DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2017.02.40

基于动力强度折减法的地震边坡稳定性分析

乔 蓓[1], 江德军[2]
(1. 成都大学, 四川 成都 610106; 2. 国电大渡河流域水电开发有限公司库坝管理中心, 四川 乐山 614900)

摘 要: 目前关于动力作用下边坡稳定性的分析方法仍存在一些不足之处,如动力问题按静力处理、未充分考虑加载地震波的动力效应、仅考虑剪切破坏、未考虑边坡滑动面形成的渐进破坏过程等。鉴于此,本文同时考虑坡体拉剪强度参数的折减及边坡渐进破坏的过程,结合动力有限元强度折减法原理及边坡动力失稳判据,从监测点位移及加速度突变、计算数值收敛性及拉剪破坏面贯通情况 3 个方面,确定边坡的动力稳定安全系数及拉剪破坏面。结果表明:动力有限元强度折减法能够定量有效地进行地震作用下岩质边坡稳定性评价,并充分反映了边坡渐进破坏过程,其结果可为地震作用下岩质边坡的抗震设计及动力稳定性分析提供参考。

关键词: 岩质边坡; 渐进破坏; 动力安全系数; 完全动力强度折减; 失稳判据; 地震边坡; 稳定性分析
中图分类号:TU435 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2017)02-0233-04

Seismic slope stability analysis based on dynamic strength reduction method

QIAO Bei[1], JIANG Dejun[2]
(1. *Chengdu University*, *Chengdu* 610106, *China*; 2. *Dadu River Hydropower Development CO. Ltd. of China Guo-dian*, *Leshan* 614900, *China*)

Abstract: At present, there are still some deficiencies in the method of slope stability analysis under the present dynamic interaction. For examples, the dynamic problem was treated as a static problem, dynamic effect under loading seismic wave was not fully considered, only shear failure was considered, and the gradual failure process of the forming of slope sliding surface was not considered, etc. Therefore, both the reduction of slope shear strength parameters and slope progressive failure process would be considered in this paper. Combined with the dynamic finite element strength reduction principle and slope instability criterion, the slope dynamic stability safety factor and the tensile and shear failure surface were both determined from the monitoring point displacement and acceleration mutation, the convergence of numerical, and the penetration of tensile and shear failure surface. The results showed that, the dynamic finite element strength reduction method evaluated the rock slope stability under seismic action quantitatively and effectively, and fully reflected the gradual failure process. The results can provide references for seismic design of rock slope under seismic action and dynamic stability analysis.

Key words: rock slope; gradual failure; dynamic safety factor; full dynamic strength reduction; instability criterion; seismic slop; slop stability analysis

1 研究背景

近几十年以来,随着我国经济的发展及对清洁能源的需求,西南地区水能开发势头迅猛。由于该地区地质条件的复杂性,必然存在大量的高地震烈度区高陡岩质边坡稳定问题,因而如何评价地震作用下岩质边坡的稳定性问题一直备受关注。边坡动力稳定性分析方法主要包括:拟静力法、Newmark 法及动力有限元时程分析法[1-2],但是存在较多不足及争议。现阶段,随着数值计算法的发展,许多学者[3-9]关于强度折减法分析边坡稳定性及其工程应用做了大量富有成效的研究,陈国庆等[10]考虑了滑坡形成过程中的渐进破坏,提出动态强度折减方法,运用定量化指标确定边坡的局部破损范围,并折减局部破损坡体内的强度参数,在坡体渐进演化过程中自动搜索滑动面。但是,大多研究仅针对边坡岩

收稿日期:2016-12-23; **修回日期**:2017-02-03
作者简介:乔 蓓(1988-),女,陕西渭南人,硕士研究生,助理工程师,研究方向为岩土力学与工程数值仿真。

体的动力响应及破坏机理进行,未考虑边坡滑动面形成的渐进破坏过程,或仅针对静力边坡的强度折减法,或基于静力计算求得滑面后分析边坡的动力稳定性等,这就导致岩质边坡的抗震设计理论始终落后于工程实践需要,故边坡的动力特性及稳定性还有待于开展深入的研究。

本文采用动力有限元强度折减法分析边坡的动力稳定性。首先介绍动力强度折减法原理及边坡动力失稳判据,其次结合动力强度折减法原理及动力失稳判据从监测点位移及加速度突变点、计算数值收敛性与拉剪破坏面贯通情况 3 个方面确定边坡的动力稳定安全系数及拉剪破坏面,其分析方法及计算结果可为地震作用下岩质边坡的抗震设计及动力稳定性分析提供参考。

2 动力强度折减分析法

2.1 动力强度折减分析法原理

许多学者经“5.12 汶川大地震”灾后调研发现[11-13],在地震作用下滑坡体上部多数发生拉破坏,甚至于有些岩土体被完全抛出,即边坡在受到地震动往复运动中,边坡更易发生拉破坏。据此可知,边坡在地震作用下破坏状态是拉剪复合破坏,为了与地震作用下边坡的实际破坏机理更加相符,故在边坡动力稳定性分析中不仅要考虑抗剪强度参数的折减,还需考虑到边坡体材料的受拉破坏,即需考虑抗拉强度参数的折减,因此,动力强度折减法应表述为[14]:

$$c' = \frac{c}{F},\ \varphi' = \arctan\frac{\tan\varphi}{F},\ \sigma^{t'} = \frac{\sigma^t}{F} \qquad (1)$$

式中:c 为折减前的黏聚力,kPa;φ 为折减前的内摩擦角,(°);σ^t 为折减前的抗拉强度,kPa;F 为折减系数;c' 为折减后的黏聚力,kPa;φ' 为折减后内摩擦角,(°);$\sigma^{t'}$ 为折减后抗拉强度,kPa。

2.2 边坡动力失稳判据

根据国内外学者研究成果[15-16],可从 3 个方面判断边坡在地震作用下的稳定性:(1)有限元计算过程中力和位移是否收敛;(2)潜在滑面在地震作用过程中监测点位移是否发生突变;(3)拉剪破坏面是否贯通。

3 算例分析

3.1 数值模型

以某岩质边坡为例,坡高为 30 m,坡比为 1∶0.5,边坡上布置 A、B、C、D、E 共 5 个监测点,其中监测点 A 位于坡顶,监测点 B 位于坡面,监测点 C 位于坡脚,监测点 D 位于坡面监测点 B 附近的坡体内,监测点 E 位于基岩内,如图 1 所示,边坡岩体参数如表 1 所示。本文采用有限元计算软件进行动力有限元分析,有限元模型采用 15 节点平面应变单元,岩质边坡采用理想弹塑性本构模型,运用 Mohr-Coulomb 强度准则。根据郑颖人院士等建议,地震动作用下边坡计算范围为:坡脚至左端边界的距离取为坡高的 1.5 倍、坡顶至右端边界的距离取为坡高的 2.5 倍、坡底岩体高度取值与坡高同高。边坡动力计算边界条件为两侧吸收边界、底部指定位移边界的标准地震边界,阻尼采用 Rayleigh 线性阻尼,阻尼系数 $\alpha = 0.01$,$\beta = 0.01$。地震时程采用单向水平输入,选用 El Centro(El,1940)地震加速度时程南北分量,持续时间取为 10s,峰值加速度为 0.34 g(g 为重力加速度),El Centro 水平向地震加速度时程如图 2 所示。

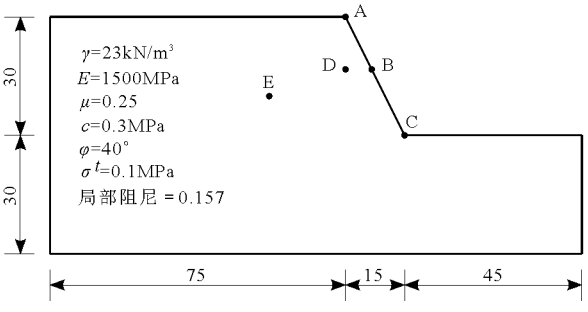


图 1 岩质边坡计算模型

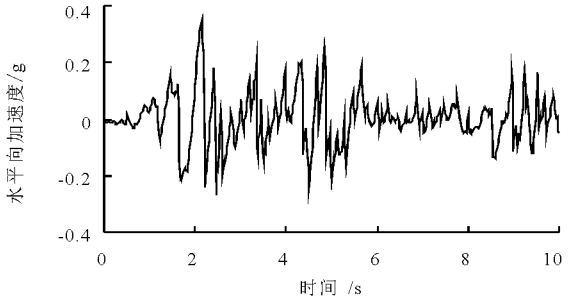


图 2 El Centro 水平向地震加速度时程曲线

表 1 边坡岩体物理力学参数

局部阻尼	天然容重 γ/(kN·m^{-3})	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	抗拉强度 σ^t/MPa	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
0.157	23.0	1500	0.25	0.1	300	40

3.2　计算结果

3.2.1　监测点位移变化　图 3 为监测点 A(坡顶)处在不同折减系数时竖向位移随时间的变化曲线。可以看出当折减系数 F_s 小于 2.6 时,坡顶 A 点位移随时间变化较小,且当地震作用结束后,该点处塑性变形不大,表明边坡未发生结构性破坏;当折减系数 F_s 大于 2.6 时,坡顶 A 点位移随时间呈增大趋势,且当地震作用结束后,该点塑性变形较大,且呈现继续发展趋势,表明边坡发生破坏。

图 4 为监测点 A、B、E 竖向位移随折减系数变化曲线,由图可以看出当折减系数 F_s 在 1.0 ~ 2.6 之间时,位于潜在滑动面范围内的监测点 A、B 处竖向位移发展比较缓慢。当折减系数 F_s 大于 2.6 时,监测点 A、B 处竖向位移迅速增大,而位于基岩内的监测点 E 由于处于潜在滑动面以外,其位移随折减系数变化较小。

图 5 为监测点 A 及监测点 C 处水平向位移随折减系数的变化曲线,由图中可以看出,坡顶 A 处水平位移随折减系数先缓慢减小,而后折减系数增大到 2.6 左右时,呈快速增大趋势;坡脚 C 处水平位移随折减系数先呈缓慢增长趋势,当折减系数到 2.6 左右时,C 点位移发生突变,呈快速增长趋势。出现上述规律主要与边坡滑动失稳时一般为圆弧滑动面有关,边坡失稳时坡顶先有向坡内移动的趋势而后向坡外滑动,而坡脚则一直向坡外滑动,当超过临界安全系数后,坡顶及坡脚会迅速向坡外滑动,发生失稳破坏。

综上,可以看出当折减系数 F_s =2.6 时,位移变化趋势发生突变,故可知 2.6 为该岩质边坡在地震作用下的动力安全系数。

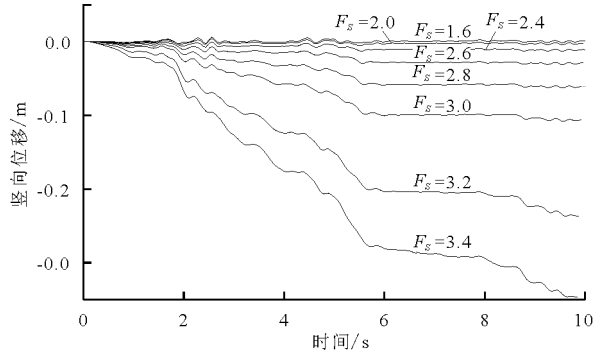


图 3　监测点 A 处在不同折减系数时 y 向位移随时间变化曲线

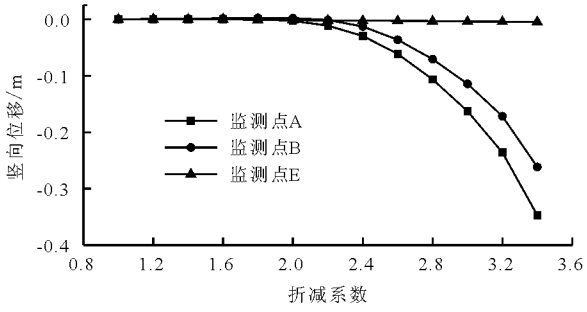


图 4 监测点 A、B、E 处竖向位移随折减系数变化曲线

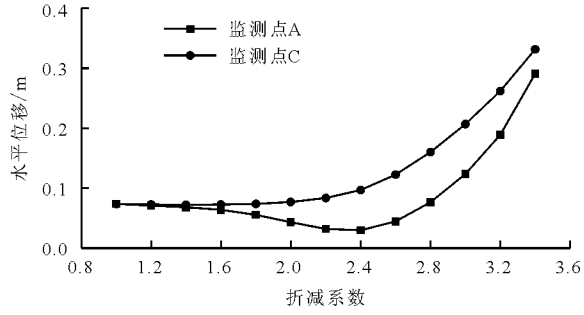
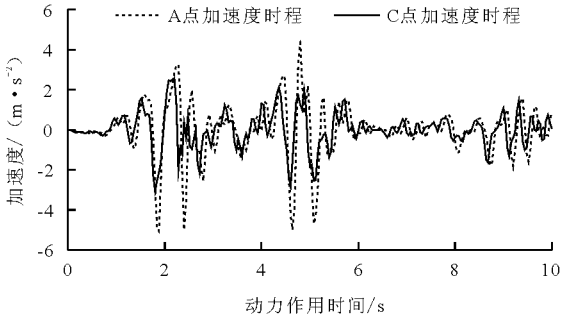
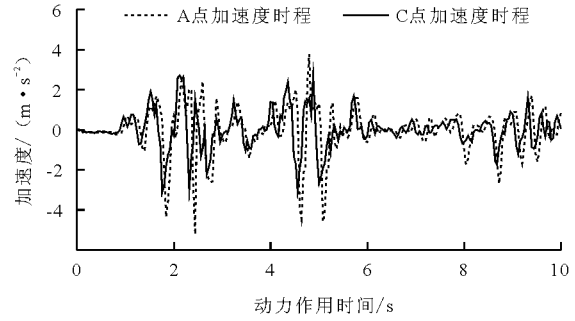


图 5 监测点 A、C 处水平位移随折减系数变化曲线

3.2.2　监测点加速度响应　图 6 为监测点 A、C 处水平向加速度时程曲线。为了更好地反映加速度响应规律,以坡脚作为基准点,将坡顶处峰值加速度 *PGA* 与坡脚处峰值加速度的比值定义为 *PGA* 放大系数[17]。图 6 中显示,坡顶处峰值加速度较坡脚处有所增大,当折减系数为 1.0 时,坡顶 A 点 *PGA* =5.072 m/s^2,坡脚 C 点 *PGA* =3.018 m/s^2,放大 1.68 倍;当折减系数为 2.6 时,坡顶 A 点 *PGA* =5.224 m/s^2,坡脚 C 点 *PGA* =3.424



(a)强度折减系数为1.0



(b)强度折减系数为2.6

图 6　坡顶 A 和坡脚 C 处加速度时程曲线

m/s^2,放大 1.53 倍,坡顶峰值加速度较坡脚峰值加速度放大系数随着折减系数的增大而减小;在地震作用过程中,坡顶 A 与坡脚 C 处水平加速度时程曲线基本接近,A 点较 C 点的动力反应出现滞后特性。

图 7 为监测点 A 处水平向峰值加速度随折减系数变化曲线,从图 7 中可以看出当折减系数增加到 2.6 时,此处水平向峰值加速度突然减小,说明此时监测点 A 附近边坡体已发生滑动,坡体内部对滑动体的约束减小,从而导致 A 点附近的水平向峰值加速度发生明显减小。

3.2.3 *边坡拉剪破坏面形成过程* 图 8 为不同折减系数拉剪破坏面形成过程图(取峰值加速度出现时刻 T = 1.96s)。通过对比可以看出 T = 1.96s 时刻,边坡体分别折减 2.0、2.4 及 2.6 时,边坡下部首先出现小范围的剪切破坏,随着折减系数增大,塑性区域不断向坡顶延伸,同时坡顶附近出现小范围拉伸破坏点,拉伸破坏区和剪切破坏区范围随着折减系数的增大不断扩大,直到折减系数增大到某个临界值时,基本贯穿整个边坡,滑动面形成,边坡体发生失稳破坏。

图 9 为折减系数为 2.6 时,边坡的体积应变及剪应变增量云图(T = 1.96s),由图 9 可以看出当折减系数为 2.6 时,坡顶拉伸破坏带与坡脚剪切破坏带贯通,边坡出现失稳。

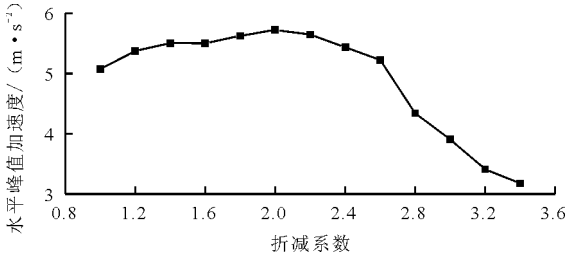
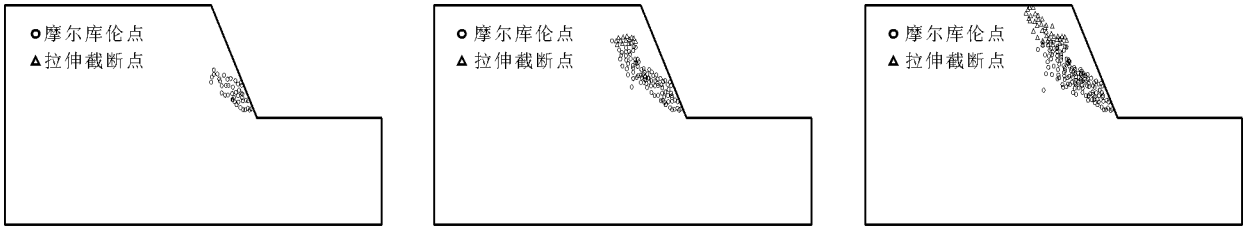
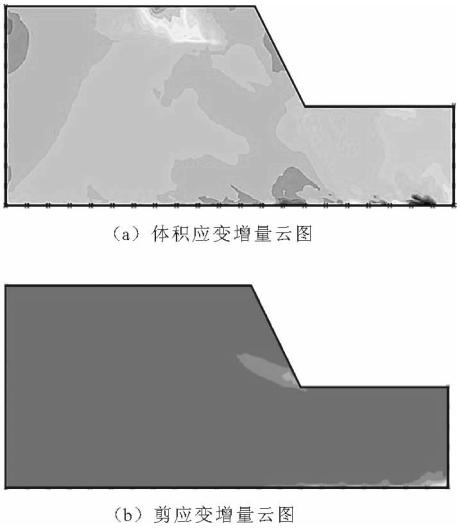


图 7 监测点 A 处峰值加速度随折减系数变化曲线



(a) 强度折减系数为2.0 (b) 强度折减系数为2.4 (c) 强度折减系数为2.6

图 8 拉剪破坏面形成过程塑性图(T = 1.96 s)



(a) 体积应变增量云图

(b) 剪应变增量云图

图 9 折减系数为 2.6 时,边坡的体积应变及剪应变增量云图(T = 1.96 s)

4 结 论

采用动力有限元强度折减法分析岩质边坡的动力稳定性,计算结果表明:

(1)边坡的动力破坏是一个随时间发展的累计过程,并非在某刻突然发生;

(2)可根据地震作用下边坡的特征位移随动力反应时间的收敛性、特征位移及峰值加速度与折减系数曲线的突变点、突变折减系数下塑性区范围等综合确定边坡的动力稳定安全系数;

(3)边坡的动力破坏模式是由潜在滑体上部受拉与下部剪切共同组成。

动力强度折减法充分考虑了动力反应过程,可为地震作用下岩质边坡的抗震设计及动力稳定性分析提供参考。

参考文献:

[1] 陈昌凯,阮永芬,熊恩来. 地震作用下边坡稳定的动力分析方法[J]. 地下空间与工程学报,2005,1(7):1054 - 1057.

[2] 陈玲玲,陈敏中,钱胜国. 岩质陡高边坡地震动力稳定分析[J]. 长江科学院院报,2004,21(1):33 - 35.

(下转第 243 页)

2010,32(4):663 – 670.
[8] Ma Zhuguo, Fu Congbin. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004[J]. Science Bulletin,2006,51(23):2913 – 2925.
[9] 赵 铭,张雪洋,包玉龙,等. 基于 2 种标准化干旱指数分析秦皇岛近 50 年干旱状况[J]. 水土保持研究,2016,23(3):246 – 251.
[10] 刘可晶,王 文,朱 烨,等. 淮河流域过去 60 年干旱趋势特征及其与极端降水的联系[J]. 水利学报,2012,43(10): 1179 – 1187.
[11] 庄晓翠,张林梅,阿志肯,等. 阿勒泰地区暖季蒸发变化特征及与气象因子的关系[J]. 干旱气象,2009,27(3):213 – 219.
[12] 鞠 彬,叶 文,胡 丹. 新疆额尔齐斯河流域降水量变化特征及趋势分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(4):1 – 5.
[13] 鞠 彬,胡 丹. 参考作物蒸发蒸腾量计算方法在额尔齐斯河流域的适用性研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(5):106 – 111.
[14] 温克刚,史玉光. 中国气象灾害大典. 新疆卷[M]. 北京:气象出版社,2006.
[15] 中华人民共和国农业部. 新中国农业 60 年统计资料[M]. 北京:中国农业出版社, 2009.
[16] 张 强,邹旭恺,肖风劲,等. GB/T20481 – 2006 气象干旱等级[S]. 北京:中国标准出版社,2006:12 – 17.
[17] 袁文平,周广胜. 标准化降水指数与 Z 指数在我国应用的对比分析[J]. 植物生态学报,2004,28(4):523 – 529.
[18] 王芝兰,李耀辉,王素萍,等. 1901 – 2012 年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征[J]. 中国沙漠,2015,35(6):1666 – 1673.

(上接第 236 页)

[3] 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.
[4] Matsui T,San K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations,1992,32(1):59 – 70.
[5] 赵尚毅,郑颖人,时卫民,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(3):343 – 346.
[6] Dawson E M ,Roth W H ,Drescher A . Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique, 1999, 49(6):835 – 840.
[7] 栾茂田,武亚军,年延凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 1 – 8.
[8] Eberhardt E E. Twenty – ninth Canadian geotechnical colloquium: The role of advanced numerical methods and geotechnical field measurements in understanding complex deep – seated rock slope failure mechanisms[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(4): 484 – 510.
[9] 史石荣,陈林杰,余 超. 基于强度折减法的高烈度地震区边坡稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(2):273 – 276.
[10] 陈国庆,黄润秋,周 辉,等. 边坡渐进破坏的动态强度折减法研究[J]. 岩土力学, 2013,34(4):1140 – 1146.
[11] 郑颖人,叶海林,肖 强,等. 基于全动力分析法的地震边坡与隧道稳定性分析[J]. 防灾减灾工程学报,2010,30(S1):279 – 285.
[12] Li Xinpo,He Siming . Seismically induced slope instabilities and the corresponding treatments: the case of a road in the Wenchuan earthquake hit region[J]. Journal of Mountain Science,2009,6(1):96 – 100.
[13] Wang Fawu, Cheng Qianggong,Lynn H,et al. Preliminary investigation of some large landslides trigger ed by the 2008 Wenchuan earthquake, Sichuan Province, China[J]. Landslides, 2009, 6(1): 47 – 54.
[14] 郑颖人,叶海林,黄润秋,等. 边坡地震稳定性分析探讨[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2):173 – 180.
[15] 郭院成,陈 涛,钱 辉. 基于强度折减的边坡动力安全系数确定方法研究[J]. 土木工程学报,2012,45(S2):117 – 120.
[16] 吴应祥,刘东升,宋强辉,等. 基于有限元强度折减法的边坡动力稳定性可靠性分析[J]. 岩土力学,2013,34(7):2084 – 2090.
[17] 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.