

地震边坡非线性特征及敏感性分析^①

景鹏旭^{1,2,3}, 龚文俊^{4,5}, 孟庆筱⁶, 赵 乐⁷

(1.中国地震局地震研究所地震大地测量重点实验室,湖北 武汉 430071;

2.中国地震局地壳应力研究所武汉科技创新基地,湖北 武汉 430071; 3.清华大学水利水电工程系,北京 100084;

4.北京航空航天大学,北京 100083; 5.中国水利水电科学研究院,北京 100038;

6.中国地震局第一监测中心,天津 300180; 7.对外经济贸易大学,北京 100029)

摘要:使用时程分析法研究边坡动力响应的非线性特征,基于强度判据的安全系数给出地震动峰值加速度以及能量持时阈值等参数对非线性特征的影响。研究认为:对于一定的岩土材料,边坡动力响应的位移、速度、加速度呈现出明显的非线性特征,具有较强的关联性,各质点具有统一的波形形式;位移和速度变化相对地震加速度变化有明显的滞后,质点加速度相对地震加速度有明显的同步性;地震动峰值加速度以及能量持时阈值的变化均对边坡安全系数和塑性区的分布有一定的影响。

关键词: 时程分析法; 地震边坡; 非线性特征

中图分类号: TU435

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)增刊 2-0147-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2015.增刊 2.0147

Nonlinear Characteristics and Sensitivity Analysis of Slope under Earthquakes

JING Peng-xu^{1,2,3}, GONG Wen-jun^{4,5}, MENG Qing-xiao⁶, Zhao Le⁷

(1. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China;

2. Wuhan Base of Institute of Crustal Dynamics, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China; 3. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

5. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 6. First Crust Monitoring and Application Center, CEA, Tianjin 300180, China; 7. University of International Business and Economics, Beijing 100029, China)

Abstract: Using a time history analysis method the nonlinear characteristics of the response of slope dynamics were studied, employing criteria such as the safety factor of the soil strength, ground peak acceleration, and earthquake energy with a threshold based on the influence of these parameters on the nonlinear slope dynamics characteristics. The study results showed that for some rock and soil materials, displacement, velocity, and acceleration of the slope dynamic response which are strongly correlated show obvious nonlinear characteristics. It was found that each study particle had a unified waveform and there was a significant displacement lag and velocity variation in the relative seismic acceleration. Particle acceleration was synchronous with the seismic acceleration. The peak ground acceleration, input direction, and duration threshold variations were within the slope safety coefficient, and the distribution of plastic zone appeared to have an influence on slope safety.

Key words: time history analysis method; slope under earthquake; nonlinear characteristics

① 收稿日期: 2015-04-01

作者简介: 景鹏旭(1990-), 男, 研究生, 主要从事岩土地震工程、边坡工程及隧道工程等方面的科研工作。

E-mail: jpx15@mails.tsinghua.edu.cn.

0 引言

边坡的动力响应问题历来是岩土工程和地震工程关心的重要问题之一。岩土体边坡在地震作用下的动力响应分析,从原理上讲可以分为确定性分析方法和概率性分析方法两类。确定性分析方法主要包括:(1)拟静力法;(2)滑块分析法;(3)数值模拟法;(4)试验法。其中拟静力法是规范中推荐的方法,其实质上是地将地震动的作用简化为水平、竖直方向的恒定加速度作用,并施加在潜在不稳定的滑体重心上,加速度的作用方向取为最不利于边坡稳定的方向。但此方法忽略了地震加速度在时空分布的不均匀性以及地震动在介质内传播时的能量损失。

在边坡地震动力分析中存在很多不确定性因素,如输入地震动的随机性、边坡材料特性的随机性等。邵龙潭等^[1]将地震动加速度时程转化为加速度功率谱来考虑地震动的随机性,并对如何考虑随机动应力做了处理;唐洪祥等^[2]基于地震动力时程反应和随机地震反应,用有限元稳定性分析方法,分析正弦波作用下模型坝边坡的稳定性,指出地震动力作用下与正弦波作用下土石坝边坡的最危险滑动面位置有所不同。

地震是一个随机过程,故随机地震反应分析逐渐为大家所接受,即把地震动的加速度作为一个随机过程来考虑,因此结构地震响应也必定是一随机过程。目前,实现随机性分析有两种方法:一是采用多条地震加速度时程记录,分别进行确定性分析,将不同的地震荷载作用于结构的地震响应进行比较来近似地考虑地震随机荷载的影响^[3-6];二是将地震荷载视为随机过程模型化处理,利用随机振动方法来获得结构的地震响应^[7-8]。

虽然前人进行了大量研究,但仍有几个问题尚未解决:(1)地震动的输入点以及输入方式。由于地震波以不同的角度在不同传播介质中传播时有非常复杂的传播机理,故在震源处输入还是边坡底部输入有待讨论;若要考虑进行多点输入地震反应分析计算,在确定多点输入地震波时,主要考虑不相干效应、行波效应以及局部场地条件效应三大因素,而这三大因素目前尚无完善的解决办法;(2)地震边坡的放大效应。王存玉等^[9]振动台模型实验表明:边坡顶部振动的反应幅值较坡底存在明显的放大现象(垂直向放大),边坡的边缘振动的反应幅值较之内部(处于同一高度上的两点比较)也存在放大现象(水平向放大)。但这种放大效应到底是线性、非线性

还是有一定的节律性,目前还没有一个统一的结论;(3)地震边坡稳定的评价标准。目前所采用的评价指标主要有安全系数和永久位移,到底采用哪些评价标准,或者是否可以综合考虑多种因素来进行地震边坡稳定性的判断尚有待研究。

本文在前人研究的基础上,以非线性系统论为基础,基于快速拉格朗日的时程分析方法,以安全系数作为评判标准,研究边坡动力响应的位移、速度、加速度以及塑性区的分布在边坡上的非线性特征,并对输入地震动的峰值加速度以及能量持时阈值进行敏感性分析。

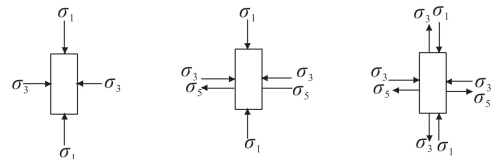
1 边坡失稳机制探讨

1.1 影响因素

影响地震边坡稳定性的因素有很多,如岩性结构、构造背景、地下水浸润线水位等。但其本质为地震动作用下引起的坡内地下孔隙水压力变化,进而引起岩土体有效应力的变化。

1.2 失稳机制

地震边坡破坏的主要原因是岩土体的剪切破坏,边坡顶部由于围压较小,在动力扰动下容易出现张拉破坏。胡广韬^[10]忽略了孔隙水压力的作用,提出坡体振荡加速度效应假说,认为地震产生的惯性力会激发滑坡体突然下降。张保元^[11]提出地震对边坡稳定性的影响表现为累积效应和触发效应。根据言志信^[12]动应力最大值和最不利于稳定的方向,画出边坡中一点在3种工况下所受应力图(图1)。



(a)自然状态 (b)水平地震作用 (c)耦合地震作用

图1 不同工况下岩土体应力状态

Fig.1 Rock mass stress state under different conditions

如图1所示,在仅有水平地震作用下,产生了一个反向的水平动应力,使得岩土体实际的水平应力为 $\sigma'_3 = \sigma_3 - \sigma_s = k_0 \gamma h - \rho_c v_s$;在耦合地震作用下,增加了一个竖向的动应力,使得边坡实际的竖直应力为 $\sigma'_1 = k_0 (\gamma h - \rho_c v_n) - \rho_c v_s$ 。式中: ρ 为岩土体密度; γ 为土体容重; h 为深度; k_0 为侧压力系数; v_n 为岩土体中质点的竖向振动速度; v_s 为质点的水平振动速度。

从图2中可以看出,随着 ρ 和 v_s 的增大,在水

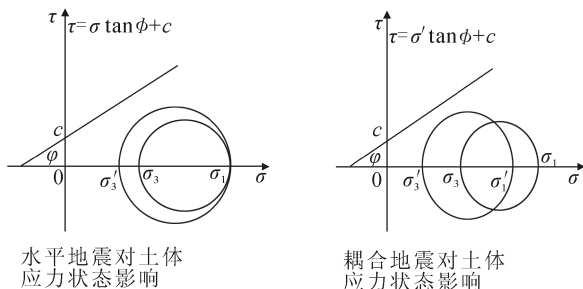


图 2 岩土体应力莫尔圆图

Fig.2 Moh's circle diagram of rock mass stress

平地震作用下莫尔圆向左移动的速度变化,使得土体的应力状态更接近破坏强度;在耦合地震作用下,由于大小主应力均在减小,莫尔圆向左移动的速度比仅在水平地震作用下更快,使得坡体更容易发生破坏。

2 计算模型与计算条件

2.1 计算模型

2.1.1 坐标与网格划分

在 ANSYS 中建立模型,通过 Ansys-to-Flac^{3d} 导入到 Flac^{3d} 中,该模型符合右手正交法则。如图 3 所示,X 轴为平行于坡面走向方向,Y 轴为垂直方向,指向上为正。模型规模:X 方向 0~1 600 m,Y 方向 0~592 m;模型组成:6 296 个单元,8 355 个节点。

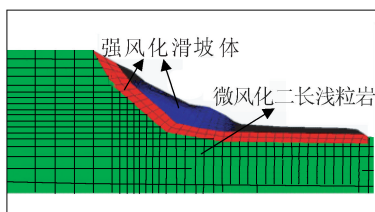


图 3 划分网格后的边坡模型及监测点布置

Fig.3 Slope model and monitoring points arrangement after meshing

2.1.2 岩土体材料参数的选取

材料参数依据《工程边坡处理岩土工程勘察报告》中建议值进行赋值(表 1)。以下材料所用的模型均为摩尔-库伦模型。

2.2 计算条件

2.2.1 边界条件

在静力计算时,底面和四周施加固定边界条件;在动力计算时,在静态分析边界条件的基础上,去掉模型底部的静力条件,动荷载从模型底部输入。该输入方式是将原始地震加速度时程转化为速度时

程,基于黏弹性边界将该速度时程转换为应力时程输入。在模型四周施加自由场边界(图 4)。

表 1 各类材料岩体力学参数表

Table 1 Rock mass mechanical parameters of various materials

岩组	重度/ (kN · m ⁻³)	变形参数		抗剪强度参数	
		静弹性模 量/MPa	泊松比	内聚力 /kPa	摩擦角 /(°)
微风化二长浅粒岩	26.1	30 400	0.24	1 500	42
强风化滑坡体	25.5	12 400	0.27	350	25

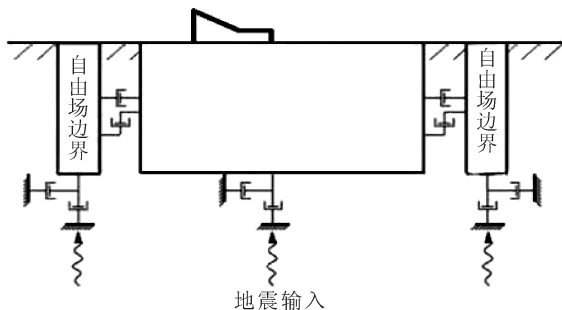


图 4 自由场边界条件的设置

Fig.4 Free field boundary condition for the model

2.2.2 地震动输入

本文采用时程分析法中底界面均匀一致输入法。根据《边坡工程独立验证方计算分析技术要求》,地震动输入按极限安全地震动峰值加速度 0.2 g 输入。因此本文水平加速度峰值取 0.2 g,竖向取水平地震加速度峰值的 2/3,即 0.133 3 g。其输入时程曲线如图 5、6 所示。

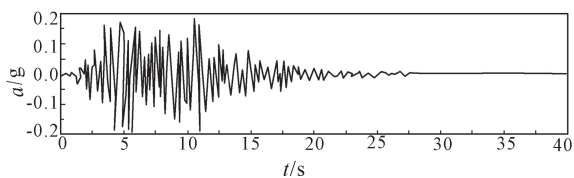


图 5 水平 X 向加速度输入时程

Fig.5 Horizontal X-acceleration time history

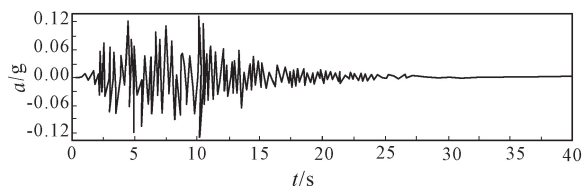


图 6 竖直 Y 向加速度输入时程

Fig.6 Vertical Y-acceleration time history

3 非线性特征及敏感性分析

3.1 非线性特征

3.1.1 质点位移非线性

边坡在地震中的最大位移表现为地震最大加速

度对边坡地质体破坏造成的结果效应。从图7中可以看出,边坡质点位移与地震加速度变化有较强的关联性,各质点具有统一的波形形式,但位移变化相对地震加速度变化有明显滞后。

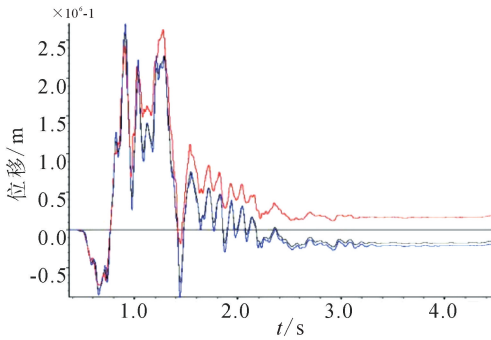


图7 监测点位移时程曲线

Fig.7 The displacement-time curve of monitoring points

3.1.2 质点速度非线性

从图8中可以看出边坡质点速度具有统一的波形形式,相对其位移响应稍有滞后,表现为几个大幅振荡脉冲。

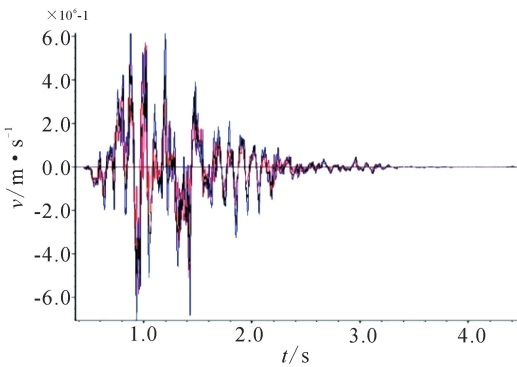


图8 监测点速度时程曲线

Fig.8 The speed-time curve of monitoring points

3.1.3 质点加速度非线性

从图9中看出,边坡质点加速度具有统一的波形形式,与地震加速度具有明显的同步性,而无滞后性。

3.2 敏感性分析

在岩土工程领域,敏感性分析法是指从众多不确定性因素中找出对岩土体有重要影响的敏感性因素,并分析、测算其对工程稳定的影响程度和敏感性程度,进而判断工程承受风险能力的一种不确定性分析方法。

合理的地震动选取及输入是确保地震反应计算结果准确的必要条件。对岩土地震工程而言,地震动的特性可以用三要素来描述,即地震动的振幅、持时和频谱。因此,地震动是不同频率、不同强度(或

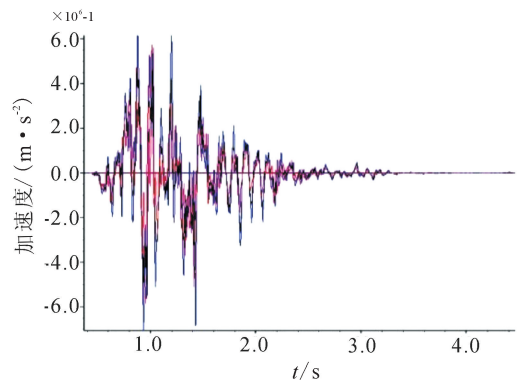


图9 监测点加速度时程曲线

Fig.9 The acceleration-time curve of monitoring points

幅值)的地震波在一段有限时间的集合^[13]。基于地震动峰值加速度以及能量持时阈值的变化对边坡进行敏感性分析,进而初步判断这些因素对边坡稳定性的影响程度。

3.2.1 地震动峰值加速度

为排除地震动其他因素的影响,可以采用3种办法改变地震记录中的PGA(峰值加速度)值:①遴选已有的地震记录,根据PGA的值选择计算所需的地震加速度时程曲线;②将地震加速度时程曲线的PGA值调整为计算所需要的值;③将地震加速度时程曲线所有记录值均调整相同的倍数^[13]。本文采用③方法将地震加速度时程曲线的PGA值乘以2和除以2,观察 $t=5$ s时边坡塑性破坏区的范围及其安全系数。

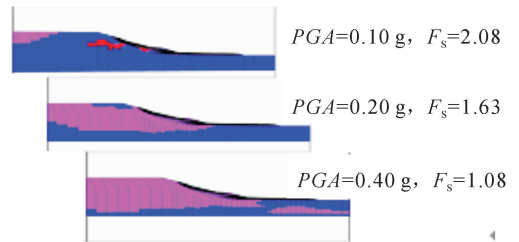


图10 不同PGA下塑性区分布图

Fig.10 Distribution of plastic zone under different PGA

从图10中可以看出,边坡塑性区的分布随着PGA的增大呈现非线性增大的趋势;安全系数的变化随着PGA的增大呈现非线性减小的趋势。说明PGA对边坡的稳定性有显著影响,所以在高烈度地区要对潜在滑坡进行工程措施,防止大幅值的峰值加速度造成滑坡。

3.2.2 地震动能量持时阈值

地震动参数持时的重要意义得到广泛认可,许多研究结论都相对一致,即持时的影响主要体现在

非线性结构的最大反应和累积反应破坏中^[14]。在 地震学中,绝对持时为记录开始到达时至可见记录消失并出现脉动信号时的时间间隔;地震工程学中关心的是地震动的强震部分,因此地震动持时是一个相对的概念。

谢礼立^[15]、胡聿贤^[16-17]、龚思礼^[18]等对各种持时定义有一定的概括,一般分为两类:一是记录持时,如括号持时、分数持时、能量持时、等效平稳持时等;二是工程持时,如反应持时、有效持时。

Husid 和 Trifunac 主张采用 90% 能量持时 $T_{(0.90)}$,强震段定义在从地震动绝对持续时间前后各截去 5% 能量的时间段上,即: $T_{(0.90)} = T_{(0.95)} - T_{(0.05)}$;Jennings 则建议采用 70% 能量持时,并将强震段定义在总持续时间前后各截去 15% 能量的时间段上,即: $T_{(0.70)} = T_{(0.85)} - T_{(0.15)}$ 。采用 100%、90% 以及 70% 能量持时进行不同的输入,通过塑性区的分布来观察较合理的能量持时输入,70% 能量持时,采用 $T_{(0.70)} = T_{(0.80)} - T_{(0.10)}$ 。其结果如图 11。

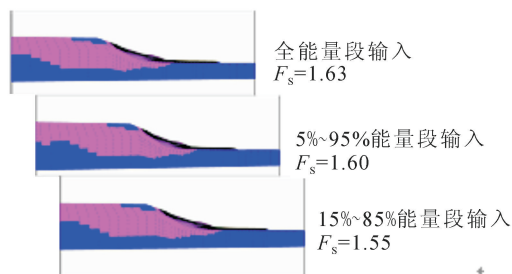


图 11 不同能量段输入下塑性区分布图

Fig.11 Distribution of plastic zone under different energy segment input

从图 11 中不难发现,这三种输入方式对模型的塑性区域范围影响不大,可以认为 70% 能量持时输入方式能够反应该地震对边坡的影响程度。在考虑计算量的情况下,可考虑选取 70% 能量持时输入方式进行边坡动力响应分析。

4 结论与建议

通过大量动力数值分析,基于动力时程分析法对边坡动力响应规律进行研究,发现了边坡动力响应的位移、速度、加速度以及塑性区的分布在边坡上的非线性特征,并根据基于强度判据的安全系数来进行输入地震动的峰值加速度以及能量持时阈值的敏感性分析。初步结论与建议如下:

(1) 在该地震动输入下,前 10 s 边坡塑性区分布变化较大,后 30 s 塑性区在逐步扩展,呈现出明显的非线性特征。

(2) 边坡质点位移、速度、加速度与地震加速度变化有较强的关联性,各质点具有统一的波形形式。

参考文献

- [1] 邵龙潭,唐洪祥,孔宪京,等. 随机地震作用下土石坝边坡稳定性分析[J]. 水利学报, 1999, (11): 66-71.
- [2] 唐洪祥,邵龙潭. 地震动力作用下有限元土石坝边坡稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(8): 1218-1324.
- [3] Shrikande M, Gupta V K. Dynamic Soil-structure Interaction Effects on the Seismic Response of Suspension Bridge[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999, 28(11): 1383-1403.
- [4] Little R R, Frederick G. Reismic Vertical Soil-structure Interaction[J]. The International Journal of Analytical and Experimental Modal Analysis, 1994, 9(1): 23-34.
- [5] Baba K, Park K, Inoue Y. Seismic Response Analysis of Soil-structure Interaction in the Time Domain[J]. Technology Reports of the Osaka University, 1995, 45(2216): 59-64.
- [6] Pak R Y S. Seismic Soil-structure Interaction Analysis by Direct Boundary Element Methods[J]. International Journal of Solids and Structures, 1999, 36(31): 4743-4766.
- [7] Sarkani S, Lutes L D, Jin S, et al. Stochastic Analysis of Seismic Structural Response With Soil-structural Interaction[J]. Structural Engineering and Mechanics, 1999, 8(1): 53-72.
- [8] Veletos A S, Prasad A M. Seismic Interaction of Structures and Soils: Stochastic Approach[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(4): 935-956.
- [9] 王存玉,王思敬. 地震条件下二滩水库岸坡稳定性研究[C]// 岩体工程地质力学问题(七). 北京: 科学出版社, 1987: 65-74.
- [10] 胡广韬. 滑坡动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1995.
- [11] 张倬元,王士天,王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- [12] 言志信,张森,张学东,等. 地震边坡失稳机理及稳定性分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 844-850.
- [13] 张麟. 土石坝工程地震反应影响因素[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [14] 李杰,李国强. 地震工程学导论[M]. 北京: 地震出版社, 1992.
- [15] 谢礼立,周雍年. 一个新的地震动持续时间定[J]. 地震工程与工程振动, 1984, 4(2): 27-35.
- [16] 胡聿贤. 地震工程学[M]. 北京: 地震出版社, 1988.
- [17] 胡聿贤,时振梁. 重要工程中的地震问题[M]. 北京: 地震出版社, 1987.
- [18] 龚思礼. 建筑抗震设计手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1994.