在 X 向加载方式下,钢锚杆(索)及 BFRP 锚杆(索)的响应情况。锚杆(索)应变时程曲线如图 6 所示。考虑到波长的时间压缩太大会

造成地震波的频谱成分更为复杂的原因,故本文地震波并未按照相似体系进行压缩^[24]。

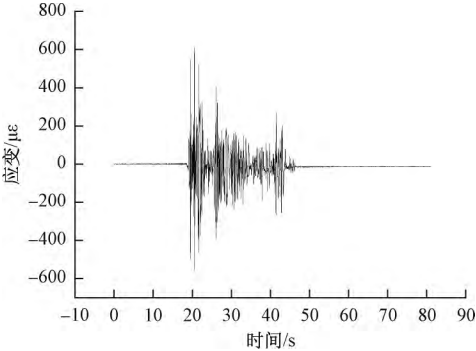


图 6 EI-Centro 波应变时程曲线

Fig. 6 EI-Centro wave strain time history curve

表 3 试验加载制度

Table 3 Test loading conditions

序号	工况	台面输入波形	方向
1	0.1 g	EI 波	X 向
2	0.15 g	EI 波	X 向
3	0.2 g	EI 波	X 向
4	0.3 g	EI 波	X 向
5	0.4 g	EI 波	X 向
6	0.5 g	EI 波	X 向
7	0.6 g	EI 波	X 向
8	0.8 g	EI 波	X 向
9	1.0 g	EI 波	X 向
10	1.4 g	EI 波	X 向

3 试验现象分析

按照表 3 中的加载制度对试验模型进行逐级加载,在加载工况 1 后,试验模型未发生明显变化,随着试验加载制度的升级,加载到工况 2 时,左幅钢锚杆(索)侧边坡坡肩位置发生了土体震陷现象,较粗的土体颗粒从碎石的空隙中掉落下来,形成了明显的粗颗粒堆积现象,如图 7 所示。

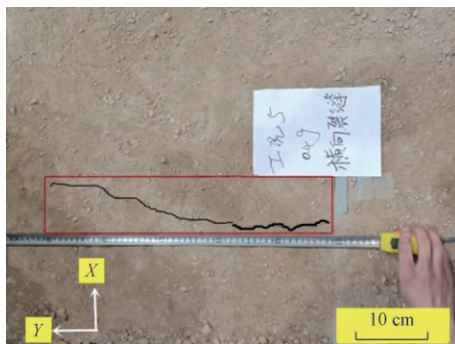
加载到工况 5 之后,右幅 BFRP 锚杆(索)侧坡顶滑带埋设位置出现了两条粗细不一的横向裂缝,经测量发现该横向裂缝距离模型箱后壁的位置大约为 28 cm,如图 8(a) 所示。其中较细的横向裂缝长度约为 30 cm,较粗的横向裂缝长度为 20 cm 左右,且这两条横向裂缝有贯通趋势,如图 8(b) 所示。分析其产生的原因是由于在水平向地震波的张拉作用下,使得坡体在顶部滑带埋设位置出现了裂缝。

在工况 6 的地震波作用下,右幅 BFRP 锚杆(索)侧坡顶位置之前出现的两条横向裂缝贯通为了一条长度约为 70 cm 的横向裂缝,且裂缝宽度也有所增加,如

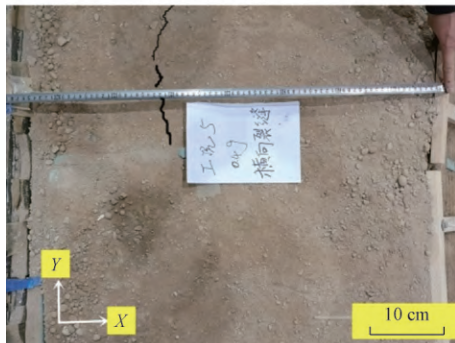


图 7 工况 2 作用下土体震陷现象

Fig. 7 Seismic subsidence of soil under working condition 2



(a) 坡顶横向裂缝的位置



(b) 坡顶横向裂缝

图 8 工况 5 作用下坡顶横向裂缝图

Fig. 8 Transverse crack diagram of slope top under the action of working condition 5

图 9(a) 所示。同时,在左幅钢锚杆(索)侧滑带位置处出现了斜向裂缝,分析其原因是地震波的剪切作用所造成的,如图 9(b) 所示。

在工况 7 水平地震波的张拉作用下,使得左幅坡顶滑带位置处出现了一条长度约为 50 cm 的横向裂缝,如图 10(a) 所示。同时,在右幅 BFRP 锚杆(索)侧二级坡坡面位置出现了一条斜向裂缝,其现象如图 10(b) 所示。

加载工况 8 后,使得之前左幅坡体在滑带附近位置出现的斜向裂缝继续发育,长度发生了明显地增长,

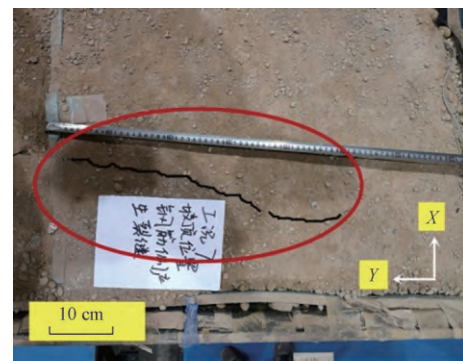


(a) 坡顶横向贯通裂缝

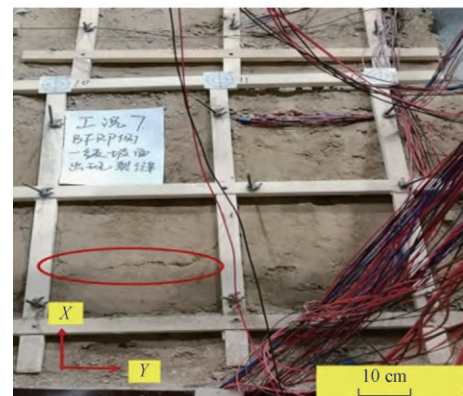
(b) 左幅斜向裂缝

图 9 工况 6 作用下坡体变形图

Fig. 9 Deformation of slope under action of working condition 6



(a) 左幅坡顶横向裂缝



(b) 右幅坡面斜向裂缝

图 10 工况 7 作用下坡体变形图

Fig. 10 Deformation diagram of slope under action of working condition 7

如图 11(a) 所示,而与该位置相对应的右幅坡体滑带附近位置未见明显裂缝产生,如图 11(b) 所示。分析其原因是由于 BFRP 锚杆(索)具有较高的抗拉强度和较低的弹性模量,从而使得锚杆(索)与边坡在一定范围内能够协同变形,故右幅坡体滑带附近位置未见裂缝产生。

加载工况 9 后,左右两幅边坡在坡肩位置均出现



图 11 工况 8 作用下坡体变形图

Fig. 11 Deformation of slope under action of working condition 8

了土体滑落的现象,从图 12 中可以看出右幅边坡钢锚杆的外露长度明显要大于左幅边坡 BFRP 锚杆的外露长度,且相较于左幅 BFRP 锚杆而言右幅坡体中间的钢锚杆出现了显著地弯曲现象,如图 12 中红色圆圈所示,从而可以说明 BFRP 作为一种柔性结构,在地震作用下能够对边坡的变形起到有效地抑制作用。

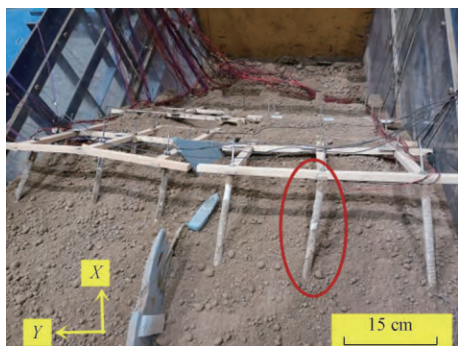


图 12 工况 9 作用下坡肩土体滑落

Fig. 12 working condition 9 acted on the soil mass sliding down the slope shoulder

4 试验结果分析

本次试验对工况 3、工况 6、工况 9 地震波作用下,

左幅边坡及右幅边坡中钢锚杆(索)和 BFRP 锚杆(索)的应变峰值的分布规律进行了对比研究。并通过小波包工具主要对工况 6 下钢锚杆(索)和 BFRP 锚杆(索)的应变频谱特性进行了分析,研究了两者的应变值在不同频段内的变化规律。其中,所要研究的锚杆(索)在左右两幅边坡中各选取 3 根,从模型底部朝顶部方向,选取桩上第二根锚索定义为下锚索、二级坡上第三根锚索定义为中锚索、三级坡上第三根锚杆定义为上锚杆,其示意图如图 13 所示。且将左幅边坡中选取的三根锚杆(索)靠近尾部处的应变片定义为 A'-1,将靠近端部处的应变片定义为 A'-2;将右幅边坡中选取的三根锚杆(索)靠近尾部处的应变片定义为 A-1,将靠近端部处的应变片定义为 A-2,选取右幅边坡中锚杆(索)为例来说明测点布置情况,如图 14 所示。

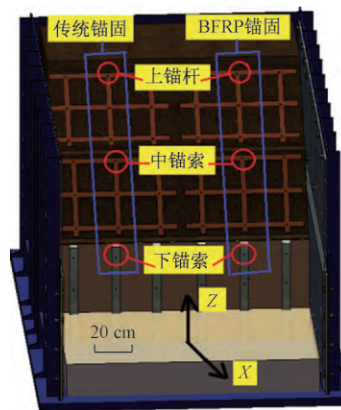


图 13 锚杆所对应的位置

Fig. 13 The position corresponding to the bolt

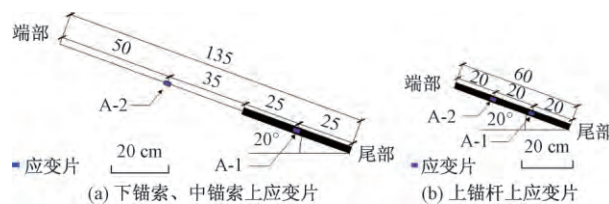


图 14 右幅边坡中应变片布置位置

Fig. 14 Strain gauge placement in right slope

4.1 钢锚杆及 BFRP 锚杆应变峰值的对比分析

工况 3、6、9 分别为水平向加载的 0.2 g、0.5 g 和 1.0 g 的 EI 地震波,做出三种工况下钢锚杆(索)及 BFRP 锚杆(索)分别在尾部及端部处的应变峰值分布图(图 15~16)。

从图 15(a) 可以看出,在三种工况的地震波作用下,对 BFRP 锚杆(索)而言, A-1 处各层的应变随加载量级的增大而增长。下锚索 A-1 处应变的增长要明显快于中锚索及上锚杆 A-1 处应变的增长情况,曲线走

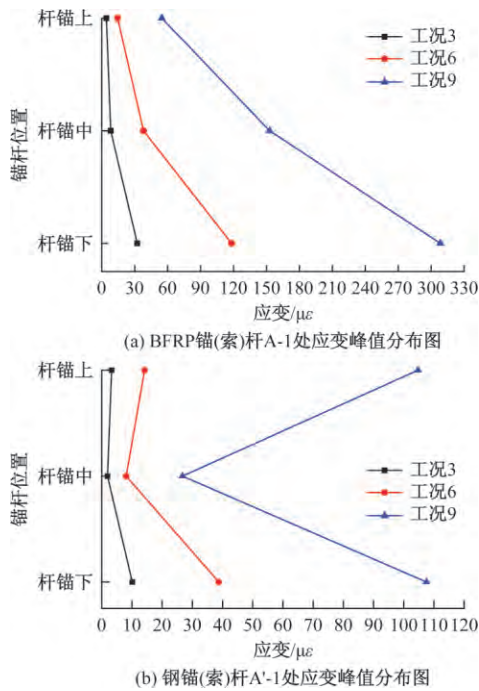


图15 锚杆尾部处应变峰值分布图

Fig. 15 Strain peak distribution diagram at bolt tail

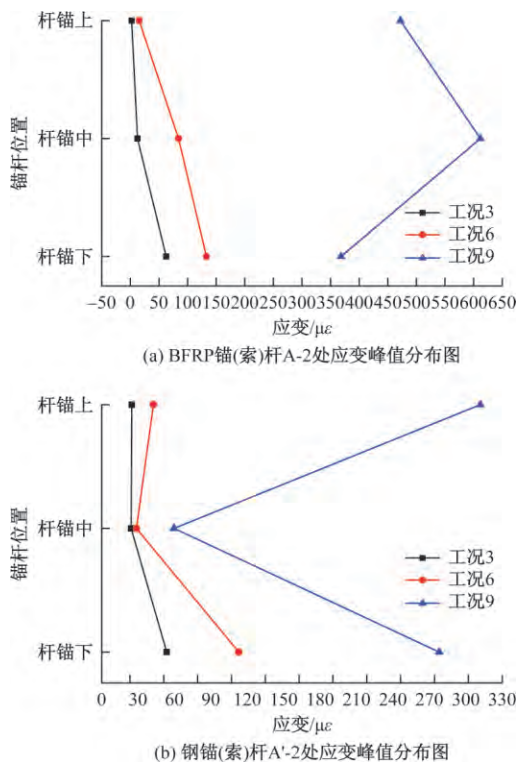


图16 锚杆端部处应变峰值分布图

Fig. 16 Strain peak distribution diagram at bolt end

向近似为斜线。分析其原因是因为BFRP作为一种柔性结构,在振动过程中上锚杆与中锚索能够起到与土体协同变形的效果,所以使得上锚杆与中锚索A'-1处

受力较小,故其应变也较小。而下锚索由于受到抗滑桩的约束作用,又承受的土体压力较中锚索与上锚杆的大,所以下锚索A'-1处应变值最大。

从图15(b)可以看出,钢锚杆(索)A'-1处的应变具有下锚索应变值最大、上锚杆次之、中锚索应变值最小的特点,曲线表现为“K”形,且这种趋势随着加载制度的增大而愈加明显,其主要表现为上锚杆A'-1处应变值增长较快。其应变值分布规律跟BFRP锚杆(索)A'-1处应变值的分布规律截然不同,分析其原因是在振动的过程中,坡体下部土体及上部土体变形较大,而钢锚杆(索)作为一种刚性结构,不能很好的随同土体一起变形,故才会出现下锚索和上锚杆A'-1处应变较大的情况。

从图16(a)可以看出,对BFRP锚杆(索)A'-2而言,当加速度峰值较小时,其应变分布规律同A'-1处的应变分布规律相似,即下锚索A'-2处的应变值最大、中锚索次之、上锚杆应变值最小。但是当加速度峰值增大到一定程度后,曲线形状发生明显地变化,表现为反“K”形。例如在工况9的地震波作用下,中锚索的应变值最大,且上锚杆的应变值比下锚索的应变值大,分析其原因是由于随着加载工况的增加,BFRP锚杆(索)与土体的协同变形能力受到了限制,右幅BFRP侧坡体的变形主要表现为坡体中部及上部土体的变形。

由图16(b)可得,钢锚杆A'-2处应变的分布规律同A'-1处的分布规律相似,即具有下锚索应变值最大、上锚杆次之、中锚索应变值最小的特点,曲线表现为“K”形,且这种趋势随着加载程度的增大而愈加明显,其变形原因同A'-1处的相同,此处不再复述。

4.2 地震波的小波包变换及锚杆(索)应变的频谱分析

4.2.1 地震波的小波包变换

小波变换是一种时间-尺度分析方法,在时间、尺度(频率)两域都具有表征信号局部特征的能力,具有多分辨率分析的特点。小波包变换是基于小波变换的进一步发展,能够提供比小波变换更高的分辨率,解决了分析信号低频部分时间分辨率差而高频部分频率分辨率差的问题^[22]。

鉴于此,本文选取小波函数中具有良好地近似对称性、光滑性及紧支撑性^[26],在地震等非稳态信号的分析中具有明显优势的db3函数作为本次振动台试验的小波基函数。且依据Shannon采样定理^[27],将本次试验中加载的EL-Centro进行3层分解,共得 $2^3 = 8$ 个小波包,则每个频带的宽度为 $50/8 = 6.25$ Hz,对应的

最低频带为 0.1 ~ 6.26 Hz ,其中 ,各频带对应的频率范围如表 4 所示。

表 4 各频带频率范围

Table 4 Frequency range of each frequency band			
频带编号	频带范围 / Hz	频带编号	频带范围 / Hz
一	0.1 ~ 6.26	五	25.01 ~ 31.26
二	6.26 ~ 12.51	六	31.26 ~ 37.51
三	12.51 ~ 18.76	七	37.51 ~ 43.76
四	18.76 ~ 25.01	八	43.76 ~ 50

4.2.2 锚杆(索)应变的频谱对比分析

由上述分析可知 ,钢锚杆(索)及 BFRP 锚杆(索)

的应变值基本上都是下锚索处的最大 ,故为了分析不同频段地震波的激励下 ,边坡中钢锚杆(索)及 BFRP 锚杆(索)应变的响应情况 ,选取工况 6 下 0.5 g 的 EI 波为例 ,对左右两幅边坡下锚索上应变时域曲线进行小波包分解 ,作出的小波包分解结果如图 17 所示。

本文将 12.51 Hz 以下的地震波均视为低频波 ,则由图 17 可得 ,对左右两幅边坡下锚索上测点 A-2、A-1 及 A'-2、A'-1 而言 ,对应变起影响作用的主要频段为第一频带 (0.1 ~ 6.26 Hz) 和第二频带 (6.26 ~ 12.51 Hz) ,土体对于高频 (12.51 Hz 以上) 地震波的吸收比较明显。

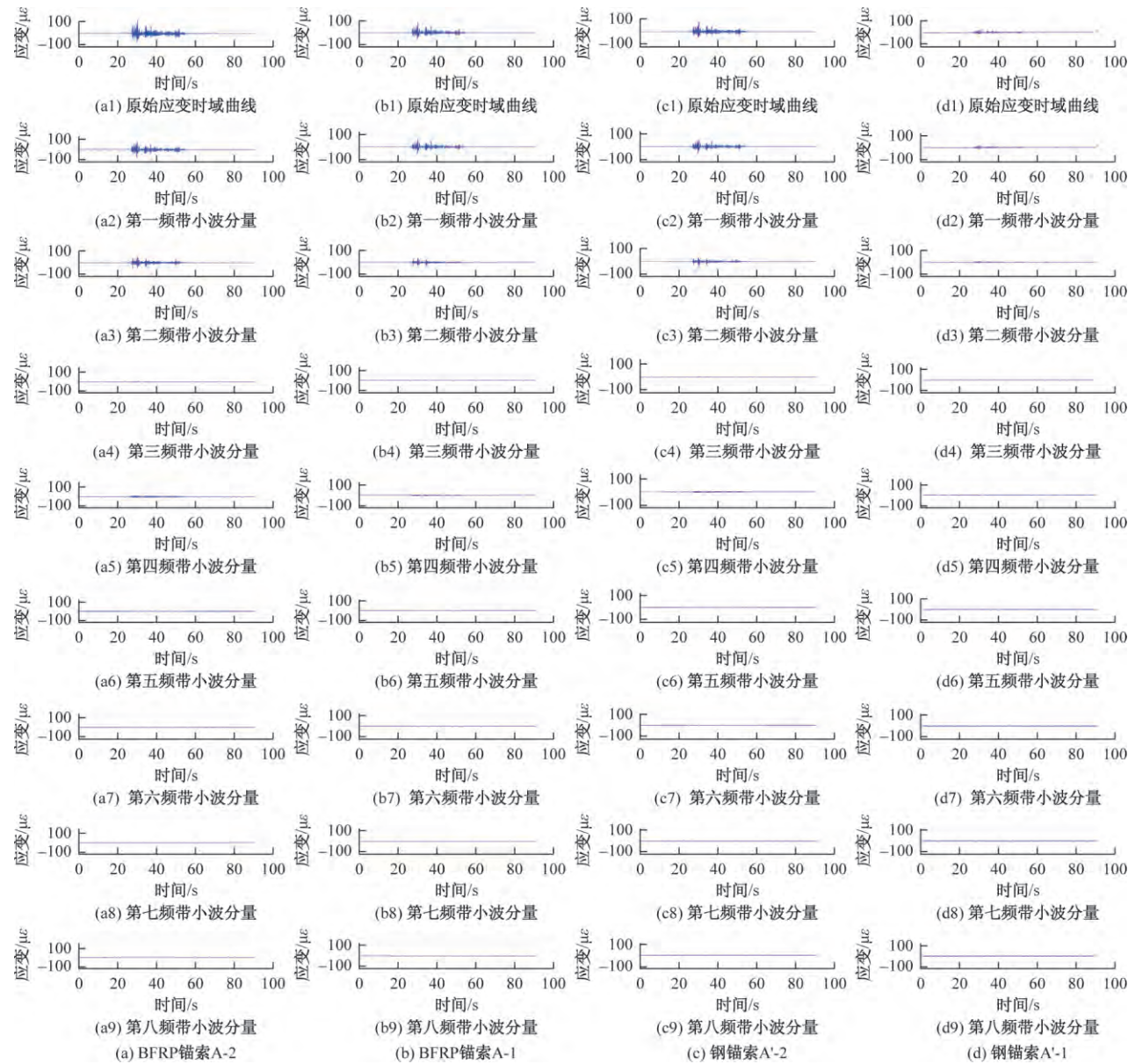


图 17 钢锚索与 BFRP 锚索在端部及尾部处的应变小波分量图

Fig.17 The strain wavelet component diagram of steel anchor cable and BFRP anchor cable at the end and tail

同时可以看出,不论是对钢锚索还是对BFRP锚索各频段的应变幅值变化情况而言,锚索端部处的应变值均要大于尾部处的应变值。而且可以得到,在同一测点处,BFRP锚索上的应变值要大于钢锚索上的应变值。这种现象是由于BFRP锚索具有较好的柔性而造成的。综合对比钢锚索及BFRP锚索两个测点处的应变值可以发现,BFRP锚索在端部A-2处的应变值最大,且分别要比BFRP锚索A-1、钢锚索A'-2、钢锚索A'-1处的应变值大1.23、1.41、3.92倍。

由于其他工况的地震波经小波包分解后所得规律跟工况6的相类似,为节省篇幅,此处不再一一列出。

5 结论

通过本次大型振动台试验,对左右两幅边坡中钢锚杆(索)及BFRP锚杆(索)的应变峰值分布规律进行了分析,并利用小波包工具对工况6中加载的EI波进行了分解,且对各频段地震波作用下应变响应及其频谱特性进行了研究,所得结论如下:

(1)从试验现象分析来看,对比钢锚杆(索)及BFRP锚杆(索)分别对边坡的支护效果可以发现,BFRP锚杆(索)与坡体协同变形的效果更加明显。

(2)对钢锚杆(索)及BFRP锚杆(索)对应测点而言,BFRP锚杆(索)上的应变值均要大于钢锚杆(索)上的应变值,且单独对钢锚杆(索)及BFRP锚杆(索)而言,锚杆(索)端部处的应变值均要大于锚杆(索)尾部处的应变值。

(3)对左右两幅边坡下锚索而言,BFRP锚索A-2处的应变值最大,且分别要比BFRP锚索A-1、钢锚索A'-2、钢锚索A'-1处的应变值大1.23、1.41、3.92倍;

(4)对左右两幅边坡下锚索上测点A-2、A-1及A'-2、A'-1而言,对应变起影响作用的主要频段为第一频带(0.1~6.26 Hz)和第二频带(6.26~12.51 Hz),土体对于高频(12.51 Hz以上)地震波的吸收比较明显。

参考文献:

- [1] 金永军,何满潮,王树仁,等. 适用于软岩边坡加固的压力分散型预应力锚索锚固机理研究[J]. 土木工程学报,2006,39(4): 63-67.
JIN Yongjun, HE Manchao, WANG Shuren, et al. Study on the anchoring mechanism of pre-stressed anchor cable with dispersive pressure suitable for soft-rock slope reinforcing [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(4): 63-67.
- [2] 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 Hailin, ZHENG Yingren, LI Anhong, et al. Shaking table test studies of prestressed anchor cable of slope under earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S1): 2847-2854.
- [3] 郑达,梁力丹,巨能攀. 低周往复荷载作用下预应力锚索震害特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(7): 1353-1360.
ZHENG Da, LIANG Lidan, JU Nengpan. Seismic damage of prestressed anchor cables under low frequency cycling loads [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(7): 1353-1360.
- [4] 王秒,李海波,刘亚群,等. 顺层岩质边坡预应力锚索抗震加固机制研究[J]. 岩土力学,2013,34(12): 3555-3560.
WANG Miao, LI Haibo, LIU Yaqun, et al. Reinforcement mechanism of bedding rock slopes with prestressed anchor cable subjected to seismic loads [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3555-3560.
- [5] 刘志勇,吴桂芹,马立国,等. FRP筋及其增强砼的耐久性与寿命预测[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版),2005,18(1): 66-73.
LIU Zhiyong, WU Guiqin, MA Liguang, et al. Durability and life prediction of FRP bars and reinforced concrete [J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition), 2005, 18(1): 66-73.
- [5] 刘志勇,吴桂芹,马立国,等. FRP筋及其增强砼的耐久性与寿命预测[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版),2005,18(1): 66-73.
LIU Zhiyong, WU Guiqin, MA Liguang, et al. Durability and service life prediction of FRP bars and FRP bars reinforced concrete [J]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering), 2005, 18(1): 66-73.
- [6] BAENA M, TORRES L, TURON A, et al. Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test [J]. Composites Part B: Engineering, 2009, 40(8): 784-797.
- [7] 曹晓峰,赵文,谢强,等. BFRP筋材基本力学性能试验研究[J]. 公路工程,2016,41(5): 215-

217.
CAO Xiaofeng, ZHAO Wen, XIE Qiang, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforced plastic rebar [J]. Highway Engineering, 2016, 41(5): 215–217, 255.
- [8] 吴刚, 朱莹, 董志强, 等. 碱性环境中 BFRP 筋耐腐蚀性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(8): 32–41.
WU Gang, ZHU Ying, DONG Zhiqiang, et al. Experimental study on the corrosion resistance performance of BFRP bars in the alkaline environment [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47(8): 32–41.
- [9] 贾新, 袁勇, 李焯芬. 新型玻璃纤维增强塑料砂浆锚杆的黏结性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2108–2114.
JIA Xin, YUAN Yong, LEE C F. Experimental study on bond behavior of new type cement grouted gfrp bolts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2108–2114.
- [10] 刘颖浩, 袁勇. 全螺纹 GFRP 黏结型锚杆锚固性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 394–400.
LIU Yinghao, YUAN Yong. Experimental research on anchorage performance of full-thread gfrp bonding anchor bolts [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 394–400.
- [11] BENMOKRANE B, ZHANG B R, CHENNOUF A. Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications [J]. Construction and Building Materials, 2000, 14(3): 157–170.
- [12] CHENG Y M, AU S K, YEUNG A T. Laboratory and field evaluation of several types of soil nails for different geological conditions [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(4): 634–645.
- [13] 赵文, 王浩, 陈云, 等. BFRP 筋锚杆土质边坡支护应用研究[J]. 工程地质学报, 2016, 24(5): 1008–1015.
ZHAO Wen, WANG Hao, CHEN Yun, et al. Laboratory and field tests use of bfrp anchor bolt in supporting soil slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2016, 24(5): 1008–1015.
- [14] 吴芳. 玄武岩纤维筋与混凝土黏结性能试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
WU Fang. Experiments on coagulation (+ bonding) properties of basalt fibre reinforcements [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009.
- [15] 沈新, 顾兴宇, 陆佳颖. 玄武岩纤维(BFRP)筋与混凝土黏结性能试验研究[J]. 交通运输工程与信息学报, 2010, 8(3): 124–130.
SHEN Xin, GU Xingyu, LU Jiaying. Experimental study on the bonding behavior between basalt fiber reinforced polymer (BFRP) and concrete [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2010, 8(3): 124–130.
- [16] 谢晶晶. 纤维增强塑料筋锚杆锚固机理及设计方法的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2002.
XIE Jingjing. Study on anchorage mechanism and design method of fiber reinforced plastic bar anchor [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2002.
- [17] 黄志怀, 李国维. 玻璃纤维增强塑料锚杆设计研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2008(4): 36–40.
HUANG Zhihuai, LI Guowei. Design research of glass fibre reinforced plastics bolts [J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2008(4): 36–40.
- [18] 刘纪峰, 张会芝. 玻璃纤维和玄武岩纤维锚杆设计探讨[J]. 河南城建学院学报, 2012, 21(5): 5–8.
LIU Jifeng, ZHANG Huizhi. On design of GFRP and BFRP anchors [J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2012, 21(5): 5–8.
- [19] 郭成鹏, 林学军, 李涛, 等. 玄武岩纤维筋用作锚杆的适宜性研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2012, 22(4): 24–27.
GUO ChengPeng, LIN XueJun, LI Tao, et al. Study on the suitability of basalt fiber reinforcement as anchor [J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 22(4): 24–27.
- [20] 崔臻, 盛谦, 刘加进, 等. 基于小波包的地下洞室群地震响应及其频谱特性研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(12): 3901–3906.
CUI Zhen, SHENG Qian, LIU Jiajin, et al. Spectrum characteristics analysis of seismic response for underground caverns via wavelet packet [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(12): 3901–3906.
- [21] 刘明才. 小波分析及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
LIU Mingcai. Wavelet analysis and its application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [22] 吴红刚, 牌立芳, 赖天文, 等. 山区机场高填方边坡桩-锚-加筋土组合结构协同工作性能优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(7): 1498–1511.

- WU Honggang, PAI Lifang, LAI Tianwen, et al. Study on cooperative performance of pile-anchor-reinforced soil combined retaining structure of high fill slopes in mountainous airports [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38 (7): 1498 – 1511.
- [23] 李楠, 门玉明, 高讴, 等. 微型桩群桩支护滑坡的地震动响应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(9): 2144 – 2151.
- LI Nan, MEN Yuming, GAO Ou, et al. Seismic behavior of the landslide supported by micropiles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(9): 2144 – 2151.
- [24] 艾挥, 吴红刚, 冯文强, 等. 冠梁约束型抗滑桩与普通抗滑桩的抗震性能对比试验研究 [J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(2): 194 – 200.
- AI Hui, WU Honggang, FENG Wenqiang, et al. Research on seismic capacity correlative experiment of top beam binding anti-slide pile and common anti-slide pile [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(2): 194 – 200.
- [25] 张德丰. MATLAB 小波分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- ZHANG Defeng. MATLAB Wavelet Analysis [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [26] 张耀平, 曹平, 高赛红. 爆破振动信号的小波包分解及各频段的能量分布特征 [J]. 金属矿山, 2007 (11): 42 – 47.
- ZHANG Yaoping, CAO Ping, GAO Saihong. Wavelet packet decomposition of blasting vibration signals and energy distribution characteristics of frequency bands [J]. Metal Mine, 2007(11): 42 – 47.
- [27] 黄文华, 徐全军, 沈蔚, 等. 小波变换在判断爆破地震危害中的应用 [J]. 工程爆破, 2001, 7(1): 24 – 27.
- HUANG Wenhua, XU Quanjun, SHEN Wei, et al. Application of wavelet transform in evaluation of blasting vibration damage [J]. Engineering Blasting, 2001, 7(1): 24 – 27.

关于为《中国地质灾害与防治学报》征集照片的启事

为了使本刊论文内容更加形象、生动,便于读者清晰地识别地质灾害的各种地质作用及现象,反映治理措施及治后效果,本刊每期另附彩版照片。凡为彩版或封面提供照片者,每版应附 100 ~ 500 字说明,每张照片也应有相应说明。为保证出版效果,请提供原照片;若用数码相机拍摄,请采用 200 万像素以上的模式拍照。照片的分辨率应在 1 600 × 1 200 dpi 以上(Fine 或 High 模式);如照片文件为扫描版,请采用 600 dpi 以上的设置扫描。如用电子邮件发送,请提供照片的原电子文档 JPG 格式(勿自行用 Photoshop 或 ACDsee 等软件处理),以保证照片的清晰度。另请提供 1 份 Word 文档,但其仅供排版时参考,不能作为印刷、排版的原始稿件。提供的照片采用刊登后,付稿酬。欢迎各地、各界同仁踊跃选送各种典型照片(含国外照片)。

感谢您的支持与合作!

本刊网址: www.zgdzzhyfzxb.com

电子信箱: nitx@mail.cigem.gov.cn zhaoh@mail.cigem.gov.cn

《中国地质灾害与防治学报》编辑部