

库水位骤降条件下涉水边坡抗滑桩加固效果

苏国韶^{1,2}, 燕柳斌^{1,2}, 丁雷¹, 钱坤¹

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 广西 南宁 530004)

摘要:针对工程实践中涉水边坡抗滑桩设计技术规范欠缺、计算模型过于简化等问题,采用强度折减拉格朗日差分法模拟分析水位骤降速度、水深坡高比、抗滑桩桩位等因素对涉水边坡抗滑桩加固效果的影响。结果表明:库水位骤降速度越大,抗滑桩加固后的边坡安全系数越小;与抗滑桩加固前相比,抗滑桩加固后水深坡高比与边坡安全系数的关系发生了较大变化,应计算最大库水位骤降速度工况下不同水深坡高比对应的边坡安全系数,取其中最小的边坡安全系数作为边坡稳定性判别依据;库水位骤降条件下,抗滑桩布设的位置对边坡加固效果具有较大影响,可根据不同桩位条件下的水深坡高比与边坡安全系数的关系曲线确定合理桩位。

关键词:边坡;抗滑桩加固;库水位骤降;拉格朗日差分法;强度折减法

中图分类号:TV697 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2013)04-0022-05

Research on reinforcement effect of anti-slide pile at riverside slope under water level plummeting condition//SU Guoshao^{1,2}, YAN Liubin^{1,2}, DING Lei¹, QIAN Kun¹ (1. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Ministry of Education Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Aiming to the problems of design specifications deficiency and calculation model oversimplification for anti-slide pile at riverside slope, the shear strength reduction method based on Lagrangian difference technique was applied to simulate the reinforcement effect of anti-slide pile under water plummeting condition. The influencing factors include the speed of water level plummeting, the ratio of water depth to slope height, and the location of the anti-slide pile. Research results show that, the larger the speed of water lever plummeting, the smaller the slope safety factor, and the relationship between the ratio of water depth to slope height and the slope safety factor changes significantly due to the anti-slide pile reinforcement. Hence, it is necessary to calculate the slope safety factors corresponding to different ratios of water depth to slope height under the condition of maximum water level plummeting speed, then select the minimum one as the criterion value for slop stability analysis. Besides, the location of anti-slide pile has a relatively high influence on the slope reinforcement effect. The appropriate location can be determined by the relationship curve of the ratio of water depth to slope height and slope safety factor according to different pile locations.

Key words: slope; anti-slide pile reinforcement; water level plummeting; Lagrangian difference method; shear strength reduction method

库水位的升降对涉水边坡的稳定性具有重要影响,水库滑坡破坏多数发生在库水位骤降时期^[1],为此,学者们深入研究了库水位的升降对涉水边坡的影响,指出库水位骤降是涉水边坡稳定性分析中应考虑的最不利工况之一^[2-6]。当前,抗滑桩是边坡加固工程中广泛采用的方式,但现有的研究多侧重于库水位的升降对边坡稳定性的影响,而对抗滑桩加固后的边坡稳定性的影响却研究较少^[7]。目前,

在工程实践中还没有制订针对涉水边坡抗滑桩的设计技术规范,存在着计算模型过于简化、过于依赖工程经验等问题,势必造成一定的安全隐患或浪费。因此,开展库水位骤降条件下涉水边坡抗滑桩加固效果的研究具有重要的现实意义与理论价值。本文采用强度折减拉格朗日差分法探讨库水位骤降速度、坡高比、抗滑桩桩位等因素对涉水边坡抗滑桩加固效果的影响,为涉水边坡抗滑桩加固设计提供理论依据与借鉴作用。

1 强度折减拉格朗日差分法

1.1 方法简介

强度折减法是当前边坡稳定性分析的重要方法之一^[8-9],与基于极限平衡原理的传统方法相比较,其具有不需对滑动面的形状做假定,不需对边坡剩余推力的分布形式做假定,适用于各种复杂条件,可模拟边坡渐进破坏全过程等优点。强度折减法的基本原理是将岩土体的黏聚力 c 、内摩擦角 φ 等抗剪强度参数按等比例折减,得到一组新的抗剪强度参数 c' 、 φ' 后再进行试算,直至计算不收敛,则边坡达到临界状态时的折减系数即为边坡安全系数 K :

$$c' = \frac{c}{K} \tag{1}$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{K}\right) \tag{2}$$

拉格朗日差分法的数值计算程序 FLAC^{3D} (fast lagrangian analysis of continua in 3 dimension)能很好地模拟岩土材料在达到极限强度后的大变形^[10],已被广泛应用于边坡工程领域。基于 FLAC^{3D} 的强度折减法简称为强度折减拉格朗日差分法,本文采用该方法进行边坡稳定性及抗滑桩加固效果分析。

1.2 方法的可行性验证

以文献[11]的抗滑桩加固边坡为例,验证强度折减拉格朗日差分法在模拟抗滑桩加固效果上的可行性。该边坡高为 13.7 m,坡角为 30°。土体计算参数如下:密度 1 963 kg/m³,弹性模量 50 MPa,泊松比 0.35,黏聚力 23.94 kPa,内摩擦角 10°。抗滑桩计算参数如下:桩长 12 m,桩径 1.0 m,密度 2 400 kg/m³,弹性模量 2.5 GPa,泊松比 0.20。抗滑桩桩位系数 $\xi=0.32$ ($\xi=x_p/L_s$,其中 x_p 为抗滑桩至坡趾的水平距离, L_s 为坡面水平长度)。

桩体采用 FLAC^{3D} 的 Pile 单元模拟,其能很好地模拟桩土接触面的力学行为^[10]。坡体计算模型的边界条件为:四周法向位移约束,底面三向位移约束。计算中仅考虑重力荷载作用,土体本构关系为理想弹塑性,破坏准则为莫尔-库伦准则,剪胀角取 0°。

计算结果表明,抗滑桩加固前,边坡安全系数为 1.13;抗滑桩加固后,边坡安全系数为 1.46,与有限元法的计算结果 1.44^[11]、简化 Bishop 法的计算结果 1.454^[12] 均较接近,表明采用强度折减拉格朗日差分法计算抗滑桩加固后的边坡安全系数是可行的。

2 库水位骤降速度对边坡稳定性的影响

以文献[13]的边坡为算例,采用强度折减拉格朗日差分法进行库水位骤降对边坡安全系数的影响

分析。边坡剖面见图 1,其中,边坡高度 $H=10\text{ m}$,坡面水平长度 $L_s=2H$, $H_1=H_2=H_3=H$, L 为库水位骤降后的水深, L/H 为水深坡高比。为简化计算,假定边坡坡体内孔隙水水位线为水平线,且不考虑孔隙水渗流的影响。图 1 中的 EF 表示边坡内部的孔隙水位线,该水位线与库水位骤降前的最高水位一致。

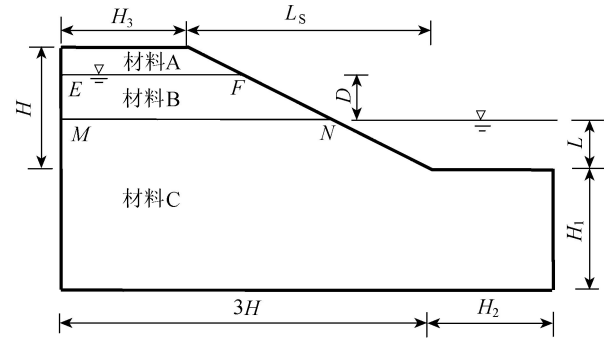


图 1 库水位骤降时边坡计算示意图

参照文献[13]的模拟方法,库水位骤降前,将最高水位 EF 以上的土体材料设为材料 A,强度参数采用抗剪强度参数 c' 、 φ' ,土体密度取天然密度。库水位骤降后,坡体内部孔隙水位高于库水位,边坡 $EFNM$ 内水的自重由土骨架来承担,土密度取湿密度,设为材料 B,抗剪强度参数与材料 A 的相同。库水位骤降后,库水位 MN 以下的土体内孔隙水与库外水相通,土容重取浮容重,土体采用材料 C 的参数进行模拟。注意土体材料分区须根据骤降前后的水位进行调整。土体本构模型采用基于莫尔-库伦屈服准则和非关联流动法则的理想弹塑性模型,土体材料的力学参数见表 1。

表 1 土体材料的力学参数

土体材料	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c'/kPa	内摩擦角 $\varphi'/(^\circ)$
A	2 000	200	0.3	10	20
B	2 980	200	0.3	10	20
C	1 020	200	0.3	10	20
桩	2 400	29 000	0.2		

图 1 中的 D 表示库水位骤降后坡体内孔隙水位与库水位的差值, D 越大,单位时间内库水位骤降的幅度越大,说明库水位骤降的速度越快,故 D 值实际上代表了库水位骤降速度,对照不同 D 值时的边坡安全系数可了解不同库水位骤降速度对边坡稳定性的影响。

当 $D=2\text{ m}$ 时,采用强度折减拉格朗日差分法计算获得的水深坡高比与边坡安全系数关系曲线即 $L/H-K$ 关系曲线(图 2)表明,强度折减拉格朗日差分法的计算结果与简化 Bishop 法、强度折减有限元法的计算结果^[13] 相当接近。运用强度折减拉格朗日差分法计算获得的不同库水位骤降速度的 $L/H-K$

关系曲线(图 3(a))表明,库水位骤降速度越大,对边坡的稳定越不利。

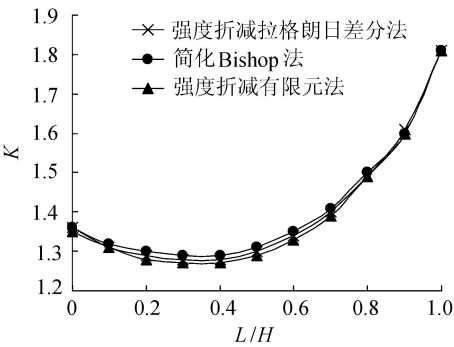
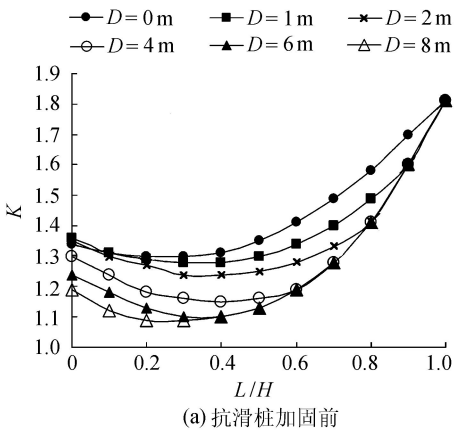
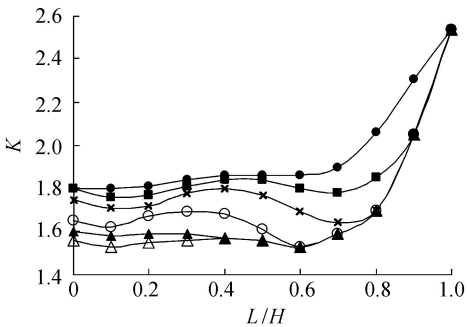


图 2 不同计算方法的 $L/H-K$ 关系曲线



(a) 抗滑桩加固前



(b) 抗滑桩加固后

图 3 不同库水位骤降速度的 $L/H-K$ 关系曲线

3 库水位骤降速度对抗滑桩加固效果的影响

仍以文献[13]的边坡为例,设单排抗滑桩加固,抗滑桩结构参数为:桩长 $h=7\text{ m}$,桩径 $d=1.0\text{ m}$,桩间距取 $4d$,桩位系数 $\xi=0.5$,桩底嵌岩固定。桩体采用 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 的 Pile 单元模拟。计算网格模型见图 4。模型边界条件为:边坡四周法向位移约束,而底部三向位移约束。计算 D 与 L/H 在不同组合情况下的边坡安全系数,见图 3(b),可见库水位骤降速度越大,对抗滑桩加固后的边坡的稳定越不利。

对比图 3(a)与图 3(b),库水位骤降速度对抗滑桩加固前与加固后的边坡稳定性影响是不同的:

a. $L/H-K$ 关系曲线的变化规律不同。抗滑桩

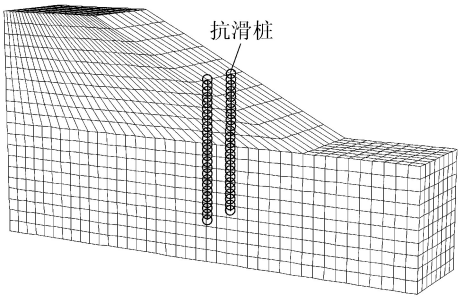


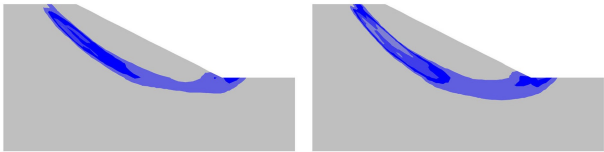
图 4 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 计算网格模型

加固前,随着 L/H 的下降, K 先大幅减小,达到最小值后又略有提高,不同 D 值时,各关系曲线的总体变化趋势是一致的;抗滑桩加固后,随着 L/H 的下降, K 先大幅减小,达到最小值后又略有提高,之后又出现小幅减小和小幅提高的趋势,不同 D 值时,各关系曲线的总体变化趋势也有一定的差异。

b. 最小 K 值出现的时机不同。抗滑桩加固前,不同 D 值时,最小 K 值集中出现在 $L/H=0.3$ 或 $L/H=0.4$ 处;抗滑桩加固后,不同 D 值时,最小 K 值出现的位置差异较大,如 $D=2\text{ m}$ 时,最小 K 值出现在 $L/H=0.5$ 处,而 $D=8\text{ m}$ 时,最小 K 值出现在 $L/H=0.1$ 处。

上述分析表明,采用抗滑桩加固边坡后,不同库水位骤降速度的 $L/H-K$ 关系曲线差别较大,曲线所呈现的非线性更高,最小边坡安全系数对应的 L/H 值不再集中,曲线变化的规律性较差。因此,对于库水位骤降条件下的抗滑桩加固边坡,需绘制最大库水位骤降速度的 $L/H-K$ 关系曲线,才能获取边坡加固后最不利工况对应的最小安全系数,并用于评价边坡稳定性。

研究还发现,不同的库水位骤降速度对抗滑桩加固后边坡的潜在滑动面形状与深度有一定影响,如图 5 所示(图中深色部分下边缘为潜在滑动面,下同),故抗滑桩加固设计时应注意根据最大库水位骤降速度对应的潜在滑动面来复核抗滑桩长度。



(a) $D=2\text{ m}$ ($L/H=0$) (b) $D=8\text{ m}$ ($L/H=0$)

图 5 不同库水位骤降速度的边坡潜在滑动面

4 桩位对边坡加固效果的影响

以上述边坡为例,取 $D=10\text{ m}$, $L/H=0.3$,经强度折减拉格朗日差分法计算得到的桩位系数 ξ 与边坡安全系数 K 的关系曲线(图 6)表明,随着 ξ 的增加, K 呈现先增后减的趋势。当 $\xi=0.6$ 时, K 值最

大,说明该桩位下边坡加固效果较好;当桩设置在靠近坡脚或者坡顶附近时,加固效果不理想,如 $\xi=0.2$ 时,边坡的潜在滑动面位于桩后且从桩顶延至桩身并贯通至边坡体,其破坏形式为滑坡体从桩顶位置滑出(图 7),抗滑桩未起到应有的抗滑作用。由此可见,库水位骤降条件下,抗滑桩布设的位置对边坡加固效果具有较大影响,故抗滑桩加固设计中应重视合理桩位的确定。

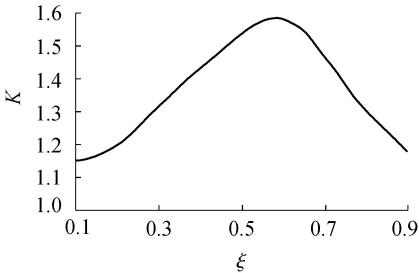


图 6 ξ - K 关系曲线



图 7 不同桩位的边坡潜在滑动面

5 工程应用实例

广西浔江的洪水具有峰高形瘦、暴涨暴落的特点,洪水涨落对岸坡稳定性具有较大影响。下面以广西平南县浔江段的某岸坡为例,采用强度折减拉格朗日差分法进行洪水位骤降条件下的抗滑桩加固设计,岸坡计算断面见图 8。

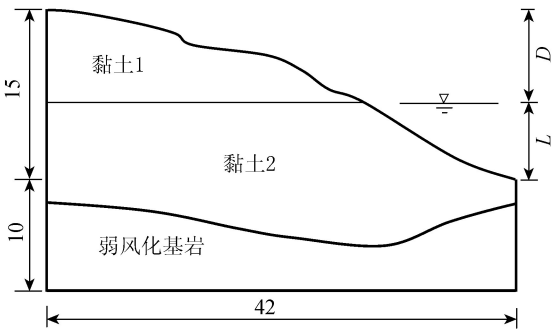


图 8 岸坡计算断面(单位:m)

岸坡的土体本构模型采用基于莫尔-库伦屈服准则和非关联流动法则的理想弹塑性模型,而基岩则采用线弹性本构模型。洪水骤降计算模型的岩土体力学参数见表 2。设计洪水频率 $P=2\%$,相应洪水位高出坡顶,计算中考虑的骤降前最高水位与坡顶高程相同。

表 2 岩土体力学参数

岩土体	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c'/kPa	内摩擦角 $\varphi'/(^{\circ})$
黏土 1	2000	200	0.3	10	22
黏土 2	1220	200	0.3	10	20
弱风化基岩	2500	10000	0.2		

该岸坡抗滑桩加固设计的主要步骤如下:

a. 判断岸坡是否需要加固。将设计洪水位骤降至正常蓄水位作为最不利工况,对应的 $D=15\text{ m}$ 。采用强度折减拉格朗日差分法计算获取的最不利工况的 L/H - K 关系曲线如图 9 所示,随着 L/H 的减小, K 逐渐降低,当 $L/H=0.2$ 时, K 降低至最小值 1.04,小于非常运用条件下的允许值 1.15^[14],因此,该岸坡需要进行加固。值得注意的是,若不考虑库水位骤降影响, K 为 1.29,均大于正常运用条件下的允许值 1.25、非常运用条件下的允许值 1.15,故该岸坡不需要加固,与考虑库水位骤降影响时得到的结论恰好相反,由此说明考虑库水位骤降的必要性。

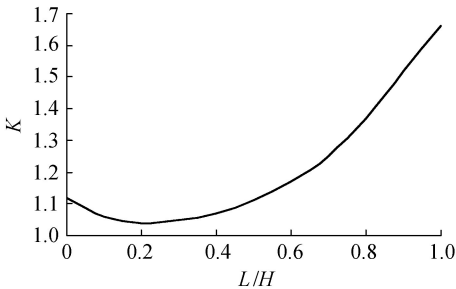


图 9 最不利工况的 L/H - K 关系曲线

b. 确定合理桩位。抗滑桩初步设计参数如下:桩径 $d=1.0\text{ m}$,单排布置,桩间距为 $4d$,嵌岩深度 0.5 m 。计算网格模型见图 10。为确定合理桩位,对比分析桩位系数 ξ 分别为 0.3(桩长 $h=12\text{ m}$)、0.4(桩长 $h=18\text{ m}$)、0.6(桩长 $h=12.5\text{ m}$) 等 3 种不同桩位的加固方案。3 种不同桩位的 L/H - K 关系曲线如图 11 所示。从图 11 可知,整体上看,各桩位的 K 值随着 L/H 的减小而减少。当 $0.1 \leq L/H \leq 0.4$ 时,抗滑桩的加固效果较弱;当 $\xi=0.6$ 时, K 小于非常运用条件下的允许值 1.15,不满足抗滑稳定安全要

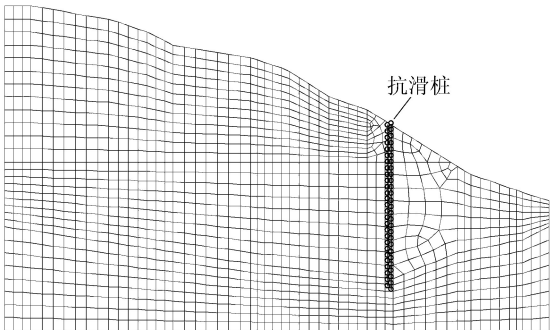


图 10 FLAC^{3D} 计算网格模型

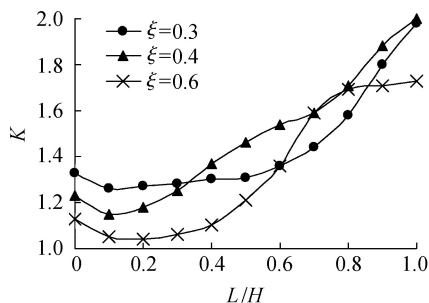


图 11 不同桩位的 L/H - K 关系曲线

求;当 $\xi=0.3、0.4$ 时, K 均大于非常运用条件下的允许值 1.15, 最小 K 值均出现在 $L/H=0.1$ 处, 且 $\xi=0.3$ 时 K 值相对较大。因此 $\xi=0.3$ 时抗滑桩的加固效果较佳。

c. 桩的内力计算。在抗滑桩加固设计中, 桩体内力是配筋计算的依据。根据设计安全系数 $K=1.15$, 采用强度折减拉格朗日差分法对桩位系数 $\xi=0.3、L/H=0.1$ 的边坡进行计算, 潜在滑动面见图 12。利用 Pile 单元可方便地获得桩体内力, 如图 13 所示。

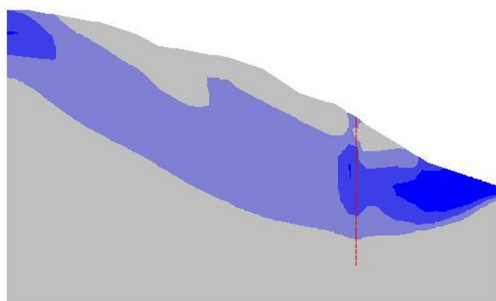


图 12 边坡潜在滑动面 ($\xi=0.3, L/H=0.1$)

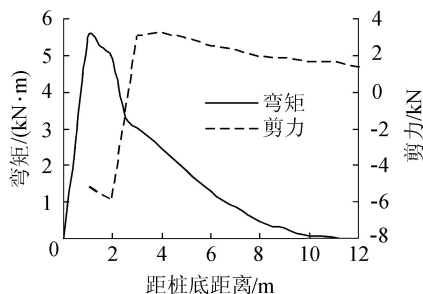


图 13 桩体内力分布

d. 嵌固段岩土体承载能力分析。计算结果表明, 嵌固段岩土体的最大压应力为 5.95 MPa, 小于基岩的允许抗压强度 20 MPa, 满足岩体承载能力要求。

6 结 论

a. 采用强度折减拉格朗日差分法分析在库水位骤降条件下的涉水边坡抗滑桩加固效果是可行的。

b. 在抗滑桩加固前与加固后, 库水位骤降速度

与边坡安全系数均呈反比关系, 库水位骤降速度越大, 边坡安全系数越小。

c. 与抗滑桩加固前相比, 抗滑桩加固后水深坡高比与边坡安全系数的关系发生了较大变化, 应计算最大库水位骤降速度工况下不同水深坡高比对应的边坡安全系数, 取其中的最小边坡安全系数作为边坡稳定性判别依据。

d. 库水位骤降条件下, 抗滑桩布设的位置对边坡加固效果具有较大影响, 合理桩位可根据不同桩位条件下的水深坡高比与边坡安全系数的关系曲线确定。

参考文献:

- [1] 中村浩之, 王恭先. 论水库滑坡[J]. 水土保持通报, 1990, 10(1): 53-64. (ZHONGCUN Haozhi, WANG Gongxian. Discussion on landslide[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1990, 10(1): 53-64. (in Chinese))
- [2] GRIFFITHS D V, LANE P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [3] LANE P A, GRIFFITHS D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(5): 443-450.
- [4] 郑颖人, 唐晓松. 库水作用下边(滑)坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(8): 1115-1121. (ZHENG Yinren, TANG Xiaosong. Stability analysis of slopes under drawdown condition of reservoirs[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(8): 1115-1121. (in Chinese))
- [5] 年廷凯, 万少石, 蒋景彩, 等. 库水位下降过程中土坡稳定强度折减有限元分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(7): 2264-2269. (NIAN Tingkai, WAN Shaoshi, JIANG Jingcai, et al. Finite element analysis of slope stability under drawdown conditions by strength reduction technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(7): 2264-2269. (in Chinese))
- [6] 李邵军, KNAPPETT, 冯夏庭, 等. 库水位升降条件下边坡失稳离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(8): 1586-1593. (LI Shaojun, KNAPPETT, FENG Xiating, et al. Centrifugal test on slope instability influenced by rise and fall of reservoir water level[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(8): 1586-1593. (in Chinese))
- [7] 胡新丽. 三峡水库水位波动条件下滑坡抗滑工程效果的数值研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(12): 2234-2238. (HU Xinli. Numerical simulation of effectiveness of anti-slide piles construction for landslide in Three Gorges Reservoir area under water-level fluctuation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(12): 2234-2238. (in Chinese))

(下转第 30 页)

参考文献:

[1] 丁加丽,彭世彰,徐俊增,等. 控制灌溉条件下水稻蒸发蒸腾量及作物系数试验研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2006,34(3):239-242. (DING Jiali, PENG Shizhang, XU Junzeng, et al. Experimental study on evapotranspiration and crop coefficient of rice under controlled irrigation [J]. Journal of Hohai University: Natural Science,2006,34(3) ,239-242. (in Chinese))

[2] VU S H, WATANABE H, TAKAGI K. Application of FAO-56 for evaluating evapotranspiration in simulation of pollutant runoff from paddy rice field in Japan [J]. Agricultural Water Management, 2005, 76 (3) : 195-210. (in Chinese))

[3] BETHUNE M, AUSTIN N, MAHER S. Quantifying the water budget of irrigated rice in the shepparton irrigation region, Australia [J]. Irrigation Science, 2001, 20 (3) : 99-105.

[4] SHAH S B, EDLING R J. Daily evapotranspiration prediction from Louisiana flooded rice field [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce, 2000, 126 (1) : 8-13.

[5] 丁加丽. 控制灌溉水稻水分利用规律及蒸发蒸腾量模拟研究 [D]. 南京:河海大学,2007.

[6] 雷志栋,罗毅,杨诗秀,等. 利用常规气象资料模拟计算作物系数的探讨 [J]. 农业工程学报,1999,15 (3) : 119-122. (LEI Zhidong, LUO Yi, YANG Shixiu, et al. Calculation of crop coefficient with meteorological data [J]. Transations of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15 (3) : 119-122. (in Chinese))

[7] TYAGI N K, SHARMA D K, LUTHRA S K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeter [J]. Agricultural Water Management, 2000, 45 (1) : 41-54.

[8] 王笑影,梁文举,闻大中. 北方稻田蒸散需水分析及其作物系数确定 [J]. 应用生态学报,2005,16 (1) : 69-72.

(上接第 26 页)

[8] DAWSON E M, ROTH W H, DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction [J]. Geotechnique, 1999, 49 (6) : 835-840.

[9] 郑宏,李春光,李焯芬,等. 求解安全系数的有限元法 [J]. 岩土工程学报,2002,24 (5) : 626-628. (ZHENG Hong, LI Chunguang, LEE C F, et al. Finite element method for solving the factor of safety [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24 (5) : 626-628. (in Chinese))

[10] 陈育民,徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例 [M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

[11] HASSIOTIS S J, HAMEAU L, GUNARATNE M. Design method

(WANG Xiaoying, LIANG Wenju, WEN Dazhong. Analysis of paddy field evapotranspiration in North China and calculation of crop coefficient [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16 (1) : 69-72. (in Chinese))

[9] 杨晓光,BOUMAN B A M,张秋平,等. 华北平原旱稻作物系数试验研究 [J]. 农业工程学报,2006,22 (2) : 37-41. (YANG Xiaoguang, BOUMAN B A M, ZHANG Qiuping, et al. Crop coefficient of aerobic rice in North China [J]. Transations of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 (2) : 37-41. (in Chinese))

[10] 彭世彰,丁加丽,茆智,等. 用 FAO-56 作物系数法推求控制灌溉条件下晚稻作物系数及验证 [J]. 农业工程学报,2007,23 (7) : 30-34. (PENG Shizhang, DING Jiali, MAO Zhi, et al. Estimation and verification of crop coefficient for water saving irrigation of late rice using the FAO-56 method [J]. Transations of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23 (7) : 30-34. (in Chinese))

[11] HUANG H C, LIU C W, CHEN S K, et al. Analysis of percolation and seepage through paddy bunds [J]. Journal of Hydrology, 2003, 284 (1/2/3/4) : 13-25.

[12] 龚元石,李保国. 应用农田水量平衡模型估算土壤水渗漏量 [J]. 水科学进展, 1995, 6 (1) : 16-20. (GONG Yuanshi, LI Baoguo. Using field water balance model to estimate the percolation of soil water [J]. Advances in Water Science, 1995, 6 (1) : 16-20. (in Chinese))

[13] 陈家宙,何圆球,陈明亮. 用大型 Lysimeter 和 TDR 测算赣东北红壤农田的渗漏量 [J]. 水土保持学报,2002,16 (1) : 88-91. (CHEN Jiazhou, HE Yuanqiu, CHEN Mingliang. Estimating water leakage in red soil farmland using lysimeter and TDR in Northeast Jiangxi Province [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2002, 16 (1) : 88-91. (in Chinese))

[14] 李远华,罗金耀. 节水灌溉理论与技术 [M]. 武汉:武汉大学出版社,2003.

(收稿日期:2012-08-07 编辑:周红梅)

for stabilization of slopes with piles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1997, 123 (4) : 314-323

[12] BISHOP A W. The use of the slip circle in stability analysis of slopes [J]. Geotechnique, 1955, 5 (1) : 7-17.

[13] 刘金龙,王吉利,梁昌望,等. 库水位变化对边坡稳定性影响的有限元模拟 [J]. 水力发电,2007,33 (10) : 41-44. (LIU Jinlong, WANG Jili, LIANG Changwang, et al. EFM Simulation on the influence of water level fluctuation on slope stability [J]. Water Power, 2007, 33 (10) : 41-44. (in Chinese))

[14] GB 50286—1998 堤防工程设计规范 [S].

(收稿日期:2012-07-19 编辑:周红梅)