

基于数字图像技术的土石混合体边坡稳定性分析

徐文杰¹, 王玉杰¹, 陈祖煜¹, 胡瑞林²

(1. 中国水利水电科学研究院 岩土工程研究所, 北京 100044; 2. 中国科学院 工程地质力学重点实验室, 北京 100029)

摘 要: 土石混合体作为自然界中常见的一类岩土体, 尤其在西南地区存在着不同成因及规模的土石混合体边坡, 这些边坡的稳定性问题对于工程在施工及运营期间的安全性有着重要的意义。在传统的边坡稳定性分析中, 通常将土石混合体边坡视为均质土坡, 忽略其内部块石的存在, 这给计算结果带来了很大的误差。运用数字图像处理技术, 对西南地区一土石混合体边坡进行分析, 建立其细观结构模型。在此基础上, 运用有限元强度折减法开展相应的稳定性研究。结果表明, 块石的存在使边坡内部应力场分布变得极其不均匀, 计算搜索得到的滑动带具有明显的绕石特征, 考虑块石时计算得到的稳定系数要较等效均质土坡的稳定系数高。

关 键 词: 土石混合体边坡; 细观结构; 数字图像处理; 强度折减法; 边坡稳定分析

中图分类号: TU 413

文献标识码: A

Stability analysis of soil-rock mixed slope based on digital image technology

XU Wen-jie¹, WANG Yu-jie¹, CHEN Zu-yu¹, HU Rui-lin²

(1. Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100044, China;

2. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: Soil-rock aggregate is a kind of common geomaterial, especially in southwest of China, there are different genetic types and different scales of soil-rock mixed slopes. The stability of these slopes is very important to the slope safety during the construction and the operation of engineering project. In the traditional slope stability analysis, soil-rock mixed slope is always regarded as homogeneous soil slope, and rock blocks are neglected. By this way, the result of slope stability analysis may have large error. Using digital image processing technique, a soil-rock mixed slope is analyzed, and its microstructure model is built. Then, by using FEM shear strength reduction method, the stability of the slope is analyzed based on its real structure. The results indicate that rock blocks make the internal stress field became very heterogeneous, the sliding zone of the soil-rock mixed slope obtained by shear strength reduction method is very zigzag. The stability factor of the soil-rock mixed slope based on its real structure model is higher than that of homogeneous soil slope.

Key words: soil-rock mixed slope; meso-structure; digital image processing; strength reduction method; slope stability analysis

1 概 述

土石混合体是指第四纪以来形成的, 由具有一定工程尺度、强度较高的块石、细粒土体及孔隙构成且具有一定含石量的极端不均匀松散岩土介质系统。土石混合体作为自然界中常见的一类岩土体, 也成为各类工程建设中经常遇到的一种地质体。尤其是随着我国西南地区各类大型乃至巨型水电项目的不断展开, 库区、近坝区等广泛存在着不同成因及规模的土石混合体斜坡^[1-9]。如: 雅砻江锦屏 I 级水电站仅近坝库岸就分布有呷爬、水文站、四家人

等 5 处大型滑坡、冲积、冰碛及洪积成因的土石混合体斜坡^[10]; 澜沧江小湾水电站左岸土石混合体斜坡是枢纽区规模最大、紧邻坝基的工程边坡, 其最大开挖高度达 700 余米^[11]; 大渡河双江口水电站近坝区广泛分布着冰水成因的土石混合体斜坡, 等等。

然而, 目前在对土石混合体边坡稳定性分析时, 由于现有技术条件的限制通常将边坡视为均匀土质边坡, 参数采用细粒组分的参数来近似代替。这种处理方法无论在边坡结构及参数选择上都进行了很大程度的简化, 忽略了土石混合体内部“块石”(尤其是巨型“块石”)在控制边坡稳定性方面的作用,

从而给计算分析带来了误差。

随着计算机硬件技术及图像理论的迅速发展,数字图像处理已为现代科学技术的发展提供了一项必不可少的技术手段,并相继应用于多种学科领域,如在医学、生物、航空航天及岩土工程中均得到了广泛的应用,并取得了可喜的成果。Kwan 等^[1]采用数字图像处理技术对水泥混凝土中粗骨料的形状、分布、骨料的延伸率等进行了研究;岳中琦等^[2]运用数字图像处理技术对沥青混凝土中骨料的大小、形状、分布及排列方式进行了研究;T. Lebourg 等^[3]基于数字图像处理技术对冰水堆积物中块体的大小和形状进行了研究。近年来,岳中琦等^[4,5]提出了数字图像有限元分析的概念,并采用数字图像处理技术对香港地区花岗岩的内部结构进行分析,建立了其真实的内部结构模型,将图像结构转换为矢量模型,再运用有限元数值模拟技术进行了非均质力学分析。徐文杰等^[6-9]采用数字图像处理技术研究了土石混合体内部细观结构特征,并采用有限元技术对建立的细观结构模型进行了相应细观力学数值试验研究。

鉴于目前数字图像处理及有限元数值模拟技术的飞速发展,本文以西南地区一土石混合体边坡为例,利用数字图像处理技术建立了真实的细观结构模型,并通过有限元数值模拟技术对该土石混合体边坡的稳定性进行了分析研究。

2 土石混合体边坡细观结构模型建立

2.1 数字图像处理技术

数字图像处理技术是计算机图形深入应用和高层应用的一个极其广泛的领域,它把来自照相机、摄像机、扫描装置、医用 CT 机等图像,经过数学变换后得到存储在计算机中的数字图像信息,再由计算机进行分析和处理,最后得到所需要的各种结果。数字图像在计算机中是由矩形排列的一系列像素点构成,在灰度图像中每个像素点对应一个整数值,用以表示该点的亮度,即灰度。常见的 256 色或二值化图像,其灰度值为 0~255 和 0~1。整个图像便由相应的具有不同灰度值的像素点阵构成,不同的灰度值分别代表了图像所包含的不同信息。

使用相机或其他图像获取设备得到的岩土工程材料图像包含了这些材料的丰富信息,这些信息则会通过相应的灰度值或色彩来反映。因此,我们可以通过土石混合体边坡断面图像的不同像素点所反映的灰度或色彩的变化来获取其内部结构特征信

息,提取其内部块石边界及空间分部信息,进而用于边坡稳定性分析。图 1 显示了基于土石混合体边坡真实结构的稳定性分析流程。

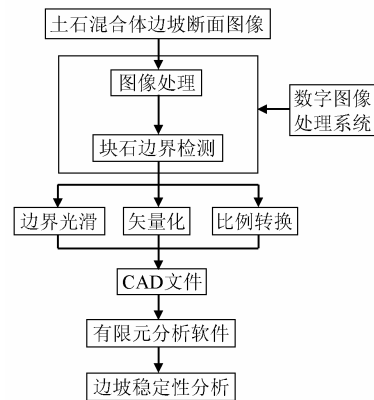


图 1 基于土石混合体边坡真实结构的稳定性分析系统
Fig.1 Process of the S-RMS stability analysis based on its real structure

2.2 土石混合体边坡图像处理

由于外界各种因素(如光照、断面的平整度、块体与周围填充土体的色彩差异性等)的影响,采用数码相机获得的土石混合体边坡断面图像通常存在大量的图像噪音而难以直接用于数字图像分析,如图 2。为此,首先要利用已有的图像处理软件(如 Photoshop 等)对原始图像进行处理,以消除这些不良因素。

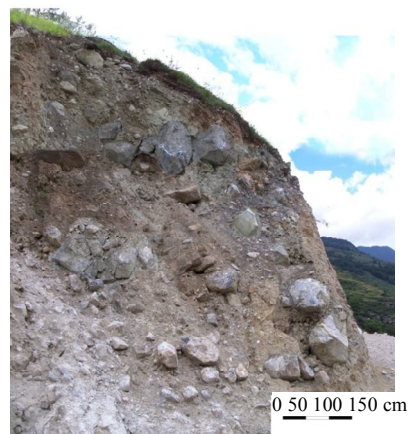


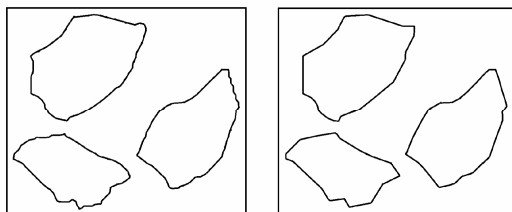
图 2 土石混合体边坡断面照片
Fig.2 Cross section of S-RMS

利用本文开发的数字图像处理系统,对上述经预处理后的土石混合体边坡断面照片分别进行二值化及边缘检测分析,提取相应的块石边界及边坡边界信息以用于下述土石混合体边坡结构模型建立。

2.3 土石混合体边坡细观结构模型建立

经过上述图像处理技术获得的边坡结构模型为二元图像,其尺寸表示为像素单位与其实际尺寸(单

位 m) 不同。另一方面, 这种二元图像不能直接为有限元等数值模拟软件所接受, 且各块石的边界为由灰度值为 0 的一系列像素点互连而成, 若直接将每个像素点的连线作为有限元模型的边界, 其边界将非常不规整 (如图 3(a)), 在划分网格时每个像素点均将成为有限元单元的节点, 这势必会给有限元网格划分带来巨大的困难, 甚至在数值计算会因网格畸变而导致数值模拟的失败。



(a)边缘检测得到块体边界 (b)边界光滑后块体边界(阈值 1)

图 3 边界光滑化前后块体边界对比示意图

Fig.3 Comparison between the boundary of the block pre and post the smooth processing

因此, 在进行数值计算前必须进行相应的尺寸比例转换、边界光滑处理, 并最终生成有限元或 CAD 软件能接受的格式。

2.3.1 比例转换

由于数字图像是由一系列矩形排列的像素点构成, 其中每个像素点对应于一个正方形, 相邻像素点间的距离与图像所代表的实际尺寸间存在一定的比例关系:

$$S = \frac{L}{N-1} \quad (1)$$

式中: S 为数字图像中每个像素单位对应的实际尺寸; L 为图像在横向或纵向上所对应的实际尺寸; N 为图像在横向或纵向上的像素点数目。

据此, 可将采用数字图像获得的以像素表示的模型尺寸转换为其实际尺寸。

此外, 土石混合体的结构具有明显的相对性, 只有在确定的研究尺度下其细观结构才能唯一确定。因此, 在获取土石混合体细观结构概念模型时一个重要的问题就是如何将其内部的“块石”区分开来, 即“土/石阈值”问题。根据 Medley、Linguist 等及徐文杰等^[6-9] 的研究成果, 本文选取:

$$d_{thr} = 0.05L_c \quad (2)$$

式中: d_{thr} 为土/石的阈值; L_c 为土石混合体的工程特征尺寸, 就边坡而言 L_c 为坡高。

本文所研究的土石混合体边坡高度为 8.5 m, 根据式 (2) 可得其土/石阈值, $d_{thr} = 0.05 \times 8.5 \text{ m} = 4.25 \text{ cm}$ 。根据上述边缘检测获得的各“块体”的像素

尺寸, 并通过式 (1) 转换为其相应的实际尺寸, 进而判定去除粒径小于 d_{thr} 的块体。根据上述数字图像分析结果, 该土石混合体边坡含石量约为 28%, 内部块石最大粒径约为 1.5 m,

2.3.2 边界光滑及几何矢量化

对于边界的“光滑”处理, 本文采用了岳中琦^[4] 提出的构造几何矢量转换算法, 其具体的实现方法如下:

(1) 设定一个阈值 t ;

(2) 找出边界中相距最远的两个像素点 a 、 b , 则这两个像素点的连线将闭合块体划分为两部分, 先考虑其中的一部分;

(3) 搜索该部分所有边界像素点到分割线距离最大的像素点, 分别记录该最大距离 l_{max} 及对应的像素点 c ;

(4) 若 l_{max} 小于 t 则用分割线代表该部分的边界, 考虑下一部分;

(5) 若 l_{max} 大于 t , 则将像素点 c 与前分割线的 2 个端点连线, 再将该部分划分为 2 个小区域, 重复步骤 (3) 和步骤 (4);

(6) 不断循环, 直到每个区间内像素点至其分割线的最大距离均小于 t 为止, 此时产生的新闭合分界线即为所求经几何转换后的块体分界线。

通过这种转换, 得到的块体的新的边界线将消除原来“锯齿状”边界 (图 3 (b)), 更有利于有限元网格划分。通过假定不同的 t , 可以得到一系列新的块体边界, t 值越小, 所得新的边界线将越逼近于原来的块体。本文选取阈值 $t=1$, 此时产生的“新块体”较原块体面积最大误差为 7.1 %, 满足计算需要。

为了使得上述处理后的模型能够成为有限元软件接受的格式, 本文编写了相应的 CAD 接口程序, 以实现将产生的模型导入 AutoCAD 中。图 4 显示了图 2 所示土石混合体边坡图像经边缘检测→比例

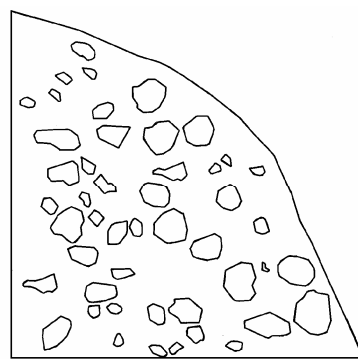


图 4 矢量化土石混合体边坡细观结构模型

Fig.4 Meso-structural model of S-RMS

转换→边界光滑,并最终转换为 AutoCAD 格式的矢量结构模型。

3 土石混合体边坡稳定性分析

为了减少数值计算过程时边界效应的影响,对图 4 所示模型左侧进行了延拓(延拓部分采用均质土体来代替),导入 ABAQUS 软件进行网格划分(图 5)。

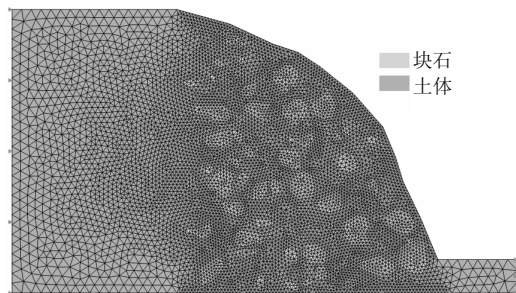


图 5 导入有限元软件网格划分后的土石混合体边坡模型
Fig.5 FEM model of S-RMS

网格划分采用 3 节点三角形单元,网格划分生成的节点总数为 4 439 个,单元总数为 8 583 个。

计算边界条件为:侧面边界采用水平约束;底面边界采用水平、垂直全约束。因为边坡体为土石混合体松散边坡,计算过程中不考虑构造应力作用。构成土石混合体边坡的“土体”和“块石”的物理力学参数见表 1,材料采用 ABAQUS 扩展的 Drucker-Prager 模型。

表 1 土石混合体边坡各组分物理力学参数一览表
Table 1 Physico-mechanical parameters of S-RMS

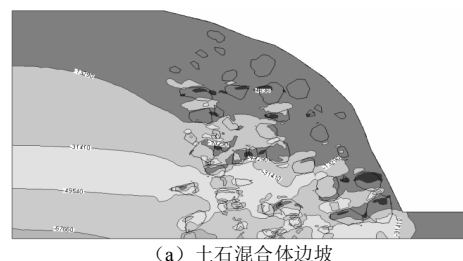
成分	密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	弹性模量 /MPa	泊松比 μ	内聚力 /kPa	内摩擦角 / ($^{\circ}$)
块石	2.41	2e4	0.2	900	42
土体	1.80	50.0	0.35	30	24

为了研究考虑细观结构情况下的土石混合体边坡与简化情况下(视为均质边坡,参数选取土体参数)应力场及稳定分析差异性,本文在研究构成中分别对考虑“块石”存在及不考虑“块石”存在两种情况下的边坡进行了计算分析。

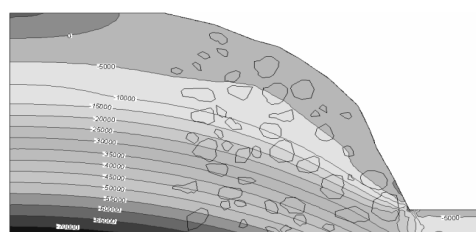
3.1 边坡内部应力场特征

图 6、图 7 分别显示了考虑内部细观结构的土石混合体边坡及其等效土坡内部最大、最小主应力场分布特征。从图中可以看出,“块石”的存在改变了土石混合体边坡内部的应力场分布状态。对于等效均质土坡而言,其应力场从坡面向破体内部呈均匀梯度递减分布,仅在坡脚部位出现应力集中现象;

土石混合体边坡虽然总体上由坡面到坡内也呈现递减趋势,但由于块石的存在其内部应力场变得非常不均匀,应力集中不仅出现在坡脚部位,而且在坡体内部“块石”与土体的接触部位也呈现明显的应力集中现象。

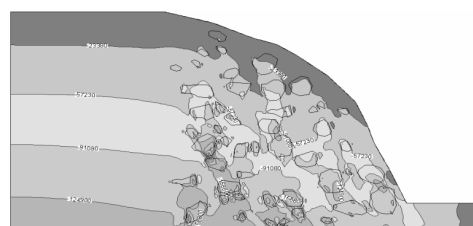


(a) 土石混合体边坡

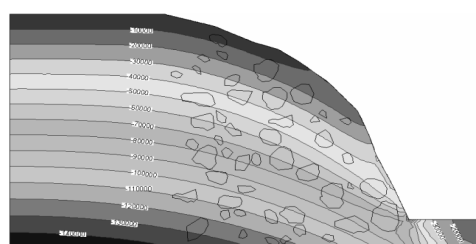


(b) 等效均质土坡

图 6 最大主应力场分布(单位: Pa)
Fig.6 Distribution of the major principal stress (unit: Pa)



(a) 土石混合体边坡



(b) 等效均质土坡

图 7 最小主应力场分布(单位: Pa)
Fig.7 Distribution of the minimum principal stress (unit: Pa)

土石混合体边坡内部在细观层次上的这种独特的应力场分布状态,势必影响着其稳定性状态、变形趋势及失稳机制。

3.2 稳定性分析

由于土石混合体边坡复杂的内部结构特征,难以采用传统的极限平衡法对其稳定性进行分析。随着计算机技术及岩土材料的非线性弹塑性有限元计算技术的发展,基于有限元强度折减技术的边坡稳

定性分析方法,近年来受到国内外岩土工程界的青睐,取得了较好的成果,并证实了该法应用于工程实践中的可行性。由于采用有限元强度折减法进行稳定性分析时无需预先指定滑动面、可以考虑边坡内部应力场状态,且在复杂边坡的稳定性分析时具有其他传统分析方法无可比拟的优势,该法在岩土工程边坡稳定性分析领域取得了飞速的发展^[12-16]。

为探索土石混合体边坡内部块石存在对其稳定性的影响,本文在研究过程中采用有限元强度折减法对土石混合体边坡及其等效均质土坡的稳定性进行了分析。此外,为进一步验证有限元强度折减法分析结果,采用极限平衡法(Spencer法)对等效均质土坡的稳定性进行了分析。图8显示了通过有限元强度折减法获得的土石混合体边坡及其等效均质土坡潜在滑动面。

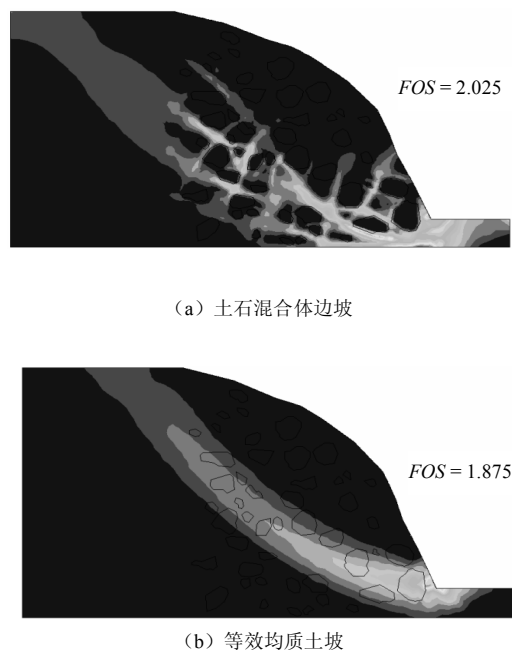


图8 有限元强度折减分析结果

Fig.8 Analysis results by FEM strength reduction method

根据上述有限元强度折减结果可以看出,考虑“块石”存在后土石混合体边坡稳定系数($FOS = 2.025$)较相应等效均质土坡的稳定性($FOS = 1.875$, 极限平衡分析结果为1.95)有着明显的上升。由于“块石”的存在使边坡内部滑动面形态和位置较相应等效均质土坡有着明显的改变,特别是由于坡脚部位存在有两块较大的“块石”,使得剪出口发生明显的改变,这对边坡的稳定性极为有利。

此外,土石混合体边坡在剪切滑动带中并不像均质土坡那样为一圆弧形,而是呈现多滑动面现象,滑面较为曲折具有明显的绕石特征,这与现场水平

推剪试验获得的滑动面形态特征是一致的。滑动带的这种曲折性,增加了其抗剪强度,从而提高了其稳定性。

综上所述可以看出,传统的极限平衡稳定性分析将土石混合体边坡简化为均质土坡,搜索得到的滑动面与实际滑动面差别很大,从而给实际工程带来很大的误差。这也说明了实际工程中,有许多土石混合体边坡采用常规的极限平衡法计算得到的稳定系数小于1(失稳),而实际情况下边坡仍然稳定存在的原因。

4 结 语

土石混合体边坡在自然界中有着广泛的分布,在传统的边坡稳定分析中常忽略其内部块石的作用,而将其视为均质土坡,这势必给分析结果带来了很大的误差。

基于数字图像处理技术,通过对西南地区一土石混合体边坡断面图像的分析,建立了相应的细观结构模型。在此基础上,采用有限元强度折减法对其稳定性进行了分析研究,其结果表明:由于块石的存在,使边坡内部应力场变得极其不均匀;剪切滑动带较为曲折,具有明显的绕石现象;考虑边坡内部块石时的稳定系数要较等效均质土坡的计算得到的稳定系数高。

综上所述,土石混合体内部的块石的存在,尤其是巨型块石的存在,对边坡的稳定性有着很大的影响。在进行土石混合体边坡稳定性分析时,应尽量利用现有先进技术(如数字图像处理技术、高精度地球物理探测技术等)探测其内部巨型块石的空间分布特征,并在此基础上进行相应的稳定分析,这对于合理优化类似边坡设计具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] KWAN A K H, MORA C F, CHAN H C. Particle shape analysis of coarse aggregate using digital image processing[J]. *Cement & Concrete Research*, 1999, 29: 1 403—1 410.
- [2] YUE Z Q, MORIN I. Digital image processing for aggregate orientation in asphalt concrete mixtures[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1996, 23: 479—489.
- [3] LEBOURG I, RISS J, PIRARD E. Influence of morphological characteristics of heterogeneous moraine

- formations on their mechanical behaviour using image and statistical analysis[J]. **Engineering Geology**, 2004, 73: 37—50.
- [4] YUE Z Q, CHEN S, THAM L G. Finite element modeling of geomaterials using digital image processing[J]. **Computers and Geotechnics**, 2003(30): 375—397.
- [5] CHEN S, YUE Z Q, THAM L G. Digital Image-based numerical modeling method for prediction of inhomogeneous rock failure[J]. **Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004(41): 939—957.
- [6] 徐文杰, 胡瑞林, 岳仲崎, 等. 土石混合体细观结构及力学特性数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (2): 300—311.
- [7] XU W J, YUE Z Y, HU R L. Study on the mesostructure and mesomechanical characteristics of the soil-rock mixture using digital image processing based finite element method[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(5): 749—762.
- [8] 徐文杰, 胡瑞林, 岳仲崎. 基于数字图像处理的土石混合体细观结构研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2008, 27(1): 51—53.
- [9] 徐文杰. 土石混合体细观结构力学及其边坡稳定性分析[D]. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2008.
- [10] 丁秀美. 西南地区复杂环境下典型堆积(填)体斜坡变形及稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2005.
- [11] 中国水利水电建设集团公司. 700 米级高陡边坡及堆积体开挖与锚固施工技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [12] DUNCAN J M. State of the art: Limit equilibrium and finite-element analysis of slope[J]. **Journal of Geotechnical Engineering, ASCE**, 1996, 122(7): 577—596.
- [13] UGAI K. A method of calculation of total factor of safety of slopes by elastic-plastic FEM[J]. **Soils and Foundations**, 1989, 29(2):190—195.
- [14] 郑颖人, 赵尚毅, 邓卫东. 岩质边坡破坏机制有限元数值模拟分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (12): 1 943—1 952.
- [15] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3 381—3 388.
- [16] 徐文杰, 胡瑞林, 岳中琦, 等. 虎跳峡龙蟠右岸边坡稳定性的数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1 996—2 004.