

doi: 10.3724/SP.J.1201.2014.01097

基于强度折减法的三维有限元在边坡加固工程中的应用

苏超¹, 尹晓明¹, 徐晨²

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 浙江省水利水电勘测设计院, 杭州 310000)

摘要: 以某边坡加固工程为例, 应用基于强度折减法的三维有限元, 对该边坡天然状态下的稳定性进行了分析, 确定了边坡危险区域及最危险滑动面, 据此提出了贴坡和抗滑桩两种加固方案, 并对两种加固方案下的边坡稳定性进行了分析。研究表明, 基于强度折减法的三维有限元对存在软弱夹层、地质条件复杂的三维边坡进行稳定性分析是可靠的; 在选择边坡加固方案时, 进行三维有限元数值模拟是十分必要的。

关键词: 强度折减法; 三维有限元; 边坡稳定性; 贴坡加固; 抗滑桩加固

中图分类号: TU457 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)01-0097-04

Application of 3D FEM Based on Strength Reduction Method in Slope Reinforcement Project

SU Chao¹, YIN Xiaoming¹, XU Chen²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Electricity, Hohai University, Nanjing 210098;

2. Zhejiang Design Institute of Water Conservancy and Hydr-Electric power, Hangzhou 310000)

Abstract: The 3D finite element method based on strength reduction method was used to analyze the slope stability of a slope reinforcement project under natural conditions. The dangerous zone and most dangerous sliding surface of the slope were determined. On the basis, two reinforcement schemes were proposed, including the fitting slope reinforcement and anti slide pile reinforcement. The slope stability was analyzed under the two reinforcement schemes. The results showed that the 3D finite element method based on strength reduction method can provide reliable analysis of slope stability for the three dimensional slopes with weak interlining and complex geological conditions. The three dimensional finite element numerical simulation is necessary in the selection of slope reinforcement scheme.

Key words: strength reduction method; 3D finite element method; slope stability; fitting slope reinforcement; anti slide pile reinforcement

目前在工程实践中进行边坡稳定性分析时, 应用较广的主要是极限平衡法和有限元法, 极限平衡法假定若干个滑动面, 通过比较各个滑动面的安全系数来确定最危险滑动面和边坡整体稳定安全系数。由于滑动面的确定具有很大的人为性和随机性, 因此在分析较为复杂地质条件下的边坡稳定时(如地震、抗滑桩加固等)具有一定的局限性, 需要作进一步的假设^[1-2]。随着计算机技术和有限元理论的发展, 有限元法开始在边坡分析中得到应用^[3-6], 特别是假定边坡岩土体处于平面应变状态的二维计算实例较多。但是, 边坡发生滑坡时有明显的三维空间效应, 二维平面分析并不能反映边坡真实受力状态和失稳破坏模式, 因而三维分析在边坡问题

的稳定性评价及加固工程设计中更具有实际意义。利用三维有限元强度折减法求解安全系数时, 不需要假定滑动面的形状和位置, 也无需进行条分, 而是由程序自动求出滑动面, 滑动破坏自然地发生在岩土体剪切带上或塑性应变和位移突变的地方。此外, 利用有限元法对边坡稳定性进行计算不受边坡几何形状、边界条件及材料不均匀性的限制, 不但能够对具有复杂地质地貌的边坡进行计算, 而且能够模拟边坡的渐进破坏过程, 同时提供应力、应变和位移等力和变形的全部信息^[7-12]。本文采用三维有限元强度折减法模拟某三维特征明显的河岸边坡, 找出岸坡危险区域, 并依据天然状态稳定计算结果提出贴坡加固和抗滑桩加固两种方案, 对两

收稿日期: 2013-11-28 修回日期: 2013-12-17 网络出版时间: 2013-12-19
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3724/SP.J.1201.2014.01097.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51279053)

作者简介: 苏超(1960-), 男(满族), 吉林梅河口人, 教授, 博士生导师, 主要从事高边坡与地下工程稳定以及复杂水工结构的数值分析与优化设计研究。E-mail: csu@hhu.edu.cn

通讯作者: 尹晓明(1988-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事高边坡与地下工程数值仿真计算方面研究。E-mail: yinxiaoming888@126.com

种加固方案下边坡危险区域的稳定性进行计算, 得出较优方案, 为类似边坡加固工程的设计提供参考。

1 计算方法

1.1 有限元强度折减法计算原理

边坡稳定分析的有限元强度折减法通过不断降低边坡岩土体抗剪切强度参数, 直至达到极限破坏状态为止。通过三维有限元计算可以得出滑动破坏面, 同时得出边坡的强度储备安全系数^[12], 其在边坡稳定分析中的具体应用过程为: 将边坡岩土材料的初始强度参数 c_0 、 $\tan \varphi_0$ 值同时除以一个折减系数 K , 得到一组新的参数 c 、 $\tan \varphi$; 将新的参数带入有限元计算, 通过不断调整折减系数 K , 得到不同的 c 、 $\tan \varphi$; 当计算不再收敛或岩体变形有突变时, 与其最接近的 K 值称为边坡的整体稳定安全系数。其分析方程为:

$$c = c_0 / K \quad (1)$$

$$\tan \varphi = \tan \varphi_0 / K \quad (2)$$

式中: c 为材料黏聚力; φ 为材料内摩擦角。

图 1 为摩尔应力圆上的强度折减过程: 假设坡内某点的应力状态, 土体的实际强度包线为 a 线, 其与摩尔应力圆分离, 此时土体不会发生剪切破坏; 随着折减系数的不断增大, 强度包线逐渐向摩尔应力圆靠近 (b 线); 当折减系数增大到某一特定值时, 强度包线将与摩尔应力圆相切 (c 线)。此时折减后土体的抗剪强度与土体实际剪应力达到平衡, 处于临界状态。折减后强度包线变为极限强度包线, 相应的折减系数即为边坡稳定安全系数。

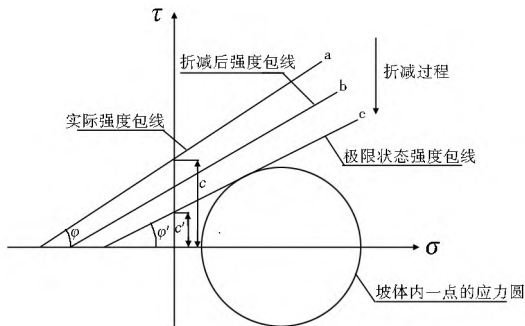


图 1 摩尔应力圆上的强度折减过程

Fig. 1 Strength reduction process on the Mohr stress circle

1.2 有限元中边坡失稳判据

有限元强度折减法计算原理较简单, 关键问题是边坡失稳临界状态的判定。现有的边坡失稳判别标准主要有收敛性判据、塑性区判据、突变性判据和能量法判据, 国际上习惯以计算机不收敛作为破坏判据, 即取边坡上一点作为特征点, 考察其位移随强度折减系数的变化, 将位移变化速率突然增大的点所处状态对应为边坡的临界失稳状态。特征点的选取位置直接影响收敛性判据的合理性, 因而采用收敛性判据时需选择边坡关键部位的点作为特征点^[12-13]。

2 工程应用

某河岸边坡因工程地质条件差又缺少防洪工程设施, 在强降雨和水电站回水淹没等多种因素影响下, 出现多处滑坡、塌岸等地质灾害, 严重危及两岸公路和建筑物安全。为

治理洪涝灾害, 改善边坡的不利受力状态, 拟对该边坡采取工程加固措施。计算范围取桩号 K0+ 000~ K0+ 380, 平面布置图如图 2 所示, 边坡岩土体参数由钻孔取样及现场原位试验获得, 断面 2 工程地质横剖面见图 2, 基本物理力学参数如表 1 所示。本文利用三维有限元强度折减法分析该岸坡在天然状态下的稳定性, 找出边坡危险区域并提出加固措施。

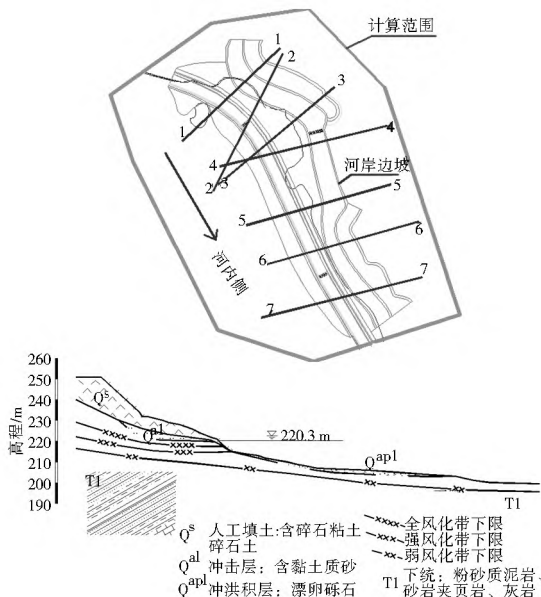


图 2 计算范围及断面 2-2 工程地质横剖面图

Fig. 2 The range of calculation and engineering geological cross sectional view of section 2-2

表 1 边坡岩土物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the slope

名称	密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$		黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	泊松比	变形模量 E / MPa
	天然	饱和				
人工填土(碎石、土)	1.90	1.96	15	19.0	0.34	25
冲积含黏土质砂	1.99	2.01	4	18.9	0.35	23.57
残坡积含砾黏土、黏土	2.01	2.03	24	22.0	0.30	33.10
全风化砂岩、粉砂质泥岩	2.01	2.06	19	26.0	0.30	36.45
强风化砂岩、泥岩	2.46	2.46	101	22.0	0.40	200
弱风化砂岩、泥岩	2.65	2.65	300	32.0	0.36	2 100
微风化砂岩、泥岩	2.70	2.70	700	38.8	0.30	3 000

2.1 模型建立与边坡稳定性分析

2.1.1 模型建立

采用空间八结点六面体和六结点五面体等参单元, 将天然状态下边坡整体三维有限元模型划分为 234 806 个单元, 251 942 个结点, 网格示意图如图 3 所示。计算考虑的主要荷载有: 边坡自重荷载、公路荷载和临水边坡表面水压力等。屈服准则采用 Drucker Prager 屈服准则, 失稳判据以数值计算是否收敛、是否形成连续的贯通区以及特征部位的位移拐点作为评价标准。

2.1.2 边坡稳定性分析

根据有限元计算结果, 发现该边坡在桩号 K0+ 75 至 K0+

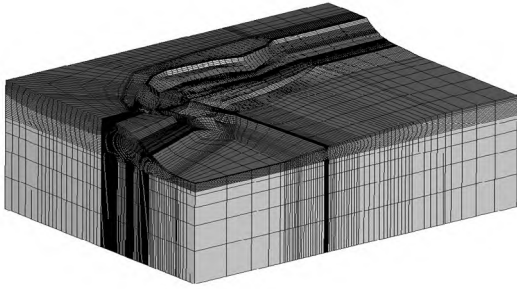


图 3 天然状态边坡计算网格示意图

Fig. 3 Finite element grid of the slope under natural conditions

120 区域塑性区发展较快,为整体模型中最危险区域,而实际上该区域存在裂缝、地面沉降等不良地质现象,计算结果与实际情况相符。计算结果还发现, K0+ 85 断面是边坡天然状态下的最危险断面,从不同强度折减系数下 K0+ 85 断面塑性区分布云图(图 4)可知:当 $K = 1$ 时,坡体出现塑性区;随着 K 值的不断增大,塑性区范围也逐渐增大;当 $K = 1.05$ 时,上部边坡的塑性区基本贯通;当 $K = 1.15$ 时,在已经贯通的塑性区下部,又出现了新的贯通塑性区,新出现的塑性区滑动带正是该断面地层中的软弱夹层部位。

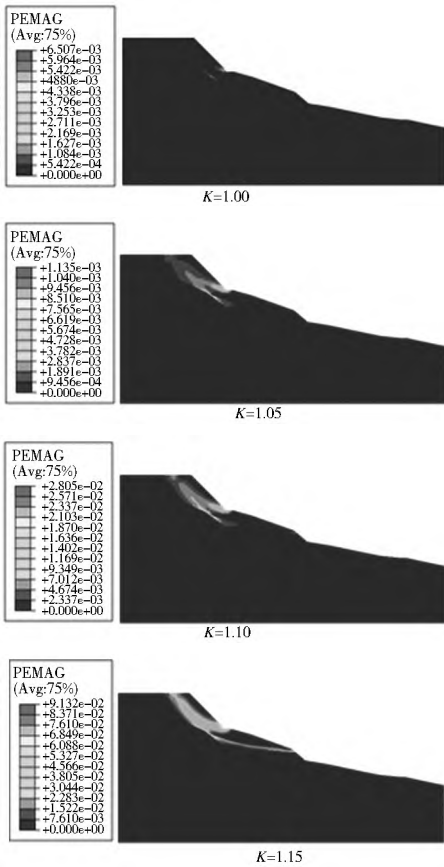


图 4 天然状态不同强度折减系数下 K0+ 85 断面塑性区发展变化示意图

Fig. 4 Schematic diagram of plastic zone development at section K0+ 85 for different strength reduction factors under natural conditions

2.2 加固方案下的边坡稳定性分析

为提高边坡稳定性,改善其受力状态,根据模型计算结果提出了两种加固方案:方案一,采用贴坡加固,使边坡坡脚

放缓;方案二,设置单排抗滑桩,抗滑桩桩顶位于 238 m 高程,桩长 20 m,桩底均打入弱风化岩层,桩体断面尺寸为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$,桩间距为 5 m。依据天然状态下边坡三维稳定分析成果,选取稳定性最差的 K0+ 85 断面,分别建立该截面控制段在贴坡加固方案及抗滑桩加固方案下的三维有限元计算模型,见图 5、图 6。

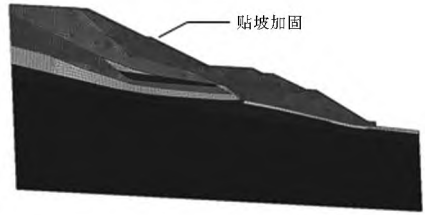


图 5 边坡危险截面段贴坡加固下三维有限元计算网格

Fig. 5 Finite element grid of the dangerous slope section under the fitting slope reinforcement



图 6 边坡危险截面段单排抗滑桩加固方案有限元计算网格

Fig. 6 Finite element grid of the dangerous slope section under the single row piles reinforcement

经计算,两种加固方案下, K0+ 85 断面发生失稳时塑性区如图 7、图 8 所示。在 K0+ 85 断面附近选取边坡表面 230 m 高程控制点,两种工况下该点位移随强度折减系数变化曲线见图 9、图 10。

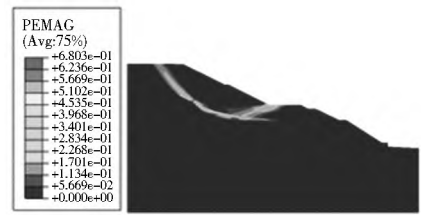


图 7 贴坡加固下边坡 K0+ 85 危险断面段 $K = 2.2$ 塑性区示意图

Fig. 7 The plastic zone of the dangerous section K0 + 85 when K is 2.2 under the fitting slope reinforcement



图 8 单排抗滑桩加固下边坡 K0+ 85 危险断面段 $K = 1.20$ 塑性区示意图

Fig. 8 The plastic zone of the dangerous section K0 + 85 when K is 1.2 under the single row piles reinforcement

从图 9 可知:贴坡加固方案下,当 K 从 1 增加到 2.2 时,边坡表面特征点位移变化不明显;当 K 继续增加时,边坡表

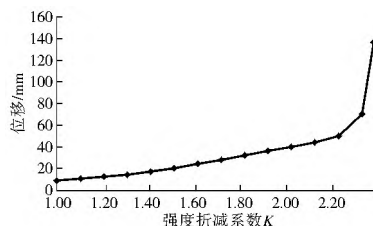


图 9 贴坡加固 230 m 高程点位移随强度折减系数变化曲线

Fig. 9 Variation of the displacement in the 230 m elevation with strength reduction factor under the fitting slope reinforcement

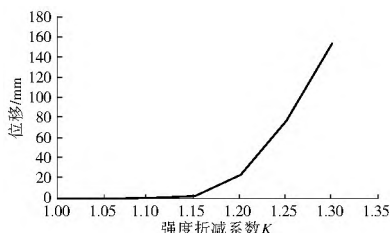


图 10 单排抗滑桩加固 230 m 高程点位移随强度折减系数变化曲线

Fig. 10 Variation of the displacement in the 230 m elevation with strength reduction factor under the single row piles reinforcement

面特征点位移变化率明显增大, K0+85 断面段边坡稳定安全系数为 2.2。与天然状态相比, K0+85 断面贴坡加固后稳定安全系数有明显提升。

从图 10 可知: 当 K 从 1 增加到 1.15 时, 边坡表面特征点位移变化不明显; 当 K 继续增加时, 边坡表面特征点位移变化率明显增大, 此时位移发生突变。在单排 5 m 间距抗滑桩加固方案下 K0+85 断面段边坡稳定安全系数不小于 1.15。与天然状态下相比, 稳定安全系数略有提升, 但不明显。分析其原因, 主要是边坡上部的坡度较大且岩土强度太低, 以至于单排抗滑桩加固后, 坡顶至桩顶间的坡体部分又快速形成贯通塑性区, 而单排抗滑桩的影响范围有限, 难以从整体上大量提升边坡的稳定安全性。另外, 对于既有陡坡, 又有缓坡的组合型边坡, 可能出现多个滑动面及贯通塑性区, 单排抗滑桩加固往往只能影响抗滑桩布置区域附近的塑性区发展情况, 对远离桩身位置的边坡岩土体阻滑效应不明显。比较两种加固方案的模拟结果, 建议该工程采用贴坡加固方案。

3 结论与建议

本文利用三维有限元强度折减法, 对某河岸边坡加固工程天然状态及不同加固方案下的稳定性进行分析, 得出如下结论。

(1) 对于滑动面未知的三维边坡, 三维有限元强度折减法可以通过计算自动搜索滑动面位置。计算结果证明, 计算确定的边坡最危险位置与实际边坡中出现不良地质位置一致, 计算确定的稳定安全系数与实际情况相符, 因此三维有限元强度折减法在边坡三维稳定分析中应用是可靠的。

(2) 某河岸边坡天然状态下最危险的 K0+85 断面出现的贯通塑性区中, 较晚出现的塑性区滑动带正是该断面地层中的软弱夹层部位。可见, 利用三维有限元强度折减法对存在软弱夹层、地质条件复杂的三维边坡进行稳定分析, 效果

良好。

(3) 对贴坡加固、单排抗滑桩加固两种方案计算发现, 贴坡加固方案对最危险断面安全系数的提升远大于单排抗滑桩加固方案, 分析其原因, 主要是单排抗滑桩的影响范围有限, 不足以从整体上提高边坡的稳定安全度。

参考文献 (References):

- [1] 2002 GB. 建筑边坡工程技术规范[S]. 2002. (2002 GB. Architectural Slope Engineering Technical Specifications[S]. (in Chinese))
- [2] 张社荣, 彭敏瑞, 董绍尧. 岩质边坡稳定性分析方法及工程应用[J]. 中国农村水利水电, 2007, 4: 94-96. (ZHANG She rong, Peng Min rui, Dong Shao yao. Rock Slope Stability Analysis Method and Engineering Application [J]. China Rural Water and Hydropower, 2007, 4: 94-96. (in Chinese))
- [3] 陈国荣, 有限单元法原理及应用[M]. 科学出版社, 2009. (CHEN Guo rong, Principles and Application of Finite Element Method [M]. Sciences Press, 2009. (in Chinese))
- [4] 邵龙潭, 唐洪祥, 韩国城. 有限元边坡稳定分析方法及其应用[J]. 计算力学学报, 2001, 18(1): 81-87. (SHAO Long tan, TANG Hong-xiang, HAN Guo cheng. Finite Element Method for Slope Stability Analysis with Its Applications[J]. Journal of Computational Mechanics, 2001, 18(1): 81-87. (in Chinese))
- [5] 宋雅坤, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 有限元强度折减法在三维边坡中的应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(5): 822-827. (SONG Ya kun, ZHENG Ying ren, ZHAO Shang yi, et al. Application of Three Dimensional Strength Reduction FEM in Slope[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(5): 822-827. (in Chinese))
- [6] 李家平, 赖允瑾, 李永盛, 等. 利用抗滑桩加固临水岸坡的边坡稳定性分析[J]. 水利水运工程学报, 2005, (2): 53-58. (LI Jia ping, LAI Yun jin, LI Yong sheng, ect. Stabilization Analysis of River Side Slope Reinforced by Stabilizing Piles[J]. Hydro Science and Engineering, 2005(2): 53-58. (in Chinese))
- [7] 刘君, 程怡. 基于强度折减法的高土石坝三维抗震稳定分析[J]. 水力发电学报, 2012, 31(4): 175-180, 215. (LIU Jun, CHENG Yi. Three Dimensional Aseismic Stability Analysis of High Rock Fill Dams Using Strength Reduction Technique[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2012, 31(4): 175-180, 215. (in Chinese))
- [8] 刘耀儒, 杨强, 薛利军, 等. 基于三维非线性有限元的边坡稳定分析方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1894-1898. (LIU Yao ru, YANG Qiang, XUE Li jun, ZHOU Wei yuan. Slope Stability Analysis Based on 3D Nonlinear Finite Element Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1894-1898. (in Chinese))
- [9] 黄正荣, 梁精华. 有限元强度折减法在边坡三维稳定分析中的应用[J]. 工业建筑, 2006, 36(6): 59-64. (HUANG Zheng rong, LIANG Jing hua. Analysis of Three Dimension Slope Stability by Strength Reduction Finite Element Method [J]. Industrial Construction, 2006, 36(6): 59-64. (in Chinese))
- [10] 马建勋, 赖志生, 蔡庆斌, 等. 基于强度折减法的边坡稳定性三维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2690-2693. (MA Jian xun, LAI Zhi sheng, CAI Qing bin, et al. 3D FEM

(下转第 125 页)

$$B^* = \bigcup_{i=1}^5 (\bigwedge_{j=1}^4 a_i^{(j)}) B_i =$$

(0, 0, 0, 0, 0, 0. 2, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 5, 0. 2, 0)

B^* 是一个包含 17 个元素的向量, 且数据分散, 加权作区间运算。回故对 B^* 的求解, 实际不为 0 的输出为 B_3 (0. 4, 0. 6) 和 B_4 (0. 6, 0. 8) 两个区间各一次, 共为 2 次。由此, 区间的权数为 1/2。由式(6)综合输出区间数为:

$$B_p = 1/2(0. 4, 0. 6) + 1/2(0. 6, 0. 8) = (0. 5, 0. 7)$$

即警度介于 0. 5~0. 7 之间, 判为重警。该诊断结果与该坝在 2009 年大坝安全鉴定中被评定为“三类坝”的结论相符。

若经专家评审, 推理准确, 则可扩充归纳模糊推理大前提为:

$$R_6: \text{if } A_4^{(1)} \text{ and } A_4^{(2)} \text{ and } A_3^{(3)} \text{ and } A_3^{(4)} \text{ then } B_4$$

随着模糊推理大前提的增加, 可获得更准确的诊断结果。

4 结语

基于大坝警情评判中的强影响性驱动因子及警情诊断合理快捷的考虑, 引入模糊推理模式, 采用多重蕴含命题的特征展开近似推理, 研究了大坝警情特征展开多重多维近似模糊推理方法。实例分析表明该方法以事先归纳出的模糊条件语句作为推理大前提, 可以对现有的因子集组成的小前提根据模糊推理规则快速做出诊断, 是大坝安全综合信息预警方法的有益补充。

参考文献(References):

[1] 王志涛, 江超, 姜晓琳, 等. 基于模糊理论的土石坝风险综合评价方法研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(2): 27-30, 105. (WANG Zhi tao, JIANG Chao, JIANG Xiaolin, et al. Research on Comprehensive Evaluation Method for Risk of Earthrock Dam Based on Fuzzy Logic[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(2): 27-30, 105. (in Chinese))

[2] 张燕, 周围, 丛培江. 基于模糊规则推理的大坝安全监测变形预测模型[J]. 水电自动化与大坝监测, 2009, 33(2): 51-54.

(ZHANG Yan, ZHOU Wei, CONG Pei jiang. Fuzzy Inference based Deformation Prediction Model for Dam Safety Monitoring [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2009. 33(2): 51-54. (in Chinese))

[3] 李子阳, 马福恒, 鲍杰. 基于多层次模糊综合诊断的燕山水库预警分析[J]. 水电能源科学, 2009, 27(6): 79-82. (LI Zi yang, MA Fu heng, BAO Jie. Early Warning Analysis of Yanshan Reservoir Based Multilevel Fuzzy Comprehensive Diagnosis [J]. Water Resources and Power, 2009, 27(6): 79-82. (in Chinese))

[4] Timothy J Ross(著). 钱同惠, 沈其聪, 葛晓彬, 等(译). 模糊逻辑及其工程应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. (Timothy J Ross(author). Qian Tonghui, Shen Qincong, Ge Xiaobin, et al (translator). Fuzzy Logic and Its Engineering Application [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2001. (in Chinese))

[5] Zadeh L A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process[J]. IEEE Trans on System, Man, Cybernetics, 1973, 3(1): 28-44.

[6] 王国俊. 模糊推理的全蕴涵三 I 算法[J]. 中国科学(E 辑), 1999, 29(1): 43-53. (WANG Guojun. Algorithm of Full Implication Three I for Fuzzy Inference[J]. Science in China (Series E), 1999, 29(1): 43-53. (in Chinese))

[7] 陈永义, 陈图云. 特征展开近似推理方法[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 1984, 20(3): 1-7. (CHEN Yongyi, CHEN Tuiyun. Features Expand Approximate Fuzzy Inference Method[J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 1984, 20(3): 1-7. (in Chinese))

[8] 李子阳. 大坝病险预警的盲分析模型和方法[D]. 河海大学, 2009. (LI Zi yang. The Models and Methods of Blind Analysis for Early Warning of Illcondition Dam[D]. Nanjing: Hohai University, 2009. (in Chinese))

[9] 张润杰, 古德祥, 蒲蛰龙, 等. Fuzzy 控制模型在三化螟幼虫数量预报中的应用探讨[J]. 生态科学, 1989(2): 38-46. (ZHANG Runjie, GU Dexiang, PU Zhelong, et al. Application Research on the Three Moth Larvae Number Forecast of Fuzzy Control Model[J]. Ecologic Science, 1989, (2): 38-46. (in Chinese))

(上接第 100 页)

Analysis of Slope Stability Based on Strength Reduction Method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(16): 2690-2693. (in Chinese))

[11] 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 Yingren, ZHAO Shangyi. Application of Strength Reduction FEM in Soil and Rock Slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(19): 3381-3388. (in Chinese))

[12] 郑颖人, 陈祖煜, 王恭光, 等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 人民

交通出版社, 2007. (ZHENG Yingren, CHENG Zuyu, WANG Gongxian. Slope and Landslide[M]. Communications Press, 2007. (in Chinese))

[13] 刘金龙, 栾茂田, 赵少飞, 等. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1345-1348. (LIU Jirong, LUAN Maotian, ZHAO Shaofei, et al. Discussion on Criteria for Evaluating Stability of Slope in Elastoplastic FEM Based on Shear Strength Reduction Technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1345-1348. (in Chinese))