

三向地震作用下错距岩质边坡共振特性研究

林峻岑, 严松宏, 孙纬宇, 欧尔峰

A study of the resonance characteristics of a staggered rock slope under the tri-dimension earthquake wave

LIN Juncen, YAN Songhong, SUN Weiyu, and OU Erfeng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206038>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

岩质边坡复合型破坏机制的改进运动单元法研究

Investigation on combined failure mechanism of rock slope based on the improved kinematical element method

张科, 侯杰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 95-101

岩质边坡表层黏性客土抗裂特性试验研究

An experimental study of the anti-cracking characteristics of foreign-clay based on rock slope

宋京雷, 何伟, 郝社锋, 蒋波, 刘瑾, 卜凡, 宋泽卓 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 144-149

基于底摩擦试验的硬岩岩质边坡变形过程及破坏机制研究

A study of deformation process and failure mechanism of hard rock slope based on the bottom friction test

李任杰, 胡富杭, 石豫川, 王磊, 吕可伟 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 145-152

基于黏聚力裂缝模型的反倾层状岩质边坡倾倒破坏模拟

A numerical study of the toppling failure of an anti-dip layered rock slope based on a cohesive crack model

马文著, 徐衍, 李晓雷, 陈敏 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 150-160

黄土填方边坡界面渗流破坏机制模型试验研究

A model test study of the interface seepage and failure mechanism of loess-filled slope

余岱金, 黄强兵, 康孝森, 陈星, 刘悦 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 119-128

层状边坡岩体的屈曲和溃屈性态研究

Buckling and buckling failure behavior of bedding slope rock mass

陈笑楠, 张慧梅, 周洪文 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 141-147



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202206038

林峻岑, 严松宏, 孙纬宇, 等. 三向地震作用下错距岩质边坡共振特性研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(2): 95-102.

LIN Juncen, YAN Songhong, SUN Weiyu, *et al.* A study of the resonance characteristics of a staggered rock slope under the tri-dimension earthquake wave[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(2): 95-102.

三向地震作用下错距岩质边坡共振特性研究

林峻岑¹, 严松宏^{1,2}, 孙纬宇^{1,2}, 欧尔峰^{1,2}

(1. 兰州交通大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730070;

2. 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室(兰州交通大学), 甘肃 兰州 730070)

摘要: 地震引发的共振往往会对边坡造成严重的破坏, 直接影响边坡的抗震性能。为研究错距岩质边坡的共振特性, 通过有限元软件 ANSYS 建立三维边坡数值模型, 分析错距对边坡固有频率的影响, 并使用谐响应分析对坡面各点的共振响应规律及地震作用频率对边坡应力的影响进行探讨。结果表明: (1) 在不同错距条件下均有可能出现共振现象, 边坡错距越大, 基频越小, 坡面的水平共振位移大于竖向共振位移, 前坡坡面位移峰值较大, 发生共振的频率比后坡小; (2) 低阶和高阶固有频率被激发都可引发共振, 但高阶共振位移相对较小, 前坡和后坡坡面水平位移峰值表现为: 坡顶>坡中>坡脚, 侧坡则是: 坡中>坡顶>坡脚, 在高频加载条件下, 边坡会出现下部动力响应大于上部的现象; (3) 坡体共振时发生的破坏主要以坡脚剪切破坏为主, 最大剪切应力和最大拉应力出现的位置与加载频率范围有关, 前坡更容易遭受破坏, 低频地震动对前坡影响较大, 而高频地震动则相反。所得结论可为错距边坡进行抗震设防时确定重点加固部位提供参考。

关键词: 地震作用; 错距边坡; 边坡破坏; 共振特性; ANSYS; 抗震设防

中图分类号: P315.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)02-0095-08

A study of the resonance characteristics of a staggered rock slope under the tri-dimension earthquake wave

LIN Juncen¹, YAN Songhong^{1,2}, SUN Weiyu^{1,2}, OU Erfeng^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. Key Laboratory of Road & Bridge and Underground Engineering of Gansu Province (Lanzhou Jiaotong University), Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: The resonance induced by an earthquake often causes more serious damage to the slope and directly affects its seismic performance. To study the resonance characteristics of a staggered rock slope, a 3D numerical model of the slope is established by using the finite element software ANSYS, and the effect of staggered space on the natural frequency of the slope is analyzed. The resonance response laws of different locations on the slope surface and the effect of the earthquake frequency on the stress of the slope are discussed by the harmonic response analysis. The results show that (1) the larger the slope slip distance is, the smaller the fundamental frequency is, and the resonance phenomena may occur under different staggered distances. The horizontal resonance displacement of the slope surface is larger than the vertical one. The front slope has a larger peak

收稿日期: 2022-06-18; 修订日期: 2022-10-12

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金(52068044; 52168058; 52208392); 甘肃省自然科学基金(21JR7RA309); 中国博士后科学基金(2021M693843)

第一作者: 林峻岑(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事隧道抗震研究工作。E-mail: 1753106300@qq.com

通讯作者: 孙纬宇(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事隧道与地下工程的教学与研究工作。E-mail: 448221362@qq.com

displacement and lower resonant frequency compared with those of the back slope. (2) Both the low and high-order natural frequencies can be excited to cause resonance, but the displacement of the high-order resonance is relatively small. The horizontal displacement peak of the front slope and back slope is in the order: top > middle > foot, while that of the side slope is in the order: middle > top > foot. Under high-frequency loading, the dynamic response of the slope at the lower part may be greater than that at the upper part. (3) The shear failure of the slope toe is the main damage in slope resonance. The location of the maximum shear and tensile stress is related to the range of loading frequency. The front slope is more prone to damage. Ground motions with low frequency have a greater influence on the front slope, while high frequency ground motions have the opposite effect. The results can be used as reference to determine the key reinforcement position of a staggered slope in the seismic fortification.

Keywords: seismic action; staggered slope; slope failure; resonance characteristics; ANSYS; seismic fortification

地震是诱发地质灾害的主要因素之一^[1]。2008 年汶川 8.0 级地震是我国近 100 年来发生的破坏性最强、波及范围最广的一次地震,触发大量滑坡、崩塌、抛射等自然灾害,造成的人员伤亡和财产损失不计其数^[2]。2017 年九寨沟 7.0 级地震,大量边坡遭到不同程度的震害,引起低烈度区烈度异常^[3]。幅值、频谱和持时是地震动特性的三要素,均会影响到边坡结构的动力响应^[4-5]。当地震动的卓越频率与边坡的固有频率一致时,将会发生共振现象,共振会放大动力响应,造成更为严重的危害。杨国香等^[6]通过大型振动台模型试验发现当地震波频率接近边坡自振频率时,无论是顺层边坡还是匀质边坡其动力响应都最为强烈。同时结构的自振特性也对其动力响应具有重要影响,包括固有频率、振型和阻尼。目前对于边坡类结构物的固有频率已有较为广泛和深入的研究。如孙纬宇等^[7]探讨了不同坡高和坡度对黄土边坡自振频率的影响,认为坡高对自振频率的影响更大。边坡的固有频率对地震响应起着不可忽视的影响,当地震动频率与边坡的前 3 阶固有频率相近时,边坡的坡面会产生较大的振动且共振响应应具有临空放大和垂直放大效应^[8]。即使地震动的幅值较小,当地震动的卓越周期与结构的自振周期接近时也会对结构物产生较大的破坏,这在墨西哥地震中已得到证实^[9]。因此,在边坡设计中应考虑频率的影响以避免发生共振^[10]。

近年来,由于计算机计算能力的巨大提升,数值模拟分析方法被学者们广泛使用。张学东等^[11]通过对岩质边坡进行模态分析推断出高频地震波对低边坡影响较大,而低频地震波对高边坡的影响较大;门妮等^[12]结合汶川地震实例分析了边坡的共振特性,认为汉源县出现高烈度异常现象是由边坡的固有周期与地震动卓越周期较接近从而发生共振效应引起的;

言志信等^[13]利用有限差分软件 FLAC^{3D}探讨了地震动参数对黄土边坡动力响应的影响,发现位移放大系数随频率的减小而减小,并在 1/4 坡高处达到最大值。此外,刘汉东等^[14]采用振动台试验方法发现频率对边坡的动力响应最为显著。以上研究均假定边坡坡面为一理想化的平面,当边坡坡面形状在空间上发生变化时,各个坡面的动力响应特征会有所不同。有错距的边坡在实际工作中比较常见,对于错距边坡而言,深入认识各个坡面的共振特性对搞震设防起着重要作用。因此,建立三维错距边坡模型,分析错距对边坡固有频率的影响,对错距类岩质边坡的共振响应变化规律进行探讨。

1 模型建立及数值分析

1.1 材料参数及计算模型

为探讨错距岩质边坡的共振特性,在 ANSYS 中建立计算模型,考虑到模态分析忽略非线性材料特性^[15],假定模型为线性、均质、各向同性材料,材料参数如表 1 所示。参考孙纬宇等^[7]提出的三维边坡概化模型,边坡高度取 30 m,边坡总宽度取坡高的 5.0 倍,前坡坡脚到前缘边界距离为坡高的 1.5 倍,后坡坡顶到后缘边界的距离为坡高的 2.5 倍,上下边界总高为坡高的 2.0 倍。错距 d 指前坡相对后坡向前延伸的距离,前后坡及侧坡坡度均取 45°。边坡模型使用 8 节点结构实体单元 SOLID185 模拟,计算所采用的三维边坡有限元模型如图 1 所示。

表 1 边坡岩体物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of slope rock mass

参数	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
取值	6.0	0.25	2 200

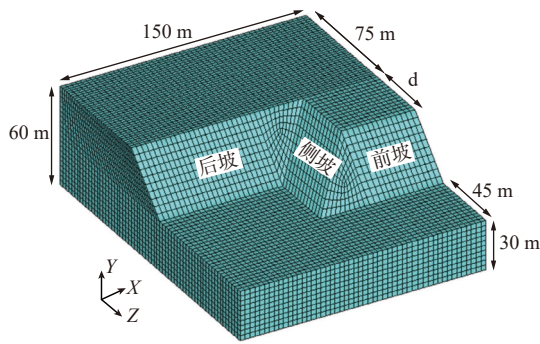


图 1 三维边坡有限元模型
Fig. 1 3D finite element model of slope

1.2 模态分析

1.2.1 分析原理

ANSYS 模态分析过程中, 无阻尼结构体系的自由振动方程为^[15]:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ ——质量矩阵;

$[K]$ ——刚度矩阵;

$\{u\}$ ——位移列阵;

$\{\ddot{u}\}$ ——加速度列阵。

在特定的初始条件下, 体系按同一频率做简谐振动, 该方程的基本解形式可以写成:

$$\{u\} = \{\phi\} \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

对式(2)进行求导, 代入式(1), 并注意到 $\sin(\omega t + \theta)$ 的任意性, 有:

$$([K] - \omega^2 [M])\{\phi\} = \{0\} \quad (3)$$

则体系的频率方程或特征方程为:

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0 \quad (4)$$

式(4)的根 $\omega_i^2 (i = 1, 2, \dots, N)$ 称为第 i 个特征值, $\omega_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 称为第 i 阶自振圆频率, 再通过公式 $\omega_i = 2\pi f_i$ 即可得到固有频率 f_i 。

1.2.2 错距对固有频率影响

利用 ANSYS 进行模态分析可以确定边坡的固有频率和振型。分析时采用缺省的模态提取方法, 即分块兰索斯法(Block Lanczos)。模型的底边界采用水平和竖向约束, 四周施加垂直于边界面的水平约束。分析中采用的不同错距计算模型(表 2)。

表 2 计算模型
Table 2 Calculation models

模型编号	1	2	3	4	5
错距/m	0	20	40	60	100

对表 2 中的计算模型分别进行模态分析。当累积质量分数超过 90% 时就可以描述该模型基本的动力特性, 综合 X、Y、Z 三个方向的模态分析结果, 提取前 14 阶固有频率, 不同错距边坡前 14 阶固有频率的变化趋势如图 2。从图中可以看出: (1) 边坡固有频率随着阶数的增加而逐渐增大; (2) 第 3 阶~第 5 阶固有频率几乎不受错距和阶数的影响; (3) 其余各阶固有频率(包括基频, 图中虚线区域所示)随边坡错距的增大而减小。将边坡视作多自由度结构, 按照固有频率计算公式 $\omega = \sqrt{k/m}$, 当错距增大时, 边坡的质量也增大, 而固有频率减小, 因此刚度增大的幅度相对较小。一般情况下, 当边坡在第 1 阶固有频率处发生共振时, 共振位移幅值最大, 对边坡造成的危害也最大。稳定岩层中地震波的卓越频率一般为 5~10 Hz, 因此在不同错距条件下边坡均有可能出现共振现象使得动力响应放大, 进行错距边坡抗震设计时应考虑共振的影响。

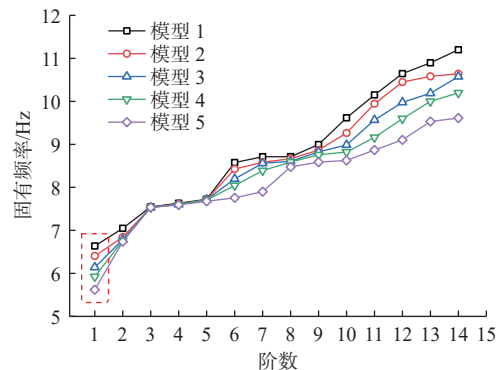


图 2 不同错距边坡前 14 阶固有频率
Fig. 2 The first fourteen order natural frequencies of slopes with different staggered distances

1.3 谐响应分析

1.3.1 分析原理

谐响应分析是用于确定线性结构在简谐荷载作用下的稳态响应, 其目的是计算出结构在几种频率下的响应, 并得到响应值和频率的变化关系曲线^[15], 结构体系的振动方程为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\} \cos \Omega t \quad (5)$$

式中: $[C]$ ——阻尼矩阵;

$\{\dot{u}\}$ ——速度列阵;

$\{F\}$ ——简谐荷载幅值列阵;

Ω ——激振圆频率。

式(5)解得的稳态位移响应为:

$$\{u\} = \{A\} \cos(\Omega t + \varphi) \quad (6)$$

式中: $\{A\}$ ——稳态响应位移幅值;

φ ——相位角。

通过 ANSYS 谐响应分析可以得到边坡在不同频率荷载作用下的稳态响应,并且可以找到共振峰值对应的加载频率,从而确定坡体发生共振的原因。

1.3.2 分析过程与结果

以模型 3 为例,分析采用水平方向(X、Z向)和竖直方向(Y向)三向同时加载,水平向加速度峰值取 0.2g。实际上,竖向地震波几乎不会与水平向地震波同时达到加速度峰值,因此,竖向地震波按照相关规范取水平向加速度激振峰值的 2/3^[16]。ANSYS 求解方法有完全法、缩减法和模态叠加法,分析采用较为简单的完全法,加载频率范围取 0~16 Hz,阻尼比 ζ 取 0.05。在坡面处设置 8 组(A—H)共 24 个监测点,监测点位置分别位于坡顶、坡中和坡脚,坡面监测点布置如图 3 所示。

由于篇幅有限,此处只绘出 B、D、F、H 组 Z 向和 X 向位移谐响应曲线(图 4 和图 5)。从图 4 中可以看出各组监测点的位移峰值大小为:坡顶>坡中>坡脚;B 组监测点 Z 向位移共振峰值均出现在 7.73 Hz 处,对应边坡第 5 阶固有频率;F、H 组监测点 Z 向位移共振峰值则均出现在 6.13 Hz 处,对应边坡第 1 阶固有频率;而 D 组监测点出现了多个位移峰值,其最大峰值

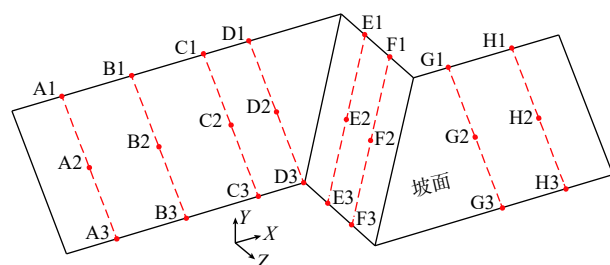


图 3 坡面监测点布置

Fig. 3 Layout of the slope monitoring points

也出现在 6.13 Hz 处。说明前坡发生共振的频率比后坡小,加载频率主要在第 1 阶和第 5 阶固有频率(6.14 Hz 和 7.71 Hz)处激发边坡 Z 向位移发生共振,其峰值大小为: H1>F1>B1>D1。同样,在图 5 中可以看出 B 组和 D 组 X 向共振位移峰值仅有 1 个且都出现在 7.73 Hz 处;F 组与 H 组 X 向较为明显的共振位移峰值有 2 个,分别出现在第 4 阶和第 13 阶固有频率(7.63 Hz 和 10.13 Hz)处。因此低阶和高阶固有频率被激发都可引起发生共振,但高阶固有频率引起的共振位移相对较小,X 向位移峰值大小为: H1<F1<B1<D1。侧坡段坡中的共振位移峰值大于坡顶,在第二个峰值处坡顶的共振位移比坡中和坡脚都小,前坡坡中共振位移峰值接近坡顶。

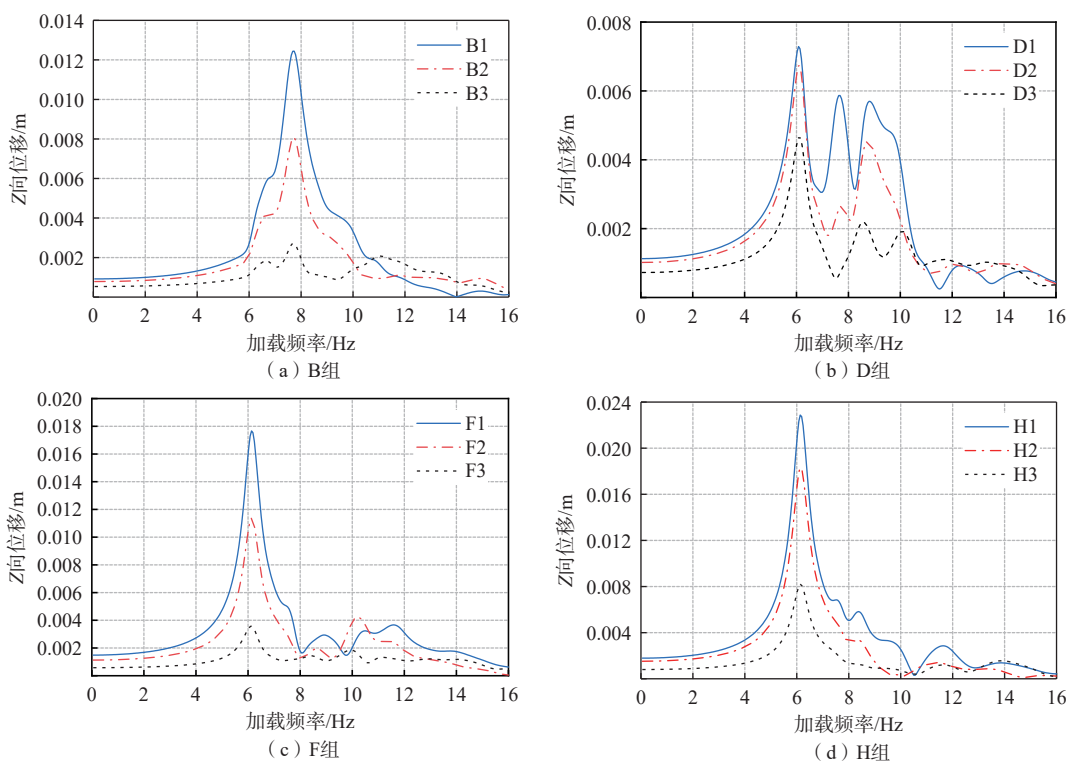


图 4 Z 向位移谐响应曲线

Fig. 4 Displacement harmonic response curves in the Z direction

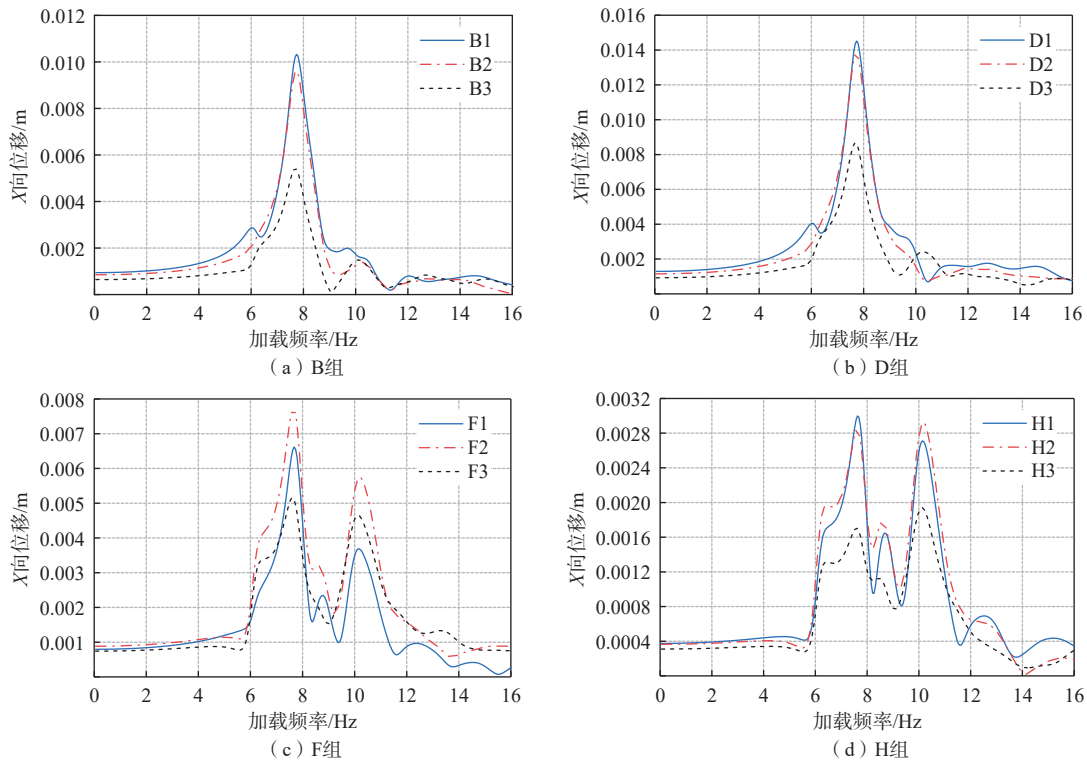


图 5 X 向位移谐响应曲线

Fig. 5 Displacement harmonic response curves in the X direction

值得注意的是,当地震波加载频率大于边坡发生共振的固有频率时,由地震波传播过程中能量的耗散产生的抑制作用随着加载频率的增大而逐渐增强,即边坡动力响应的放大作用随高程的增加而逐渐变弱,当抑制作用大于边坡垂直放大效应时,边坡下部的动力响应就容易出现大于边坡上部的现象,如图 4 与图 5 中的高频段所示。

2 共振位移峰值变化规律

为更好比较坡面位移的变化规律,坡面水平位移峰值定义为前后坡 Z 向位移峰值和侧坡 X 向位移峰值,坡面各点水平位移峰值和竖向位移峰值如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,坡面各个位置的水平位移峰值变化较大,前坡坡面水平位移大于侧坡和后坡。前坡和后坡坡面水平位移峰值表现为:坡顶>坡中>坡脚;侧坡则是:坡中>坡顶>坡脚,且坡顶到坡脚的位移峰值变化较小。从图 6(b)则可以看出前坡和侧坡坡面的竖向(Y 向)位移峰值相对较大,所有位置的位移峰值均是:坡顶>坡中>坡脚。竖向位移峰值相比于水平位移峰值要小得多,特别是前坡位置,如前坡坡中,水平位移峰值最大可达竖向位移峰值的近 4 倍。因此,当边坡处于共振状态时,坡面位移是以水平向为主,此

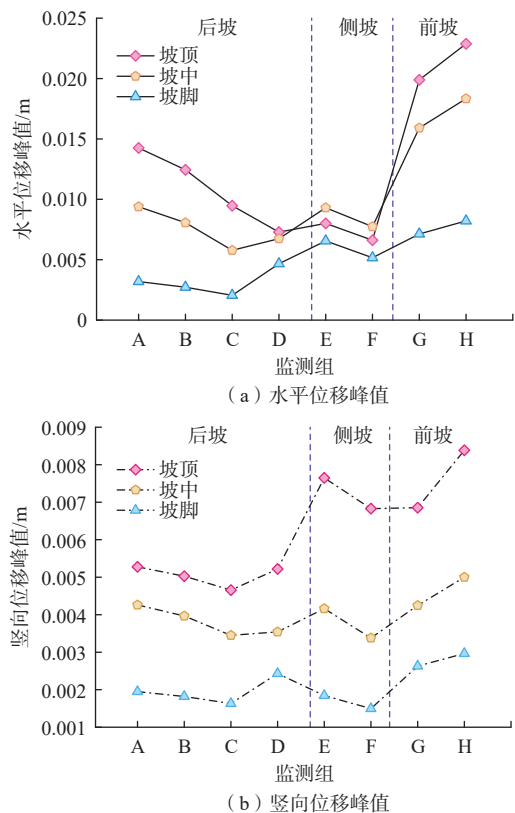


图 6 坡面共振位移峰值

Fig. 6 Peak of slope resonance displacement

结论已被言志信等^[8]通过谐响应分析证实。

3 加载频率对坡体应力的影响

边坡应力通过实部和虚部的平方和取平方根值 (SRSS 值) 提取, 不同加载频率下的应力云图如图 7。其中 (a)(b)(c)(d) 为坡体剪应力云图, 从中可以看出: 无论是前坡还是后坡, 坡体的最大剪切应力主要出现在坡脚处, 因此边坡的坡脚首先出现破坏现象, 郑颖人等^[17-18]通过试验分析也得出了类似的结论。当荷载频率较低时, 最大剪切应力出现在前坡, 如图 7(a) 所示, 当坡体处于第 1 阶共振状态时, 剪切应力达到最大值 1.51 MPa, 对边坡的破坏最大; 当加载频率为 7.52 Hz 时, 前后坡的剪切应力同时达到最大值; 当荷载频率较高时, 最大剪切应力则出现在后坡, 如图 7(c) 所示。图 7(d) 为侧坡最大剪切应力, 同样处于第 1 阶共振时剪切应力最大, 最大剪切应力出现在前坡坡角处。由此可看出当坡体处于共振状态时, 最大剪切应力出现在前坡坡脚处。

(e) 和 (f) 为坡体主拉应力云图, 从中可以看出前坡坡脚、后坡和侧坡交界处也会发生拉裂破坏, 分别第 1 阶和第 5 阶固有频率处共振时其值达到最大。前坡坡脚主拉应力为整个坡面最大时的加载频率范围为 4.43 ~ 6.93 Hz; 而交界处主拉应力达到整个坡面最大时的加载频率范围为 7.52 ~ 11.47 Hz, 最大主拉应力为 2.92 MPa, 出现在 7.71 Hz 处, 可看出出现最大拉应力的频率并不相同。因此, 最大剪切应力和最大拉应力出现的位置与加载频率范围有关。

从前述分析可知前坡与后坡的破坏与地震动的频率有关, 低频震动对前坡影响更大, 而高频地震动则对后坡影响更大。坡体不仅会发生剪切破坏还会出现拉裂现象。由于边坡体对地震波的低频部分存在放大作用, 对高频部分具有滤波和抑制作用^[12], 使得坡体内含有较为丰富的低频成分, 因此前坡更容易遭受剪切和张拉破坏。在对此类边坡进行抗震设防时应重点加固前坡部位。

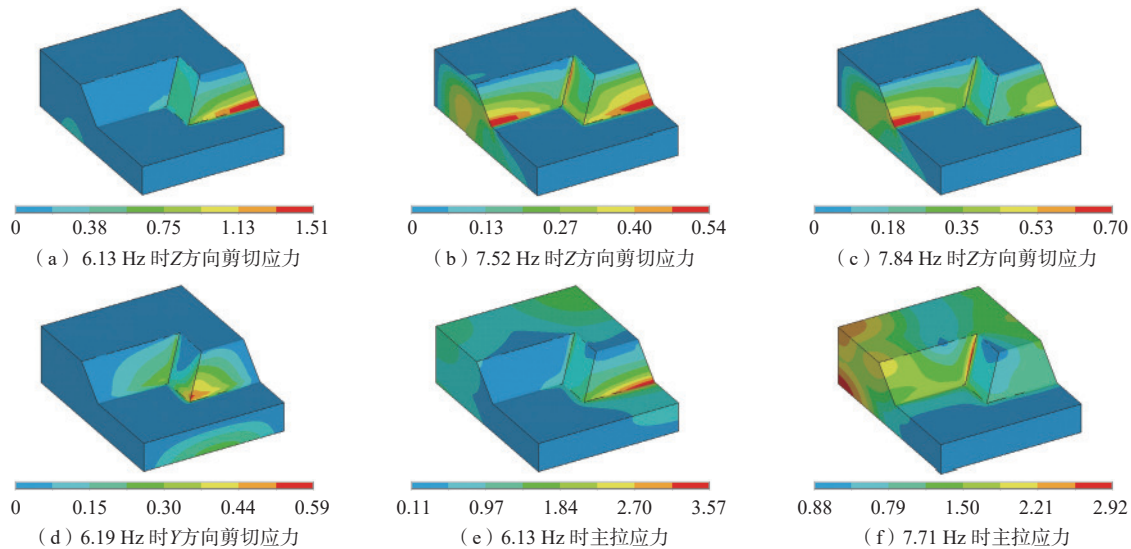


图 7 不同加载频率应力云图 (单位: MPa)

Fig. 7 Stress nephograms of different loading frequencies (unit: MPa)

4 分析与讨论

地震动的频率对边坡的动力响应影响较大, 当接近边坡的前几阶固有频率时, 将引发边坡发生共振, 共振使得边坡的动力响应会出现明显的放大现象。实际上的坡体总是崎岖不平的, 产生一定的错距, 当坡体在地震作用下发生共振时, 前坡和后坡段上部的水平位移峰值最大, 而侧坡段的最大水平位移峰值则出现在中部附近。在汶川地震中, 大量的岩质坡体物

质从中上部被抛射出来^[2], 由上述可解释共振是边坡出现抛射的一个可能原因。

另外, 文中采用的是一定频率范围内幅值相同的简谐荷载, 实际的地震波包含各频率成分的幅值是不同的, 因而在以后的研究中可以采用真实的地震动以反映坡体真实的动力响应。

5 结论

(1) 边坡固有频率随着阶数的增加而逐渐增大。

第3阶~第5阶固有频率几乎不受错距和阶数的影响,其余各阶固有频率随边坡错距的增大而减小。在不同错距条件下均有可能出现共振现象,边坡错距越大,基频越小。

(2)前坡发生共振的频率比后坡小,加载频率主要在第1阶和第5阶固有频率处激发边坡Z向位移发生共振,在第4阶和第13阶固有频率处激发边坡X向位移发生共振。Z向坡顶位移峰值大小为:前坡>侧坡>后坡,X向坡顶位移峰值大小为:前坡<侧坡<后坡。低阶和高阶固有频率被激发都可引发共振,但高阶共振位移相对较小。当加载频率大于边坡发生共振的固有频率时,边坡下部的动力响应可能会大于边坡上部。

(3)坡面水平共振位移大于竖向共振位移,前坡坡面位移峰值比其余各坡面大。前坡和后坡坡面水平位移峰值表现为:坡顶>坡中>坡脚,侧坡则是:坡中>坡顶>坡脚,且侧坡坡顶到坡脚的水平共振位移峰值变化较小。

(4)坡体发生共振时最大剪切应力主要发生在坡脚处,前坡坡脚、后坡和侧坡交界处会发生拉裂破坏,最大剪切应力和最大拉应力出现的位置与加载频率范围有关。低频地震动对前坡的影响大,高频地震动对后坡影响大,前坡更容易遭受破坏,在对错距边坡进行抗震设防时前坡应是重点加固部位。

参考文献 (References) :

- [1] 钱海涛,张力方,修立伟,等.中国地震地质灾害的主要类型与分布特征[J].水文地质工程地质,2014,41(1):119-127. [QIAN Haitao, ZHANG Lifang, XIU Liwei, et al. Types and distribution characteristics of earthquake induced geological disasters in China[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(1): 119-127. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 黄润秋.汶川8.0级地震触发崩滑灾害机制及其地质力学模式[J].岩石力学与工程学报,2009,28(6):1239-1249. [HUANG Runqiu. Mechanism and geomechanical modes of landslide hazards triggered by Wenchuan 8.0 earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1239-1249. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 王谦,苏永奇,马占虎,等.2017年九寨沟M_s7.0地震低烈度区烈度异常特征与启示[J].世界地震工程,2018,34(3):153-160. [WANG Qian, SU Yongqi, MA Zhanhu, et al. Characteristics and implications of abnormal intensities in the low-intensity regions in the Jiuzhaigou M_s7.0 earthquake, 2017[J]. World Earthquake Engineering, 2018, 34(3): 153-160. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 吴多华,刘亚群,李海波,等.地震荷载作用下顺层岩体边坡动力放大效应和破坏机制的振动台试验研究[J].岩石力学与工程学报,2020,39(10):1945-1956. [WU Duohua, LIU Yaqun, LI Haibo, et al. Shaking table tests on dynamic amplification and failure mechanism of layered rock slopes under seismic actions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 1945-1956. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 徐光兴,姚令侃,李朝红,等.边坡地震动力响应规律及地震动参数影响研究[J].岩土工程学报,2008,30(6):918-923. [XU Guangxing, YAO Lingkan, LI Zhaohong, et al. Dynamic response of slopes under earthquakes and influence of ground motion parameters[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(6): 918-923. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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 Guoxiang, WU Faquan, DONG Jinyu, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 孙纬宇,严松宏,欧尔峰,等.黄土边坡自振特性影响因素分析[J].铁道科学与工程学报,2018,15(1):64-70. [SUN Weiyu, YAN Songhong, OU Erfeng, et al. Analysis of influence factors on natural vibration characteristics of loess slope[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(1): 64-70. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 言志信,张学东,张森,等.基于双向地震作用下边坡共振特性与固有频率研究[J].水文地质工程地质,2011,38(2):46-51. [YAN Zhixin, ZHANG Xuedong, ZHANG Sen, et al. Study on resonance characteristics and natural frequency of slope under bi-directional seismic action[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(2): 46-51. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 胡聿贤.地震工程学[M].北京:地震出版社,2006. [HU Yuxian. Earthquake engineering[M]. Beijing:

- Seismological Press, 2006. (in Chinese)]
- [10] 郑黎明. 铁路边坡岩体的振动特性和机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(1): 69 – 78. [ZHENG Liming. Specific vibration property and mechanism of rockmass in railway slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(1): 69 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 张学东, 言志信, 张森. ANSYS在岩质边坡动力响应分析中的应用[J]. 西北地震学报, 2010, 32(2): 117 – 121. [ZHANG Xuedong, YAN Zhixin, ZHANG Sen. Numerical analysis on dynamic response of rock slope using ANSYS software[J]. Northwestern Seismological Journal, 2010, 32(2): 117 – 121. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 门妮, 孙有为, 薄景山, 等. 地震作用下边坡动力响应及影响因素研究[J]. 世界地震工程, 2017, 33(3): 110 – 120. [MEN Ni, SUN Youwei, BO Jingshan, et al. Study on dynamic response and influence factors of slope under earthquake[J]. World Earthquake Engineering, 2017, 33(3): 110 – 120. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 言志信, 郭斌, 张学东, 等. 黄土边坡动力响应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2012, 32(5): 629 – 635. [YAN Zhixin, GUO Bin, ZHANG Xuedong, et al. Dynamic response analysis of loess slope[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2012, 32(5): 629 – 635. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 刘汉东, 牛林峰, 袁富强, 等. 地震波频率对层状岩质边坡动力响应影响的试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2): 77 – 83. [LIU Handong, NIU Linfeng, YUAN Fuqiang, et al. Test research on the influence of seismic wave frequency on the dynamic response of a layered rock slope[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(2): 77 – 83. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王新敏. ANSYS结构动力分析与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2014. [WANG Xinmin. Structural dynamic analysis and application with ANSYS[M]. Beijing: China Communications Press, 2014. (in Chinese)]
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)]
- [17] 郑颖人, 叶海林, 黄润秋. 地震边坡破坏机制及其破裂面的分析探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1714 – 1723. [ZHENG Yingren, YE Hailin, HUANG Runqiu. Analysis and discussion of failure mechanism and fracture surface of slope under earthquake[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1714 – 1723. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 毕鹏程, 车爱兰, 袁刚烈. 基于振动台试验的地震作用下岩质边坡位移演化特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(3): 11 – 19. [BI Pengcheng, CHE Ailan, YUAN Ganglie. Displacement evolution of rock slope under earthquake based on shaking table test[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(3): 11 – 19. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农