

地震作用下岩体边坡破坏机制及稳定性研究进展

寇 昊^{1,2}, 李 宁², 郭双枫²

(1. 核工业西南勘察设计院有限公司, 四川 成都 610061; 2. 西安理工大学岩土工程研究所, 陕西 西安 710048)

摘要:从岩体结构控制论的观点出发,分别从理论分析、数值模拟和试验研究等方面,综述了近年来块状结构、层状结构、碎裂状结构及散体状结构岩体边坡的地震稳定性及破坏机制的研究进展,系统总结了地震作用下不同结构岩体边坡的破坏模式。针对当前地震荷载作用下岩体边坡破坏机制和稳定性研究中存在的不足,指出应当考虑地震动空间变化对岩体边坡变形与稳定的影响,加强岩体内部结构特征研究,提高物理模型试验的准确性,并深入研究地震与地下水共同作用下岩体边坡的破坏机制。

关键词:岩体边坡;地震作用;岩体结构;边坡稳定;破坏机制;综述

中图分类号: TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2018)04-0081-08

Advances in failure mechanisms and stability of rock slopes under earthquake action//KOU Hao^{1,2}, LI Ning², GUO Shuangfeng² (1. Nuclear Industry Southwest Survey & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610061, China; 2. Institute of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: From the viewpoint of rock mass structure control, the research progress of dynamic stability and damage mechanisms for rock slopes of massive structures, layered structures, fragmented structures, and discrete structures in recent years is reviewed in terms of theoretical analysis, numerical simulation and experimental research. The failure modes of rock mass slopes with different structures under earthquake action are summarized systematically. Aiming at the shortcomings of the current research on the failure mechanism and stability of rock slopes under earthquake load, it is pointed out that the influence of spatial variation of earthquakes on the deformation and stability of rock slopes should be considered. The study on the internal structural characteristics of rock mass should be strengthened and the accuracy of physical model test should be improved. In addition, the failure mechanism of rock slopes under the joint action of groundwater and earthquakes should be further studied.

Key words: rock slope; earthquake action; rock mass structure; slope stability; failure mechanism; review

目前常用的边坡地震稳定性分析方法主要有拟静力法、滑块分析法、数值模拟和试验法等。许多学者结合实际工程对这些方法进行了改进及应用,如:祝荃芑等^[1-2]对拟静力法进行了改进;陈春舒等^[3]通过改进 Newmark 滑块位移法得到更符合实际的计算结果;言志信等^[4]采用 FLAC 有限差分软件、郑允等^[5]采用 UDEC 离散元软件、黄润秋等^[6]采用 PFC 颗粒流软件、李书兵等^[7]采用 ANSYS 有限元软件、Tang 等^[8]结合 FEM 和 DDA 方法、刘蕾等^[9]通过 FLAC/PFC2D 耦合计算,对岩质边坡的地震稳定性及破坏机制进行了大量的数值模拟研究;李祥龙等^[10]、范刚等^[11]分别采用振动台和离心机动力试验,分析了岩质边坡的动力破坏特征。此外,

AL-Homoud 等^[12]考虑不确定性因素,将概率算法引入到边坡地震稳定性计算之中。对于边坡动力失稳破坏的标志,郑颖人等^[13]认为潜在滑体位移突然增大、破裂面贯通以及计算中力和位移不收敛这 3 个条件同时满足才能说明边坡已经破坏。

大量工程实践表明,岩体的结构特征控制着岩体工程的变形与破坏,对岩体的整体稳定性起着决定性作用^[14],因此从岩体结构角度分析边坡稳定性具有极其重要的现实意义。本文依据 GB 50487—2008《水利水电工程地质勘察规范》的岩体结构划分方式,按块状结构、层状结构、碎裂状结构及散体状结构等 4 种结构类型,综述地震作用下岩体边坡破坏机制和稳定性的研究进展,总结了不同结构岩

基金项目:国家自然科学基金(11572246,51779207)
作者简介:寇昊(1992—),男,硕士研究生,主要从事边坡与地下洞室稳定性研究。E-mail:kouhaoyanan@163.com
通信作者:李宁(1959—),男,教授,博士,主要从事地下洞室、边坡工程与寒区冻土工程研究。E-mail:ningli@xaut.edu.cn

体边坡的地震破坏模式,以供潜在失稳边坡的治理提供参考。

1 岩体边坡地震稳定性的影响因素

关于边坡动力响应及稳定性的研究始于 20 世纪 20 年代,但初期主要集中于土质边坡的研究。对岩体边坡的动力研究则开始于 20 世纪 70 年代。岩体边坡在地震动荷载作用下发生变形破坏,是由岩体自身结构特征、所处的地质环境(应力场、渗流场、温度场)以及地震动荷载特征(幅值、频谱、持续时间及作用方向等)共同作用的结果,其中岩体结构特征是内因,所处的地质环境是间接因素,地震作用是直接诱导因素^[15]。

1.1 岩体结构特征

岩体是由完整岩块和复杂结构面网络组合而成的,其结构面决定了岩体具有不同于其他天然材料的独特属性,即不连续性、各向异性与非均质性。人们经过多年的研究与实践,对岩体变形程度和复杂性作了综合概括,对岩体结构进行了分类,并作为评价岩体质量及稳定状态的定性指标^[16]。Brady 等^[17]研究了岩体岩性和结构对岩体力学性质的影响,并将岩体结构总体划分为六大类:完整型岩体、质量等级极好岩体、质量好的岩体、中等质量岩体、质量低的岩体和极差岩体,并提出了岩体破坏准则。孙广忠^[18]经过多年的研究,发现岩体破坏受岩体结构控制,提出了在岩体结构控制下的 7 种破坏机制,还根据岩体的变形及地应力特点将岩体划分为 4 种类型。殷跃平^[19]将三峡库区边坡结构划分为顺层岩体边坡、平缓软硬互层边坡、滑崩堆积体边坡、溶塌角砾岩边坡、层状碎裂状岩体边坡等类型。Agliardi 等^[20-21]通过分析不同边坡区段岩体的破坏特征,总结得出边坡的整体破坏是由局部结构控制的边坡失稳所导致,因此有必要进行岩体边坡的损伤评估,进而更好地认识边坡的潜在破坏模式。在地震动荷载作用下不同完整程度和不同坚硬程度的岩体动力响应也存在很大的差异^[22]。

1.2 地质环境

地质环境是指地质体赋存的环境,主要包括地层岩性及地质构造、地应力、地下水、温度等环境要素。Koukouvelas 等^[23]通过航拍照片和地震测绘研究表明,希腊的斯科里斯山(Skolis Mountain)的岩崩现象是长期的气候和地质构造等因素造成的。Azhari 等^[24]主要考虑了地震参数和地质力学特征,建立了一个地震动荷载所造成的露天矿山边坡破坏的数据库,通过数据分析得出虽然有利的河谷形状和顶部风化层的缺失使得露天矿山边坡不太容易发

生地震破坏,但过大的孔隙水压力仍会造成破坏。地下水是滑坡发生的一个因素,倾斜地形的地震作用也是一个重要因素,Loáiciga 等^[25-26]建立了考虑地震动荷载和地下水共同作用下的边坡安全系数和屈服系数的闭合方程,说明了地震动荷载和地下水共同作用下会发生液化以及黏土软化的原因。在高地应力和冻融循环的环境中,也会加剧边坡的破坏^[27-28]。

2 地震作用下岩体边坡破坏机制及稳定性

2.1 块状岩体边坡

通常情况下,块状岩体边坡未发育或较少发育结构完整、倾向坡外的结构面,边坡整体稳定性较好。但在地震动荷载作用下,岩体震裂松动,结构面加剧扩展,抗剪强度也显著降低,致使边坡的整体稳定性大幅降低。

地震作用下块状岩体边坡的破坏模式及破坏过程受到坡高、坡角、岩体结构面特征以及地震动荷载特征等因素的影响。Gibson 等^[29]基于简化、离散、单块模型的方案,采用二维单块框架,提出了滑动破坏、倾倒破坏、坍塌破坏和约束倾倒破坏等 4 种块状岩体边坡破坏模式的地震屈服加速度方程。基于块体理论,郭杰^[30]采用拟静力法对浅层块状岩体边坡稳定性的研究表明,地震作用下不同方向的地震惯性力对边坡块体稳定性影响不同,水平向的地震惯性力对边坡稳定性的影响更为明显,易出现顺层向的滑移破坏。廖少波^[31]采用三维离散元软件 3DEC 研究了结构面特征对块状岩体边坡稳定性的影响,结果表明块状岩体边坡的稳定性受结构面强度的控制,顺倾结构面倾角越大、结构面起始位置越高,边坡的地震动力响应越大,稳定性越差;结构面发育越密集,岩体的完整性越差,边坡的地震动力响应就越强烈。滕光亮等^[32]采用 UDEC 对含两组节理的岩体边坡进行了数值模拟,结果表明:地震作用下坡高和坡角越大边坡稳定性越差,节理夹角越大边坡越稳定,节理倾角大于坡角或倾角很小时,边坡较稳定;在地震作用初期,边坡表面出现受拉破坏,沿着边坡表面由下向上延伸;随着地震作用的进行,破坏区逐渐向坡体内部发展,边坡下部的受拉破坏区域逐渐扩大且向坡体上部发展;地震作用后期,边坡表面存在着强烈的拉裂作用,塑性受拉破坏区域发展到形成一个贯通的区域时,整个贯通区域上部的坡体便会发生滑塌破坏。

综上所述,块状岩体边坡在地震作用下的破坏过程是先在坡体表面出现受拉破坏,然后逐渐由坡体的上部向下部、表面向内部发展延伸,直至受拉区

向受剪区扩展形成贯通的区域,最终导致边坡发生失稳破坏,这是受拉和受剪的复合破坏过程。

2.2 层状岩体边坡

层状岩体边坡是被结构面切割成层状的一类岩体边坡,一般按边坡与岩层产状关系划分为顺层岩体边坡、反倾岩体边坡及水平层状岩体边坡。层状边坡分布十分广泛,大部分变质岩和全部沉积岩均具有层状结构,而地球表面分布最为广泛的岩石就是沉积岩。地震作用下层状岩体边坡的破坏模式及破坏过程受到坡体形状、层面特征以及地震动荷载特征等因素的影响^[33]。

2.2.1 顺层岩体边坡

对于顺层岩体边坡,尤其当岩层倾角大于边坡倾角时,在自重、外界扰动、降雨等作用下边坡非常容易发生失稳破坏。对于顺层岩体边坡的动力响应研究,董金玉等^[34]通过大型振动台模型试验,发现顺层岩体边坡随着边坡高程增加,加速度放大系数增加的速度加快,在坡体同一高程上,边坡表面加速度放大系数大于坡体内部。汪茜^[35]采用 UDEC 对地震造成的顺层节理岩体边坡的变形破坏规律进行了数值模拟,结果表明边坡的变形破坏程度随坡角和层面倾角的增大而增大。李祥龙等^[36]通过 FLAC/PFC2D 耦合动力计算,发现非贯通层面部分的强度和层面贯通率对顺层岩体边坡地震稳定性影响显著,而贯通层面部分的抗剪强度对顺层岩体边坡地震稳定性和破坏范围的影响较小,只有在顺层岩体边坡内部所有岩层面均完全贯通的前提下才成为影响边坡稳定性的主导因素。丁梓涵等^[37]采用 FLAC3D 对不同岩层倾角的顺层岩体边坡的数值模拟表明,当岩层倾角小于软弱岩层内摩擦角时,边坡表面峰值位移较小且变化规律受岩层倾角影响不明显;当岩层倾角大于软弱岩层内摩擦角且小于 30°时边坡表面峰值位移增大,大于 60°时减小。冯志仁等^[38]对含软弱夹层的顺层岩体边坡的研究表明,地震动峰值加速度、频率和初动方向对边坡表面放大效应的影响较大,随着地震动峰值加速度的增大,放大效应由软弱夹层之上的边坡表面及坡顶向坡肩逐渐增大,坡肩的放大效应最大。言志信等^[4]对竖向和水平向地震耦合作用下的动力响应分析表明,地震竖向和水平向耦合作用比简单水平向振动更加贴近实际,破坏性更大。

对地震作用下顺层岩体边坡的破坏模式及破坏过程,艾畅等^[39]通过水下爆炸模拟近场地震,发现在近场地震作用下主要表现为层间滑移破坏,由于应力波的作用,层间界面弱化,黏聚力及内摩擦角减小,导致坡体失稳。李祥龙等^[10]的离心机动力试验

结果表明,顺层岩体边坡的地震稳定性和破坏机制受结构面发育特征控制,含有次级节理的边坡动力稳定性更低,产生张拉破坏导致岩体内部解体,非贯通层面部分产生剪切破坏使层面贯通。范刚等^[40]对顺层岩体边坡采用能量判识方法分析,发现边坡的损伤首先出现在坡肩位置,随后随着地震动强度的增大,损伤向低高程转移;含软弱夹层的顺层岩体边坡的破坏主要表现为边坡后缘垂直的拉裂和沿边坡中上部软弱夹层的剪切滑动,边坡的破坏模式为拉裂-滑移-崩落式。言志信等^[41]通过 FLAC3D 数值模拟研究表明,地震作用下顺层岩体边坡变形破坏主要受软弱夹层控制,表现为软弱结构面上部受拉破坏与下部剪切破坏。

2.2.2 反倾岩体边坡

对于反倾岩体边坡,其沿层面方向没有滑动变形的空间,不易形成贯通滑面,一般认为较为稳定。对于反倾岩体边坡的地震稳定性研究,张沫^[42]采用 FLAC3D 对反倾岩体边坡进行了动力分析,得出反倾岩体边坡加速度放大系数极值会随着坡高的增加先增大后减小,随着坡角的增大而增大,随着岩层倾角的增大而减小的结论。陈臻林等^[43]对含不同角度和厚度软弱夹层的反倾岩体边坡地震稳定性研究结果表明,地震波经过软弱夹层后,边坡上部岩体对地震波的放大作用会减弱,随软弱夹层反倾角度的增大,边坡动力响应的变化规律是先增大后减小。李祥龙等^[44]的离心机动力试验结果表明,含有次级节理的反倾岩体边坡地震稳定性明显低于不含次级节理的反倾岩体边坡。杨国香等^[45]的振动台模型试验结果表明,当地震波频率越接近坡体自振频率时,加速度放大越明显。范刚等^[11]对含泥化夹层的顺层和反倾岩体边坡的研究表明,反倾岩体边坡坡体内部加速度放大系数整体上大于顺层岩体边坡。

地震作用下反倾岩体边坡的破坏模式及破坏过程研究方面,杨国香等^[45]通过振动台模型试验得出反倾岩体边坡在地震作用下的破坏过程为:地震诱发坡顶结构面张裂、坡体浅表层结构面张开、浅表层结构面张开数量增加并出现块体剪断现象、坡体表层及中上部结构松动并出现贯通裂缝。刘云鹏等^[46]采用 UDEC 模拟了反倾软硬互层岩体边坡,结果表明地震作用下软弱岩层向外剪出,带动上部的岩体向外张拉,形成贯通的滑移面,进而使得边坡发生倾倒滑移破坏。李祥龙等^[44]的离心机动力试验结果表明,不含次级节理的反倾岩体边坡破坏从坡脚开始依次向后产生岩层的弯折破坏,而含有次级节理的反倾岩体边坡破坏从坡体中后部开始依次向坡脚岩层产生贯通破坏,贯通破坏面倾角明显高于

不含次级节理的反倾岩体边坡,并且呈明显的台阶状。刘蕾等^[9]对反倾岩体边坡的数值模拟结果表明,地震破坏过程中,坡体内部层面主要发生剪切破坏,边坡顶部出现少量张拉破坏;含正交次级节理的边坡坡顶产生张拉破坏,而坡底既产生张拉破坏,也产生剪切破坏。

2.2.3 水平层状岩体边坡

对于水平层状岩体边坡的地震稳定性研究,侯红娟等^[47]通过大型振动台试验,得出不同地震荷载条件下,水平层面结构均对竖向地震波的影响较为显著的结论。周飞等^[48]对含水平软弱夹层的岩体边坡试验结果表明,软弱夹层对边坡的动力响应影响也因激励方向不同而有所区别,水平向激励的动力响应有一定的放大作用,而对竖向激励的动力响应则会吸收减弱;在相同的地震动荷载激励下,软弱夹层以下边坡表面的竖向放大系数大于水平向,夹层以上则相反。周剑等^[49]采用 UDEC 模拟了水平层状岩体边坡在不同频率垂向压缩应力波作用下边坡的动力响应,结果表明坡顶垂向峰值加速度大小呈周期性变化,输入应力波频率越大该变化频次越高,低频应力波作用下,水平层状岩体边坡坡顶的垂向峰值加速度较均质边坡的增加值随坡高增加而增大;较高频率应力波作用时,边坡顶部靠近边坡表面的垂向峰值加速度高于均质边坡,远离边坡表面时则相反。

地震作用下水平层状岩体边坡的破坏模式及破坏过程研究方面,侯红娟等^[47]的振动台模型试验结果表明,地震作用下水平层状边坡变形破坏以拉裂-剪切滑移为主,硬岩边坡主要以竖向拉压作用为主,而软岩边坡则是水平拉剪作用显著。胡训健等^[50]采用 PFC2D 模拟了不同节理间距的含水平断续节理的层状岩体边坡在地震作用下的破坏模式,结果表明:当节理间距较小时,发生溃散型破坏;当节理间距较大时,发生拉裂-滑移-块体倾倒破坏和拉裂-水平滑移混合破坏。邹威等^[51]对不同岩性组合的水平层状岩体边坡进行了试验研究,发现水平层状边坡破坏受层面控制,主要发生在顶部尤其是靠近坡肩部位,呈拉裂-剪切-滑移式破坏;在相同地震波作用下,上软下硬边坡主要是顶层岩体震碎而呈散体状滑落,而上硬下软边坡主要是岩层后缘拉裂而发生整体剪切错动。

综上所述,层状岩体边坡在地震作用下的破坏模式可总结为:①顺层岩体边坡。地震作用下层间界面弱化,抗剪强度降低,主要发生层间滑移破坏;非贯通层面的顺层岩体边坡非贯通部分产生剪切破坏,含有次级节理的顺层岩体边坡产生张拉破坏;含

有软弱夹层的顺层岩体边坡,表现为软弱结构面上部张拉破坏与下部剪切破坏。②反倾岩体边坡。地震作用下坡体内部主要发生弯折-剪切破坏,坡顶出现少量张拉破坏;含有次级节理的反倾岩体边坡,坡顶产生张拉破坏,而坡底既产生张拉破坏,也产生剪切破坏;含有软弱夹层的反倾岩体边坡,带动上部岩体向外张拉,发生倾倒滑移破坏;含有下伏软岩的反倾岩体边坡后缘部位更易拉裂。③水平层状岩体边坡。地震作用下主要以拉裂-剪切滑移破坏为主,软岩边坡以水平拉剪为主,硬岩边坡以竖向拉压为主;上软下硬岩体边坡主要是顶层岩体震碎而呈散体状滑塌破坏,上硬下软岩体边坡主要是岩层后缘拉裂而发生整体剪切崩塌破坏。

2.3 碎裂状岩体边坡

碎裂状结构岩体是工程中常见的不良岩体,稳定性较差。对于碎裂状岩体边坡的破坏模式和破坏过程研究,崔圣华^[52]通过室内物理试验发现,碎裂岩体震动后密度降低率达 10%,存在扩容现象;基于 PFC 颗粒流软件的岩石动力剪切试验表明,碎裂滑带的抗剪强度随正应力的增加而降低,稳定性随时间呈波状递减变化。黄润秋等^[6]对“5·12”汶川地震触发的大光包滑坡的研究表明,强震滑带碎裂化现象存在且伴随扩容效应;采用物理模拟和 PFC 数值模拟验证了强震中滑带的碎裂和扩容过程:滑带岩体的碎裂降低了滑带的摩阻力,扩容使地下水强力挤入扩容空间,从而可能激发水击作用机制,导致孔隙水压力激增,滑带抗剪能力急剧降低,从而促使滑坡骤然启动,产生高速滑动。周君波^[53]的岩体动力学试验表明,碎裂状结构岩体的动力破坏以沿着结构面的张拉破坏为主,岩体片理面对岩体的破坏起控制性作用;采用 UDEC 对碎裂状岩体边坡动力破坏过程的数值模拟结果表明,地震会造成结构面的累积损伤,加速结构面的扩展、贯通,导致边坡岩体沿结构面发生张拉破坏,岩体破碎滑落或者被抛出。赵伟华等^[54]分析了碎裂状结构岩体的崩塌机理,指出碎裂状岩体边坡崩塌过程可分为应力重分布、潜在崩塌体形成和地震诱发崩塌 3 个阶段。

综上所述,地震作用下碎裂状岩体边坡先是在结构面产生损伤累积,岩体沿着结构面发生张拉破坏,并伴随着扩容效应进一步破碎,从而降低了岩体抗剪强度,最终导致岩体破碎滑落甚至抛出。

2.4 散体状岩体边坡

散体状岩体边坡一般呈碎裂、松散状,节理、裂隙极其发育,自稳能力较差。对于散体状岩体边坡的破坏模式和破坏过程研究,姜立春等^[55]通过浅层振动波在散体状岩体边坡中的传播测试试验得出,

黏弹性散体介质波的衰减与频率正相关;介质的密度差、孔隙度、充填物、透过因子是振动波衰减的关键因素。张晓晖^[56]采用 FLAC 模拟了破碎岩体和人工堆渣复合高边坡的动力稳定性,结果表明:对于破碎岩体边坡,水平方向上从边坡表面向坡内以及垂直方向上随着高程的增加,位移、速度、加速度放大系数略有增大;对于人工堆渣边坡,则有所减小,但均比坡脚处有所增大。叶袁坤^[57]对山区高速公路岩堆边坡的动力分析表明:边坡永久位移随着频率的增加反而降低;随着振幅的增加,永久位移明显增大;随着坡高的增加并非单调增大,而存在一个临界的坡高(100 m 左右),当坡高大于临界坡高时,永久位移随着坡高的增加反而下降;当坡角小于 60° 时,随着坡角的增加,永久位移明显增大,当坡角大于 60° 时,对边坡的永久位移影响不大。Zhang 等^[58]对土石堆积层斜坡的地震扰动分析表明,地震动峰值加速度的提高对堆积体累积塑性变形有显著影响,对堆积体稳定状态有较强的扰动效应;土工离心模型试验结果表明,随着震松坡体损伤程度增大,其应力与位移场于震后短期的调整幅度将相应提高。张元才等^[59]通过物理模拟试验,证实了细颗粒层在溜砂坡大规模失稳的主控作用,认为动力失稳机制是在地震动荷载强烈作用下,细颗粒层抗剪强度相对较低,使坡体沿细颗粒层发生大规模的滑塌。

综上所述,由于散体状岩体边坡自稳能力较差,在地震作用下散体被震碎、震松,使得抗剪强度降低,进而造成滑塌破坏。

3 研究展望

地震作用下岩体边坡破坏机制及稳定性受到边坡本身的几何形态、岩体内部结构和力学特征以及地震动特征等多种因素的影响,是一个非常复杂的问题。虽然前人对岩体边坡的地震稳定性及破坏机制做了大量研究,取得了一定成果,但由于对岩体内部结构认识不足及其他因素的影响,未能从岩体结构角度进行全面详细地研究,今后可从以下几个方面做进一步探讨:

a. 深入研究地震动空间变化对岩体边坡变形与稳定的影响。已有研究主要集中在地震动荷载的峰值、频率、持时以及地震动方向等方面,然而考虑行波效应、相干效应及场地效应等引起的地震动空间变化,可以更全面认识地震动荷载对边坡稳定性的影响。

b. 加强岩体内部结构特征研究。岩体结构对地震波具有散射作用,决定了岩体边坡的动力响应特征。通过利用地质雷达探测技术与真三维钻孔成

像技术的互补优势,可以更加准确探测出岩体内部结构的发育情况。

c. 提高物理模型试验的准确性。物理模型试验由于尺度效应、边界效应、数据采集的准确性以及试验中未考虑到的因素等影响,导致结果与工程实际存在一定偏差。采用现场试验或者更能反映实际重力场的离心机试验,可以得到更接近实际的地震作用效果,更清晰的边坡破坏模式。

d. 考虑地下水和地震动荷载共同作用的影响。地下水和地震动荷载都是诱导滑坡产生的重要因素,然而考虑地下水对散体状岩体边坡和部分碎裂状岩体边坡的劣化作用以及水压力驱动作用的研究较多,考虑地震动荷载作用的研究却较少,对于块状岩体边坡和层状岩体边坡的研究更少。在岩体边坡的变形和稳定性分析中,同时考虑地下水和地震动荷载,将会更好地反映岩体边坡的破坏机制。

参考文献:

[1] 祝荃荪. 边坡地震稳定性分析拟静力法的改进[D]. 重庆:重庆大学,2015.

[2] LIU Yaqun, LI Haibo, XIAO Keqiang, et al. Seismic stability analysis of a layered rock slope[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 474-481.

[3] 陈春舒,夏元友. 基于极限分析的边坡实时动态 Newmark 滑块位移法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(12): 2507-2515. (CHEN Chunshu, XIA Yuanyou. A real-time dynamic Newmark sliding block method for slopes based on limit analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35 (12): 2507-2515. (in Chinese))

[4] 言志信,龙哲,周小亮,等. 锚固参数对地震作用下岩质边坡锚固界面剪切作用影响的数值分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2537-2544. (YAN Zhixin, LONG Zhe, ZHOU Xiaoliang, et al. Numeral analysis of anchoring parameters for bolt in rock slope anchored interface shear action under earthquake [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2537-2544. (in Chinese))

[5] 郑允,陈从新,刘婷婷,等. 坡顶荷载作用下岩质边坡倾倒破坏分析[J]. 岩土力学, 2015, 36(9): 2639-2647. (ZHENG Yun, CHEN Congxin, LIU Tingting, et al. Analysis of toppling failure of rock slopes under the loads applied on the top[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (9): 2639-2647. (in Chinese))

[6] 黄润秋,裴向军,崔圣华. 大光包滑坡滑带岩体碎裂特征及其形成机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 1-15. (HUANG Runqiu, PEI Xiangjun, CUI Shenghua. Cataclastic characteristics and formation mechanism of rock mass in sliding zone of Daguangbao landslide[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

- Engineering, 2016, 35(1): 1-15. (in Chinese))
- [7] 李书兵, 苏骏, 毕辉. 岩质边坡在地震荷载作用下的动力响应分析[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 212-216. (LI Shubing, SU Jun, BI Hui. Dynamical response analysis of rock slopes under earthquake load [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 212-216. (in Chinese))
- [8] TANG S B, HUANG R Q, TANG C A, et al. The failure processes analysis of rock slope using numerical modelling techniques[J]. Engineering Failure Analysis, 2017, 79: 999-1016.
- [9] 刘蕾, 陈亮, 崔振华, 等. 逆层岩质边坡地震动力破坏过程 FLAC/PFC2D 耦合数值模拟分析[J]. 工程地质学报, 2014, 22(6): 1257-1262. (LIU Lei, CHEN Liang, CUI Zhenhua, et al. FLAC/PFC2D hybrid simulation for seismically induced failure progress of toppling rock slope [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, 22(6): 1257-1262. (in Chinese))
- [10] 李祥龙, 唐辉明, 胡巍. 层面参数对顺层岩质边坡地震动力破坏过程影响研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(3): 466-473. (LI Xianglong, TANG Huiming, HU Wei, et al. Effect of bedding plane parameters on dynamic failure process of sliding rock slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(3): 466-473. (in Chinese))
- [11] 范刚, 张建经, 付晓. 含泥化夹层顺层和反倾岩质边坡动力响应差异性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(4): 692-699. (FAN Gang, ZHANG Jianjing, FU Xiao. Dynamic response differences between bedding and count-tilt rock slopes with siltized intercalation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(4): 692-699. (in Chinese))
- [12] AL-HOMOUD A S, TAHTAMONI W. Comparison between predictions using different simplified Newmarks' block-on-plane models and field values of earthquake induced displacements [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 19(2): 73-90.
- [13] 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))
- [14] 张宏涛, 赵宇飞, 纪洪广, 等. 节理岩体边坡稳定上限分析方法[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(2): 38-42. (ZHANG Hongtao, ZHAO Yufei, JI Hongguang, et al. Upper bound limit analysis for stability of jointed rock slopes[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2011, 31(2): 38-42. (in Chinese))
- [15] 刘贵应, 梁庆国, 韩文峰. 地震动特征对岩体边坡动力响应的影响[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 205-211. (LIU Guiying, LIANG Qingguo, HAN Wenfeng. Influence of ground motion parameters on dynamic responses of rock slope [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1): 205-211. (in Chinese))
- [16] 陈昌彦, 王贵荣. 各类岩体质量评价方法的相关性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1894-1900. (CHEN Changyan, WANG Guirong. Discussion on the interrelation of various rock mass quality classification systems at home and abroad[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1894-1900. (in Chinese))
- [17] BRADY B H G, BROWN E T. Rock mechanics; for underground mining [M]. 3rd ed. London: Chapman & Hall, 1993.
- [18] 孙广忠. 岩体结构力学[M]. 北京: 科学出版社, 1988.
- [19] 殷跃平. 三峡库区边坡结构及失稳模式研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 45-54. (YIN Yueping. Human-cutting slope structure and failure pattern at the Three Gorges Reservoir [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 45-54. (in Chinese))
- [20] AGLIARDI F, CROSTA G B, MELONI F, et al. Structurally-controlled instability, damage and slope failure in a porphyry rock mass[J]. Tectonophysics, 2013, 605: 34-47.
- [21] BRIDEAU M A, YAN Ming, STEAD D. The role of tectonic damage and brittle rock fracture in the development of large rock slope failures [J]. Geomorphology, 2009, 103: 30-49.
- [22] 江巍, 程圣国, 冯强. 基于非连续变形分析方法的爆破荷载下不同类别岩体的动力响应[J]. 水利水电科技进展, 2012, 32(2): 28-31. (JIANG Wei, CHENG Shengguo, FENG Qiang. Dynamic response of different rock under blasting load based on discontinuous deformation analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2012, 32(2): 28-31. (in Chinese))
- [23] KOUKOUVELAS I, LITOSELITI A, NIKOLAKOPOULOS K, et al. Earthquake triggered rock falls and their role in the development of a rock slope: the case of Skolis Mountain, Greece [J]. Engineering Geology, 2015, 191: 71-85.
- [24] AZHARI A, OZBAY U. Investigating the effect of earthquakes on open pit mine slopes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 100: 218-228.
- [25] LOÁICIGA H A. Groundwater and earthquakes: screening analysis for slope stability [J]. Engineering Geology, 2015, 193: 276-287.
- [26] ZHOU Jingren, WEI Jiong, YANG Tianhong, et al. Damage

- analysis of rock mass coupling joints, water and microseismicity[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 366-381.
- [27] 刘建, 乔丽苹, 李蒲健, 等. 拉西瓦水电工程高应力坝基边坡开挖扰动及锚固效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(6): 1094-1103. (LIU Jian, QIAO Liping, LI Pujian, et al. Study of excavation disturbance and anchoring effects of high-geostress dam foundation slope of Laxiwa Hydropower Engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27 (6): 1094-1103. (in Chinese))
- [28] BAKUN-MAZOR D, HATZOR Y H, GLASER S D, et al. Thermally vs. seismically induced block displacements in Masada rock slopes [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 61: 196-211.
- [29] GIBSON M D, WARTMAN J P, MACLAUGHLIN M M, et al. Pseudo-static failure modes and yield accelerations in rock slopes [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 102: 1-14.
- [30] 郭杰. 大岗山水电站右岸边坡块体稳定性及地震响应研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [31] 廖少波. 强震作用下块状岩体边坡稳定性研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [32] 滕光亮, 陈永明, 石玉成, 等. 地震作用下节理岩质边坡稳定性影响因素研究[J]. 地震工程学报, 2013, 35 (1): 119-125. (TENG Guangliang, CHEN Yongming, SHI Yucheng, et al. A study on the influencing factors of joint rock slope stability under earthquake activity [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2013, 35 (1): 119-125. (in Chinese))
- [33] 鲁海峰, 姚多喜, 胡友彪, 等. 基于 FLAC3D 多裂隙模型的层状岩质边坡破坏特征及稳定性[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(4): 36-41. (LU Haifeng, YAO Duoxi, HU Youbiao, et al. Analysis of failure characteristics and stability of layered rock slope based on multi-fracture model of FLAC3D [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(4): 36-41. (in Chinese))
- [34] 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. (DONG Jinyu, YANG Guoxiang, WU Faquan, 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. (in Chinese))
- [35] 汪茜. 地震作用下顺层岩质边坡变形破坏机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [36] 李祥龙, 唐辉明, 王立朝. 顺层岩体边坡地震动力破坏离心机试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33 (4): 729-736. (LI Xianglong, TANG Huiming, WANG Lichao. Centrifuge modelling tests on dynamic failure of bedding rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (4): 729-736. (in Chinese))
- [37] 丁祥涵, 赵其华, 彭社琴, 等. 岩层倾角对顺倾向边坡地震效应的影响[J]. 地震工程学报, 2015, 37(4): 956-962. (DING Zihan, ZHAO Qihua, PEN Sheqin, et al. Impact of dip angle of rock stratum on seismic response of consequent slope [J]. China Earthquake Engineering Journal, 2015, 37(4): 956-962. (in Chinese))
- [38] 冯志仁, 刘红帅, 于龙. 地震作用下含软弱夹层顺层岩质边坡表面放大效应研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34(1): 96-100. (FENG Zhiren, LIU Hongshuai, YU Long. Surface amplification effect of bedding rocky slope with weak interlayer under earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34 (1): 96-100. (in Chinese))
- [39] 艾畅, 冯春, 李世海, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (9): 1825-1832. (AI Chang, FENG Chun, LI Shihai, et al. Experimental research on dynamic response of consequent rock slope under seismic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (9): 1825-1832. (in Chinese))
- [40] 范刚, 张建经, 付晓, 等. 含软弱夹层顺层岩质边坡动力破坏模式的能量判识方法研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 959-966. (FAN Gang, ZHANG Jianjing, FU Xiao, et al. Energy identification method for dynamic failure mode of bedding rock slope with soft strata [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (5): 959-966. (in Chinese))
- [41] 言志信, 张刘平, 曹小红, 等. 地震作用下顺层岩质边坡动力响应规律及变形机制研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33 (增刊 1): 61-65. (YAN Zhixin, ZHANG Liuping, CAO Xiaohong, et al. Dynamic response and deformation mechanism of a bedding rock slope under earthquakes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(Sup1): 61-65. (in Chinese))
- [42] 张沫. 基于 FLAC3D 数值分析方法的反倾层状斜坡地震动力响应特征研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [43] 陈臻林, 杨小奇. 地震波作用下含反倾软弱夹层岩质边坡动力响应规律研究[J]. 应用数学和力学, 2015, 36 (增刊 1): 155-166. (CHEN Zenlin, YANG Xiaochi. Dynamic responses of a rock slope with counter-tilt weak intercalation layer under seismic loads [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2015, 36 (Sup1): 155-166. (in Chinese))
- [44] 李祥龙, 唐辉明. 逆层岩质边坡地震动力破坏离心机试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 687-694. (LI Xianglong, TANG Huiming. Dynamic centrifugal modelling tests on toppling rock slopes [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36 (4): 687-694. (in Chinese))

- Chinese))
- [45] 杨国香,叶海林,伍法权,等. 反倾层状结构岩质边坡动力响应特性及破坏机制振动台模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31 (11): 2214-2221. (YANG Guoxiang, YE Hailin, WU Faquan, et al. Shaking table model test on dynamic response characteristics and failure mechanism of antidip layered rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (11): 2214-2221. (in Chinese))
- [46] 刘云鹏,邓辉,黄润秋,等. 反倾软硬互层岩体边坡地震响应的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2012, 39 (3): 30-37. (LIU Yunpeng, DENG Hui, HUANG Runqiu, et al. Numerical simulation of seismic response of antidumping rock slope interbedded by hard and soft layers [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2012, 39 (3): 30-37. (in Chinese))
- [47] 侯红娟,许强,刘汉香,等. 不同方向地震动作用下水平层状边坡动力响应特性[J]. 地震工程与工程振动, 2013, 33 (2): 214-220. (HOU Hongjuan, XU Qiang, LIU Hanxiang, et al. Dynamic response characteristics of horizontal slopes subjected to seismic ground motions in different directions [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33 (2): 214-220. (in Chinese))
- [48] 周飞,许强,刘汉香,等. 地震作用下含水平软弱夹层斜坡动力响应特性研究[J]. 岩土力学, 2016, 37 (1): 133-139. (ZHOU Fei, XU Qiang, LIU Hanxiang, et al. An experimental study of dynamic response characteristics of slope with horizontal weak interlayer under earthquake [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (1): 133-139. (in Chinese))
- [49] 周剑,张路青,王学良. 水平层状岩体边坡动力响应中的结构面效应研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19 (3): 352-358. (ZHOU Jian, ZHANG Luqing, WANG Xueliang. Effect of structural plane on dynamic response of rock slopes with horizontal strata [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (3): 352-358. (in Chinese))
- [50] 胡训健,卞康,李鹏程,等. 水平厚层状岩质边坡地震动力破坏过程颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36 (9): 2156-2168. (HU Xunjian, BIAN Kang, LI Pengcheng, et al. Simulation of dynamic failure process of horizontal thick-layered rock slopes using particle flow code [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36 (9): 2156-2168. (in Chinese))
- [51] 邹威,许强,刘汉香,等. 强震作用下层状岩质斜坡破坏的大型振动台试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2011, 31 (4): 143-149. (ZOU Wei, XU Qiang, LIU Hanxiang, et al. Large-scale shaking table model test study on failure of layered rocky slope under strong ground motion [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31 (4): 143-149. (in Chinese))
- [52] 崔圣华. 强震巨型滑坡滑带碎裂岩体微观分析及其静动力破坏机制研究[D]. 成都:成都理工大学, 2014.
- [53] 周君波. 强震区碎裂状结构边坡动力稳定性及抗震加固研究[D]. 成都:成都理工大学, 2012.
- [54] 赵伟华,黄润秋,赵建军,等. 强震条件下碎裂岩体崩塌机理及崩塌后壁对堆积体稳定性影响研究[J]. 工程地质学报, 2011, 19 (2): 205-212. (ZHAO Weihua, HUANG Runqiu, ZHAO Jianjun, et al. Rockfall mechanism of cataclastic rock mass and influence of back wall upon the stability of accumulation under strong earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19 (2): 205-212. (in Chinese))
- [55] 姜立春,吴爱祥,沈慧明. 散体状岩体边坡体振动波传播机理[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2003, 34 (6): 678-682. (JIANG Lichun, WU Aixiang, SHEN Huiming. The mechanism about vibrating wave transmitting on the granular structure slope [J]. Journal of Central South University of Technology (Natural Science), 2003, 34 (6): 678-682. (in Chinese))
- [56] 张晓晖. 破碎岩体和人工堆渣复合高边坡动力稳定性研究[D]. 西安:长安大学, 2007.
- [57] 叶袁坤. 山区高速公路岩堆边坡动力响应研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2010.
- [58] ZHANG Hua, LU Yang. Continuum and discrete element coupling approach to analyzing seismic responses of a slope covered by deposits [J]. Journal of Mountain Science, 2010, 7 (3): 264-275.
- [59] 张元才,黄润秋,傅荣华,等. 溜砂坡大规模失稳动力学机制试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29 (1): 65-72. (ZHANG Yuancai, HUANG Runqiu, FU Ronghua, et al. Experimental research on dynamic failure mechanism of large-scale talus slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (1): 65-72. (in Chinese))

(收稿日期:2017 - 08 - 25 编辑:熊水斌)

