洞巴水电站高边坡稳定性评价研究

林育梁，严利娥，胡　涛

（广西大学土木建筑工程学院，广西 南宁 530004）

摘　要：将强度折减技术与快速拉格朗日元法结合起来对洞巴水电站左岸岩质高边坡进行了稳定性分析评价，然后跟 Sarma 法和能量法这两种极限平衡分析方法进行了比较。结果表明：基于强度折减的快速拉格朗日元法不需要假设滑动面形状位置，确定的最危险滑移面是一条具有一定宽度的滑移带，与实际情况极为吻合。它能合理简便地确定边坡的安全系数，是进行高边坡稳定性评价的好方法。

关键词：高边坡；稳定性；强度折减技术；拉格朗日元法

作者简介：林育梁(1943－)，男，教授，从事岩土工程的教学与科研工作。

0　前　　言

重点工程中的高边坡失稳一般都会产生严重的后果，国内外边坡发生破坏的事故也很频繁，因此，高边坡稳定性的研究是一个重大的工程技术问题。然而，目前传统的边坡稳定性分析方法都不尽完善。广西百色田林洞巴水电站工程是西洋江流域综合利用规划中以发电为主的水电工程，位于田林县那比乡那腊村洞巴屯下游 2 km。坝址以上控制集雨面积 4380 km^2，占西洋江流域面积 5070 km^2 的 86.4%，多年平均流量 56.7 m^3/s，电站设计正常蓄水位 448 m，相应库容 5.15 亿 m^3，为不完全年调节水库，死水位 415 m，最大水头 87 m，设计水头 74 m。混凝土面板堆石坝坝顶长 540 m，坝顶高程 452 m，最大坝高 105 m，坝顶宽 7 m，最大坝底宽度 390.9 m。选取洞巴水电站左岸趾板上游边坡 60～60'（即溢洪道 0+095.40 处）工程地质剖面作为稳定性分析对象。该边坡自然坡度为 28°～45°，局部达到一个新的水平 60°。河床高程 350.7～55.5 m，山顶高程 551.2，高差 200 m，为超高边坡。

对于岩质边坡,由于实际岩体中含有大量不同构造、产状和特性等不连续结构面（比如层面、节理、裂隙、软弱夹层、岩脉和断层破碎带等），给岩质边坡的稳定分析带来了巨大的困难，传统极限平衡方法尚不能搜索出危险滑动面以及相应的稳定安全系数。而目前的各种数值分析方法，一般只是得出边坡应力、位移、塑性区，对于边坡危险滑动面以及相应的安全系数的确定，也不够合理完善。

结合本工程地质状况，本文将强度折减技术与快速拉格朗日差分法相结合，形成基于强度折减的快速拉格朗日元法，并运用于广西百色田林洞巴水电站工程岩质高边坡的稳定性分析评价。这个方法的步骤如下：①由 $FLAC^{3D}$ 程序求得边坡的应力、位移、塑性区范围等；②根据快速拉格朗日元法分析的应力应变关系和塑性区结果构造初始滑裂面；③利用强度折减技术与快速拉格朗日元法相结合求解边坡的危险滑动面和稳定安全系数。最后本文还运用 Sarma 法和能量法两种极限平衡方法检验基于强度折减技术的快速拉格朗日元法所得结果。

1　基于强度折减的拉格朗日元法

利用拉格朗日元法可以按时步求解边坡的应力、位移、塑性区范围等，但是，它不能直接求解边坡的稳定安全系数，也不能直接确定边坡滑移带的位置。为此，我们提出基于强度折减的拉格朗日元法。强度折减技术的原理是对土体的抗剪强度进行逐步折减，找到边坡的临界破坏状态。此时对应的安全系数是土的实际抗剪强度与经过折减后的抗剪强度的比值。

Duncan（1996）指出边坡的安全系数 F_s 可以定义为使边坡刚好达到临界破坏状态时，对土体材料的抗剪强度进行折减的程度，即定义边坡安全系数是土体的实际的抗剪强度与临界破坏时折减后的剪切强度的比值，具有强度储备系数的物理意义。即当土体材料的抗剪强度参数 c 和 φ 分别用其临界抗剪强度参数 c_c 和 φ_c 所代替后，结构处于临界破坏状态，其中：

$$c_c=\frac{c}{F_s}\quad,\quad \varphi_c=\arctan(\tan\frac{\varphi}{F_s})\quad。\qquad(1)$$

用拉格朗日元法求解（1）式所示的安全系数 F_s 时，通常需要求解一系列的具有下列强度参数 c' 和 φ' 的问题：

$$c'=\frac{c}{R}\quad,\quad \varphi'=\arctan(\tan\frac{\varphi}{R})\quad,\qquad(2)$$

式中　c 和 φ 是土体抗剪强度参数，R 是抗剪强度的折减系数。

基于强度折减技术的快速拉格朗日元法的要点是假设外荷载不变，利用式（2）来折减土体的强度指标 c 和 φ，然后对边坡进行分析，通过不断地增加折减系数 R，反复进行应力应变分析，直至边坡达到临界破坏，此时的折减系数就是安全系数 F_s，临界破坏状态时边坡的塑性区就是最危险滑移面，一般是有一定宽度的滑移带。

2　利用基于强度折减的 $FLAC^{3D}$ 进行高边坡稳定性评价研究

$FLAC^{3D}$ 软件是将连续体的快速拉格朗日元法应用于

收稿日期：2006－07－30

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

岩土工程问题的计算软件。该软件在解决岩土工程问题上具有许多优越性，已逐渐成为工程技术人员理想的三维数值模拟工具。然而，FLAC^{3D} 软件在模型建立以及单元网格划分等前处理问题上却存在以下不足，造成了其建模的不便性。因此本文利用有限元程序对于复杂工程地质体数值模型的建立的明显优势，在 ANSYS 软件上对复杂工程地质体建立相应数值模型（包括三维网格划分），再通过接口程序进行数据转化实现 FLAC^{3D} 模型的自动生成，然后在 FLAC^{3D} 中对模型进行分析求解。ANSYS 三维模型生成过程：首先，在 CAD 中建立平面模型。然后将 CAD 模型导入 ANSYS，在 ANSYS 中进行网格划分并建立三维模型；其次，利用 Ansys to Flac 3D 小程序将前面建好的模型导入 FLAC^{3D} 中，图 1 所示。计算模型由上往下岩土层分别是：强风化上段、强风化下段、弱风化层以及微风化层。对于左岸剖面，在应用 FLAC^{3D} 进行分析计算时，边坡的计算断面宽度为 398 m，高度为 202 m。计算中考虑了边坡的风化带的影响，材料服从摩尔－库仑屈服准则。计算模型的力学参数见表 1。分析计算过程如下：

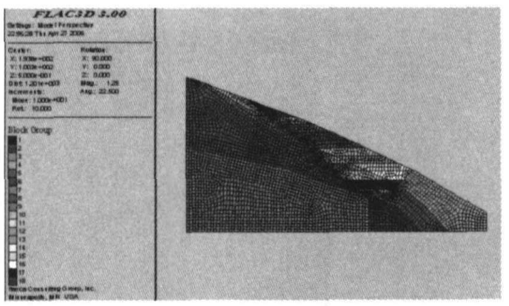


图 1 高边坡 FLAC 计算模型

(1) 计算天然状况下边坡稳定性，得到系统不平衡力演化全过程曲线及边坡的水平位移等值线图如图 2 和 3。从计算结果可以看出，系统不平衡力发展趋势收敛，而边坡结点的最大位移只有 2.5 cm，因此可以得出在天然状况下，对于所选参数，该边坡是稳定的，这与实际情况是相符合的。

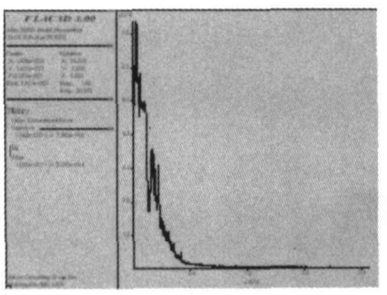


图 2 天然状况下不平衡力演化曲线

(2) 取折减系数为 1.2，得到系统不平衡力曲线以及水平方向位移等值线图如图 4 和 5。由计算结果分析可知，在折减系数为 1.2 时，系统不平衡力发展趋势不收敛，最大位移达到 7.7 m，边坡失稳，因此边坡安全系数应介于 1～1.2 之间。

(3) 当折减系数取 1.1 时，计算得到系统不平衡力和位移矢量图如图 6 和图 7 所示。由计算结果分析可知，在折减系数为 1.1 时，系统不平衡力发展趋势收敛，水平方向最大位移 8.6 cm。

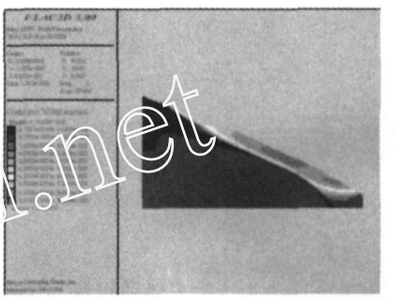


图 3 天然状态下水平方向位移等值线云图

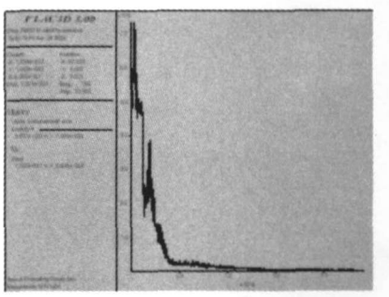


图 4 折减系数为 1.2 不平衡力演化曲线

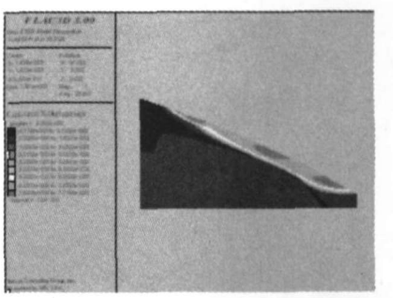


图 5 折减系数为 1.2 水平方向位移等值线云图

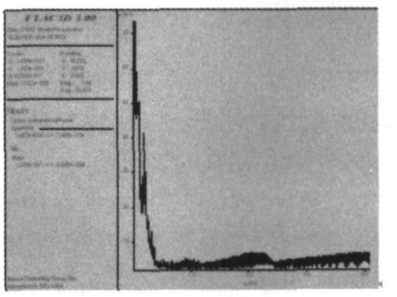


图 6 折减系数为 1.1 不平衡力演化曲线

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表1 计算模型中的材料参数

项目	变形模量 E/GPa	泊松比	摩擦角/(°)	粘聚力/kPa	抗拉强度/kPa	密度/(kg·m^{-3})	体积模量/Pa	剪切模量/Pa
强风化上带	0.3	0.4	18	50	20	2400	500000000	107142857.1
强风化下带	0.8	0.38	22	100	70	2500	1111111111	289855072.5
弱风化	5	0.28	33	300	270	2650	3787878788	1953125000
微风化	9	0.26	35	450	420	2700	6250000000	3571428571

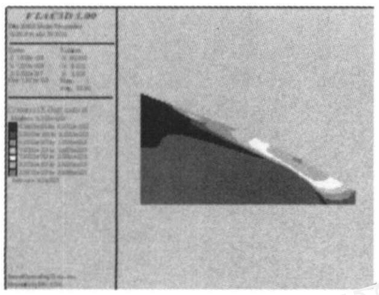


图7 折减系数为1.1水平方向位移等值线云图

(4) 取折减系数为1.15得到系统不平衡力曲线以及水平方向位移等值线图如图8和图9。由计算结果分析可知，在折减系数为1.15时，系统不平衡力发展趋势不收敛，水平方向最大位移51 cm，边坡不稳定，因此边坡安全系数应介于1.1～1.15之间。

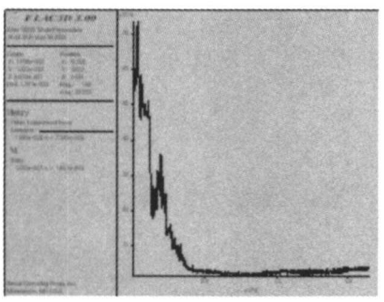


图8 折减系数为1.15不平衡力演化曲线

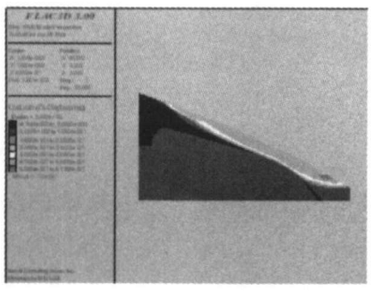


图9 折减系数为1.15水平方向位移等值线云图

(5) 取折减系数为1.125得到系统不平衡力曲线以及水平方向位移等值线图如图10和图11。

由计算结果分析可知，在折减系数为1.125时，系统不平衡力发展趋势不收敛，水平方向最大位移达到62.4 cm，边坡不稳定，因此边坡安全系数应介于1.1～1.125之间。偏于保守起见，我们取此边坡安全系数为1.1，可见，此边坡目前处于稳定状态，这和实际情况相符合。而边坡安全系数为1.1时边坡的塑性区，即为可能的边坡滑动面。同时还得出，在FLAC程序中用强度折减的方法来计算安全系数比直接用solve命令求解优越，速度快且直观。

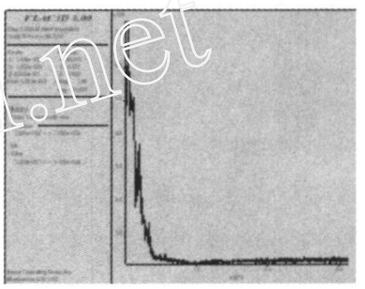


图10 折减系数为1.125不平衡力演化曲线

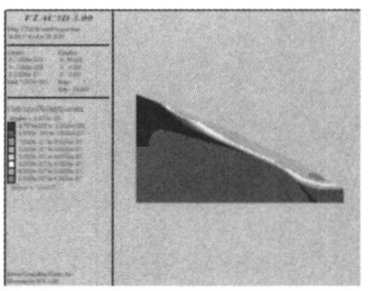


图11 折减系数为1.125水平方向位移等值线云图

3 极限平衡分析法检验

我们选用Sarma法和能量法来进行岩质边坡稳定性分析验证。

(1) 首先进行Sarma法分析，采用理正岩土软件进行极限平衡分析。理正岩质边坡（稳定）分析软件主要功能是分析计算简单平面、复杂平面、简单三维楔体岩质边坡的稳定计算及相关的分析。考虑的因素包括：岩体结构的结构面、裂隙、裂隙水、外加荷载、锚杆及结构面的抗剪强度、地震作用等。本工程采用第二种“复杂平面稳定问题”中的Sarma法来进行分析计算。参照前面FLAC分析结果，按照塑性区形状构造滑裂面，反复试算，找出安全系数最小的可能滑裂面，如图5、6所示分析结果，得安全系数为1.182。

(2) 用能量法EMU程序搜索出可能的临界滑裂面，求出相对应的安全系数。EMU是一个对滑坡体采用倾斜条块的极限分析上限解的稳定分析程序。一般情况下，倾斜侧面上的强度指标取该侧面通过的土层指标的平均值。当

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

滑坡体为连续介质时（如土质边坡），每个土条界面倾斜角度δ_i将和滑裂面坐标一起通过优化计算，确定一个相应最小安全系数的临界模式。程序通过优化计算获得临界滑裂面和相应的倾角。EMU 程序结果安全系数为为 1.1872，

4 结　论

传统的极限平衡方法尚不能搜索出危险滑动面以及相应的稳定安全系数。而目前的各种数值分析方法，一般只是得出边坡应力、位移、塑性区，也无法得到边坡危险滑动面以及相应的安全系数。基于强度折减技术的快速拉格朗日元法，对洞巴水电站左岸典型岩质边坡稳定性进行评价研究，取得了较好的效果，得出以下结论：证实了基于强度折减技术的 FLAC^{3D} 程序用于岩质边坡稳定性分析是可行的，并且和极限平衡分析结果相比较，表明 FLAC 分析结果是可信的；利用强度折减技术结合 FLAC^{3D} 程序分析边坡的稳定性，采用解的数值不收敛作为破坏标准，边坡破坏和数值不收敛同时发生，并伴随着网格节点位移显著增加，就意味着出现破坏，该方法具有以下优点：

(1) 不需要事先假设滑面的形状，破坏发生在土体内剪应力超过剪切强度的区域。

(2) 不需要假设条间力，维持整体平衡直到达到破坏。

(3) 考虑了土体的非线性弹塑性本构关系，以及变形对应力的影响，可以模拟渐进破坏直到整体剪切破坏，滑移面大致在水平位移突变的地方及塑性变形发展严重的部位，呈条带状，这与实际情况吻合。

(4) 能够对复杂地貌和地质情况的边坡进行计算。

参考文献：

[1] 陈祖煜. 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, 2004.

[2] 张有天, 周维恒. 三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究丛书——岩石高边坡的变形与稳定[M]. 北京：中国水利水电出版社, 1999.

[3] SARMA S K. Stability analysis of embankments and slopes[J]. ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1979, **105**(12):1511 - 1524.

[4] 陈祥军, 汤劲松. 用 FLAC3D 进行马崖高边坡稳定性分析[J]. 石家庄铁道学院学报, 2002,**15**(3).

[5] 梁海波, 等. FLAC 程序及其在水电工程中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1996.

[6] 刘立平, 姜德义, 郑硕才, 等. 边坡稳定性分析方法的最新进展[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2000,**23**(3).

[7] 胡柳青, 李夕兵, 温世游. 边坡稳定性研究及其发展趋势[J]. 矿业研究与开发, 2000,**20**(5).

[8] 王向东. 昆明东支线土质高边坡稳定性分析及支护研究[D]. 西安：西南交通大学, 2004.

[9] 喻军华. 岩质高边坡开挖与支护过程分析[D]. 杭州：浙江大学, 2005.

[10] 寇晓东, 周维恒, 杨若琼. FLAC^{3D} 进行三峡船闸高边坡稳定分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, **20**(1).

[11] 宋国新, 孔繁友, 杨子荣. 巴山水电站大坝溢洪道高边坡稳定性的 FLAC^{3D} 程序分析[J]. 边坡工程.

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net