

文章编号:1673-9469(2025)03-0049-11

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.03.007

预应力锚固岩体地震响应规律的离心振动试验分析

赵宇飞¹,姜龙¹,陈曦²,尚佳艺^{1*},刘彪¹

(1. 中国水利水电科学研究院,北京 100084;2. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院,湖北 武汉 440000)

摘要: 为了探明锚固边坡随地震加速度变化的响应规律和锚索本身在地震作用下的具体响应过程,借助中国水利水电科学研究院配置的离心振动台试验设备,通过开展离心机模型试验,研究了简谐地震波作用下锚固边坡的位移变化过程,以及不同位置锚索、同一锚索不同点位的应变响应过程与规律。研究表明:边坡竖向位移与锚索应变值震荡频率和输入地震加速度频率同步性较好;锚索的应变和受力呈现出自上而下递减的状态,滑面附近的锚索需要发挥更大的加固作用。随着地震烈度的增大,锚索发挥更大的加固作用,也体现出了锚索的被动支护作用。该试验得到了锚固边坡在地震作用下的坡体位移并分析了锚索响应规律,也验证了离心模型试验对此类问题研究的较强适用性。

关键词: 预应力锚索;岩质边坡;地震荷载;离心振动试验;位移变化;应变响应

中图分类号:TV531

文献标识码:A

Centrifugal Vibration Test Analysis of Seismic Response Laws of Prestressed Rock Mass

ZHAO Yufei¹, JIANG Long¹, CHEN Xi², SHANG Jiayi^{1*}, LIU Biao¹

(1. China Institution of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100084, China; 2. Economic and Technological Research Institute State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Wuhan, Hubei 440000, China)

Abstract: In order to clarify the response patterns of the anchored slope under the variation of seismic acceleration and the specific response process of the anchor cable under the action of earthquakes, by using the centrifugal vibration test equipment configured by the China Water Resources and Hydropower Research Institute, centrifugal model tests were carried out to study the displacement change process of the anchored slope under the action of harmonic seismic waves, as well as the strain response process and patterns of different positions of the anchor cable and different points of the same anchor cable under the action of earthquakes. The research results show that the oscillation frequency of the vertical displacement of the slope and the strain value of the anchor cable is in good synchronization with the input seismic acceleration frequency; the strain and force of the anchor cable show a decreasing state from top to bottom, and the anchor cables near the sliding surface need to play a greater reinforcing role. With the increase of seismic intensity, the anchor cable plays a greater reinforcing role, and also demonstrates the passive support function of the anchor cable. This test obtained the analysis of the displacement and response patterns of the slope and anchor cables under the action of earthquakes for the anchored slope, and also verified the strong applicability of the centrifugal model test for the research of such problems.

Key words: prestressed anchor cable; rock slope; seismic load; centrifugal vibration test; displacement change; strain response

收稿日期:2024-02-26

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(5200-202322135A-1-1-ZN)

第一作者:赵宇飞(1979—),男,山西陵川人,博士,正高级工程师,主要从事岩土工程研究。

* 通信作者:尚佳艺(1999—),女,河南灵宝人,硕士,主要从事岩土工程稳定分析研究。

预应力锚索技术最早应用于1934年阿尔及利亚舍尔法重力坝改建加高工程,该坝使用了37根预应力锚索进行加固,单孔荷载达106 N,其运行20年后测量发现预应力仅损失3%,大坝整体稳定性良好^[1]。20世纪60年代开始,预应力锚索技术在国内工程中也得到运用。1964年梅山水库连拱坝的坝肩加固中首次使用了预应力锚索;1990年,漫湾水电站成功布设了2 000余根预应力锚索用以加固其左岸滑坡,开启了我国大规模边坡锚固工程的先河^[2]。预应力锚索凭借其加固效果好、经济实用和对岩体造成的扰动破坏较小等众多优势^[3-4],得到了非常广泛的应用。预应力锚索在三峡、紫坪铺水库等大型工程的边坡加固中更是起到了难以替代的作用^[5-6]。

我国地处环太平洋地震带与欧亚地震带交汇区,地震断裂带十分活跃,一直以来地震灾害频发,严重威胁了人民群众的生命安全和财产安全,为经济社会发展带来大量的负面影响。因此,地震作用下预应力锚固体系的动力响应机制研究具有重大现实意义。其中锚索结构在地震激励下的动力相互作用机理、破坏模式演化规律等关键科学问题亟待突破。采用预应力锚索加固的紫坪铺水利枢纽工程在遭受了超过其设计地震烈度的汶川地震后,仍保持了较好的稳定性,李凯等^[7-11]通过安装多点位移计和锚索测力计,对比汶川地震前后的各项数据后发现,虽然地震后紫坪铺水库工程各类边坡都产生了一定变形,但锚索支护部位均未出现垮塌破坏现象,且表面位移量均控制在十几毫米以内,证明锚索有效抑制了坡体变形。但已有研究多聚焦于边坡整体力学行为表征,采用现场原位检测和数值模拟相结合的技术路线,研究成果偏于宏观,缺

乏对单根锚索在地震作用下的响应过程、响应特征及破坏动态演化过程的深入研究。利用离心机等大型设备,开展离心机中振动试验,进行预应力锚索地震作用下的精细化模拟,能够针对不同部位的锚索开展地震过程中的响应特征分析,目前这部分的研究成果相对较少。李林昊等^[12]通过离心机模型试验,分析了边坡中加固的锚索在地震作用下的受力状况,揭示了预应力锚索支护的主动与被动作用,但未对单根锚索的响应特征进行深入分析。

本文应用中国水利水电科学研究院岩土所拥有的离心振动台试验设备,开展了顺层滑坡模式下的锚索在地震作用下的响应规律分析,为了进一步细致了解地震作用下输入地震波及锚索不同位置响应规律与特征,本次试验采用了正弦波作为输入地震波。通过分析不同布设位置的锚索、同一锚索关键点位的地震响应,以及地震波作用各阶段的边坡位移与锚索应变规律,本研究相关成果不仅为揭示全长粘结型锚索的动力响应机制及失效演化特征提供了关键依据,同时为预应力锚索边坡加固设计等工程实践提供了重要参考。

1 试验方案

1.1 相似设计

本文使用白金汉量纲分析 π 定理来建立相似准则,从而确定各项物理量的相似比。记模型值与原型值之比为相似比 λ ,取 $\lambda_L = 30$, $\lambda_g = 1/30$, $\lambda_\rho = 1$ 为控制量,根据 π 定理可推出,本试验涉及的主要物理量相似关系和相似比尺如表1所示。

表1 主要物理量相似关系和相似比尺

Tab. 1 Similarity relation and similarity scale of main physical quantities

物理量名称	量纲	相似关系	相似比尺	物理量名称	量纲	相似关系	相似比尺
密度 ρ	$[ML^{-3}]$	λ_ρ	1	几何尺寸 L	$[L]$	λ_L	30
弹性模量 E	$[ML^{-1}T^{-2}]$	$\lambda_E = \lambda_\rho \lambda_L \lambda_g$	1	位移 s	$[L]$	$\lambda_s = \lambda_L$	30
粘聚力 c	$[ML^{-1}T^{-2}]$	$\lambda_c = \lambda_\rho \lambda_L \lambda_g$	1	频率 f	$[T^{-1}]$	$\lambda_f = \lambda_L^{-1/2} \lambda_g^{1/2}$	1/30
内摩擦角 φ	$[1]$	$\lambda_\varphi = 1$	1	输入加速度 a	$[LT^{-2}]$	$\lambda_a = \lambda_g$	1/30
泊松比 μ	$[1]$	$\lambda_\mu = 1$	1	重力加速度 g	$[LT^{-2}]$	λ_g	1/30
应力 σ	$[ML^{-1}T^{-2}]$	$\lambda_\sigma = \lambda_\rho \lambda_L \lambda_g$	1	力 F	$[MLT^{-2}]$	$\lambda_F = \lambda_\rho \lambda_L^3 \lambda_g$	900
应变 ε	$[1]$	$\lambda_\varepsilon = 1$	1	时间 t	$[T]$	$\lambda_t = \lambda_L^{1/2} \lambda_g^{-1/2}$	30

1.2 试验设备

本试验采用的是中国水利水电科学研究院于1991年建成的LXJ-4-450离心模拟试验平台^[13],其有效负载为450 g·t,有效转动半径为5.03 m,最大设计加速度为300 g,有效模型负载为115 t,试验吊篮尺寸为1.5 m×1.0 m×1.5 m。基于该平台配置了世界首台水平、垂直双向离心机振动台R500B^[14],其性能技术参数如表2所示。

表2 离心机振动台R500B技术参数
Tab.2 Technical parameters of centrifuge shaking table R500B

项目	参数
离心机运转加速度	50 g
最大振动加速度	30 g(水平)/20 g(竖直)
振动频率	10~400 Hz
最大振动历时	3 s
最大振动负载	440 kg
振动波形	正弦波、任意地震波
振动台面尺寸	1000 mm×700 mm
最大振幅	±5 mm

在模型箱的选取方面,综合考虑加速度相似比尺和离心机振动台技术参数,选取了铝合金材质层状模型箱,其内部尺寸为750 mm×350 mm×520 mm。

1.3 模型设计与制作

1.3.1 模型尺寸

综合考虑离心机模型箱尺寸、边坡原型尺寸和长度相似比尺,最终确定模型尺寸为750 mm×350 mm×420 mm,共布置上、中、下三排两两并列的锚索,锚索与滑面相垂直,如图1所示。

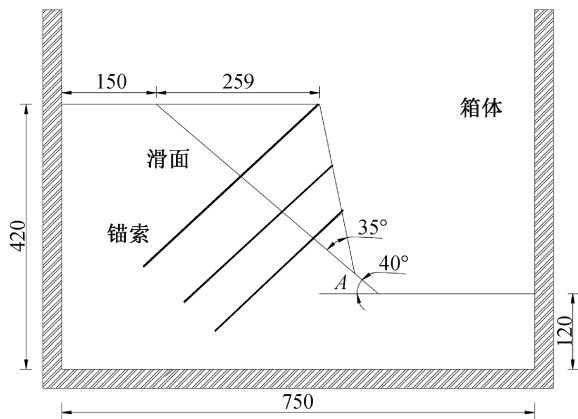


图1 模型整体示意图(单位:mm)

Fig.1 Diagram of overall model (unit:mm)

1.3.2 模型材料

对于边坡岩体模拟材料的选取,在综合考虑

原型岩体密度、弹性模量、抗压强度、内摩擦角、粘聚力等物理力学参数,对应相似比尺,模型材料获取、制作的成本和难度后,最终确定采用42.5普通硅酸盐水泥、标准砂和水配制的水泥砂浆来制作坡体模型,其密度为2 g/cm³,抗压强度为4.5 MPa,弹性模量为6.3 GPa。为了简化模型制作过程,选取牛皮纸作为滑面材料。

对于锚索模拟材料的选取,除了同样考虑原型锚索各项物理力学参数和对应相似比尺之外,还需要考虑后续应变片安装问题,最终采用紫铜作为锚索的模拟材料,其截面尺寸为1 mm×10 mm,密度为8.92 g/cm³,弹性模量为108 GPa,泊松比为0.32。

1.3.3 应变片与传感器布置

综合考虑锚索、滑面位置以及受力变形的特点,最终决定在模型上共布置24片应变片,便于全面监测锚索不同位置的不同响应状况。其中一列锚索的应变片具体安装位置和编号如图2和图3所示。同时,为了监测坡体的位移状况,且受模型箱内尺寸限制,本试验中仅在坡顶安装激光位移传感器,监测各工况下坡体的竖向位移。最终制作完成的边坡模型如图4所示。

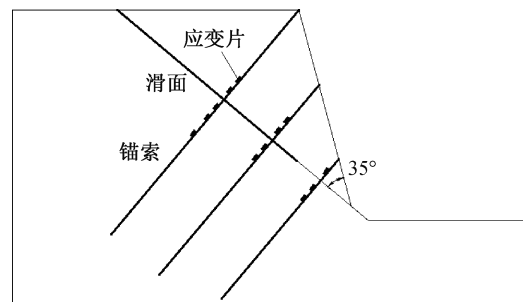


图2 应变片布置示意图(侧视图)

Fig.2 Strain gauge arrangement (side view)

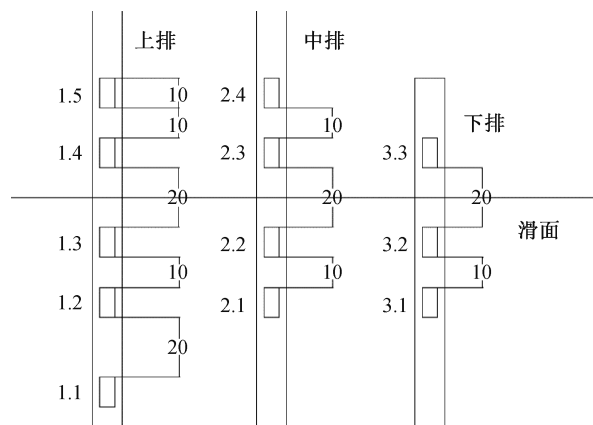


图3 应变片布置示意图(正视图,单位:mm)

Fig.3 Strain gauge arrangement diagram (front view, unit:mm)

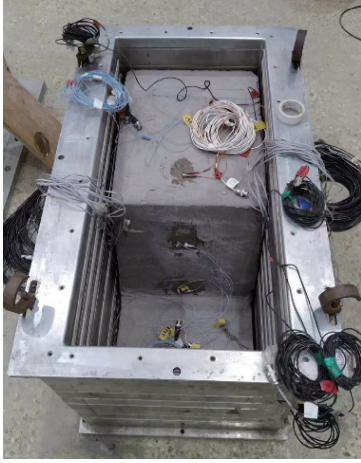


图4 制作完成的试验模型

Fig. 4 Completed test model

1.3.4 试验工况

本次试验在 30 g 离心加速度下进行,采用标准正弦波作为地震动输入。分别选取地震烈度为 8 度(水平地震加速度峰值为 7.5 g)和 9 度(水平地震加速度峰值为 15 g)的两种试验工况。地震波输入时长均为 2.4 s,周期为 0.19 s。水平峰值加速度 7.5 g 的工况所采用的地震波时程曲线如图 5 所示。

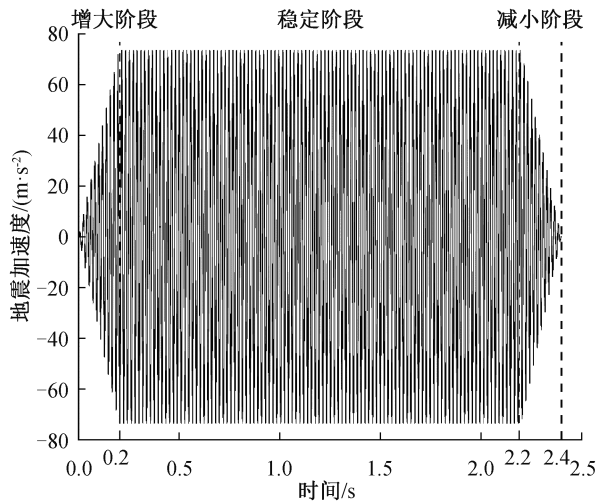


图5 输入正弦波加速度时程曲线

Fig. 5 Input sinusoidal acceleration time history curve

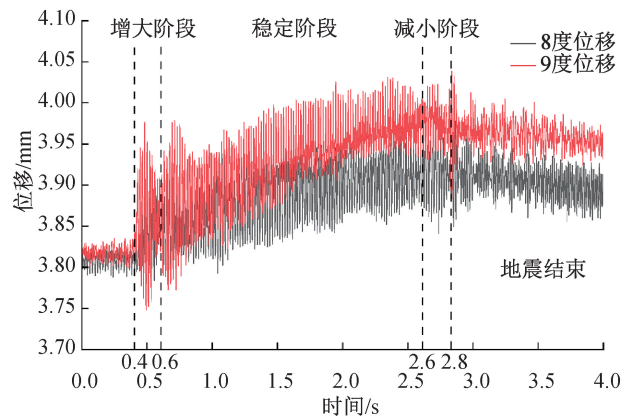
根据地震加速度的变化,可将地震动输入划分为加速度增大阶段 0.2 s、稳定阶段 1.8 s 和减小阶段 0.2 s,在下文各图中均用对应坐标处的虚线予以表示。对于不同加载工况,因为在试验连续进行过程中无法改变输入地震波的波形和时长,所以不同工况下仅对正弦波的振幅进行调整。地震动输入采取水平向和竖向双向独立输入,根据边坡设计规范中的规定,竖向向地震波峰值加

速度为水平向的一半。

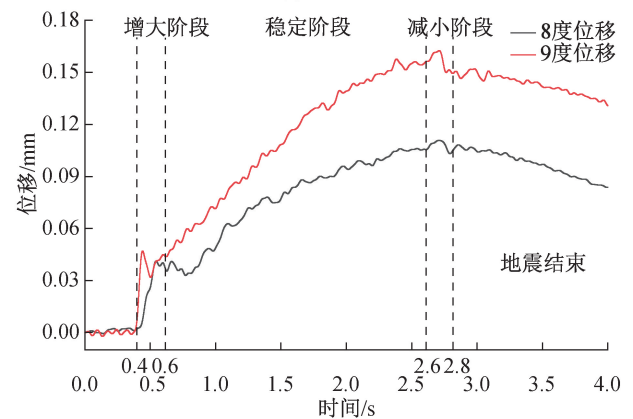
2 边坡位移分析

2.1 地震全过程位移变化规律

选取地震开始前 0.4 s、地震作用全程 2.4 s 和地震结束后 1.2 s 的数据进行研究,全程共计 4 s。将不同地震工况下激光位移传感器测得的坡体竖向位移数据绘制成图,如图 6(a)所示。由于受干扰信号影响,原始数据波动较大,因此需要进行滤波处理。通过 FFT 滤波对位移数据进行处理,并将两组数据调至同一起点,最终得到图 6(b)所示的位移曲线。



(a) FFT滤波前



(b) FFT滤波后

图6 地震过程中坡体竖向位移曲线

Fig. 6 Vertical displacement curve of slope during earthquake

由图(6)可知,不同地震烈度下坡体的竖向位移变化规律和过程是基本一致的。在地震加速度开始和结束阶段,位移值均会产生较大波动,这是因为坡体受力状态因地震波突然改变,引发了边坡响应变化。在地震波开始输入、地震加速度迅速增大时,坡体竖向位移迅速增长;地震加速度平稳后,位移变化以较缓斜率稳定持续增长;当地震

加速度突然减小时,坡体竖向位移再次加剧波动;地震停止后,边坡位移缓慢回落,但因产生残余变形,位移曲线无法回归至原点。

2.2 地震全过程位移幅值变化规律

通过绘制图6(a)曲线的包络线,得到8度和9度地震过程中的位移幅值变化曲线,如图7所示。由图可知,地震烈度越大,前期坡体的竖向位移幅值越大,尤其表现在地震加速度迅速增大的阶段以及加速度稳定阶段的前0.2 s,这是由于9度地震引起的边坡惯性力不协调程度更大。但在地震波稳定作用下,两种工况下坡体的竖向位移幅值均逐渐回落并趋于稳定,这可能是由于锚索发挥了明显的被动响应支护作用,有效地控制了坡体的位移和变形发展。

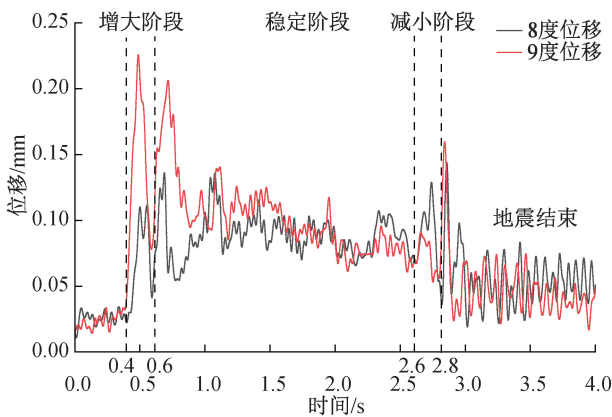


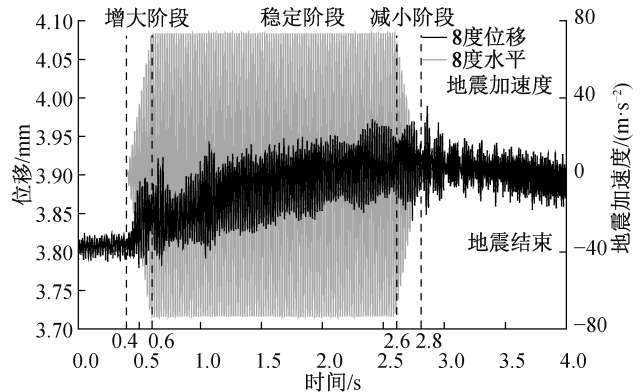
图7 不同地震烈度下坡体竖向位移幅值变化曲线

Fig. 7 Variation curves of the vertical displacement amplitude of the slope under different seismic intensities

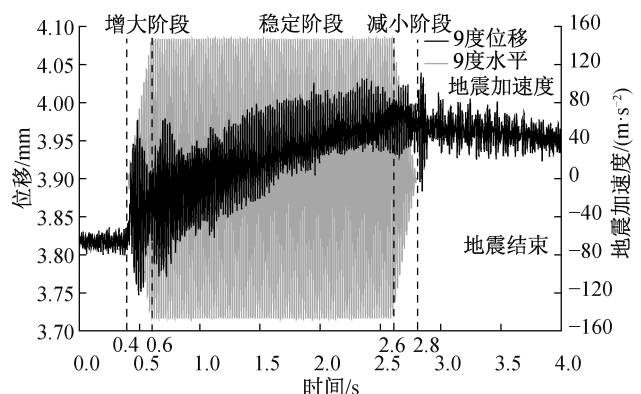
2.3 位移随地震加速度变化的响应规律

将两种地震工况下的位移原始数据和水平向地震加速度输入数据绘制在同一张图中,如图8(a)和(b)所示。可知,不同地震烈度下坡体竖向位移振荡频率与输入简谐波频率基本一致。为了进一步分析位移随加速度周期性变化的响应规律,分别在加速度增大阶段、稳定阶段和减小阶段选取三个时间段,将两个周期内的位移数据和加速度输入数据绘制在同一坐标系内,分别如图9(a)—(c)和图10(a)—(c)所示。边坡竖向位移是由地震加速度引起的,故位移振荡频率与输入加速度频率同步性较好,尤其在加速度稳定阶段,位移与地震加速度几乎无相位差。而在加速度增大和减小阶段,由于坡体不协调惯性力的作用,位移响应也会发生变化,两者相位差较为明显。将不同工况下的位移响应状况横向对比,可知地震

加速度越大,同一时间阶段内的位移响应也越及时。由于竖向和水平向地震加速度周期、时长一致,仅大小不同,边坡位移随竖向地震加速度的响应规律也大致相同。



(a) 地震烈度为8度



(b) 地震烈度为9度

图8 坡体竖向位移随输入地震加速度变化曲线

Fig. 8 Variation curve of vertical displacement of slope with input seismic acceleration

3 锚索应变响应分析

3.1 地震全过程锚索应变响应规律

锚索应变监测数据的对比分析表明,不同点位应变数据的变化趋势基本一致。本研究选取应变响应最为显著的标号为1.3的测点监测数据作为典型样本,将两种地震工况下的应变时程曲线与对应加速度时程进行同步对比分析,如图11(a)和(b)所示。可知,不同地震烈度下应变振荡频率与输入简谐波的频率基本一致。若将应变初始值归0,可发现随着地震动加速度的持续输入,应变值持续增大;在地震发生1.4 s左右之后,锚索通过自身调整发挥了良好的阻滑作用,应变值趋于稳定且基本不变;同时,对比发现地震烈度越大,锚索产生的应变响应越明显。

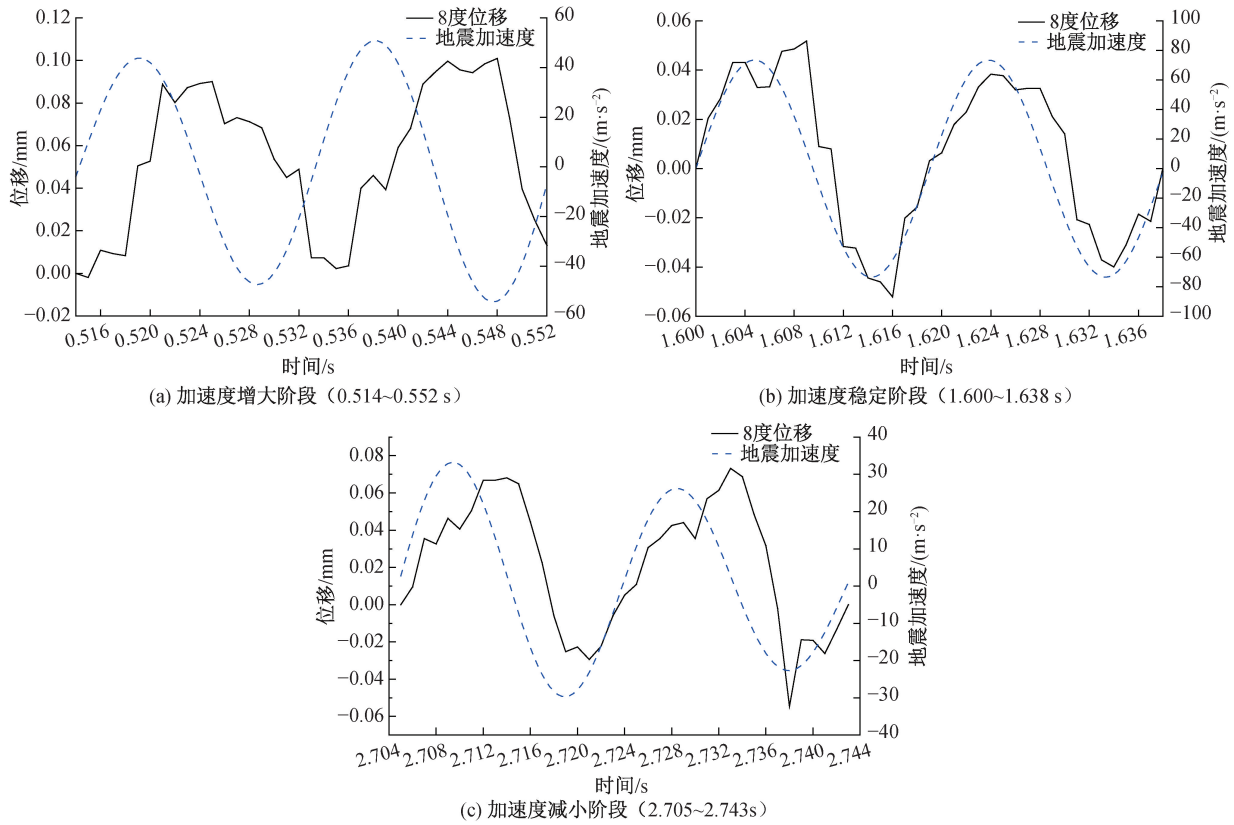


图9 8度地震下不同时间段坡体竖向位移随输入地震加速度变化曲线

Fig. 9 Variation curve of vertical displacement of slope with input seismic acceleration at different time stages under 8 degree earthquake

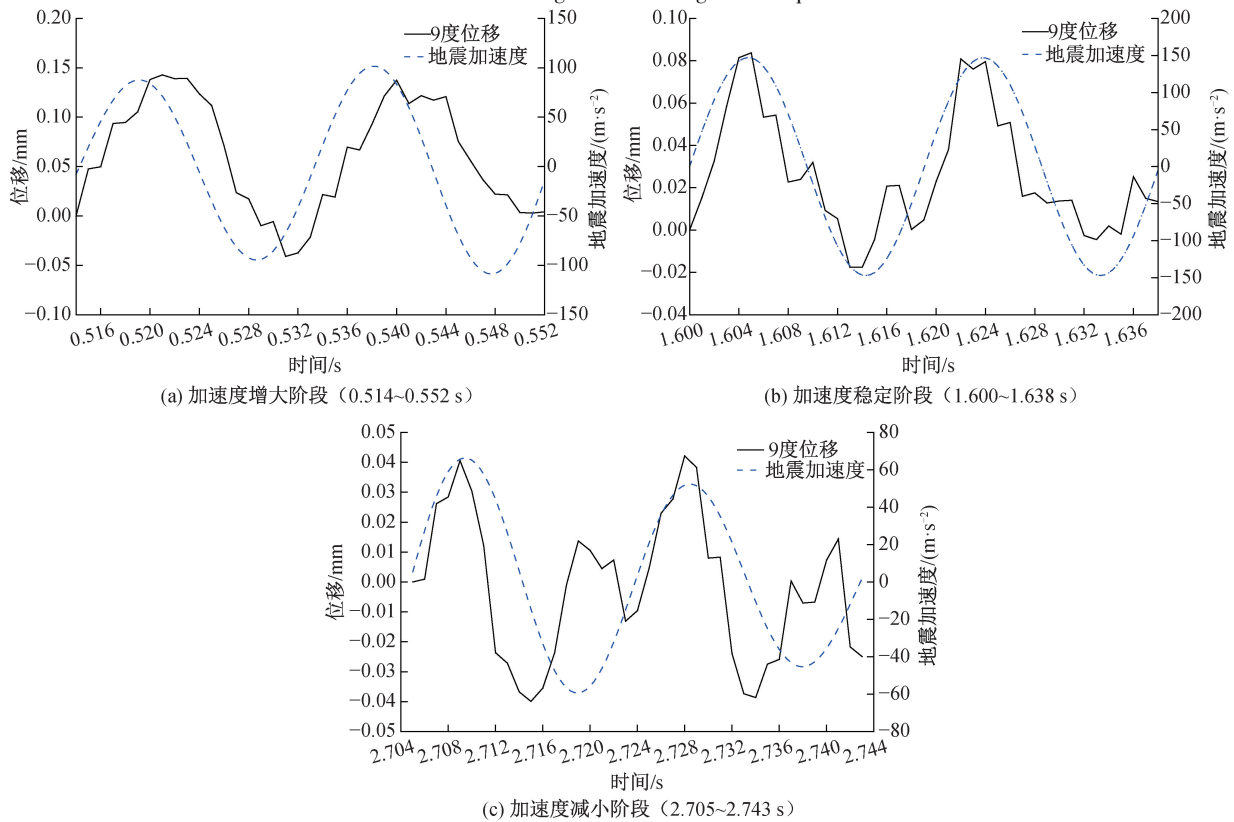


图10 9度地震下不同时间段坡体竖向位移随输入地震加速度变化曲线

Fig. 10 Variation curve of vertical displacement of slope with input seismic acceleration at different time stages under 9 degree earthquake

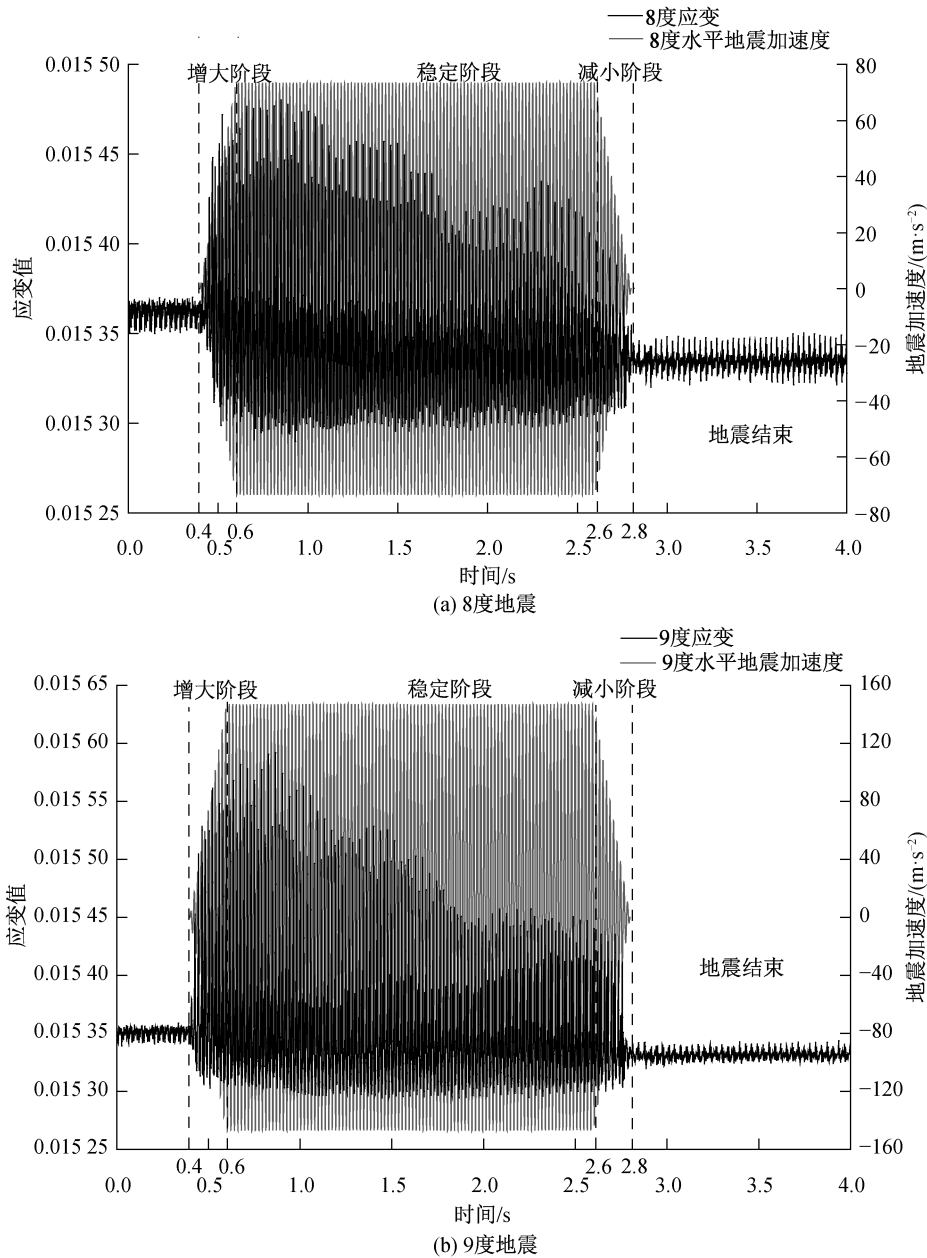


图 11 标号 1.3 处应变值随输入地震加速度变化曲线

Fig. 11 Variation curve of strain value at mark 1.3 with input seismic acceleration

3.2 地震全过程应变幅值响应规律

3.2.1 同一锚索不同部位应变幅值变化规律

选取上排某侧锚索为分析对象,该锚索上安装的应变片标号为 1.1—1.5。通过数据整理分析,得到了地震烈度为 8 度和 9 度两种试验工况下同一锚索不同部位应变幅值的变化曲线,分别如图 12(a)和(b)所示。可以看出,不同地震烈度下应变幅值的变化规律基本一致。在地震加速度增大阶段,应变幅值迅速增大;待地震波加速度稳定后,锚索通过自身应变调节,应变幅值趋于稳定;地震加速度迅速减小为 0 时,应变幅值也迅速回落,整个变化过程与地震波的输入过程具有较好

的一致性。对比图 12(a)和(b)内同种地震烈度下不同点位应变片的幅值变化曲线,可以发现,应变片与滑面的距离越近,其应变幅值越大。这是因为滑面的存在使得滑面两侧的岩体产生较大的不协调惯性力,滑面附近的锚索被动产生响应变形抵制惯性力,使边坡整体性不被破坏,从而发挥其阻滑加固作用。随着与滑面距离的增加,锚索因地震加速度而产生的阻滑加固作用越小,相应应变幅值也越小。

为了更直观地反映不同地震烈度和不同时间点下,同一锚索各点位的响应差异,选取地震开始后 0.2、1.2 和 2.2 s 三个时间点,以 1.1 号应变片

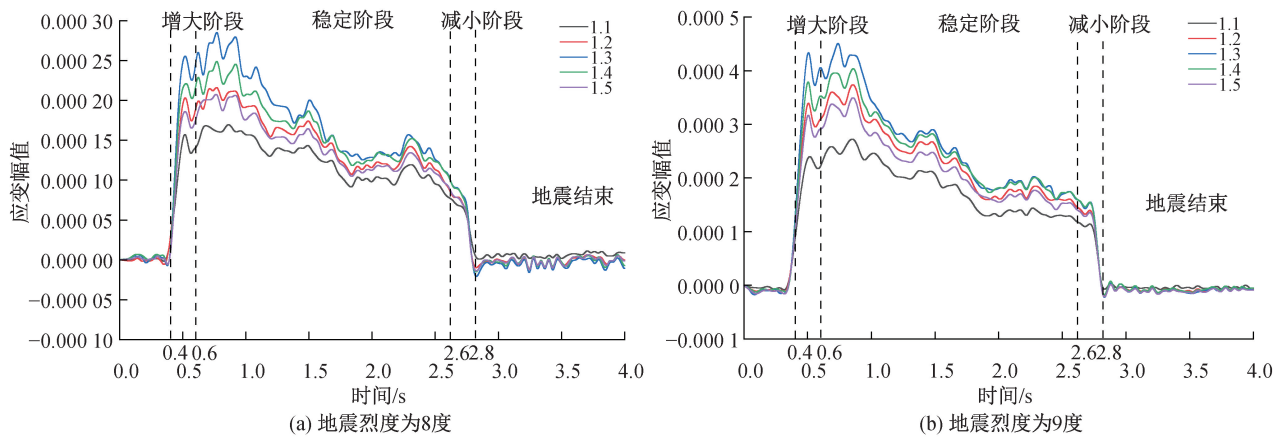


图 12 锚索不同点位应变幅值变化曲线

Fig. 12 Variation curve of strain amplitude at different points of anchor cable

的应变幅值为基准点,将两种地震烈度下上排锚索各点的应变幅值换算为轴向力幅值,绘制成图,如图 13(a)一(c)所示。可以看出,轴向力变化幅值随滑面距离的增大而减小,随地震烈度的增大而增大。

3.2.2 同一部位应变幅值变化规律

为对比不同地震烈度下的锚索力学响应特征,本研究将两种工况下编号为 1.3 的应变片监测数据绘制于同一坐标系中(图 14)。监测结果表明,地震烈度越大锚索应变幅值变化越明显。这

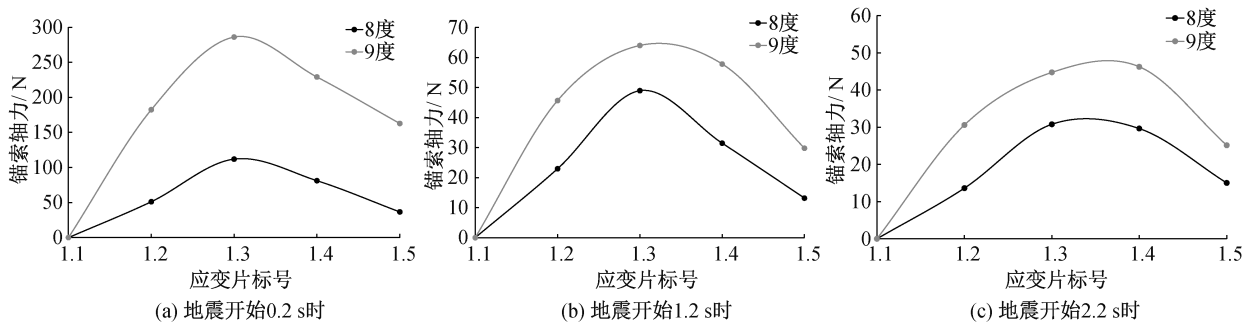


图 13 锚索不同点位在不同时间点和地震烈度下的轴向力幅值

Fig. 13 Amplitude of axial force of anchor at different points under different time and seismic intensity

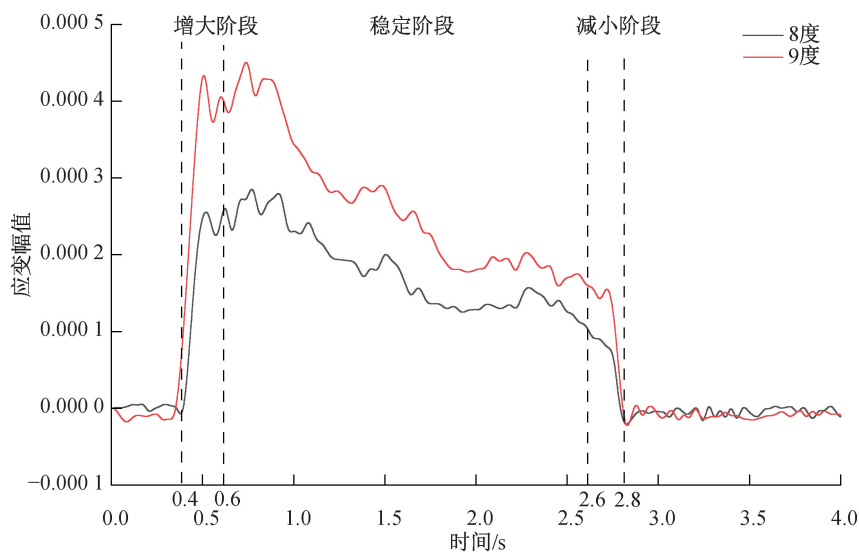


图 14 锚索同一点位在不同地震烈度下应变幅值变化曲线

Fig. 14 Variation curve of strain amplitude at the same point of anchor cable under different seismic intensities

是因为地震烈度提升导致滑面两侧岩体惯性力增大,进而使锚索需要提供更大的阻滑抗力,即同一监测部位的锚索索体应变值显著增加。通过增强的阻滑抗力有效约束地震荷载作用下的岩体变形,从而确保边坡体系的整体稳定性。这种力学响应机制也成功解释了汶川地震中的典型工程现象:紫坪铺工程进出口边坡在强震作用下,既出现锚索预应力骤增现象,又通过深部多点位移计测得岩体产生 20 mm 位移量,但边坡仍保持稳定,未发生塌滑破坏。这验证了预应力锚索在地震荷载作用下的动态响应机制——通过及时产生协调变形,充分发挥其被动支护特性,在岩体位移发展过程中持续提供渐进式阻滑加固作用。

3.2.3 不同锚索应变幅值变化规律

选取地震开始后 0.2 s 这一时间点,分别以 1.1、2.4 和 3.1 号应变片的应变幅值为基准点,将两种地震烈度下各排锚索不同部位的应变幅值转换为轴力幅值,如图 15(a)—(c) 所示。为了更直观地反映不同位置锚索的地震影响状况,取三排锚索距滑面距离相等的 1.3 号、2.2 号和 3.2 号应变试验数据,以地震开始时的应变幅值为基准点,将地震作用全过程中的应变幅值转换为轴力幅值,分别取最大值进行对比,如图 16 所示。可知,同一时间点各排锚索受力呈现出自上到下依次递减的状态,这主要是由顺层滑坡的破坏模式所决定的。由于模型下部滑面没有贯穿,因此在地震作用下滑坡体表现出以滑面下 endpoint (如图 1 中 A 点) 为支点向外转动的趋势,即上排锚索需承担更大的阻滑作用。

3.3 应变随加速度变化的响应规律

选取和 3.2 节分析中相同的三个时间阶段,将两个周期内的应变数据和加速度输入数据绘制在同一坐标系中,分别如图 17(a)—(c) 和图 18(a)—(c) 所示。锚索的应变响应体现了被动支护作用,

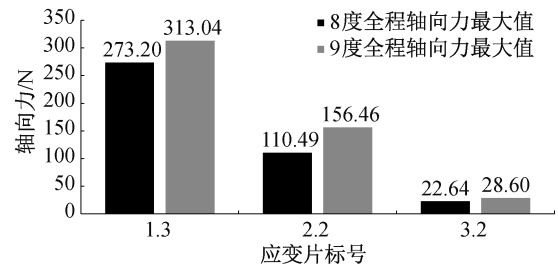


图 16 距滑面相同距离的不同锚索轴向力幅值最大值
Fig. 16 Maximum values of the axial forces of different anchor cables at the same distance from the sliding surface

即边坡在地震作用下产生变形后,锚索内部才随之产生响应变形,发挥加固作用。因此,相较于坡体位移,应变值与地震加速度的相位差更为明显,在地震作用的全过程中,相位差均相同。而将不同工况下的位移响应状况横向对比,可知地震加速度越大,同一时间点的相位差更小,预应力锚索所产生的阻滑加固作用时效性显著提升。

4 结论

本文以实际工程中的锚固岩质边坡为原型,开展了锚固岩质边坡的离心振动模型试验,探讨了在不同的地震强度作用下,边坡预应力锚索、边坡岩体的响应规律与特征。主要结论如下:

1) 边坡位移方面:位移震荡频率与输入地震加速度频率同步性较好;在地震加速度迅速变化的两个阶段,坡体竖向位移均随之出现明显的增大和减小;在地震波稳定输入的过程中,坡体竖向位移持续增大,但增幅逐渐变缓、趋于稳定;地震结束后,位移值缓慢减小,可知有永久变形产生,且地震烈度越高,产生的位移峰值与永久变形量越大。

2) 锚索响应方面:锚索应变值同样与地震波产生同频震荡,在地震波增大及减小的两个阶段,应变幅值产生较大变化;而地震波稳定阶段,锚索

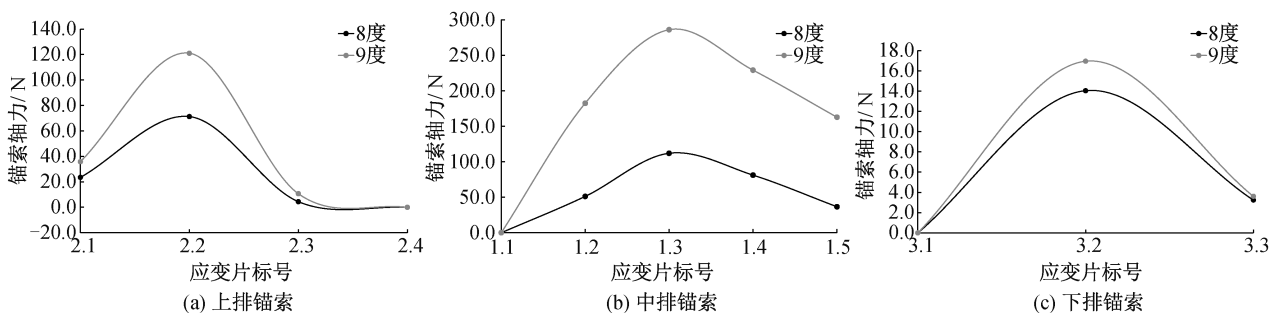


图 15 不同位置锚索在地震开始 0.2 s 时轴向力幅值

Fig. 15 Amplitude of axial force of anchor cables at different positions at 0.2 s before the start of the earthquake

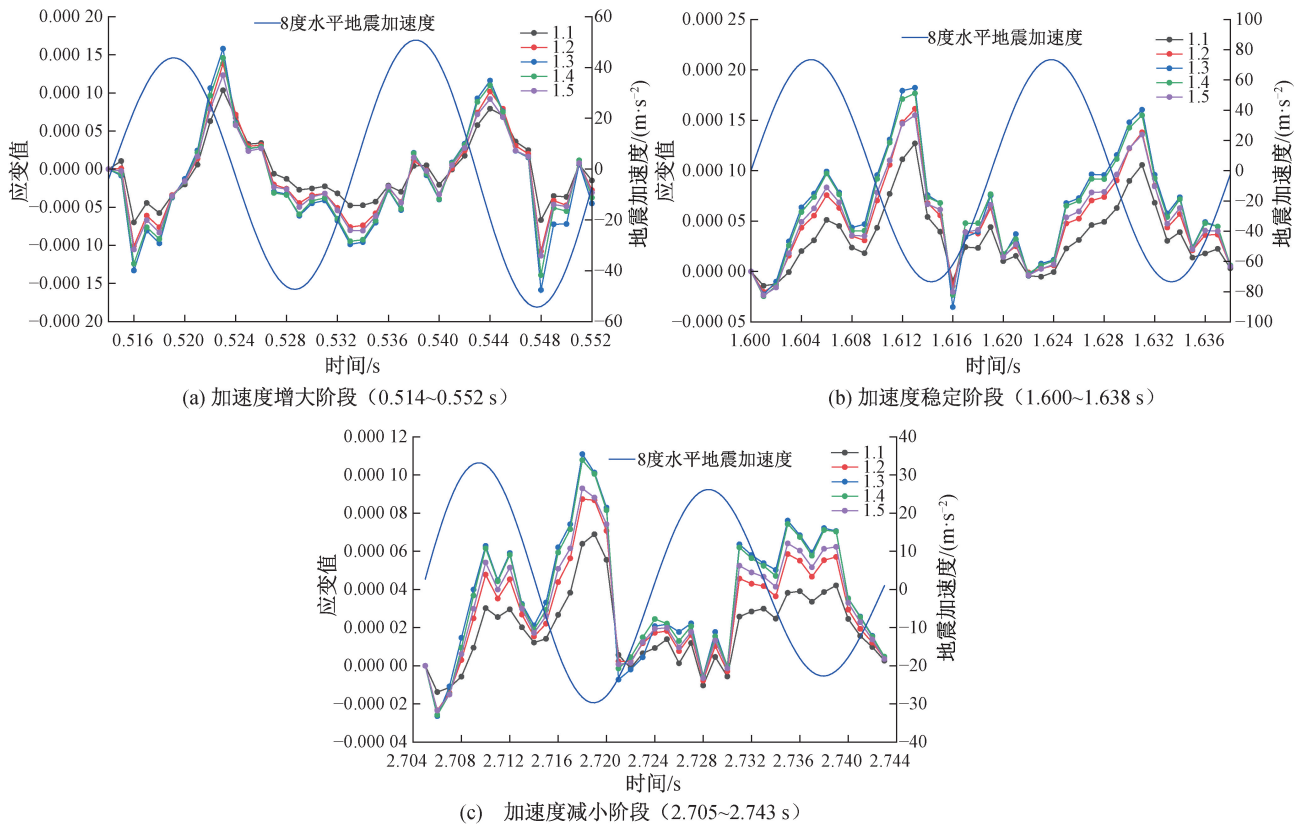


图 17 8 度地震下不同时间段应变幅值随输入地震加速度变化曲线

Fig. 17 Variation curve of strain amplitude with input seismic acceleration at different time stages under 8 degree earthquake

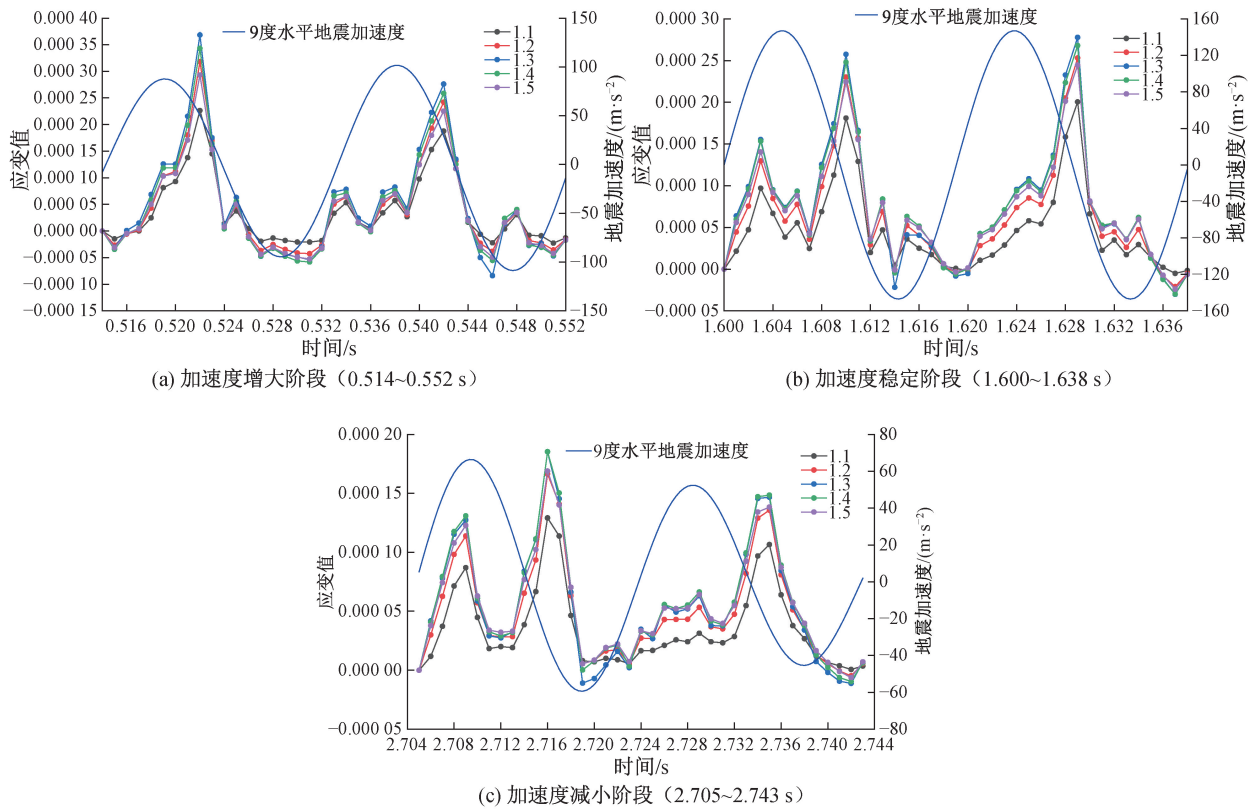


图 18 9 度地震下不同时间段应变幅值随输入地震加速度变化曲线

Fig. 18 Variation curve of strain amplitude with input seismic acceleration at different time stages under 9 degree earthquake

通过自身形变进行调节,应变幅值趋于稳定。对于同一锚索上的不同部位,与滑面的距离越近,其应变幅值越大,说明滑面附近的锚索需要发挥更大的加固作用。对于锚索的不同位置,其应变和受力呈现出自上而下递减的状态。对于不同工况,地震烈度越大,为了约束坡体进一步形变,锚索需要发挥更大的加固作用,也体现出了锚索的被动支护作用。

3)随着地震烈度的增大,位移和应变响应与输入简谐波的相位差均有所缩小,在地震加速度稳定阶段,位移基本达到无相位差的同频响应;锚索应变值与地震加速度的相位差更明显,不随地震过程中加速度的变化而改变;而边坡位移与地震加速度的相位差相对较小,在地震作用全过程中有明显变化。

通过本次试验得到了锚固边坡在地震作用下坡体位移和锚索响应规律分析,也验证了离心模型试验对此类问题研究的较强适用性。但离心模型试验需要考虑的物理量众多,很难全部满足,这也导致试验模型无法完全反映原型的实际情况,更精细的锚索地震相应分析研究,还需要结合数值模拟等其他研究手段来开展。

参考文献:

- [1] 程良奎. 岩土预应力锚固技术的应用和发展趋向[J]. 工业建筑,1992(9):37-42.
- [2] 陈祖煜,杨健. 岩土预应力锚固技术的进展[J]. 贵州水力发电,2004(5):5-10.
- [3] 朱茂强. 预应力锚索技术在边坡加固中的综合效益分析[J]. 价值工程,2022,41(24):16-18.
- [4] 孙世国,贾欣欣,肖剑. 岩土预应力锚固技术研究现状及发展趋势分析[J]. 煤矿安全,2022,53(3):213-220.
- [5] 向欣,范雷,唐辉明. 预应力锚索在三峡库区边坡治理中的应用[J]. 路基工程,2008(2):49-51.
- [6] 钟贤五,周先齐. 预应力锚索在紫坪铺水利枢纽边坡工程中的应用[J]. 中国西部科技,2008(26):20-22.
- [7] 李凯. 强震作用下锚固岩质边坡的动力响应研究[D]. 成都:成都理工大学,2016.
- [8] 宋彦刚,由丽华,王昆,等. 经历汶川特大地震的紫坪铺水利枢纽工程安全监测分析[J]. 四川水力发电,2018,37(4):7-13.
- [9] 李巧,汪家林,马玉梅. 紫坪铺泄洪排砂洞进口边坡震后稳定性分析[J]. 甘肃水利水电技术,2011,47(10):1-4.
- [10] 马玉梅,汪家林,徐湘涛. 紫坪铺引水发电洞进口边坡震后安全监测分析[J]. 地质灾害与环境保护,2011,22(1):46-50.
- [11] 马玉梅. 汶川大地震对紫坪铺工程边坡稳定性影响的监测分析[D]. 成都:成都理工大学,2011.
- [12] 李林昊,赵宇飞,汪小刚. 预应力锚索边坡加固作用的离心机试验研究[J]. 水利水电技术,2018,49(1):143-148.
- [13] 侯瑜京. 土工离心机振动台及其试验技术[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2006(1):15-22.
- [14] 魏迎奇,张雪东,张紫涛,等. 基于LXJ-4-450平台的土工离心模型试验研究[J]. 水利学报,2018,49(9):1087-1096.

(责任编辑 周雪梅)