

Study on Dynamic Characteristics of Loess Slope Reinforced by Prestressed Anchor Cables Under Earthquake

Wang Xiaolin, Xue Ying*

School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an, China

Email address:

285153896@qq.com (Wang Xiaolin), 1169104611@qq.com (Xue Ying)

*Corresponding author

To cite this article:

Wang Xiaolin, Xue Ying. Study on Dynamic Characteristics of Loess Slope Reinforced by Prestressed Anchor Cables Under Earthquake. *Science Discovery*. Vol. 9, No. 6, 2021, pp. 348-353. doi: 10.11648/j.sd.20210906.22

Received: September 28, 2021; Accepted: November 15, 2021; Published: November 17, 2021

Abstract: As a commonly used method to reinforce slopes, prestressed anchor cables can effectively prevent slope instability. To study the dynamic response characteristics of loess slopes reinforced with prestressed anchor cables under earthquake action. Taking a slope in Yan'an as an example, using MIDAS/GTS numerical simulation, a model of loess slope reinforced by prestressed anchor cables under earthquake action is established, and the dynamics are analyzed in terms of slope displacement, horizontal and vertical velocity, maximum principal stress, and anchor cable axial force. Based on the response characteristics, the influence of peak seismic acceleration and ground motion duration on the stability of loess slopes is analyzed. The results show that under the action of an earthquake, the range of displacement and velocity of the slope surface is larger than that of the inside of the slope, and the slope surface is more prone to instability. The seismic wave has little effect on the axial force of the anchor cable at the same elevation. The displacement of the slope increases with the increase of the seismic peak acceleration, and the input peak acceleration is every time With an increase of 0.1g, the deformation at the slope surface S5 increases by 0.014m, and the slope displacement changes significantly with the change of the duration of the ground motion, increasing continuously.

Keywords: Seismic Slope, Prestressed Anchor Cable, Dynamic Response

地震作用下预应力锚索加固黄土边坡动力特性研究

王小林, 薛瑛*

西安科技大学建筑与土木工程学院, 西安, 中国

邮箱

285153896@qq.com (王小林), 1169104611@qq.com (薛瑛)

摘要: 预应力锚索作为一种常用加固边坡的手段,可以有效预防边坡失稳。为研究地震作用下预应力锚索加固黄土边坡动力响应特性,以延安某边坡为例,利用MIDAS/GTS数值模拟,建立地震作用下预应力锚索加固黄土边坡模型,从坡体位移、水平垂直速度、加速度、最大主应力以及锚索轴力方面分析动力响应特性,并在此基础上分析地震峰值加速度和地震动持时对黄土边坡动力特性的影响。结果表明:在地震作用下,边坡表层位移和速度变化范围较坡体内部大,边坡表面更易发生失稳现象,坡面的PGA放大系数整体较坡体内部更大,地震波对于同一高程处的锚索轴力影响不大,坡体位移随地震峰值加速度增大呈增加趋势,且输入的峰值加速度每增加0.1g,坡面S5处的变形增加0.014m,坡体位移随着地震动持时的变化发生较为显著的改变,不断地增大。

关键词：地震边坡，预应力锚索，动力响应

1. 引言

我国地震烈度VI度以上的黄土地区面积达33.51万平方公里，地震诱发滑坡是一种常见的地震此生地质灾害，在居民集中的山区发生强烈地震后，地震触发的滑坡的危害性往往比地震直接造成的灾害还要大[1]。据调查显示，滑坡是地震发生前后产生数量最多的地质灾害[2]。因此地震条件下边坡稳定性问题成为众多学者的重点研究方向[3]。

针对黄土边坡在地震作用下的动力稳定特性，国内外学者对于其在理论、实验及模拟三方面展开了大量的研究。言志信[4]等在FLAC3D的基础上，通过分析静力作用下该黄土边坡的剪应变增量、坡内、坡顶不同监测点的位移，在静力分析的基础上得出黄土边坡地震动力响应规律；叶帅华[5]等利用Geo-Studio 2012有限元分析软件建立模型，分析对比多级高填方边坡与单级填方边坡动力响应结果，以此得到地震作用下黄土多级高填方边坡动力响应规律及稳定性。杨博[6]等在野外工程地质勘察和室内实验基础上，采用强度折减法对开挖后的高路垫黄土边坡的初始状态进行分析，建立数值计算模型，模拟边坡地震响应全过程，从细观层面揭示边坡的失稳过程。邵帅[7]等以兰州地区典型边坡为原型，设计并完成了几何比尺1:20的原状黄土边坡动力离心模型试验。系统地研究了黄土边坡的地震动力响应特性、稳定性以及震陷变形规律。张泽林[8]等采用黄土-泥岩组合的概念模型，建立离心振动台试验，使其满足相似率，在此基础上，输入不同的水平向和垂向地震波，系统地研究模型边坡的地震动力响应特性。宋丹青[9]等为研究层状边坡地震波传播特性，运用FLAC3D软件建立顺层与反倾两种不同类型边坡，研究软弱夹层及其类型对地震波传播特性的影响。杨果林[10]等将汶川波作为输入地震波，对在地震作用下基覆边坡在不同支挡结构的动力特性进行数值分析和模型试验，通过对比两种分析结果表明，数值模拟与模型试验结果规律基本相符，随着挡墙高度的增加，水平向加速度放大系数增大，对于地震加速度响应特性而言，数值模拟结果虽可靠，但结果值稍偏大。陈行等以具体工程为实例，研究地震作用下不同弧形排布方式的抗滑桩加固边坡的动力响应规律和稳定性分析，结果表明，弧形排布方式可以有效地控制边坡上部土体的位移，从而减小地震作用下边坡失稳的风险，且弧形排布方式较直杆排布与反向弧形排布更加有效[11]。综合以上研究，大多数学者仅研究边坡本身在地震作用下的动力响应特性，未结合加固结构等，因此研究地震作用下锚固结构与边坡的动力响应特性是非常有必要的。

本文在前人研究的基础上，以延安某边坡为例，利用有限元软件MIDAS/GTS,建立含预应力锚索的边坡计算模型，对地震作用下的边坡最大位移，水平竖直速度、最大主应力及锚索轴力的变化规律进行数值模拟研究，并分析峰值加速度、地震动持时对边坡稳定性的影响，以期为此工程案例提供一定的参考。

2. 地震动力计算理论

2.1. 动力方程

基本力学运动方程：

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = -M\ddot{u}_g(t)$$

式中：M为质量矩阵，C为阻尼矩阵，K为刚度矩阵； \ddot{u} 、 \dot{u} 、u分别响应的加速度、速度以及位移列矩阵， \ddot{u}_g 为输入地震动加速度列矩阵。

2.2. 本构关系

本文主要是对黄土边坡动力响应问题进行探讨，需要材料在地震作用下能够发生塑性变形，已有相关研究表明边坡在静力作用下主要为“剪坏”，而动力作用下还包括“拉坏”[12-13]。因此，本文选取摩尔-库伦本构模型进行研究。

3. 计算模型及参数

3.1. 计算模型

以延安某黄土边坡为例，边坡采用抗滑桩、挡土墙及预应力锚索等方式加固。为监测不同位置黄土边坡的地震动力响应以及锚索的力学特性，分别设置水平向监测点10个，分别为V1-V7，竖直向监测点4个，分别为H1-H4，同时在边坡表面设置5个监测点，编号分别为S1-S5,如图1所示。边坡各土层物理参数从上到下分别为黄土和砂岩。土体参数如表1所示。

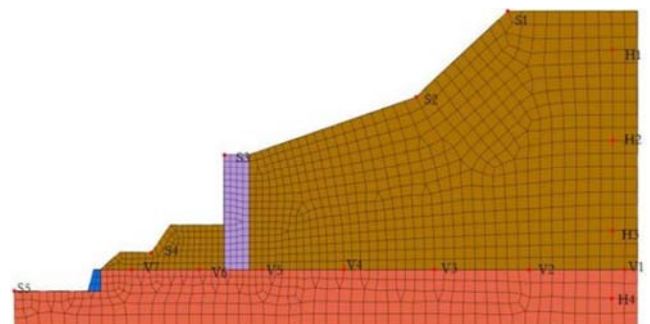


图1 计算模型。

表1 土体物理力学参数。

| 地层 | 重度 (kN/m ³) | | 岩土体抗剪强度 (建议值) | | | |
|----------|----------------------------|------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| | | | 天然 | | 饱和 | |
| | 天然 | 饱和 | 粘聚力 (kPa) | 内摩擦 角 (°) | 粘聚力 (kPa) | 内摩擦 角 (°) |
| ①层 (黄土层) | 15.8 | 17.0 | 42.6 | 34.6 | 20.6 | 19.8 |
| ②层 (砂岩) | 25.2 | 25.4 | / | 65.0 | / | 60 |

根据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010/2016年版)附录A资料,以及最新版的《中国地震动参数区划图》(GB18306-2015)得知,本场地所在的地区地震动峰值加速度为0.05g,地震动反应谱特征周期 $T_g=0.35s$,地震烈度为VI度。

3.2. 地震波

由于水平地震作用是引起边坡破坏的主要因素,本文为模拟地震作用下边坡动力响应特性,在模型底部输入水平地震波。对模型输入实际地震波记录EI-Centro波的水平加速度时程,加速度幅值适应本场地调整为0.05g,地震加速度时程曲线截取前10秒。

4. 结果分析

4.1. 位移分析

边坡体的变形是影响边坡安全及其周围建、构筑物稳定和正常使用的重要因素。为了防止边坡发生较大变形,故对边坡进行加固[14]。为了研究黄土边坡在地震作用下的位移响应规律,选取边坡体监测点位移随时间的变化曲线进行分析。本文选择具有代表性的水平测点V1及V6,竖直测点H1及H4进行分析,如图1所示。同时分析坡面监测点S1-S5的位移变化特性,如图2所示。

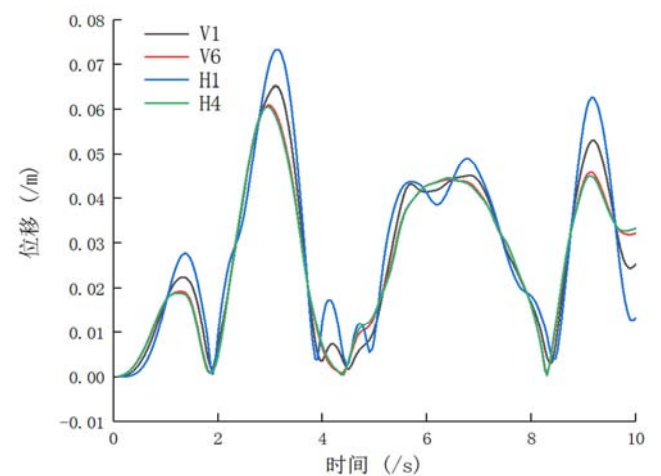


图2 位移变化规律。

由图2可知,V1、V6、H1及H4的位移图形趋势基本一致,H1的位移变化范围较其他3个监测点略大一些,H1、H4最大位移分别为0.073m、0.060m,可见边坡变形位移随着高程的增加而增大。V1、V6最大位移为0.061m、0.064m,表明越靠近黄土边坡的表面,监测点的位移越大。

由图3可知,边坡坡面位移图形的基本趋势一致,S1的坡面位移较其他4个监测点位移最大,为0.073,其余4个坡面监测点最大位移(S2-S5)分别为0.069、0.066、0.063及0.060,表明随着边坡高程的增加,坡面位移也随之增加。

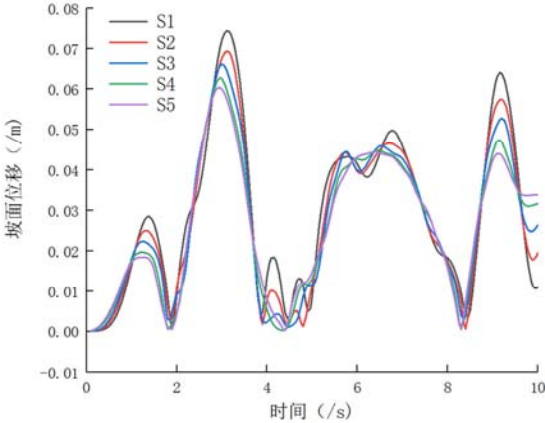


图3 坡面位移变化规律。

4.2. 速度分析

为了更清楚的对地震作用下边坡速度响应规律进行分析,故选择选择边坡内部监测点V1和坡面监测点S1水平向速度与竖直向速度,以此来研究黄土边坡内部的速度动力响应规律。由图4可知,S1的水平向速度变化范围很大,介于-0.010-0.010m/s之间,竖直向速度变化基本趋于一条直线,介于-0.151-0.115m/s之间,由图5可知,监测点V1水平速度的变化范围为-0.104-0.095m/s,竖直向速度变化范围为-0.005-0.004m/s。结合图4、图5可知,地震作用下,S1比V1的速度变化范围更大,由此可见边坡表层的速度变化范围更大,在地震作用下更易发生失稳。

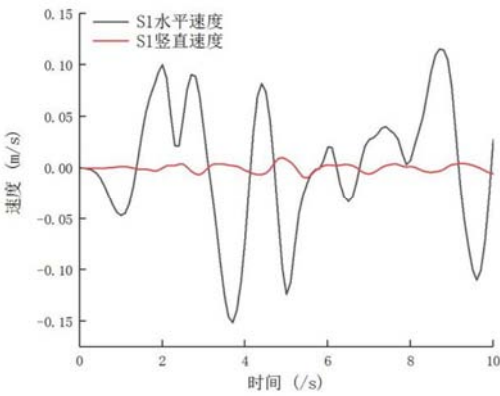


图4 S1监测点的水平与竖直速度时程曲线。

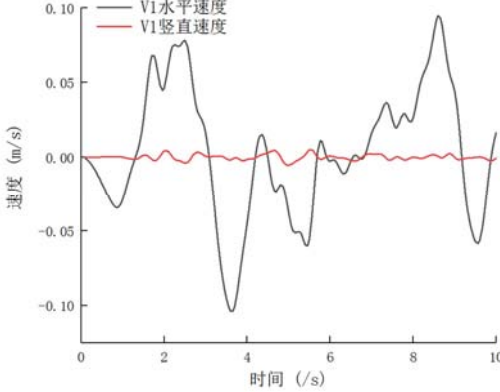


图5 V1监测点的水平与竖直速度时程曲线。

4.3. 加速度分析

为了分析地震作用下边坡的加速度响应特性,将边坡任意一点的加速度峰值与坡角处的加速度峰值的比值称为PGA放大系数。选取坡面监测点是S1-S5,内部监测点H1-H4,由图6可知,坡面和坡体内部的PGA放大系数都随着边坡高程的变化出现一定的波动,其中坡面的PGA放大系数整体较坡体内部更大,表明在地震作用下,边坡坡面比坡内更容易发生失稳现象。

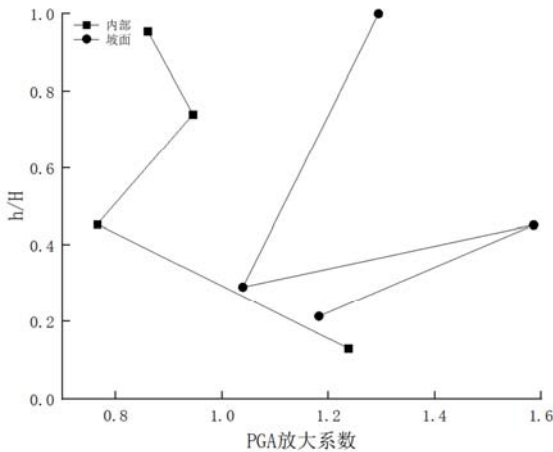


图6 PGA放大系数。

4.4. 最大主应力分析

为分析在不同高程处,地震作用下坡面最大主应力动力响应特性,故选择坡面监测点S1-S5。具体情况如图7所示,边坡坡脚监测点S5的波动较大,坡面处监测点S1的波动较小,可见随着边坡高程的降低,最大主应力增大,坡脚处最大主应力最大,表明在地震作用下需对坡脚进行加固,防止失稳现象的发生。

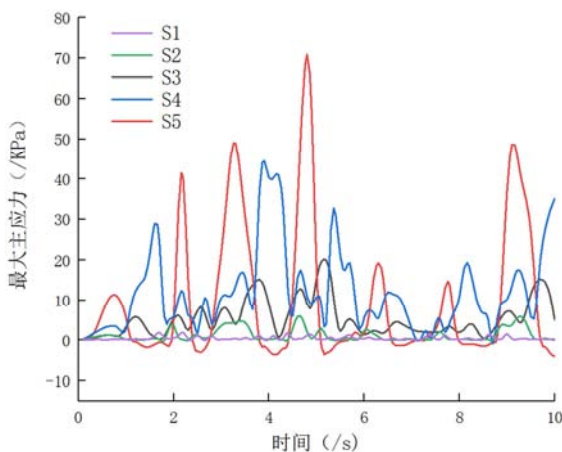


图7 最大主应力变化规律。

4.5. 锚索轴力分析

预应力锚索作为一种常用来加固边坡的手段,可以有效控制边坡坡体变形,提高边坡抵抗地震的能力,从而极大的提高边坡的稳定性。本文取预应力为200kN,选择锚

索L1、L2、L3、L4及L5的锚索对其进行时程曲线分析,如图8所示。

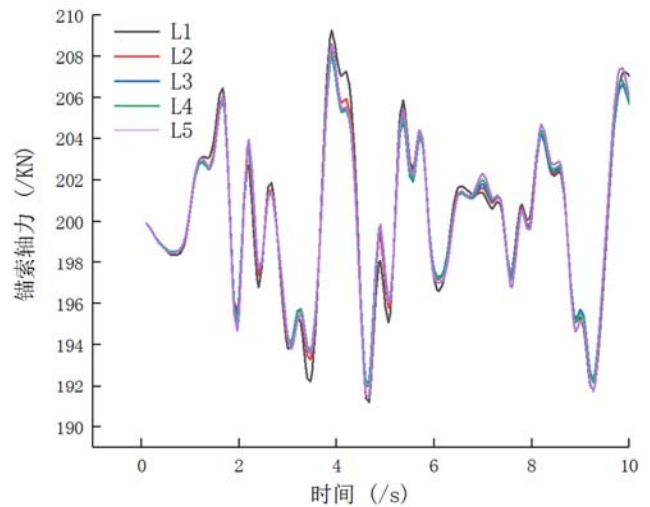


图8 锚索轴力变化规律。

由图8可知,锚索的预应力值以200kN为基础上下波动。由于此工程案例是通过锚索加固抗滑桩,从而达到边坡稳定的效果。抗滑桩处于同一水平高程处,故锚索的水平高程也一致。在同一高程处的锚索的峰值轴力相差不大,分别为209.258、208.330、208.037、208.129及208.622kN,可见地震波对于同一高程处的锚索轴力影响不大。

5. 影响因素分析

5.1. 地震动峰值加速度的影响

为研究加速度幅值对黄土边坡稳定性的影响,分别设置3个不同的地震动峰值加速度0.1g、0.2g、0.3g,通过分析边坡坡脚S5处的最大主应力变化、坡体位移变化,从而得出动峰值加速度对边坡稳定性的影响规律。

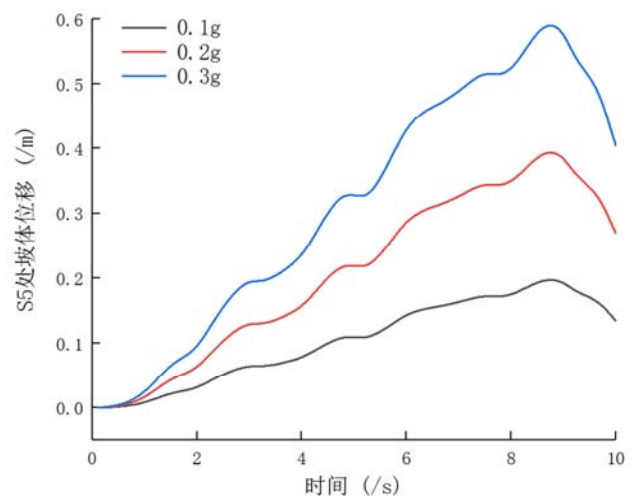


图9 不同加速度幅值下S5处坡体位移变化。

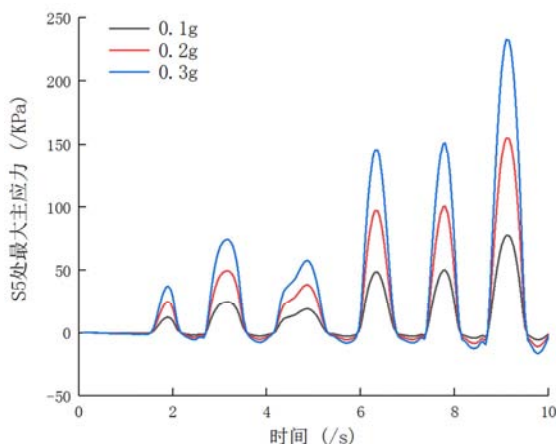


图10 不同加速度幅值下S5处最大主应力变化。

由图9、图10可知,在S5处,坡体反应的变形位移随着地震动峰值加速度的增大而显著增大,且输入的峰值加速度每增加0.1g,坡面S5处的变形增加0.014m, S5处的最大主应力也随着峰值加速度的增大呈现增加趋势,表明在峰值加速度增加的情况下,边坡坡体稳定性逐渐降低。可见峰值加速度对黄土边坡变形具有显著影响。

5.2. 地震动持时的影响

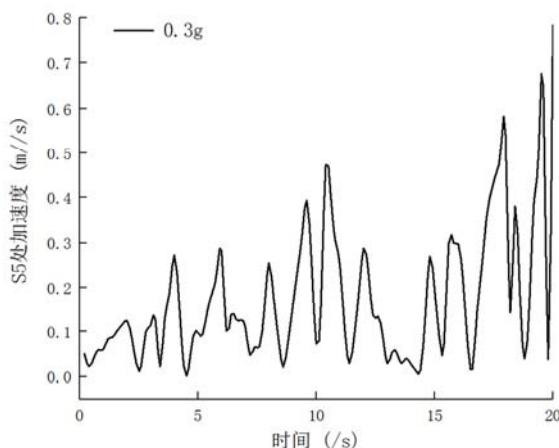


图11 加速度随地震动持时变化规律。

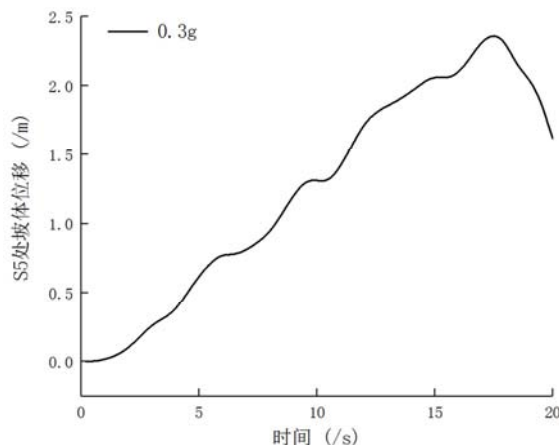


图12 S5坡体位移随地震动持时变化规律。

由图11、图12可知,在地震刚开始时,加速度较小, S5处坡体位移变化也较小,随着地震动持时的增加,加速度逐渐变大,动力作用增强,坡面位移迅速增大,此时边坡处于失稳状态。整个地震过程中,坡面位移随着地震动持时的变化发生较为显著的改变,不断地增大,表明坡体变形位移受地震动持时的影响也十分显著。

6. 结论

本文利用有限元软件MIDAS/GTS对地震作用下边坡动力响应特性进行分析,通过对延安某边坡水平地震作用下的位移、速度、加速度、最大主应力以及锚索轴力的有限元模拟分析,并研究地震动峰值加速度以及地震动持时的影响,得到以下4点结论。

- (1) 地震作用下对黄土边坡的位移存在累计增大效应,边坡变形位移随着高程增加而增大,越靠近黄土边坡的表面,变形位移越大。
- (2) 黄土边坡在地震作用下,水平向速度的波动比竖向速度波动更大,边坡表层比内部的速度变化更大,表层PGA放大系数比内部PGA放大系数更大,表明边坡表层比内部更容易发生失稳现象。
- (3) 黄土边坡最大主应力出现在坡脚S5处,表明此处较为薄弱,需进行加固。在同一高程处的锚索的峰值轴力相差不大,可见地震波对于同一高程处的锚索轴力影响不大。
- (4) 坡体位移随着地震峰值加速度增大而增大,且输入的峰值加速度每增加0.1g,坡面S5处的变形增加0.014m,坡面位移随着地震动持时的变化发生较为显著的改变,不断地增大。由此可见,地震峰值加速度、地震动持时对黄土边坡稳定性的影响较为明显。

7. 展望

- (1) 本文采用数值模拟方法对地震作用下预应力锚索加固黄土边坡动力响应特性进行分析,为此类工程案例提供参考。
- (2) 本文未考虑锚索设计参数变化对地震作用下边坡动力响应的变化,未来若进行此方面的研究,可以从此方面入手。

参考文献

- [1] 李忠生.国内外地震滑坡灾害研究综述[J].灾害学,2003,18(4): 64—70.
- [2] 张永双,成余粮,姚鑫等,四川汶川地震—滑坡—泥石流灾害链形成演化过程[J].地质通报,2013,32(12): 1900-1910.
- [3] ZHANG Y B, CHEN G Q, ZHENG L, et al. Effects of Nearfault Seismic Loadings on Run-out of Large-scale Landslide: A Case Study [J]. Engineering Geology, 2013, 166: 216-236.

- [4] 言志信, 曹小红, 张刘平等, 地震作用下黄土边坡动力响应数值分析[J], 岩土力学, 2011, 32(S2): 610-614。
- [5] 叶帅华, 黄安平, 房光文, 水平地震作用下黄土多级高填方边坡动力响应规律及稳定性分析[J], 震灾防御技术, 2020, 15(01): 1-10。
- [6] 杨博, 田文通, 孙军杰等, 地震作用下高路垫黄土边坡细观力学研究[J], 地震工程学报, 2021, 43(01): 187-194。
- [7] 邵帅, 邵生俊, 李宁等, 地震作用下黄土边坡震陷破坏的动力离心模型试验研究[J], 岩土工程学报, 2021, 43(02): 245-252。
- [8] 张泽林, 吴树仁, 王涛等, 地震作用下黄土-泥岩边坡动力响应及破坏特征离心机振动台试验研究[J], 岩土力学与工程学报, 2016, 35(09): 1844-1853。
- [9] 宋丹青, 黄进, 刘晓丽, 地震作用下层状岩质边坡动力响应[J], 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(05): 113-120。
- [10] 杨果林, 申权, 杨啸等, 基覆边坡支挡结构的加速度放大系数数值与试验研究. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(02), 374-381。
- [11] 陈行, 陈文字, 宋兴海等, 地震作用下弧形抗滑桩加固边坡的动力响应及稳定性分析[J].安全与环境工程, 2020, 27(04): 79-86+101。
- [12] 冯君, 周德培, 江南等, 顺层岩质边坡顺层滑动岩体范围分析 [J] . 山地学报, 2007, 25(3), 376-380。
- [13] 王建. 地震作用下路基工程破坏机理及抗震技术研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [14] 叶帅华, 时轶磊, 龚晓南等, 框架预应力锚杆加固多级高边坡地震响应数值分析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40 (S1): 153-158。

作者简介

王小林 (1963—) 男, 陕西蓝田人, 副教授。研究方向: 岩土工程研究和教学

薛瑛 (1997—) 女, 陕西渭南人, 硕士研究生。研究方向: 岩土工程