

文章编号: 1006-4710(2011)04-0466-05

库水位骤降时坝体渗流场及坝坡稳定性分析

刘钊¹, 柴军瑞^{1,2}, 陈兴周¹, 徐维生³

(1. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048; 2. 三峡大学 土木水电学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为了研究水位骤降时影响上游坝坡稳定性的因素, 模拟坝坡在水位骤降时的渗流场及稳定性变化。基于土体渗透性, 材料的非线性特性及水位下降率, 利用有限元法对库水位变化下的渗流场进行瞬态分析, 得出的自由水面线和孔隙水压力耗散等结果应用于上游坝坡稳定性分析, 坝坡稳定分析采用极限平衡法。实例分析表明: 计算区域渗流场变化滞后于水位下降的时间; 坝体渗透系数越小, 水位骤降对其稳定性的不利影响越显著; 水位下降速率越大, 上游坝坡稳定性降低越快。

关键词: 坝坡稳定性; 库水位骤降; 渗流场; 有限元模型; 极限平衡法

中图分类号: TV139.14 **文献标志码:** A

An Analysis of the Seepage Field and the Stability of Dam Slope During Rapid Drawdown of Reservoir Water Table

LIU Zhao¹, CHAI Junrui^{1,2}, CHEN Xingzhou¹, XU Weisheng³

(1. Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. College of Civil and Hydropower Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
3. School of Water Resources and Hydropower, Wuhan University, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to study the effect of water table drawdown upon the factors of upstream dam slope stability, it is necessary to simulate the seepage field and changes in stability in the case of dam slope in water table drawdown. Based on soil permeability non-linearity of materials and rate of water table, the finite element method is used to carry out the transient analysis of the seepage field in the case of changes in reservoir water table, whereby obtaining that the results of free water surface line and dispersion of pore water pressure, etc, can be used to analyze the upstream dam slope stability, but the limit equilibrium method is used to analyze the dam slope stability. The real example analysis indicates that the changes in seepage field in the calculated zone delay in time of reservoir water table drawdown, the smaller the osmotic coefficient of dam body is, the greater the effect of disadvantages of water table drawdown upon the stability is; the greater the rate of water table drawdown is, the faster the stability of upstream dam slope decreases.

Key words: stability of dam slope; drawdown; seepage field; finite element model; limit equilibrium method

库水位骤降会导致坝坡稳定性降低。近些年, 已有很多学者对自然边坡和构造边坡在库水位骤降条件下的稳定性进行了广泛的研究^[1-7]。为了确定边坡稳定系数, 极限平衡法结合有限元数值分析法被应用于工程界^[8-9], 数值方法被应用于岩土工程领域^[10-12], 尤其是有限元法在边坡稳定分析中的应用, 为采用有效应力法计算边坡稳定性提供了便利。

本文研究了库水位骤降期坝坡稳定性的变化情况, 考虑了材料的渗透特性、体积含水率、粘聚力、内摩擦角等属性, 在不同工况下, 用有限元法模拟了孔隙水压力随水位骤降的变化, 将计算得出的不同时刻孔隙水压力值应用于采用极限平衡法计算的边坡稳定性分析中。结合南沟门均质土石坝具体情况对其渗流场变化条件下的坝坡稳定性进行分析, 总结

收稿日期: 2011-04-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50579092); 教育部博士后基金资助项目(20096118110007)。

作者简介: 刘钊(1987-), 男, 陕西汉中, 硕士生, 研究方向为水工结构数值分析。E-mail: liuzhaomvp@163.com。

柴军瑞(1968-), 男, 陕西眉县人, 教授, 博导, 研究方向为水工结构渗流力学。E-mail: chajunrui@163.com。

了坝坡稳定性对库水位变化的响应情况,对其安全运行给出评价和建议。

1 基本原理

孔隙水压力决定于渗流场的变化,当渗流区域包含一个随时间变化的自由面(如图1),即为一个瞬态分析问题。

根据达西定律,多孔饱和不可压缩连续介质渗流可表示为:

$$\operatorname{div}(k(p) \cdot \operatorname{grad}\phi) - Q = S \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ϕ 为总流势或总水头; $k(p)$ 为介质的渗透系数; Q 为源、汇项; S 为储水系数。

其中 $k(p) = k_s - f(p)$ (2)

式中: k_s 为饱和渗透系数(常数), $f(p)$ 为关于压力水头 p 的光滑连续函数。

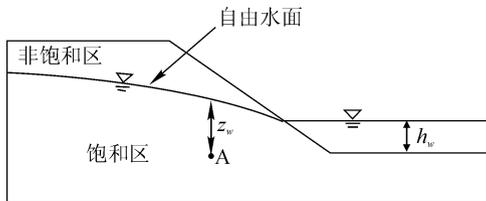


图1 边坡流体区域和自由水面线

Fig. 1 Flow domain and free surface in a slope

结合有限元理论,由式(1)可得:

$$[k_s]\{q\} - [k_{us}]\{q\} + [p_s]\{q\} - [p_{us}]\{q\} = \{Q\} \quad (3)$$

式中: $[k_s]$ 为饱和单元渗透系数矩阵, $[k_{us}]$ 为非饱和单元渗透系数矩阵, $[p_s]$ 为饱和单元孔隙率矩阵, $[p_{us}]$ 为非饱和单元空腔率矩阵, $\{q\}$ 为节点水头向量, $\{Q\}$ 为临界节点流向量。

微分方程(3)整合了时间域,结合平衡方程和连续方程,可以通过迭代计算出自由面及渗流场分布。

本文将非饱和理论应用于工程实际,在边坡水位骤降的瞬态模拟中,指定初始水位线和孔隙水压力,确定水位骤降率,从而可以分析不同工况下的渗流场情况,得出的结果包括水头、孔隙水压力、流速等被应用于边坡稳定性分析。

通过有限元瞬态渗流分析得出水位骤降后某一时刻自由面,对于滑动面在浸润面以下的情况,可采用考虑孔隙水压力影响的有效应力方法来计算土坡的安全系数,再结合 Morgenstern-Price 提出的非饱和土体的强度理论,根据有限元渗流分析得出的孔隙水压力等结果,定义材料参数后可搜索出临界滑移面,计算出坝坡安全系数^[2,8-9]。

2 有限元渗流分析

2.1 计算模型

南沟门水利枢纽工程位于陕西省延安市黄陵县境内,拦河坝采用均质土坝,大坝坝顶高程为 852.0 m,坝顶宽为 10 m,最大坝高为 66.0 m,坝顶总长为 502.0 m;坝体上游边坡为 1:2.75 和 1:3,在高程为 830 m 处设宽为 3.0 m 马道,下游坝坡比均为 1:2.75,在高程为 836 m、816 m 处设宽为 2.0 m 的马道,于坝体内设水平褥垫排水。

该地区坝体材料渗透系数试验值可达 10^{-7} m/s 级,但因击实条件及其它施工因素影响,根据已建均质坝的坝体渗透系数监测值,坝体渗透系数甚至可达 10^{-3} m/s 级。本文分别取坝体渗透系数 $k_{\text{dam}} = 8.64 \times 10^{-3}$ m/d 及 $k_{\text{dam}} = 8.64 \times 10^{-1}$ m/d 进行分析。

表1给出了模型不同分区计算参数取值。

表1 模型计算参数

Tab. 1 Calculation parameters

分区	坝体	排水褥垫	帷幕灌浆	强透水层	弱透水层
渗透系数 $k/(\text{m/s})$	$10^{-7}, 10^{-5}$	1.852×10^{-2}	3×10^{-8}	3.7×10^{-5}	3×10^{-7}
容重 $\gamma/(\text{kN/m}^3)$	19.8	23.0	24.0	19.1	23.0
粘聚力 $c/(\text{kPa})$	25.0	30.0	1200.0	100.0	500.0
内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	28.0	40.0	43.0	30.0	45.0

图2为大坝某最大横断面计算模型网格剖分图,最大坝高为 64 m,正常蓄水位为 60 m,死水位为 29 m,下游水位取为 0。上游边界条件随时间变化,即从 60 m 到 29 m 进行瞬态分析。下游坝坡下部为自由出流边界,其余

为不透水边界。运用 Geo-studio 建立起二维有限元模型,共剖分 771 个节点,723 个单元。本文就三种工况(见表2)模型范围渗流场的变化情况和上游坝坡稳定性进行计算分析。

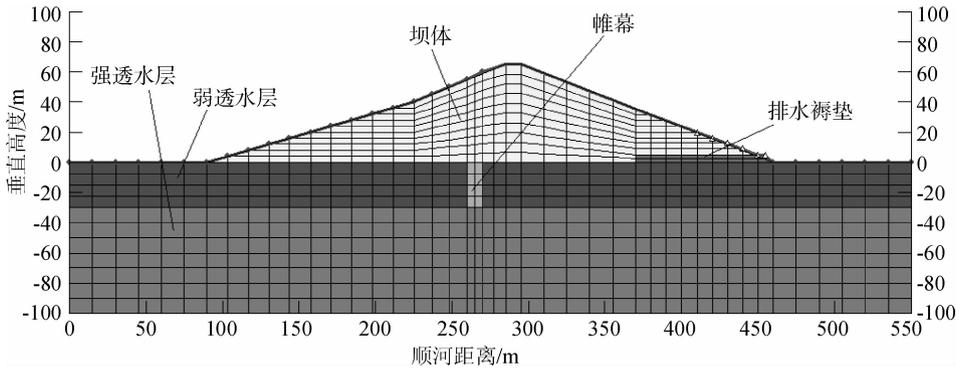


图2 计算模型网格剖分图

Fig.2 Mesh generation for calculation model

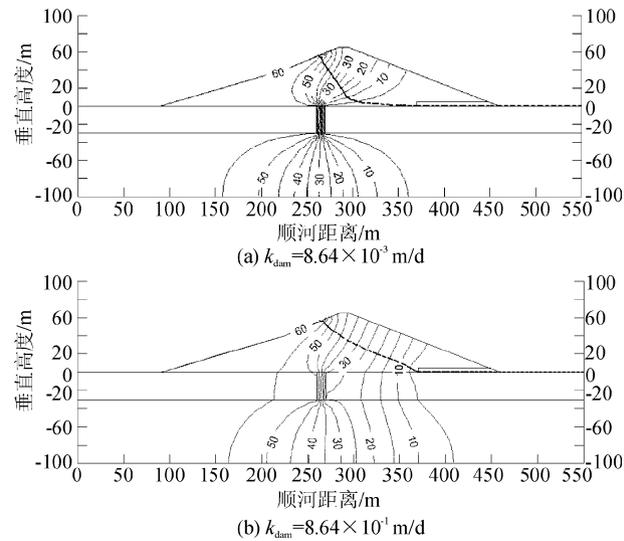
表2 计算工况

Tab.2 Working conditions for numerical calculation

计算工况	工况1		工况2		工况3	
水位下降速率 $v/(m/d)$	1		3		5	
坝体渗透系数 $k_{dam}/(m/d)$	8.64×10^{-3}	8.64×10^{-1}	8.64×10^{-3}	8.64×10^{-1}	8.64×10^{-3}	8.64×10^{-1}

2.2 k_{dam} 值对渗流场影响分析

图3为 $k_{dam} = 8.64 \times 10^{-3} m/d, 8.64 \times 10^{-1} m/d$ 时模型渗流场分布图,根据图中总水头线及自由面,可以看出坝体渗透系数对坝体渗流场分布产生影响。

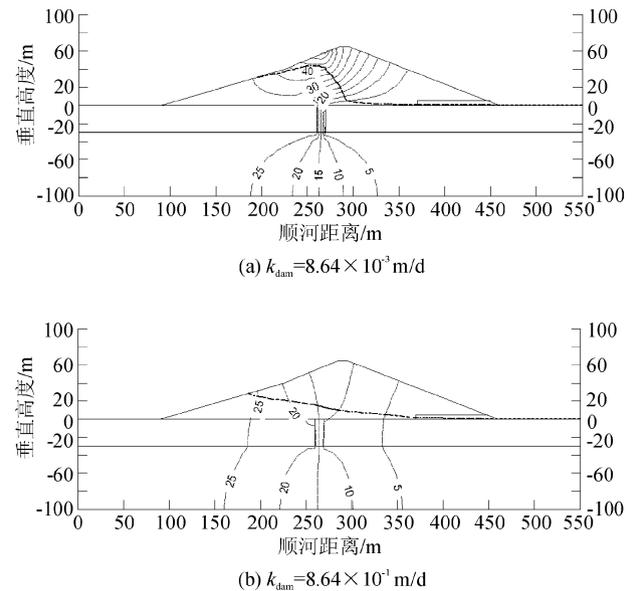
图3 初始渗流场分布
Fig.3 Initial seepage field

自由面是饱和区和非饱和区的分界线,在极限平衡法计算边坡稳定性时,这是非常重要的影响因素。坝体渗透系数小,防渗效果好,自由面低,饱和区范围小,对坝坡的稳定性是非常有利的。

库水位骤降时上游坝坡往往会产生“逆流”现象,导致坝体迎水面稳定性降低,甚至失稳。图4为工况1库水位从60 m降至29 m时计算区域渗流场分布情况。

图4中两种情况下的自由面都未达到稳定,(a)图自由水面线曲率大于(b)图,说明渗流场变化滞后于水

位下降,并且,材料渗透系数越小,对流体流动的阻碍越强烈,此效应越明显。

图4 工况1 渗流场分布
Fig.4 The distribution of the seepage for case 1

为了确保有限元模型的合理性,通过水工设计手册上的建议公式对坝体渗流量进行计算,将结果与有限元模型计算结果进行对比验证。

由于下游水位取0, J. Kozeny 建议渗流量计算公式为:

$$q = k(\sqrt{(L + \Delta L)^2 + H_1^2} - (L + \Delta L)) \quad (4)$$

式中 q 为流量; k 为渗透系数,取为 $10^{-5} m/s$; H_1 为上游水深,取 60 m; L 为上游入渗点到排入体伸入坝内最深点的水平距离,取 100 m; ΔL 为虚拟矩形体的宽度,计算得 25.38 m。

经计算 q 为 $3.499 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, 在此工况下有限元计算 q 结果为 $3.657 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$, 结果基本一致, 证明模型边界及其余参数取值符合要求。

2.3 v 值对渗流场影响分析

水位骤降对坝库区滑体稳定性影响最大的是下降速率 v , 因此有必要对 v 值的影响深入讨论。图 5、6 分别为工况 2 和 3 条件下库水位从正常蓄水位降至死水位时计算区域渗流场分布计算结果。

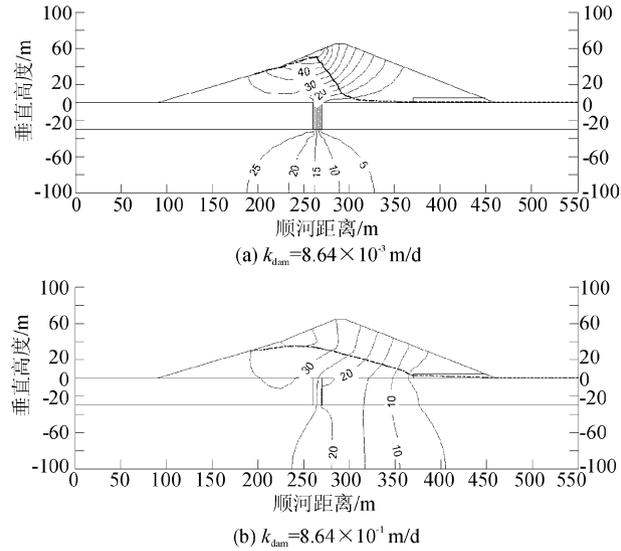


图 5 工况 2 渗流场分布

Fig. 5 The distribution of the seepage for case 2

由图 4~6 可知, 坝体渗透系数一定, 水位下降速率越大, 即 v 值越大, 自由水面线曲率越大, 越远离稳定状态, 说明渗流场变化越滞后于水位下降时间。水位下降过快, 孔隙水压力没有足够的时间消散, 坝外水压力过快降低, 而坝内孔隙水压力却来不及伴随坝外静水压力的降低而消散, 便在坝体迎水面形成“逆流”, 向上游的渗

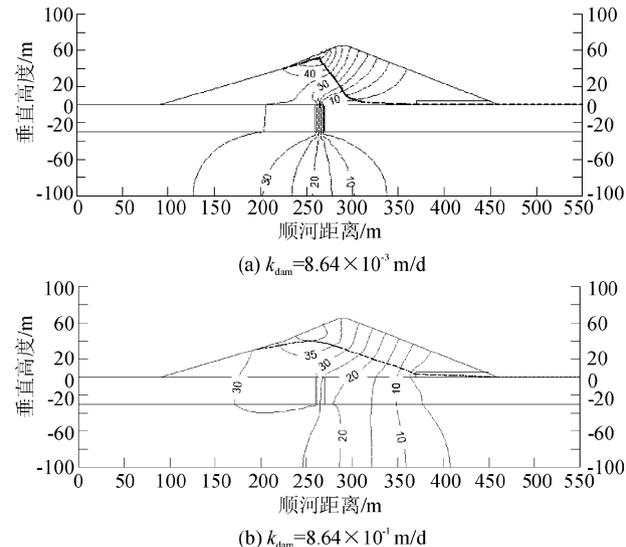


图 6 工况 3 渗流场分布

Fig. 6 The distribution of the seepage for case 3

透压力会导致上游稳定性降低。尤其当坝体渗透系数过小或水位下降速率过大时, 此内外水压力会更为显著。

3 游坝坡稳定性分析

库水位骤降对坝体渗流场影响较大, 根据计算出的渗流场变化结果, 由 Morgenstern-Price 法计算上游坝坡安全系数随库水位下降的变化过程。由于 Morgenstern-Price 法考虑条间正应力和切应力, 同时满足力矩平衡和力平衡等条件, 计算结果较接近实际。图 7~9 为不同工况上游坝坡安全系数随时间变化情况。

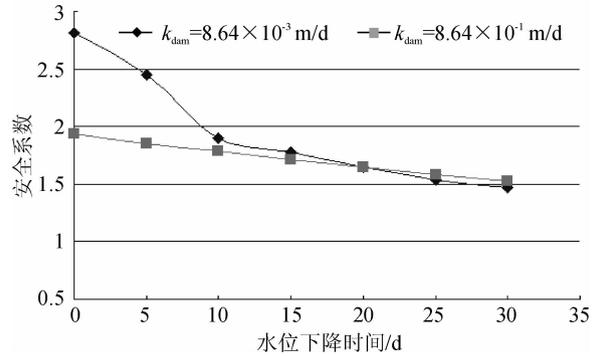


图 7 工况 1 上游坝坡安全系数变化规律

Fig. 7 The variation of the factor of safety of upstream slope for case 1

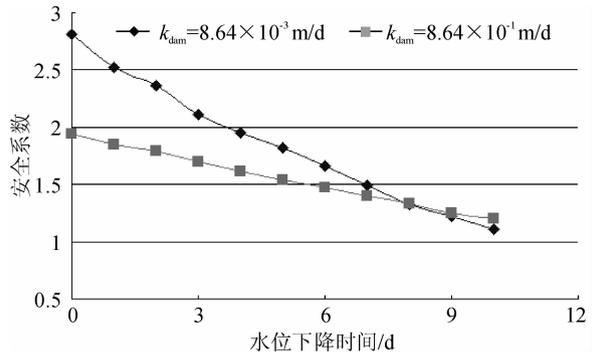


图 8 工况 2 上游坝坡安全系数变化规律

Fig. 8 The variation of the factor of safety of upstream slope for case 2

由图 7~9 可知, 当 $k_{dam} = 8.64 \times 10^{-3} \text{ m/d}$, 初始状态上游坝坡安全系数为 2.8, 随着水位骤降时间的推移, 安全系数逐渐降低, 水位下降速率越快安全系数降低越快, 在工况 3 (图 9) 情况下上游坝坡已经失稳。当 $k_{dam} = 8.64 \times 10^{-1} \text{ m/d}$ 时, 初始状态上游坝坡安全系数为 1.98, 随着水位骤降时间的推移, 安全系数逐渐减小, 但其减小速率较 $k_{dam} = 8.64 \times 10^{-3} \text{ m/d}$ 时小, 工况 3 时上游坝坡安全系数降至 1.18, 还未失稳。

库水位突然降落后, 坡体内的浸润线并未与坡外水位同时降落, 孔隙水压力来不及消散, 由坡外水位提供的静水压力在水位骤降时迅速消失, 上游坝坡形成“逆

流”,导致其稳定性降低。坝体渗透系数越小其饱和区范围越小,初始安全系数较大,但由于较小渗透系数的坝体对孔隙水压力的消散有较大的阻滞作用,坝外静水压力与坝内孔隙水压力形成较大的水位差,在库水位降低过程中其稳定性降低较快。

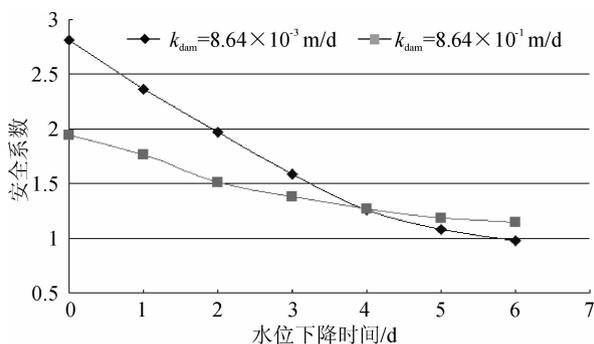


图9 工况3上游坝坡安全系数变化规律

Fig.9 The variation of the factor of safety of upstream slope for case 3

库水位下降速率越快,坝体内孔隙水压力就有较少时间耗散,上游坝坡“逆流”越突出,尤其是当坝体材料渗透系数较小时,此效应就越明显,导致上游坝坡稳定性迅速降低。在此工程中,当库水位下降速率达到5 m/d时坝坡稳定性已较差,较小渗透系数的坝体已经失稳。

4 结论

库水位骤降对上游坝坡稳定性影响的研究是目前岩土工程界关注的问题。本文考虑非饱和非稳定渗流,对南沟门水库均质坝某最大横断面渗流场在库水位骤降时的变化进行分析,得出不同渗透系数坝体在不同工况下渗流场的变化规律。根据坝体渗流场计算结果,采用极限平衡原理对坝上游边坡进行了稳定性分析,重点考察了不同渗透系数坝体、不同水位下降速率对边坡安全系数的影响,结果表明:

1) 坝体渗透系数小,正常蓄水位时浸润线低,非饱和区范围小,上游坝坡安全系数大;

2) 坝体渗透系数越小,库水位下降时其孔隙水压力消散越慢,上游坝坡内外水压力越大,“逆流”越明显,稳定性越低;

3) 随着库水位下降速率的增大,孔隙水压力消散的时间减少,上游坝坡“逆流”越显著,导致其稳定性降低越快。对于该工程,建议库水位下降速率不要超过5 m/d。

参考文献:

- [1] 柴军瑞,徐维生. 大坝工程渗流非线性问题[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [2] 沈珠江. 广义吸力与非饱和土的统一变形理论[J]. 岩土工程学报,1996,18(2):1-9.
Shen Zhujiang. Generalized suction and unified deformation theory for unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(2): 1-9.
- [3] 刘新喜,夏元友,张显书,等. 库水位下降对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(8):1439-3444.
Liu Xinxi, Xia Yuanyou, Zhang Xianshu, et al. Effects of drawdown of reservoir water level on landslide stability [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(8): 1439-3444.
- [4] 刘新喜,夏元友,练操,等. 库水位骤降时的滑坡稳定性评价方法研究[J]. 岩土力学,2005,26(9):1427-1431.
Liu Xinxi, Xia Yuanyou, Lian Cao, et al. Research on method of landslide stability valuation during sudden drawdown of reservoir level [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(9): 1427-1431.
- [5] 王学武,许尚杰,党发宁,等. 水位骤降时的非饱和坝坡稳定分析[J]. 岩土力学,2010,31(9):2760-2764.
Wang Xuewu, Xu Shangjie, Dang Fanning, et al. Analysis of stability of dam slope during rapid drawdown of reservoir water level [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2760-2764.
- [6] 贾苍琴,黄茂松,土贵和,等. 水位骤降对土坡稳定性的影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2008,36(3):304-309.
Jia Cangqin, Huang Maosong, Wang Guihe, et al. Analysis of stability of soil slope during rapid drawdown of water table [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, 36(3): 304-309.
- [7] Mehmet M B. Investigation of stability of slopes under drawdown conditions [J]. Computers and Geotechnics, 2007, 34: 81-91.
- [8] 谢定义,姚仰平,党发宁. 高等土力学[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [9] 陈祖煜. 土质边坡稳定性分析的原理和方法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2000.
- [10] Dawson E M, Roth W H, Drescher A. Slope stability analysis by strength reduction [J]. Geotechnique, 1999; 49(6): 835-840.
- [11] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements [J]. Geotechnique, 1999; 49(3): 387-403.
- [12] Lane P A, Griffiths D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions [J]. Journal of Geotechnique Geoenvironment Engineering, 2000, 126(5): 443-450.

(责任编辑 杨小丽)