

DOI: 10.16285/j.rsm.2020.0851

玄武岩纤维增强复合材料在高边坡防护中的 振动台试验研究

赖天文¹, 雷 浩^{1,2}, 武志信³, 吴红刚²

(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 730030;
3. 甘肃省交通规划勘察设计院股份有限公司, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 在地震烈度较低时, 钢锚索可以很好地限制坡体变形, 起到良好的边坡支护效果。但是在强震条件下, 常规的锚索难以发挥其锚固作用, 最终导致锚固失效破坏, 常会引发边坡失稳破坏的现象, 且在地下水等腐蚀性物质的作用下, 常会造成钢锚索的锈蚀问题。鉴于此, 通过大型振动台试验, 对新型玄武岩纤维增强复合材料 (basalt fiber reinforced plastics, 简称 BFRP) 加固边坡及无支护边坡的动力响应进行了对比研究, 旨在为高边坡加固中 BFRP 锚索的动力合理性设计提供科学依据。研究结果表明: 相较于 BFRP 锚索支护边坡而言, 无支护边坡在地震波加载过程中具有明显的变形阶段, 主要可划分为弹性阶段、塑性阶段、塑性增强阶段以及破坏阶段, 且当输入波峰值小于 0.2g 时, BFRP 锚索支护边坡与无支护边坡均可处于弹性状态; BFRP 锚索支护边坡的加速度峰值均要大于无支护边坡的加速度峰值, 表明相较于无支护边坡而言, BFRP 锚索可有效提高边坡的刚度; 同一工况的地震波作用下, 无支护边坡中各测点位移谱值均要大于 BFRP 锚索支护边坡对应测点的位移谱值, 表明 BFRP 锚索用于边坡支护工程中时, 可以很好地限制坡体变形, 有利于提高坡体的抗震性能。

关 键 词: 高边坡; 振动台试验; BFRP 锚索; 加速度; 位移谱

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2021) 02-0390-11

Shaking table test study on basalt fiber reinforced plastics in high slope protection

LAI Tian-wen¹, LEI Hao^{1,2}, WU Zhi-xin³, WU Hong-gang²

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Northwest Research Institute Co. Ltd. of CREC, Lanzhou, Gansu 730030, China;

3. Gansu Transportation Planning Survey and Design Institute Co. Ltd., Lanzhou, Gansu 730030, China)

Abstract: In general, the steel anchor cable can effectively reduce the deformation of the slope body, and is useful for slope reinforcement when the seismic intensity is low. However, the anchored rock mass deforms excessively under strong earthquake conditions, and conventional prestressed anchor cable cannot sustain the large deformation, which leads to the catastrophic slope instability and failure. Additionally, the corrosion of steel anchor cable often occurs under the groundwater containing corrosive substances. In view of this, the dynamic response of the slope reinforced using the new basalt fiber reinforced plastics (BFRP) and the unsupported slope was compared through the large-scale shaking table tests, aiming to provide a scientific basis for the dynamic rational design of BFRP anchor cables for reinforcement of high slopes. The result shows that: compared with the slope supported by BFRP, the unsupported slope has obvious deformation stages during seismic loading, which can be divided into elastic stage, plastic stage, plastic reinforcement stage, and failure stage. When the peak value of input wave is less than 0.2g, both the slope supported by BFRP anchor cable and the unsupported slope are in elastic state. In addition, the peak acceleration value of the slope supported by BFRP anchor cable is greater than that of the unsupported slope, which indicates that the BFRP anchor cable can effectively improve the rigidity of the slope. Under the action of seismic wave in the same condition, the displacement spectrum value of each measured point in the unsupported slope is greater than that of the corresponding measured point in the slope supported by BFRP anchor cable,

收稿日期: 2020-06-19

修回日期: 2020-11-12

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (No. 2018YFC1504901, No. 2018YFC1504903); 云南省交通运输厅 (云交科教 (2017) 37 号- (1))。

This work was supported by the National Key Research and Development Program of China (2018YFC1504901, 2018YFC1504903) and the Yunnan Provincial Department of Transportation (Yunjiao Science and Education (2017) 37-1).

第一作者简介: 赖天文, 男, 1968 年生, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事岩土与边坡工程方面的研究。E-mail: 376234629@qq.com

通讯作者: 武志信, 男, 1993 年生, 硕士, 工程师, 主要从事岩土与边坡工程方面的研究。E-mail: 1169697283@qq.com

which indicates that the BFRP anchor cable can reduce the deformation and improve the seismic performance of the slope in the slope supporting engineering.

Keywords: high slope; shaking table test; BFRP anchor cable; acceleration; displacement spectrum

1 引言

通过对大量地震边坡破坏情况调查表明,在地震烈度较小时,常规预应力锚索能有效限制坡体位移,具有良好的抗震性能^[1-2]。但是随着地震烈度的增大,常规的锚索难以发挥其锚固作用,最终导致锚固失效破坏,常会引发边坡失稳破坏的现象^[3-4]。另外,由于地下水及坡体内部腐蚀性化学物质存在的原因,会造成常规预应力锚索筋材出现侵蚀、损伤甚至破坏,从而引起锚固边坡整体失稳破坏的现象。因此,人们提出使用玄武岩纤维增强复合材料(basalt fiber reinforced plastics,简称BFRP)这一新材料代替传统钢筋锚索的方法。

BFRP具有很高的化学稳定性,在低温(约 $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$)至相对高温(约 $600\sim 800\text{ }^{\circ}\text{C}$)环境下均可使用,且其拥有质量轻、造价低、与注浆体黏结性能好、良好的抗疲劳能力及耐碱性等优点。此外,由于BFRP相对钢筋较高的抗拉强度和较低的弹性模量等优点^[5-6],能够更好地适应及协调坡体的变形,具有明显地边坡抗震效果。

在过去的研究中,大量学者对BFRP的物理力学性能方面进行了详细研究。Fiore等^[7]对BFRP的组成及其力学性能、热学性能和化学性能等进行了详细介绍。Ramachandran^[8]、Nasir^[9]及Prasad^[10]等都对BFRP的耐腐蚀能力进行了研究,结果表明BFRP具有优良的耐碱性能,且经过腐蚀后其力学性能优于玻璃纤维等其他材料。冯君等^[11]通过现场拉拔试验对比了BFRP锚杆和钢锚杆的承载能力和力学特性,发现两种材质锚杆的极限承载力相近,但BFRP锚杆轴力大于钢锚杆的轴力。Urbanski等^[12]对BFRP加固结构与传统钢筋加固结构相比的延性、变形性、极限应力和损伤机制等进行了对比研究。

在与混凝土的黏结性能研究方面,Francesca等^[13]通过一系列试验详细分析了BFRP加固混凝土梁的可行性;Yuan等^[14]通过新环氧锚的BFRP与混凝土黏结性能的试验,得到了其与混凝土的黏结强度提高了77.49%,峰值剪应力提高了78.1%,BFRP片材利用率提高了86.71%的结论;赵文^[15]、沈新^[16]等都通过试验对BFRP锚杆与混凝土的黏结性能进行了研究,得出了BFRP与混凝土的黏结强度大于与砂浆等其他材料的结论。

在边坡加固方面,高先建等^[17-18]通过室内性能试验及现场试验研究,确定了BFRP锚杆的主要性能参数、施工工艺和设计参数,并对成都某工程项目场地内开挖的基坑边坡进行了支护;邢飞^[19]、王安福^[20]等分别提出了采用BFRP锚杆(索)对岩质边坡及土质边坡进行加固的方案并验证了其可行性。此外,武志信等^[21]通过振动台试验,对钢锚杆(索)与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;李慈航等^[22-23]对地震作用下BFRP锚固结构的动力固坡效应进行了初步研究,结果表明BFRP锚索能够减小震害损伤破坏,具有良好的抗震性能。

通过上述研究发现,目前国内外学者对于BFRP锚杆的研究主要集中在其物理力学性能等方面,且研究手段主要以静力试验为主,而对于BFRP筋在地震作用下边坡支护工程中的动力响应特性研究还很欠缺。鉴于此,为了明确BFRP锚索在高烈度地震区高边坡防护中的加固效果,本文以功东高速公路中的大营盘高边坡为典型工点,开展了BFRP锚索+框架结构加固边坡及无支护边坡的振动台对比试验,旨在为BFRP锚索加固高边坡的动力合理性设计提供科学依据。

2 试验工点概况

云南功东高速公路大营盘高边坡地处川滇经向构造带与华夏系东北向构造带结合部位,分属康滇地轴和滇黔川鄂台坳地质构造单元,位于南北展布的小江断裂影响带内,该断裂为左旋走滑性压性断裂,平均水平滑移速率 10 mm/s ,区域稳定性较差。该地区地质简图如图1所示。

大营盘路堑高边坡(K39~K41)位于东川区大营盘村落东侧约200 m,龙东格路西侧约150 m,交通条件便利。路堑起止里程桩号K39+780~K41+120,全长1.34 km,线路走向约 345° ,沿路线地面高程为1 253.25~1 309.98 m,线路中心处设计高程为1 238.04~1 262.95 m。路堑区地貌类型属中低山侵蚀剥蚀堆积地貌,地形起伏较大,山体坡向 63° ,自然坡度一般为 $20^{\circ}\sim 45^{\circ}$,轴线经过处地面高程为1 253.25~1 309.98 m。

该边坡地层土由黏土、角砾与碎石组成。设计边坡分6级,1~6级坡高均为9 m,设计坡率1、2

级边坡为 1:0.75, 3~6 级坡率为 1:1.00。平台宽度除了 2、4 级宽度为 5 m 外, 其余平台宽度均为 2 m。大营盘边坡支护后效果如图 2 所示。

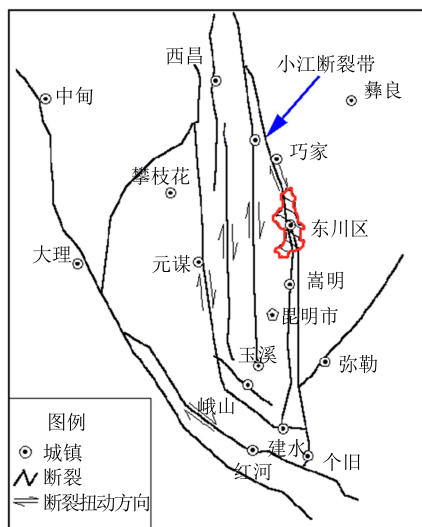


图 1 区域地质简图

Fig.1 Regional geological sketch



图 2 边坡支护后效果图

Fig.2 Slope support

3 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×6 m, 最大负荷质量 25 t, X、Z 向最大位移分别为 250、100 mm, 工作频率为 0.5~50.0 Hz^[24]。

3.1 试验相似比及材料的选取

本文所采用的相似关系计算方法为 Buckingham π 相似定理, 选取几何尺寸 L 、密度 ρ 和加速度 g 共 3 个物理量为基本控制物理量。本次模型试验的几何尺寸为 $C_L = 30$, 根据相似原理, 密度 $\rho_P = \rho_M$, 加速度 $a_P = a_M$, 故

$$\frac{F_P}{F_M} = 30 \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_P}{\sigma_M} = \frac{F_P / A_P}{F_M / A_M} = 30 \quad (2)$$

$$\frac{E_P}{E_M} = \frac{\sigma_P}{\sigma_M} \frac{\xi_P}{\xi_M} = 30 \quad (3)$$

式中: F 为惯性力; A 为面积; σ 为应力; E 为弹性模量; ξ 为应变; 下标 P、M 分别表示原型量和模型量。

其余模型参数可以根据量纲推得, 如表 1 所示。

表 1 振动台试验模型相似参数

Table 1 Similarity parameters of shaking table test model

模型构成	物理量	相似关系	相似参数
基本控制参数	长度 L	C_L	30
	密度 ρ	$C_\rho = 1$	1
	加速度 g	$C_g = 1$	1
	黏聚力	$C_c = C_\rho C_L C_g$	30
边坡模型材料	内摩擦角	C_ϕ	1
	弹性模量	$C_E = C_\rho C_L C_g$	30
	应力	$C_{\sigma 1} = C_\rho C_L C_g$	30
	应力	$C_{\sigma 2} = C_\rho C_L C_g$	30
支护结构材料	拉伸刚度	$C_{EA} = C_L^3 C_\rho C_g$	2.7×10^4
	应变	C_ξ	1
	抗拔力 F	$C_F = C_L^3 C_\rho C_g$	2.7×10^4
	时间	$C_t = C_L^{0.5} C_g^{-0.5}$	4.47
地震波	加速度	$C_a = C_g$	1
	频率	$C_W = C_L^{-0.5} C_g^{0.5}$	0.224

经过换算其部分相似比尺产生的“奇异”较大, 而在模型试验中要使得模型材料完全满足相似比尺的计算, 这在物理模型试验中几乎是不能实现的^[25]。考虑到本次试验主要为地震作用下的现象性质对比试验, 并不仅是坡体或结构本身, 故对这些相似材料的次要参数进行了忽略。

根据大营盘 (K39~K41) 边坡地质调查资料, 边坡揭露地层为第四系人工成因种植土、第四系中更新统冲洪积粉质黏土、角砾和碎石, 且边坡地层中以碎石为主。原型边坡中各地层的物理力学参数如表 2 所示。

表 2 地层物理参数

Table 2 Soil physical parameters

地层名称	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 ϕ / (°)	压缩模量 E_s / MPa	基底摩擦系数 μ
粉质黏土	22	20	13	0.25
角砾	6	35	37	0.45
碎石	6	39	42	0.50

本试验坡体材料选择按照碎石地层来模拟, 考虑到影响岩土体相似材料强度指标的因素较多, 本

次试验采用正交设计方法进行相似材料的抗剪强度参数直剪试验,以黏聚力和内摩擦角作为控制指标。共选取了4种配合比进行试验,将直剪试验所得结果按照相似比进行计算,并与坡体原型中碎石的物理参数进行对比,如图3所示。

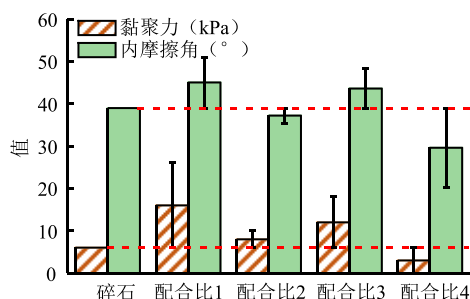


图3 各配合比物理参数对比图
Fig.3 Comparison of physical parameters of each mix ratio

通过图3可得,配合比2所测得的黏聚力为8 kPa、内摩擦角为 37.2° ,与碎石的物理力学参数最为接近,故本次试验按照配合比2来进行模拟岩土体,其中配合比2中黏土:河砂:石膏:水的质量比为3:11:1:1。坡体的材料以河砂为主要材料,以石膏粉、黏性土为辅助材料。

3.2 模型的设计与制作

模型箱用2 cm厚钢板外加等边角钢焊接作为其主体框架,模型箱的内槽尺寸为 $2.8\text{ m} \times 1.4\text{ m} \times 1.85\text{ m}$,模型长边采用2 cm厚透明玻璃钢,可便于观察模型变化。本次试验为水平竖直双向耦合(XZ)振动试验,在模型箱水平振动方向上采用2 cm厚钢板进行围护。为了减少模型与箱体之间的接触摩擦作用,在模型箱的内表面涂上凡士林,并在箱体侧面及背面设置泡沫层,该泡沫垫层主要是模拟截断的介质土体对有限域土体介质的弹性支持作用,且同时提供了部分阻尼的作用,减弱了模型边界上的地震波反射效应。

将黏土、河砂、石膏、水按质量比3:11:1:1的配合比配制模拟岩土体,在填筑过程中采用分层填筑、分层夯实的步骤进行,每层填筑厚度约为20 cm,试验模型填筑过程如图4(a)所示。当模型填筑到一定高度时,在右幅边坡中由下至上依次植入直径为4 mm的BFRP锚索,整个模型填筑完成后,安装框架梁并对锚索进行锁锚,如图4(b)所示。本次试验分为两幅,中间采用5 cm厚聚苯乙烯防震泡沫隔开,左幅为无支护边坡,右幅为BFRP锚索+框架结构对边坡进行支护。制作完成的试验模型如图4(c)所示。

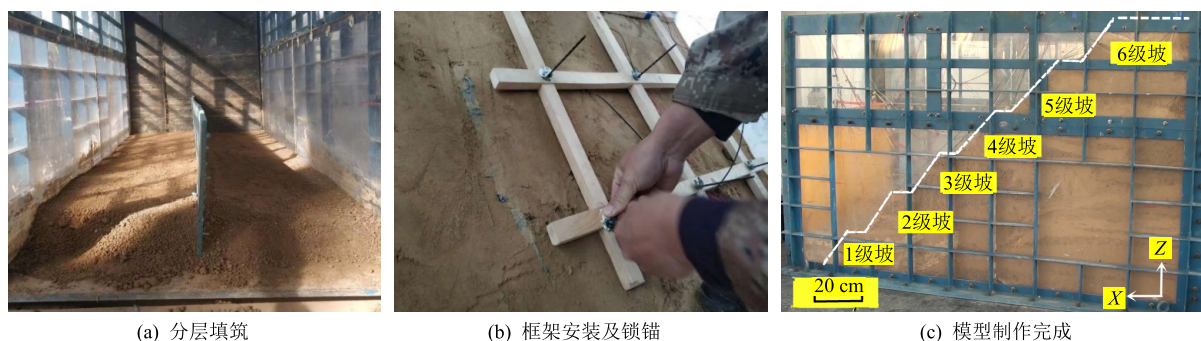


图4 模型制作过程
Fig.4 Model preparation procedures

3.3 测试断面及原件布置

考虑到模型箱边界效应的影响,将加速度传感器分别布置在左右两幅边坡的主断面1-1和2-2断面上,如图5所示。在左右两幅边坡的3~6级坡中心垂直距离为10 cm位置处各布置一个加速度传感器,在4级坡沿竖向位置各增设一个加速度传感器,5级坡沿竖向位置各增设两个加速度传感器,竖向传感器之间的距离均为30 cm。支护侧边坡中1~5级坡中布置长度为75 cm的锚索,其中锚固段为30 cm。在6级坡中布置长度为35 cm的锚索,其中,

锚固段为15 cm。右幅支护侧边坡中加速度传感器及锚索布置图如图6所示,左幅边坡中传感器布置的位置与右幅边坡的相对应,加速度编号对应为N1~N7。

3.4 加载制度设计

本次试验采用了XZ双向耦合作用下的LD(鲁甸)地震波进行了加载,加载方向为X方向。当输入波峰值为0.1g时振动台台面测点处的LD地震波加速度时程曲线如图7(a)所示,采样时间间隔为 $\Delta T = 0.001\ 562\ 5\text{ s}$,加速度峰值为0.059g,主振时

长约为 2.7~4.2 s, 共 1.5 s 时间; LD 波的傅氏谱如图 7(b)所示, 可得其卓越频率为 6.0~8.0 Hz, 最大振幅约为 0.019。

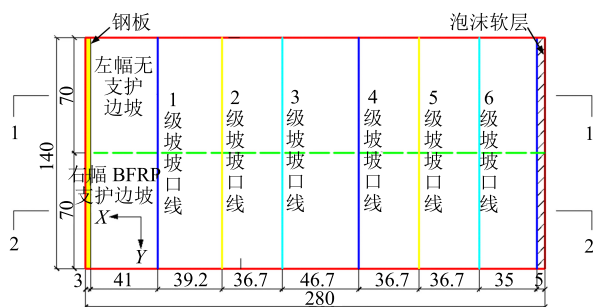


图 5 左右两幅边坡俯视图 (单位: cm)

Fig.5 Top view of left and right slopes (unit: cm)

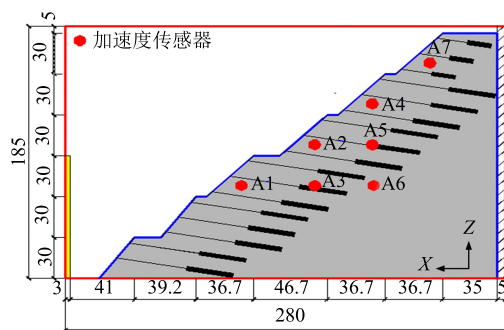
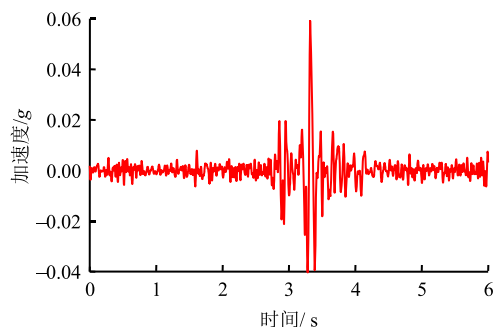
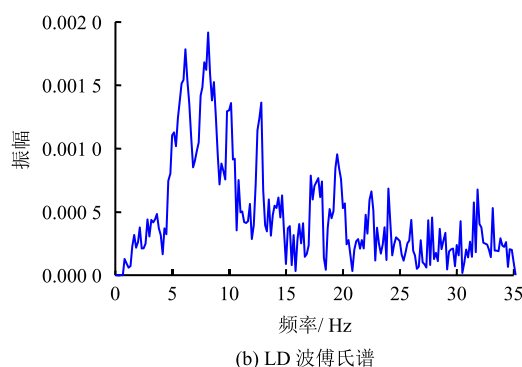


图 6 右幅边坡结构布置图 (单位: cm)

Fig.6 Right side slope structure layout (unit: cm)



(a) LD 波加速度时程曲线



(b) LD 波傅氏谱

图 7 LD 波加速度时程曲线及傅氏谱

Fig.7 LD wave acceleration time history curve and Fourier spectrum

试验开始前先进行正弦扫频激励的微振试验, 以测定模型的动力特性。在加速度峰值改变时, 均输入 0.05g 的正弦扫频, 观察模型动力特性的变化情况。具体加载制度如图 8 所示。

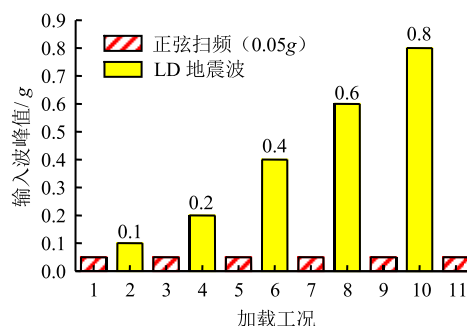


图 8 加载制度示意图

Fig.8 Schematic diagram of loading conditions

4 振动台试验结果分析

本次试验对 BFRP 锚索支护边坡及无支护边坡的加速度响应情况及位移谱响应情况进行了对比分析, 并着重探讨了低震 (0.2g)、中震 (0.4g)、强震 (0.6g) 地震波作用下左右两幅坡体的动力响应情况。

4.1 加速度放大系数分析

采用加速度放大系数 (PGA) 对边坡响应加速度的放大效应进行研究, 以右幅边坡中 A1 测点的加速度放大系数为例进行说明: 假设在某一地震波作用下 A1 测点加速度时程曲线中的最大值为 $\max(A1)$, 而此时台面测点加速度时程曲线中的最大值为 $\max(\text{台面})$, 则加速度放大系数 α 为

$$\alpha = \frac{\max(A1)}{\max(\text{台面})} \quad (4)$$

绘制出各工况的鲁甸波作用下, BFRP 锚索支护边坡和无支护边坡坡体表面及内部加速度放大系数与输入地震波峰值的关系曲线 (左幅边坡坡体内部 N5 测点出现了损坏, 对其影响忽略不计) 如图 9、10 所示。随着输入波峰值的增大, 同一幅边坡中坡体表面和坡体内部加速度放大系数变化趋势基本一致。

由图 9(a)及 10(a)可得, 对于右幅 BFRP 锚索支护边坡而言, 当输入波峰值不大于 0.2g 时, 即小振幅地震波激励作用下, 边坡体处于弹性阶段, 各测点加速度放大系数随着输入波峰值的增大呈线性减小趋势。在 0.4g 的地震波输入后, 除了坡体表面 A1、A7 测点外, 坡体表面及内部中其余测点的加速度放大系数均呈现减小趋势。综合边坡变形破坏

情况,分析其原因是:在 $0.4g$ 及 $0.6g$ 的地震波作用下,右幅边坡可能在 4、5 级坡体表面出现裂缝,表明 4、5 级坡体中可能出现了一定的土体损伤情况,致使土体对于地震波的吸收作用增强。因此,才会导致 4、5 级坡体表面的 A2、A4 测点,5 级坡体内部 A5、A6 测点的加速度放大系数持续减小的现象。

如图 9(b)及 10(b)所示,对于左幅无支护边坡而言,当输入波峰值不大于 $0.2g$ 时,边坡体同右幅边坡一样可处于弹性阶段。但是在 $0.2g$ 地震波输入之后,各测点加速度放大系数与输入波峰值的关系曲线呈现锯齿形分布状态。分析其原因是在 $0.2g$ 的地震波作用之后,坡体已产生局部破坏,坡体几何形态和受力状况的改变对加速度的传播规律造成影响。当输入波峰值为 $0.2g \sim 0.4g$ 时,随着输入波峰

值的增大,各测点加速度放大系数均减小,说明在此过程中,土体动剪切模量减小,阻尼比增大,可认为此时坡体处于塑性状态。当输入波峰值为 $0.4g \sim 0.6g$ 时,各测点加速度放大系数增大,可认为坡体处于塑性增强状态。当输入波峰值为 $0.6g \sim 0.8g$ 时,各测点加速度放大系数再次减小,此时坡体处于破坏阶段。

综合上述分析结合第 5 节坡体破坏变形情况可得,在整个地震波输入过程中,BFRP 锚索支护的边坡及无支护边坡的变形阶段有所不同,为了分析主要变形阶段坡体的动力响应情况,本文以无支护边坡的变形阶段为准,选择坡体分别处于弹性、塑性和破坏状态下的 $0.2g$ 、 $0.4g$ 、 $0.6g$ 工况作为特征工况,并将这 3 种工况分别视为低震、中震和强震。

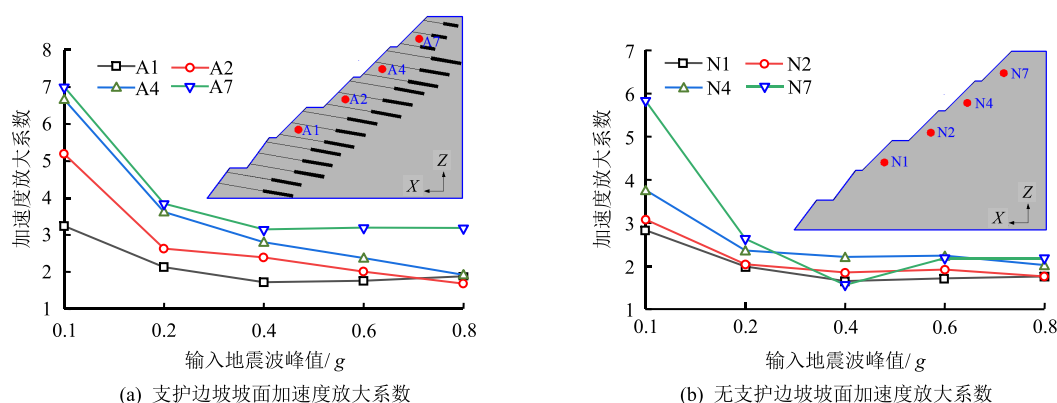


图 9 左右两幅边坡坡面加速度放大系数与输入波峰值关系
Fig.9 Relationship between the acceleration amplification factor of the left and right slopes and the peak value of the input wave

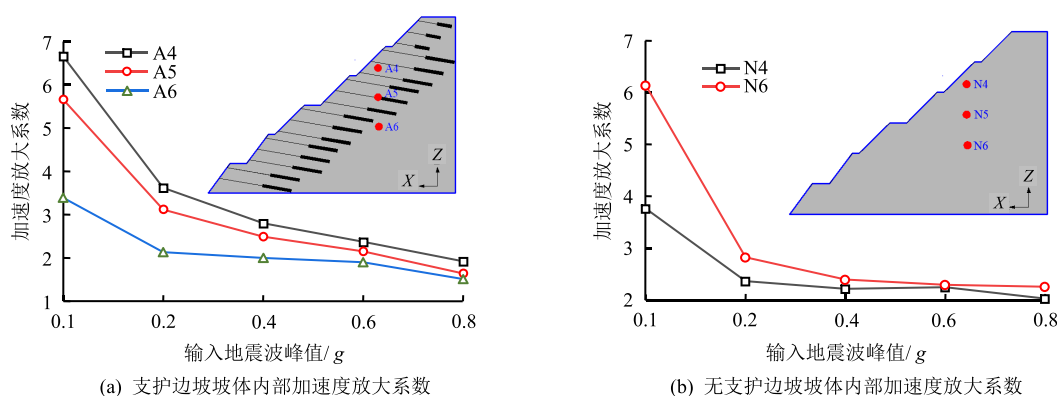


图 10 左右两幅边坡坡体内部加速度放大系数与输入波峰值关系
Fig.10 Relationship between the internal acceleration amplification factor of the left and right slopes and the peak value of the input wave

4.2 加速度峰值分析

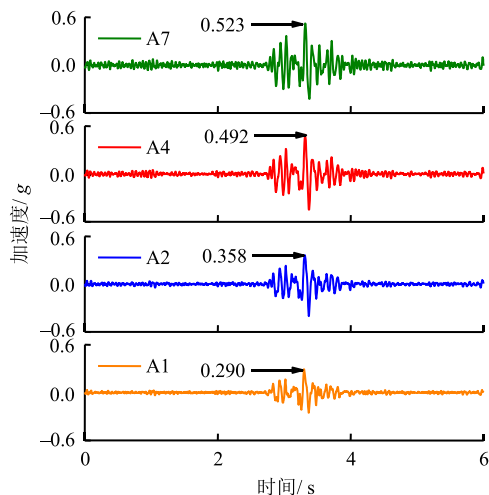
选择输入波峰值为低震 ($0.2g$)、中震 ($0.4g$)、强震 ($0.6g$) 时左右两幅边坡表面测点 A1 (N1)、A2 (N2)、A4 (N4)、A7 (N7) 的加速度时程曲线

进行分析,如图 11 所示。

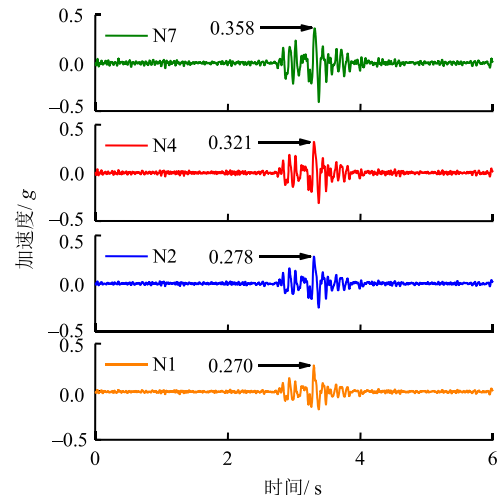
由图 11 可得,随着输入波峰值的增大,各测点的加速度峰值也在不断增大。同时,对右幅 BFRP 锚索支护边坡而言,在各工况的地震波作用下,随

着测点布置高度的增大,其加速度峰值也在增大,A7测点的加速度峰值最大,A1测点的加速度峰值最小,产生这种现象的原因是加速度沿高程放大效应、趋表效应及鞭梢效应所造成的。

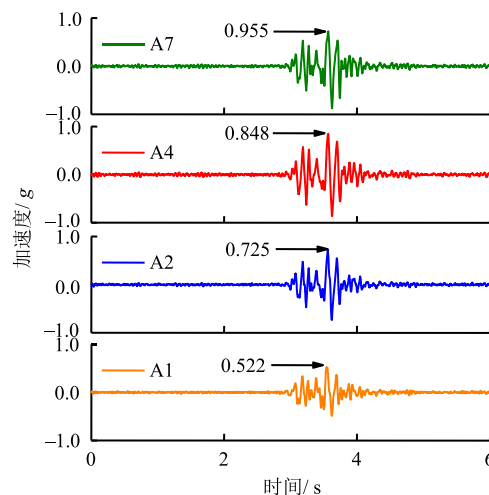
对左幅无支护边坡而言,除了中震(0.4g)地震波及强震(0.6g)地震波作用下,边坡顶部N7测点的加速度峰值沿高程出现减小现象外,其余测点均随着布置高度的增大,加速度峰值也存在着逐



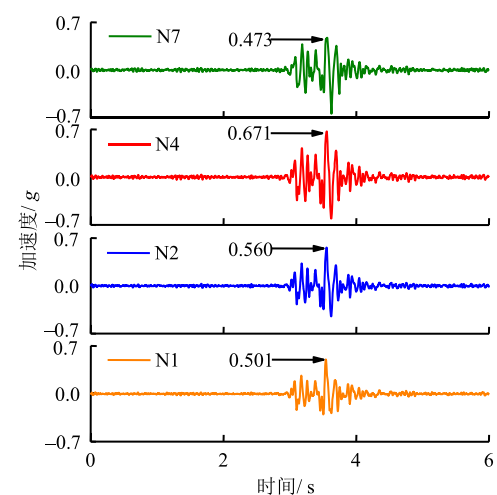
(a) 低震(0.2g)右幅边坡加速度时程曲线



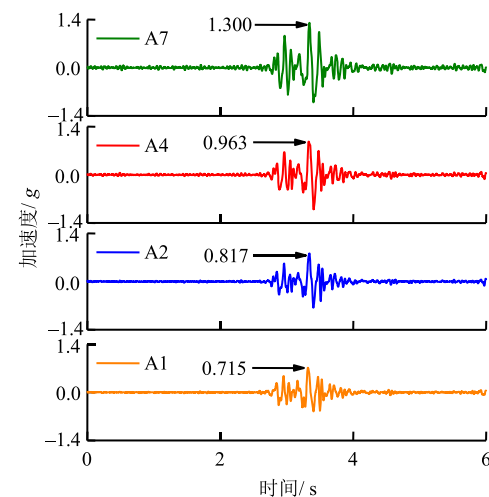
(b) 低震(0.2g)左幅边坡加速度时程曲线



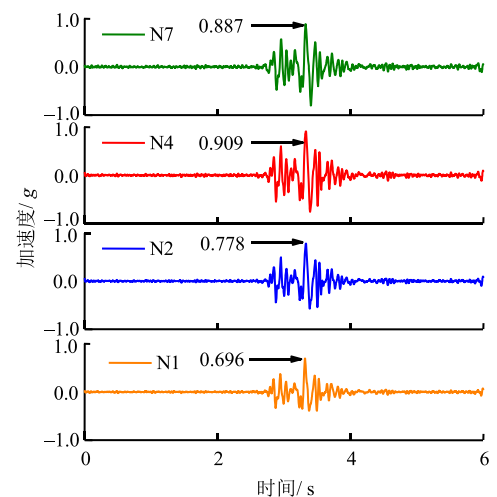
(c) 中震(0.4g)右幅边坡加速度时程曲线



(d) 中震(0.4g)左幅边坡加速度时程曲线



(e) 强震(0.6g)右幅边坡加速度时程曲线



(f) 强震(0.6g)左幅边坡加速度时程曲线

图 11 左右两幅边坡坡面各测点加速度时程曲线

Fig.11 Acceleration time-history curve of each measuring point on the left and right slopes

渐增大的现象。分析 0.4g 和 0.6g 地震波作用下, N7 测点加速度峰值减小的原因是,在较强的地震波激励作用下,坡体顶部 N7 测点附近土体出现了坍塌现象,致使该处坡体刚度减小,对地震波的吸收作用增强而造成的。

对比同一工况的地震波作用下,左右两幅边坡对应位置测点的加速度峰值可发现,右幅 BFRP 锚索支护边坡的加速度峰值均要大于左幅无支护边坡的加速度峰值。结合 4.1 节,分析其原因是:相较于无支护边坡而言,BFRP 锚索提高了边坡的整体刚度,坡体稳定性能较好,致使坡体阻尼减小所造成的。

4.3 边坡位移谱分析

地震反应谱(包括位移谱、加速度谱、速度谱)主要反映地震对结构的影响,并能够表征出结构的固有频率(周期),因此,其被广泛用于评估结构的动力响应过程中。本节选取输入波为低震(0.2g)、中震(0.4g)、强震(0.6g)时左右两幅边坡表面测

点 A1(N1)、A2(N2)、A4(N4)、A7(N7)的位移谱来研究坡体的动力变形情况。图 12、13 分别给出了低震(0.15g)、中震(0.4g)、强震(1.4g)地震波作用下左右两幅边坡的位移谱分布图。

由图 12(a)、13(a)可得,低震作用下,左右两幅边坡的位移谱幅值均小于 1.3 cm,坡体位移均很小,结合 4.1 节分析,可认为左右两幅边坡在低震情况下处于弹性状态。由图 12(b)、13(b)可得,中震作用下,左右两幅边坡的位移谱幅值均小于 1.9 cm,且随着测点布置高度的增大,其位移谱也在逐渐增大,位移谱最大值均出现在坡体顶部 N7 和 A7 测点处,其值分别为 1.86 cm 和 1.66 cm。分析其原因是在 0.4g 的地震波作用下,左右两幅边坡顶部均出现了一定的位移现象。由图 12(c)、13(c)可得,强震作用下,左右两幅边坡的位移谱最大值仍出现在坡体顶部 N7 和 A7 测点处,其值分别为 12.2 cm 和 4.36 cm, BFRP 锚索支护边坡的位移较无支护边坡位移而言要小的多。

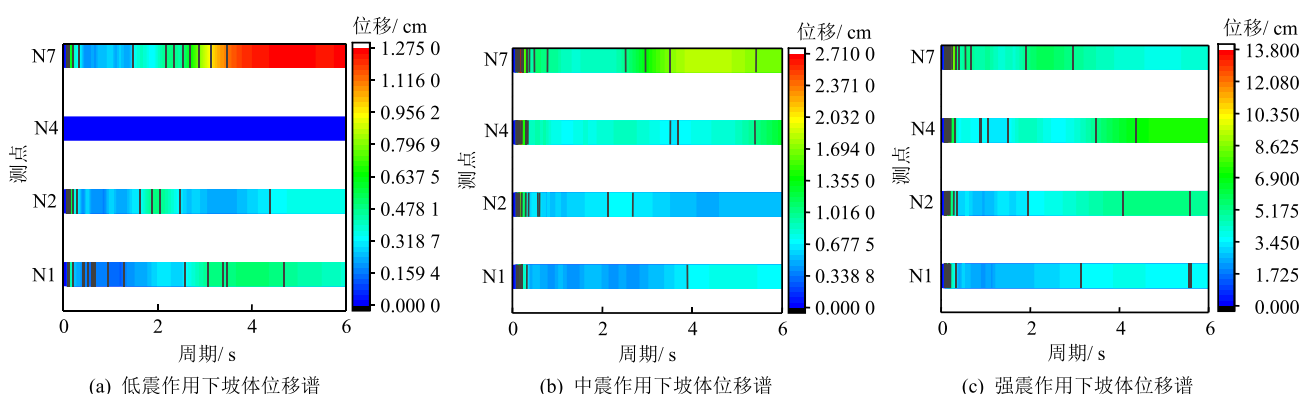


图 12 左幅边坡坡面各测点位移谱分布图
Fig.12 Displacement spectrum of each measuring point on the left slope

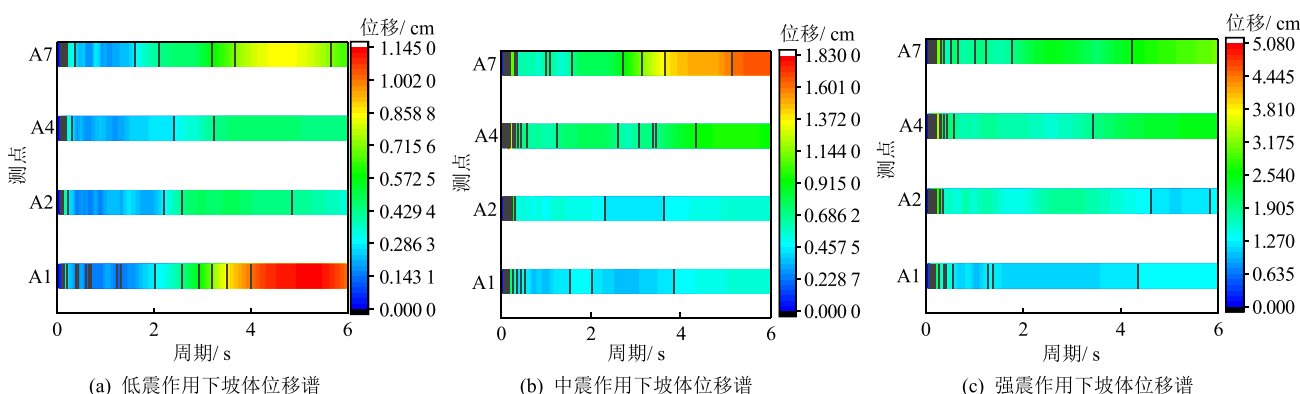


图 13 右幅边坡坡面各测点位移谱分布图
Fig.13 Displacement spectrum of each measuring point on the right slope

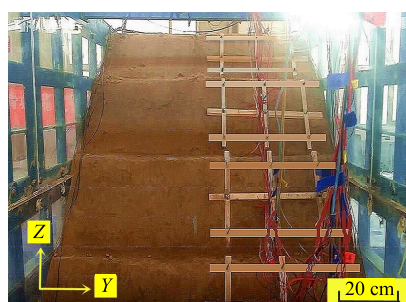
综上所述,同一工况的地震波作用下,左幅边坡中各测点位移谱值均要大于右幅边坡对应测点的

位移谱值,且随着输入波峰值的增大,两幅边坡坡面位移的差值在不断增大。表明 BFRP 锚索用于边

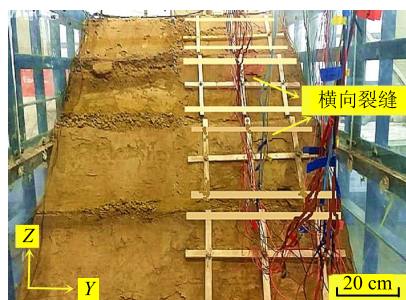
坡支护工程中时,可以很好地限制坡体变形,有利于提高坡体的抗震性能。

5 边坡变形破坏机制分析

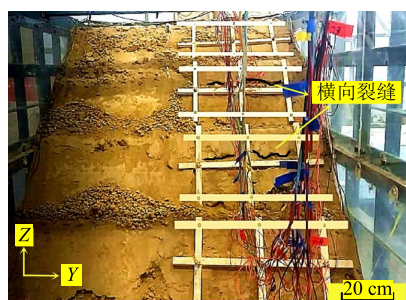
选择输入波为低震(0.2g)、中震(0.4g)、强震(0.6g)时左右两幅边坡的坡体变形情况来分析,具体如图14所示。



(a) 0.2g 地震波作用下坡体变形



(b) 0.4g 地震波作用下坡体变形图



(c) 0.6g 地震波作用下坡体变形图

图14 左右两幅边坡坡体变形图

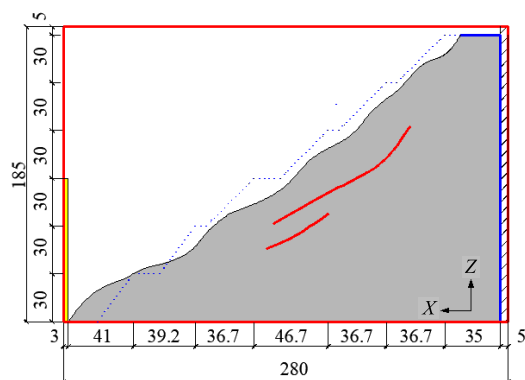
Fig.14 Deformation of left and right slopes

如图14(a)所示,在0.2g的地震波作用下,左右两幅边坡均未出现明显的变形情况,结合3.1节分析其原因是,当输入地震波峰值小于0.2g时,左右两幅边坡均处于弹性状态。当输入波峰值加载到0.4g时,如图14(b)所示,右幅BFRP边坡在4级坡出现了一条长度约12 cm的横向裂缝,在5级坡出现了一条长度约8 cm的横向裂缝,而左幅无支护边坡在6级坡坡脚及5级坡坡顶位置处出现了土体损伤现象,致使土体刚度减小,阻尼比增大,因此,

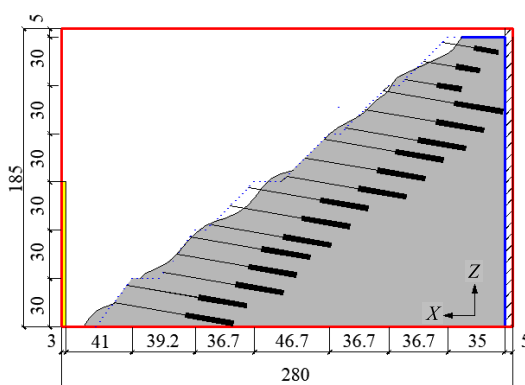
才会导致图9(b)中N7测点在0.4g的地震波作用下加速度放大系数骤降的情况。

在0.6g地震波作用下,左右两幅边坡的变形情况如图14(c)所示,由图可得,左幅边坡在4~6级坡中均出现了土体坍塌现象,坡体已形成部分坡面流现象。相较而言,右幅BFRP锚索支护边坡只在4级坡及5级坡坡中位置出现了两条横向裂缝,坡体变形情况较小。

图15(a)、15(b)分别为极振工况(0.8g)下左右两幅边坡的变形效果图。如图15(a)所示,对左幅无支护边坡而言,坡体表面基本已形成坡面流现象,同时,在3~5级坡位置中出现了两条斜向裂缝,整个坡体破坏情况严重。图15(b)为右幅BFRP锚索支护边坡的坡体变形效果图,相较于左幅边坡而言,其只在6级坡和3级坡中出现了土体坍塌现象,且坡体中未见明显裂缝产生,相较于无支护边坡而言,右幅边坡能够保持良好的整体性能。



(a) 左幅边坡变形效果图



(b) 右幅边坡变形效果图

图15 左右两幅边坡坡体变形效果图(单位: cm)

Fig.15 Deformation illustration of the left and right slopes (unit: cm)

6 结论

本文通过大型振动台试验,对BFRP锚索框架结构支护边坡与无支护边坡的加速度响应特性及位

移谱进行了对比分析, 所得主要结论如下:

(1) 在 0.2g 地震波作用之前, BFRP 锚索支护边坡及无支护边坡均能保持弹性状态, 且在整个加载过程中, 无支护边坡具有明显地变形阶段。

(2) 由于加速度沿高程放大效应、趋表效应及鞭梢效应的存在, 使得左右两幅边坡中加速度峰值出现了随测点布置高度的增大而逐渐增大的现象。

(3) BFRP 锚索支护边坡的加速度峰值均要大于无支护边坡的加速度峰值, 表明相较于无支护边坡而言, BFRP 锚索可有效提高边坡的刚度。

(4) 同一工况的地震波作用下, 无支护边坡中各测点位移谱值均要大于 BFRP 锚索支护边坡对应测点的位移谱值, 表明 BFRP 锚索用于边坡支护工程中时, 可以很好的限制坡体变形, 有利于提高坡体的抗震性能。

参考文献

- [1] 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 Ying-ren, LI An-hong, et al. Shaking table test study of slope prestressed anchor cable under earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Suppl.1): 2847-2854.
- [2] 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 Zhi-bo, TAO Lian-jin, SHI Ming. Stability analysis of prestressed anchor cable slope under seismic loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(11): 3604-3612, 3631.
- [3] 言志信, 刘春波, 龙哲, 等. 含软弱层顺倾岩体边坡锚固地震响应试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(12): 2180-2188.
YAN Zhi-xin, LIU Chun-bo, LONG Zhe, et al. Experimental study on seismic response of anchorage of bedding rock slope with weak layer[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(12): 2180-2188.
- [4] 叶帅华, 赵壮福, 朱彦鹏. 框架锚杆支护黄土边坡大型振动台模型试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4240-4248.
YE Shuai-hua, ZHAO Zhuang-fu, ZHU Yan-peng. Large-scale shaking table model test study on loess slopes supported by frame bolts[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(11): 4240-4248.
- [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 Zhi-yong, WU Gui-qin, MA Li-guo, 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.
- [6] BAENA M, LLUÍS TORRES, 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] FIORE V, SCALICI T, DI BELLA G, et al. A review on basalt fibre and its composites[J]. **Composites Part B Engineering**, 2015, 74: 74-94.
- [8] RAMACHANDRAN B E, VELPARI V, BALASUBRAMANIAN N. Chemical durability studies on basalt fibres[J]. **Journal of Materials Science**, 1981, 16: 3393-3397.
- [9] NASIR V, KARIMPOUR H, TAHERI-BEHROOZ F, et al. Corrosion behaviour and crack formation mechanism of basalt fibre in sulphuric acid[J]. **Corrosion Science**, 2012, 64: 1-7.
- [10] PRASAD V V, TALUPULA S. A review on reinforcement of Basalt and aramid (Kevlar 129) fibers[C]//7th International Conference of Materials Processing and Characterization. [S. l.]: Elsevier, 2018: 5993-5998.
- [11] 冯君, 王洋, 张俞峰, 等. 玄武岩纤维与钢筋锚杆锚固性能现场对比试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4185-4193.
FENG Jun, WANG Yang, ZHANG Yu-feng, et al. Field comparative test study on the anchorage performance of basalt fiber and reinforced anchor[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(11): 4185-4193.
- [12] URBANSKI MAREK, LAPKO ANDRZEJ, GARBACZ ANDRZEJ. Investigation on concrete beams reinforced with Basalt rebars as an effective alternative of conventional R/C structures[J]. **SciVerse ScienceDirect**, 2013, 57: 1183-1191
- [13] FRANCESCA N, GIUSEPPE V. Experimental investigation on the debonding failure mode of basalt-based FRP sheets from concrete[J]. **Composites Part B Engineering**, 2018, 153: 205-216.
- [14] YUAN C, CHEN W, PHAM T M, et al. New epoxy anchor for better bonding between FRP sheets and concrete[J]. **Construction and Building Materials**, 2020,

- 248: 118628.
- [15] 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.
- [16] 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 Xing-yu, LU Jia-ying. Experimental study on the bonding properties of basalt fiber (BFRP) bars and concrete[J]. **Journal of Transportation Engineering and Information**, 2010, 8(3): 124-130.
- [17] 高先建. 玄武岩纤维增强复合锚杆支护土质边坡设计方法的试验研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- GAO Xian-jian. Experimental study on the design method of basalt fiber reinforced composite bolt supporting soil slope[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [18] 高先建, 谢强, 赵文, 等. 非预应力 BFRP 锚杆加固土质边坡设计参数确定试验研究[J]. 公路交通科技, 2017, 34(7): 20-28, 36.
- GAO Xian-jian, XIE Qiang, ZHAO Wen, et al. Experimental study on determination of design parameters for soil slope reinforced by non-prestressed BFRP anchors[J]. **Highway Transportation Science and Technology**, 2017, 34(7): 20-28, 36.
- [19] 邢飞, 陈浩浩, 温耿马. BFRP 筋锚杆土质边坡支护应用研究[J]. 城市地理, 2017(14): 140-141.
- XING Fei, CHEN Hao-hao, WEN Geng-ma. Application research of bfrp reinforced anchor rod soil slope support[J]. **Urban Geography**, 2017(14): 140-141.
- [20] 王安福, 赵文, 李勇, 等. 公路岩质边坡 BFRP 锚杆(索)支护设计及应用研究[J]. 湖南交通科技, 2017, 43(3): 10-13, 17.
- WANG An-fu, ZHAO Wen, LI Yong, et al. Design and application of BFRP anchor (cable) support for highway rock slope[J]. **Hunan Transportation Science and Technology**, 2017, 43(3): 10-13, 17.
- [21] 武志信, 吴红刚, 谢显龙, 等. 高边坡防护中 BFRP 锚固结构的振动台试验[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2019, 30(6): 94-104.
- WU Zhi-xin, WU Hong-gang, XIE Xian-long, et al. Shaking table test of BFRP anchor structure in high slope protection[J]. **Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention**, 2019, 30(6): 94-104.
- [22] 李慈航. 地震作用下 BFRP 锚索框架加固边坡的动力响应研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2019.
- LI Ci-hang. Research on dynamic response of BFRP anchor frame reinforced slope under earthquake action[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2019.
- [23] 李慈航, 吴红刚, 马宁. 地震作用下 BFRP 锚固结构动力固坡效应研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(增刊 2). DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0824.
- LI Ci-hang, WU Hong-gang, MA Ning. Research on dynamic slope fixing effect of BFRP anchored structure under earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(Suppl.2). DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0824.
- [24] 郑静, 牛文庆, 吴红刚, 等. 微型桩大型振动台试验—坡体及桩动力特性研究[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(9): 22-28.
- ZHENG Jing, NIU Wen-qing, WU Hong-gang, et al. Large-scale shaking table test of micro-pile-research on dynamic characteristics of slope and pile[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2017, 34(9): 22-28.
- [25] 王志佳, 张建经, 付晓, 等. 模型试验的分离相似设计方法——以锚索格构加固边坡模型试验为例[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2617-2623.
- WANG Zhi-jia, ZHANG Jian-jing, FU Xiao, et al. Separation and similarity design method of model test: taking model test of anchor rope lattice reinforced slope as an example[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(9): 2617-2623.