

动力作用下锚杆格构支护土质边坡动态响应分析

郝建斌,姚 婕,黄毓挺,李金和

(长安大学 地质工程与测绘学院,陕西 西安 710054)

摘 要:地震边坡稳定性是岩土工程和地震工程中研究的重点问题之一。针对锚杆格构支护的均质土坡在地震荷载作用下的动力响应,通过振动台模型试验,分析了不同坡高地震加速度和速度响应规律、边坡位移特征及支护结构破坏特征,揭示了均质土坡及其支护结构在地震作用下的变形破坏机理。结果表明:随着振动次数的增加,边坡模型自振频率逐渐降低;低频动荷载作用下坡体上部加速度响应最大,但随着振动频率的增加,放大作用降低,即边坡对低频振动波有放大作用,而对高频振动波却有滤波作用;振动频率较小时,坡体整体速度较大,但不同高度差异较小,破坏并不明显;振动频率接近模型边坡自振频率时,坡体上部速度最大,下部速度最小,且变化明显,破坏性最大;动荷载作用过程中,滑坡体的变形模式表现为旋转位移和水平位移,滑体和基体间相对位移上部较大;支护结构破坏时,上层锚杆和中层锚杆被拔出,上部格构发生严重隆起;虽然边坡做往复运动,但最终仍有一定相对位移;在设计支护结构时,要适当加长上部锚杆的长度,并且对中、上部格构进行补强。

关键词:边坡稳定性;地震;正弦波;动态响应;振动台试验;锚杆;格构

中图分类号:TU476;P642

文献标志码:A

Analysis of Dynamic Response of Soil Slope Reinforced by Anchors and Lattices Subjected to Dynamic Loads

HAO Jian-bin, YAO Jie, HUANG Yu-ting, LI Jin-he

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

Abstract: Seismic slope stability is one of the key topics in geotechnical engineering and earthquake engineering. In order to study the dynamic response of homogeneous soil slope supported by anchors and lattices under seismic loading. Based on the shaking table test, the seismic acceleration, velocity and displacement of slope and the failure of supporting structures at different heights were analyzed, and the deformation and failure mechanisms of homogeneous soil slope and its supporting structures under seismic load were discussed. The results show that the nature frequency of slope model decreases with the increase of vibration time; the response of acceleration is maximum at the upper of slope subjected to dynamic load with low frequency, and the amplification effect decreases with the increase of vibrational frequency, that is, the slope has amplification effect on vibration waves at low frequency, and has filtering effect at high frequency; though the whole velocity of slope is large at low frequency, the velocities at different heights of slope are almost the same, so that there is no obvious failure happened to the slope and its supporting structures; when vibrational frequency is close to nature frequency of slope model, the

收稿日期:2014-12-27

基金项目:国家自然科学基金项目(41102177,41440021);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G2261010)

作者简介:郝建斌(1975-),女,山西武乡人,副教授,工学博士,博士后,E-mail:dcdgx28@chd.edu.cn.

velocity is maximum at the upper of slope and minimum at the bottom, and the failure is significant; the deformation types of landslide body subjected dynamic loads include rotation displacement and horizontal displacement, and the upper relative displacement between the active and the resistant parts of slope is large; when the supporting structures destroy, the top-row and mid-row anchors are pulled out, and the upper lattices bump seriously; though the slope shakes back and forth, there is relative displacement; the upper anchors are lengthened appropriately, and the middle and upper lattices are strengthened for the design of the supporting structures.

Key words: slope stability; earthquake; sinusoidal wave; dynamic response; shaking table test; anchor; lattice

0 引言

地震作用下的边坡稳定性是岩土工程和地震工程中重要的研究课题。振动台模型试验作为一种有效的研究手段一直受到工程界学者的青睐。早在 1956 年 Clough 等就使用振动台进行了无支护边坡的研究^[1]。之后, Wartman 等分别对无支护边坡^[2-9]和有支护结构的边坡^[10-11]进行不同规模的振动台模型试验研究,得出一些有价值的结论,为加固边坡以保证其在地震中的稳定性提供指导。

上述模型试验主要采用相似材料法,边坡模型材料主要采用原状土或与模拟坡体物理力学参数存在一定相似关系的材料。但该方法存在一定的局限性。一方面,几何相似条件不能满足,主要体现在土体颗粒大小与级配不能按照几何相似常数来配置,因此,试验结果并不可靠。另一方面,荷载作用对边坡造成的破坏是不可逆的,如果使用同一模型,某一级荷载作用时所监测到的破坏往往叠加了之前荷载所造成的破坏,实际上放大了后续荷载的作用;如果构建多个模型,则耗财耗力。为了降低这种叠加效应,同时便于加载过程中观察坡体的变形,本文选择黏弹性材料硅胶为边坡模拟材料,主要模拟由锚杆格构支护、有明显滑面的均质土坡在动荷载作用下的动力反应规律及变形破坏特征。试验中做如下假设:土体为各向同性、均质的连续介质;边坡中存在一明显的圆弧滑面;土体处于理想弹-黏性力学状态;动荷载作用下,支护结构发生破坏前,坡体仅发生往返运动,无明显永久位移。

1 试验模型

1.1 模型材料

边坡模型(包括坡体模型和坡体模型前侧的滑坡体模型)采用硅胶(密度为 $1.15 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)模拟,坡体与滑坡体之间通过弧形滑面直接接触;锚杆采

用直径为 6 mm 的铝棒模拟;灌浆体采用环氧树脂灌封胶模拟;坡表格构采用聚氯乙烯(PVC)板模拟。边坡模型尺寸结构见图 1。

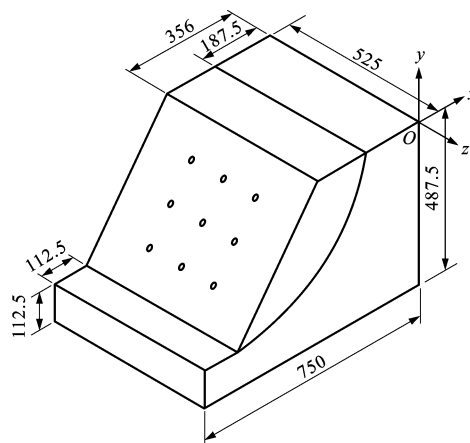


图 1 边坡模型结构尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Dimension of Slope Model (Unit:mm)

1.2 模型制作

试验采用刚性模型箱,模型箱内部长 85 cm,宽 53.5 cm,高 49.5 cm,左、右两侧边界采用可透视有机玻璃(厚 5 mm)。根据已有的振动台模型试验设计^[5-6,8,12],为减少模型箱边界效应的影响,在模型箱前、后两端垫厚度为 5 cm 的聚乙烯泡沫,作为减震层。图 2、3 为构筑的边坡模型。

2 试验方案

2.1 振动台概况

试验在陕西陕航环境试验有限公司的振动台上进行。振动台台面尺寸为 $1.2 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,额定正弦激振力为 100 kN,水平方向最大空载加速度为 $235 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,最大速度为 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最大位移量为 51 mm,频率范围为 5~2 000 Hz。

2.2 测试方案

为了观测坡体的变形,在模型侧面均匀刻画了边长为 5 mm 的方格(图 2),试验过程中采用高速摄像



图 2 边坡模型侧面
Fig. 2 Side View of Slope Model

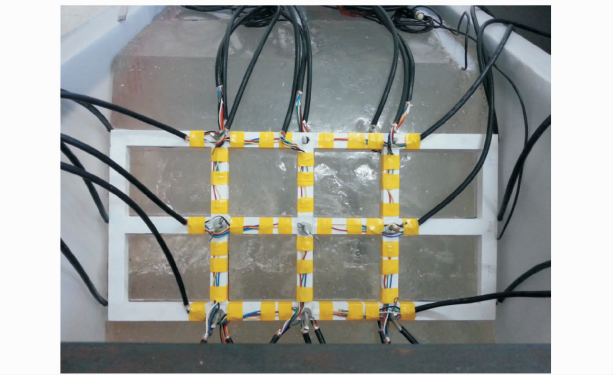


图 3 设置好锚杆格构的模型
Fig. 3 Slope Model Set with Anchors and Lattices

机对试验过程中边坡模型的变形进行拍摄记录。模型侧面和顶面分别布设有 4 个加速度传感器(型号为 CA-YD-186),用来监测模型不同高度处的动力响应,其编号、位置及方向见图 4。在锚杆的自由段中点布置 1 个测点,锚固段端头、端尾和中点布置 3 个测点,均粘贴电阻应变片用来监测锚杆的轴向应变。每段格构梁正反面均对称粘贴 6 片电阻应变片^[13],用来监测格构的应变。振动试验时在振动台台面上安装 2 台加速度传感器(型号为 DL100)作为激励控制。

2.3 输入波形及加载方案

在对模型固有特性研究时,采用正弦低量级特征扫频试验条件;在对模型响应特性研究时,采用正弦定频试验条件。试验按照水平 z 向、 x 向的顺序进行,具体见表 1。由于水平 z 向振动对边坡破坏性不大,所以本文仅对水平 x 向振动做了分析。

3 边坡模型动力响应结果

3.1 低应变动力响应特征

为了了解振动前后模型边坡的动力学特性变化情况,每级加速度加载结束后均输入低频振动波对模型进行扫描。图5分别为第5、10、25、30组试验

表 1 模型试验加载工况
Tab. 1 Summary of Test Load Arrangments

试验 编号	激振 方向	试验 方法	加速度 峰值	试验带宽/ Hz	扫频速率/ (Oct · min ⁻¹)	振动 时长/s
1	z	扫频	0.1g	5~40	1	
2	z	定频	0.2g	5		20
3	z	定频	0.2g	10		20
4	z	扫频	0.1g	5~40	1	
5	x	扫频	0.1g	5~40	1	
6	x	定频	0.2g	5		20
7	x	定频	0.2g	10		20
8	x	定频	0.2g	15		20
9	x	定频	0.2g	20		20
10	x	扫频	0.1g	5~40	1	
11	x	定频	0.4g	5		20
12	x	定频	0.4g	10		20
13	x	定频	0.4g	15		20
14	x	定频	0.4g	20		20
15	x	扫频	0.1g	5~40	1	
16	x	定频	0.6g	5		20
17	x	定频	0.6g	10		20
18	x	定频	0.6g	15		20
19	x	定频	0.6g	20		20
20	x	扫频	0.1g	5~40	1	
21	x	定频	0.8g	5		20
22	x	定频	0.8g	10		20
23	x	定频	0.8g	15		20
24	x	定频	0.8g	20		20
25	x	扫频	0.1g	5~40	1	
26	x	定频	1.0g	5		20
27	x	定频	1.0g	10		20
28	x	定频	1.0g	15		20
29	x	定频	1.0g	20		20
30	x	扫频	0.1g	5~40	1	

的低频正弦波扫描时,各加速度传感器的频谱反应。其中,加速度传感器 A6 发生损坏,故没有检测值。从图 5 可以看出,当振动频率在 8.8~9.2 Hz 附近时,各传感器放大作用明显,其中埋置于坡顶的传感器 A5、A7、A8 放大作用最显著,坡体下部的传感器 A3、A4 放大作用最小。从扫描结果来看,从第 6 组试验到第 24 组试验,模型的共振频率稍有所降低,但并不明显,但第 30 组试验扫描结果显示,各传感器在振动频率为 8.15 Hz 时的放大作用明显。这表明经过多次振动后,模型的自振频率有所降低,但变化并不明显。

此外,随着振动次数的增加,各加速度传感器的实测值逐步增大。坡顶加速度传感器 A5 在第 5 组

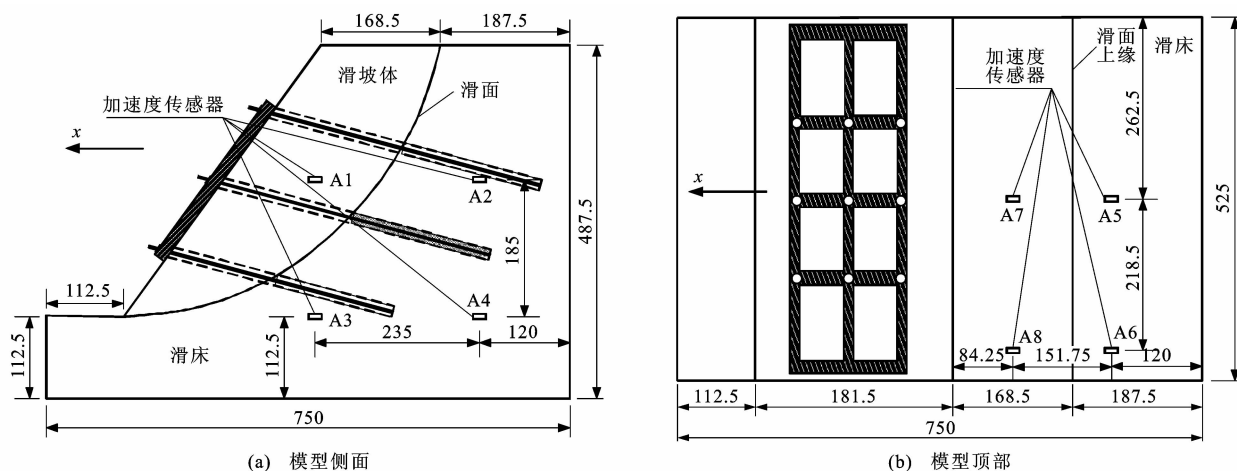


图 4 加速度传感器布置(单位:mm)

Fig. 4 Locations of Acceleration Sensors (Unit:mm)

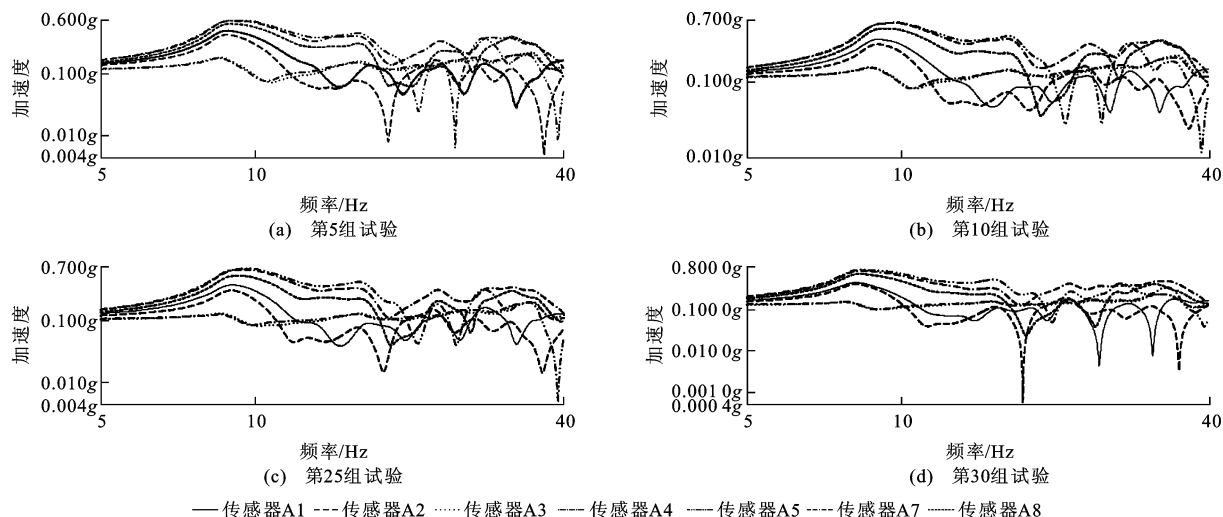


图 5 变频扫描时加速度传感器的动力反应曲线

Fig. 5 Dynamic Response Curves of Selected Acceleration Sensors During Frequency Sweep Tests

试验变频扫描时的最大值为 $0.6g$ (g 为重力加速度), 在第 10、25 组试验变频扫描时的最大值为 $0.7g$, 而最后一次扫描时的最大值为 $0.8g$ 。这说明随着振动次数的增加, 模型边坡对振动的放大作用增大, 且坡体上部更加显著。

3.2 边坡加速度动力响应规律

为便于分析, 引入动力响应加速度峰值 (PGA) 放大系数^[4], 采用平均动力响应加速度峰值 (APGA) 放大系数, 根据各监测点的实测最大加速度响应值绘制不同高度 APGA 放大系数随激振加速度的响应规律 (图 6)。

从图 6 可以看出: 低振动频率 (5、10 Hz) 情况下, APGA 放大系数随坡高表现出上部最大、下部最小的特征; 高振动频率 (15、20 Hz) 情况下, 呈现两头大、中间小的特征, 其中, 当振动频率为 15 Hz

时, 坡体顶部 APGA 放大系数大于坡体底部, 当振动频率在 20 Hz 时, 坡体底部 APGA 放大系数大于坡体顶部。在不同振动频率情况下, 坡体加速度响应具有明显差异, 边坡土体对低频振动波有放大作用, 而对高频振动波却有滤波作用, 这与文献[4]的研究结果相吻合, 而且幅值越大, 滤波作用更明显。

3.3 边坡速度动力响应规律

图 7 展示了坡体顶部测点 A8、坡体中部测点 A1 和坡体下部测点 A3 在不同加速度时的瞬时速度响应规律。由图 7 可见: 在低频荷载作用下, 坡体上部的速度往往要大于下部; 但振动频率增大时, 惯性作用使得中、上部速度减小, 上部为自由界面, 而中部受上、下部约束, 因此, 上部速度反而要大于中部。由于不同高度的速度不同, 导致当边坡受到动荷载作用时, 上部临空面首先失稳破坏。图 7 显示:

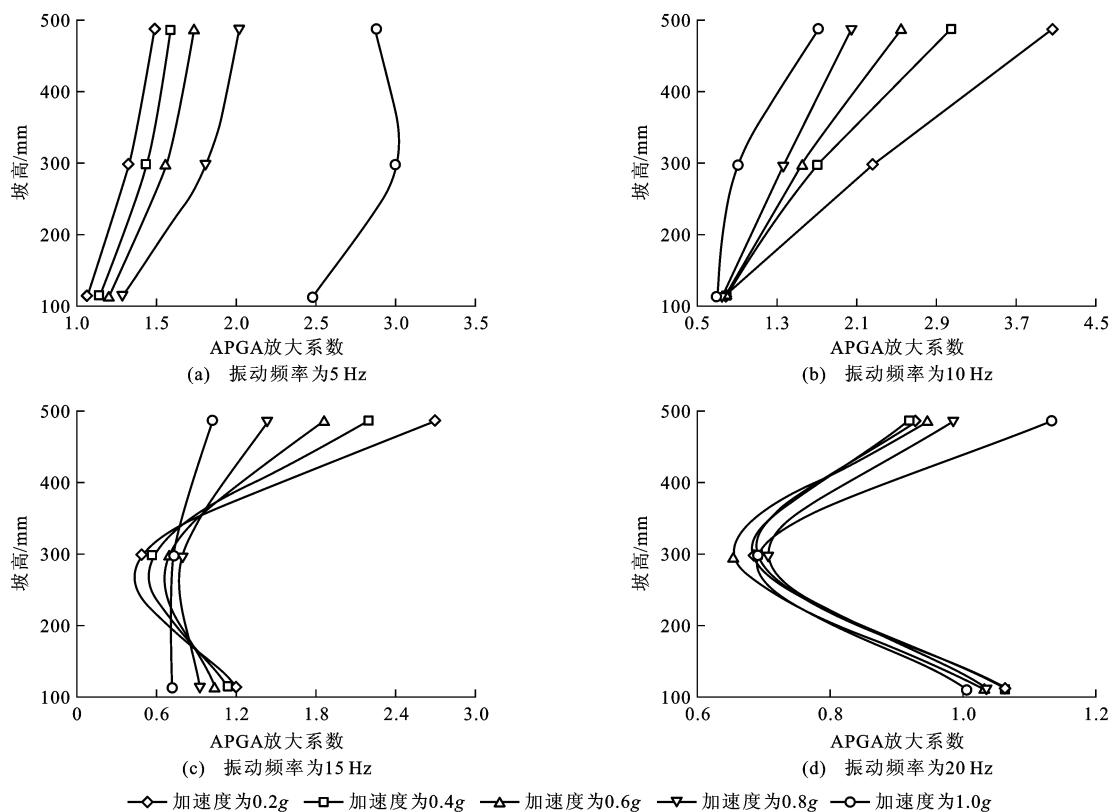


图 6 不同坡高测点 APGA 放大系数分布规律

Fig. 6 Distributions of APGA Amplification Factors at Different Heights of Slope

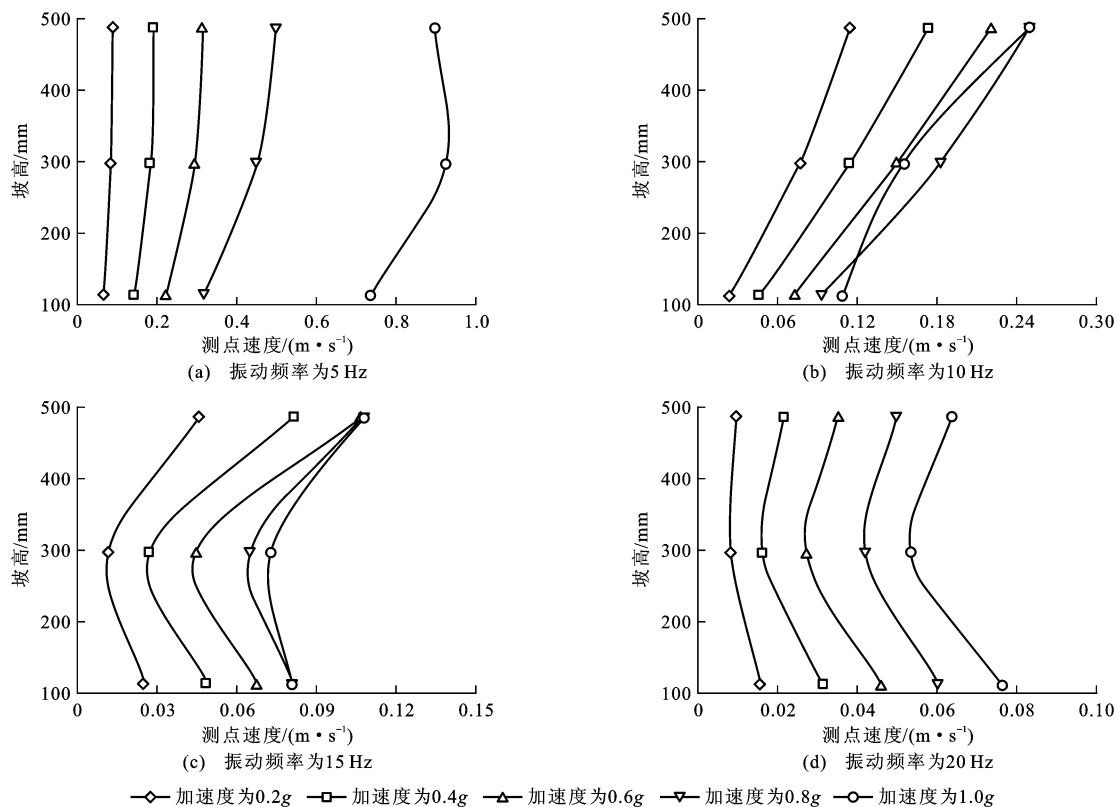


图 7 不同坡高测点速度响应规律

Fig. 7 Distributions of Velocity of Key Points at Different Heights of Slope

当振动频率为 5 Hz 时,坡体整体速度较大,但不同高度差异较小,实际上整体运动步调一致,因此,破坏并不明显;当振动频率为 10 Hz(较为接近模型边坡的自振频率)时,坡体上部、中部和下部速度变化明显,且呈现出线性特征,此时破坏性最大。

3.4 边坡变形规律

根据最后一次变频扫描结果,各传感器在振动频率为 8.18 Hz 时的放大作用明显,因此,本文又增加了此频率下的正弦激励峰值加速度为 1.0g 的定频振动试验,以及在 5 Hz 振动频率下,加速度峰值分别为 1.2g 和 2.0g 的定频振动试验,以观察边坡的破坏模式。加载工况见表 2。

表 2 边坡模型破坏试验加载工况

Tab. 2 Arrangement Summary of Loads for Slope Model Breaking Test

试验编号	激振方向	试验方法	加速度峰值	试验带宽/Hz	振动时长/s
31	x	定频	1.0g	8.18	20
32	x	定频	1.2g	5.00	20
33	x	定频	2.0g	5.00	20

根据试验观测结果,振动过程中的最大位移位于坡体上部,并且从上往下呈减小趋势,这与文献[14]的现场监测结果相一致。当振动频率为 5 Hz,加速度峰值为 1.2g 时,振动过程中的模型剖面见图 8。由图 8 可见,振动过程中滑坡体的变形模式表现为沿滑面逆时针旋转和水平位移。当加速度峰值为 1.2g,振动频率为 5 Hz 时,坡顶上部附近滑坡体与稳定体之间的水平间隙达到 15 mm,垂直位移为 15 mm 左右;当加速度峰值为 2.0g,振动频率为 5 Hz 时,水平间隙达到 20 mm,垂直位移约为 18 mm。

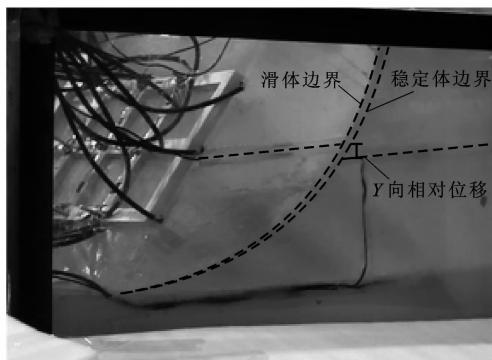


图 8 当加速度峰值为 1.2g,振动频率为 5 Hz 时
振动过程中模型剖面

Fig. 8 Profile of Model During Test Under Motion with Acceleration Peak of 1.2g and Vibrational Frequency of 5 Hz

但在振动过程中,滑体下部水平位移较小,主要为旋转位移。边坡顶部发生拉裂破坏,底部则发生剪切破坏。当加速度峰值为 2.0g,振动频率为 5 Hz 时,加载结束后格构的破坏情况见图 9。由图 9 可见,锚杆已被拔出,格构发生隆起且上侧隆起严重,为 2 cm 左右,这与边坡变形特征相一致。在振动过程中,上部相对位移较大,因此,锚杆格构受力较大。虽然边坡没有完全失稳,但锚杆格构已经破坏,基本起不到加固边坡的作用。从图 9 还可以看出,虽然边坡做往复运动,但最终仍有一定相对位移。图 10、11 分别为试验结束后,切取模型右侧锚杆处剖面,测量顶层锚杆和中层锚杆被拔出情况。由图 10、11 可见,顶层锚杆被拔出约 3.5 cm,中层锚杆被拔出约 3 cm。底层锚杆基本未拔出。

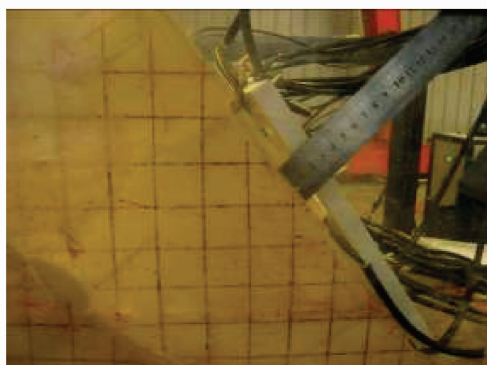


图 9 当加速度峰值为 2.0g,振动频率为 5 Hz 时
振动结束后的格构破坏情况

Fig. 9 Lattice Failure After Test Under Motion with Acceleration Peak of 2.0g and Vibrational Frequency of 5 Hz



图 10 顶层锚杆被拔出

Fig. 10 Top-row Anchor Pulled out

3.5 锚杆及格构梁的轴向应变

3.5.1 锚杆的轴向应变峰值

加载过程中,锚杆的轴向应变随加速度的增大而增大,且滑面处受力最大。以第 3 列锚杆为例,图 12 展示了振动频率为 15 Hz 时,锚杆③、⑥、⑨的



图 11 中层锚杆被拔出

Fig. 11 Mid-row Anchor Pulled out

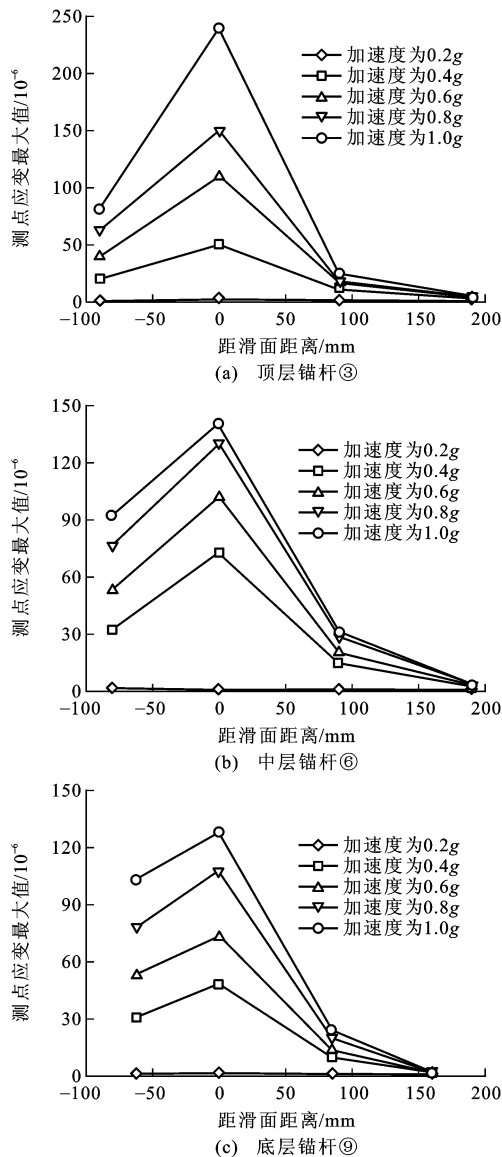


图 12 振动频率为 15 Hz 时第 3 列锚杆的轴向应变峰值

Fig. 12 Axial Strain Peaks for the Third Anchor when Vibrational Frequency Is 15 Hz

轴向应变峰值分布曲线。由图 12 可见,顶层锚杆受力最大,底层锚杆受力最小,这与边坡的变形特征相

一致。从这点来说,抗震效果最好的锚杆设计应该是由上至下锚固段长度减小,但考虑到静力作用下边坡锚杆的受力特征,中、下部锚杆起到很好的抗滑作用,因此,最理想的设计是锚固段等长设计,但要适当加长上部锚杆的长度。上部锚杆主要防止上部发生较大拉裂破坏,下部锚杆防止发生剪切破坏。

3.5.2 格构梁的轴向应变峰值

对比分析同级荷载作用下横向和纵向格构梁的轴向峰值,纵、横向格构梁的受力水平基本相当。对于横向格构梁,当振动频率较低(5、10 Hz)时,中、下部格构梁应变峰值较大,当振动频率较大(15、20 Hz)时,中层格构梁应变峰值较大。对于纵向格构梁,中、上部格构梁的轴向应变峰值较大。格构梁的轴向应变随加速度峰值及振动频率的变化规律,与锚杆的轴向应变变化规律类似,已在文献[13]中进行了详细表述。因此,在设计格构梁时,需要对中、上部格构梁进行补强设计。

4 结 语

(1)动荷载作用后,坡体内部并未出现松散,模型的自振频率有所降低,但变化并不明显,前面试验结果对后续试验结果影响不大;随着振动次数的增加,扫频过程中各加速度传感器的实测值在逐步增大;随着振动次数的增加,模型边坡对振动的放大作用增大,且坡体上部放大作用更加显著。

(2)引入平均动力响应加速度峰值放大系数,不同振动频率时,坡体加速度响应具有明显差异。边坡土体对低频振动波有放大作用,而对高频振动波却有滤波作用,且幅值越大,滤波作用越明显。

(3)在低频荷载作用下,坡体振动速度由下至上逐渐增大。振动频率增大时,由于惯性作用,使得中、上部速度减小,上部为自由界面,而中部受上、下部约束,所以上部速度反而要大于中部;振动频率较小时,坡体整体速度较大,但不同高度差异较小,破坏并不明显;振动频率接近模型边坡的自振频率时,坡体上部、中部和下部速度变化明显,且呈现出线性特征,此时破坏性最大。

(4)振动过程中,最大位移位于坡体上部,并且从上往下呈减小趋势;动荷载作用过程中,滑坡体的变形模式表现为旋转位移和水平位移。支护结构破坏时,上部锚杆被拔出,上部格构发生严重隆起,这与边坡变形特征相一致;虽然边坡做往复运动,但最终仍有一定相对位移。综合锚杆及格构梁的受力特征以及静力作用下边坡的破坏特征,在设计支护结

构时,要适当加长上部锚杆的长度,并且对中、上部格构梁进行补强。

参考文献:

References:

- [1] 郝建斌. 地震作用下边坡稳定性研究进展[J]. 世界地震工程, 2014, 30(1): 145-153.
HAO Jian-bin. Progress of Research on Stability of Slope Subjected to Seismic Excitation[J]. World Earthquake Engineering, 2014, 30(1): 145-153.
- [2] WARTMAN J, SEED R B, BRAY J D. Shaking Table Modeling of Seismically Induced Deformations in Slopes[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(5): 610-622.
- [3] LIN M L, WANG K L. Seismic Slope Behavior in a Large-scale Shaking Table Model Test [J]. Engineering Geology, 2006, 86(2): 118-133.
- [4] 徐光兴, 姚令侃, 高召宁, 等. 边坡动力特性与动力响应的大型振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 624-632.
XU Guang-xing, YAO Ling-kan, GAO Zhao-ning, et al. Large-scale Shaking Table Model Test Study on Dynamic Characteristics and Dynamic Responses of Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(3): 624-632.
- [5] 李 阳, 李同春, 牛志伟. 边坡动力响应特性及破坏过程的振动台试验研究[J]. 水电能源科学, 2014, 32(1): 93-95.
LI Yang, LI Tong-chun, NIU Zhi-wei. Shaking Table Test Study on Dynamic Responses and Failure Mode of Slope[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(1): 93-95.
- [6] 董金玉, 杨国香, 伍法权, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应和破坏模式大型振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2977-2982, 2988.
DONG Jin-yu, YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, et al. The Large-scale Shaking Table Test Study of Dynamic Response and Failure Mode of Bedding Rock Slope Under Earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2977-2982, 2988.
- [7] 杨国香, 伍法权, 董金玉, 等. 地震作用下岩质边坡动力响应特性及变形破坏机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 696-702.
YANG Guo-xiang, WU Fa-quan, DONG Jin-yu, et al. Study of Dynamic Response Characters and Failure Mechanism of Rock Slope Under Earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 696-702.
- [8] 李振生, 巨能攀, 侯伟龙, 等. 陡倾层状岩质边坡动力响应大型振动台模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2012, 20(2): 242-248.
LI Zhen-sheng, JU Neng-pan, HOU Wei-long, et al. Large-scale Shaking Table Model Tests for Dynamic Response of Steep Stratified Rock Slopes[J]. Journal of Engineering Geology, 2012, 20(2): 242-248.
- [9] 刘婧雯, 黄 博, 邓 辉, 等. 地震作用下堆积体边坡振动台模型试验及抛出现象分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 307-311.
LIU Jing-wen, HUANG Bo, DENG Hui, et al. Shaking Table Tests and Throwing Phenomenon of Deposit Slopes Under Earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(2): 307-311.
- [10] 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: 1264-1279.
- [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] 陈新民, 沈 建, 魏 平, 等. 下蜀土边坡地震稳定性的大型振动台试验研究(I): 模型试验设计[J]. 防灾减灾工程学报, 2010, 30(5): 497-502.
CHEN Xin-min, SHEN Jian, WEI Ping, et al. Large-scale Shaking Table Test of Seismic Stability of Xiashu Loess Slopes(I): Design of Model Test [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2010, 30(5): 497-502.
- [13] 郝建斌, 李金和, 程 涛, 等. 锚杆格构支护边坡振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 293-304.
HAO Jian-bin, LI Jin-he, CHENG Tao, et al. Experimental Study of Slopes Supported with Framed Anchors on Shaking Table [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 293-304.
- [14] 张 华, 游 宏, 陆 阳. 地震作用下斜坡堆积体的变形规律[J]. 公路交通科技, 2014, 31(1): 50-54.
ZHANG Hua, YOU Hong, LU Yang. Deformation Regularity of Deposit Covered Slope Subjected to Earthquake[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2014, 31(1): 50-54.