

文章编号: 1000-7598-(2013) 增 1-0393-06

基于复杂结构精细描述的岩质高边坡稳定性分析

杜朋召¹, 刘 建¹, 韩志强¹, 徐 华²

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 湖北省随岳高速公路管理处, 武汉 430050)

摘 要: 用数值方法对岩质高边坡进行稳定性分析时, 描述岩体结构对的精细程度会影响分析结果, 但常见的有限单元法程序仍难以对复杂节理岩体进行精细建模。为解决这一问题, 将结构面网络模拟与离散单元法相结合, 在 UDEC 软件中, 利用 FISH 语言编写网络模拟程序, 依据结构面统计资料和结构面分级, 实现对复杂岩体结构的精细描述。以某大型水电工程边坡为例, 在对岩体结构进行精细描述的基础上, 采用离散元强度折减法对边坡进行稳定性分析。通过与极限平衡法和一般离散元结果的对比, 表明基于复杂岩体结构精细描述确定的边坡潜在滑动面和安全系数是合理的, 为复杂岩质边坡破坏模式和稳定性的分析提供了新的途径。

关键词: 岩质边坡; 精细描述; 离散元; 强度折减法; 稳定性分析

中图分类号: TU 472

文献标识码: A

Stability analysis of high rock slope based on meticulous description of complex structure

DU Peng-zhao¹, LIU Jian¹, HAN Zhi-qiang¹, XU Hua²

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Sui-Yue Expressway Construction Management Office of Province, Wuhan 430050, China)

Abstract: In a numerical method for stability analysis of high rock slope, the analysis results will be influenced by the meticulous extent of description for rock mass structure. However, it is difficult to model meticulously for complex jointed rock mass in finite element method at present. In order to solve the problem, discontinuity network modeling and discrete element method (DEM) are combined used in this essay. Based on statistic data and classification of discontinuity, the meticulous description of complex rock mass structure is realized by network simulation program in UDEC. By means of constructing a fine geological model, strength reduction method based on DEM is presented and applied to the stability analysis of a high slope of a hydropower station. Compared the above results with LEM and general DEM, the numerical results show that the potential sliding surface and safety factor of slope are reasonable, with the usage of meticulous description of complex rock mass structure. Consequently, it will provide a new approach for analyzing the failure mode and stability of complex rock slopes.

Key words: rock slope; meticulous description; discrete elements; strength reduction method; stability analysis

1 引 言

随着西部大开发战略的实施, 我国水电资源的开发已转向西部高山峡谷地区。由于丰富的水力资源, 西部水电工程的数目越来越多, 规模越来越大, 岩质高边坡的稳定性问题已成为影响和制约工程建设与运营的关键技术问题之一^[1]。

我国西部地区受到青藏高原持续隆升的影响, 地形变化大, 区域地质构造复杂, 高山峡谷地貌中

的水电工程边坡, 多为高地应力环境下快速卸荷过程的产物^[2]。由于边坡岩体遭受多期的构造运动及浅表生地质作用的改造, 其内部广泛存在着规模不等、产状不同、性质各异的结构面, 其数目之多在西部诸多水电工程建设中均有体现, 其中漫湾水电站左岸边坡岩体实测结构面有 1 314 条, 龙滩水电站岩体中实测结构面有 7 000 条, 小湾水电站有 18 361 条, 李家峡水电站有 6 800 条等^[3]。

由于结构面分布的随机性、形态的多样性和空

收稿日期: 2012-08-07

第一作者简介: 杜朋召, 男, 1986 年生, 硕士, 主要从事岩体力学与工程方面的研究。E-mail: Zhuimeng0101@163.com

通讯作者: 刘建, 男, 1966 年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石力学与工程理论及应用方面的研究。E-mail: jliu@whrsm.ac.cn

间组合的差异,使高边坡的岩体结构变得非常复杂。目前的数值模拟方法对岩质边坡的变形破坏模式的分析和稳定状态的判断,其结果的可靠性往往取决于岩体结构模型的正确与否^[4]。因此,进行复杂结构的精细描述,构建准确的岩体结构模型,对岩质高边坡的稳定性分析具有重要意义。

复杂岩体结构的精细描述方法,主要是建立在统计学和概率论基础上的结构面网络模拟^[5-6],而传统的网络模拟往往忽略对结构面的分级,且通过网络模拟得到的岩体结构模型与一些数值计算方法(如有限元等)耦合时存在一定的难度。考虑到离散单元法处理非连续介质问题具有的优越性,将其与结构面网络模拟相结合,进而分析岩质边坡的稳定性不失为一种合理的方法。

通用离散元程序 UDEC,在岩质边坡稳定性分析中已经取得了广泛的应用^[7-8],本文利用 UDEC 内嵌的 FISH 语言,编写节理网络模拟程序,并用节理网络对某岩质边坡中大量的节理、裂隙等、

级结构面进行模拟,实现对复杂岩体结构的精细描述。在此基础上,利用离散元强度折减法分析边坡的破坏模式及稳定性,并通过与极限平衡法和一般离散元结果的对比,分析基于复杂岩体结构精细描述确定的边坡潜在滑动面和安全系数是合理性。

2 相关原理

2.1 离散元及强度折减法

离散单元法是 Cundall^[9]于 20 世纪 70 年代提出以解决非连续力学问题的数值计算方法,随后该方法得到迅速发展。离散元以牛顿第二定律为理论基础,将要研究的区域划分为一个个独立的多边形块体单元,单元与单元之间具有一定的初始接触状态,随着块体单元的转动和移动,各单元之间的接触关系不断调整,最终使块体单元达到稳定状态或一直运动。

离散元强度折减法在岩质边坡稳定性分析中的应用已取得了一定的成果^[10-11],其基本思想是在计算过程中,逐渐折减岩土体的力学参数,反复计算直至边坡达到临界状态,此时的折减系数即为边坡的安全系数 F_s ,亦可视为边坡的安全储备系数,公式为

$$\left. \begin{aligned} c_k &= c / F_s \\ \varphi_k &= \arctan(\tan \varphi / F_s) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: c 、 φ 分别为岩土体初始的黏聚力和内摩擦角; c_k 、 φ_k 分别为折减后的黏聚力和内摩擦角; F_s 为边坡安全系数。

本文考虑到复杂岩质高边坡的变形特征,选取关键点的位移曲线趋势作为边坡临界状态的判据,即在折减过程中当位移出现突变时的折减系数为岸坡的安全系数。

2.2 结构面网络模拟

结构面网络模拟是依据实测统计确立的结构面参数及其概率分布,推求服从这些分布规律的几何图形。研究表明,结构面的迹长、间距多服从负指数分布或对数正态分布,倾角多服从正态分布、对数正态分布或均匀分布^[5]。

结构面网络模拟的常用方法是蒙特卡罗(Monte-Carlo)法,又称随机模拟方法^[3-4]。此方法的步骤如下:①建立随机变量的统计概率模型,模拟产生与这个概率模型相似或平行的随机数。②通过抽样统计求得服从这一规律的统计估算值,作为分析问题的数值近似解,得到与实际结构面在统计特征上相同的结构面网络。③利用计算机成图原理生成结构面网络,再现岩体中结构面的分布形态。

3 节理网络模拟在 UDEC 软件中的实现与检验

3.1 节理网络模拟在 UDEC 软件中的实现

在 UDEC 软件中,对节理的模拟,需要确定节理两个端点的坐标^[12]。两端点的坐标可通过节理的倾角,迹长、岩桥和间距计算,如图 1 所示。

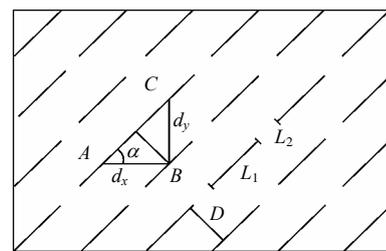


图 1 UDEC 中节理模拟示意图
Fig.1 Sketch of joint simulation in UDEC

设节理迹长为 L_1 ,岩桥长度为 L_2 ,间距为 D ,倾角为 α ; A 点坐标为 (X_t, Y_t) , B 点坐标为 (X_{t+1}, Y_t) , C 点坐标为 (X_{t+1}, Y_{t+1}) ,则有

$$\left. \begin{aligned} X_{t+1} &= X_t + d_x \\ Y_{t+1} &= Y_t + d_y \\ d_x &= D / \sin \alpha \\ d_y &= (L_1 + L_2) \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

节理 A 两个端点的坐标 (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) 为

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= X_i - (L_1 / 2) \cos \alpha \\ Y_1 &= Y_i - (L_1 / 2) \sin \alpha \\ X_2 &= X_i + (L_1 / 2) \cos \alpha \\ Y_2 &= Y_i + (L_1 / 2) \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由坐标 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ ，可以生成节理 A 。同理，可生成其他节理。

依据节理几何参数的分布规律，用迹长、岩桥、间距、倾角的随机变量 $\nabla L_1, \nabla L_2, \nabla D, \nabla \alpha$ 替代确定的 L_1, L_2, D, α ，即可得到满足这一分布的节理网络。

基于上述原理，利用 FISH 语言，编写节理网络模拟程序，在 UDEC 软件中实现对节理、裂隙等 IV、V 级结构面的模拟。节理网络模拟的流程图，如图 2 所示。

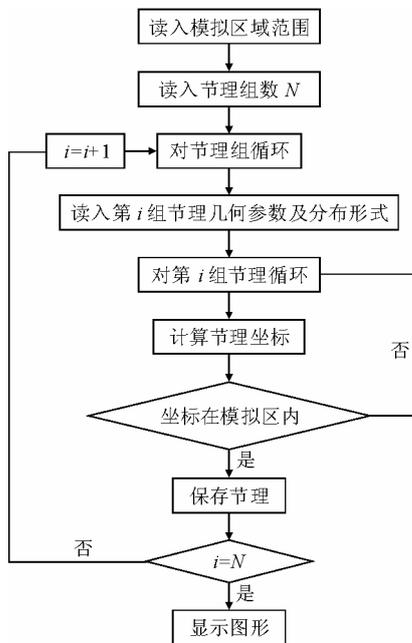


图 2 节理网络模拟流程图

Fig.2 Flowchart of joint network simulation

3.2 UDEC 节理网络模拟程序的检验

为检验 UDEC 节理网络模拟程序的可靠性，采用文献[13]中的数据，在 20 m×20 m 的正方形块体中，生成 4 组随机节理，节理几何参数及其分布规律见表 1。文献[13]模拟结果与本文方法的模拟结果如图 3、4 所示。

表 1 节理几何参数及其分布规律

Table 1 Joint geometric parameters and its distributed regularity

组数 / 组	倾角/(°)			迹长/m			间距/m			连通率 /%
	均值	标准差	分布	均值	分布	均值	标准差	分布		
1	39.7	42.6	对数正态	1.3	负指数	1.0	0.20	负指数	33.3	
2	51.3	7.2	正态	2.0	负指数	0.9	1.06	对数正态	44.4	
3	54.4	57.2	对数正态	2.3	负指数	1.0	0.20	负指数	50.0	
4	87.0	0	定值	2.5	负指数	0.8	0.98	对数正态	51.0	

1	39.7	42.6	对数正态	1.3	负指数	1.0	0.20	负指数	33.3
2	51.3	7.2	正态	2.0	负指数	0.9	1.06	对数正态	44.4
3	54.4	57.2	对数正态	2.3	负指数	1.0	0.20	负指数	50.0
4	87.0	0	定值	2.5	负指数	0.8	0.98	对数正态	51.0

在节理网络模拟中，几何参数满足一定的概率分布，参数的大小在某一范围内是随机的，所以模拟的结果不可能完全相同。从结果的对比中可以看出，节理网络的几何规律是一致的，说明 UDEC 节理网络模拟程序对于 IV、V 级结构面的模拟是可靠的，能够实现对复杂岩体结构的精细描述。



图 3 文献[13]的模拟结果

Fig.3 Result of simulation in 13 reference

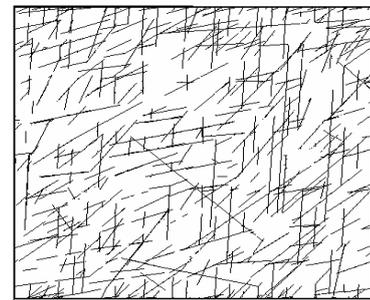


图 4 本文方法的模拟结果

Fig.4 Result of simulation in UDEC

4 工程应用

4.1 工程简介

本文的研究对象为某大型水电工程的库岸边坡，边坡距大坝约 1 000 m。坝址区为典型的深切 V 字型河谷地貌，谷底到岸顶相对高差约 700 m，边坡上陡下缓，坡度为 40°~50°。

4.2 工程地质条件

区域岩体为中生代印支期花岗岩，由于长期风化、卸荷等外生地质营力作用，边坡由表及里依次为散体带、碎裂带、块裂带和原岩。

由于河谷下切，地应力释放，两岸岩体浅表生改造强烈，边坡区域存在大量的结构面，其中 II、

III级断裂结构面共 10 条，延伸长度约 50~200 m，如 LF1、Hf104 等。IV、V 级结构面数目众多、分布广泛，主要有 4 组对边坡岩体变形破坏起控制作用的节理、裂隙，其特征为：（1）倾向坡外，倾角 60°~80°，发育密度大，延伸较长，在岩体中受拉张作用，构成的后缘拉裂面；（2）倾向坡内，倾角 60°~70°，发育密度大，延伸较长，多分布于边坡顶部，对岩体的构造改造和次生改造最强；（3）倾向坡外，倾角约为 40°，发育密度较小，多为硬性结构面，受剪切作用，控制边坡岩体向岸外的滑动性变形；（4）倾向坡内，倾角为 20°~35°，发育密度较小，受压剪作用，对块体向岸外滑移变形起阻滑作用。

IV、V 级结构面在边坡岩体中的分布如图 5 所示。

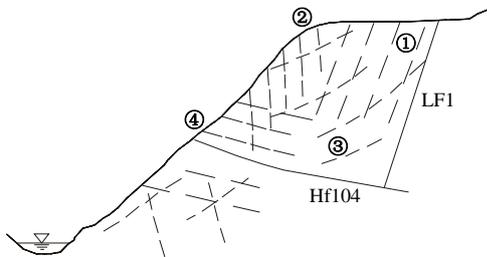


图 5 4 组 IV、V 级结构面在边坡岩体中的分布
Fig.5 The distribution of four groups level IV and V structural surface in slope

4.3 边坡结构面网络模拟

在 UDEC 软件中，对于边坡岩体内部发育的 II、III 级断裂结构面，如 LF1、Hf104 等依地质图进行模拟。对于 IV、V 级结构面按其几何参数服从的概率分布规律，采用 UDEC 节理网络程序进行模拟。

结合地质调查资料和统计分析结果，在边坡结构面网络模拟中，表层散体带和碎裂带的 IV、V 级结构面几何参数及其分布规律，见表 2。由于岩体不同部位结构面的发育程度不同，依据实际地质条件，边坡块裂带区域，结构面的迹长和间距取表层岩体的 3 倍，连通率 50%；原岩区域，迹长和间距取表层岩体的 5 倍，连通率 30%。边坡结构面网络模拟结果，如图 6 所示。

表 2 边坡散体带、碎裂带结构面几何参数
Table 2 Structure surface geometric parameters in scattering and fractured zone of slope

组数 / 组	倾角/(°)			迹长/m			间距/m			连通率 /%
	均值	标准差	分布	均值	标准差	分布	均值	标准差	分布	

1	70	1.2	正态	9.5	1.8	负指数	5.9	2.3	负指数	80
2	65	2.7	正态	10.2	1.4	负指数	5.7	1.5	对数正态	80
3	40	5.1	正态	11.0	2.1	对数正态	8.5	1.6	负指数	50
4	30	1.8	正态	6.2	1.7	负指数	6.8	2.9	对数正态	50

4.4 计算模型及参数

计算中岩体采用 Mohr-Coulomb 与抗拉破坏准则结合的屈服准则。边坡材料分区、主要结构面及关键点，如图 7 所示。

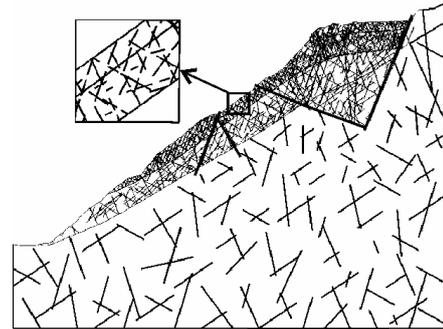


图 6 结构面网络模型
Fig.6 Model of discontinuity network simulation

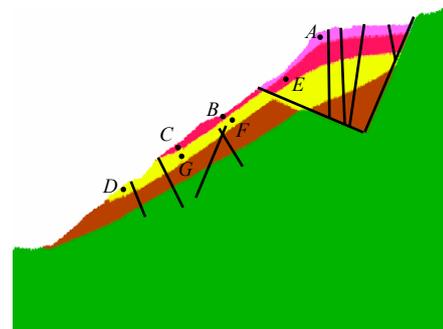


图 7 UDEC 数值模型材料分区、主要结构面及关键点
Fig.7 Location of the materials and main structural planes and key points used in the UDEC model

综合现场和室内试验，并结合相关工程经验，边坡岩体及结构面的力学参数取值，见表 3、4。

表 3 岩体物理力学参数
Table 3 Physico-mechanical parameters of rock mass

结构类型	变形模量 E /GPa	泊松比 v	黏聚力 c/MPa	内摩擦角 φ/(°)	重度 /(kg/m ³)
散体带	0.5	0.32	0.05	26.6	2 600
碎裂带	1.0	0.29	0.4	33	2 650
块裂带	3.5	0.26	0.6	38.7	2 680
原岩	15.0	0.24	1.5	50.2	2 700

表 4 结构面力学参数
Table 4 Mechanical parameters of structural plane

结构面类型	泥质	夹泥	碎屑	硬质夹泥	硬质夹屑	硬质
黏聚力 c/MPa	0.05	0.05	0.15	0.15	0.18	0.20
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	16.7	21.8	26.6	28.8	33.0	35.0

4.5 计算结果分析

利用离散元强度折减法，逐渐折减边坡岩体及结构面参数，搜索边坡变形破坏区域及潜在滑动面，结果如图 8 所示。岩体变形首先出现在边坡顶部，随折减系数增加，边坡的变形范围逐渐扩大，岩体内的结构面逐渐张开、延伸，最终产生以拉裂缝 Lf55 为后缘，沿碎裂线的贯通滑面。随岩体变形的不断增加，表层岩体逐渐产生破坏，局部散体区域出现掉块或垮塌现象。

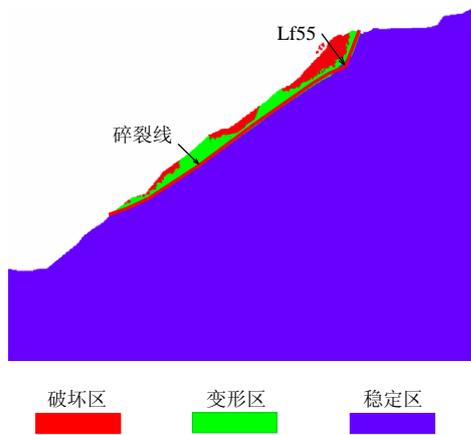


图 8 边坡变形区域及潜在滑动面
Fig.8 The deformation region and potential sliding surface of the slope

在边坡顶部，受第 2 组反倾结构面控制，岩体产生倾倒变形；在边坡中部，岩体则沿第 3 组结构面发生顺坡向的剪切变形，如图 9 所示。

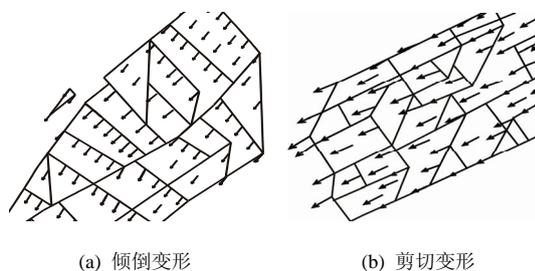


图 9 边坡岩体变形破坏模式
Fig.9 The deformation and failure mode of slope rock mass

边坡的变形区域是在地质历史时期，随着河流的下切，高地应力向临空方向释放后形成的低应力区，是岩体发生卸荷松弛的主要部位，模拟的边坡

变形破坏结果是合理的。

计算得到边坡关键点的位移随折减系数的变化曲线如图 10 所示。从曲线中可以看出，当折减系数增加至 1.22 时，关键点的位移趋势发生明显改变，因此，边坡的安全系数为 1.22。

为进一步分析结果的合理性，采用极限平衡法和一般离散元法求解边坡的安全系数，结果见表 5。

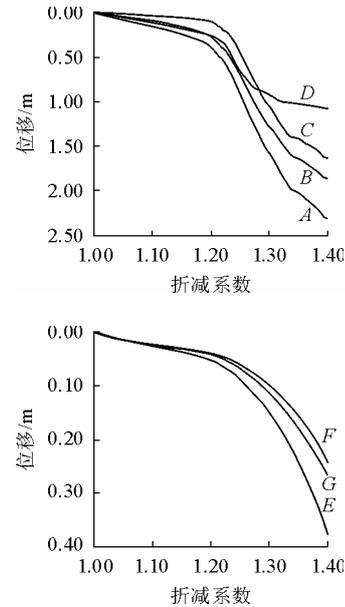


图 10 关键点位移与折减系数的关系曲线
Fig.10 Displacement histories at key points in the UDEC model

表 5 到不同方法求得的稳定安全系数
Table 5 Safety factors by different methods

计算方法	安全系数
基于精细描述的离散元法	1.220
极限平衡法 (M-P 法)	1.148
非精细描述的离散元法	1.370

基于精细描述的离散元法，考虑了岩体中大量存在的断续但并未完全连通的结构面。极限平衡法假定滑面存在且贯通，是稳定性分析的下限解，因此安全系数最小。非精细描述的离散元法，由于未考虑岩体中众多随机的 IV、V 级结构面，忽略了其对边坡稳定性的不利影响，安全系数偏大。因此，基于复杂岩体结构精细描述确定的边坡潜在滑动面和安全系数是合理的，弥补了传统方法处理复杂岩质边坡时，不便于考虑岩体的结构效应，难以确定合理的岩体破坏模式和边坡潜在滑动面的不足，为复杂岩质边坡的稳定性分析提供了新的途径。

5 结 语

通过与已有网络模拟结果的对比,表明 UDCE 节理网络模拟程序能够实现对复杂岩体结构的精细描述。

随着结构面逐渐张开、延伸,边坡最终产生以拉裂缝 Lf55 为后缘,沿碎裂线的贯通滑面;在边坡顶部,受第二反倾结构面控制,岩体产生倾倒变形;边坡中部岩体则沿第三组结构面发生顺坡向的剪切变形。

基于复杂岩体结构精细描述确定的边坡潜在滑动面和安全系数是合理的,为复杂岩质边坡的稳定性分析提供了新的途径。

参 考 文 献

- [1] 李天斌,王兰生. 岩质工程高边坡稳定性及其控制[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 黄润秋. 岩石高边坡发育的动力过程及其稳定性控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1525—1544. HUANG Run-qiu. Geodynamical process and stability control of high rock slope development[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(8): 1525—1544.
- [3] 汪小刚,贾志欣,张发明,等. 岩体结构面网络模拟原理及其工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [4] 黄润秋,许模,陈剑平,等. 复杂岩体结构精细描述及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [5] 王蓬. 节理岩体结构面网络模拟[硕士论文 D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [6] 贾超,王志鹏,朱维申. 节理网络模拟的程序实现及其在地下洞室中的动态响应分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(9): 2867—2872. JIA Chao, WANG Zhi-peng, ZHU Wei-shen. Program for joint network simulation and its application to dynamic response analysis of underground caverns[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(9): 2867—2872.
- [7] 王泳嘉,邢纪波. 离散单元法及其在岩土力学中的应用[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1991.
- [8] 王成虎,何满潮,郭啟良. 水电站高边坡变形及强度稳定性的系统分析研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 581—585. WANG Cheng-hu, HE Man-chao, GUO Qi-liang. Systematic studies on the deformation and strength stability of a high slope at a hydroelectric project[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp.1): 581—585.
- [9] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large-scale movements in blocky rock systems[C]//Proceedings of the Symposium of the International Society for Rock Mechanics. Nancy, France: [s. n.], 1971.
- [10] 雷远见,王水林. 基于离散元的强度折减法分析岩质边坡稳定性[J]. 岩土力学, 2006, 27(10): 1693—1698. LEI Yuan-jian, WANG Shui-lin. Stability analysis of jointed rock slope by strength reduction method based on UDEC[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(10): 1693—1698.
- [11] 宁宇,徐卫亚,郑文棠. 应用离散元强度折减对复杂边坡进行稳定性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(增刊 1): 569—574. NING Yu, XU Wei-ya, ZHENG Wen-tang. Application in complicated high slope with strength reduction method based on discrete element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(Supp 1): 569—574.
- [12] Itasca Consulting Group. DEC (Universal distinct element code) user's manual(version 3.0)[M]. USA: Itasca Consulting Group, 1996.
- [13] 苏培莉,谷拴成,韦正范,等. 岩体结构面网络的计算机模拟[J]. 中国矿山工程, 2006, 35(4): 47—49. SU Pei-li, GU Shuan-cheng, WEI Zheng-fan, et al. Computer simulation of discontinuities network of rock mass[J]. **Journal of China Mine Engineering**, 2006, 35(4): 47—49.