

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201907029

# 地震作用下BFRP锚固结构动力响应试验研究\*

李慈航

(中铁第四勘察设计院集团有限公司,湖北 武汉 430063)

**摘要:**地震作用下锚固结构动力响应研究的是锚杆(索)杆体-注浆体、注浆体-围岩之间的动力学作用机制,是岩土锚固工程的研究重点和发展趋势。通过振动台模型试验,研究了地震作用下BFRP锚固结构的动力响应,利用粘贴在BFRP锚索杆体上的应变片,测得地震波激励过程中不同高度位置、锚固深度锚索断面上的应变波响应,对锚固段内BFRP锚索沿锚固深度轴力峰值和应变波时程曲线进行了分析。结果表明:(1)BFRP锚固结构的动力响应与输入地震波强震段的发生时间和持续时间基本一致;(2)随着输入地震波加速度峰值的增大,BFRP锚索轴力峰值在数值上随锚固边坡屈服状态发生变化,其中锚固段前半段受影响较大;(3)锚索残余轴力受地震作用的影响,随着锚固结构内测点位置相对高度的增大而增大,这一现象在靠近锚固体端部的位置更为明显,在工程应用中应重点关注锚固段端部注浆材料损坏而导致的锚固系统失效破坏。通过小波包分解得到锚固结构的应变波主频,进一步表明了锚固体端口、中部、尾部的主频差异较大,会导致锚索与注浆体之间出现“差拍”作用,引起锚索与注浆体之间的不协调运动,导致锚固体内第一界面不断地受剪揉搓,形成损伤到破坏的时间累积效应。

**关键词:**地震作用; BFRP锚固结构; 动力响应; 小波包分解

**中图分类号:** TU435 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)06-1212-10

## Experimental Investigation on Dynamic Response of BFRP Anchorage Structure under Earthquake Effect

LI Cihang

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China)

**Abstract:** The study on dynamic response of the anchoring system under seismic loading mainly emphasizes on the dynamic interaction mechanism of the anchor cable and the grouting body, or the grouting body and the surrounding rock, which is the research focus and development trend in the rock and soil anchoring engineering. Through the large-scale shaking table model test, the dynamic response of the BFRP cable in anchorage body under seismic loading is studied. Using the strain gauges attached to the anchor cable, the strain waves on different anchor cable sections and different anchorage depth during dynamic loading are measured, and the axial force amplitude and residual deformation of the BFRP anchor cable caused by seismic action are analyzed. The results showed that: (1) The dynamic response of the anchor cable caused by the earthquake is basically consistent with the occurrence time and duration of the strong seismic section of the input seismic wave acceleration time history curve; (2) With the increase of the input seismic dynamic load, the peak force of the BFRP anchor cable varies with the yielding state of the slope structure, especially in the first half part of the an-

\* 收稿日期:2019-07-09;修回日期:2020-04-20

作者简介:李慈航(1993—),男,工程师,硕士。主要从事地质路基工程勘察设计方面的研究。E-mail:810331684@qq.com

chorage section. (3) With the increase of the relative height of the measuring points in the anchoring structure, the influence of seismic motion on the residual axial force of the anchor cable is significant, and the phenomenon is more obvious near the end of the anchoring section. According to the preliminary distribution law of the vibration energy of the anchor cable obtained by wavelet packet decomposition, the transmission characteristics of the main frequency of the anchor cable along the anchorage depth are further discussed, and the damage mode of the BFRP anchor cable anchored structure under dynamic action is revealed.

**Keywords:** Earthquake action; BFRP anchorage structure; dynamic response; wavelet packet decomposition

## 引 言

锚索框架结构作为一种常见的边坡加固形式,在有效限制岩土体强度参数劣化、预防边坡出现失稳滑塌等方面表现出了良好的性能,但由于此类支护结构工作环境的特殊性,长时间承受岩土体内部的腐蚀性介质和杂散电流都会导致筋材在不同程度上出现老化、损伤甚至破坏,进而引发锚固边坡整体失稳<sup>[1]</sup>。BFRP锚固结构采用了一种绿色环保的新型纤维复合材料,具有耐腐蚀、强度高、质量轻和张保持率与钢筋相当等优点,目前我国交通和建筑领域边坡锚固工程的设计和施工当中已被广泛应用。郭成鹏等<sup>[1]</sup>通过性能测试给出了BFRP筋的锚固性能参数,并对BFRP筋用作锚杆的适宜性进行了研究。王安福等<sup>[2]</sup>通过对公路岩质边坡BFRP锚杆(索)锚固体体系轴力的实时监测,提出BFRP锚索的预应力保持率高于钢绞线锚索的结论。理论分析方面,国内外学者对静力条件下BFRP锚固结构荷载传递机理已取得了一系列研究成果<sup>[3-6]</sup>,然而,对于动力荷载下BFRP锚固结构的荷载传递机制和破坏发展模式的研究仍比较欠缺。

目前,动力作用下的锚固体系试验研究大多是针对传统钢筋材料开展的,已取得了很多有效的研究成果。S. Morita<sup>[7]</sup>、B. L. Balazs<sup>[8]</sup>研究了动力荷载作用下锚杆与注浆体分离破坏模式和锚固力渐进破坏规律。张建经等<sup>[9]</sup>研究了重复荷载作用下锚固体体系内第一、第二界面的黏结力分布特点,给出了锚固体界面不同破坏阶段的临界位移值。董建华等<sup>[10]</sup>基于锚杆端部应力简化力学模型,提出了水平地震作用下边坡支护结构的动位移、动轴力响应及轴力峰值在边坡体内的空间分布规律。A. Ivanovic等<sup>[11]</sup>研究不同冲击荷载和频率作用对抗浮锚

杆的位移和动力响应分布规律的影响。单仁亮等<sup>[12]</sup>采用小波包理论分析了爆炸荷载作用下锚杆不同分区的振动频率分布,验证了工程锚杆临近锚固段的动态响应规律。但这些试验结果对于BFRP锚固结构是否同样适用,值得我们通过模型试验和理论分析去进一步研究。

本文选取约30 m高的典型路堑边坡开展大型振动台模型试验,针对地震作用引起BFRP锚固结构的轴力幅值变化和残余变形进行了分析,对了解BFRP锚杆(索)支护结构的抗震安全性,推动BFRP材料在边坡锚固工程中的应用具有一定的意义。

## 1 振动台模型试验概况

BFRP锚索框架加固边坡模型试验振动台台面如图1所示,台面有效尺寸为4 m×6 m,可实现水平、垂直双向地震波加载,台面最大加振力为600 kN,最大加速度水平向为1.7g、垂直向为1.2g。

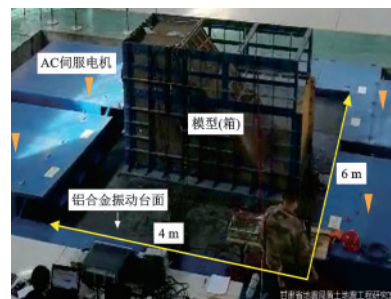


图1 振动台台面

Fig.1 Overview of shaking table

### 1.1 试验相似设计及材料

模型参数设计时,选取输入地震加速度、锚固结构材料密度和试验模型尺寸为基本控制参量。

试验模型动力相互作用系统由输入地震荷载、边坡体、锚固结构(锚索和框架)组成,基于 Buckingham 定理,分离系统中这三部分组成要素,分别使其满足相似设计,具体推导过程参见文献[13]。

振动台模型试验选择模型几何尺寸  $L$ 、模型材料密度  $\rho$  和重力加速度  $g$  为控制参数,输入地震波加速度峰值、边坡体、结构物的关键参数的求解特征方程如下:

$$f_{\text{边坡体}}(L, \rho, g | c, \varphi) = 0 \quad (1)$$

$$f_{\text{结构材料}}(L, \rho, g | \sigma, \varepsilon, F) = 0 \quad (2)$$

$$f_{\text{地震波}}(L, \rho, g | a, t, \omega) = 0 \quad (3)$$

式中,  $L$  为长度;  $\rho$  为密度;  $g$  为重力加速度;  $c$  为边坡黏聚力;  $\varphi$  为边坡内摩擦角;  $\sigma$  为结构应力;  $\varepsilon$  为结构应变;  $F$  为力;  $a$  为输入地震波加速度峰值;  $t$  为地震波作用时间;  $\omega$  为地震波频率。

试验选取模型缩尺比例为 1:20, 输入地震加速度和试验模型岩土体材料密度的相似比为 1, 按照分离相似定律设计导出各物理量的相似关系和相似系数(表 1)。

表 1 振动台模型试验相似关系

Table 1 Similar parameters of shaking table model test			
模型构成	物理量	相似关系	相似常数
基本控制参数	长度	$C_L$	20
	密度	$C_p$	1
	加速度	$C_g$	1
边坡模型材料	黏聚力	$C_c = C_L \times C_p \times C_g$	20
	内摩擦角	$C_\varphi$	1
锚固结构材料	力	$C_F = C_L^3 \times C_p \times C_g$	$8 \times 10^3$
	应力	$C_{\sigma} = C_L \times C_p \times C_g$	20
	应变	$C_\varepsilon$	1
输入地震波	时间	$C_t = C_L^{0.5} \times C_g^{-0.5}$	4.47
	加速度	$C_a = C_g$	1
	频率	$C_w = C_L^{-0.5} \times C_g^{0.5}$	0.224

在锚索相似材料的选取上,考虑到预应力锚索在模型试验中实现较为困难,本次试验主要针对 BFRP 这一特殊材料,采用直径 4 mm 的 BFRP 筋作为模型试验材料,锚索长 110 cm,外露纤维筋长 10 cm,用于安装框架及锚具,锚固段长度为 40 cm,锚索倾角  $20^\circ$ ,填土夯实到锚固体位置时,在锚索自由端套入 PVC 管,保证锚索可以具有设计长度的自由段。制作完成后模型如图 2 所示。



图 2 制作完成的试验模型

Fig.2 Experiment model of the slop

## 1.2 试验加载方案

振动台试验选择 El Centro 地震波和距离依托工点位置最近的鲁甸地震波作为试验加载波形,如图 3 和图 4 所示。地震波的持时、幅值和频率根据相似关系进行调整。由于依托工点线路走向为南北向,为了最大程度展现锚固结构在最不利情况下的动力响应,因此输入水平地震波的方向采用地震波记录的东向西分量。

振动台试验时对于两种地震波均采用水平垂直双向输入,地震波峰值加速度依次为 0.1g、0.2g、0.4g、0.6g、0.8g 和 1.0g,加载次序为同一加速度峰值先后输入鲁甸波和 El Centro 波。在试验开始前、结

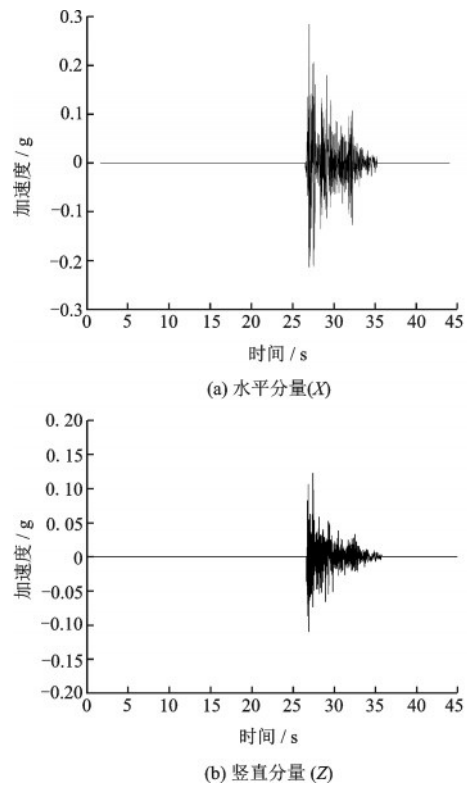


图 3 相似设计后输入 El Centro 地震波加速度时程曲线  
Fig.3 Acceleration time-history curve of input El Centro seismic wave

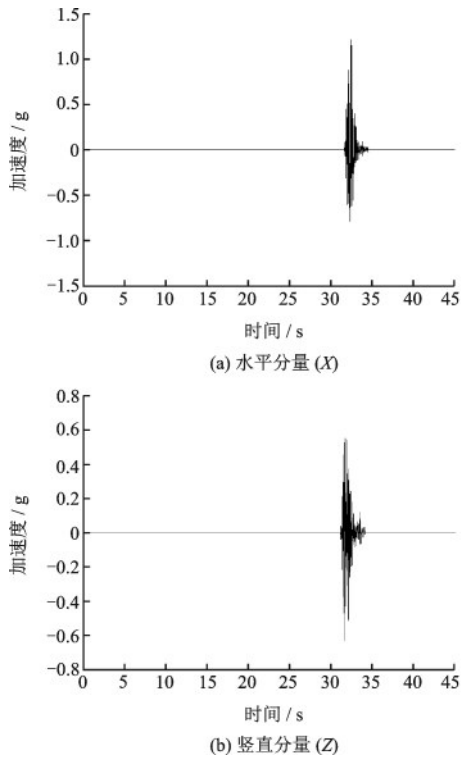


图4 相似设计后输入鲁甸地震波加速度时程曲线  
Fig.4 Acceleration time history curve of input Ludian seismic wave after compression

束后及每次增大加速度峰值前需要输入水平向0.05g(0.1~50 Hz)正弦扫频,输入地震波加载工况见表2。

表2 输入地震波工况及输入地震波峰值

Table 2 Working condition and the peak value of the input seismic wave

加载峰值/g	输入地震波峰值/g			
	El Centro地震波		鲁甸地震波	
	X向	Z向	X向	Z向
正弦扫频(0.05g)	/			
0.1	0.1	0.044	0.1	0.066
正弦扫频(0.05g)	/			
0.2	0.2	0.088	0.2	0.132
正弦扫频(0.05g)	/			
0.4	0.42	0.175	0.4	0.266
正弦扫频(0.05g)	/			
0.6	0.628	0.263	0.6	0.4
正弦扫频(0.05g)	/			
0.8	0.84	0.35	0.794	0.527
正弦扫频(0.05g)	/			
1.0	1.05	0.44	0.99	0.66
正弦扫频(0.05g)	/			

### 1.3 测试内容及数据采集

地震作用下BFRP锚索框架加固边坡的稳定性与锚固系统关系密切<sup>[14]</sup>。振动台模型试验中,在BFRP筋上布设电阻应变片分别测取自由段和锚固段内锚索杆体上关键位置处的应变数据,整理试验数据分析得到地震动力荷载作用下锚固系统的动力响应,进而研究其动力荷载传递机制和锚固系统损伤发展模式。测点具体布置情况如图5所示,测试锚索在每级边坡的中间位置各选一根,从一级坡到三级坡依次编号为T1、T2、T3。

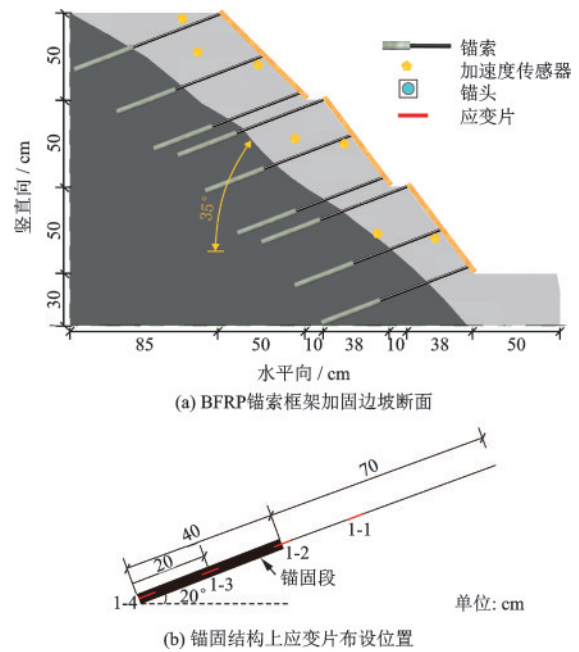


图5 模型测点布置示意  
Fig.5 Monitoring points arrangement of the model

BFRP筋锚固范围内表面指定位置切槽打磨平整后粘贴应变片,分别布置3个应变片,将粘贴好应变片的BFRP锚索垂直插入长40 cm,直径为10 mm的波纹圆管中,固定对中后向管中均匀注入石膏浆,将制备好的测试锚索静置一段时间,保证其强度。BFRP锚索应变监测选用适用于纤维树脂材料的BE120-10AA-P100型号应变传感器,数据采集选用DH3820数据采集系统,采样频率为100 Hz。在振动台模型试验过程中,数据采集、信号监测同步进行。

## 2 试验结果与分析

在试验数据采集过程中,发现锚固结构自由段

上的应变片由于填筑模型时发生了破坏,无法监测到有效数据,为了保证试验数据的有效性,只研究了沿高度向上各级坡锚固体内锚索筋材上的动力响应。

## 2.1 锚索轴力动力响应

按照试验加载方案,分别输入了加速度峰值从0.1g到1.0g的El Centro波和鲁甸地震波,根据弹性体的应力-应变关系<sup>[15]</sup>,计算BFRP筋在地震作用下各测点的应力:

$$\sigma = E_1 \epsilon_1 \quad (4)$$

式中, $E_1$ 为BFRP筋的弹性模量; $\epsilon_1$ 为锚固系统各测点的应变值。

由材料力学<sup>[15]</sup>可知,BFRP筋在地震作用下各测点的轴力峰值为:

$$F_N = \sigma A \quad (5)$$

式中, $A$ 为BFRP筋的横截面面积; $\sigma$ 为BFRP筋测点处的应力。

数据处理结果显示,试验过程中监测到的锚索轴力最大值仅与输入地震波加速度峰值相关。本文选取鲁甸地震波作用下,不同高度位置锚固体内监测断面的轴力响应最大值与输入地震波加速度峰值间的关系进行研究,轴力峰值与输入地震波加速度的关系如图6所示。

由图6可以看出地震波加速度峰值为0.1g时,T3(坡顶)锚索锚固体内各测点轴力峰值最大;地震

波加速度峰值在0.2g~0.6g时,不同高度位置锚固体内锚索受力分布转变为边坡中部承受动力作用大于边坡上部,此时边坡下部承受动力作用最小;随着地震波加速度峰值继续增大,中上部锚索在锚固段内的杆体轴力峰值差异逐渐减小,结合试验宏观现象可以解释为边坡中上部坡体内浅表层岩土体发生应力屈服,形成的塑性区逐渐贯通,地震荷载作用在坡体中上部岩土体受力重新分配,此时T2(坡中)锚索轴力峰值略大于T3(坡顶),说明边坡塑性区屈服状态是以下部牵引为主。

地震波加速度峰值达到0.6g以后,沿锚固深度锚固体内锚索轴力峰值衰减速率增大,在地震作用下锚索反复张拉-收缩,端部位置注浆材料与锚索筋材之间最先发生黏结损伤,锚索承受地震荷载导致轴力峰值增大,而锚固体中部和尾部黏结损伤较小,第一界面剪应力可以发挥较大的作用。

地震波加速度峰值在0.8g~1.0g时,锚索轴力峰值大小在高度位置表现为上部>中部>下部,随着输入地震波加速度峰值的增大,边坡上部受地震作用影响增大,坡体屈服状态以上部推动为主。

对于同一高度位置不同锚固深度的轴力峰值,T2(坡中)锚索与T3(坡顶)锚索轴力峰值分布在锚固体内分布规律基本一致,锚固体端部轴力均出现突增,结合试验中边坡上部土体出现拉剪破坏,可以认为作用在锚固体端部位置的剪切力造成第一界面局部失效,动力荷载完全由BFRP筋承担造成

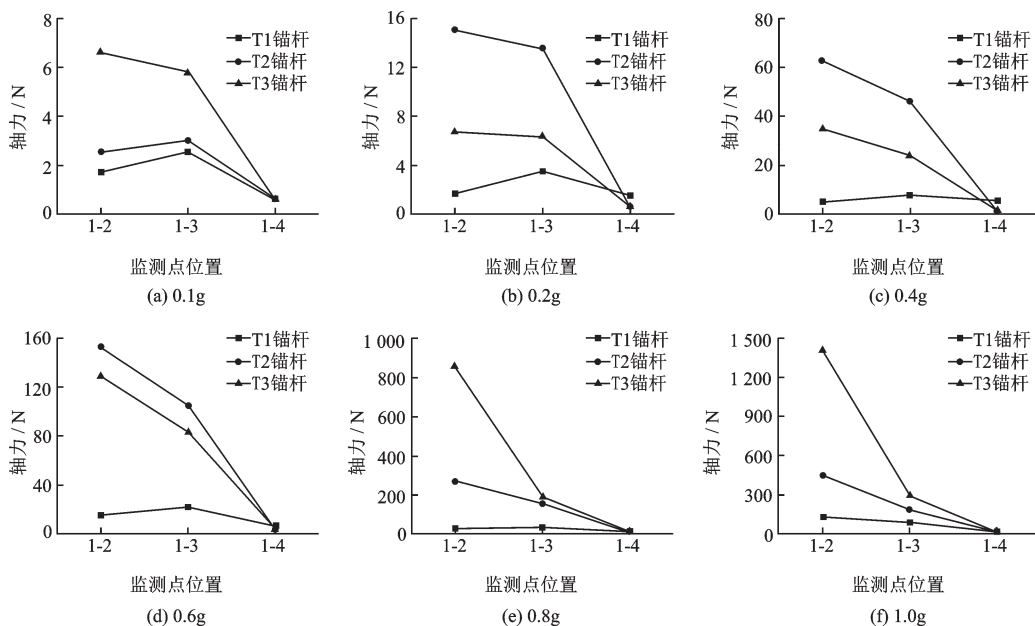


图6 鲁甸地震波作用下锚固系统各测点轴力峰值分布

Fig.6 Axial force peak distribution map of anchorage system under ludian earthquake wave

的,因此边坡锚固段应该深入基岩中一定距离对锚固体的抗震能力会有所提高。

## 2.2 锚索上的应变波形分析

从锚索锚固段内锚索轴力动力分布情况可以看出,锚固体内锚索轴力分布在0.6g时变化较大,锚固体内第一界面黏结状态发生改变。为了研究BFRP锚索锚固结构的受力破坏状态,从锚固段内锚索监测点的应变波形来进一步研究锚固结构的应力状态,分别选取加速度峰值为0.6g的鲁甸地震波和El Centro地震波作用下轴力变化最明显的T2锚索和T3锚索的前半段1-2、1-3测点应变波进行分析,如图7和图8所示。

由图8可以看出,不同类型地震波作用下测点监测到的轴力时程曲线与台面监测地震波加速度时程曲线强震段的发生时间和持续时间基本一致。锚固体内锚索在输入地震波激励作用下会产生残余轴力,锚索轴力残余值同样与输入地震波类型、锚索相对高度和测点位置有关,在轴力时程曲线中具体表现为曲线基线在地震动荷载作用下突然发生上移或下移。为了便于对比分析,规定残余轴力值以拉应力为正值、压应力为负值,将各测点产生的轴力残余值与轴力最大值的比值进行对比,输入地震波为鲁甸波时,在T2锚索1-3测点产生的残余轴力比值为-18.2%,在T3锚索1-2测点、1-3测点产生的残余轴力比值分别为12.5%、10%;输入地

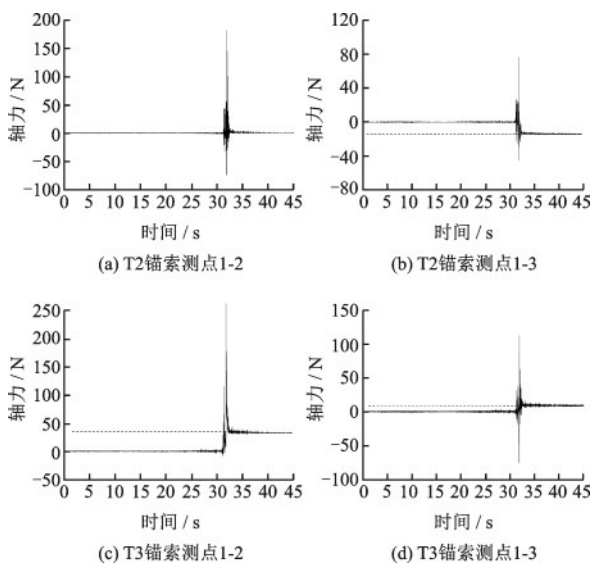


图7 鲁甸波激励时轴力时程曲线

Fig.7 Axial force time-history curve under ludian wave excitation

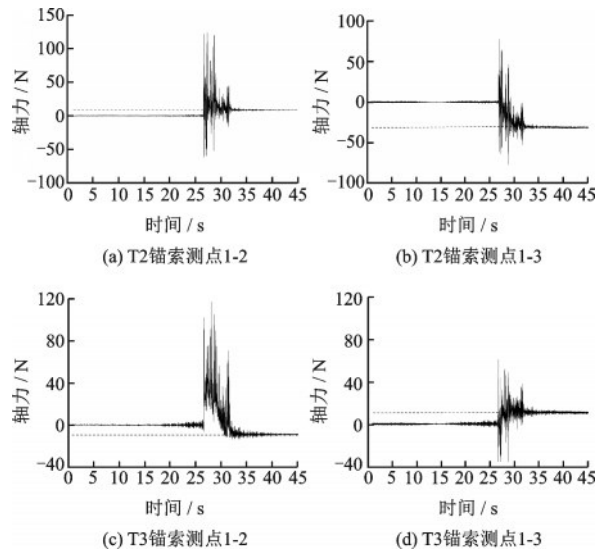


图8 El Centro波激励时轴力时程曲线

Fig.8 Axial force time-history curve under el centro wave excitation

震波为El Centro波时,在T2锚索1-2测点、1-3测点产生的残余轴力比值分别为为8.3%、-50.4%,在T3锚索1-2测点、1-3测点产生的残余轴力比值分别为-9.1%、16.7%。

随着锚固结构内测点位置相对高度的增大,锚索残余轴力受地震作用的影响明显,说明边坡中上部岩土体受地震动作用后出现了永久位移。由于模型试验是采用BFRP筋来模拟,在动力作用下锚固体内筋材可能发生不同方向的弯曲,由于仅在BFRP筋的一侧粘贴了应变片,导致该测点出现受拉或受压两种状态,是由锚固结构发生弯曲造成的。并且,图中可以观察到锚固体内锚索残余轴力在地震动荷载作用过程中并非突然产生,而是一种累积形成的过程,在靠近锚固段端部的位置这一现象更为明显。

## 2.3 应变波频谱分析

试验监测到的锚索测点应变波形较复杂,并且存在明显的残余变形,本文采用小波包分解对0.05g(0.1~50 Hz)正弦扫频和台面输入加速度峰值0.6g的鲁甸地震波、El Centro地震波作用下测得的BFRP锚索应变波进行了处理。

应变采集仪器的数据采样频率为100 Hz,根据Shannon采样定理,其Nyquist频率为50 Hz。为了尽可能精确地了解地震波在各个频带的能量分布,根据小波包分解原理,将信号分解到第5层,共有32

一个小波包,原信号在整个频域被划分为32个子频带。在小波包基的选择中选用处理振动信号常用的db8作为此次分析的基函数,数据处理采用MATLAB数值分析软件完成。设重构信号 $S_{5,j}$ 对应的能量为 $E_{5,j}$ ,计算如下:

$$E_{5,j} = \sum_{k=1}^m |x_{j,k}|^2 \quad (6)$$

式中, $m$ 为应变波信号的离散采样点数; $x_{j,k}$ 表示重构信号 $S_{5,j}$ 的离散点幅值( $j=0,1,2,\dots,2^5-1;k=1,2,\dots,m$ )。

重构信号的总能量 $E_0$ 为:

$$E_0 = \sum_{j=1}^{2^5-1} E_{5,j} \quad (7)$$

各频带重构信号能量占总能量的百分比 $E_j$ 为:

$$E_j = \frac{E_{5,j}}{E_0} \times 100\% \quad (8)$$

数据分析结果见表3~5。表3列出了0.05g正弦扫频作用下锚固段内BFRP锚索各测点振动能量分布,通过输入正弦扫频的地震波激励,对边坡模

型“调理”后的动力响应进行小波包分解可以得到边坡模型的自振频率,这也就是为什么我们每次在改变输入地震波加速度峰值前都会加载一次正弦扫频的原因。输入正弦扫频波时,监测到的应变波为锚固系统受迫振动时的自振响应,与锚固系统中测点的空间位置和注浆质量密切相关,BFRP锚索结构T1、T3的在锚固段端口的应变波主频以低频段(0~1.532 Hz)为主,中间测点没有明显主频,在中高频段(15.625~25 Hz)能量较大,且分布较为均匀,尾部测点的应变波主频以高频段(23.437~25 Hz)为主,可以认为锚固体内随着锚固深度的增加,锚索自振响应主频由低频逐渐转变为高频,T2锚索在锚固段端部位置处的应变波能量分布均匀,未出现明显的能量集中频段,锚固段中间位置处的应变波在0~1.562 Hz频段能量占比为15.18%,其余频段能量分布均匀,锚固段尾部的应变波能量集中在频段0~1.562 Hz和23.437~25 Hz,分别占到总能量的75.85%和17.85%。

表3 正弦扫频作用下BFRP锚索应变波频带的能量分布

Table 3 Energy distribution of strain wave band of BFRP cable under sinusoidal sweep

频段/Hz	T1锚索各频段振动能量分布			T2锚索各频段振动能量分布			T3锚索各频段振动能量分布		
	百分比/%			百分比/%			百分比/%		
	1-2	1-3	1-4	1-2	1-3	1-4	1-2	1-3	1-4
0~1.562	57.52	6.00	8.84	2.81	15.18	75.85	30.13	6.51	10.93
1.562~3.125	0.63	0.25	0.42	1.31	1.01	0.48	0.47	0.35	0.56
3.125~4.687	0.45	0.17	0.57	2.50	1.81	0.26	0.79	0.46	0.41
4.687~6.25	0.82	0.44	0.94	3.84	3.04	0.35	0.74	0.44	0.62
6.25~7.812	1.36	6.51	0.54	1.18	1.03	0.32	6.27	5.01	0.75
7.812~9.375	0.40	2.23	0.40	1.73	1.56	0.27	3.07	2.51	0.43
9.375~10.937	0.23	0.23	0.58	1.89	1.54	0.28	1.10	0.71	0.42
10.937~12.5	0.33	0.73	1.24	2.85	2.45	0.16	1.77	1.59	0.44
12.5~14.062	0.81	1.67	2.27	3.81	3.23	0.17	1.74	3.17	0.38
14.062~15.625	1.36	2.87	3.90	4.72	4.33	0.20	2.48	4.54	0.47
15.625~17.187	2.44	5.60	4.83	5.02	4.26	0.18	4.19	6.06	0.54
17.187~18.75	3.13	6.83	0.92	8.06	7.44	0.29	5.28	8.26	0.83
18.75~20.312	1.13	4.81	2.01	1.30	1.21	0.30	5.00	4.01	0.58
20.312~21.875	2.02	6.34	4.73	2.06	1.94	0.21	6.29	7.00	0.80
21.875~23.437	2.87	7.25	4.25	3.64	3.15	0.24	5.17	6.04	0.49
23.437~25	2.32	6.67	38.31	2.67	2.41	17.85	5.14	5.29	75.19
其他	22.18	41.40	25.25	50.61	44.41	2.59	20.37	38.05	6.16

表4 鲁甸地震波作用下BFRP锚索应变波频带的能量分布

Table 4 Energy distribution of strain wave band of BFRP cable under Ludian seismic wave

频段/Hz	T1锚索各频段振动能量分布			T2锚索各频段振动能量分布			T3锚索各频段振动能量分布		
	百分比/%			百分比/%			百分比/%		
	1-2	1-3	1-4	1-2	1-3	1-4	1-2	1-3	1-4
0~1.562	64.23	74.10	61.10	20.86	95.98	20.40	97.67	87.12	84.57
1.562~3.125	4.22	5.89	1.39	11.13	0.37	2.22	0.56	0.79	1.02
3.125~4.687	8.49	2.79	2.68	34.90	1.57	1.65	0.13	1.97	0.04
4.687~6.25	1.53	1.88	0.50	2.15	0.06	1.56	0.03	0.58	0.13
6.25~7.812	1.41	0.69	1	1.56	0.08	0.89	0.12	0.52	0.09
7.812~9.375	2.93	0.64	1.68	4.89	0.44	1.14	0.20	1.93	0.40
9.375~10.937	2.61	1.47	1.35	3.03	0.15	1.06	0.14	0.53	0.30
10.937~12.5	3.67	1.04	1.32	6.96	0.47	0.80	0.23	1.13	0.06
12.5~14.062	0.32	0.11	0.28	0.15	0.01	0.64	0.07	0.11	0.11
14.062~15.625	0.62	0.22	0.26	0.24	0.02	0.56	0.03	0.10	0.06
15.625~17.187	1.41	1.56	1.21	3.22	0.21	0.57	0.16	0.45	0.17
17.187~18.75	0.58	0.70	0.29	0.63	0.05	0.64	0.05	0.10	0.10
18.75~20.312	3.24	4.21	1.83	0.77	0.06	2.13	0.02	1.14	1.26
20.312~21.875	1.06	1.37	0.72	1.05	0.03	1	0.12	0.82	0.38
21.875~23.437	0.77	0.45	0.78	2.21	0.13	0.69	0.19	0.94	0.18
23.437~25	0.77	0.54	20.53	4.40	0.17	53.29	0.07	0.76	10.08
其他	2.16	2.34	3.08	1.85	0.20	10.76	0.21	1.01	1.05

输入加速度峰值为0.6g的鲁甸地震波时,锚固段内BFRP锚索各测点振动能量分布见表4,分析表中各测点能量分布,认为BFRP锚索结构T1、T3在地震动作用下在应变波主频以低频段(0~1.532 Hz)为主,锚固体内各测点锚索应变协调性较好,而T2锚索在锚固段端部、中部、尾部的主频分别为3.125~4.687 Hz、0~1.562 Hz和23.437~25 Hz,由上文分析可知,边坡中部锚索轴力响应在输入地震波加速度达到0.6g时的传递规律,可以发现锚固结构损坏与锚索振动主频分布有关,锚固体内锚索应变主频不一致时,会导致锚索与注浆体之间出现“差拍”作用,引起锚索与注浆体之间的不协调运动,导致第一界面不断地受剪揉搓,形成损伤到破坏的时间累积效应。

输入加速度峰值为0.6g的El Centro地震波时,锚固段内BFRP锚索各测点振动能量分布见表5,分析表中各测点能量分布,BFRP锚索结构T1、T2、T3的应变波主频均为低频段(0~1.532 Hz),锚固体内锚索与注浆体之间变形协同,具有较好的整体

性,可以认为El Centro地震波作用下BFRP锚索锚固段能保持更好的耐久性。

### 3 结 论

(1)锚固段内BFRP锚索残余轴力在地震动激励过程中并非突然产生,而是一种累积形成的过程,随着锚固结构位置高度的增加锚固体内锚索产生残余轴力现象受地震作用的影响增大,这一过程伴随着锚固段端口位置注浆材料的黏结劣化破坏。

(2)随着输入地震波加速度峰值的增大,由于坡体结构屈服状态时刻发生变化,锚索空间轴力峰值大小增长规律随边坡屈服状态发生变化,在边坡锚固工程建设中,沿坡面向上不同高程位置处的坡体动力响应差别较大,对各级坡面锚固结构的动力作用也不完全相同,因此坡面BFRP锚固结构设计中应适当加大边坡中上部位置的设计锚固力。

(3)锚固段内应变波频谱特性与输入地震波类型有关,T1(坡脚)和T3(坡顶)锚索锚固段内测点

表5 EI Centro地震波作用下BFRP锚索应变波频带的能量分布

Table 5 Energy distribution of strain wave band of BFRP cable under EI Centro seismic wave

频段/Hz	T1锚索各频段振动能量分布			T2锚索各频段振动能量分布			T3锚索各频段振动能量分布		
	百分比/%			百分比/%			百分比/%		
	1-2	1-3	1-4	1-2	1-3	1-4	1-2	1-3	1-4
0~1.562	45.17	94.92	47.97	63.69	96.9	59.09	83.61	89.87	66.97
1.562~3.125	2	0.39	1.37	2.86	0.12	0.95	2.86	0.55	1.42
3.125~4.687	7.54	0.28	3.21	7.06	0.61	0.70	0.40	0.64	0.30
4.687~6.25	4.47	0.31	1.16	2.43	0.15	0.95	0.48	0.71	1.15
6.25~7.812	3.04	0.24	2.29	1.24	0.11	0.50	1.56	0.55	0.66
7.812~9.375	4.33	0.36	2.26	3.54	0.34	0.72	1.06	0.63	0.76
9.375~10.937	4.10	0.17	2.20	6.95	0.43	0.54	0.71	0.29	0.57
10.937~12.5	2.14	0.19	2.08	5.23	0.50	0.98	1.39	1.35	1.10
12.5~14.062	0.22	0.03	0.21	0.13	0.01	0.28	0.16	0.08	0.38
14.062~15.625	0.33	0.03	0.91	0.29	0.02	0.36	0.21	0.16	0.49
15.625~17.187	2.34	0.21	0.44	0.86	0.07	0.39	0.76	0.42	0.51
17.187~18.75	0.86	0.09	4.06	0.24	0.03	0.32	0.62	0.19	1.24
18.75~20.312	7.74	0.89	2.35	1.11	0.16	0.44	1.11	1.01	0.71
20.312~21.875	3.60	0.51	2.72	1.38	0.16	0.49	1.41	1.01	0.84
21.875~23.437	3.96	0.44	3.17	1.42	0.16	0.29	1.26	0.88	1.63
23.437~25	4.48	0.53	20.80	0.77	0.11	28.54	0.69	0.72	18.59
其他	3.68	0.41	2.80	0.80	0.12	4.46	1.71	0.94	2.68

随着锚固深度的增加,锚索自振响应主频由低频逐渐转变为高频;输入EI Centro地震波时,锚固体内部应变波主频均为低频段;输入鲁甸地震波时,T2(坡中)锚索在锚固段端口、中部、尾部的主频差异较大,从而导致锚索与注浆体之间出现“差拍”作用,引起锚索与注浆体之间之间的不协调运动,导致第一界面不断地受剪揉搓,形成损伤到破坏的时间累积效应。

参考文献:

[1] 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 Ch P, Lin X J, Li T, et al. Study on the suitability of basalt fiber reinforcement as anchor rod[J] Journal of Luoyang Institute of Technology (Natural Science), 2012,22(4):24-27. (in Chinese)

[2] 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 A F, Zhao W, Li Y, et al. Design and application of BFRP bolt (cable) support for highway rock slope[J]. Hunan Transportation Science and Technology, 2017,43(3):10-13,17. (in Chinese)

[3] 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. Experimental study on mechanical properties of basalt fiber composite reinforcement and application of rock and soil anchoring[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.(in Chinese)

[4] 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 experimental study on anchorage mechanism of BFRP mortar anchor[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018. (in Chinese)

[5] 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 method of basalt fiber reinforced composite anchor support soil slope[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)

- [6] 蔡立. 玄武岩筋材锚杆(索)锚具研制及工程应用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.  
Cai L. Development and engineering application research of basalt reinforcement bolt (cable) anchorage [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [7] Morita S. Local bond stress-slip relationship under repeated loading [C] // Proceedings, IABSE symposium on the resistance and ultimate deformability of structures. Lisbon: International Association for Bridge and Structural Engineering, 1973.
- [8] Balazs B L. Fatigue of bond [J]. ACI Material Journal, 1991, 88(6): 620-629.
- [9] 张建经, 廖蔚茗, 欧阳芳, 等. 重复荷载作用下岩锚体系力学特性和黏结性能试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(4): 829-834.  
Zhang J J, Liao W M, Ouyang F, et al. Experimental study on mechanical properties and bond properties of rock anchor system under repeated loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(4): 829-834. (in Chinese)
- [10] 董建华, 朱彦鹏, 马巍. 框架预应力锚杆边坡支护结构动力计算方法研究 [J]. 工程力学, 2013, 30(5): 250-258, 264.  
Dong J H, Zhu Y P, Ma W. Study on dynamic calculation method of frame prestressed anchor slope support structure [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(5): 250-258, 264. (in Chinese)
- [11] Ivanovic A, Starkey A, Neilson R D, et al. The influence of load on the frequency response of rock bolt anchorage [J]. Advances in Engineering Software, 2003, 34(11/12): 697-705.
- [12] 单仁亮, 周纪军, 夏宇, 等. 爆炸荷载下锚杆动态响应试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1540-1546.  
Shan R L, Zhou J J, Xia Y, et al. Experimental study on dynamic response of anchor under blast loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1540-1546. (in Chinese)
- [13] 王志佳, 张建经, 付晓. 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 Zh J, Zhang J J, Fu X. Separate design method for model test—Analysis of slope model test with anchor cable lattice as an example [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2617-2623. (in Chinese)
- [14] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(12): 2585-2592.  
Huang R Q, Li W L. Study on the development and distribution of geological disasters triggered by the “5.12” Wenchuan Earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(12): 2585-2592. (in Chinese)
- [15] 孙训芳. 材料力学 [M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.  
Sun X F. Material mechanics [M]. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2009. (in Chinese)

(本文责编: 苏泽云)