

文章编号:1672-3031(2019)02-0125-07

## 西藏某水电站高边坡地震永久位移分析

刘彪, 张伯艳

(中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心, 北京 100048)

**摘要:** 西藏某水电站位于喜马拉雅地震带和藏中地震带交汇处, 岸坡陡峭, 坝址区某高边坡对枢纽工程的安全影响最大。为尽快消除该边坡的安全隐患, 本文基于 Slide 软件选用了 3 条不同类型的地震波, 采用 Newmark 滑块分析方法计算了该边坡在不同地震峰值加速度作用下的动力反应和永久位移, 并采用拟静力法对该边坡在设计地震作用下的稳定性进行了验算。计算结果表明, 在设计地震动作用下该边坡是稳定的, 随着地震波幅值的增加该边坡产生的总滑移量也在不断的增加; 对于不同类型的地震波, 虽然输入的地震峰值加速度相同, 但地震动参数的差异会影响边坡产生的永久位移。研究结果可为工程单位进行类似边坡工程稳定性分析提供参考依据。

**关键词:** Newmark 滑块法; 永久位移; 边坡稳定性; 地震; Slide 软件

**中图分类号:** TU457

**文献标识码:** A

**doi:** 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.02.006

### 1 研究背景

地震诱发的滑坡是最具破坏性的次生灾害之一, 其造成的损失有时比剧烈地震直接造成的灾害损失还严重, 因此评估地震作用下边坡的稳定性, 已成为岩土地震工程界的重要研究方向。地震边坡稳定性评价方法可以分为三大类: 拟静力方法、滑块分析法和应力变形分析法<sup>[1]</sup>。拟静力方法是评价地震区域边坡稳定的最简单方法, 该方法将地震惯性力等效为潜在滑动体重量乘以水平和垂直地震作用系数  $k_h$  和  $k_v$ , 即在极限平衡法中加入了水平和垂直静态地震力, 用于模拟由地面加速度引起的潜在惯性力。拟静力方法作为极限平衡法的扩展, 不仅提供了一套关于其工程应用的判断体系, 还提供了一个简单的标量稳定性指标, 但这种简单性是源于对动态荷载作用方式的粗糙假设, 这导致在合理选择地震作用系数和实际评估失效的可能性或结果方面存在困难<sup>[2]</sup>。应力变形分析法建模考虑了边坡材料的应力-应变行为和土体参数的空间变异的复杂性, 可以较准确地提供地震期间边坡实际变形的详细信息, 并且对地震响应和变形机制均给出了可观的描述, 越来越多地应用于一些大型复杂的工程问题, 但该方法计算复杂, 需要输入大量不易确定的参数, 难以应用于面广量多的区域问题<sup>[3]</sup>。Newmark 滑块分析法在简化的拟静力方法和复杂的应力变形分析法之间架起一座桥梁, 这种方法比拟静力法产生更加可靠的信息, 并且比应力变形分析法更加实用<sup>[4]</sup>, 用该方法预测地震作用下工程边坡的永久位移可以直观地判断边坡的抗震安全性, 所需的输入参数简单且计算复杂度相对较低, 计算结果符合工程要求, 相对经济合理, 因此, Newmark 滑块分析法在工程实践中得到了广泛的应用。

王璨等<sup>[5]</sup>采用拟静力方法以及应力变形分析法, 对人工地震波作用下西藏某水电站边坡进行了稳定性分析, 本文在此基础上, 利用加拿大 Slide 软件采用 Newmark 滑块分析法计算该水电站高边坡在不同地震波类型和地震峰值加速度作用下的动力反应, 尝试性的探讨其对永久位移的影响, 为工程单位对该边坡以及类似工程的安全性评价提供参考。

收稿日期: 2018-11-06

基金项目: 中国水利水电科学研究院科研专项(EB0145B382016)

作者简介: 刘彪(1992-), 硕士生, 主要从事工程抗震研究。E-mail: lbiwhr@163.com

通信作者: 张伯艳(1961-), 博士, 教授级高级工程师, 主要从事工程抗震研究。E-mail: zhangboyan2008@163.com

## 2 永久位移 Newmark 滑块分析法简介

**2.1 Newmark 滑块分析法** Newmark<sup>[6]</sup>提出采用地震期间的总滑移量来代替拟静力方法中安全系数以评估地震期间边坡抗震稳定性,该方法弥合了分析过于简单的拟静力方法和分析过于复杂的应力变形分析法之间的差距,且能够获得地震期间动力变形破坏的情况,因此本文采用 Newmark 滑块分析法来进行地震作用下工程边坡永久位移分析。在使用 Newmark 方法之前,需要了解其限制性假设<sup>[2,7-8]</sup>:(1)将滑动体视为刚性块体,其内部不发生变形;(2)在低于屈服加速度下不会产生永久位移,并且当超过屈服加速度时沿着离散的基础剪切面产生塑性位移;(3)土体的静力抗剪强度和动力抗剪强度保持一致;(4)屈服加速度不依赖于应变,因此在整个分析过程中保持不变;(5)忽略动态孔隙水压力的影响;(6)向上滑动阻力取无穷大,使得上坡运动被禁止。

Newmark 滑块分析法计算结构的永久位移需要屈服加速度和地震动加速度时程两个关键的参数。Newmark 滑块分析法将滑坡模拟为在倾斜平面上滑动的刚性块,如图 1 所示,滑块具有已知的屈服加速度  $a_c$ ,即克服剪切阻力和开始滑动所需的阈值基础加速度,可以表示为:

$$a_c = (F_s - 1)g \sin \alpha \quad (1)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $F_s$  为拟静力方法确定的安全系数;  $\alpha$  为潜在滑动体的重心滑动方向与水平方向的夹角,通常可以近似为坡度角。

当确定了滑坡的屈服加速度并且选择了地震动加速度时程,就可以通过对地震动时程中位于屈服加速度之上的部分进行双重积分来计算 Newmark 位移<sup>[9]</sup>。目前求解 Newmark 位移的方法包括精确算法和经验算法,精确算法分析计算位移是基于用户指定的地面运动,而经验算法是基于给定地面运动参数(如峰值地面加速度、震级等)而后使用经验回归关系预测位移,其中应用最广泛的精确算法是由 Wilson 等开发的<sup>[10]</sup>,如图 2 所示。位移的计算采用两步积分法:(1)对加速度-时间曲线中位于屈服加速度之上的部分进行积分,得到速度-时间曲线(图 2(b));(2)对速度-时间曲线进行积分,得到滑块体的累积位移(图 2(c))。因此 Newmark 累计位移量可以表示为:

$$D = \iint_t (a(t) - a_c) dt dt \quad (2)$$

式中:  $a(t)$  为地震加速度动时程;  $a_c$  为屈服加速度。

**2.2 Slide 软件简介** Slide 是一种功能强大的二维边坡稳定性分析软件,可以使用拟静力方法和 Newmark 滑块分析法来分析地震作用下边坡的稳定性。拟静力方法是建立在极限平衡的基础上,软件在求解边坡动力和静力稳定性时设有多种分析方法,包括简化毕肖普法、简化 Janbu 法、陆军工程师团法、Morgenstern-Price 法和 Spencer 法等。软件中 Newmark 滑块分析法是基于美国地质调查局开发的 SLAMME 算法求解的<sup>[11]</sup>,利用地震记录模拟地震滑坡运动,旨在进行各种滑块分析,以评估地震边坡性能。软件因具有建模简便,清晰直观的后处

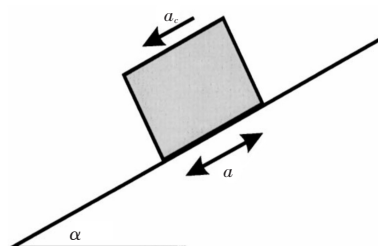


图1 Newmark 分析的滑块模型

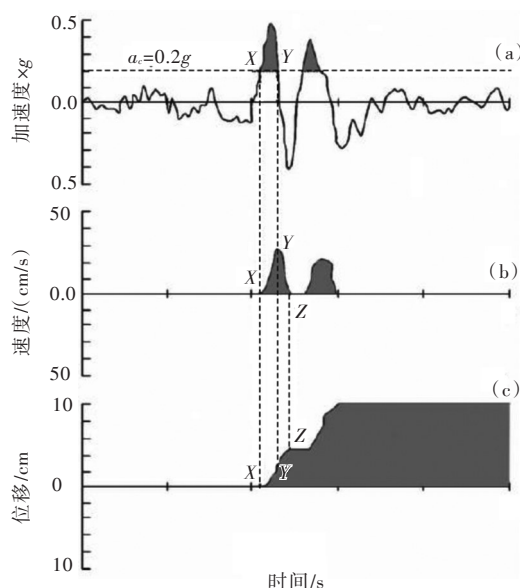


图2 Newmark 位移算法

理技术，而广泛地应用于土石坝和边坡等岩土工程中，因此本文采用Slide软件中内置的Newmark滑块分析模块来模拟不同地震记录下边坡的动力响应，并采用拟静力法对该边坡在设计地震动作用下的稳定性进行了验算。

3 西藏某水电站高边坡地震安全评价

**3.1 工程概况及计算参数** 西藏某水电站工程区位于青藏高原拉萨地体南部边缘，靠近雅鲁藏布江缝合带。坝址区河谷深切、岸坡陡峻，两岸山顶高程均在5400 m以上，为典型的高山峡谷地貌。根据初步调查，坝址区物理地质现象主要表现为岩体风化、泥石流及崩坡积体，预可研阶段坝址区共发育崩坡积体6个，其中C<sub>1</sub>崩坡积体对枢纽的安全影响最大，为尽快消除C<sub>1</sub>崩坡积体的安全隐患，预测及预防该边坡崩坡积体对工程建设的影响，本文选取C<sub>1</sub>崩坡积体中最不利剖面进行分析，简化的边坡计算剖面尺寸如图3所示，通过现场和室内剪切试验结果并类比工程区其它相似工程岩土层参数，表1给出了该高边坡各土层的参数建议值，各土层材料对应的位置分区见图3。

表1 各土层物理力学参数建议值

| 土层名称  | 材料编号 | 密度/(kg/m <sup>3</sup> ) | c/kPa | φ/(°) | 变形模量/MPa | 泊松比   |
|-------|------|-------------------------|-------|-------|----------|-------|
| 块石层   | 1    | 2150                    | 55    | 33.0  | 52.5     | 0.27  |
| 块石层   | 2    | 2200                    | 40    | 32.0  | 52.5     | 0.27  |
| 碎石混合层 | 3    | 2100                    | 80    | 32.0  | 47.5     | 0.29  |
| 块石层   | 4    | 2200                    | 60    | 36.5  | 57.5     | 0.265 |
| 岩体层   | 5    | 2590                    | 600   | 36.5  | 4000     | 0.24  |
| 岩体层   | 6    | 2610                    | 600   | 36.5  | 4000     | 0.24  |

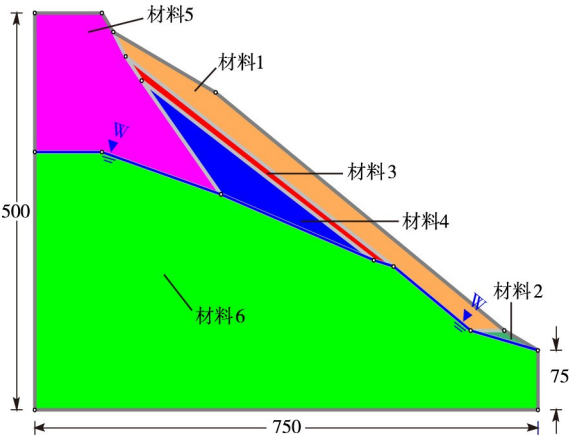


图3 计算剖面及材料分区（单位：m）

按照水电水利工程边坡设计规范(DL/T5353-2006)规定，C<sub>1</sub>崩坡积体整体按照A类Ⅱ级边坡设防，静、动力设计安全系数分别为1.15和1.05，抗震设计标准与主要水工建筑物相同，采用50年超越概率10%的基岩水平向地震动峰值加速度1.76 m/s<sup>2</sup>作为设计加速度，为了研究不同地震动时程曲线以及不同地震峰值加速度对工程边坡永久位移的影响，本文选取了人工地震波、Loma Prieta波和汶川地震波3条加速度曲线进行了分析，归一化地震动时程及傅里叶谱见图4。

**3.2 计算结果分析** 采用Slide软件中的Morgenstern-Price法进行拟静力地震分析，取水平地震作用系数k<sub>h</sub>=0.3，设计地震加速度下边坡滑动面的位置及安全系数如图5所示，设计地震动下边坡的安全系数最小值为1.105，大于1.05，满足规范要求，与文献[5]计算结果较接近，故该边坡在设计地震动下是稳定的。将加速度值分别调整为设计地震动的不同倍数进行拟静力计算，计算得出的安全系数

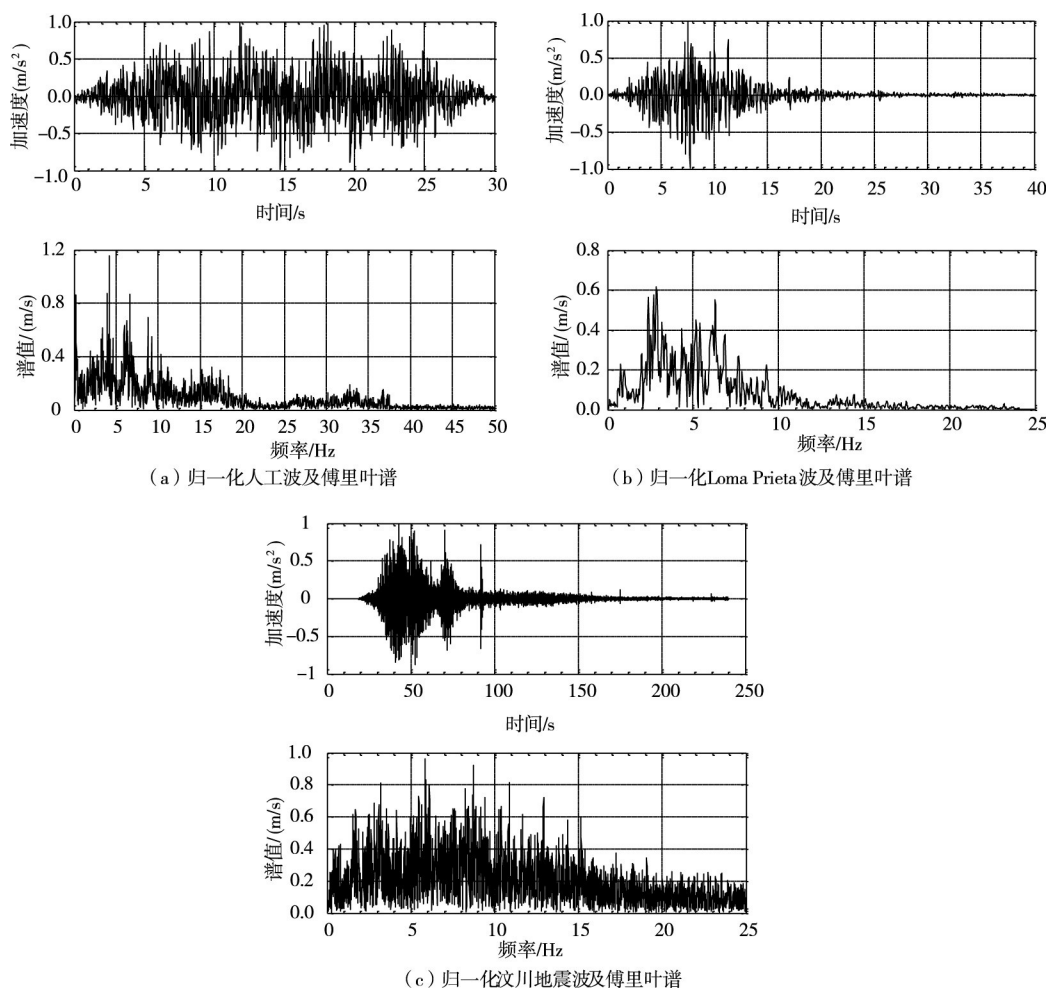


图4 归一化地震动时程及傅里叶谱

表2 不同设计地震动倍数下边坡安全系数

| 设计地震动倍数 | 1.0   | 1.5   | 2.0   | 2.5   | 3.0   | 3.5   |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 安全系数    | 1.105 | 1.053 | 1.008 | 0.963 | 0.920 | 0.881 |

值见表2。由表2可知,在2倍设计地震动作用下边坡安全系数小于1.05,边坡趋于不稳定。

为了进一步研究该边坡在不同地震波类型和地震峰值加速度作用下的动力反应,本文还应用Slide软件自带的Newmark滑块法进行了分析。首先通过Morgenstern-Price法进行极限平衡分析得到坡体的屈服加速度为 $0.11g$ (见图6),然后将3条地震波依次输入到Slide软件中,峰值加速度分别调整为设计地震动的不同倍数,各工况数值模拟结果见图7。

从图7(a)~(c)可知,在设计地震加速度作用下,人工波作用下产生的永久位移为 $0.137\text{ cm}$ , Loma Prieta波作用产生的永久位移为 $0.126\text{ cm}$ ,汶川波作用下产生的永久位移为 $0.104\text{ cm}$ ,因此发生上述3种类型的地震时,在设计地震烈度下边坡仅仅会产生很小的滑移量,整体是稳定的,与拟静力法得出的结论相吻合。通过拟静力法分析结果可知,当地震波峰值达到2倍设计地震峰值加速度时,边坡趋于不稳定,此时人工波作用下产生的永久位移为 $8.213\text{ cm}$ , Loma Prieta波作用产生的永久位移为 $4.029\text{ cm}$ ,汶川波作用下产生的永久位移为 $7.224\text{ cm}$ 。从图7(d)可知:(1)对于任意一条地震波而言,随着幅值的增加,边坡产生的永久位移呈现增大的趋势,因为地震动强度逐渐增大,土体的剪应变增加就会表现出明显的非线性特性,因此滑移量逐渐增大。(2)当输入3条不同类型地震波,在峰值加速度相同的情况下,人工波作用下边坡产生的永久位移最大,汶川地震波次之, Loma Prieta波最小。这表明不同的地震波作用时边坡的动力响应会有显著的差异,其根本原因是地震动参数的



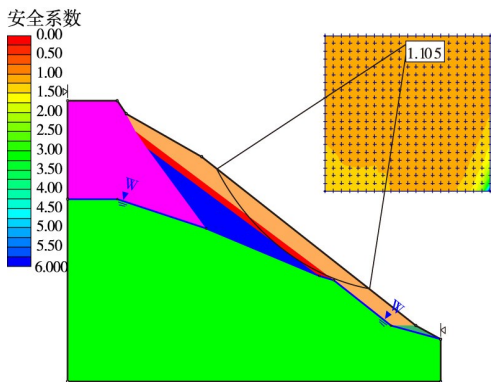


图5 设计地震动下边坡安全系数

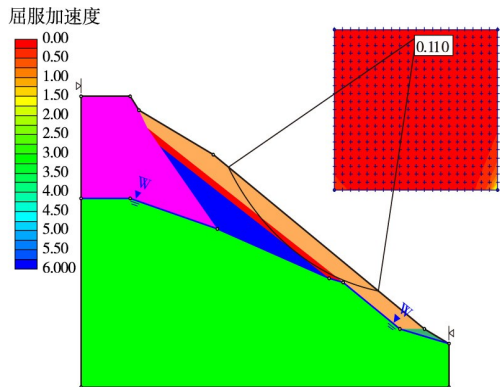
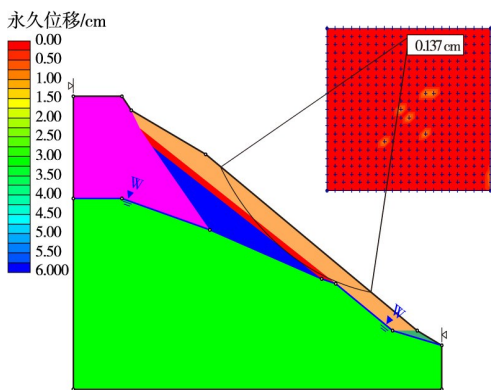
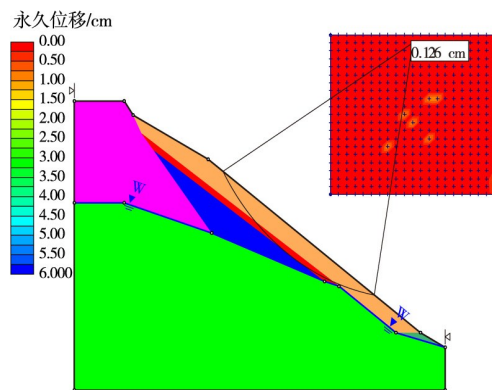


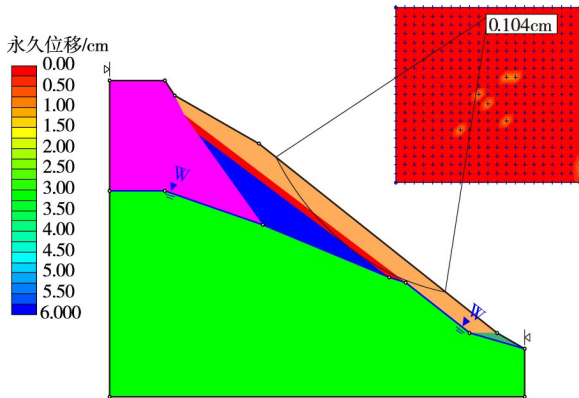
图6 边坡静态屈服加速度 (g)



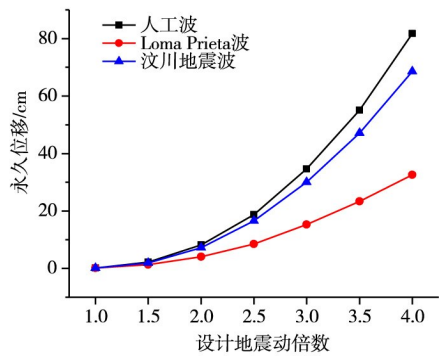
(a) Newmark法永久位移 (人工波)



(b) Newmark法永久位移 (Loma Prieta波)



(c) Newmark法永久位移 (汶川波)



(d) 不同峰值加速度下的永久位移

图7 地震波作用下的永久位移 (a-c为设计加速度下位移值)

差异。

另外，从图4(a)可以看出，人工波强震持时为25 s，加速度卓越频率在0~4.5 Hz，由于边坡体材料自身阻尼的存在会对高频地震波产生滤波作用，对地震波低频段的能量起到放大作用，因此人工波作用下产生的位移响应大；从图4(b)可以看出，Loma Prieta波强震持时为15 s，在3条波中强震持时最短，加速度卓越频率在2.5~6.5 Hz，且较其他地震波而言，加速度时程曲线中位于屈服加速度之上的部分最少，因此产生的累积位移最小；从图4(c)可以看出，汶川地震波强震持时为60 s，在3条波中强震持时最长，加速度卓越频率在3~11 Hz，加速度时程曲线中位于屈服加速度之上的部分较多，因此产生的永久位移也比较大。

综上所述，Newmark 滑块法计算的永久位移可以准确地反映边坡的地震场地效应，但目前国内

外对永久位移的允许值还没有相关的技术规范可参考,国外通常是业主基于项目类型、工程等级标准等指标来给出可接受的最大允许位移<sup>[8]</sup>,也有学者参考国外一些工程案例<sup>[12-15]</sup>给出的最大允许位移值作为地震作用下边坡稳定性评价的判断依据,本文分析得出了不同地震峰值加速度作用下边坡永久位移的变化趋势,可为有关工程单位根据相应的工程等级指标对边坡地震稳定性的判断提供一定的依据。

#### 4 结论

本文采用拟静力法和Newmark滑块法分析了西藏某水电站边坡崩坡体在设计地震动作用下的稳定性,并通过Newmark滑块分析法分析了该水电站边坡在不同地震波类型和地震峰值加速度作用下的动力反应,得出以下结论:(1)拟静力地震分析表明,该边坡在设计地震动作用下的安全系数最小为1.105,大于规范要求的1.05,该边坡在设计地震动下是稳定的。(2)Newmark滑块法分别采用了3条不同类型的地震波对该边坡在设计地震动作用下的稳定性进行分析,计算结果表明,人工波作用下产生的永久位移为0.137 cm, Loma Prieta波作用下产生的永久位移为0.126 cm,汶川波作用下产生的永久位移为0.104 cm,在设计地震烈度下该边坡产生很小的滑移量,是稳定的。通过调整3条地震波的峰值加速度,发现随着地震波幅值的增加,该边坡产生的总滑移量也在不断的增加;对于不同的地震波,虽然输入的地震峰值加速度相同,但地震动参数的差异会影响边坡产生的永久位移。(3)Newmark滑块法计算的永久位移可以直观地反映地震对场地边坡的影响,输入参数简单,计算复杂度相对较低,计算结果符合工程要求,是一种经济实用的分析方法。

#### 参 考 文 献:

- [ 1 ] DU W Q . Effects of directionality and vertical component of ground motions on seismic slope displacements in Newmark sliding-block analysis[J] . Engineering Geology, 2018, 239: 13-21 .
- [ 2 ] JIBSON R W . Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes-A retrospective [J] . Engineering Geology, 2011, 122(1): 43-50 .
- [ 3 ] 张伯艳,王璨,李德玉,等.地震作用下水利水电工程边坡稳定分析研究进展[J].中国水利水电科学研究院学报,2018,16(3):168-178 .
- [ 4 ] KRAMER S L, LINDWALL N W . Dimensionality and directionality effects in newmark sliding block analyses [J] . Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(3): 303-315 .
- [ 5 ] 王璨,张伯艳,李德玉.考虑地震输入机制的强度折减动力有限元方法[J].中国水利水电科学研究院学报,2015,13(2):100-105 .
- [ 6 ] NEWMARK N M . Effects of earthquakes on dams and embankments [J] . Geotechnique, 1965, 15 ( 2 ) : 139-160 .
- [ 7 ] ZHAO H, SONG E X . A method for predicting co-seismic displacements of slopes for landslide hazard zonation [J] . Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 40: 62-77 .
- [ 8 ] 褚宏宪,方中华,史慧杰,等. Newmark 位移分析方法在海底斜坡地震稳定性评价中的应用[J].海洋地质前沿,2017,33(6):53-58 .
- [ 9 ] FRANKLIN A G, CHANG F K . Permanent displacements of earth-embankments by newmark sliding block analysis[R] . Vicksburg: U.S. Army Engineering Waterways Experiment Station, 1977 .
- [ 10 ] WILSON R C, KEEFER D K . Dynamic analysis of a slope failure from the 6 August 1979 Coyste Lake, California, earthquake[J] . Bull . Seismol . Soc . Am., 1983, 73(3): 863-877 .
- [ 11 ] JIBSON R W, RATHJE E M, JIBSON M W, et al . SLAMMER: Seismic Landslide Movement Modeled using Earthquake Records[M]//Section B in Book 12. Reston, VA, U. S.: Geological Survey, 2013 .
- [ 12 ] HYNES-GRIFFIN M E, FRANKLIN A G . Rationalizing the seismic coefficient method[R] . Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg Mississippi, 1984 .

- [ 13 ] WIECZOREK G F, WILSON R C, HARP E L . Map showing slope stability during earthquakes in San Mateo Country, California [ R ] . U.S. Geological Survey, 1985 .
- [ 14 ] KEEFER D K, WILSON E L . Predicting earthquake-induced landslides, with emphasis on arid and semi-arid environments [ C ] // Proceedings of Landslides in a Semiarid Environment on the Inland Valleys of Southern California. Inland Geological Society, Riverside, CA ( USA ), 1989 .
- [ 15 ] JIBSON R W, KEEFER D K . Analysis of the seismic origin of landslides: examples from the New Madrid seismic zone [ J ] . Geological Society of America Bulletin, 1993, 21(4): 521-536 .

### Analysis of seismic permanent displacement of a high slope for a hydropower plant in Tibet

LIU Biao, ZHANG Boyan

(Earthquake Engineering Research Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

**Abstract:** A hydropower plant in Tibet is located at the intersection of the Himalayan seismic belt and Central Tibet seismic belt, with a steep bank slope. A high slope in the dam site area has the greatest impact on the safety of the pivotal project. In order to eliminate the safety hazard of the slope as soon as possible, this paper selects three different types of seismic waves based on Slide software, and calculates the dynamic response and permanent displacement of the slope under the action of different seismic amplitudes by using Newmark sliding block analysis. The pseudostatic method is used to check the stability of the slope under the design ground motion. The calculated results show that the slope is stable under the effect of designed ground motion, and the total slip generated by the slope increases with the increase of seismic wave amplitude. For different types of seismic waves, when the input peak seismic acceleration is the same, the difference in ground motion parameters will affect the permanent displacement of the slope. The research results can provide reference for similar slope engineering stability analysis.

**Keywords:** Newmark sliding block analysis; permanent displacement; slope stability; earthquake; Slide software

(责任编辑:王冰伟)