

武都水库坝基深层抗滑稳定性评价中 BD 角的合理取值

卢坤林^{1,2}, 朱大勇^{1,2}

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009 ;
2. 合肥工业大学安徽省土木工程与材料重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要 :针对武都水库大坝坝基深层抗滑稳定性分析过程中 BD 角合理取值问题 ,应用多种严格极限平衡法和极限分析法对该坝基深层抗滑稳定性评价中的 BD 角取值进行了分析论证 ,研究 BD 角在各种工况下变化趋势与合理取值。结果表明 : BD 角不等于 0° ,不考虑 BD 角会低估坝基的抗滑能力 ,潜在滑面稳定性较好时 , BD 角较小 ,潜在滑面稳定性较差时 , BD 角较大 ;对于武都水库大坝坝基加固工程及类似工程 ,采用规范中双滑面等安全系数法计算时 , BD 角取 15° 是合适的且留有安全裕度。武都水库大坝坝基加固工程的 BD 角取为 15° ,节约了大量加固费用。

关键词 : BD 角 ;深层抗滑 ;坝基 ;武都水库

中图分类号 :TV642.3 文献标志码 :A 文章编号 :1006-7647(2012)03-0035-04

Reasonable value of BD angle in deep dam foundation stability analysis of Wudu Reservoir//LU Kun-lin^{1,2}, ZHU Da-yong^{1,2} (1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China ; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering and Materials, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract :Based on the problem of reasonable BD angle values in the analysis of foundation stability of the Wudu Reservoir Dam , several limit equilibrium methods and limit analysis methods were applied in this study to estimate the proper value of its BD angle and to investigate the reasonable values as well as the changing trend under different working conditions. The results indicate that : (1) the anti-slide stability of the dam foundation will be underestimated if the BD angle value is assumed to be zero ; (2) the better the stability of the potential sliding is , the BD angle value is smaller ; and (3) 15° is a reasonable value for the BD angle for the dam foundation reinforcement projects in which the geological condition is similar to the Wudu Reservoir project. A large amount of the reinforcement expenditure is saved by considering the BD angle value to be 15° in the Wudu Reservoir Project.

Key words : BD angle ; deep dam foundation stability ; dam foundation ; Wudu Reservoir

坝基深层抗滑稳定性是重力坝设计的一个经典课题 ,已取得了丰硕的成果^[1-5]。目前 ,此类课题常采用的分析方法有刚体极限平衡法、有限单元法、地质力学模型试验法等 ,但目前仍以传统的刚体极限平衡法为主 ,其他方法为辅^[6]。

在极限平衡法的理论框架下 ,双滑面是重力坝深层抗滑稳定性分析中最常见的一种失稳模式 ,如图 1 所示(图中 : W 为作用于坝体上全部荷载的垂直分量 ; H 为作用于坝体上全部荷载的水平分量 ; U_1, U_2, U_3 分别为 AB, BC, BD 面上的扬压力 ; G_1 与 G_2 分别为滑块 ABD 与 BCD 重量的垂直作用力 ; Q 与 φ 分别为 BD 面上的作用力及其与水平面的夹角 (BD 角) ; α 和 β 分别为 AB 与 BC 面与水平面的

夹角)。在具体计算时需要将双滑面中的 BD 面上的推力倾角 φ (俗称 BD 角)进行假设 ,国内相关规范^[6-7]建议 $\varphi = 0^\circ$,美国陆军工程兵团也有类似的规定^[8]。实际上 ,从边坡稳定分析理论可知 $\varphi \neq 0^\circ$,取 $\varphi = 0^\circ$ 计算存在不少安全裕度^[9] ,抗滑稳定安全系数

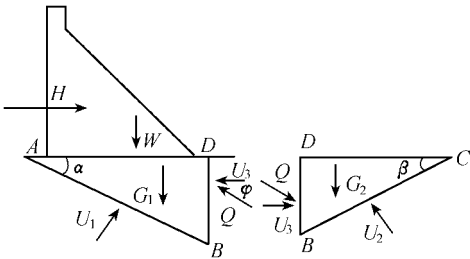


图 1 双滑面稳定分析简图

可能低估 10% ~ 20%^[10] ,造成巨大的工程浪费。因此 ,恰当地确定 BD 角倍受理论和工程界的关注 ,已有一些实际工程根据经验对 BD 角取值并获得成功^[11-13]。

SL319—2005《混凝土重力坝设计规范》规定的坝基深层抗滑稳定计算方法为双滑面等安全系数法 ,计算时需假定滑块 BD 角 , BD 角赋值的任意性必然会带来计算结果的不确定性 ,特别是对地质条件复杂的武都水库大坝坝基深层抗滑稳定安全系数影响甚大。

采用严格极限平衡法分析重力坝深层抗滑稳定性无需假定 BD 角 ,可通过力矩平衡来确定 BD 角 , SL386—2007《水利水电工程边坡设计规范》将 Morgenstern-Price 法(以下简称 M-P 法)列为首选方法^[14] ,避免了 BD 角赋值的任意性给计算结果带来的不确定性 ,同时也可以作为合理确定 BD 角的一个重要参考因素^[10]。

武都水库大坝坝基地质条件复杂 ,数条断层、层间错动带与多条裂隙面组合成坝基下众多潜在滑体 ,影响坝基的安全性。按 SL319—2005《混凝土重力坝设计规范》分析其深层稳定性 ,将低估坝基岩体的抗滑能力 ,造成基础处理量过大 ,因此 , BD 角的合理取值是该坝基设计的关键。鉴于此 ,本文采用多种严格极限平衡法和极限分析法分析武都水库大坝坝基深层抗滑稳定性 ,研究 BD 角在各种工况下的变化趋势与合理取值。分析结果表明 ,对于武都水库大坝坝基加固工程及类似工程 , BD 角取 15° 是合适的且留有安全裕度。

1 工程概况与计算资料

1.1 工程概况

武都引水工程^[15]是四川省“西水东调”总体规划中确定的大型综合利用水利工程。武都水库最大坝高 120.34 m ,水库总库容为 5.72 亿 m^3 。大坝的坝顶高程 661.34 m ,坝顶长度 727.00 m ,建基面最低高程 541.00 m ,最大坝高 120.34 m ,坝体设计为碾压混凝土重力坝。

武都水库坝址区位于龙门山褶断带前山构造带的北段 ,处于 F5 与 F7 断层之间 ,坝基岩体中存在 8 个断层、42 条层间错动带、13 条溶蚀带和大量的裂隙等结构面 ,严重影响坝基的深层抗滑稳定。根据初步计算^[16] ,拟综合采用明挖混凝土置换、齿墙、洞塞及压脚等多种措施加固地基 ,但工程处理量过大且耗资颇多。

1.2 计算工况

根据 SL319—2005《混凝土重力坝设计规范》,

在进行大坝深层抗滑稳定性分析时须考虑 4 种工况(荷载组合) ,列于表 1 中。

表 1 荷载组合

荷载	工况 1 (正常蓄水位)	工况 2 (设计洪水位)	工况 3 (校核洪水位)	工况 4 (正常蓄水 + 8 度地震)
自重	✓	✓	✓	✓
静水压力	✓	✓	✓	✓
扬压力	✓	✓	✓	✓
浪压力	✓	✓	✓	✓
淤砂压力	✓	✓	✓	✓
地震作用				✓
动水压力		✓	✓	
其他荷载	✓	✓	✓	✓

1.3 分析参数

依据前期研究成果^[16] ,表 2 给出了坝址区岩体和结构面的物理力学参数。

表 2 坝址区岩体和结构面的物理力学参数

岩体和结构面	密度/($t \cdot m^{-3}$)	抗剪强度参数	
		c /MPa	φ /($^\circ$)
基岩	2.76	0.80	38.68
F31	2.14	0.03	19.30
10f2-4	2.14	0.06	26.60
10f2-5	2.14	0.10	28.80
f115-2	2.14	0.10	19.30
f115-3	2.14	0.06	24.20
f114-3	2.14	0.06	24.20
层间错层	2.14	0.06	24.20
裂隙	2.14	0.12	33.00

1.4 可能的组合滑面

以坝基中稳定性最差的 18 号坝段为例 ,先期研究^[16]根据不同结构面的组合 ,提出了 36 个可能的组合滑面(编号为组合滑面 1 ~ 36 ,限于篇幅不具体列出)。

2 计算方法与分析流程

SL319—2005《混凝土重力坝设计规范》规定 : BD 角的取值须经论证后选用 ,偏于安全考虑可取为零。对于武都水库大坝坝基加固工程 , BD 角对计算结果影响较大 ,合理取值对坝基加固处理的可靠性和经济性都有较大的影响。多次专家专题咨询 ,都认为对 BD 角赋值是合理、应该的 ,关键是赋值的大小^[16]。

采用严格极限平衡方法如 M-P 法可求出 BD 角 ,但求解过程往往非常复杂 ,一般工程技术人员不易掌握 ,故 M-P 法在我国应用并不普遍。朱大勇等^[17]曾对 M-P 法计算格式作了实质性改进 ,简化了求解过程 ,本文拟采用该改进方法(以下简称改进 M-P 法) ,计算结果与经典 M-P 法完全一致 ,仅计算过程程序化 ,结果易收敛 ,研究不同组合滑面在不同工

况下 BD 角的变化趋势,为其合理取值提供理论依据。同时还采用了基于滑面正应力修正的极限平衡法^[18](以下简称正应力修正法)计算各工况下的 BD 角,使得计算结果相互验证,更具有说服力。

图 2 给出了本文研究的分析流程。

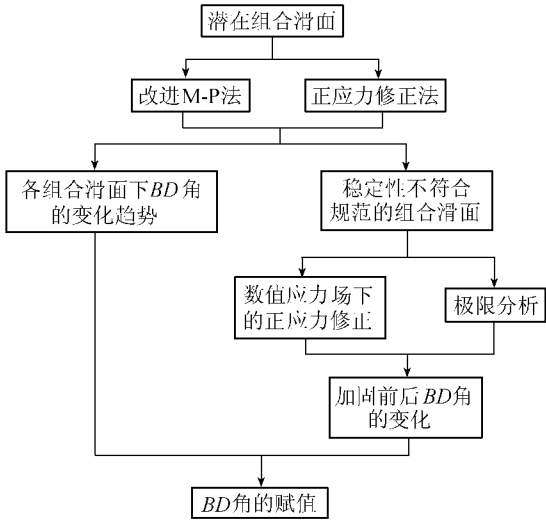


图 2 BD 角赋值的研究分析流程

3 计算结果与分析

3.1 各组合滑面下的 BD 角

分别采用改进 M-P 法和正应力修正法两种严格极限平衡法计算武都水库大坝坝基可能的 36 组滑面, BD 角在各种工况下变化趋势如图 3 所示。

由图 3 可以看出:①两种方法得到的 BD 角基本一致,平均相差约 6.5° ,表明计算数据合理可靠;② BD 角不为零,应该予以适当赋值;③对于武都水

库大坝坝基加固工程而言, BD 角普遍大于 10° ,不考虑 BD 角会低估坝基的抗滑能力;④安全系数较高时, BD 角较小,而安全系数较低时, BD 角较大。

依据 SL319—2005《混凝土重力坝设计规范》36 组滑面中的组合滑面 5、6、9、28、32 和 34 的抗滑安全系数不能满足规范要求,从图 3 中还可以发现,不满足规范要求的 6 个组合滑面对应的 BD 角普遍高于其他组合滑面。

至此,可以认为上述 6 个组合滑面就是决定坝基深层抗滑稳定性的控制滑面,同时也是真正决定 BD 角赋值的关键滑面。

3.2 关键滑面加固前后的 BD 角

对于抗滑安全系数不能满足规范要求的组合滑面 5、6、9、28、32 和 34,需对坝基进行加固处理。

为了进一步研究 BD 角的合理赋值,在 3.1 节中的两种严格极限平衡法的基础上增加基于数值应力场的正应力修正法^[19](以下简称数值正应力法)和极限分析法^[20]来计算不满足规范要求的 6 个组合滑面在加固前后各工况下的 BD 角。

表 3 给出了 6 个组合滑面在加固前后不同分析方法得到的 BD 角。加固前,各组合滑面的 BD 角介于 $13^\circ \sim 65^\circ$ 之间,平均值为 43° ;加固后 BD 角普遍有所降低,其值介于 $15^\circ \sim 44^\circ$ 之间,平均值为 28° ,平均降幅为 34.9%。

加固前,与改进 M-P 法的计算结果相比,由正应力修正法所求的 BD 角平均偏低 21.6%,由数值正应力法所求的 BD 角平均偏低 22.5%,由极限分析法所求的 BD 角平均偏低 4.7%。

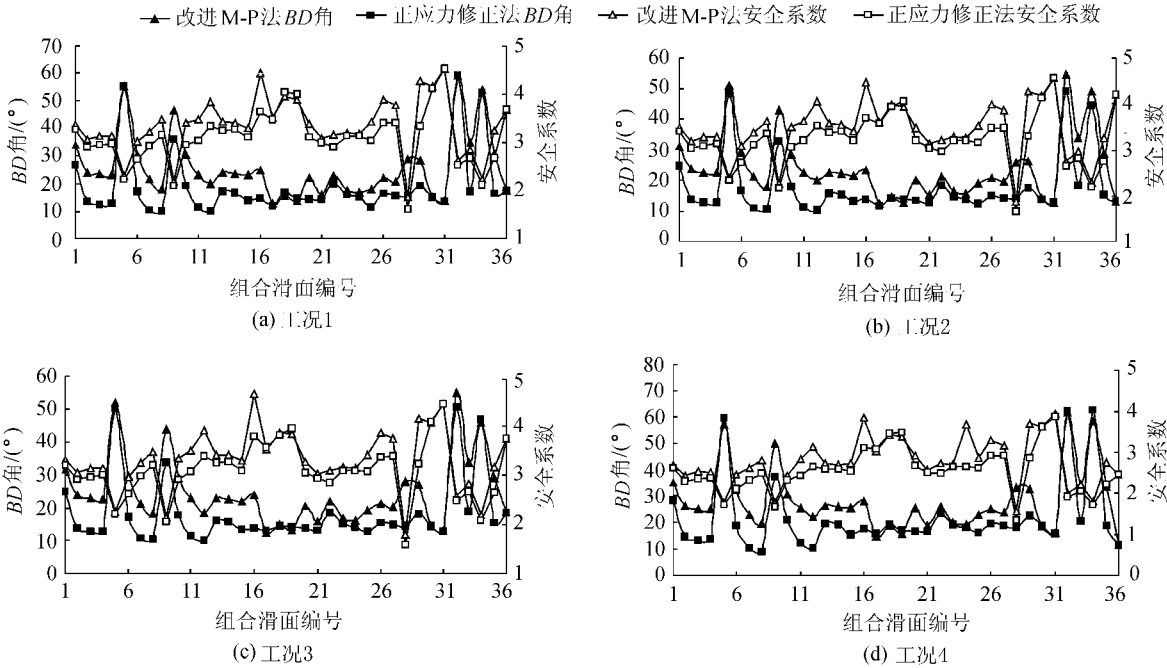


图 3 不同组合滑面下的 BD 角

表 3 关键 6 组滑面加固前后的 BD 角

组合滑面 编号	分析方法	BD 角(°)							
		工况 1		工况 2		工况 3		工况 4	
		加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后	加固前	加固后
5	改进 M-P 法	55.28	21.67	50.88	20.66	51.98	21.13	56.81	22.07
	正应力修正法	53.27	19.48	45.41	18.64	47.66	19.00	58.67	21.10
	数值正应力法	53.55	21.29	48.46	21.19	50.78	20.54	58.59	26.16
	极限分析法	51.96	19.50	46.81	19.83	50.94	19.86	59.08	20.75
6	改进 M-P 法	30.47	29.73	29.21	28.02	29.56	28.41	32.45	31.34
	正应力修正法	15.81	15.68	15.47	15.05	15.87	15.47	17.82	17.76
	数值正应力法	14.79	21.97	13.26	20.60	14.51	21.70	21.82	29.95
	极限分析法	30.77	27.05	30.38	29.14	31.92	30.40	34.40	32.28
9	改进 M-P 法	46.51	30.09	43.01	28.04	43.91	28.64	49.90	32.00
	正应力修正法	34.46	33.97	35.24	30.86	36.02	31.85	39.04	35.72
	数值正应力法	39.81	31.87	39.55	33.75	39.44	34.03	33.75	25.26
	极限分析法	48.84	31.29	40.86	27.48	46.98	28.93	51.40	34.56
28	改进 M-P 法	28.87	18.32	25.94	16.85	27.83	17.42	32.93	20.36
	正应力修正法	19.56	19.33	18.39	18.34	18.37	18.67	21.61	21.62
	数值正应力法	44.63	33.08	42.90	33.70	43.60	34.31	48.36	34.55
	极限分析法	27.43	17.77	26.98	17.69	28.11	18.29	31.61	18.53
32	改进 M-P 法	59.32	36.08	54.71	32.91	55.10	33.07	61.52	34.33
	正应力修正法	57.81	23.29	46.15	21.17	48.21	21.55	61.98	23.41
	数值正应力法	60.49	37.21	53.82	35.09	55.07	35.63	61.72	39.77
	极限分析法	61.10	36.44	56.90	33.90	58.41	35.05	64.60	35.36
34	改进 M-P 法	54.05	30.16	49.23	27.51	45.84	28.24	58.19	32.27
	正应力修正法	47.93	27.14	43.26	23.75	45.56	24.64	61.45	31.01
	数值正应力法	52.98	38.74	48.62	37.29	50.77	38.55	61.26	43.76
	极限分析法	52.43	28.35	53.17	27.23	47.67	29.09	61.68	32.92

加固后 ,与改进 M-P 法的计算结果相比 ,由正应力修正法所求的 BD 角平均偏低 19.5% ,由数值正应力法所求的 BD 角平均偏低 30.0% ,由极限分析法所求的 BD 角平均偏低 4.6%

总体而言 ,加固前后 BD 角在各工况下的变化趋势基本一致 ,加固后滑面稳定程度增强 ,相应的 BD 角则有所降低 ,改进 M-P 法的平均降幅为 36.5% ,正应力修正法的平均降幅为 29.2% ,数值正应力法的平均降幅为 19.1% ,极限分析法的平均降幅为 37.7%。

3.3 BD 角赋值的综合评定

综上所述 ,各种方法得到的结果基本一致 ,依据计算结果将 36 个组合滑面划分成稳定性符合规范要求与不满足规范要求的两类 ,而不满足规范要求的 6 组滑面才是决定 BD 角赋值的关键滑面。针对这 6 组滑面 ,加固前 BD 角普遍大于 20° ,仅少数小于 20° ,加固后 BD 角平均降低约 34.9% ,但均大于 15°。因此 ,采用规范中双滑面等安全系数法计算时 ,取 15°~20°是适宜可行的。故建议取下限 15°是合理的 ,且留有一定的安全裕度。

该分析结果为业主所采纳 ,节约相关费用约 1.2 亿元 ,取得了良好的经济效果。

4 结 论

a. 坝基深层抗滑稳定性分析中应适当考虑 BD 角 ,不考虑 BD 角会低估坝基的抗滑能力。

b. BD 角与潜在滑面的稳定程度有关 ,稳定性较好时 ,BD 角较小 ;当潜在滑面稳定性较差时 ,BD 角较大 ,因此 ,加固后同一滑面的 BD 角有所减小。本文所提出的 BD 角取值为极限状态下的取值 ,其他状态取值应小于极限状态。

c. 对于武都水库大坝坝基加固工程及类似工程 ,采用规范中双滑面等安全系数法计算时 ,BD 角取 15°是合适的且留有安全裕度。

参考文献 :

[1] 陈际唐 ,游万敏 .关于坝基深层抗滑稳定刚体极限平衡法的改进 [J].水利学报 ,2011 ,42(8) :963-969.
[2] 苏怀智 ,刘红萍 .高重力坝抗滑稳定安全度分析 [J].水利水电科技进展 ,2011 ,31(4) :20-23.
[3] 王小毛 ,徐麟祥 ,廖仁强 .三峡工程大坝设计 [J].中国工程科学 ,2011 ,13(7) :70-77.
[4] 丁泽霖 ,张林 ,陈媛 ,等 .重力坝深层抗滑稳定三维地质力学模型破坏试验研究 [J].水利学报 ,2011 ,42(4) :499-504.

(下转第 47 页)

大,单一计算耗时大,计算机有多个 CPU 时,使用并行方法进行计算是非常必要和具有优越性的。

参考文献：

[1] 汝乃华,牛运光.大坝事故与安全[M].北京:中国水利水电出版社,2001.

[2] 袁会娜.基于神经网络和演化算法的土石坝位移反演分析[D].北京:清华大学,2003.

[3] KAVANGH K T,CLOUGH R W. Finite element application in the characterization of elastic solid[J]. Int J Solids Structures , 1973(7):11-23.

[4] KENNEDY J,EBERHART R C. Particle swarm optimization [C]//Proc IEEE International Conference on Neural Networks IV .Piscataway ,NJ : IEEE Service Center ,1995 :1942-1948.

[5] SHI Y ,EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Alaska : Anchorage ,1998 :69-73.

[6] 刘建华.粒子群算法的基本理论及其改进研究[D].长沙:中南大学,2009.

[7] SHI Y ,EBERHART R. Empirical study of particle swarm optimization [C]//Proceedings of the 1999 Congress on

Evolutionary Computation. Piscataway , NJ : IEEE Service Center ,1999 :1948-1950.

[8] 曾建潮,崔志华.微粒群算法的统一模型及分析[J].计算机研究与发展,2006,43(1):96-100.

[9] 杜好.基于微粒群算法的堆石坝坝料参数反演分析[D].大连:大连理工大学,2006.

[10] 岳戈,陈权. ADINA 应用基础与实例详解[M].北京:人民交通出版社,2008.

[11] HERMANN S M. Parallel programming in Fortran 95 Using OpenMP[M]. Madrid : School of Aeronautical Engineering. 2002.

[12] 赵川,刘盛乾,李锡林,等.糯扎渡水电站粘土心墙压实度检测方法与控制标准[J].云南水力发电,2009,25(5):58-61.

[13] 牟声远,王正中.堆石料邓肯张模型的参数敏感性与统计分析[J].中国农村水利水电,2009(3):97-100.

[14] SHI Y ,EBERHART R C. A modified particle swarm optimizer [C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Piscataway ,NJ : IEEE Press ,1998 :69-73.

(收稿日期:2011-09-19 编辑:周红梅)

(上接第38页)

[5] AL-HOMOUD A S ,TANASH N. Modeling uncertainty in stability analysis for design of embankment dams on difficult foundation[J]. Engineering Geology ,2004 ,71(3):323-342.

[6] SL319—2005 混凝土重力坝设计规范[S].

[7] SL274—2001 碾压式土石坝设计规范[S].

[8] EM1110-2-2200 Engineering and design gravity dam design [S]. Washington D. C. :Department of the Army ,US Army Corps of Engineers ,1995.

[9] 陈祖煜.土质边坡稳定分析:原理·方法·程序[M].北京:中国水利水电出版社,2003:67-82.

[10] 周建平,钮新强,贾金生.重力坝设计二十年[M].北京:中国水利水电出版社,2008:319-328.

[11] 黄东军,聂广明.重力坝深层抗滑稳定安全评价若干问题的思考[J].水力发电学报,2005,24(2):90-93.

[12] 孙冠华,郑宏,童伟.重力坝双滑面抗滑稳定分析中抗力角的取值建议[J].水力发电学报,2011,30(3):164-168.

[13] 苑举卫,杜成斌,洪永文.厂坝联合作用下重力坝厂房坝段静动抗滑稳定分析[J].河海大学学报:自然科学版,2008,36(2):229-233.

[14] SL386—2007 水利水电工程边坡设计规范[S].

[15] 合肥工业大学,四川省水利水电勘测设计研究院.武都水库大坝18#坝段深层抗滑稳定性分析研究报告[R].合肥:合肥工业大学,2006.

[16] 四川武都引水第二期工程武都水库技施设计阶段大坝深层抗滑稳定设计报告[R].成都:水利部,四川省水利水电勘测设计研究院,2006.

[17] 朱大勇,李焯芬,黄茂松,等.对三种著名边坡稳定性计算方法的改进[J].岩石力学与工程学报,2005,24(2):183-194.

[18] ZHU Da-yong ,LEE C F. Explicit limit equilibrium solution for slope stability[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics ,2002 ,26(15):1573-1590.

[19] 朱大勇,卢坤林,台佳佳,等.基于数值应力场的极限平衡法及其工程应用[J].岩石力学与工程学报,2009,28(10):1969-1975.

[20] 范鹏贤,朱大勇,郭志昆,等.动态规划法求解边坡安全系数最小上解[J].岩土工程学报,2007,29(3):467-470.

(收稿日期:2011-11-21 编辑:熊水斌)

