

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0743-05

动力时程响应的加卸载响应比描述研究

石 崇, 徐卫亚, 周家文, 周先齐

(河海大学 岩土工程研究所, 南京 210098)

摘 要: 借鉴地震预报中的加卸载响应比理论, 将作用在动力模型上的地震力视为加卸载, 采用动力有限单元法和加卸载响应比理论开展全时程动力分析, 建立了地震加卸载响应模型, 采用相对位移(速度、加速度)作为响应参数, 对地震过程加卸载响应比理论在动力响应预报方面进行了有益探索。结果表明, 由于相对响应参数比绝对响应参数更能体现动力模型的变形趋势, 反映动力荷载的作用机制; 以加卸载响应比判断地震稳定性, 是可以反映动力响应程度大小的一种有效方法。

关 键 词: 动力响应; 加卸载规律; 绝对动力响应; 相对动力响应

中图分类号: TU 435

文献标识码: A

Dynamic stability research by using load/unload ratio method

SHI Chong, XU Wei-ya, ZHOU Jia-wen, ZHOU Xian-qi

(Research Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Borrowing the idea of load/unload response theory in seismic prediction, seismic dynamic model is established, in which seismic acceleration on the boundary is regarded as load/unload process and relative displacement, velocity or acceleration is looked upon as response parameters, whole time history analysis is performed by finite element method and load/unload response theory, favourable exploratory of the application in dynamic response prediction is then attained through the above-mentioned theories. The results indicate that relative response parameters are more applicable of describing structure deformation, reflecting the dynamic mechanism of action than absolute displacement. Using Load/unload dynamic response ratio to identify the damage degree under seismic waves turns out to be an effective method reflecting the response degree.

Key words: dynamic response; load/unload law; absolute dynamic response; relative dynamic response

1 引 言

地震作用下岩体的动力特性涉及工程地震、岩体结构抗震、地质工程、岩体力学等诸多学科, 一直是学者及工程师们关心的问题之一。在地震荷载作用下, 岩土体内部总会或多或少出现剪切破坏或者产生过大变形, 甚至出现局部塌落^[1]。只要这些破坏被限制在较小的局部范围内, 对边坡岩土体整体的影响甚微, 岩体仍然处于稳定状态, 因此, 岩土体稳定性不可用点上的指标来分析^[2], 需要综合考虑各方面的因素来分析地震动力响应。对此问题, 国内外学者展开了大量研究, 并提出了一些不同原理的分析与评价方法。根据拟静力法的局限性^[2], 发展了更能反映地震荷载特征以及结构固有特性的

非线性方法, 如 Seed 提出的等效线性法^[3], Newmark 和王思敬等发展的地震滑动位移分析法^[4,5], Cundall 提出的离散单元法^[6]以及考虑不确定因素的概率方法等^[7]。

由于岩体的动力响应不仅受岩体结构、岩体几何的制约, 同时受地震荷载形式的影响^[8], 常规的做法是采用某一实测地震波(人工处理)作为荷载计算岩体的动力效应。对比国内外相关研究发现, 动力计算是一个复杂的非线性系统, 不考虑岩体几何与构造固然不对, 荷载形式对振动响应也大有影响, 采用相同抗震加速度峰值、不同形式地震波计算得到的位移-时程大相径庭。综合考虑这个非线性系统, 采用加卸载响应比理论为分析动力响应提供了一种新的途径^[9-11], 王裕仓、尹祥础等人通过 MTS

收稿日期: 2007-04-20

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(No. 50539110)

作者简介: 石崇, 男, 1978 年生, 博士研究生, 主要从事岩石动力学方面研究。E-mail: scvictory@hhu.edu.cn

试验和数值模拟^[9]证明了加卸载响应比(LURR)在岩体变形非线性系统中的存在,同时也证明了加卸载响应比理论的正确性,姜彤等^[12]将之应用于岩体边坡动力响应分析并取得了较好的结果。

本文借鉴地震预报中的固体潮应变理论对岩体动力模型建立了加卸载响应比预报模型,对加卸载响应比理论在动力全时程分析的预报方面进行了有益探索。

2 加卸载响应比理论

加卸载响应比理论^[9-11]是尹祥础等人 1987 年提出的用于非线性系统失稳前兆和失稳预报的新理论、新方法,其基本思路为:岩体失稳是一个非线性系统。如果对其施加某种作用,如加载或卸载,当岩体系统处于稳定状态时,它对这两种作用的响应应该是相同的。当它临近失稳时,它对加载的响应远大于稳态时对同荷载量的响应。通过观察响应比(响应/荷载量)的差别,就能够判断出岩体系统的稳定性。响应比的差别越大,系统越不稳定。利用系统的加荷响应率的比值(简称加卸载响应比),可以定量地描述非线性系统偏离稳态或接近失稳的程度。

与固体潮作用相比,地震也是周期性变化的荷载,可以作为加卸载响应比中的荷载。地震作用下的动力响应也是一个非线性系统,受地质、材料性能、几何等因素的制约和影响,其演化过程表现为确定性与随机性综合运动的特点。从原理上讲,岩体系统的稳定性完全可以用加卸载响应比来衡量。

将加卸载响应比理论用于岩体失稳判断首先要解决两个问题:一是如何进行加卸载以及如何判别加卸载;二是采用什么参量作为荷载,如何计算响应参量。

2.1 加卸载响应的定义

假设时间序列持续时间为 N 秒,将其划分为 M 个加卸载区间,其中第 i 个区间内荷载(可以为加速度、速度、位移、应力)的正均值为 $\bar{k}_+$ 区间加荷;第 i 个区间内地震荷载负均值 $\bar{k}_-$ 定义为区间卸荷。时程计算后可以统计质点相应第 i 区间的响应参数(位移、速度、加速度等)正、负均值作为响应参数,并分别记做 $\bar{R}_+$, $\bar{R}_-$ 。

则第 i 段的加卸载响应比为

$$Y_i = \frac{\bar{R}_+ / \bar{k}_+}{\bar{R}_- / \bar{k}_-} \quad (1)$$

当系统处于稳定状态时, $Y_i \approx 1$; 当系统偏离稳态时, $Y_i > 1$; 当系统失稳时, $Y_i \rightarrow \infty$ 。

2.2 荷载与响应参数的确定

目前加卸载响应比主要应用于地震预报中,其加载过程是地球、月球以及太阳之间周期性变化的引力潮,在岩体稳定性预报方面案例较少。与地震预报不同,岩体的失稳一般是局部性的,其荷载也往往简化为平面波形式,如加速度波、速度波、位移波、应力波等,理论上处于周期性变化的时间序列均可以作为加卸载响应比计算的荷载过程。

地震荷载作用下,岩体关键部位的位移、速度、加速度均会产生波动,质点上统计的时间变量可作为响应参量,但只有那些响应呈现波动变化的物理量才能有较好的加卸载比计算结果。由于动力计算中得到的响应一般为绝对响应(以静止物体为参照物),而边坡、洞室、地面建(构)筑物发生破坏则会产生较大的相对位移(或速度、加速度等)。采用相对响应参量参与加卸载比计算更加合理,其变化波动性更强。

2.3 加卸载过程的计算

加卸载过程一般采用区间直接平均法。

第 i 个加卸载区间的加卸载均值计算如下:

$$(1) \text{ 地震荷载加载过程均值 } \bar{k}_{i+} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m k_{i+j}; \text{ 地震}$$

$$\text{荷载卸载过程均值 } \bar{k}_{i-} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m k_{i-j}。$$

$$(2) \text{ 如果把响应参数定义为 } \bar{R}_{i+} \text{ 和 } \bar{R}_{i-}, \text{ 则地震}$$

$$\text{响应加载过程均值 } \bar{R}_{i+} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{i+j}; \text{ 地震响应卸载过}$$

$$\text{程均值 } \bar{R}_{i-} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R_{i-j}。$$

其中, m 为第 i 个区段荷载点数目; n 为第 i 个区段响应点数目; $k_{i+}, k_{i-}, R_{i+}, R_{i-}$ 分别为荷载与响应加卸载过程的某一时刻值。

2.4 加卸载响应比计算中的问题与处理方法

在荷载-时间历程中,根据划分加卸载区间数目的不同,存在以下情况的发生:在某个或某几个区间内所有时间历程均大于(或小于)0。此时该区间内所有时刻值均为加载(或卸载)过程,采用式(1)计算的加卸载响应比为无穷大。显然这与实际情况是不符的。对于这种情况,就要通过降低区间划分数目 M 来进行控制,使区间同时涵盖加卸载过程。

由于荷载传播至响应记录点需耗费一定时间,当模型尺寸较小、荷载与响应延时较小时,延时因素影响较小,加卸载响应比计算较精确。若延时时间较长,则可能造成较大的误差,特别是当高频率波入射时,此时将响应的加卸载区间整体向后平移延时时间,使荷载与响应时间相互对应。

采用人工或者原始地震加速度波作为荷载, 绝对响应尤其是位移波动性并不明显, 显然不符合式(1)中加卸载响应比计算的要求。此时以相对响应参量代替绝对响应参量, 则波动性更强, 并作周期性振动, 即可采用式(1)计算。

当岩体破坏时, 破坏区域内质点与稳定区内质点相对位移持续增加, 此时式(1)中 $\bar{R}_-$ (或 $\bar{R}_+$) 的值为 0, 为保证计算进行下去, 人为规定 $\bar{R}_+ = 0.05\bar{R}_-$ (或 $\bar{R}_- = 0.05\bar{R}_+$)。由于系统不稳定时加卸载比趋向无穷大, 因此, 这样处理并不影响加卸载比的变化趋势, 对于荷载参数同样适用。

3 岩体加卸载响应规律研究

3.1 计算模型

为了验证加卸载比法的正确性, 建立地震波穿越地下洞室模型如图 1 所示。模型中洞室宽为 20 m, 高为 26 m, 洞顶半径为 10 m, 4 个边界采用人工黏滞边界。岩体力学参数如表 1 所示。全时程动力计算采用 FLAC^{3D} 软件^[13, 14], 记录洞室中线及洞室内壁各点的位移、速度、加速度-时程曲线, 并计算加卸载响应比规律。

地震荷载采用人工加速度地震波, 其幅值为 0.212g, 以横波形式施加于模型底部边界。

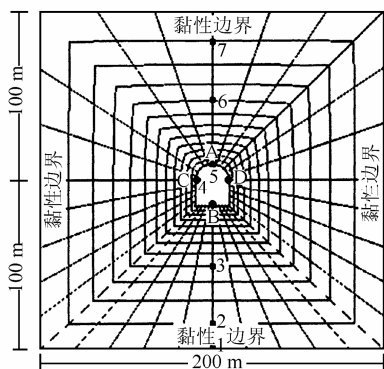


图 1 动力计算模型

Fig.1 Dynamic model

表 1 岩体力学性能表

Table 1 Mechanical properties of the rock material

岩石性能	数值	岩石性能	数值
密度 $\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	2.65	凝聚力 c/MPa	1.5
弹性模量 E/GPa	20	摩擦角 $(^\circ)$	50
泊松比	0.21	/	/

3.2 地震波作用下绝对位移响应

绝对位移响应为模型在加速度地震波作用下直接计算得到的位移-时程, 图 2 为采用表 1 参数计算的 1~7 点绝对位移响应, 图 3 为变形参数取表 1 中

变形参数 1 % 时 1~7 点绝对位移计算结果。由于位移需经两次积分及系统阻尼的影响, 位移响应相对于加速度频率要低得多, 且变形参数越小其频率越低。

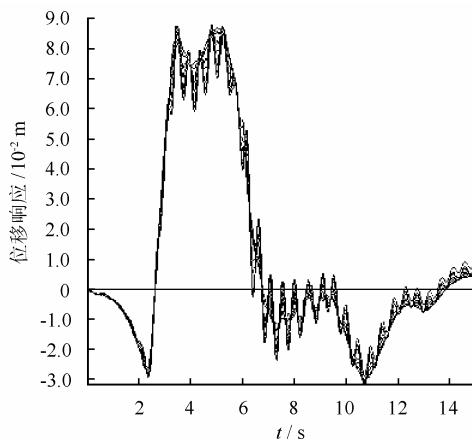


图 2 地震作用下位移动力响应(绝对值)

Fig.2 Dynamic displacement response under seismic wave

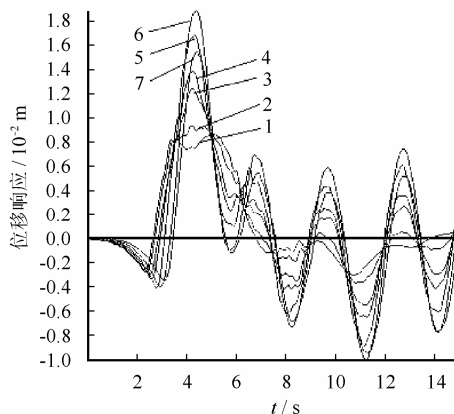


图 3 低变形参数位移动力响应(绝对值)

Fig.3 Dynamic displacement response of lower deformation parameters

在洞室中线上, 随传播距离的增加, 位移幅值逐渐增加, 这符合地震波传播中的高程放大规律。当地震波传播至洞室后, 由于受绕射作用影响, 洞室拱顶位移增加幅度变小(图 3 中曲线 5), 随着地震波继续传播, 绕射作用逐步减弱, 位移幅值又开始逐渐增加。岩体性能参数的降低可使绝对位移幅值变大、位移中的高频成分减少, 与位移变化趋势相似。这说明较低的材料参数可吸收更多的高频波动成分, 位移响应依赖于岩体几何及入射地震波的频谱构成。

3.3 相对响应及相对加卸载比

通过不同岩体力学参数计算对比发现, 完整岩体的动力响应一般处于弹性状态, 采用弹性与弹塑性的岩体力学参数计算差别并不大。而且模型内所有质点均处于运动状态, 绝对位移大小难以区分岩

体构筑物的动力稳定性。实际上,边坡、洞室等构筑物的破坏也主要表现为较大永久位移的产生,这些位移是相对于完整岩体的相对位移,而不是常规计算动力响应位移时程中的最大值。

根据模型中洞室几何形状,计算了 A-B、C-D 水平相对位移、相对水平速度、相对水平加速度如图 4~6 所示。虽然相对位移数值比绝对位移小一个数量级,但相对位移时程曲线波动性更好,更能体现地震作用下洞室的变化趋势。水平速度、加速度频谱频率依次增加,A-B、C-D 点保持同步,而位移不但变化频率较低,其变化也不同步,图 4 规律表明,洞室在本次地震波作用下,A-B 点最大水平相对位移约 5 mm,并最终恢复到 0 左右,而洞室侧壁 C-D 在作同步运动时有突然靠近的趋势。

以图 4 所示相对位移作为加卸载比计算中的响应参数计算得如图 6 所示的相对位移加卸载比,其中 $M=100$ 。 M 值增大可导致加卸载响应比的频率变

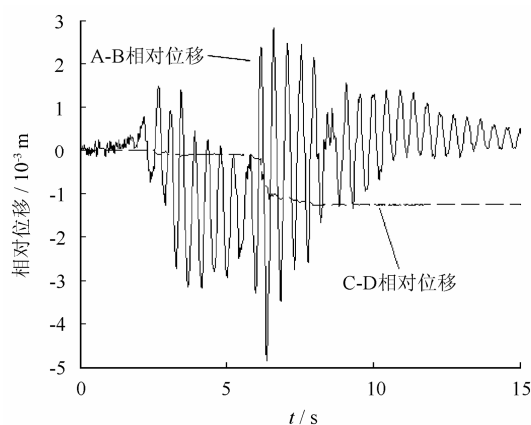


图 4 洞室内壁 A-B 和 C-D 水平相对位移

Fig.4 Relative displacement between A-B and C-D on inwall of chamber

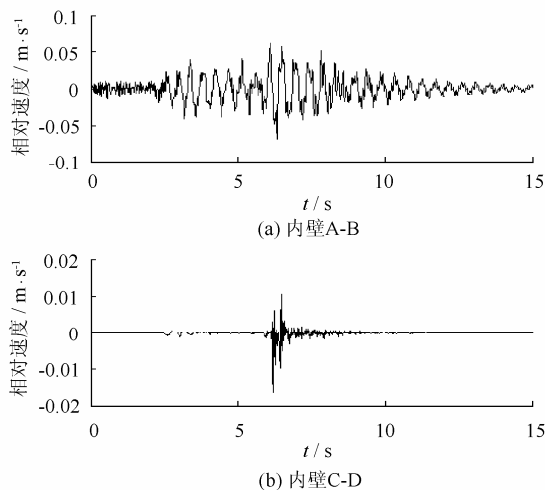


图 5 洞室内壁 A-B 和 C-D 水平相对速度

Fig.5 Relative velocity between A-B and C-D on inwall of chamber

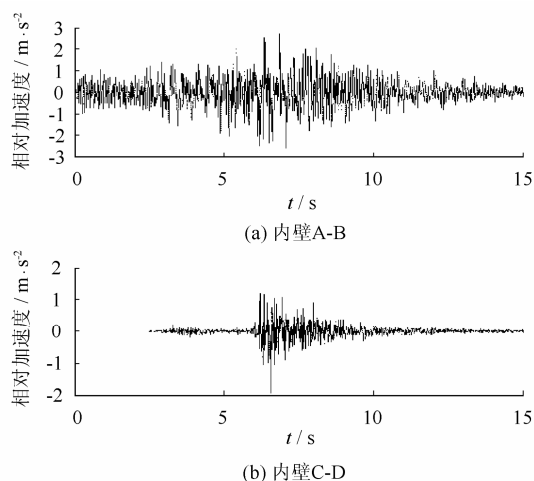


图 6 洞室内壁 A-B 和 C-D 水平相对加速度
Fig.6 Relative accelerate between A-B and C-D on inwall of chamber

大,加卸载响应比最大值亦升高,在本模型计算中,为方便数据对比, M 一旦选定即保持为固定值。

加卸载响应比是某一时段系统在荷载、力学性能下的反应,其变动幅度体现出荷载变化引起的力学性能变化。如图 7 中,由于相对位移变动较小,位移加卸载比变动幅度较小,仅 2~6 s 区域内较大,这与地震波荷载的幅值出现在 4.1 s 附近有关。当洞室破坏时,A-B 相对位移可能持续增长的相对变形,此时相对位移加卸载比会持续增长至无穷。

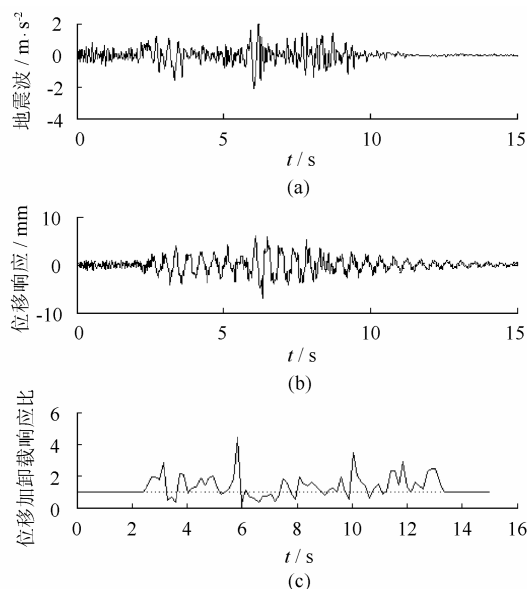


图 7 A-B 相对水平位移的加卸载响应比
Fig.7 Load/unload response of relative horizontal displacement

图 8 揭示为洞室中线上各点的相对位移、相对速度、相对加速度加卸载响应比(以模型中 1 点为基点)变化情况,其变化规律完全符合地震波穿越洞室时的波动现象。其中加速度响应比变化幅度较小,

速度、位移变化幅度较大,在洞室附近可能发生跳跃式变化。

由于加卸载响应比考虑了地震荷载的形式,同时也考虑了地震动力响应机制。当岩体某质点产生

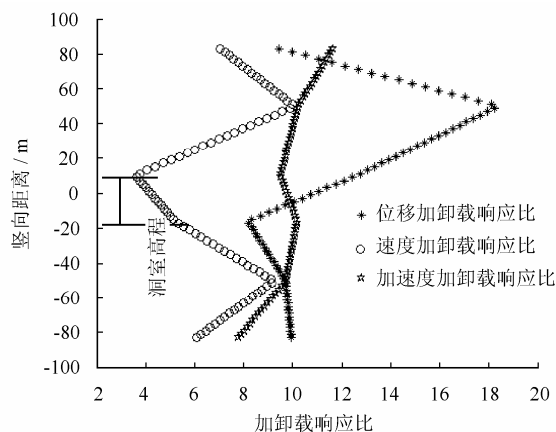


图 8 加卸载响应比应高程变化趋势

Fig.8 Load/unload response under different elevation

较大的相对位移时,加卸载响应比会发生较大的跳跃突变。借助于岩体力学响应加卸载规律的变化,完全可以反映岩体的响应程度,不失为判断岩体稳定性的一种有效方法。

4 结 论

(1) 加卸载响应比理论反映岩体非线性失稳的基本物理本质,采用了周期性变化的荷载来模拟加卸载,其结果对外界因素的干扰不敏感。特别当外界因素影响较大,响应-时间非线性阶段比较明显,用该理论进行预报效果更好。

(2) 绝对位移-时程曲线依赖于模型与输入地震波频谱,由于阻尼等因素的影响其变化趋势非常缓慢,不适合作为加卸载响应比计算中的响应参数。采用相对响应参数更能体现动力模型的变化趋势,反映动力的作用机制。

(3) 动力计算岩体的稳定性是难以准确描述的,点安全系数法已经被证明不合理。利用常规方法难以从其时间序列上判断出动力响应下岩体所处的状态。根据加卸载响应比理论,只要与加卸载响应有关的物理量其响应比在岩体临界失稳前都要发生剧增,所以采用加卸载响应比理论可以最大限度地显示各种动力响应信息,以此为岩体是否失稳作预报服务。

参 考 文 献

[1] 祁生文. 边坡动力响应分析及应用研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2002.

[2] 薛守义. 岩体边坡动力稳定性研究[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 1989.

[3] Siad L. Seismic stability analysis of fractured rock slopes by yield design theory[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2003, (23): 203—212.

[4] Newmark N M. Effects of earthquakes on dams and embankments[J]. *Geotechnique*, 1965, 15 (2): 139—160.

[5] 王思敬, 张菊明. 边坡岩体滑动稳定的动力学分析[J]. *地质科学*, 1982(2): 162—170.

WANG Si-jing, ZHANG Ju-ming. On the dynamic stability of block sliding on rock slopes[J]. *Scientia Geologia Sinica*, 1982(2): 162—170.

[6] Cundall P A. Explicit finite difference methods in geomechanics. *Numerical Methods in Engineering*[A]. *Proc. of the EF Conference on Numerical Methods in Geomechanics*[C]. New York: ASCE, 1976, 132—150.

[7] Yegian M K, Marciano E A, Ghahraman. V G. Seismic risk analysis for earth dams[J]. *Journal of Geotech. Engrg*, 1991, 117(1): 8—34.

[8] 祁生文, 伍法权, 刘春玲, 等. 地震边坡稳定性的工程地质分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(16): 2 792—2 797.

QI Sheng-wen, WU Fa-quan, LIU Chun-ling, et al. Engineering geology analysis on stability of slope under earthquake[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2 792—2 797.

[9] 王裕仓, 尹祥础, 彭克银, 等. 加卸载响应比的数值模拟[J]. *地球物理学报*, 1999, 42(5): 669—676.

WANG Yu-cang, YIN Xiang-chu, PENG Ke-ying, et al. Numerical simulation on load/unload response ratio theory[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 1999, 42(5): 669—676.

[10] Yin X, Wang Y, Peng K, et al. Development of a new approach to earthquake prediction: Load/unload resonsratio (LURR) theory[J]. *Pure Appl. Geophys.*, 2000, 157: 2 365—2 383.

[11] YIN Xiang-chu, YIN Can. The Precursor of instability for nonlinear system and its application to earthquake prediction[J]. *Science in China*, 1991, 34: 977—986.

[12] 姜彤, 马莎, 许兵, 等. 边坡在地震作用下的加卸载响应规律研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(22): 3 803—3 807.

JIANG Tong, MA Sha, XU Bing, et al. Study of laws of load-unload response of slope under seismic load[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(22): 3 803—3 807.

[13] 王存玉. 地震条件下二滩水库岸坡稳定性研究[A]. *岩体工程地质力学问题(七)*[C]. 北京: 科学出版社, 1987.

[14] 刘春玲, 祁生文, 童立强, 等. 利用 FLAC^{3D} 分析某边坡地震稳定性[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(16): 2 730—2 733.

LIU Chun-ling, QI Sheng-wen, TONG Li-qiang, et al. Stability analysis of slope under earthquake with flac3D[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(16): 2 730—2 733.