

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2020.02.13

BFRP 锚杆加固斜坡对地震动的响应特征 ——以功东高速响水河边坡为例

王秋懿¹, 吴红刚², 张金江¹, 李天能¹

(1. 云南省交通投资建设集团投资有限公司, 云南 昆明 650228;

2. 中铁西北科学研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 功东高速公路地震活动主要受小江断裂带控制, 该活动断裂带曾经发生了多次破坏性强震, 地震作用造成的边坡失稳以及对原有支护结构的损坏, 对公路交通运营带来了极大的安全隐患, 严重威胁着人民的生命和财产安全。鉴于此, 本文通过振动台试验, 对无支护边坡与 BFRP 锚固边坡在 EL 地震波作用下的加速度及动应力响应情况进行了研究, 旨在为高速公路边坡的抗震设计提供一定的理论支撑, 得到以下结论: (1) 当输入地震波加速度峰值相同时, 对应的高程处, 无支护侧坡面的加速度放大系数比支护侧的加速度放大系数要大, 表明 BFRP 锚固结构对边坡的加速度放大系数起到了有效地抑制作用, 从而提高了边坡的整体稳定性。(2) 由于地震波在坡体内传播介质不均匀的原因, 使得坡面各测点加速度放大系数随输入地震波加速度峰值的增大并非呈现线性增加的关系, 而是一种“锯齿状”的变化趋势。(3) BFRP 锚固结构加固边坡二级坡面附近单元体压应力最大, 坡体内部在三级坡后单元体压应力最大, 而无支护边坡坡面主要承受边坡上部的拉应力, 边坡体内单元体受力并不均匀, 表明 BFRP 锚固结构可以改变边坡单元体的受力状态。

关键词: BFRP 锚杆; 振动台试验; 加速度动力响应; 动应力响应

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2020)02-0094-08

Response of the slope reinforced with BFRP anchors to earthquake: a case study of the slope at the Xiangshui River

WANG Qiuyi¹, WU Honggang², ZHANG Jinjiang¹, LI Tianneng¹

(1. Yunnan Transportation Investment Construction Group Investment Co., Ltd, Kunming, Yunnan 650228, China; 2. China Northwest Research Institute Co. Ltd. of CREC, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: The seismic activity of Gongdong Expressway is mainly controlled by Xiaojiang fault zone, which has experienced many destructive strong earthquakes. The slope instability caused by the earthquake and the damage to the original supporting structure have brought great safety risks to the highway traffic operation and seriously threatened the safety of people's lives and property. This paper studies the acceleration and dynamic stress responses of unsupported slope and BFRP anchorage slope under the action of EL seismic wave through shaking table test, aiming to provide certain theoretical support for the seismic design of expressway slope, and the following conclusions are obtained: (1) when the peak acceleration of the input seismic wave is same, the acceleration amplification coefficient of the slope without support is larger than that of the supporting side at the same elevation, which indicates that BFRP anchorage structure can effectively inhibit the acceleration amplification, thereby it can improve the overall slope stability. (2) Due to the inhomogeneity of slope soil,

收稿日期: 2019-07-08; 修订日期: 2019-08-21

基金项目: 国家重点研发计划资助(2018YFC1504903); 云南省交通运输厅(云交科教(2017)37号-(1))

第一作者: 王秋懿(1977-), 男, 云南曲靖人, 土木工程专业, 本科, 高级工程师, 主要从事高速公路工程研究。E-mail: 951549901@qq.com

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

the acceleration amplification coefficient at different measuring point in the slope increased nonlinearly with the peak acceleration of input seismic wave, and shows a “zigzag” change trend. (3) the surface of secondary slope with the largest compressive stress, slope surface without supporting is mainly bear the tensile stress from the upper slope, the slope unit stress in slope body is not uniform, shows that BFRP slope anchor structure can change the stress state of the slope units.

Keywords: BFRP anchor; shaking table test; acceleration response; dynamic stress response

0 引言

BFRP 锚杆是以玄武岩纤维为增强材料,环氧树脂为基体材料,采用纤维浸渍含有固化剂的环氧树脂胶液,经过拉挤而形成的一种新型材料。具有抗腐蚀性好、耐久性好、抗拉强度高、低松弛性及抗震性能优越等特点。同时,由于 BFRP 筋材的弹性模量较钢筋低,约为钢筋的 1/4,作为锚杆使用相对钢锚杆而言,可较少的影响锚固体与围岩的黏结状态,也具有更好的适应坡体变形的能力^[1-2]。

目前,因其优越的物理-化学性能,BFRP 筋已经越来越多的应用于边坡锚固设计和工程建设当中,但对于 BFRP 锚杆的研究大多停留在材料力学性能应用层面,曹晓峰等^[3]、杨国梁^[4]、高先建等^[5]、王洋^[6]从锚杆直径、锚固段长度和锚固地层岩性等方面通过一系列现场抗拉伸试验、抗剪试验,研究了玄武岩纤维锚固系统极限抗拉强度、荷载位移关系、杆体轴力分布和剪应力分布状态等,对 BFRP 锚固结构的应用起到了理论的推动作用。但是这些试验都是针对单根锚杆锚固系统进行的,并未对 BFRP 锚固系统和边坡的协同工作性能展开研究,尤其地震作用下 BFRP 锚固边坡的结构-边坡协同工作性能方面的研究目前还很滞后。

高先建^[7]通过 FLAC^{3D} 数值模拟计算了 BFRP 锚杆和钢筋锚杆加固基坑边坡的支护效果,认为 BFRP 锚杆可以有效的加固边坡,较好的控制边坡位移,且加固效果与钢筋锚杆相当,边坡破坏模式与钢筋锚杆加固边坡相同。王安福等^[8]通过实际工程应用中 BFRP 锚杆(索)受力特征长期监测,并传统钢筋锚杆和钢绞线锚索受力进行对比,验证 BFRP 锚杆(索)在公路岩质边坡支护中的可行性。赵文等^[9]将 BFRP 筋作为锚杆,对其抗拉强度设计值、与砂浆黏结强度取值进行了实验研究,通过 BFRP 筋材和钢筋锚杆加固土坡的现场对比试验,分析了 BFRP 锚杆加固土质边坡的效果,表明两种锚杆受力和边坡变形类似,验证了 BFRP 筋作为岩土支护锚杆的适用性。

通过上述研究发现,对于 BFRP 锚杆在动力情况

下支护边坡的研究还有所欠缺,为了明确地震作用下 BFRP 锚固系统加固边坡的抗震效果,本文通过振动台试验的方式,对无支护边坡与 BFRP 锚固边坡在 EL-Centro 地震波作用下的加速度及动应力响应情况进行研究,旨在为高速公路边坡的抗震设计提供一定的理论支撑。

1 试验方案及过程

1.1 振动台模型试验概况

本次试验场地位于甘肃省地震局黄土地震工程研究室,振动台台面有效尺寸为 4 m × 6 m,试验所用的模型箱是由钢板、型钢和有机玻璃制作的刚性箱,尺寸为 2.85 m × 1.45 m × 1.8 m,为了便于填料,模型箱一端开口,配备可自由拆卸的挡板。为了减小振动波在边界的反射作用,在地震波水平传播方向的箱体后壁内衬 3 cm 厚的缓震泡沫,用来模拟吸波材料^[10]。采用在线迭代控制加载方式,振动台工作输入信号包括:位移时程、速度时程、加速度时程、反应谱和功率谱,可以输入规则波、随机波、地震波和人造波等。

试验模型依托工点为云南省功东高速公路沿线里程 K5 + 660 附近的响水河路堑边坡,边坡高度为 29.5 m,边坡坡面形式为三级坡,采用锚索框架结构作为边坡加固措施,该区域位于小江断裂带影响范围内,是我国地震活动多发地带,地震基本烈度高达 IX 度,因此开展该地区边坡的地震动力响应模型试验具有重要意义。

1.2 模型相似设计

根据此次试验条件和目的,本文在全面、综合考虑各种因素的基础上,主要考虑选取试验的 9 个关键物理量:容重 γ 、位移 δ 、应变 ε 、几何尺寸 l 、应力 σ 、泊松比 u 、弹性模量 E 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,按相似理论,借助因次分析法推导模型与原型的相似准则^[11],然后按相似判据进行模型设计和试验,其函数关系式为:

$$f(l, \delta, \gamma, \varepsilon, E, \sigma, u, c, \varphi) = 0 \quad (1)$$

以几何尺寸 l 和弹性模量 E 为基本量纲的物理

量,利用相似“ π 定理”式(1)变为:

$$f_1(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9) = 0 \quad (2)$$

根据力学现象相似准则:

$$\left. \begin{aligned} C_\delta &= C_L C_\varepsilon \\ C_\sigma &= C_\gamma C_L \\ C_E &= C_c = C_R = C_T = C_\sigma \\ C_\varepsilon &= C_f = C_\mu = 1 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$\textcircled{1} \text{几何相似比尺: } C_L = \frac{L_P}{L_m} = 20$$

$$\textcircled{2} \text{容重相似比尺: } C_\gamma = \frac{\gamma_P}{\gamma_m} = 1$$

$$\textcircled{3} \text{应力相似比尺: } C_\sigma = \frac{\sigma_P}{\sigma_m} = C_\gamma C_L = 20$$

$$\textcircled{4} \text{弹性模量相似比尺: } C_E = \frac{E_P}{E_m} = C_\sigma = 20$$

$$\textcircled{5} \text{黏聚力相似比尺: } C_c = \frac{c_P}{c_m} = C_\sigma = 20$$

$$\textcircled{6} \text{内摩擦角相似比尺: } C_f = \frac{f_P}{f_m} = 1.0$$

$$\textcircled{7} \text{泊松比相似比尺: } C_\mu = \frac{\mu_P}{\mu_m} = 1.0$$

$$\textcircled{8} \text{应变相似比尺: } C_\varepsilon = \frac{\varepsilon_P}{\varepsilon_m} = 1.0$$

$$\textcircled{9} \text{位移相似比尺: } C_\delta = \frac{\delta_P}{\delta_m} = C_L C_\varepsilon = 20$$

1.3 模型试验制作

(1) 岩土体相似材料

相似材料的设计是开展物理模型试验的重要环节,其设计合理与否直接决定着模型试验结果能否准确真实的反映工程原型物理力学特性。振动台试验相似材料与一般的地质力学相似材料不同,它要求模型相似材料的动应力-动应变特性、动剪切模量衰减特性、阻尼特性、剪切波速、密度、不固结不排水强度等特性与原型材料满足相似性要求^[12]。

本次模型试验依托响水河工点,模型边坡上覆地层为全风化玄武岩,岩块之间黏结强度低,岩体破碎现象明显。模型制作时将边坡岩块用河砂模拟,岩块间的胶结物用黏性土模拟,添加石膏粉进行混合搅拌,通过改变石膏粉的含量和材料密度来调节模拟材料参数。通过大量室内剪切试验和单轴压缩试验,采用黏性土:河砂:石膏粉:水=5:10:1:1的质量配合比模拟全风化玄武岩地层,其物理力学室内试验参数统计见表1。

表1 试验土层材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of materials in the test

名称	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	泊松比	压缩模量/ MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
全风化玄武岩地层	2.07	0.33	3.4	1.41	16.2

(2) 相似结构

试验选用直径为4 mm的BFRP纤维筋作为锚杆,其弹性模量为200 GPa,锚杆总长度为100 cm,锚固段长度为40 mm,外漏纤维筋长10 cm,用于锚固。框架梁采用松木条制成,水平向横梁和竖向纵梁的截面尺寸均为3 cm×2 cm。在边坡体制作完成后,将埋设在坡体内的PVC管人力拔出,在模型土体中植入锚固体,然后安装用松木条制作的框架梁,最后人工张拉锚索自由端锁定,锚杆布置过程如图1所示,制作完成的试验模型见图2。



图1 锚杆布置安装

Fig.1 Arrangement and installation of anchor rod



图2 模型制作完成

Fig.2 The completed Model

1.4 模型监测点布置和制作过程

试验中采集了边坡动土压力值及加速度值,各种传感器在使用之前均已进行过现场标定,从而保证测

量数据的准确。监测点布设原则和位置如下所述,其示意图见图 3。

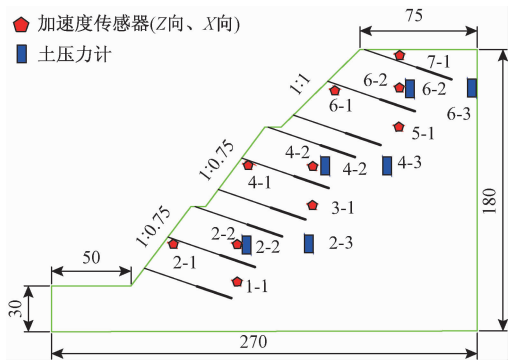


图 3 模型尺寸及测点位置

Fig. 3 Model size and measurement points

(1)加速度传感器

采用 DH301 系列三向电容式加速度传感器(图 4)。为研究边坡潜在滑体形成过程内软弱夹层对坡体的加速度高程响应特性,分别在距坡面 40 cm 处和距坡面 5 cm 处由下到上等间距布置加速度传感器,另外在坡脚自由场和振动台台面各布置 1 个加速度测点。振动台模型试验时共布设 20 个加速度传感器。



图 4 三向电容式加速度传感器

Fig. 4 Three-way accelerometer

(2)动土压力传感器

动压力传感器为 CYY9 型土壤岩石压力传感器(图 5)。该传感器输出信号范围为 0 ~ 5VDC(中间点为 2.5VDC),准确度等级为 0.25%,测量范围为 -500 ~ +500 kPa。为了研究边坡中水平向动土压力在振动过程中的响应规律,分别在每级坡中部,距坡面 40 cm 和 80 cm 布置土压力计。

1.5 地震波输入及加载工况

功东高速公路位于小江断裂带附近,历史上多次发生过大地震,为了研究公路沿线高边坡的地震动稳



图 5 CYY9 土壤岩石压力传感器

Fig. 5 CYY9 soil and rock pressure sensor

定性和新型支护结构的抗震性能。本次试验采用 EL-Centro 波进行加载。相似试验中加载波形也需要根据模型试验设计的相似系数对加载时间和频率含量进行修正,按照本次试验的相似系数 20,对地震波进行压缩(表 2)。

表 2 输入地震波相似关系表

Table 2 Similarity ratio of input seismic waves

地震波	时间	$C_t = C_L^{0.5} \times C_g^{-0.5}$	$1/\lambda^{0.5}$
加速度		$C_a = C_g$	1
频率		$C_w = C_L^{-0.5} \times C_g^{0.5}$	$\lambda^{0.5}$

地震波相似处理后,加载波形的频率为原始波形频率的 $\lambda^{0.5}$ 倍,即 4.47;加载波形的加载时间为原始波形频率的 $1/\lambda^{0.5}$ 倍,即 0.224;加载波形的振幅不变。原始波形的卓越频段均在 0.1 ~ 10 Hz,而记录时间为 40 s,因此修正后的加载波形频段为 0.447 ~ 44.7 Hz,(此频段上限不超过振动台的工作频段 50 Hz,)加载时间为 8.94 s。压缩后输入地震波时程曲线如图 6 所示。

本文研究区处于高烈度地区,故将最高输入加速度峰值设定为 1.0 g,采用逐级地震加速度峰值的方式进行^[13],加速度峰值从 0.1 g 到 1.0 g,具体加载工况见表 3。

表 3 输入地震波加载方式

Table 3 Loading mode of input seismic wave

工况	波形	加载方向	PGA
1	正弦扫频	水平(X)	0.05 g (0.1 ~ 50 Hz)
3	EL wave	水平(X)	0.1 g
5	EL wave	水平(X)	0.2 g
7	EL wave	水平(X)	0.4 g
8	EL wave	水平(X)	0.6 g
10	EL wave	水平(X)	0.8 g
12	EL wave	水平(X)	1.0 g
14	正弦扫频	水平(X)	0.05 g (0.1 ~ 50 Hz)

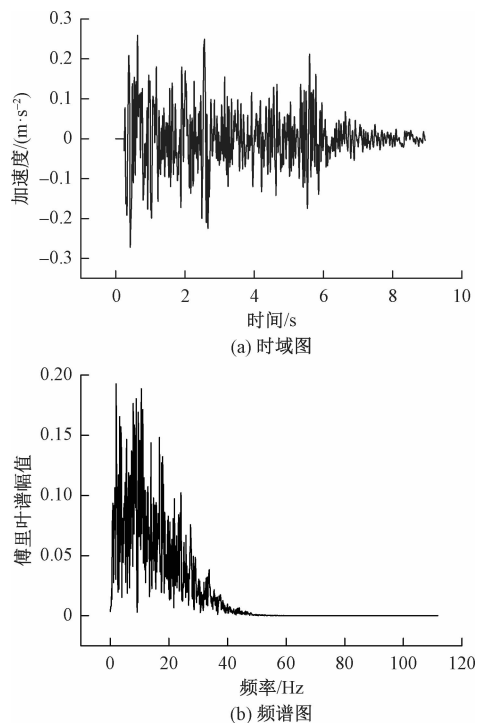


图 6 压缩后的 EL-Centro 地震波加速度时程曲线

Fig.6 Acceleration time history curve of compressed EL-Centro seismic wave

2 试验结果及分析

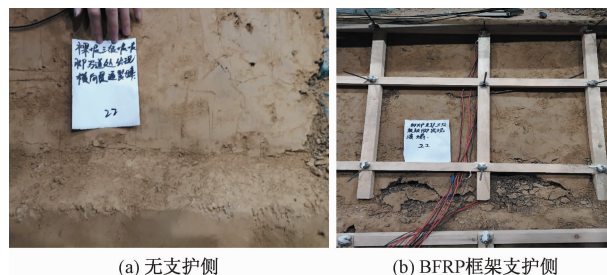
2.1 试验现象

在加速度峰值小于等于 $0.6g$ 时,试验现象不显著,主要为未支护侧坡面出现裂缝和轻微掉块(图 7),坡体与背部减震泡沫有轻微分离,侧面观察无内部裂缝,表现为整体轻微位移。

图 7 $0.6g$ 时无支护侧的三级坡坡面裂缝Fig.7 Cracks on grade III slope without support while the acceleration is $0.6g$

当加速度峰值为 $0.8g$ 时,未支护侧整体位移加

剧,坡面裂缝继续发育,各级坡脚出现横向贯通裂缝(图 8),二级坡面约 45° 的斜向贯通裂缝,坡体中上部侧面出现斜裂缝;支护侧第三级坡脚和模型侧面裸露处出现掉块。

图 8 $0.8g$ 时坡面裂缝Fig.8 Cracks on slope surface while acceleration is $0.8g$

到 $1.0g$ 时,无支护侧坡体破坏严重,各级坡已无明显分界(图 9);支护侧的坡体形态保存较好,破坏主要为坡脚的 $0.5 \sim 1.0mm$ 横向贯通裂缝和裂缝附近的局部掉块,位移在强震中表现为整体位移。可以看出经过 BFRP 框架梁加固的坡体在强震作用下的整体稳定性好。

图 9 $1.0g$ 时坡面破坏情况Fig.9 Failure of slope surface while acceleration is $1.0g$

2.2 加速度响应特性

为研究边坡响应加速度的放大效应,将边坡体内的加速度放大系数定义为各测点加速度峰值与坡脚自由场处测点的加速度峰值之比。此处以不同工况下 BFRP 锚杆框架结构支护和未支护斜坡坡体内及坡顶测点的加速度放大系数进行说明:如在地震波作用下,坡体内某一测点水平向加速度的最大绝对值为 $\max(\text{水平})$,而对应时刻的台面测点加速度的最大绝对值为 $\max(\text{台面})$,则加速度放大系数 a 为:

$$a = \frac{\max(\text{水平向})}{\max(\text{台面})}$$

在 EL 波各加载工况下,框架支护坡面加速度放大系数与台面监测地震波峰值的关系(图 10)。图 10 为输入水平向(X 向)作用地震波峰值增大的过程中,不同高程位置坡面的加速度放大系数随输入地震波加速度峰值的变化趋势,整体呈现“台阶状”上升。当峰值加速度为 $0.2 g$ 时加速度放大效应的增长趋势明显开始出现减小。在高程为 55 cm 和 105 cm 处的坡面加速度放大系数增长趋势较缓,在三级坡坡面和坡顶位置处的加速度峰值放大系数增长幅度较大。当输入地震波峰值为 $0.1 g$ 、 $0.2 g$ 、 $0.4 g$ 时加速度放大系数增长趋势相同,在加速度为 $0.2 g$ 时,各高程加速度放大系数均较小,其原因是加速度为 $0.2 g$ 时,支护结构对坡面加速度的放大效应起到了一定的抑制作用。

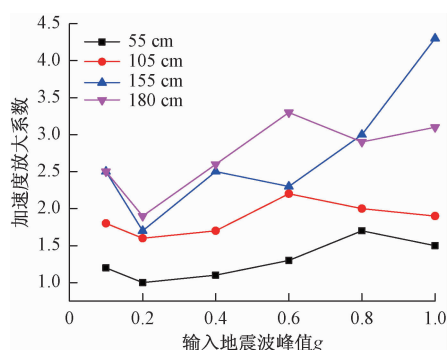


图 10 EL 波激励时框架支护坡面加速度放大系数与输入地震波峰值关系

Fig. 10 Relation between acceleration amplification coefficient and peak value of input seismic wave (excited by EL wave)

高度在 155 cm 处的加速度放大系数随输入地震波峰值加速度的增加而呈“锯齿状”增加趋势,具体表现为 $0.1 g \sim 0.2 g$ 、 $0.4 g \sim 0.6 g$ 为下降段, $0.2 g \sim 0.4 g$ 加速度放大系数处于上升阶段, $0.6 g$ 以后加速度放大系数基本显示处大幅度的上升趋势;高度在 180 cm 处的加速度放大系数随着输入波加速度峰值的增大而增加,具体表现为 $0.1 g \sim 0.2 g$ 为下降段, $0.2 g \sim 0.6 g$ 加速度放大系数上升段, $0.6 g \sim 0.8 g$ 为下降段, $0.8 g$ 以后加速度放大系数呈上升趋势。

通过分析试验过程中坡体裂纹及坡表破坏现象,可以发现边坡坡表加速度放大系数沿高程严格增大,导致该现象的原因是由于边坡顶部在地震作用下产生了局部破坏,从而导致坡体受力状况和几何形态的改变对加速度的传播规律造成了影响。例如:第三级坡在输入地震动过程中震动剧烈,坡顶逐渐产生横向裂纹,随着地震加速度峰值的增大,裂缝逐渐产生贯通;

第二级坡坡面和第三级坡坡面均产生横向贯通裂缝。

在 EL 波各加载工况下,无支护台面监测地震波峰值与坡面加速度放大系数的关系如图 11 所示。随着输入波加速度峰值的增大,不同高程位置坡体的加速度放大系数随输入地震波峰值加速度的增加近似呈稳定上升趋势。当峰值加速度为 $0.2 g$ 时,高程为 105 cm 、 155 cm 、 180 cm 的位置处加速度放大系数稍微有所降低,从 55 cm 往上,高程对加速度放大系数的影响有所降低。

在输入地震波峰值加速度在 $0.1 g$ 时,高程 105 cm 处的加速度放大系数比高程 155 cm 处的大,即二级坡坡面的加速度放大系数大于三级坡坡面的加速度放大系数,说明在无支护的斜坡上斜坡的坡腰最先承受较大的地震动力影响。

从 $0.2 g \sim 0.6 g$ 加速度放大系数沿高程和输入地震波峰值呈增大趋势,到输入地震波峰值加速度为 $0.8 g$ 时高程 155 cm 处的加速度放大系数最大。当输入加速度峰值大于 $0.8 g$ 后斜坡坡顶产生贯通裂缝,岩土体整体性较差,坡顶位置的加速度放大系数呈“锯齿状”的增长趋势;在高程为 155 cm 处的坡面加速度放大系数增长趋势平稳,三级坡坡面振动剧烈,有崩塌的趋势;在高程为 105 cm 处的坡面加速度放大系数在输入地震波峰值达到 $1.0 g$ 时产生骤降,二级坡坡面发生了滑动,坡体表面埋置的加速度传感器外露。

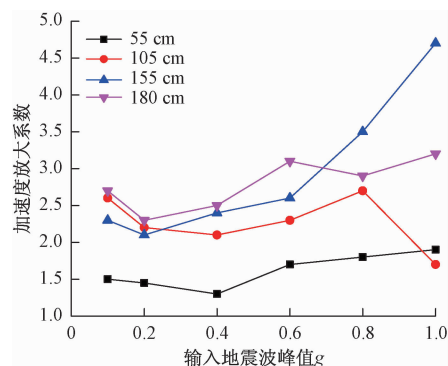


图 11 EL 波激励时无支护坡面加速度放大系数与输入地震波峰值关系

Fig. 11 Relation between acceleration amplification coefficient of unsupported slope and peak value of input seismic wave (excited by EL wave)

通过上述分析可得,当输入加速度峰值相同时,对应的高程处,无支护侧坡面的加速度放大系数比支护侧的加速度放大系数要大,表明框架锚固结构对边坡的加速度放大系数起到了有效地抑制作用,从而提高了边坡的整体稳定性。

2.3 应力响应特性

地震波持续过程中,在动静力场耦合作用下岩土体单元应力时刻发生变化,从一点的应力状态来看,单元体应力与测点水平向加速度响应有直接关系。本次试验对 BFRP 锚固边坡和未支护边坡坡体内不同高程和埋设深度的土压力进行监测,得到边坡体空间位置的应力状态,通过摩尔库伦强度准则对坡体内不同位置应力屈服状态进行判断。首先测的了正弦扫频波作用下边坡自振时的应力状态,随着输入地震波峰值加速度的增大,应力状态不断发生变化,如图 12 ~ 图 14 所示。

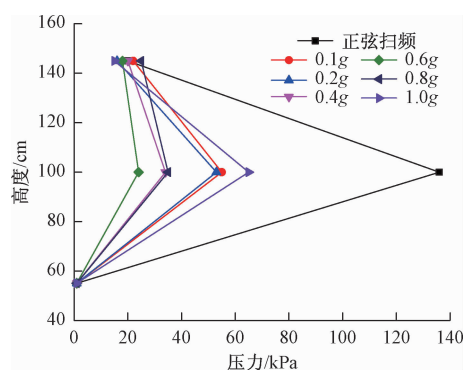


图 12 锚固边坡断面 I 应力分布

Fig. 12 Stress distribution of at section I in slope supported with anchorage

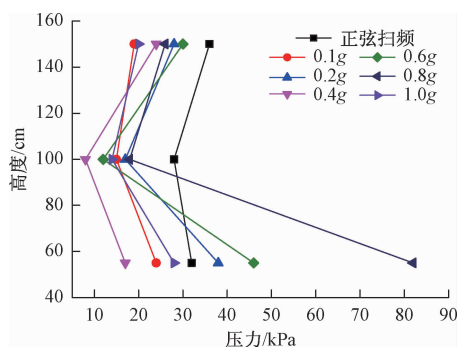


图 13 锚固边坡断面 II 应力分布

Fig. 13 Stress distribution at section II in slope supported with anchorage

对比锚固边坡监测断面 I 和监测断面 II 的应力分布可以观察到,锚固边坡监测断面 I 的压应力最大值出现在二级坡坡后(高度 105 cm),输入地震波为正弦扫频时该测点压应力最大,随着输入地震波峰值加速度的增大,测点压应力值逐渐减小。其他高度位置的测点压应力值较小,随着加速度增大基本不发生变化。

锚固边坡监测断面 II 的压应力最大值出现在一级

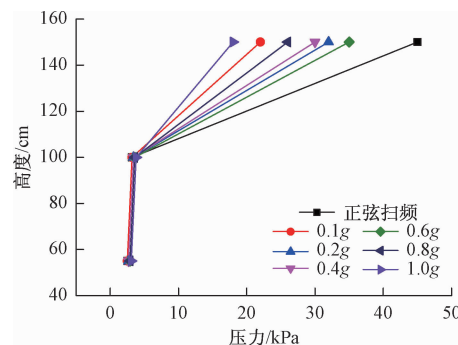


图 14 未支护边坡断面 I 应力分布

Fig. 14 Stress distribution at section I of unsupported slope

坡(高度 55 cm)和三级坡(高度 155 cm)坡后相对位置,除输入正弦扫频外,其他加速度峰值地震波作用下边坡应力变化不大,规律性也不太明显,在输入地震波达到 0.8 g 后一级坡后土体压应力突增,可能发生了剪切应力屈服。

由于未支护边坡监测断面 II 有一处土压力传感器发生故障,监测数据无效,因此仅对监测断面 I 的应力分布做出分析,可以看出监测断面 I 的压应力最大值出现在三级坡坡后,其他位置岩土体应力没有明显差别,表明无支护边坡在地震波作用下,上部岩土体首先发生张拉应力屈服,其他位置应力状态变化较小。压应力最大值出现在输入正弦扫频的时候,可认为此时的压应力与该测点单元体在静力作用下受到的应力相同。随着输入地震波峰值加速度的增大,压应力逐渐减小,其原因是由于岩土体受张拉作用而导致的。

3 结论

以功东高速响水河边坡为试验原型,通过振动台试验,对无支护边坡与 BFRP 锚固边坡在不同峰值加速度地震波作用下的加速度放大系数及动应力变化情况进行了研究,所得结论如下:

(1)当输入地震波加速度峰值相同时,对应的高程处,无支护侧坡面的加速度放大系数比支护侧的加速度放大系数要大,表明 BFRP 锚固结构对边坡的加速度放大系数起到了有效地抑制作用,从而提高了边坡的整体稳定性。

(2)由于地震波在坡体内传播介质不均匀的原因,使得坡面各测点加速度放大系数随输入地震波加速度峰值的增大并非呈现线性增加的关系,而是一种“锯齿状”的变化趋势。

(3)BFRP 锚固结构加固边坡二级坡坡面附近单

元体压应力最大,坡体内部在三级坡后单元体压应力最大,而无支护边坡坡面主要承受边坡上部的拉应力,边坡体内单元受力并不均匀,表明 BFRP 锚固结构可以改变边坡单元体的受力状态。

参考文献:

- [1] LI G W, PEI H F, HONG C Y. Study on the stress relaxation behavior of large diameter B-GFRP bars using FBG sensing technology [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2013, 9 (10): 201767.
- [2] LI G W, NI C, PEI H F. Stress relaxation of larger diameter B-GFRP soil nail element grouted along body [J]. China Ocean Engineering, 2013, 27(4): 495 - 508.
- [3] 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 X F, ZHAO W, XIE Q, et al. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber reinforced plastic rebar [J]. Highway Engineering, 2016, 41(5): 215 - 217. (in Chinese)]
- [4] 杨国梁. 玄武岩纤维复合筋材力学性能试验及岩土锚固应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [YANG G L. Mechanical properties test and geotechnical anchoring applications of basalt fiber reinforced plastics[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)]
- [5] 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. [GAO X J, XIE Q, ZHAO W, et al. Experimental study on determining design parameters of non-prestressed BFRP anchor for supporting soil slope [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (7): 20 - 28. (in Chinese)]
- [6] 王洋. BFRP 砂浆锚杆锚固机理现场试验研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2018. [WANG Y. Field pullout tests of basalt fiber-reinforced polymer ground anchor [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)]
- [7] 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 X J. Experimental study on design of basalt fiber reinforced polymer anchor supporting soil slope [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)]
- [8] 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. [WANG A F, ZHAO W, LI Y, et al. Design and application of BFRP bolt (cable) support for highway rock slope [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2017, 43 (3): 10 - 13. (in Chinese)]
- [9] 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 W, WANG H, CHEN Y, 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. (in Chinese)]
- [10] 付晓. 框架锚索及框架锚索-抗滑桩加固岩质边坡的动力特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017. [FU X. The dynamic behavior of rock slope reinforced by frame anchor system and frame anchor combined with anti-slide pile [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)]
- [11] 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 H G, PAI L F, LAI T W, 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. (in Chinese)]
- [12] 王志佳. 岩土工程振动台试验理论及在地下管线动力响应研究中的应用[D]. 成都: 西南交通大学, 2016. [WANG Z J. Theory of geotechnical shaking table test and its application in study of dynamic response of buried pipeline [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)]
- [13] 文畅平, 杨果林. 格构式框架护坡地震动位移模式的振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2076 - 2083. [WEN C P, YANG G L. Shaking table model test study of seismic displacement mode of slope with anchor lattice frame structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30 (10): 2076 - 2083. (in Chinese)]