

虎跳峡龙蟠右岸边坡稳定性的数值模拟

徐文杰¹, 胡瑞林¹, 岳中琦², 谭儒蛟¹, 李仁江³, 曾如意⁴

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 香港大学土木系, 香港; 3. 中科院武汉岩土力学所, 湖北 武汉 430071; 4. 中国水电工程顾问集团公司中南勘察设计研究院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 虎跳峡龙蟠右岸边坡的稳定性问题对拟建的虎跳峡水电站具有重要的意义。在钻探及平硐勘查过程中尚未发现该边坡有连续的滑动面, 因此无法用传统的极限平衡法对其稳定性作出判定。本文运用有限元强度折减法对虎跳峡龙蟠右岸边坡的稳定性进行了稳定性分析研究, 得出该边坡在现今应力场状态下的稳定性问题、潜在的破坏模式及相应的滑动面。此外, 还结合离散元模拟进行了对比, 结果表明有限元强度折减法和离散元方法获得的滑动面基本一致, 增强了计算结果的可靠性。

关键词: 数值模拟; 有限元强度折减法; 离散元; 扩展的 Drucker-Prager 模型; 虎跳峡

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2006)11-1996-09

作者简介: 徐文杰(1978-), 男, 博士研究生, 主要从事土石混合体力学特性及应用性研究、边坡稳定性分析及岩土工程数值模拟工作。

Numerical simulation on stability of right bank slope of Longpan in Tiger-Leaping gorge area

XU Wen-jie¹, HU Rui-lin¹, YUE Zhong-qi², TAN Ru-jiao¹, LI Ren-jiang³, ZENG Ru-yi⁴

(1. Key Laboratory of Engineering Geo-mechanics, Institute of Geology and Geophysics Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Department of civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, China; 3. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. Central-south Hydroelectric Investigation, Hydroelectric Engineering Counsellor Company of China, Changsha 410083, China)

Abstract: The stability of the right bank slope of Longpan in Tiger-Leaping Gorge area is important to the building of the Tiger-Leaping Gorge reservoir. So it is important to select a proper method to obtain correct results. With the development of the calculations techniques, especially with the development of nonlinear mechanics of the rock and soil materials, the strength reduction FEM emerged as required. In the strength reduction FEM, it was not necessary to know where the slip surface was, and the initial geostatic stress could be included in the analysis which was more advantageous than the limited equilibrium method. The strength reduction FEM was used to study the stability of the right bank slope of Longpan in Tiger-Leaping Gorge area, and the stability coefficient of the slope under current stress state, the potential failure surface and its failure model. As a comparison, DEM analysis of the slope was executed. It was indicated that there was basic consistency between the results of the strength reduction FEM and DEM, which ensured the reliability of the result.

Key words: numerical simulation; strength reduction FEM; DEM; extended Drucker-Prager model; Tiger-Leaping Gorge

0 引言

拟建的虎跳峡水电站位于云南省中甸地区的金沙江上游, 设计坝高 200 m 以上, 正常蓄水位 2010 m, 总库容 $374 \times 10^8 \text{ m}^3$, 装机容量 $400 \times 10^4 \text{ kW}$, 是金沙江梯级水电开发的龙头水库。该边坡位于目前关注的上虎跳坝址和下落鱼坝址上游只有十八公里之遥, 其位置的重要性决定了无论作为坝址还是近坝库岸, 都对即将建成的虎跳峡水利枢纽极其重要。因此, 对龙蟠右岸边坡的稳定性作出较为准确的分析, 对于坝址

的选择及建成后的安全运营将具有重要的意义。

边坡稳定分析方法主要有极限平衡法和数值分析法。但极限平衡法需要率先知道滑动面的大致位置和形状, 对于均质土坡可以通过搜索迭代确定其危险滑动面, 但是对于岩质边坡由于其结构和构造比较复杂,

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目 (KZCX3-SW-134); 国家重点基础研究发展规划项目 973 (2002CB412702)

收稿日期: 2005-11-07

难以准确确定滑动面的位置, 而且确定时也带有很大的的人为性和随机性, 这就给岩质边坡的稳定性分析带来了较大的困难。此外, 极限平衡法无法考虑初始地应力问题, 这给边坡稳定性分析带来了很大的不准确性, 而且无法对边坡的变形破坏模式作出判定。传统的数值分析方法(有限元法、有限差分法等)一般只能得出边坡的应力、位移状况等, 而无法得到边坡的潜在滑动面和相应的稳定系数。

Duncan^[1]指出边坡的安全系数可定义为使边坡刚好达到临界破坏状态时, 对岩土体的剪切强度进行折减的程度, 并定义边坡的安全系数为岩土体的实际抗剪强度与临界破坏时的抗剪强度的比值。随着计算机技术的发展, 尤其是岩土材料的非线性有限元计算技术的发展及各种成熟的大型有限元计算软件, 诸如 ABAQUS、ANSYS、ADINA 等的推出, 为有限元强度折减法在边坡稳定性分析中的广泛应用提供了方便。文献[2~11]对有限元强度折减法在边坡稳定性分析中的应用做了重要的研究。但是, 在这些研究中大都未考虑初始地应力的影响, 势必会对其分析结果带来一定的影响。

由于在虎跳峡龙蟠右岸边坡现场勘探过程中未发现连续贯通的滑动面, 因此无法用传统的极限平衡法对其稳定性进行分析。为此, 本文综合采用有限元强度折减法及离散元法对龙蟠右岸边坡的破坏机理、可能的剪切破碎带及相应的稳定性进行了研究。

1 有限元强度折减法

1.1 基本原理

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, 有限元强度折减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。所谓边坡稳定分析的有限元强度折减法, 就是在理想弹塑性有限元计算中将边坡岩土体抗剪强度参数逐渐降低直到其达到破坏状态为止, 程序可以自动根据弹塑性计算结果得到潜在滑动面(塑性应变和位移突变的地带), 同时得到边坡的强度储备安全系数 f ^[1], 将有限元应用于边坡的稳定分析, 为边坡稳定开辟了一条新的途径。该法认为: 滑动面塑性区贯通是岩土体破坏的必要条件, 但不是充分条件, 岩土体破坏的标志应该是部分土体出现无限移动, 此时滑移面上的应变或者位移出现突变, 这种突变同时会引起有限元计算的不收敛现象。因而, 采用有限元数值计算是否收敛作为土体破坏的依据是合适的^[2]。

目前流行的各类大型有限元软件, 如 ABAQUS、

ANSYS 等中的岩土材料的本构模型, 均采用的屈服准则为广义 Mises 准则, 即

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K = 0 \quad (1)$$

式中 I_1 , J_2 分别为应力张量第一不变量和应力偏张量的第二不变量; α 、 K 与岩土材料的内摩擦角 φ 、粘聚力 c 及膨胀角 ψ 有关的常数。

在广义 Mises 屈服准则中引入强度折减系数 F , 此时屈服准则表示为

$$f = \frac{\alpha}{F} I_1 + \sqrt{J_2} - \frac{K}{F} = 0 \quad (2)$$

式中, F 为极限状态的安全系数。

在计算过程中通过不断增加 F 的值, 然后相应的调整岩土体的强度参数, 利用调整后的强度参数进行计算, 直到程序不收敛为止, 此时的 F 值就是坡体的安全系数, 相应的塑性破坏区即为坡体的滑动破坏面。

1.2 计算软件及岩土材料的屈服准则

众所周知, 岩土体是一种具有高度非线性行为的材料模式, 在对岩土体进行强度折减的有限元分析时需要具有过硬的非线性有限元程序及良好的本构模型。ABAQUS 作为国际上最先进的大型通用非线性有限元分析软件, 提供了丰富和强大的岩土本构, 包括 Mohr-Coulomb 模型、扩展的 Drucker-Prager 模型等, 这为非线性有限元强度折减边坡稳定分行的可靠性和计算精度提供了有力的保证^[12]。此外, ABAQUS 还提供了 *INITIAL CONDITIONS 命令来处理初始地应力问题, 为岩土工程数值模拟研究带来了方便。

岩土材料中最为常见的材料模式为 Mohr-Coulomb 模型, 其在平面应变条件下的屈服准则为

$$f = \sqrt{J_2} + \sin \varphi I_1 - 2c \cos \varphi = 0 \quad (3)$$

为了与传统的 Mohr-Coulomb 准则进行比较, 本文还采用了 ABAQUS 提供的扩展的 Drucker-Prager 屈服准则(图 1)。在平面应变条件下, 当扩展的 Drucker-Prager 屈服准则的屈服面在 π 平面上的形状为直线时, 其控制方程为

$$f = \sqrt{J_2} + \frac{\tan \beta \sqrt{3(9 - \tan^2 \psi)}}{9 - \tan \beta \tan \psi} I_1 - 2 \frac{\sqrt{3(9 - \tan^2 \psi)}}{9 - \tan \beta \tan \psi} d = 0 \quad (4)$$

为了保证式(3)和(4)的等价性, 有

$$\left. \begin{aligned} \sin \varphi &= \frac{\tan \beta \sqrt{3(9 - \tan^2 \psi)}}{9 - \tan \beta \tan \psi} \\ c \cos \varphi &= \frac{\sqrt{3(9 - \tan^2 \psi)}}{9 - \tan \beta \tan \psi} d \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中, β 为 Drucker-Prager 内摩擦角。

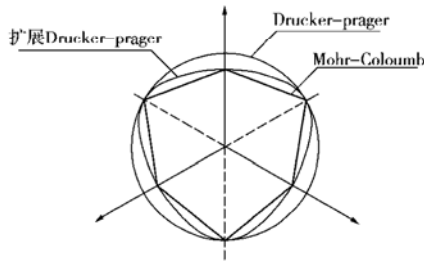


图1 π 平面上不同的屈服准则对应的典型屈服面

Fig. 1 Typical yield surfaces of different yield criteria in the deviatoric plane

式(5)同时也提供了平面应变问题中 Mohr-Coulomb 材料参数和线性扩展 Drucker-Prager 材料参数之间的转换关系。对于关联流问题 ($\beta = \psi$), 式(4)变为

$$f = \sqrt{J_2} + \frac{\tan \beta \sqrt{3}}{\sqrt{9 - \tan^2 \beta}} I_1 - 2 \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{9 - \tan^2 \beta}} d = 0, \quad (6)$$

式中,

$$\left. \begin{aligned} \tan \beta &= \frac{\sqrt{3} \sin \varphi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \sin^2 \varphi}}, \\ \frac{d}{c} &= \frac{\sqrt{3} \cos \varphi}{\sqrt{1 + \frac{1}{3} \sin^2 \varphi}}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

1.3 算例分析

为了验证 ABAQUS 中扩展的 Drucker-Prager 本构模型在岩土工程有限元强度折减法中计算的和可行性, 及初始地应力对边坡稳定性分析的影响, 以西北某黄土高边坡为例, 综合采用强度折减法及 Spencer 条分法进行了分析。该边坡土体容重为 15.5 kN/m^3 , 坡比为 $1:0.75$, 坡高为 40 m , 坡底底面边界固定约束, 左、右边界为水平约束, 其它面为自由约束, 计算单元选用平面三节点三角形单元, 见图 2。有限元计算参数共 6 个, 见表 1。在计算过程中, 对于各屈服准则又分计算开始时考虑初始地应力(自重引起)和不考虑初始地应力的情况: ①不考虑初始地应力时, 直接对模型施加重力荷载, 然后对计算模型进行弹塑性有限元分析, 并不断对岩土体的强度参数按相应准则进行折减, 最后获得相应的 F 值; ②当计算开始考虑初始地应力时(自重应力), 首先计算模型在重力荷载作用下各个节点的应力值并导出相应文件, 修改 ABAQUS 生成的 inp 文件, 添加 *INITIAL CONDITIONS, TYPE = STRESS 项, 并将计算导出的节点应力作为各个节点的初始应力值。再次对计算模型进行弹塑性有限元分析, 并不断对岩土体的强度参数按相应准则进行折减, 最后获得相应的 F 值。计算

结果见表 2 所示。

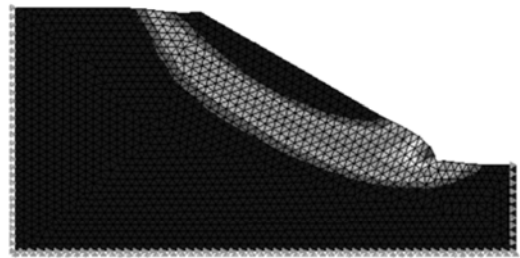


图2 边坡失稳后形成的塑性应变剪切带

Fig. 2 The failure surface of equivalent plastic strain

表 1 有限元计算参数表

Table 1 The finite element parameters

E/MPa	ν	$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	$\varphi/(\text{°})$	c/MPa	$\psi/(\text{°})$
110	0.3	15.5	28	0.02	20

表 2 安全系数计算结果

Table 2 The comparison of calculated safe factor

工况	稳定系数	
	不考虑初始应力	考虑初始应力
Spencer	1.195	—
Mohr-Coulomb	1.266	1.152
扩展 D-P	1.212	1.034

从表 2 中可以看出, 不考虑初始地应力(自重应力)时采用平面应变条件下的有限元折减计算结果与采用 Spencer 法计算的稳定系数非常相近, 其最大误差的绝对值小于 6.4%。采用扩展的 D-P 模型在不考虑初始应力的情况下的计算结果与采用 Spencer 法计算的稳定系数更为接近。然而, 在考虑初始地应力(自重应力)的情况下, 通过有限元强度折减计算所得的稳定系数要小于通过 Spencer 法计算结果, 这表明了考虑初始地应力在边坡稳定性分析中的重要性。从另一个侧面也反映了采用传统的极限平衡法获得的稳定系数存在着“虚量”, 具有一定的误差。

图 3 显示了用 Spencer 法搜索得到的最优滑动面, 从图 4 中可明显看出, 采用有限元强度折减法计算获得的潜在滑动面(塑性应变剪切带)与采用 Spencer 法搜索获得的最优滑动面是一致的。从图 5 中还可看出, 有限元强度折减法计算过程中边坡的稳定系数与边坡的最大位移之间存在某种直接的关系, 边坡的最大位移随着强度折减系数的增加而增加, 在达到极限破坏状态时, 位移急剧增大产生突变, 使得程序无法继续运行下去, 此时的折减系数即为边坡的稳定系数。

从上面的论述可以看出, ABAQUS 在边坡有限元强度折减法计算中具有良好的稳定性和计算精度, 此外, 初始地应力对边坡的稳定性具有重要的影响是边坡稳定分析中不可缺少的因素。因此, 为了研究现今应力场状态下龙蟠右岸边坡的稳定性问题以正确指导

工程建设, 并考虑到研究区的工程地质概况 (构造应力对边坡的影响较小), 本文拟在考虑由自重引起的初始地应力情况下采用有限元强度折减法对其稳定性进行分析。

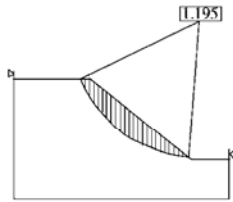


图 3 采用 Spencer 法搜索的最优滑动面

Fig. 3 The slip surface obtained from Spencer method



图 4 有限元计算滑动面与 Spencer 法搜索滑动面对比

Fig. 4 The comparison of the slip surface using FEM method and Spencer method

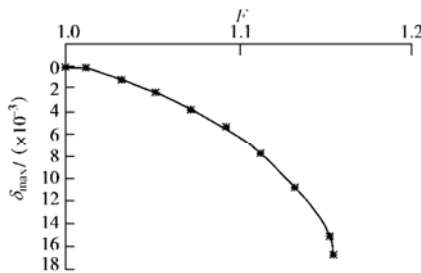


图 5 边坡的最大位移与强度折减系数走势图

Fig. 5 Variation the maximum displacement with the strength reduction factor of the slope

2 龙蟠右岸边坡的工程地质概况

龙蟠右岸边坡地处虎跳峡的宽谷河段, 高程分布在 1820~2240 m, 河流在此处的走向为 NW350°, 枯水季节水位为 1807 m, 水面宽 164 m, 水流平稳, 主流线略偏右岸, 两岸均有狭长的 II 级阶地分布, 阶面高程 1830 m (图 6)。两岸山体拔河高 600~800 m, 右岸地形坡度 28°~30°。根据平硐和钻孔资料显示, 龙蟠右岸边坡表层为由土石混合物组成的第四纪崩积层, 厚 5.0~40.0 m 不等^[13], 岩体强风化深度一般为 110~120 m, 弱风化带深度为 215~225 m。边坡前缘岩体主要为三叠系厚层砂岩夹砂质板岩, 中上部为薄层千枚状板岩和砂岩, 呈反倾交互层状分布, 局部穿插灰绿色辉绿岩侵入岩脉和透镜体状结晶灰岩

条带。岩层走向与坡面近于一致, 总体产状为 350°~15°/NE (或 SE)。在坡体前缘分布有古湖相沉积层, 主要为洪积、崩坡积以及静水环境沉积形成的混杂堆积物, 厚度 170 m 左右, 其上为卵砾石和中、粉细砂构成的现代河流相冲积层。河谷左岸岩体主要为巨厚层的玄武岩。(图 7)

龙蟠右岸边构造较为发育, 在坡脚和高程 2100 m 处发育有两条规模较大的顺坡向断层 F2 和 F3, 其产状为 NNE5°/SW∠70° 和 NNW335°/SW∠76°, 为冲江河断裂及其分支断层。另外, 根据 CSAMT (V6A) 探测可推测在 2300 m 高程位置附近有另外一条较大的 F4 断层存在 (图 8)。

此外, 根据平硐、钻孔、坑槽探以及 CSAMT (V6A) 探测表明, 该边坡中仅见有局部的张裂破碎带, 但未见顺坡向贯通性滑移界面或软弱带, 即目前尚未形成统一的滑动破坏面。

3 有限元的数值模拟

3.1 计算参数的选择

为了能够获得满意的计算结果, 有限元计算所采用的计算模型既要能较好的反映构成边坡岩体的不均质性, 又要能够保证有限元分析的可行性。为此, 首先要根据研究区的工程地质概况对计算中采用的地质模型进行相应的概化, 并对构成边坡的各类岩体进行力学性质分区。

根据上述原则, 首先将龙蟠右岸边坡表层的第四纪崩积层 (土石混合物) 概化为一种均匀各项同性的地质材料。由于岩体的风化、卸荷等作用对边坡稳定影响较大, 且即便同一类岩体在不同的风化状态下其力学参数差别也很大, 因此, 按风化程度将边坡岩体进行力学性质分区对于边坡稳定性研究是必要的。所以在计算中按风化带的类型将构成边坡的各类岩体划分为强风化岩体、弱风化岩体和微风化岩体三类, 并将同一分类内的岩土体概化为均匀各项同性的地质材料。

根据现有地质报告^[14-15]并结合各种现场和室内试验及工程地质类比分析^[16-17], 确定计算模型岩土体的物理力学参数见表 3。计算采用平面应变问题的弹塑性分析, 材料的本构关系采用扩展的 D-P 本构模型。

3.2 有限元模型的建立

选定合理的计算范围是保证有限元计算精度的另外一个重要条件, 根据区域工程地质概况在本次计算中选用 I-I 坝轴线断面, 图 7 展示了其详细的工程地质剖面 and 相应的边界尺寸。

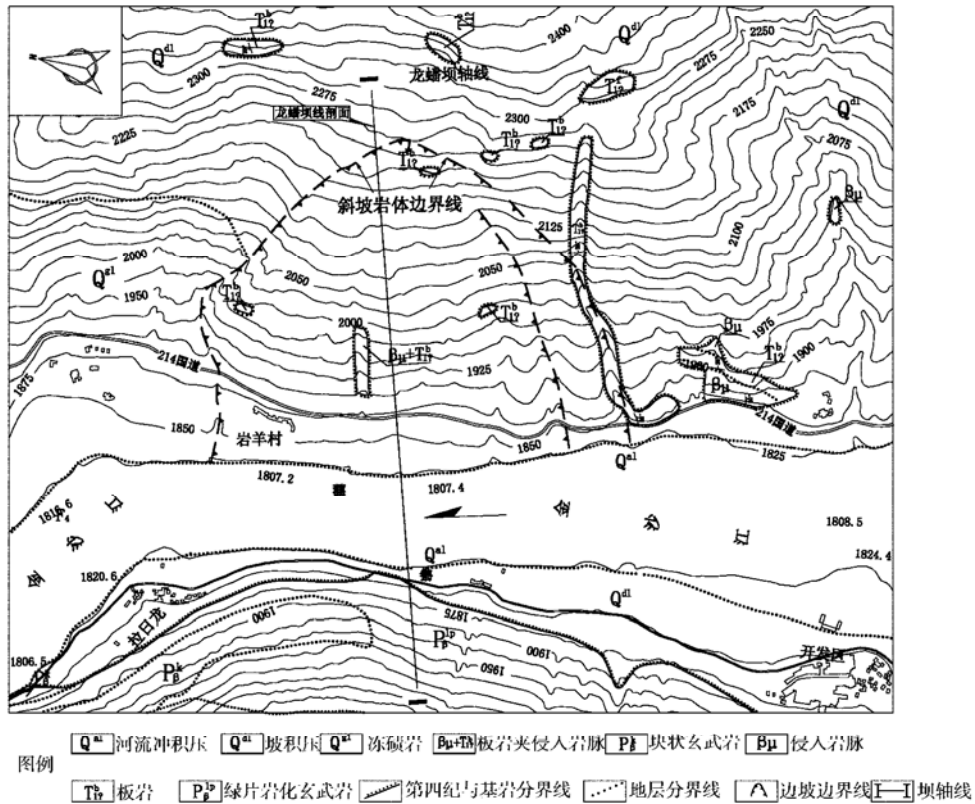


图 6 龙蟠坝区工程地质平面图

Fig. 6 The engineering geologic map of Longpan dam region

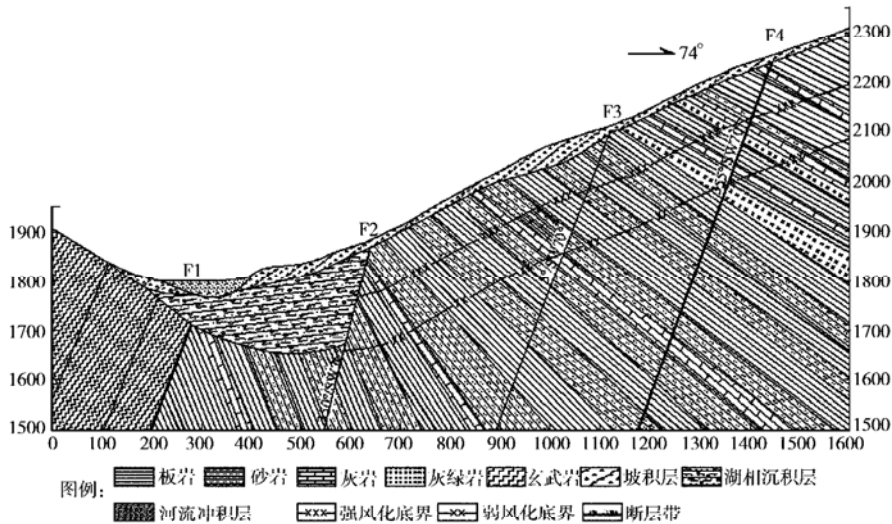


图 7 虎跳峡龙蟠坝址工程地质剖面图

Fig. 7 The engineering geologic cross section of Longpan dam region of Tiger-Leaping Gorge

此外，对模型选择合理的计算网格也是保证有限元计算能够顺利和强度折减法精度的必备因素。计算分析采用平面应变问题来处理，单元划分采用 ABAQUS 中的受控四边形网格 (Quad-dominated) 自动网格划分功能。有限元网格划分后生成的结点总数为 4447，单元总数为 4452，其中三结点三角形平面应变元 (CPE3) 有 301 个，四结点四边形平面应变元

(CPE4R) 有 4151 个 (图 9)。

计算模型所采用的边界条件为：设定模型的上部为自由边界，左右两侧为水平约束，底面边界采用固定约束。此外，计算中考虑由自重应力引起的初始应力。

3.3 计算结果与分析

(1) 现今应力场特征分析

表 3 计算模型岩土体物理力学参数

Table 3 The physical and mechanical parameters of rock and soil

岩性	密度/(g · cm ³)	弹性模量/GPa	泊松比 μ	粘聚力/MPa	粘摩擦角/(°)	
砂岩	强风化	2.36	4.7	0.20	2.8	18.5
	弱风化	2.41	10.4	0.17	3.5	20.88
	微风化	2.47	14.3	0.15	4.4	25.3
板岩	强风化	2.61	10.3	0.18	1.6	20.3
	弱风化	2.69	16.2	0.15	1.9	25.9
	微风化	2.72	21.0	0.14	2.3	32.0
灰岩	强风化	2.6	16.8	0.22	3.7	19.4
	弱风化	2.67	20.9	0.21	4.1	24.8
	微风化	2.71	25.5	0.19	5.3	36.4
辉绿岩	强风化	2.67	21.6	0.18	1.7	16.2
	弱风化	2.75	45.9	0.17	2.1	19.8
	微风化	2.80	63.1	0.16	2.6	24.2
玄武岩	强风化	2.30	19.6	0.19	2.0	22.5
	弱风化	2.50	50.9	0.13	2.7	28.1
	微风化	2.60	70.5	0.10	3.4	34.5
坡积层	1.75	2.5	0.30	0.001	46.7	
河流冲积层	2.10	2.0	0.33	0.09	27.0	
湖相沉积层	2.32	2.0	0.33	0.10	25.0	
断层破碎带	1.94	3.0	0.35	0.38	23.0	

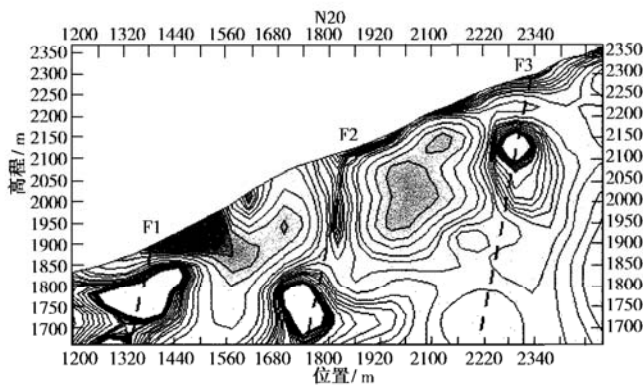


图 8 HN20 测线 CSAMT 方法反演断面图

Fig. 8 Interpreted profile of CSAMT about line HN20

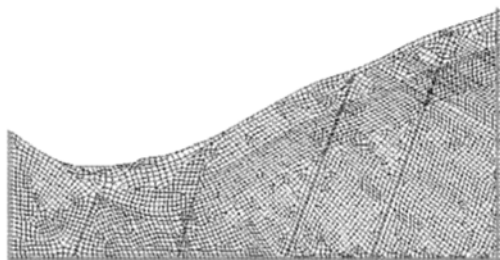


图 9 龙蟠右岸边坡有限元划分网格

Fig. 9 The FEM Grid of the right bank slope of Longpan

根据上述概化后的龙蟠右岸边坡的工程地质模型和各类岩体力学参数, 通过 ABAQUS 计算获得了研究区的最大主应力和最小主应力云图 (图 10~12), 由图可以看出:

a) 从总体上看, 龙蟠右岸边坡的最小主应力和最大主应力的分布特征基本相似, 并总体上呈现出由地表到深处逐渐增加的趋势。随着深度的增加, 主应

力的方向也发生了明显的偏转。

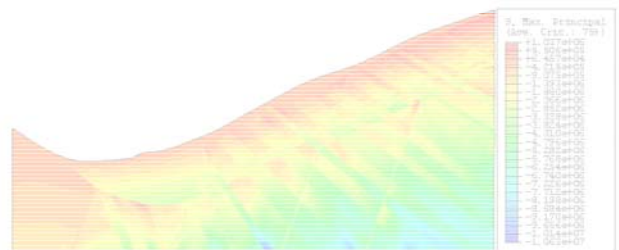


图 10 最大主应力云图

Fig. 10 The nephogram of the maximum principal stress

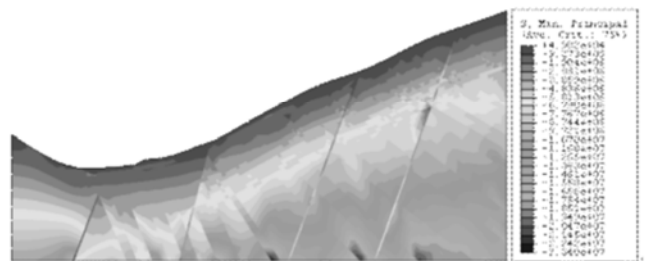


图 11 最小主应力云图

Fig. 11 The nephogram of the minimum principal stress

b) 从主应力云图中可以看出, 在边坡的强风化及弱风化带内出现了局部张应力分布区, 表明岩体发生了明显的卸荷—拉裂变形。据现场勘探#1 平洞, 可以明显看到这一现象。

c) 图 12 可以看出, 龙蟠右岸边坡岩体中目前尚未出现明显的剪应力高度集中区。

(2) 稳定性分析

以上分析了龙蟠右岸边坡现今的地应力场的状态。为了进一步研究边坡的稳定性问题, 本文采用有

限元强度折减法对龙蟠右岸边坡的稳定性进行了计算分析。图 13 显示了边坡塑性破坏区随强度折减系数 F 的变化情况。

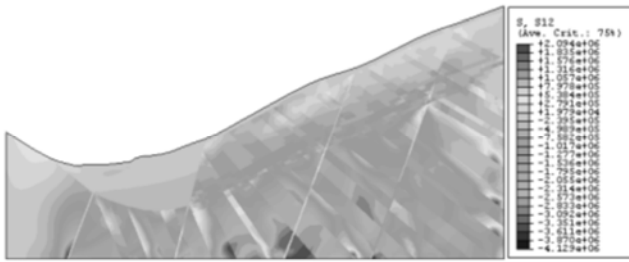


图 12 剪应力云图

Fig. 12 The nephogram of the shear stress

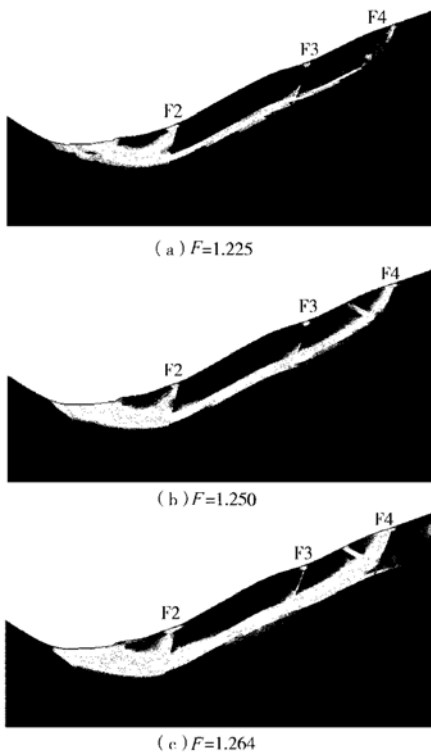


图 13 塑性区随强度折减系数变化关系图

Fig. 13 The development of the plastic zone with different values of strength reduction factors

在有限元强度折减法计算过程中由于坡前的湖相沉积层首先达到塑性破坏，而无法搜索出其整体滑动面。为此，在不影响边坡的整体稳定性分析的条件下，对边坡前缘的湖相沉积层的强度参数进行了适当的增加。在计算过程中，当强度折减系数达到 1.264 时程序由于不收敛而无法运行，并且边坡中出现了连续贯通的塑性区，此时的强度折减系数即为采用有限元强度折减法获得的边坡的稳定系数 ($F = 1.264$)。

由图 13 可以看出，随着强度折减系数的增加，边坡的塑性破坏区从坡角逐渐向上扩展，边坡整个变形

体的滑动破坏受到 F3 和 F4 断层控制。图 13 (a) 显示了强度折减系数达到 1.225 时，F3 断层前部的变形体塑性剪切带首先贯通，并连同 F3 断层一起形成连续贯通的滑动面。而后，随着强度折减系数的不断增大，变形体的塑性剪切带逐渐向坡顶推进，最后形成一个以 F4 断层为后缘的连续贯通的塑性变形区。

上述采用有限元强度折减法对龙蟠右岸边坡的变形破坏模式及潜在的滑动面进行了分析。可以看出：构成龙蟠右岸边坡的整个变形体被 F3 断层分割为两部分，它在将来某种条件下的失稳破坏并不会形成整体的滑动破坏模式，而是以 F3 断层为分界的多块(B1、B2 块体组成)滑动破坏(图 14)。随着 B1 变形块体的下滑破坏，B2 坡段才随之逐渐的失稳破坏。根据获得的潜在滑动面，可推知边坡滑面最大埋深约为 157 m。此外，坡体前部的湖相沉积层对于整个边坡的稳定有重要的意义，它的存在起着“压脚”作用，在以后的工程中应设法采取适当的保护措施。

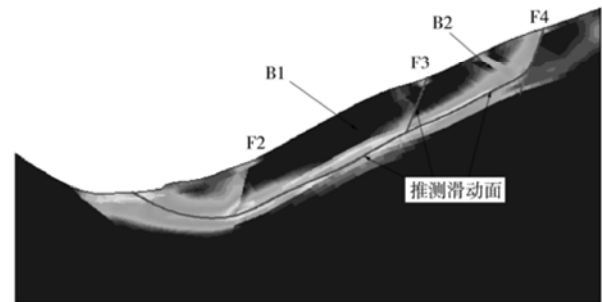


图 14 有限元强度折减法推测滑动面

Fig. 14 The predicted slip surface by strength reduction FEM

4 离散元数值模拟

为了进一步验证有限元强度折减法在龙蟠右岸边坡稳定性分析计算中的可靠性，本文还采用了离散元的方法对该边坡进行了数值模拟研究。在离散元计算过程中，岩体单元的划分根据现场勘查统计的节理裂隙的主要方向 ($335^\circ / SW \angle 75^\circ \sim 80^\circ$ 、 $40^\circ / SE \angle 20^\circ \sim 25^\circ$) 来确定。图 15 详细展示了离散元计算时边坡破坏时滑动破碎带及剪出口的变形情况。

离散元计算结果表明，龙蟠右岸边坡的变形破坏首先发生在 F3 断层附近及其前部变形体，然后滑动破坏面逐渐沿边坡向上发展，直到与 F4 断层形成贯通的滑动带。

比较离散元及有限元的计算结果可以看出，由两者获得的潜在的变形破坏模式及相应的滑动带基本吻合。两者差异的主要原因是由于离散元计算滑动面受到块体划分的约束，造成滑动破坏面基本上沿块体接触面发育。

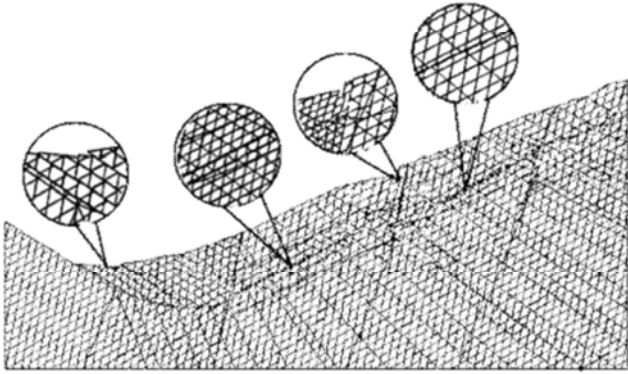


图 15 离散元计算结果

Fig. 15 Calculated result of DEM

5 结 论

(1) 本文运用 ABAQUS 进行边坡稳定的有限元强度折减计算, 通过算例表明运用 ABAQUS 软件自身包含的扩展的 D-P 本构模型计算得到的安全系数与采用 Spencer 条分法得到的安全系数相差很小(不考虑初始应力情况下)。当考虑自重引起的始应力时, 通过有限元强度折减法计算获得的安全系数要较 Spencer 条分法计算所得的安全系数小, 从某种程度上反映了采用传统的极限平衡法获得的稳定系数存在着“虚量”, 具有一定的误差。因此在用有限元强度折减法进行有限元边坡的稳定分析时, 如果条件足够宜将初始地应力引入计算中来。

(2) 本文采用有限元强度折减系数法, 利用大型商务软件 ABAQUS 对其进行了计算分析, 得到了龙蟠右岸边坡潜在的破坏模式、相应的滑动面及在现今应力状态下的稳定系数, 对虎跳峡水电站的工程建设具有指导性意义。

(3) 通过分析表明龙蟠右岸边坡变形体的滑动破坏受到 F3 和 F4 断层的控制, 其潜在的滑动破坏模式为“多块滑动”, 即该变形体不会形成整体的滑动破坏, 而是以 F3 断层为分界线形成 B1 块体和 B2 块体, 破坏时 B1 块体将首先破坏, B2 坡段才随之逐渐的失稳破坏。此外, 坡前的湖相沉积层对于整个边坡的稳定性起着“压脚”的作用, 在工程实施过程中应当给予适当的保护。

(4) 通过采用离散元对龙蟠右岸边坡进行计算分析表明: 由有限元和离散元计算获得的边坡潜在的变形破坏模式及相应的滑动带基本吻合, 进一步验证了通过有限元强度折减法计算得到的龙蟠右岸边坡的潜在滑动面位置的可靠性, 以指导工程建设。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] MATSUI T, SAN K C. Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique[J]. Soils and Foundations,1992,32(1):59 - 70.

[4] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique,1999,49(3):387 - 403.

[5] DAWSON E M, ROTH W H, DRECHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000,126(1):75 - 80.

[6] 张鲁渝, 郑颖人. 奉节县新城区头道河小区 4 号路 D 区高边坡有限元分析[J]. 地下空间, 2001, 21(5):445 - 449.(ZHANG Lu-yu, ZHENG Ying-ren. Cut slope stability analysis of zone D, Road 4 of Fengjie Country by FEM[J]. Underground Space, 2001,21(5):445 - 449.)

[7] 张鲁渝, 时卫民, 郑颖人. 平面应变条件下土坡稳定有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2002,22(4):487 - 490.(ZHANG Lu-yu, HI Wei-min, ZHENG Ying-ren. The slope stability by FEM under the plane strain condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002,24(4):487 - 490.)

[8] 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):1943 - 1952.(ZHENG Yin-ren, ZHAO Shang-yi, DENG Wei-dong. Numerical simulation on failure mechanism of rock slope by strength reduction FEM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003,22(12):1943 - 1952.)

[9] 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):3381 - 3388.(ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi. Application of strength reduction FEM in soil and rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(19):3381 - 3388.)

[10] 郑颖人, 赵尚毅, 孔位学, 等. 极限分析有限元法讲座—I 岩土工程极限分析有限元法[J]. 岩土力学, 2005,26(1):163 - 168.(ZHENG Ying-ren, ZHAO Shang-yi, KONG Wei-xue, et al. Geotechnical engineering limit analysis using finite element method - I [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(1):163 - 168.)

[11] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座—II 有限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005,26(2):332 - 336.(ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren,

- ZHANG Yu-fang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method — II[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005,26(2):332 - 336.)
- [12] ABAQUS Inc. ABAQUS 有限元软件 6.4 版入门指南[M]. 庄茁, 译. 北京: 清华大学出版社, 2004.(ABAQUS Inc. The introduction manual of FEM software ABAQUS 6.4[M]. HUANG Zhuo, trans. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.)
- [13] 徐文杰, 胡瑞林, 谭儒蛟, 等. 虎跳峡龙蟠右岸变形体土石混合体野外试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(6):1270 - 1277. (XU Wen-jie, HU Rui-lin, TAN Ru-jiao, et al. Study on field test of rock-soil aggregate in the right bank plasmodium of Long-pan in Tiger-Leaping Gorge area[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006,25(6):1270 - 1277.)
- [14] 国家电力公司中南勘测设计研究院. 金沙江虎跳峡河段梯级开发方式设计研究报告[R].1999. (Central-south Hydroelectric Investigation, Design and Institute of State Power Corporation. The design and research report of the way of stepping exploitation of the Tiger-Leaping Gorge on the jinsha river[R]. 1999.)
- [15] 国家电力公司中南勘测设计研究院. 金沙江虎跳峡河段规划工程地质勘察报告[R]. 1999.(Central-south Hydroelectric Investigation, Design and Institute of State Power Corporation. The reconnaissance report of engineering geology of programming of the Tiger-Leaping Gorge on the Jinsha River [R]. 1999.)
- [16] 汪波, 李渝生, 王运生, 等. 金沙江虎跳峡水电站龙蟠坝区坝肩边坡的稳定性研究[J]. *地质力学学报*, 2002, 8(4):376 - 382.(WANG Bo, LI Yu-sheng, WANG Yun-sheng, et al. Study on the dam abutment's side slope stability of longpan dam region of tiger leaping gorge hydroelectric station in Jinsha river[J]. *Journal of Geomechanics*, 2002,8(4):376 - 382.)
- [17] 陈祖煜, 汪小刚, 杨健, 等. 岩质边坡稳定分析—原理·方法·程序[M]. 北京: 中国水利水电出版社,2005.(CHEN Zu-yu, WANG Xiao-gang, YANG Jian, et al. Rock slope stability analysis—theory, methods and programs[M].Beijing: China Water Power Press, 2005.)