

滑坡防治格构梁锚固系统振动台模型试验

汪班桥, 李楠, 门玉明, 张妙芝

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 为研究地震作用下锚固系统的动力响应, 采用振动台进行格构梁锚杆支护滑坡模型试验。试验分别输入汶川波、EL Centro 波、正弦波作为地震激励, 监测锚杆轴力、坡体加速度和位移时程, 研究锚固滑坡在地震作用下的动力响应差别、不同位置锚杆在地震作用下的受力机制。结果表明: 低量级地震波 ($0.05\text{ g}\sim 0.40\text{ g}$) 作用下, 坡脚相对坡体的其他部位, 浅表效应表现明显, 坡脚滑面由于反复的揉搓作用, 更容易出现裂缝, 影响整个锚固体的稳定; 建议在拟静力法设计的基础上, 在滑坡坡脚密集地打入短锚杆或土钉以平衡坡脚滑面处出现的不协调往复运动。高量级地震波作用 ($0.6\text{ g}\sim 0.8\text{ g}$) 下, 坡肩处坡表效应表现明显、坡顶滑面处裂缝宽度不断增长, 更易出现崩裂、崩滑等现象; 建议加长坡顶的第 1 排锚杆, 以抑制坡顶滑面处裂缝的下切发展; 同时在坡顶面垂直地打入短锚杆或种植根系发达的植物护坡。格构梁锚固系统不会出现素土边坡的整体性破坏, 强震作用下, 首先是坡脚锚杆的承载能力受到损伤, 顶层锚杆的抗拉力则因坡顶面及上表面的拉裂急剧增长。研究结果为更加合理地进行锚杆抗震设计提供了良好的基础。

关 键 词: 滑坡; 锚固系统; 地震作用; 动力响应; 振动台试验

中图分类号: P 642

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2018)03-0782-08

Shaking table model test for framed anchors in landslide prevention

WANG Ban-qiao, LI Nan, MEN Yu-ming, ZHANG Miao-zhi

(School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: In order to study the dynamic responses of anchorage system under earthquake, the model of landslide supported by anchor bars and lattice beam is carried out using shaking table. The difference of dynamic response of anchor bars in different locations and the mechanism behavior of anchor bars under earthquake are studied by inputting waves of Wenchuan earthquake, EL Centro earthquake and sine seismic wave to monitor the axial force of anchor bars, landslide acceleration and landslide displacement. The results suggest that under low level earthquake loading ($0.05\text{ g}\sim 0.40\text{ g}$), the surface effect of slope toe is more obvious than other parts of the landslide, and the sliding surface near slope toe is prone to fracturing because of repeated rubbing and cutting. Based on pseudo-static method design, it is advised that short anchors or soil nails should be driven into toe slope in order to balance the uncoordinated reciprocating motion of sliding surface near slope. Under high level earthquake loading ($0.6\text{ g}\sim 0.8\text{ g}$), the surface effect of slope shoulder is more obvious, the fracture in sliding surface near slope top is longer and wider than before, and the sliding surface is more likely to crack or collapse. It is advised that the first-row anchors should be extended in order to restrain the development of cracks in slope sliding surface. Meanwhile, using short anchors or growing plants with developed root system at top of the slope is necessary to protect the slope. Slope with anchorage system is not prone to as-a-whole slope damage like plain soil slope, and under high level earthquake loading, firstly anchors in slope toe are damaged, and then tensile force of top anchors sharply rises due to cracks caused by pulling force at the top surface of slope. The results provide a reasonable foundation for the design of anchor bars under earthquake.

Keywords: landslide; anchorage system; earthquake; dynamic response; shaking table test

1 引 言

近百年的实践证明, 锚固系统对滑坡的加固效

果显著, 且具有很好的抗震性能。由汶川地震后开展的工程边坡震害调查^[1-2]发现, 采用锚固技术加固的边坡虽然存在锚头松动、脱落、锚筋松弛等变形

收稿日期: 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.41440021); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (No.2014G1261049)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41440021) and the Special Funds for Basic Research Funds in Central Universities (I2014G1261049).

第一作者简介: 汪班桥, 女, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要从事锚固边坡稳定性方面的研究工作。E-mail: dcdgx17@chd.edu.cn

迹象,但锚固工程仍然有效,基本未出现明显灾害,这与唐山地震和日本 Hanshin-Awaji 大地震的震后调查结果基本相同。因此,研究地震作用下锚固体体系的受力特性及破坏特征对进一步完善加固措施的抗震性能具有十分重要的意义。

近几年,关于锚固体体系动力响应特征振动台试验方面的研究较为活跃^[3-17]。文畅平^[10]、杨果林^[11]等通过边坡大型振动台模型试验,研究了格构式框架锚杆护坡在地震作用下的位移模式及其变化特性。叶海林等^[12-13]采用振动台进行锚杆支护岩质边坡模型试验,研究了锚杆在地震作用下的受力机制、锚杆轴力分布规律、不同位置锚杆在地震作用下的动力响应差别等。杨明等^[14]采用土工离心模型试验和数值模拟方法,对抗滑桩、抗滑桩联合锚杆框架两种加固措施进行了对比分析;在此基础上提出:高烈度地震区,斜坡堆积体的工程设计应强调“固脚强腰”的防治原则。蒋良淮等^[15]针对汶川震区国道213线都江堰—映秀段道路边坡崩滑和岩土损伤深度所表现的地震扰动浅表动力效应现象,通过大型振动台模型试验,对浅表效应产生机制及防护工程锚固控制机制进行了初步研究。郝建斌等^[16]以锚杆格构支护的均值土坡为研究对象,设计并完成了一组硅胶边坡模型振动台试验,研究了支护结构的动力地震响应特征。赖杰等^[17]开展了抗滑桩和锚杆联合抗震性能振动台试验,通过输入3种不同地震波,不断增大地震波的峰值,得到了支挡结构的动力分布规律及加固机制。

分析可知,目前可见的振动台研究成果主要集中在边坡锚固体动力特性的研究,专门针对滑坡防治时锚固体体系动力响应特征及其破坏特征的分析几乎没有。本项目选择土质滑坡作为研究对象,研究地震作用时锚杆支护体系与滑坡的动力响应,对锚杆支护体系在逐级增加地震作用下的破坏特征进行分析,并提出了相应的抗震设计理论与方法。

2 振动台模型试验设计

本次模型试验是在西安建筑科技大学抗震试验大厅的地震模拟振动台上进行,振动台的台面尺寸为4.1 m×4.1 m,最大负荷量为20 t,最大位移:水平X向为±15 cm,Y向为±25 cm,竖向为±10 cm。

2.1 相似比选取

模型试验原型为一高度为7 m的黏性土质滑坡,滑体坡度为60°,锚杆间距为2.0 m×1.5 m。试验的几何相似比为1:7,即试验模型的边坡高度为1 m,锚杆间距为0.29 m×0.22 m。模型和原型材料

基本相同,相似关系按照重力相似率及量纲分析法进行推导,选取密度、加速度、长度作为基本控制量,其中 $S_\rho=1$, $S_a=1$, $S_l=7$,其余物理量利用 π 项式和相似准则方程导出,相似关系如表1所示。

表1 模型试验所采用的相似关系
Table 1 Similitude ratios of the model

物理量	相似关系	相似常数
密度	S_ρ	1.00
长度	S_l	7.00
弹性模量	$S_E=S_\rho S_l$	7.00
应变	$S_\epsilon=1$	1.00
加速度	$S_a=S_E/(S_\rho S_l)$	1.00
内摩擦力	$S_\phi=1$	1.00
黏聚力	$S_c=S_\rho S_l$	7.00
时间	$S_t=S_l(S_\rho/S_E)^{1/2}$	2.65

2.2 模型制作

模型试验在长为2.05 m,宽为1.50 m,高为1.30 m的模型箱内进行,模型箱由角钢和厚为0.01 m的可透视有机玻璃板构成。模型制作时,在有机玻璃板上涂抹一层凡士林,以减小模型与有机玻璃之间的摩擦;并在模型箱底部钢板板面上用环氧树脂黏结一层最大粒径为0.15 m的碎石,使之成为粗糙表面,以减少箱土接触面的相对位移;同时在模型箱前后两端放置0.05 m厚的聚乙烯泡沫作为减震层,以减少模型箱边界对入射波的反射。

试验模型由人工分层夯土而成;之后削坡预设圆弧型滑面,圆弧曲率通过极限平衡法搜索确定,以坡体剖面过程坡顶出现微裂缝为滑坡极限平衡状态,滑带由铺设于滑床上一层厚为2~3 mm的干细土模拟;再次分层填筑制作滑体。削坡完成后,在预设锚孔位置采用PVC管钻孔,将带有置中支架的锚杆插入锚孔,向孔内注浆。待灌浆体养护2月之后,安装预制好的格构模型,并将锚杆与格构用螺帽锚固。如图1所示。



图1 试验模型
Fig.1 Test model

锚杆及格构是在几何相似比 $S_l=7$ 的基础上, 按规范设计计算确定的。锚孔直径为 2 cm, 锚杆采用光面消除应力的 $\phi 6$ mm 钢筋模拟, 灌注砂浆配合比水:水泥:砂=40:29:145。格构梁混凝土强度等级为 C10, 配合比为水:水泥:砂:石=0.80:1.00:2.96:3.76, 截面尺寸为 40 mm×50 mm。

2.3 测试方案

为监测模型不同高度处的动力响应, 在模型边坡内部及坡面内侧分别安装 12 个水平向加速度传感器及一个竖向加速度传感器 (A1-3), 其位置及编号见图 2, 并在每根锚杆上黏贴有 4 片电阻应变片 (型号 BE-120), 用来监测锚杆全长的应变, 黏贴位置见图 3。

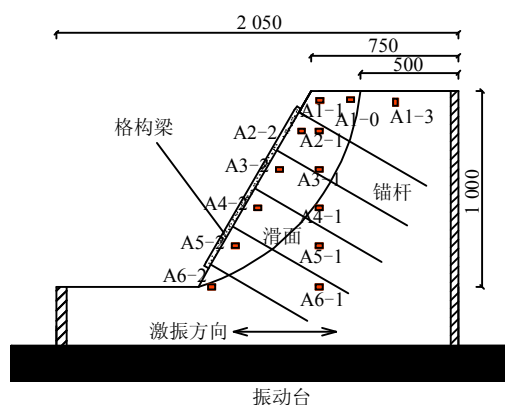


图2 模型断面及加速度计的布置 (单位: mm)
Fig.2 Sectional model and layout of acceleration meter (unit: mm)

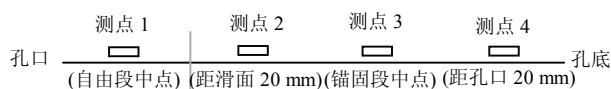


图3 锚杆上的应变片布置图
Fig.3 Layout of strain gauges on anchor

3 加载方案

考虑到水平地震作用能显著降低边坡稳定性, 是造成结构破坏的主要因素; 本次试验地震波均采用单向水平输入。试验激励波有 3 种: 汶川波 (2008 年, 代号为 W)、EL Centro 波 (1940 年, 代号为 E) 以及正弦波 (代号为 Z)。

试验开始前和结束后, 以及试验过程中输入台面的加速度峰值改变时, 对模型进行白噪声 (代号为 B) 扫描, 其主要目的是获取模型坡体的自振频率、振型等动力特性。试验采用逐级施加地震加速度的方式进行, 加载工况具体见表 2。

表2 试验加载工况
Table 2 Loading conditions in tests

试验序号	工况代号	峰值/g	时间压缩比	频率/Hz
1	B-0	0.035		/
2	W-0	0.050	2.65	/
3	E-0	0.050	2.65	/
4, 5, 6	Z-0	0.050		5, 10, 15
7	B-1	0.035		/
8	W-1	0.100	2.65	/
9	E-1	0.100	2.65	/
10, 11, 12	Z-1	0.100		5, 10, 15
13	B-2	0.035		/
14	W-2	0.150	2.65	/
15	E-2	0.150	2.65	/
16, 17, 18	Z-2	0.150		5, 10, 15
19	B-3	0.035		/
20	W-3	0.200	2.65	/
21	E-3	0.200	2.65	/
22, 23, 24	Z-3	0.200		5, 10, 15
25	B-4	0.035		/
26	W-4	0.300	2.65	/
27	E-4	0.300	2.65	/
28, 29, 30	Z-4	0.300		5, 10, 15
31	B-5	0.035		/
32	W-5	0.400	2.65	/
33	E-5	0.400	2.65	/
34, 35, 36	Z-5	0.400		5, 10, 15
37	B-6	0.035		/
38	W-6	0.600	2.65	/
39	E-6	0.600	2.65	/
40, 41, 42	Z-6	0.600		5, 10, 15
43	B-7	0.035		/
44, 45	Z-7	0.800		5, 10
46	B-8	0.035		/
47	Z-8	1.000		5

4 锚固边坡振动台试验结果分析

4.1 同列传感器在不同地震波激励下的自振频率对比分析

为了解模型的动力学特性, 试验前输入低频振动波对模型进行扫描, 图 4 为埋置在边坡模型中的同列加速度传感器自振频率随先期加载历史的变化曲线。

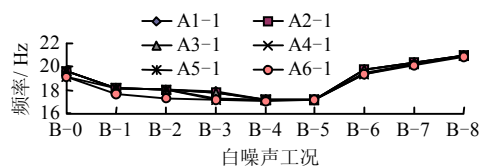


图4 同列传感器自振频率随先期加载历史的变化曲线
Fig.4 Changes of natural frequency of each sensor in the same column under excitations of white noises in different stages of the test

滑坡锚固体的自振频率随着先期加载量级的增大而变化。低量级地震波 ($0.05\text{ g}\sim 0.40\text{ g}$) 激振期间, 随着激振量级的增大, 模型的平均自振频率略有减小, 从最初的 19.73 Hz 降低到 17.89 Hz ; 高量级地震波 ($0.6\text{ g}\sim 0.8\text{ g}$) 激振作用下, 锚杆支护体系与滑坡土体形成一整体, 锚固系统主动抗震抗滑的能力加强, 自振频率稍有增大。

同一激振条件下, 各层传感器的自振频率略有不同, 由下至上, 加速度的放大作用递增。以第 4 次扫频 (B-3) 为例, 坡脚 (A6-1) 的自振频率为 17.19 Hz ; 坡顶中部 (A4-1) 的自振频率为 17.34 Hz ; 坡顶 (A1-1) 的自振频率为 17.97 Hz 。

4.2 同一加载量级同列传感器在不同地震波激励下的 PGA 放大系数对比分析

为方便分析, 将传感器上的加速度响应峰值与输入的加速度峰值比值定义为 PGA 放大系数。图 5 为加速度峰值为 0.6 g 时, 坡体内侧同列传感器在不同地震波激励下的 PGA 变化曲线。W 为汶川波、E 为 EL Centro 波, $Z_5\text{ Hz}$ 、 $Z_{10}\text{ Hz}$ 、 $Z_{15}\text{ Hz}$ 分别为正弦波为 5、10、15 Hz 时的激励地震波。

不同地震波作用时, 各个传感器的加速度反应不同。W 波作用下, 坡内 6 个传感器的 PGA 放大系数均小于 E 波作用时; 即使是相同的正弦波作用下, 频率不同, 各传感器的反应也不同。说明对同一个滑坡支护设计问题, 有必要输入不同的地震波进行锚杆抗震设计; 也反映了采用拟静力法进行抗震设计的不足之处, 即不能反映不同地震波的频谱特性。

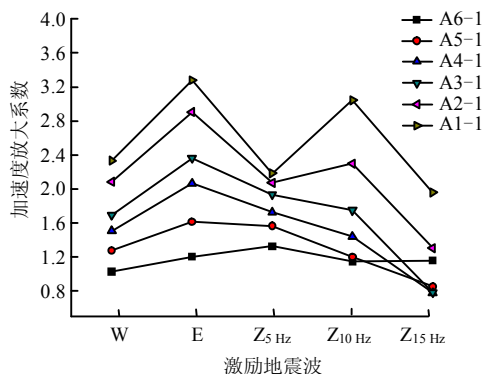


图 5 同列传感器在不同地震波激励下的 PGA 放大系数曲线

Fig.5 PGA amplification coefficient curves of sensors in the same column under different earthquake waves

随着锚固边坡高度的增加, 传感器的加速度反应也随之增加; 由于坡肩处于两个临空面的交汇处, 地震波在此发生多次反射和叠加, 使得其对输入波的放大效应剧增, 此处理设的传感器 A1-1 的 PGA 放大系数最大。地震作用下边坡中上部到坡肩段受到的惯性力最大, 是最容易破坏失稳的部位, 在抗震设计中应予重点考虑。

4.3 不同加速度量级下各层传感器 PGA 系数变化曲线分析

不同地震波激励作用下, 布置在锚固体内的两列传感器 PGA 系数的变化规律基本相同。以 5 Hz 正弦波激励为例, 结合锚固体的损伤特征, 对不同加速度量级作用下各层传感器 PGA 系数的变化规律进行对比分析, 如图 6 所示。

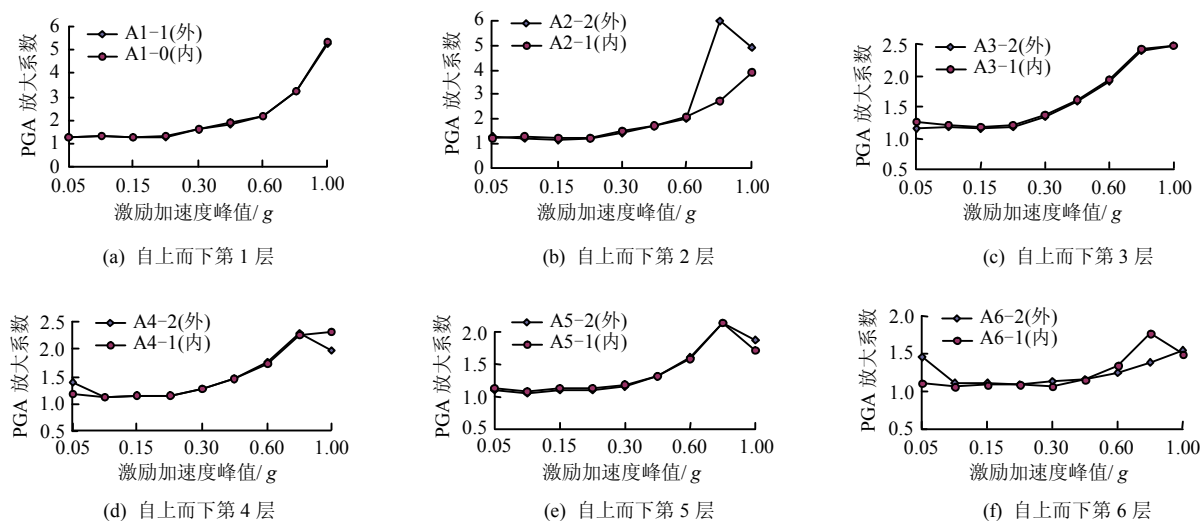


图 6 同层传感器 PGA 放大系数随加速度量级的变化曲线

Fig.6 PGA amplification coefficient curves of sensors in the same row under different loading magnitudes

低量级地震波 ($0.05\text{ g}\sim 0.40\text{ g}$) 激励作用下, 坡脚外侧传感器 A6-2 的放大系数保持大于坡体内

部传感器 A6-1 的放大系数的趋势; 坡脚以上各层测点的放大系数差别不是很大。分析各传感器的埋

设位置可知, A6-2 埋设在坡脚外侧临空处, 且处于预设滑面处, 坡体内部传来的地震波在浅表层形成反射、干涉叠加, 导致坡表 A6-2 的加速度响应远大于坡体内部 A6-1 的加速度反应。其他的传感器均处于锚固群体之中, 由于框架锚杆的作用将坡体内部与滑体连成整体, 锚固力的作用减弱了地震波在坡表反射造成的浅表层动力效应, 两列传感器的 PGA 系数反应差别不大。

随着加载量级的增加, 各个传感器的放大系数随之增大。激励加速度峰值升至高量级 0.6 g、0.8 g 时, 位于坡体内侧的传感器 A6-1 的放大系数大于坡体外侧 A6-2 的放大系数。结合试验现象发现, 0.1 g 时, 在传感器 A6-1 附近开始出现横向细小裂纹, 如图 7 所示, 随着加载量级的增大, 裂纹向两侧逐步扩展, 加载至 0.4 g 时, 左右分别延伸至 A 点和 B 点, 形成裂缝 AOB。同时, 0.15 g 时, 在坡脚稍上的 C 点处出现剪出口 CD, 随着加载量级的增大, 剪出口附近的裂缝逐步向坡体内部横向延伸; 0.4 g 时, CD 延伸至 E, 基本与坡体内的横向裂缝 AOB 相交。0.6 g 时, 坡脚处的水平裂缝贯通, 如图 7 所示; 裂缝上下坡体之间的不协调运动(拉压动应变)愈为明显, 产生明显的反复搓揉作用; 0.8 g 时, 不断发展的裂缝使得其周围的土体较为松散, 坡体内部传来的地震波在裂缝附近形成一系列的反射、干涉叠加作用, 一定程度上增大了 A6-1 处的加速度值, 导致 A6-1 的加速度响应大于外侧的 A6-2 的加速度响应。继续加大量级至 1.0 g 时, 锚固坡体两侧的素土边坡发生破坏, 试验结束。

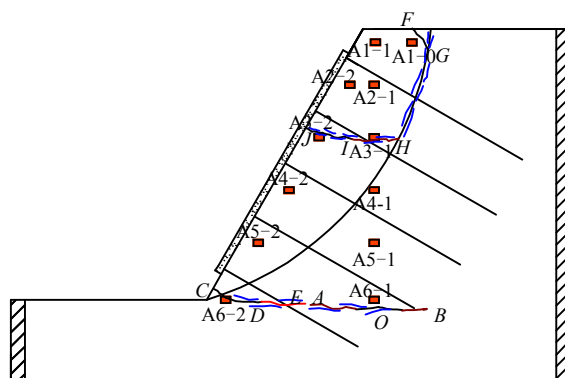


图 7 模型侧面裂缝发展曲线素描图
Fig.7 Hand-drawn crack development on the side of model

激励加速度峰值在 0.6 g 之前, 锚固体内各层内外两列传感器的 PGA 曲线基本重合, PGA 系数相差不大, 此时, 锚固系统不断发挥作用, 以锚固力

抵消地震波在坡表反射造成的拉裂作用, 而且将坡体内部与滑坡体连成整体, 消除两者的不协调运动, 同时提高坡体自振频率, 控制坡表的加速度响应和浅表层破坏。不同量级地震作用下, 同列传感器中, 坡顶的 PGA 系数最大; 但不同量级作用下, 各层传感器加速度的增长速率一直在调整变化。

如图 7 所示, 0.3 g 之前, 模型上部预设滑面附近不断出现一些与滑面走向相近的细小裂缝, 0.6 g 时, 上部滑面基本贯通; 0.4 g 时, 在传感器 A3-2 附近的 J 点出现第 2 个剪出口, 剪出口的右侧水平延伸至 I 点; 0.6 g 时, JI 与贯通后的滑面基本相接, 形成疑似连续的破裂体 FGHIJ。锚固边坡加速度增长速率最快的位置由坡顶(A1)移向坡体中上部(A3), 但坡顶的加速度值依然保持最大。

高量级地震波(0.6 g~0.8 g)激励作用时, 滑体在之前加载历程中累积的不可恢复位移越来越大, 损伤越来越多, 振动过程中滑体与滑床的不协调筛动变形越来越明显, 各层加速度传感器对地震波的动态响应越来越强。坡顶的滑体与滑床出现明显分离现象, 第 2 层两列传感器(A2-1、A2-2)的加速度曲线发生明显差异。

加速度峰值在 0.8 g 时, 各层加速度传感器的 PGA 系数急剧增加, 达到峰值。坡顶的滑体与滑床之间的裂缝宽度增加至 5 mm; 第 2 个剪出口处的水平裂缝贯通至坡面, 素土边坡外侧的滑体与内侧的滑床在地震力的作用下发生明显的拉压动应变, 两者之间的不协调性表现明显, 素土边坡在坡顶中上部发生崩裂, 如图 8 所示。此时, 设置在锚固边坡坡顶外侧的第 2 层传感器 A2-2 的加速度 PGA 系数及增长速率都达到同列最高水平。



图 8 0.8 g 时模型破坏示意图
Fig.8 Damage model at 0.8 g

1.0 g 破坏荷载作用时, 因为整个坡顶发生崩离, 传感器被拉离原有的位置, 其加速度值急剧增加; 其余各层传感器的加速度反应明显下降, 锚固系统侧面的素土边坡坡顶及坡脚发生崩裂破坏, 如图 9

所示。但整个锚固体内部土体并无明显的裂缝分离现象。



图9 1.0 g 时锚固模型破坏示意图
Fig.9 Damage model at 1.0 g

4.4 同列各层锚杆峰值应变随加速度量级的变化曲线

图10为5 Hz正弦波作用下第3列各层锚杆滑面处测点应变随加速度量级的变化曲线。

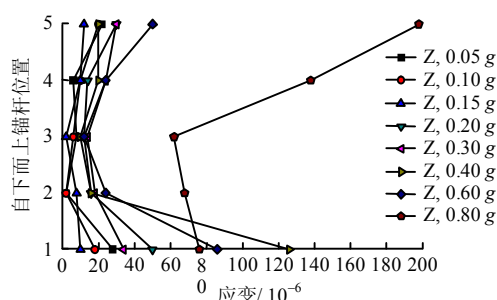


图10 同列各层锚杆峰值应变随加载量级的变化曲线
Fig.10 PGA amplification coefficient curves of sensors in the same column under different loading magnitudes

0.4 g 之前, 各层锚杆上的峰值应变相差不大, 坡脚的应变稍大于其余各层; 0.4 g 时, 坡脚的应变急剧增加, 其余各层变化不大; 加载量级增至 0.6 g 时, 各层锚杆的峰值应变呈现“C 型”, 低层与顶层锚杆的峰值应变大于中间各层, 低层锚杆的峰值应变最大; 0.8 g 时, 底层锚杆应变减小, 其他各层锚杆的峰值应变迅速增大, 尤其是顶层锚杆。1.0 g 时, 锚杆上应变急剧增加, 部分测点已无数据, 没有在图上画出来。

这与前文描述的传感器变化规律及坡体破坏规律吻合, 在不断提高的动载作用下, 锚固体的动态响应越来越强烈, 各层传感器的 PGA 系数不断增大, 滑坡体出现了一定程度的损伤, 锚杆的主动抗滑抗震作用增强, 各层测点的应变逐级增大。强震 (0.8 g) 作用下, 由于拉裂区 *FGHIJ* 的形成, 坡顶滑体与滑床的不协调变形增大, 尤其是坡顶附近, 振幅大而明显, 锚固体内部的应变重新调整、分配,

位于坡顶的上两层锚杆应变急剧增大; 坡体下方裂缝 *CDEAOB* 的贯通, 在坡脚锚固体周围产生明显的剪应力增高集中区, 土体较为松散, 首先进入弹塑性区, 一定程度上减小了坡脚处的锚固力, 坡脚最下一层锚杆的应变有所减小。也正是由于锚杆的协调作用, 即使在破坏荷载 (1.0 g) 作用下, 锚固区没有出现类似素土边坡区的破坏现象。

5 结论与建议

地震作用下, 格构梁锚固系统不会出现素土边坡的整体性破坏, 但在不断提高的加载量级作用下, 锚固系统内部的应力分布不断调整, 以协调滑坡的拉压应变。

(1) 不同地震波作用时, 各个传感器的加速度反应不同; 即使是相同的正弦波作用下, 频率不同, 各传感器的反应也不同。说明对同一个边坡支护设计问题, 有必要输入不同的地震波进行锚杆抗震设计; 也反映了采用拟静力法进行抗震设计的不足之处, 即不能反映不同地震波的频谱特性。

(2) 低量级地震波作用 (0.05 g~0.40 g) 下, 坡脚的浅表层动力效应表现明显, 坡脚滑面由于反复的揉搓作用, 更容易出现裂缝, 坡脚锚杆所承受的锚固力相对较大。

(3) 高量级地震波作用 (0.6 g~0.8 g) 下, 坡脚首先进入弹塑性区, 一定程度上减小了坡脚处的锚固力, 导致坡脚处锚杆的应变有所减小; 坡顶则由于潜在滑面处裂缝宽度的不断增长更易发生张拉破坏, 出现崩裂、崩滑等现象, 此阶段坡顶锚杆的锚固力最大。

(4) 滑坡锚固工程设计时, 建议在拟静力法设计基础上, 在滑坡坡脚密集地打入短锚杆或土钉以抑制坡脚弹塑性区的发展; 加长设计坡顶第 1 排锚杆, 以延缓坡顶滑面处裂缝的发展; 同时在坡顶面垂直地打入短锚杆或植入根系发达的植物, 抑制破坏地震作用下坡顶的脱离。

参考文献

- [1] 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 Run-qi, LI Wei-le. Research on development and distribution rules of geohazards induced by Wenchuan earthquake on 12th May, 2008[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27

- (12): 2585—2592.
- [2] 周德培, 张建经, 汤涌. 汶川地震中道路边坡工程震害分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 565—576.
ZHOU De-pei, ZHANG Jian-jing, TANG Yong. Seismic damage analysis of road slopes in Wenchuan earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 565—576.
- [3] 汪鹏程, 朱大勇, 许强. 强震作用下加固边坡的动力响应及不同加固方式的比较研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 32(10): 1501—1504.
WANG Peng-cheng, ZHU Da-yong, XU Qiang. Dynamic response of slopes subjected to intense earthquakes and effect comparison between various support modes[J]. **Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)**, 2009, 32(10): 1501—1504.
- [4] 董建华, 朱彦鹏. 框架锚杆支护边坡地震响应分析[J]. 兰州理工大学学报, 2008, 34(2): 118—122.
DONG Jian-hua, ZHU Yan-peng. Analysis of response of slope supported with framed anchor to earthquake[J]. **Journal of Lanzhou University of Technology**, 2008, 34(2): 118—122.
- [5] ZHANG C S, ZOU D H, MADENGA V. Numerical simulation of wave propagation in grouted rock bolts and the effects of mesh density and wave frequency[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2006, 43(4): 634—639.
- [6] 石玉成, 秋仁东, 孙军杰. 地震作用下预应力锚索加固危岩体的动力响应分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 1157—1162.
SHI Yu-cheng, QIU Ren-dong, SUN Jun-jie. Analysis of dynamic response of dangerous rock mass reinforced by prestressed anchor cables under seismic loads[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(4): 1157—1162.
- [7] STAMATOPOULOS C A, BASSANOU M, BRENNAN A J, et al. Mitigation of the seismic motion near the edge of cliff-type topographies[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 2007, 27(3): 1082—1100.
- [8] BRUMMER R K, TANNANT D D, YI X. Rock bolt behaviour under dynamic loading: field tests and modeling[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1995, 32(6): 537—550.
- [9] HONG Y S, CHEN R H, WU C S, et al. Shaking table tests and stability analysis of steep nailed slopes[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2005, 42(5): 1264—1279.
- [10] 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 Chang-ping, YANG Guo-lin. 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.
- [11] 杨果林, 文畅平. 格构锚固边坡地震响应的振动台试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(4): 1482—1493.
YANG Guo-lin, WEN Chang-ping. Shaking table test study on dynamic response of slope with lattice framed anchor structure during earthquake[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2012, 43(4): 1482—1493.
- [12] 叶海林, 郑颖人, 陆新, 等. 边坡锚杆地震动特性的振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊 1): 152—157, 176.
YE Hai-lin, ZHENG Ying-ren, LU Xin, et al. Shaking table test on anchor bars of slope under earthquake[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2011, 44(Supp.1): 152—157, 176.
- [13] 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 studies of prestressed anchor cable of slope under earthquake[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2012, 31(Supp.1): 2847—2854.
- [14] 杨明, 姚令侃, 王建, 等. 斜坡堆积体抗震加固措施离心模型试验[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(3): 335—340.
YANG Ming, YAO Ling-kan, WANG Jian, et al. Centrifuge model test of earthquake countermeasures for deposit-on-slope[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2008, 43(3): 335—340.
- [15] 蒋良潍, 姚令侃, 胡志旭, 等. 地震扰动下边坡的浅表动力效应与锚固控制机制试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2010, 42(5): 164—174.
JIANG Liang-wei, YAO Ling-kan, HU Zhi-xu, et al. Experimental study on slope's superficial dynamic effect and anchoring prevention mechanism under earthquake disturbance[J]. **Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)**, 2010, 42(5): 164—174.