

文章编号: 1000-7598-(2013)06-1541-06

力幅突变激励作用的岩石边坡动力敏感性研究

王建国¹, 王振伟^{1,2}

(1.中国煤炭科工集团沈阳研究院, 辽宁 抚顺 113122; 2.中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘 要: 动载荷作用引起岩石边坡失稳破坏, 尤其力幅突变激励作用对边坡稳定影响很大。对动、静载荷作用下岩石力学性质进行了分析, 建立了岩石边坡非线性运动方程, 分析了岩石边坡动力变形模型及非线性动力响应, 得出当扰动频率增加到一定程度, 滑体振幅突然增加, 产生向上突跳并随力幅的增加继续增加; 反之, 当力幅较大并逐渐减小时, 滑体振幅也随之减小, 当扰动的振幅减小至一定程度, 滑体振幅突然降低, 产生向下突跳减小。对初始条件和力幅突变激励对岩石力学非线性振动系统的影响进行了分析, 得到初始条件的微小变化可引起系统响应的巨大差异, 当振幅 A 极小时, 线性系统的振荡很弱, 它对非线性系统的作用也很弱, 整个系统的运动便可看作两运动的独立叠加。当振幅 A 再加大到使其幅值超过非线性系统三奇点之间的间隔时, 系统可以在这些奇点之间来回跃迁振荡, 从而运动复杂化, 随振幅 A 的增加, 系统从倍周期运动向混运动变化, 研究结果可为岩石边坡的动力稳定提供指导。

关 键 词: 岩石边坡; 力幅突变; 激励作用; 动力敏感性

中图分类号: O 33

文献标识码: A

Study of dynamic sensitivity of rock slope under excitation function role of force increase mutation

WANG Jian-guo¹, WANG Zhen-wei^{1,2}

(1. Shenyang Branch of China Coal Technology and Engineering Group, Fushun, Liaoning 113122, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: The dynamic loading leads to instability and failure of rock slope. Especially, the role of force increase mutation has a great influence on slope stability. The rock mechanical properties are analyzed under static and dynamic loadings. And then, the nonlinear equation of rock slope is established. The dynamic deformation model of rock slope and the nonlinear dynamic response are studied. The amplitude of the sliding body suddenly increase, resulting in the sudden jump up and continue to increasing with the increase of the force, when the disturbance frequency to a certain extent. Conversely, the amplitude of the landslide suddenly reduces, resulting in the sudden decreases when the perturbation amplitude reduces to a certain extent. Tiny changes in initial conditions can cause a huge difference of the system response. The movement of the entire system can be regarded as an independent superposition of the two sports when the amplitude(A) is very small. As the amplitude(A) increases to more than its amplitude between the three singular points of the nonlinear system interval, the system can oscillate back and forth between these singular points. With the amplitude(A) increasing, the system changes from the period-doubling motion to mix sports. The results can provide guidance for the dynamic stability of the rock slope.

Key words: rock slope; force increase mutation; excitation function; dynamic sensitivity

1 引 言

动载荷作用下岩石^[1-3]失稳破坏一直是岩土工程领域研究的难点, 尤其力幅突变激励作用对边坡稳定影响很大, 造成边坡突然失稳破坏, 因此, 开展力幅突变激励作用的岩石边坡动力敏感性研究,

具有重要的实际意义。研究工作者在边坡稳定性^[4-8]方面开展大量的研究工作, 但在准确预测灾害性滑坡方面大都以失败告终, 说明对于边坡失稳的机制掌握的还不够清楚, 尤其在动载荷激励作用下岩石边坡动力敏感研究方面更加欠缺。混沌系统对于初始条件非常敏感, 在初始状态的小误差值可被迅速

收稿日期: 2012-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (No.51274122, No. 50774046)。

第一作者简介: 王建国, 男, 1955 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩土力学与边坡工程方面的研究工作。E-mail: wangjianguo@fscrci.com

放大, 边坡失稳过程存在混沌现象吗? 导致混沌产生的条件又是什么? 解决好这些问题, 才可能对边坡失稳破坏进行准确评价和预测。

本文从岩石动力学角度出发, 分析动、静载荷作用下岩石力学性质, 建立岩石边坡非线性运动方程, 研究力幅变化对边坡滑体振幅的影响, 进而得到初始条件和力幅突变激励对岩石力学非线性振动系统的影响规律, 为岩石边坡的动力稳定性研究提供理论依据。

2 岩石边坡非线性动力响应分析

2.1 岩石边坡非线性运动方程

(1) 动、静载荷作用岩石力学性质分析

岩石试件在静力和动力作用下的性质差异较大。岩石试件受到动力激励时, 当外力较小时, 岩石试件的变形属于线弹性范围, 当外力较大时, 岩石的动力特性^[9-11]如图 1、2 所示。相关的几种岩石动态和静态试验结果也说明了岩石的破坏应力与变形模量是随施载速率的增加而增大, 随着应力速率的增加, 不同岩性的破坏应力有不同程度的提高, 应力速率对拉伸破坏应力和应变存在着影响。

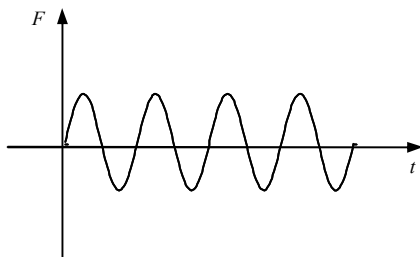


图 1 动力激励

Fig.1 Dynamic excitation

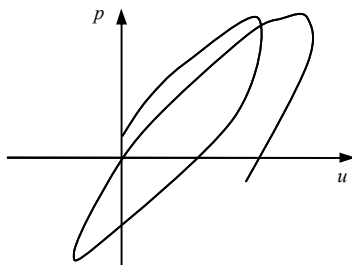


图 2 强外荷载

Fig.2 Strong external load

(2) 岩石边坡非线性运动方程

设岩石边坡系统的运动微分方程为

$$M\ddot{u} + P_2 + P_1 = A \cos \omega t \quad (1)$$

式中: M 为质量; \ddot{u} 为变形率; P_1 为变形力; P_2 为

阻尼力; A 为激励力幅; ω 为扰动频率。

在岩石力学系统的运动微分方程中, 如果变形力和阻尼力都是线性模型, 那么采用的方法就是线性动力分析方法; 如果其中任何一个是非线性的, 那么采用的方法就是非线性动力分析方法。在这里选择非线性变形模型和线性阻尼模型。非线性变形模型为

$$P_1 = ku + \beta u^3 \quad (2)$$

式中: P_1 、 u 分别为变形力和变形量; k 为零点切向刚度; β 为非线性系数。这时系统变形呈刚度非线性。其广义刚度为

$$\frac{dP_1}{du} = k + 3\beta u^2 \quad (3)$$

这里 β 为非线性影响项。如果 $\beta > 0$, 岩石试件的刚度系数是随变形的增加而增加, 系统的刚度随变形的增加而加强, 为渐硬弹性; 如果 $\beta = 0$, 岩石试件的刚度系数是不随变形的变化而变化, 为线性系统; 而如果 $\beta < 0$, 岩石试件的刚度系数随变形的增加而减小, 系统的柔度随变形的增加而加强, 为渐软弹性。若非线性项影响系数 β 很小, 则称系统为弱非线性问题, 反之则称强非线性问题。

岩石力学系统中的阻尼是指在振动中由于外力激励作用或岩石系统本身固有的原因引起的振动幅度逐渐下降的特性, 是这一特性的量化, 阻尼力与振动速度成正比, 因此, 线性阻尼模型为

$$P_2 = D\dot{u} \quad (4)$$

式中: P_2 为阻尼力; \dot{u} 为变形系数; D 为阻尼系数。

2.2 岩石边坡变形模型及非线性动力响应

(1) 岩石边坡动力变形模型

在外力激励作用下, 岩石边坡易在薄弱面处发生滑动, 在以下研究中, 考虑单一滑面边坡, 可认为边坡在弱面发生滑动, 而实际岩石边坡往往会在此处发生, 因此, 作为滑坡的一种类型进行分析。在现场可通过坡体地形地貌, 比如滑坡后缘, 滑坡前缘(剪出口)等地形地貌特征, 还可根据水文地质条件、泉眼或钻探、物探等发现滑带、滑动面; 也可根据地区经验来确定类似边坡的滑动面。

假设有一顺倾边坡(见图 3), 基岩与滑体之间存在一弱面。基岩为子系统 I, 滑体为子系统 II, 则边坡^[12-13]动力系统由子系统 I 和子系统 II 组成。将滑体作为一个振子, 滑体与基底的联系为一组非线性弹簧。对滑体来说, 一般强迫激励力来自基底岩石, 其方向是随机的, 频率范围很宽。为简化计算,

只分析切向响应，激励考虑单一连续变化频率的作用。则总系统的切向运动平衡微分方程可描述为

$$M\ddot{u} + D\dot{u} + ku + \beta u^3 = A \cos \omega t \quad (5)$$

对于子系统 I，由于受地震力作用，激励力幅 A 开始由小变大，终了由大变小；激励频率 ω 开始由慢变快，最终由快变慢。对于子系统 II 在受力过程中，结构形式不变。

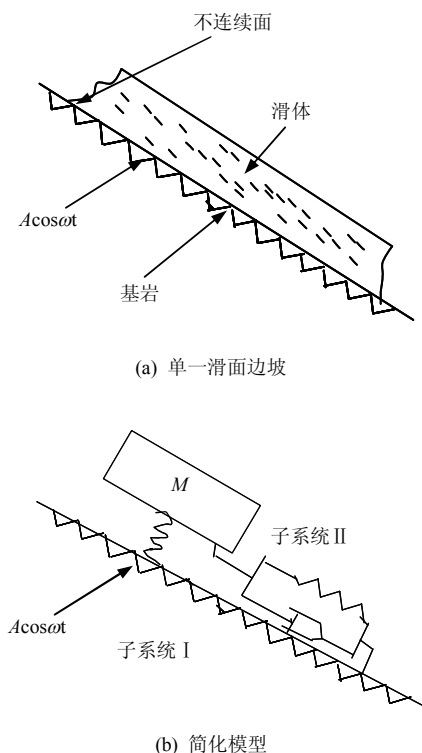


图 3 单一滑面边坡及其简化模型
Fig.3 Single sliding surface slope and its simplified model

(2) 边坡非线性动力响应

当 A 、 ω 变化时，将系统运动微分方程化简为

$$\ddot{u} + 2\mu\dot{u} + \omega_0^2 u + \beta u^3 = A \cos \omega t \quad (6)$$

将上式用 H (振幅)、 ω (扰动频率) 和 A (力幅) 之间的关系表示为

$$[0.75\beta H^2 - (\omega_0^2 - \omega^2)]^2 + 4\mu^2 \omega^2 H^2 = A^2 \quad (7)$$

滑体的振幅 H 与扰动频率的关系可用图 4 说明。从图可明显地看出，对于渐硬弹簧 $\beta > 0$ (见图 4(a))，在固有频率 ω_0 附近范围内，随着干扰力频率的缓缓增加，则激励力幅 A 沿响应曲线也逐渐增加，一直达到点 1，因在该点有铅直切线，当频率继续增加时，振幅突然从 1 点跳到响应曲线较低分支的点 2 上，然后沿 2 点逐步下降；反过来说，

如果 ω 从一个相应大的值开始逐渐减小时，则激励力幅 A 沿响应曲线逐渐增加，直到点 3，在点 3 处又出现铅直切线，当频率继续减小时，振幅突然跳到响应曲线较高的分支点 4 上，然后从 4 点开始，振幅沿响应曲线逐步下降。在突跳的瞬间，滑体的振幅突然变化，此时滑体的振动速度、加速度就非常大，由此引起的惯性力也很大。对于渐软弹簧 $\beta < 0$ (见图 4(b)) 也有类似的现象，只不过跳跃出现在相反的方向。对于 $\beta = 0$ (见图 4(c))，不存在跳跃现象。现场中放炮等在基岩中产生一系列不同频率、不同力幅的强扰，如果基岩的振动频率中只要有一个频率与滑体的频率在不稳定的频带范围中，就会导致滑体位移的瞬时急剧增加，诱发滑坡，且放炮等工程扰动会对基岩产生不稳定的频率载荷作用，多种载荷耦合作用对滑动的贡献同样要存在一个频率与滑体的频率在不稳定的频带范围，才会导致滑体的滑动。

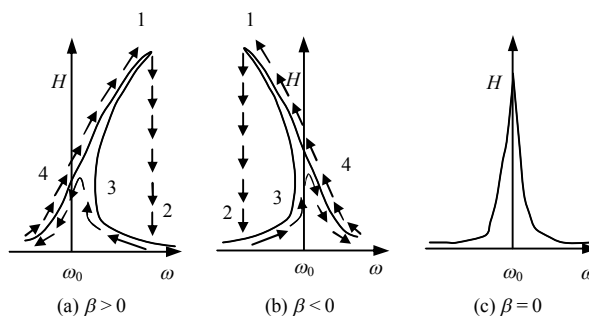


图 4 滑体振幅与扰动的频率之间的关系
Fig.4 Relationships between landslide amplitude and disturbance frequency

滑体的振幅与基岩激励力幅之间的关系可用图 5 表示。图 5 中走势曲线表征滑体的振幅随基岩激励力幅的变化趋势，实线表征滑体的振幅随基岩激励力幅的变化关系。滑体的振幅与基岩激励力幅之间并不是存在线性的变化关系，同时与 ω 、 ω_0 、 β 和 μ 有关，因此，表现为实线非线性特征。从图中可以看出，在一定的力幅影响范围内，当逐渐增加扰动力幅时，滑体振幅也在增加，当扰动频率增加到一定的程度，滑体的振幅突然增加，产生向上突跳，之后随力幅的增加继续增加；反过来，当力幅较大，逐渐减小时，滑体的振幅也在随之减小，当激励力幅减小到一定的程度，滑体的振幅突然降低，产生向下突跳，然后随力幅的减小继续减小。走势曲线向下、向上突跳的主要原因，分析认为是由于基岩扰动作用出现某一频率与滑体的频率在不稳定的频带范围，导致滑体可能滑动。

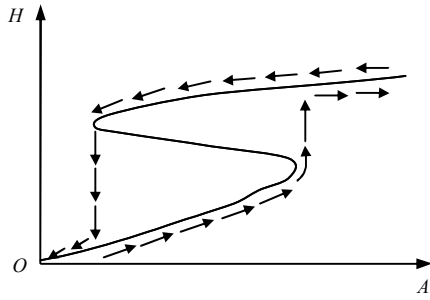


图5 滑体振幅与基岩扰动振幅(力幅)之间的关系
Fig.5 Relationship between landslide amplitude and force rate

3 岩石边坡动力敏感性研究

3.1 岩石边坡初始扰动的动力敏感性

初始条件对岩石力学非线性振动系统的影响也非常明显，因此，需要讨论当系统的初始值有微小差别时，系统响应的变化。将方程具体化为

$$\ddot{u} + k\dot{u} - u + u^3 = F \cos 1.2t \quad (8)$$

式中：当 k 、 F 分别为切向刚度和振幅，单位分别为 N/m 和 m。 k 、 F 取值较小，对系统影响较大，特别当 $k < 0.6$ 、 $F < 0.6$ 时，该系统对初始条件将非常敏感，需要通过计算说明。分 3 种情况进行讨论， k 分别取值为 0.2、0.3、0.1，对应 F 分别取值为 0.5、0.31、0.5。取初始条件分别为① $u(0) = 1.01$ 、 $\dot{u}(0) = 0.01$ ，对应图中的 data1 和② $u(0) = 1.00$ 、 $\dot{u}(0) = 0$ 对应图中的 data2，得到两种初始条件的 $u-t$ 图。

由图 6 结果可以看出，初始条件的微小变化引起了系统响应的巨大差异，这就是混沌运动对初始条件的敏感依赖性——蝴蝶效应，由于初使条件的难以预测性和多变性，所以就给边坡稳定性^[14-15]的预测带来巨大的困难。

3.2 岩石边坡力幅变化的动力敏感性

系统运动微分中除力幅是可变参数外，其余参数为定值。

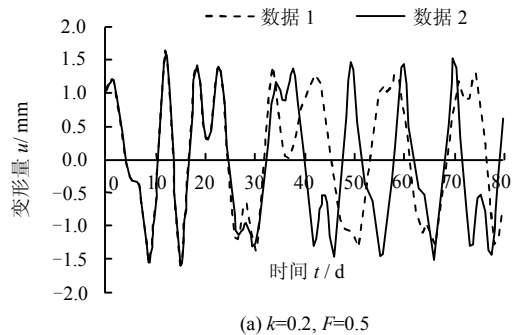
$$\ddot{u} + 0.3\dot{u} - u + u^3 = A \cos 1.2t \quad (9)$$

当扰动力幅 A 由小逐渐变大时， $u-t$ 曲线见图 7，相位图见图 8。其中， A 取不同值（由上往下依次分别取 0.200、0.270、0.280、0.287、0.320、0.360、0.400、0.645、0.850）。

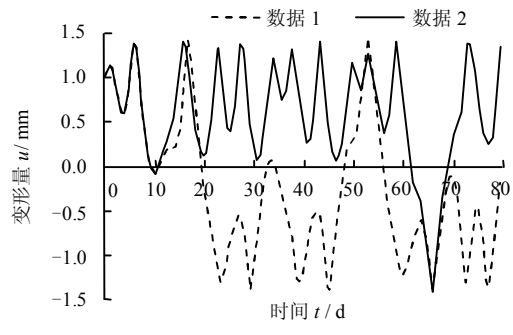
由图 7 和图 8 可知，随着扰动力幅 A 的增加，系统从倍周期运动向混运动变化。当扰动力幅 A 极小时，线性系统的振荡很弱，它对非线性系统的作用也很弱，整个系统的运动便可看作两运动的独立叠加。稍许加大扰动力幅 A 非线性系统的影响只是

使整个系统的振荡出现分频（倍周期）。当扰动力幅 A 再加大到使其幅值超过非线性系统三奇点之间的间隔时，系统可以在这些奇点之间来回跃迁振荡，从而运动复杂化了，出现混沌。扰动力幅 A 继续加大时，线性振子完全处于统治地位，非线性系统的影响是次要的，整个系统又被锁在外加周期力的各分频上。扰动力幅 A 进一步加大，线性振子完全处于统治地位，非线性系统的作用相对来说极弱，这时整个系统便按线性系统方式运动。

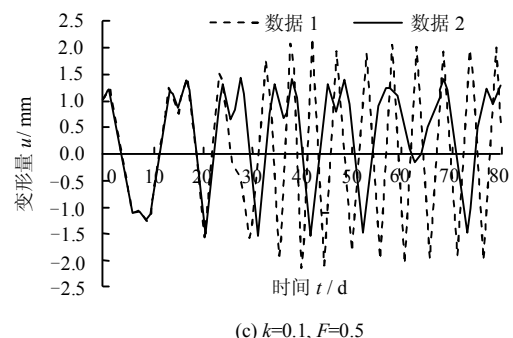
以上研究结果说明，两耦合系统在其中之一（线性振子）弱至整个系统可看作两相对独立系统，或者其中之一（线性振子）强到占统治地位时，系统都将处于锁频状态。只有当两系统强弱相当时，两振荡相互强烈影响，运动出现复杂化而产生混沌。



(a) $k=0.2, F=0.5$



(b) $k=0.3, F=0.31$



(c) $k=0.1, F=0.5$

图6 3种条件下 $u-t$ 曲线图
Fig.6 Curves of $u-t$ in three conditions

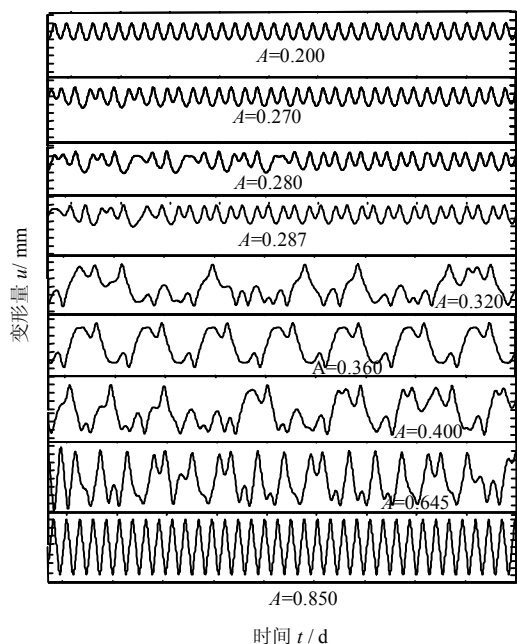


图 7 $u-t$ 曲线图
Fig.7 Curves of $u-t$

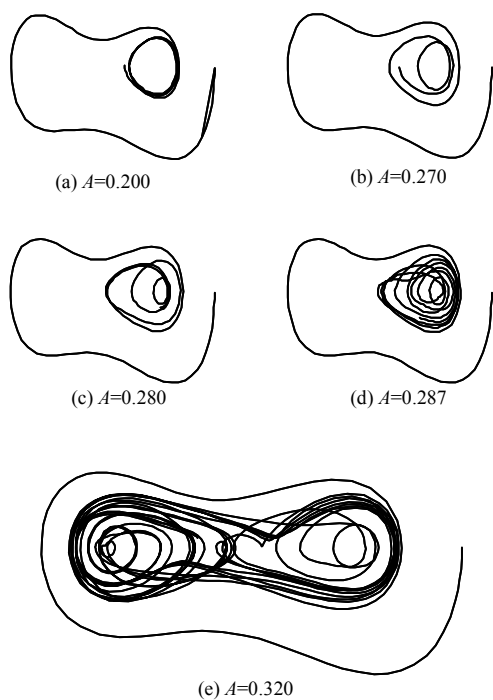


图 8 相位图
Fig.8 Phase diagrams

4 结 论

(1) 分析了岩石边坡动力变形模型及非线性动力响应，当扰动频率增加到一定程度，滑体振幅突然增加，产生向上突跳并随力幅的增加继续增加；反之，当力幅较大并逐渐减小时，滑体振幅也随之减小，当扰动力幅减小至一定程度，滑体振幅突然

降低，产生向下突跳减小。

(2) 初始条件的微小变化引起了系统响应的巨大差异，当扰动力幅 A 极小时，线性系统的振荡很弱，它对非线性系统的作用也很弱，整个系统的运动便可看作两运动的独立叠加。

(3) 当扰动力幅 A 再加大到使其幅值超过非线性系统三奇点之间的间隔时，系统可以在这些奇点之间来回跃迁振荡，从而使运动复杂化，随扰动力幅 A 的增加，系统从倍周期运动向混运动变化。

参 考 文 献

[1] 秦四清. 斜坡失稳过程的非线性演化机制与物理预报[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(11): 1241—1247.
QIN Si-qing. Nonlinear evolutionary mechanisms and physical prediction of instability of planar-slip slope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(11): 1241—1247.

[2] 王来贵, 黄润秋, 王泳嘉. 岩石力学系统运动稳定性及其应用[M]. 北京: 地质大学出版社, 1998.

[3] 周维垣. 高等岩石力学[M]. 北京: 水利水电出版社, 1993.

[4] CLAES A. Application of probabilistic approach in slope stability analyses[C]//Proceedings of Landslides. Rotterdam: Balkema, 1996: 1137—1142.

[5] BROADBENT C D, KO K C. Rheological aspects of rock slope failures[J]. **Stability of Rock Slopes**, 1971: 573—593.

[6] 章根德, 剡公瑞. 岩体高边坡流变学性状有限元分析[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(2): 166—170.
ZHANG Gen-de, YAN Gong-rui. Finite element analysis for rheological behavior of rock highslope[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(2): 166—170.

[7] 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 Ying-ren, YE Hai-lin, HUANG Run-qiu. 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.

[8] 肖克强, 李海波, 刘亚群, 等. 地震荷载作用下顺层岩体边坡变形特征分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1557—1564.

- [11] 黄雨, 毛无卫. 液化后土体的流态化特性研究进展[J]. 同济大学学报, 2011, 39(4): 501—506.
HUANG Yu, MAO Wu-wei. State of art of fluidization behavior of post-liquefied soils[J]. **Journal of Tongji University**, 2011, 39(4): 501—506
- [12] 黄雨, 郝亮, 谢攀, 等. 土体流动大变形的 SPH 数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1520—1524.
HUANG Yu, HAO Liang, XIE Pan, et al. Numerical simulation of large deformation of soil flow based on SPH method[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(10): 1520—1524.
- [13] 陈育民. 砂土液化后流动大变形试验与计算方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [14] 陈育民, 刘汉龙, 周云东. 液化及液化后砂土的流动特性分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1139—1143.
CHEN Yu-min, LIU Han-long, ZHOU Yun-dong. Analysis of flow characteristics of liquefied and post-liquefied sand[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(9): 1139—1143.
- [15] TOWHATA I, SASAKI Y, TOKIDA K I, et al. Prediction of permanent displacement of liquefied ground by means of minimum energy principle[J]. **Soils and Foundations**, 1992, 32(3): 97—116.
- [16] ORENSE R P, TOWHATA I. Three dimensional analysis of lateral displacement of liquefied subsoil[J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38(4): 1—15.
- [17] TAMATE S, TOWHATA I. Numerical simulation of ground flow caused by seismic liquefaction[J]. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, 1999, 18: 473—485.
- [18] UZUOKA R, YASHIMA A, KAWAKAMI T, et al. Fluid dynamics based prediction of liquefaction induced lateral spreading[J]. **Computers and Geotechnics**, 1998, 22(3/4): 243—282.
- [19] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC^{3D} 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [20] 陈育民, 刘汉龙. 邓肯-张本构模型在 FLAC^{3D} 中的开发与实现[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2123—2126.
CHEN Yu-min, LIU Han-long. Development and implementation of Duncan-Chang constitutive model in FLAC^{3D}[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2123—2126.

上接第 1545 页

- XIAO Ke-qiang, LI Hai-bo, LIU Ya-qun, et al. Study on deformation characteristics of bedding slopes under earthquake[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1557—1564.
- [9] 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): 54—58.
YAN Zhi-xin, ZHANG Liu-ping, CAO Xiao-hong, et al. Dynamic response and deformation mechanism of a bedding rock slope under earthquakes[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(Supp.1): 54—58.
- [10] 龚文惠, 王平, 陈峰. 顺层岩质路堑边坡稳定性的敏感性因素分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 812—816.
GONG Wen-hui, WANG Ping, CHENG Feng. Analysis of sensitivity factors to stability of bedding rock cutting slope[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(4): 812—816.
- [11] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 边坡临界失稳状态的判定标准[J]. 煤炭学报, 2008, 33(6): 643—647.
LIN Hang, CAO Ping, LI Jiang-teng, et al. The standards for critical failure state of slope[J]. **Journal of China Coal Society**, 2008, 33(6): 643—647.
- [12] 李世海, 刘天莘, 刘晓宇. 论滑坡稳定性分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊 2): 3309—3324.
LI Shi-hai, LIU Tian-ping, LIU Xiao-yu. Analysis method for landslide stability[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(Supp.2): 3309—3324.
- [13] 李建林, 刘杰, 王乐华. 多因素作用下隔河岩电站厂房高边坡变形机理及岩体稳定性研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1289—1295.
LI Jian-lin, LIU Jie, WANG Yue-hua. Studies on deformation mechanism and rock mass stability of high slopes of Geheyan power station under multiple factors[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(9): 1289—1295.
- [14] 路为, 白冰, 陈从新. 岩质顺层边坡的平面滑移破坏机制分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 204—207.
LU Wei, BAI Bing, CHENG Cong-xin. Analysis of mechanism of plane sliding failure for bedded rock slopes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp.2): 204—207.
- [15] 杨天鸿, 张锋春, 于庆磊, 等. 露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1437—1472.
YANG Tian-hong, ZHANG Feng-chun, YU Qing-lei, et al. Research situation of open-pit mining high and steep slope stability and its developing trend[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(5): 1437—1472.