

# 金佛山沥青混凝土心墙坝坝坡稳定性有限元分析

张慧萍<sup>1</sup>, 邱珍锋<sup>1</sup>, 刘良军<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;  
2. 重庆市水利电力建筑勘测设计研究院, 重庆 400020)

**摘要:** 针对重庆市金佛山水利工程沥青混凝土心墙堆石坝, 采用有限元强度折减法, 研究了上、下游坝坡在竣工期、蓄水期及水位骤降等不同工况下的稳定性。结果显示, 在竣工期、蓄水期和水位骤降期的坝坡安全系数均符合规范要求。与极限平衡分析方法相比, 强度折减法在滑弧面及塑性区的分析中弥补了极限平衡法中无法准确确定滑动面具体位置及滑体大小的缺陷, 但是强度折减法计算结果偏安全, 因此将两种方法结合进行稳定性分析, 结果更为客观。

**关键词:** 沥青混凝土心墙坝; 坝坡稳定性; 有限元强度折减法; 判定准则

**中图分类号:** TV 64    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2013)04-0206-05

## Finite Element Analysis of Dam Slope Stability of Jinfoshan Asphalt Concrete Core Wall Rock fill Dam

ZHANG Hui ping<sup>1</sup>, QIU Zhen feng<sup>1</sup>, LIU Liang jun<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education,  
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Surveying and Design Institute of Resources, Electric and Architecture, Chongqing 400020, China)

**Abstract:** The finite element strength reduction method was used to analyze the upstream and downstream dam slope stability of Jinfoshan asphalt concrete core wall rock fill dam under different working conditions including the completion period, impoundment period, and sudden water level decreasing period. The results showed that the dam slope safety coefficients meet the standard requirements under the completion, impoundment, and sudden water level decreasing periods. Compared with the limit equilibrium analysis method, the finite element strength reduction method can overcome the disadvantages of limit equilibrium analysis method to determine the specific location of slide surface and the size of sliding mass in the analysis of slide surface and plastic area, but the results determined by the finite element strength reduction method were safer. Therefore, the combination of the two methods to analyze the slope stability can provide more reasonable results.

**Key words:** asphalt concrete core rock fill wall; dam slope stability; finite element strength reduction method; judging criterion

## 1 研究背景

目前, 在岩土工程中广泛采用的边坡稳定性分析方法主要是传统的极限平衡法和有限元法, 极限平衡法包括普通的条分法、毕肖普法、杨布条分法等, 都需要做一定假设<sup>[1]</sup>。自有限元法引入边坡的稳定性分析以来, 在边坡工程治理中得到了很大的发展<sup>[2,4]</sup>, 实现了边坡在荷载作用下的应力、变形、滑动面等的计算<sup>[5]</sup>。其中, 有限元强度折减法被部分学者用于土石坝的稳定分析: 邹兵华<sup>[6]</sup>采用有限元强度折减法分析了均质中低坝型窑店煤矿拦渣坝的自重和堆渣两种工况的坝坡稳定性; 彭凯<sup>[7]</sup>等提出采用坝体典型断

面特征点的位移矢量与强度折减系数之比作为作为判别坝坡破坏的标准, 当比值出现突变时即认为处于极限平衡状态。不过, 尽管有限元强度折减法优点甚多, 然而在土石坝中应用不广泛, 原因之一是人们对于有限元强度折减法准确性有疑虑。

本文将滑坡的变形破坏规律应用到土石坝的坝坡稳定性分析中, 以金佛山沥青心墙堆石坝为例, 采用毕肖普法、瑞典条分法分析有限元强度折减法的计算精度, 探讨有限元强度折减法在填料复杂的高土石坝的稳定分析中的运用的可行性, 并通过塑性区等值线图对大坝坝坡安全性进行分析。

收稿日期: 2012-11-12    修回日期: 2013-05-07    网络出版时间: 2013-07-28

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130728.1310.026.html>

作者简介: 张慧萍(1972), 女, 甘肃陇西人, 高级实验师, 硕士, 主要从事水利工程方面的教学和研究工作。E-mail: zhanghuiplings@126.com

通讯作者: 邱珍锋(1988), 男, 江西信丰人, 硕士研究生, 主要从事水工结构与岩土相互作用理论及应用技术方面研究。E-mail: qiuzhenfeng3012@163.com

## 2 工程概况

金佛山水利工程位于重庆市南川区、万盛区以及贵州省桐梓县,以灌溉、供水为主,兼顾发电等综合利用的大(Ⅱ)型水利工程。水库正常蓄水位 836.00 m,相应库容 9 614.6 万

m<sup>3</sup>,水库总库容 1.03 亿 m<sup>3</sup>。水库枢纽工程由拦河大坝、溢洪道、泄洪放洪洞、坝后式电站、渠首工程等组成。按坝体结构要求,除沥青混凝土心墙外,大坝其他部位共分 6 个区,分别为上游堆石 I 区,下游堆石 II 区和堆石 III 区,下游砂岩大块石排水棱体 IV 区,及上下游过渡层 V 和 VI 区,见图 1。

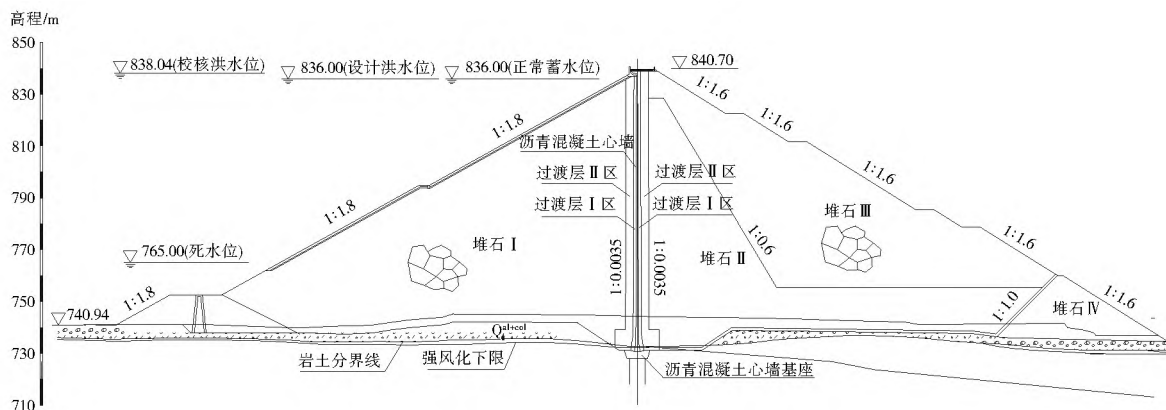


图 1 沥青混凝土心墙堆石坝坝体剖面图

Fig. 1 Profile of asphalt core concrete wall rock fill dam

## 3 计算方法

### 3.1.1 有限元强度折减法

强度折减法原理是在理想弹塑性有限元计算中,通过不断折减岩土体的抗剪强度参数  $c$ 、 $\varphi$ ,直至边坡达到临界破坏状态<sup>[2]</sup>,此时的强度折减系数就是边坡的稳定安全系数  $F_s$ ,定义为土体实际的抗剪强度与折减后极限状况下抗剪强度的比值。土体的抗剪强度参数的折减公式为:

$$\hat{c} = c/F \tag{1}$$

$$\hat{\varphi} = \arctan(\tan \varphi / F)$$

式中: $c$ 、 $\varphi$ 为土体实际的抗剪强度; $\hat{c}$ 、 $\hat{\varphi}$ 为折减后的土体抗剪强度; $F$ 为强度折减系数。

### 3.1.2 有限元法计算参数

模型采用 Mohr-Coulomb 屈服准则。上游堆石体 I 的三轴压缩(饱和 CD 试验)体积应变  $\varepsilon_v$  与轴向应变  $\varepsilon_a$  关系见图 2,可见只在小围压(200 kPa)时才稍表现出压硬性,因此,采用非关联流动法则(剪胀角  $\Psi = 0$ )。Mohr-Coulomb 屈服准则假定:作用在某一点的剪应力等于该点的抗剪强度时,该点发生破坏,剪切强度与作用在该面的正应力呈线性关系。Mohr-Coulomb 模型是基于材料破坏时应力状态的莫尔圆提出的,破坏线是与这些莫尔圆相切的直线。Mohr-Coulomb 的强度准则为:

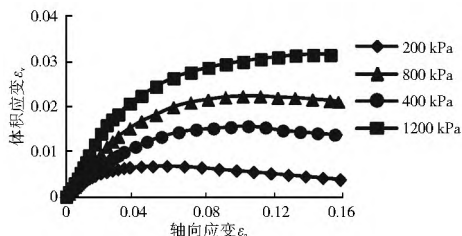


图 2 体积应变  $\varepsilon_v$  与轴向应变  $\varepsilon_a$  关系

Fig. 2 Relationship between volumetric strain and axial strain

$$\tau = c - \sigma \tan \varphi \tag{2}$$

式中: $\tau$ 为剪切强度; $\sigma$ 为正应力; $c$ 为材料的黏聚力; $\varphi$ 为材料的内摩擦角。

有限元强度折减法的计算参数依据《重庆市南川区金佛山工程堆石坝材料试验研究》,选用了线性强度,认为抗剪强度  $\tau$  与法向应力  $\sigma$  之间呈直线关系,用强度指标  $c$  和  $\varphi$  来表示。对坝区各材料的上包线、多组平均线及下包线级配进行了非线性  $E \sim \mu$  双曲线模型参数确定,模型中的切线弹性模量  $E_t$  和切线泊松比  $\mu_t$  采用如下公式计算:

$$E_t = \left[ 1 - R_f \frac{(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]^2 K P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \tag{4}$$

$$\mu_t = \frac{G - F \lg \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)}{(1 - A)^2} \tag{5}$$

$$A = \frac{D(\sigma_1 - \sigma_3)}{K P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \left[ 1 - \frac{R_f(1 - \sin \varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \varphi + 2\sigma_3 \sin \varphi} \right]} \tag{6}$$

式中: $E_t$ 为切线弹性模量; $\mu_t$ 为切线泊松比; $c$ 、 $\varphi$ 为摩尔-库仑强度指标,分别为黏聚力和内摩擦角; $R_f$ 为破坏比, $R_f = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_{di}}$ ;  $K$ 为模量值; $P_a$ 为大气压力; $n$ 为模量指数; $D$ 为应变的变化对初始泊松比的影响参数; $F$ 为压力对初始泊松比的影响参数; $G$ 为初始泊松比。各参数的取值列于表 1。

### 3.1.3 计算模型

根据王俊杰<sup>[8]</sup>提出的边坡简化计算方法及网格对有限元计算结果的影响<sup>[9]</sup>,将坝体设计图剖面简化,按照平面应变问题来处理。利用 ABAQUS 中的受控四边形网格(Quadrilateral)自动网格划分功能进行单元划分。有限元网格划分后生成的结点总数为 1 331 个,单元总数为 1 279 个,其中三结点三角形平面应变元(CPE3)有 38 个,四结点四边形平面应变元(CPE4)有 1 241 个,见图 3。

### 3.2 计算方案

采用有限元强度折减法、瑞典条分法和简化毕肖普法,

表 1 有限元强度折减法的计算参数

Table 1 Calculation parameters of the finite element strength reduction method

材料名称	$\rho_{sat} / (g \cdot cm^{-3})$	$E_{sat} / MPa$	$U_{sat}$	$c_{sat} / kPa$	$\varphi_{sat} / (^\circ)$	$\rho_{na} / (g \cdot cm^{-3})$	$E_m / MPa$	$U_a$	$c_m / kPa$	$\varphi_{na} / (^\circ)$
过渡层 I	2.42	111	0.37	30	38	2.18	124	0.42	33.6	46.0
过渡层 II	2.41	112	0.37	36	37.5	2.17	125	0.42	40.3	45.4
堆石 I	2.35	105	0.38	58	38.7	2.12	118	0.43	65.0	46.8
堆石 II	2.35	105	0.38	58	38.7	2.12	118	0.43	65.0	46.8
堆石 III	2.37	73	0.38	39	32.2	2.13	82	0.43	43.7	36.1
堆石 IV	2.35	105	0.38	58	38.7	2.16	118	0.43	65.0	43.3
基座混凝土	2.4	30 000	0.167	/	/	/	/	/	/	/
沥青混凝土心墙	2.43	85	0.38	200	27	2.01	95	0.43	224.0	32.7
坝基覆盖层	2.23	44	0.41	37	27.3	1.95	49	0.47	41.4	33.0
基岩	2.4	12 000	0.2	400	40.1	/	/	/	/	/

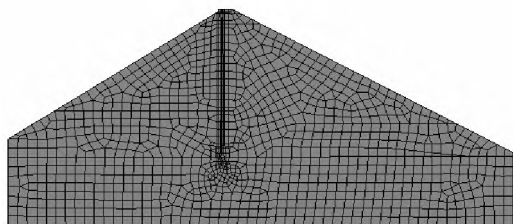


图 3 计算模型网格划分图

Fig. 3 The finite element model grid of the dam

设计了竣工期、蓄水期和水位骤降期三种工况下安全系数的计算方案。

在蓄水期,不考虑湿化变形时,坝体主要受到两方面影响:一是上游涉水土体受到浮力的作用,这部分荷载通过定义方向向上的体力来模拟,大小为土体浸水前后的容重之差;二是上游蓄水对心墙面的水压力的作用,模拟方法为首先定义上游正常蓄水位以下的心墙面为 surf,然后在定义的 surf 面上叠加静水压力分布的压力,顶部压力值为 0,底部为正常蓄水位产生的静水压力。

在水位骤降期,模拟水位从正常蓄水位骤降到死水位的过程中,坝体荷载包括三个部分:水下的土体的浮力、静水压力、骤降区间处理,其中浮力、静水压力处理方法与蓄水期相同,骤降区间的土体滞后渗透则采用饱和重度模拟<sup>[9]</sup>。

## 4 计算结果分析

### 4.1 失稳破坏判定准则

目前,判断边坡失稳破坏的标准通常包括:有限元数值计算的不收敛、塑性区的贯通、广义剪应变的贯通等<sup>[3]</sup>。吕庆等<sup>[11]</sup>认为在小应变假设中用数值计算不收敛作为判据,但是,计算不收敛的原因比较多,或者荷载过大,或者计算单元有奇异等,因此,以此为判据适用范围有一定的限制;栾茂田<sup>[12]</sup>建议采用塑性应变贯通作为判据,但此判据中主观因素占很大成分,并未排除弹性塑性应变的影响,破坏界限比较模糊。

分析坝坡失稳破坏的主要特征,不管其内部的变形机理是广义剪应变还是塑性应变,最终结果都是产生位移,位移是坝坡内部作用的外在表现。滑动主要是由剪应变和位移造成的。随着强度参数的不断折减,坝坡上的位移矢量和剪应变不断向坝脚处增大,因此,以坝顶特征点位移突变为失

稳判据,意义明确、界限清晰。

### 4.2 有限元计算结果分析

经过有限元强度折减法的坝坡稳定的分析,上下游坝坡均产生一定的位移和变形,与上游的蓄水期、水位骤降期及下游竣工期相比,竣工期有明显的滑动趋势。竣工期上游坝坡计算结果见图 4。

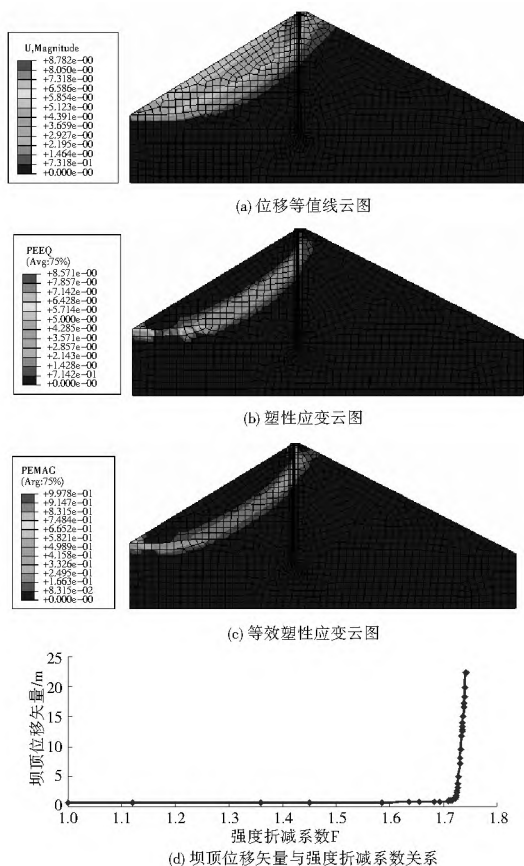


图 4 竣工期上游坝坡计算

Fig. 4 Calculation of dam slope of the upstream dam during the completion period

图 4 显示了坝坡的位移塑性区总体从坝底向坝顶贯通,宏观上表现为坝坡滑弧,即在位移等值线云图中显示出来的滑弧。结合有限元强度折减系数与位移矢量关系图可以看出,折减系数为 1.72 时是位移矢量的拐点,之后位移矢量开始陡增;若以计算不收敛作为判定准则,安全系数为 1.74。但

是,从塑性区的贯通现象能够看出,塑性区贯通后坝坡自然位移快速增加,此时整个滑体开始滑动,即当 $F_s=1.72$ 时,坝坡已经处于滑动过程中了。因此,将位移矢量与强度折减系数关系图中的“位移矢量陡增突变”作为判定准则,可以清楚地解释坝坡破坏启动的瞬间安全系数,即将强度指标折减到极限平衡状态,塑性区刚贯通,即将开始滑动的临界状态,将此时刻的强度折减系数定义为安全系数界限清晰,意义明确。

### 4.3 安全系数分析

为了便于比较分析,在进行强度折减法的同时,还进行了极限平衡法计算,即对各种工况分别采用了有限元强度折

减法、瑞典条分法、简化毕肖普法等三种方法进行计算,计算结果列于表2。表2还列出了有限元强度折减法的计算结果与瑞典条分法、简化毕肖普法计算结果(分别用 $F_{S1}$ 、 $F_{S2}$ 、 $F_{S3}$ 表示)及其比较值。可以看出:

(1)表2中所有方法计算的各种工况安全系数,均满足《碾压式土石坝设计规范》<sup>[13]</sup>要求。蓄水期和水位骤降期的上游坝坡稳定性安全系数分别为1.71和1.66。上游坝坡主要由堆石体I组成,堆石体I的渗透系数为0.2~0.75 cm/s,骤降速率为1.6 m/d。可见,上游坝坡渗透系数较大,使其在水位骤降期与蓄水期的安全系数相差不大。

表2 不同方法计算的安全系数对比

Table 2 Comparison of calculated dam slope safety coefficients determined by three methods

方案编号	计算工况	坝坡	$F_{S1}$	$F_{S2}$	$F_{S3}$	$(F_{S1}-F_{S2})/F_{S1}$	$(F_{S1}-F_{S3})/F_{S1}$	规范要求的 $F_s$
1	竣工期	下游坝坡	1.66	1.68	1.75	-1.21	-5.42	1.30
2	竣工期	上游坝坡	1.72	1.83	1.89	-6.01	-8.99	1.30
3	蓄水期	上游坝坡	1.71	1.81	1.83	-5.52	-6.56	1.50
4	水位骤降	上游坝坡	1.66	1.72	1.8	-3.49	-7.78	1.50

(2)有限元强度折减法计算结果总体比极限平衡法低:相对瑞典条分法,下游坝坡计算结果低1.21%,上游坝坡低6.01%;相对于简化毕肖普法,下游坝坡低5.42%,上游坝坡低8.99%。在蓄水期和水位骤降期时,强度折减法比瑞典条分法小5.52%,比毕肖普法小6.56%;水位骤降期时比瑞典条分法小3.49%,比毕肖普法小7.78%。

(3)三种方法计算的不同工况下安全系数中,有限元强度折减法计算结果最低,毕肖普法最高,瑞典条分法介于两者之间。

总之,在这几种工况下,有限元强度折减法计算结果在安全的角度上考虑是可行的,在大坝稳定计算中建议以极限平衡法为主,强度折减法在坝坡稳定计算中可以采取修正的办法达到一定的精度,具体修正方法还有待研究。

## 5 结论

通过对重庆市金佛山水利工程沥青混凝土心墙堆石坝坝坡稳定计算及分析,可以得到以下结论。

(1)在竣工期、蓄水期和水位骤降期等各种工况下坝坡的安全系数计算结果均能满足土石坝设计规范的要求。

(2)强度折减法计算结果比瑞典条分法和毕肖普法低,计算结果偏安全,建议在土石坝坝坡稳定分析中以极限平衡法为主,或对强度折减法结果进行修正。

(3)虽然《碾压式土石坝设计规范》中,没有建议采用有限元法计算坝坡稳定性,但是有限元法在滑弧面及塑性区的分析中弥补了极限平衡法中无法准确确定滑动面具体位置及滑体大小的缺陷,因此本文认为采用两种方法结合更有利于进行坝体稳定性分析。

### 参考文献(References):

[1] 张军,景建伟,陈效华,等.混凝土面板堆石坝整体稳定性的数值分析[J].科学技术与工程,2008,8(14):3858-3862.(ZHANG Jun, JING Jian wei, CHEN Xiao hua, et al. Numerical Simulation for Stability Analysis of Concrete Face Rockfill Dam[J].

Science Technology and Engineering, 2008, 8(14): 3858-3862. (in Chinese))

[2] 赵尚毅,郑颖人,时卫明,等.用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J].岩土工程学报,2002,24(34):343-346.(ZHAO Shang yi, ZHENG Ying ren, SHI Wei ming, et al. Analysis on Safety Factor of Slope by Strength Reduction FEM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(34): 343-346. (in Chinese))

[3] 赵尚毅,郑颖人,张玉芳.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 Yurfang. Study on Slope Failure Criterion in Strength Reduction Finite Element Method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 332-336. (in Chinese))

[4] 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. (in Chinese))

[5] 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 3D Slope Stability by Strength Reduction FEM[J]. Industrial Construction, 2006, 36(6): 59-64. (in Chinese))

[6] 邹兵华,李占斌,李鹏,等.基于强度折减法的拦渣坝坝坡稳定性分析研究[J].长江科学院院报,2008,26(3):53-57.(ZOU Bing hua, LI Zhan bin, LI Peng, et al. Study on Slope Stability Analysis of Tailing Dam Based on FEM Strength Reduction Method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 26(3): 53-57. (in Chinese))

[7] 彭凯,朱俊高,王元龙,等.土石坝坝坡稳定三维有限元强度折减法计算分析[J].人民长江,2006,24(4):67-70.(PENG Kai, ZHU Jun gao, WANG Yuan long. Slope Stability Analysis of Rockfill Dam by 3D FEM Strength Reduction Method[J]. Yangtze River, 2006, 24(4): 67-70. (in Chinese))

[8] 王俊杰,陈锦璐.阶梯型均质边坡的稳定性分析[J].水电能源

- 科学, 2011, 29(1): 73-75. (WANG Jur jie, CHEN Jir lu. Stability Analysis of Ladder Type Homogeneous Soil Slope[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(1): 73-75. (in Chinese))
- [9] 陈锦璐, 王俊杰, 唐胜传. 有限元网格和边界条件对土坡稳定性计算的影响[J]. 水电能源科学, 2011, 29(11): 135-138. (CHEN Jir lu, WANG Jur jie, TANG Sheng chuan. Influence of Mesh Density and Boundary Condition of Finite Element Model on Soil Slope Stability[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(11): 135-138. (in Chinese))
- [10] 费康, 张建伟. Abaqus 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FEI Kang, ZHANG Jian wei. Abaqus Application in Geotechnical Engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2010. (in Chinese))
- [11] 吕庆, 孙红月, 尚岳全. 有限元强度折减法中边坡失稳判据的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 42(1): 83-87. (LV Qing, SUN Hong yue, SHANG Yue quan. Slope Failure Criteria of Shear Strength Reduction Finite Element Method[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2009, 42(1): 83-87. (in Chinese))
- [12] 栾茂田, 武亚军, 年延凯. 有限元强度折减法中边坡失稳的塑性区判据及应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 1(3): 1-8. (LUAN Mao tian, WU Ya jun, NIAN Ting kai. A Criterion for Evaluating Slope Stability Based on Development of Plastic Zone by Shear Strength Reduction FEM[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 1(3): 1-8. (in Chinese))
- [13] SL 274 2001, 碾压式土石坝设计规范[S]. (SL 274 2001, Rolling Type Earth rockfill Dam Design Specification[S]. (in Chinese))

(上接第 144 页)

- [18] 丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划编制组. 丹江口库区及上游水污染防治和水土保持规划[Z]. 2005. (The Danjiangkou Reservoir and Upstream Water Pollution Control and Soil Conservation Planning Group. The Danjiangkou Reservoir and Upstream Water Pollution Control and Soil Conservation Planning[Z]. 2005. (in Chinese))
- [19] 韩德梁. 丹江口库区生态系统服务价值化研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010. (HAN De liang. Research on Value of Ecosystem Services at Danjiangkou Reservoir Area[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010. (in Chinese))
- [20] 常秋玲. 南水北调中线区(南阳市)生态环境综合研究[D]. 北京: 中国地质大学. 2007. (CHANG Qiu ling. Comprehensive Research on Ecological Environment in Water Source Region (NanYang City) of the Middle Route Project for South to North Water Diversion[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2007. (in Chinese))
- [21] 屈少科. 河南省土地生态系统服务价值研究[D]. 开封: 河南大学, 2008. (QU Shao ke. Study on the Land Ecosystem Services Value in Henan Province[D]. Kaifeng: Henan University, 2008. (in Chinese))
- [22] Jing, L, Zhiyuan, R. Variations in Ecosystem Service Value in Response to Land use Changes in the Loess Plateau in Northern Shaanxi Province, China[J]. International Journal of Environmental Research, 2011, 5(1): 109-118.