

文章编号: 1000-7598 (2011) 04-1205-06

# 节理网络有限元在倾倒斜坡稳定分析中的应用

宋彦辉<sup>1,2</sup>, 黄民奇<sup>3</sup>, 孙 苗<sup>1</sup>

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2. Earth Science Department, Simon Fraser University, Burnaby, B.C, Canada, V5A 1S6;  
3. 中国水电顾问集团西北水电设计院, 兰州 730050)

**摘 要:** 节理网络有限元是指具有节理网络模拟功能的有限元, 它不但能将野外节理统计特征直接输入到模型中, 同时允许节理按一定的破坏准则产生屈服, 从而较好地模拟边坡的实际结构及破坏特征。论述了倾倒变形边坡的分析方法及存在的问题, 介绍了节理网络有限元的功能及参数输入, 说明了其在倾倒变形边坡应用中的优势, 并以黄河上游茨哈峡电站 I 号倾倒体为例, 计算了该倾倒边坡的稳定性及破坏趋势, 结果表明, 节理网络有限元是倾倒变形边坡稳定分析的一种有效、可靠的方法。

**关 键 词:** 节理网络; 有限元; 倾倒; 斜坡; 稳定分析  
**中图分类号:** TU 457      **文献标识码:** A

## Application of finite elements with joint net to stability analysis of toppling slope

SONG Yan-hui<sup>1,2</sup>, HUANG Min-qi<sup>3</sup>, SUN Miao<sup>1</sup>

(1. School of Geology Engineering and Geometrics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Earth Science Department, Simon Fraser University, Burnaby, B.C, Canada, V5A 1S6;

3. Northwest Hydroelectric Investigation & Design Institute of China Hydropower Consulting Group, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The finite elements with joint net is a powerful program which has the function of modeling actual joint net of rock mass slope, it not only permits in-situ statistic parameters of the joints to be input into the model directly, but also gives joints the right to yield according to a certain criterion and thus can better simulate the real rock mass structure of the toppling slope and failure pattern. The stability analysis method of the toppling slope and open questions are discussed; the function and input parameter of the finite elements with joint net are introduced; and its some advantages for stability analysis of toppling slope are explained. A case of toppling slopes from Cihaxia hydropower station at the upper reaches of the Yellow River is calculated using this method to analyze its stability and failure pattern. It is shown that the finite elements with joint net is an effective and matter-of-fact method for the stability analysis of toppling slopes.

**Key words:** joint net; finite elements; toppling; slope; stability analysis

## 1 引 言

倾倒破坏是反倾层状岩石或陡倾顺层岩石边坡及地下开挖中最常见的破坏类型之一。这类失稳破坏模型通常包括弯曲倾倒、块状倾倒、块状弯曲倾倒和次生倾倒等 4 种类型。它们往往使层状岩体边坡产状变缓, 岩层之间发生错动, 并且在倾倒体内部及与正常岩层之间产生近于垂直层理的张性折断破坏。倾倒岩体与正常岩层之间有时呈明显的折断破碎带, 有时则为过渡性接触, 底部界限不甚明确。

对于倾倒破坏岩体的稳定性分析, 国内外都有较多的研究, 归纳起来, 这些研究主要有以下特点:

① 倾倒破坏研究主要以 Goodman 和 Bray 的工作为基础, 针对块状倾倒并运用极限平衡进行分析<sup>[1-5]</sup>。  
② 以物理模拟试验如底摩擦试验<sup>[6]</sup>、离心模拟试验<sup>[7-8]</sup>等为基础, 确立倾倒破坏的模式, 并在此基础上推导建立相应的稳定分析计算公式; ③ 以数值模拟为手段研究倾倒破坏的机制及过程<sup>[9-11]</sup>。数值模拟方法主要为离散单元法、有限差分法、流形元法等, 鲜有运用有限单元法进行研究的文献; ④ 有些研究者还在极限平衡分析基础上, 提出了倾倒岩体稳定分析的可靠性计算方法及图表法等<sup>[12-13]</sup>。

从上述可见, 已有研究主要是针对块体倾倒进行的, 而对于韧性薄层岩体, 其变形破坏方式主要

收稿日期: 2010-03-31

第一作者简介: 宋彦辉, 男, 1968 年生, 博士, 副教授, 主要从事地质工程的教学与研究。E-mail: dcdgx30@chd.edu.cn

为弯曲倾倒,这与块体倾倒的机制有所区别。在野外,常发现已经发生弯曲、倾倒的变形体,其稳定状态不能简单地由已有的各种推导公式来估算,而应考虑该类变形的发展演变进程。这种情况下,薄层岩体往往在最大弯折带形成倾向坡外的断续拉裂面,岩层中原有的垂直层面的裂隙也会被拉开并倾向坡外,此时整个边坡实际上由各单层的弯曲倾倒开始转变为以蠕滑为主的拉裂变形,并最终演变为滑坡<sup>[14]</sup>。因此,对该类边坡的稳定分析也应以此为基础。

然而,这类倾倒-蠕滑边坡稳定分析的困难在于无法准确确定滑面,也难以确定潜在滑带的抗剪强度参数,这为使用极限平衡法带来了困难。尽管使用离散元等方法可以模拟边坡的破坏机理和破坏方式,但由于斜坡密集的节理使该方法的应用受到一定限制。

在有限单元法或有限差分法中引入强度折减系数法能够计算边坡的稳定系数,并且在许多工程中得到了很好运用,但对于弯曲倾倒边坡这类特殊的变形边坡,由于其稳定性及发展演化趋势受控于广泛的倾外节理和折断面网络,以前开发的有限元、有限差分程序难以有效模拟边坡的实际结构。Rocscience公司于近年开发的Phase<sup>2</sup>7.0有限元软件有效地解决了这一问题,它可以模拟岩体中的节理网络,允许沿节理产生剪切破坏。节理网络可以按照野外实测统计结果输入到模型,通常包括节理的产状、间距、长度、位置等,并按照一定破坏准则赋予各组节理相应强度参数。因此,非常适于弯曲倾倒边坡的稳定分析。为该类斜坡的稳定评价提供了一种较佳的途径。

为说明节理网络有限元在弯曲-倾倒变形体中的应用,本文利用Phase<sup>2</sup>7.0计算了黄河上游茨哈峡电站I号倾倒变形体的稳定性,给出了倾倒变形体的稳定系数,并说明了斜坡变形破坏的模式。

## 2 节理网络模拟原理及稳定分析方法

### 2.1 节理网络模拟原理

Phase<sup>2</sup>7.0有限元软件模拟节理网络时,仍将节理网络视为各单条节理的组合,但同时提供了强大的节理网络生成器。不仅允许单条节理、断层的输入,还可以按照节理的统计特征等直接生成一组或多组节理。单条节理的模拟采用无厚度接触单元模拟节理的不连续性,节理的剪切变形行为服从库仑定律,即:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中: $\tau$ 为节理面的抗剪强度; $c$ 为节理面的凝聚力; $\sigma$ 为作用于节理面上的正应力; $\varphi$ 为节理面内摩擦角。

当节理面上的剪应力超过其抗剪强度时,节理面将产生剪切变形,从而使斜坡应力-应变场进行相应调整进而影响整个斜坡的变形破坏行为。

### 2.2 稳定分析方法

稳定分析方法采用剪切强度折减法,其基本原理是将斜坡强度参数凝聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 同时除以一个折减系数 $F$ ,得到一组新的 $c_f$ 、 $\varphi_f$ 值,即

$$c_f = c / F \quad (2)$$

$$\varphi_f = \varphi / F \quad (3)$$

然后将 $c_f$ 、 $\varphi_f$ 作为一组新的材料参数输入,再进行试算,如此反复。当计算不收敛时,意味着斜坡不能同时满足摩尔-库仑准则(或其他破坏准则)及整体平衡的应力分布,表明斜坡破坏已经产生,此时对应的折减系数 $F$ 即为斜坡的稳定系数。其中折减系数 $F$ 值的选取由程序根据各步计算结果自动调整。

## 3 倾倒变形体工程地质特征

### 3.1 场地地质特征

研究边坡为茨哈峡电站I号倾倒体,发育于坝址左岸岸坡,规模较大,沿河谷长约2 km,发育高程上至坡顶,下部接近坡脚,相对高差约400 m,平均坡度约42°。

倾倒体发育岸坡出露的地层主要为三叠系板岩、砂岩,印支期中酸性侵入岩脉( $\gamma_5$ )、第三系泥岩及第四系冲洪积、坡积覆盖物。坡体主体由三叠系中统( $T_2-S_1$ )薄层板岩局部夹砂岩组成,下部至坡脚部位主要由灰绿色砂岩夹灰色板岩( $T_2-S_3+S_1$ )组成,典型河谷岸坡剖面如图1所示。

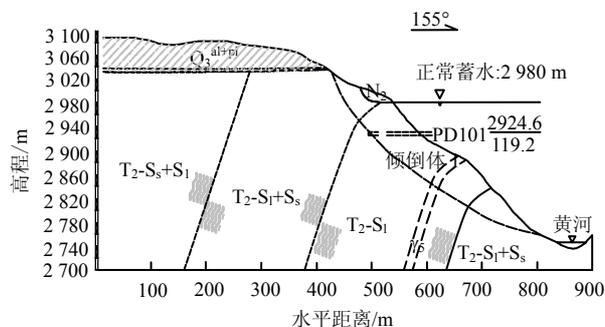


图1 I号倾倒体典型断面

Fig.1 The typical section of toppling slope No. I

### 3.2 倾倒体地质特征

I号倾倒体基岩正常产状一般为 $320^\circ \sim 350^\circ \angle$

60°~80°，倾向坡内。边坡浅表部岩体均发生了明显的弯曲倾倒，其变形破坏主要以岩层的弯曲倾倒及其伴随的破裂为主（见图 2），具体表现为如下几个方面：



图 2 弯曲倾倒变形

Fig.2 The flexural toppling deformation of rock mass

(1) 岩层倾角的变化

在水平方向上由浅至深倾倒程度不同，总体上，岩层倾角随深度的增大有逐渐增大的趋势，至一定深度后开始转变为正常岩层产状。表明岸坡岩体的倾倒变形随深度的增大有逐渐减弱的趋势，靠近坡体浅表部，倾倒变形最为强烈。

(2) 岩层弯曲拉裂变形

由于岩层弯曲倾倒，从而导致岩层沿板理面或层间软弱带、层间断层产生拉张错动，形成楔形张裂缝，局部尚有岩体的折断现象。在板岩与砂岩接触部位，由于应力作用及岩体性质的差异，均形成拉裂带。

(3) 倾倒体岩体弹性波速较低

倾倒体纵波波速值较低，变化范围为 1 120~2 340 m/s，表明岸坡岩体发生了明显的松动变形。

由于组成 I 号倾倒体的物质主要为薄层板岩，从变形特征上可明显看出，坡体的变形破坏机制大致为：①卸荷回弹使层状岩体沿层面拉裂，并在自重弯矩作用下从前缘开始向临空方向作悬臂梁弯曲，并逐渐向坡内发展；②弯曲变形产生的张应力超过岩层的抗张强度时，在弯曲岩层内产生一组与

弯曲岩层面近直交的折断面；③在重力作用下，弯曲变形的岩层沿断续折断面等产生缓慢蠕滑变形。

## 4 节理网络有限元模拟

### 4.1 节理有限元模拟

为分析该弯曲倾倒边坡的稳定性，利用 Phase<sup>2</sup>7.0 有限元程序进行模拟，建模原型见图 1，根据弯曲倾倒体特征，模型结构可分为 3 部分，其一为强烈倾倒部分，倾倒后的岩层倾角约为 36°，倾向坡内，除此之外，尚有一组与之近于正交的倾外节理或折断面，该部分中板理面为无限长延伸，倾外节理或折断面仅限于板理面之间；其二为弱倾倒部分，该部分由于岩层较薄，故只产生岩层的弯曲，模型中只考虑弯曲后的板理面，倾角约为 50°，倾向坡内，无限长延伸；其三为未发生变形的正常岩层，岩层倾角约为 70°，倾向坡内。由此构建的计算模型如图 3 所示。

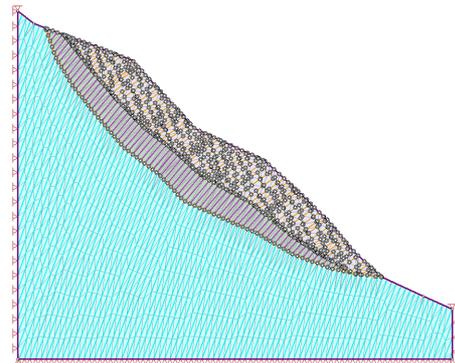


图 3 节理网络有限元模型

Fig.3 The model of finite elements with joint net

由于板岩为薄层，层面间距很小，仅十几厘米，若按实际输入，计算量将非常大，因此，为简化计算，层面间距适当放大。其他参数则为实际原型参数，由野外实测统计所得。板理面、节理或折断面的分布形式均为正态分布，发育位置为随机分布。破坏准则采用摩尔-库仑破坏准则。节理网络的输入参数如表 1 所示。

表 1 节理网络输入参数

Table 1 Input parameters of joint net

岩层性质	节理网络型式	节理间距				节理长度	节理倾角 / (°)	端点型式	发育位置		
		分布形式	平均值/m	方差	最大值 /m					最小值 /m	
强烈倾倒岩层	两组交互节理	板理面	正态分布	3	0		无限长	36	全部张开	随机	
		折断面、倾外节理	正态分布	5	1	8	2	限于板理面之间	54	全部张开	随机
弱倾倒岩层	平行（变形的板理面）		等间距	3	0	3	3	无限长	50	张开	随机
正常岩层	平行（板理面）		等间距	3	0	3	3	无限长	70	闭合	随机

根据上述模型，在天然重力场条件下计算该边坡的稳定性，计算参数列于表 2、3。

表 2 岩体有限元模拟参数

Table 2 The parameters of rock mass for the use of finite elements modeling

岩层性质	天然重度 /( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	弹性模量 /GPa	泊松比	峰值指标			残余指标		
				抗拉强度 /MPa	内摩擦角 /( $^\circ$ )	凝聚力 /MPa	剪胀角 /( $^\circ$ )	内摩擦角 /( $^\circ$ )	凝聚力 /MPa
强烈倾倒	27	2	0.35	0	35	0.5	0	30	0.2
弱倾倒	27	4	0.32	0	40	1.0	0	30	0.2
正常	27	15	0.30	0	45	3.0	0	30	0.2

表 3 节理有限元模拟参数

Table 3 The parameters of rock mass for the use of finite elements modeling

岩层性质	抗拉强度 /MPa	凝聚力 /MPa	内摩擦角 /( $^\circ$ )	法向刚度 /(GPa/m)	切向刚度 /(MPa/m)
板节理	0.0	0.5	35	100	500
强烈倾倒节理或折断面	0.0	0.0	35	100	100
弱倾倒	0.2	1.0	40	100	200
正常岩层	不允许沿板理产生破坏				

4.2 模拟结果分析

计算的弯曲倾倒边坡的最大、最小主应力如图 4、5 所示，变形矢量如图 6 所示，总位移及变形等值线如图 7 所示，屈服单元及屈服节理如图 8~10 所示。

根据计算结果可知，用有限元强度折减法计算的边坡稳定系数为 2.05，处于稳定状态。强烈倾倒部分岩体中最小主应力均为 0，处于完全松弛状态。受岩体中节理网络的影响，最大、最小主应力图与无节理网络有限元模拟结果有明显不同（见图 4、5），主要表现为其等值线受节理网络控制呈明显不规则的锯齿状或楔状。边坡最大位移发生在坡脚强烈倾倒岩层内及整个边坡的浅表部。运动破坏形式主要为强烈倾倒岩层向坡下的蠕动变形（见图 6、7）。目前状态下，弯曲倾倒岩体主要沿最大弯折带及坡脚处产生剪切破坏，而在坡体浅表部，尤其是坡缘部位，主要为张拉破坏（见图 8）。潜在滑动破坏面为追踪最大弯折带附近的倾外节理及折断面。

图 9 表明，在弯曲倾倒斜坡的演变过程中，沿节理网络均产生剪切应力，剪切方向遵循力学原理。将图 9 (a) 中方框部分放大即为 9 (b) 所示的剪切运动局部图。从而在模拟岩体内形成更为复杂的应力分布体系。当实际剪切应力大于由节理面  $c$ 、 $\varphi$  值决定的抗剪强度时，节理沿剪切方向产生屈服滑移（见图 10），使坡体内应力重新调整，调整后的应

力重新作用于岩体和节理，从而使更多岩体和节理单元产生相应屈服直至破坏或最终达到平衡状态。

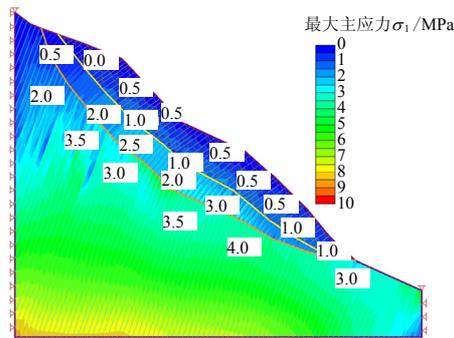


图 4 最大主应力图

Fig.4 The diagram of maximum principal stresses

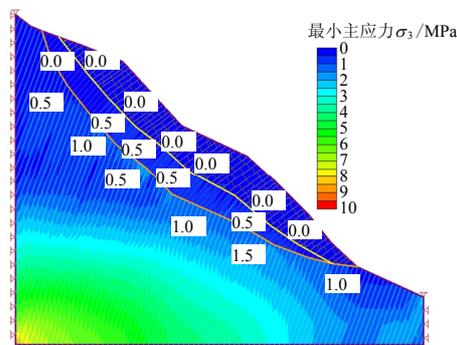


图 5 最小主应力图

Fig.5 The map of minor principal stresses

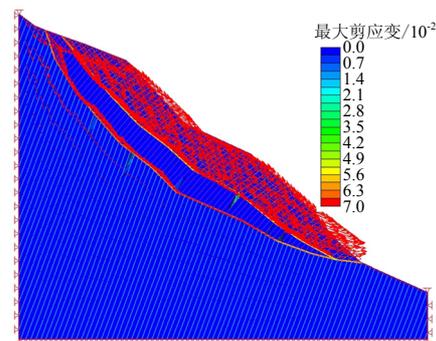


图 6 变形矢量图

Fig.6 Vector diagram of deformations

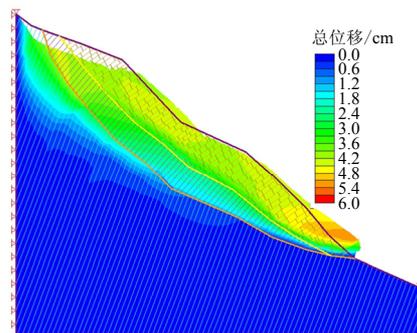


图 7 总位移及变形图

Fig.7 Diagram of total displacement and deformation

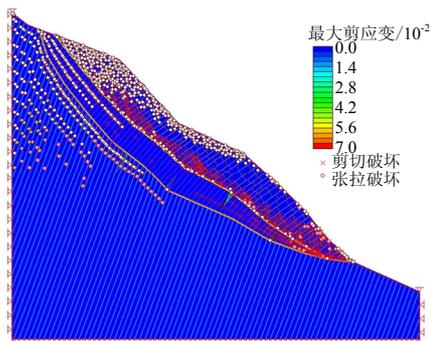
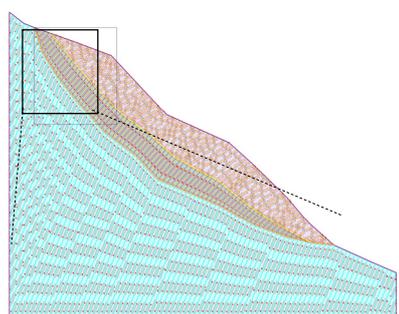
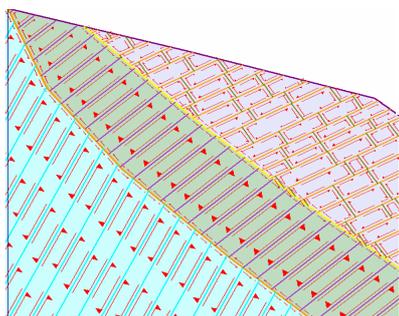


图 8 屈服单元图  
Fig.8 Distribution diagram of yielded elements



(a) 整体图



(b) 局部放大图

图 9 斜坡岩体沿节理的剪切运动  
Fig.9 Shear movements along joints

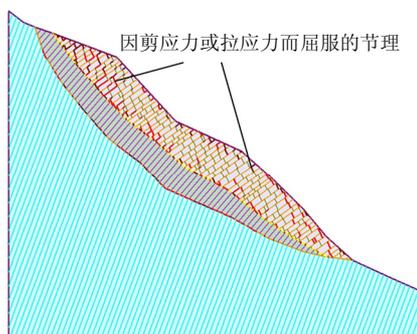


图 10 屈服节理图  
Fig.10 Distribution diagram of yielded joints

综上所述表明，已发生弯曲倾倒变形的斜坡，在自然条件下其后续的变形破坏机制将以滑移-拉

裂为主，沿节理网络的剪切变形控制了斜坡的变形趋势。

### 5 结 论

(1) 弯曲倾倒边坡的稳定分析问题至今仍未得到很好的解决。已有的极限平衡方法尽管在许多学者的努力下有了很大的改进和提高，但仍只适用于单一折断面或节理切割面上部岩块的倾倒稳定分析，而实际弯曲倾倒边坡往往被一组倾外的剪节理及拉张节理所切割，从而使该类变形边坡节理化严重，尤其是边坡的浅表部。因此，极限平衡法的假设与实际有一定差距，故其应用受到很大的限制。

(2) 离散单元法、有限差分法（如 FLAC）等能够模拟倾倒岩体的大变形特征，但在模拟倾倒岩体的节理网络上却受到限制，从而使其计算结果受到一定影响。

(3) 本文采用具有模拟节理网络功能的有限元分析倾倒边坡的稳定性，不仅能够使计算模型与实际边坡结构高度一致，而且由于程序允许所有节理产生剪切失效，从而使斜坡应力应变场的计算结果更趋于真实合理。

(4) 节理网络有限元计算结果不但可以获得变形斜坡的稳定系数，而且可以从分析图中获知边坡破坏的部位及发展趋势。因此，这一方法用于研究弯曲倾倒边坡的稳定性，解决了目前这一领域长期存在的无“法”可算的困境，提供了一种有效、合理的分析途径。

### 参 考 文 献

[1] ADHIKARY D P, DYSKIN A V, JEWELL R J, et al. A study of the mechanism of flexural toppling failure of rock slopes[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1997, 30(2): 75—93.

[2] BOBET A. Analytical solutions for toppling failure[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1999, 36(7): 971—980.

[3] LIU C H, JAKSA M B, MEYERS A G. Improved analytical solution for toppling stability analysis of rock slopes[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008, 45(8): 1361—1372.

[4] 王建锋, WILSON H T, 崔政权. 块状岩体边坡倾倒破坏稳定性分析[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2001, 12(4): 1—8.

WANG Jian-feng, WILSON H T, CUI Zheng-quan. Stability analysis of toppling failure of block rock

- slopes[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2001, 12(4): 1—8.
- [5] 陈祖煜, 张建红, 汪小刚. 岩石边坡倾倒稳定分析的简化方法[J]. **岩土工程学报**, 1996, 18(6): 92—95.  
CHEN Zu-yu, ZHANG Jian-hong, WANG Xiao-gang. Simplified method for the stability analysis of toppling slope of rock mass[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(6): 92—95.
- [6] 张勤春, 祖国林, 申力. 倾倒滑移体的变形模拟试验研究[J]. **露天采煤技术**, 2002, (1): 18—21.  
ZHANG Qin-chun, ZU Guo-lin, SHEN Li. Trial study of deformation simulation of toppled sliding mass[J]. **Opencast Coal Mining Technology**, 2002, (1): 18—21.
- [7] ZHANG J H, CHEN Z Y, WANG X G. Centrifuge modeling of rock slopes susceptible to block toppling[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 2007, 40(4): 363—382.
- [8] 汪小刚, 张建红, 赵毓芝, 等. 用离心模型研究岩石边坡的倾倒破坏[J]. **岩土工程学报**, 1996, 18(5): 14—21.  
WANG Xiao-gang, ZHANG Jian-hong, ZHAO Yu-zhi, et al. Investigations on mechanism of slope toppling failure by centrifuge model testing[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 18(5): 14—21.
- [9] LANARO F, JING L, STEPHANSSON O, et al. DEM modelling of laboratory tests of block toppling[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1997, 34(3/4): 173.
- [10] ISHIDA T, CHIGIRA M, HIBINO S. Application of the distinct element method for analysis of toppling observed on a fissured rock slope[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1987, (20): 277—283.
- [11] 张国新, 赵妍, 彭校初. 考虑岩桥断裂的岩质边坡倾倒破坏的流形元模拟[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(9): 1773—1780.  
ZHANG Guo-xin, ZHAO Yan, PENG Xiao-chu. Simulation of toppling failure of rock slope by numerical manifold method considering fracture of rock bridges[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1773—1780.
- [12] SCAVIA C, BARLA G, BERNAUDO V. Probabilistic stability analysis of block toppling failure in rock slopes[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1990, 27(6): 465—478.
- [13] BRYAN S A, TATONE G G. Rocktopple: A spreadsheet-based program for probabilistic block-toppling analysis[J]. **Computers & Geosciences**, 2010, 36(1): 98—114.
- [14] 张倬元, 王士天, 王兰生. **工程地质分析原理**[M]. 地质出版社, 北京: 1994.

---

#### 上接第 1204 页

- [15] TATSUOKA F, ISHIHARA M, DI BENEDETTO H, et al. Time-dependent shear deformation characteristics of geomaterials and their simulation[J]. **Soils and Foundations**, 2002, 42(2): 103—129.
- [16] 彭芳乐, 李福林, 李建中, 等. 加载速率变化条件下砂土的黏塑特性及本构模型[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(8): 1576—1585.  
PENG Fang-le, LI Fu-lin, LI Jian-zhong, et al. Viscoplastic behaviors and constitutive modeling of sands under change of loading rates[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1576—1585.
- [17] 彭芳乐, 李福林, 白晓宇, 等. 考虑应力路径和加载速率效应砂土的弹黏塑性本构模型[J]. **岩石力学与工程学报**, 2009, 28(5): 929—938.  
PENG Fang-le, LI Fu-lin, BAI Xiao-yu, et al. Elasto-viscoplastic constitutive model of sandy soil considering stress path and loading rate[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(5): 929—938.
- [18] HOQUE E, TATSUOKA F. Anisotropy in elastic deformation of granular materials[J]. **Soils and Foundations**, 1998, 38(1): 163—179.
- [19] 彭芳乐, 李福林, 江智森, 等. 任意加载条件下土工合成材料的弹黏塑性及本构模型[J]. **工程力学**, 2009, 26(8): 50—58.  
PENG Fang-le, LI Fu-lin, KONGKITKUL W, et al. Elasto-viscoplastic behavior and constitutive modeling of geosynthetic reinforcements under arbitrary loading[J]. **Engineering Mechanics**, 2009, 26(8): 50—58.