

类土质岸坡渗流稳定性的修正传递系数法^{*}

——以三峡库区凉水井滑坡为例

唐红梅¹, 周云涛^{2,3}, 陈洪凯¹

(1. 重庆交通大学 岩土工程研究所, 重庆 400074; 2. 中国地质调查局地质灾害防治技术中心, 成都 611734;
3. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 成都 611734)

摘要:【目的】提出考虑渗流驱动力作用下的岸坡稳定的修正传递系数法。【方法】分析《重庆市地质灾害防治工程设计规范》(DB50 5029-2004)(后简称《规范》)中三峡库区岸坡渗流驱动力计算方法的不足,建立类土质岸坡渗流驱动物理模型,提出岸坡渗流驱动力精细化计算方法,考虑渗流驱动力修正了类土质岸坡稳定性计算的传递系数法。【结果】三峡库区凉水井滑坡实例分析表明,《规范》中的方法和本文方法得到的稳定系数分别为 1.061 和 1.074,《规范》中的方法关于渗流驱动力计算过于保守。【结论】考虑渗流驱动力精细化计算方法对于大型、特大型岸坡稳定性计算具有实际工程意义。

关键词: 渗流驱动力; 修正传递系数法; 类土质岸坡; 三峡库区

中图分类号: U412.22⁺2; U416.1⁺4

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2017)05-0044-05

自 2003 年三峡水库蓄水以来,由库水位下降形成的渗流引发的地质灾害不断,如 2003 年的秭归县千将坪滑坡和马家沟滑坡、2005 年开县井泉滑坡、2009 年云阳县凉水井滑坡、2010 年神女溪青石滑坡等。岸坡地质灾害频发,造成人员伤亡和重大经济损失。研究渗流引发的类土质岸坡稳定性变化问题对于三峡库区地质减灾具有积极意义。

水库放水产生的岸坡渗流稳定问题一直是岩土工程界的热点,国内外学者取得了大量研究成果,如 Saada 等人^[1]通过动力有限元程序解决了浸水岩质边坡的稳定性问题,解释了由过饱和和孔隙水压力在边坡中引起的渗流效应; Athani 等人^[2]认为在土质坝的设计中必须考虑边坡和渗流的双重稳定性,从而为土质坝设计提供安全保障; Ahmadi-Adli 等人^[3]进行了引水渠的数值模拟及现场试验,发现基质吸力对水土特征曲线特别敏感; Vandamme 等人^[4]提出一种新的陡坡形迹颗粒元模型,该模型能够较好地考虑由渗流引起的基质吸力和水力改变情况; Özer 和 Akay^[5-6]研发了一种由渗流引发的岸坡破坏修复方法,为岸坡修正提供了技术保证。在国内,郑颖人等人^[7]提出了边坡渗流力和浸润线计算方法;唐红梅等人^[8]认为库水位下降产生的渗流力是导致巫山县江东寺岸坡破坏的主要因素;杨春宝等人^[9]通过粉土边坡离心模型试验得出了当坡内水位超过 1/3 坡高后在坡内渗流作用下粉土边坡呈现逐级侵蚀剥落、从坡脚向坡顶、由浅层向深层的多级滑坡失稳模型;陈五一等人^[10]研究表明,渗流应力耦合效应对边坡稳定的影响最为不利;于玉贞等人^[11]认为 Bishop 和 Fredlund 非饱和土抗剪强度公式在强度折减法应用的本质是相同的;涂国祥等人^[12]探讨了水位变速对边坡堆积体渗流场和稳定性的影响机理和规律;毛昶熙等人^[13]系统叙述了渗流产生的破坏力“浮力”和“渗透力”,并讨论了渗流力之间相互转换关系及在管涌滑坡中的应用;年廷凯等人^[14-15]提出了水位下降条件下黏性土边坡稳定性分析的图表法,并通过强度折减有限元法的模拟,得出水位下降速率对高渗透性土坡孔压影响显著,而对低渗透性土坡内孔压影响较小的结论;张文杰等人^[16]考虑基质吸力对非饱和土抗剪强度及岸坡安全系数的贡献,认为土体的饱和渗透系数和土水特征曲线共同决定了水位升降过程中岸坡内孔隙水压力的大小和分布;张芳枝等人^[17]在试验确定非饱和黏土层的水-土特征曲线和强度参数的基础上,通过理论分析建立了非饱和和岸坡渗流-应力耦合模型;高小育等人^[18]根据 Biot 固结理论和孔隙水连续性原理,建立了应力场和渗流场耦合有限元方程,对边坡工程的防控具有

* 收稿日期:2016-09-07 修回日期:2017-06-28 网络出版时间:2017-05-16 11:26

资助项目:重庆市自然科学基金重点项目(No.cscet2013JJB30001);国土资源部公益性行业科研项目(No.201511051);中国地质调查项目(No. DD20160278)

第一作者简介:唐红梅,女,教授,博士,研究方向为岩土与工程地质减灾与防治, E-mail: hmtang6778@sina.com; 通信作者:周云涛,工程师, E-mail: zhouyuntao_13@sina.com

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20170516.1126.056.html>

一定参考价值;徐东强等人^[19]推导了透水边坡在地下水渗流条件下边坡稳定系数的解析表达式,采用非线性规划中的变尺度方法,得出最危险圆弧滑动面的位置。

三峡库区重庆段对于库水位下降类土质岸坡设计常参照重庆市地方规范《重庆市地质灾害防治工程设计规范》(DB50 5029-2004)(后简称《规范》)^[20]。《规范》给出了库水位下降过程中渗流驱动力的计算方法,主要方法是平均水力梯度乘以水的重度。此方法在运用过程中有一定缺陷,如取水力梯度为平均值,而现实中水力梯度在滑体内任一点是不同的,取平均值无疑增大了误差。同时,渗流驱动力也与滑面方程和浸润线方程相关。本文针对《规范》关于渗流驱动力计算的缺陷,计算得出滑体内任一点的渗流驱动应力,通过浸润线方程和滑面方程积分得到渗流驱动力,进而修正传统的岸坡稳定性计算的传递系数法,相关研究成果对岸坡稳定性计算和优化设计提供理论依据。

1 渗流驱动力计算

如图 1 类土质岸坡渗流驱动物理模型,将库水位下降过程考虑为潜流,潜流从高水位 h_1 流向低水位 h_2 形成浸润线,在岸坡体内形成渗流驱动力。通过 Dupuit 公式^[7]可求得任一竖截面的渗流应力为:

$$D_p = \rho g J = \frac{\rho g (h_1^2 - h_2^2)}{2l(h_x - b_x)}, \quad (1)$$

通过渗流区域对任一竖截面的渗流应力进行积分获得作用于条块 i 的渗流驱动力为^[21]:

$$D = \int_0^{b_i} D_p dx = \int_0^{b_i} \frac{\rho g (2v_s h_1 t - v_s^2 t^2)}{2l(g(x) - f(x))} dx. \quad (2)$$

(1),(2)两式中, q_x 为任一竖截面的单宽流量(单位: $m^3 \cdot s^{-1}$); K 为类土质土体渗透系数; J 为水力梯度; A 为垂直渗流方向的流经面积(单位: m^2); l 为渗流路径水平投影长度(单位: m); h_x 为浸润线到不透水层的高度(浸润线方程); b_x 为岸坡潜在破裂面方程; b_i 为条块 i 底面水平投影长度(单位: m); v_s 为库水位降落速度(单位: $m \cdot d^{-1}$); t 为时间(单位: d); $f(x)$ 为潜在破裂面关于 x 的函数,可拟合获得; $g(x)$ 为渗流自由面(浸润线)方程;其他物理意义同上。

至此,建立了考虑库水位降落速度、降落时间、库水位初始高度、浸润线方程以及岸坡潜在破裂面方程的渗流驱动力。

2 考虑渗流驱动力的修正传递系数法

在岸坡体中取第 i 块条块进行受力分析,如图 2 所示。条块受重力 W_i 、浮力 U_i 、渗流驱动力 D_i 、 $i-1$ 条块的不平衡推力 P_{i-1} 、抵抗力 T_i 、正压力 N_i ,将各作用力投影到底滑面上,对传递系数法^[17]进行修正,得到第 i 条块的平衡方程为:

$$P_i = (W_i \sin \alpha_i + D_i \cos \beta_i) - \frac{c_i l_i}{F_s} - (W_i \cos \alpha_i - D_i \sin \beta_i) \frac{\tan \varphi_i}{F_s} + P_{i-1}, \quad (3)$$

不平衡系数为:

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \frac{\tan \varphi_i}{F_s} \sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i). \quad (4)$$

(3),(4)两式中, P_i 是第 i 条块的不平衡下滑力; α_i 是第 i 条块滑面与水平面的夹角; α_{i-1} 是第 $i-1$ 条块滑面与水平面的夹角; β_i 是第 i 个滑面与渗流驱动力的夹角; c_i 是第 i 个条块粘聚力; l_i 是第 i 条块的底面长度; φ_i 是第 i 条块滑动摩擦角; ψ_{i-1} 是第 i 条块的不平衡系数; F_s 滑坡稳定系数。

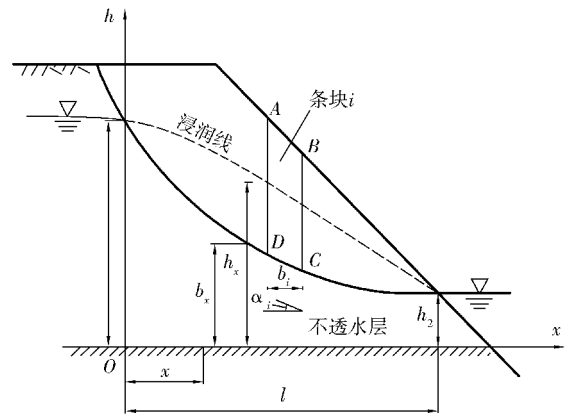


图 1 类土质岸坡渗流驱动物理模型

Fig. 1 Physical model of seepage force for the quasi soil bank slope

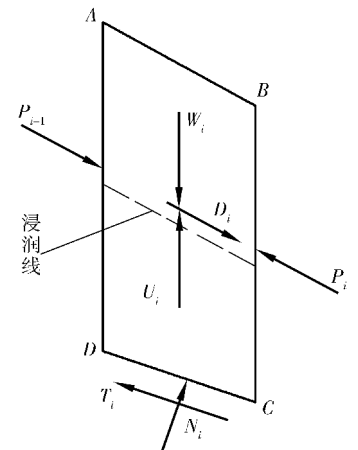


图 2 条块 i 力学模型

Fig. 2 Mechanical model for slice i

3 算例分析

3.1 凉水井滑坡概况

凉水井滑坡位于重庆市云阳县水让村 8 组长江右岸斜坡地带。滑坡整体平面形态呈“U”形,后部地形呈近似圈椅状,南高北低,中后部地形较陡,前部地形较缓,自然坡度 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。滑坡前缘高程约 100 m,后缘高程约 319.5 m,相对高差约 221.5 m,平面纵向长度约 434 m,横向宽 358 m,面积约 $1.182\times 10^5\text{ m}^2$,滑体平均厚度约 34.5 m,总体积约 $4.0779\times 10^6\text{ m}^3$ 。凉水井滑坡滑体(Q_4^{del})为滑坡堆积,主要由含角砾粉质粘土、人工填土、含碎石、块石粘土以及砂、泥岩块石组成;滑床为侏罗纪中统沙溪庙组(J_2s)互层砂岩、泥岩;滑动带为滑坡堆积与下伏基岩接触带,滑动方向与现坡向基本一致。

滑坡危害对象主要为长江航道。由于该滑坡区内长江航道较狭窄,滑坡体积较大;失稳后滑体入江速度可能较快,形成涌浪较高,将直接威胁航道内过往船舶及乘客安全,经济损失和社会影响无法估量。该滑坡危害等级为 II 级。

3.2 修正传递系数法计算凉水井滑坡稳定性

图 3 为凉水井滑坡地质剖面图,将该剖面按传递系数法划分为 8 个条块。滑体天然重度为 $23\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$;饱和重度为 $23.8\text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$;滑面未浸水段抗剪强度为 $c=20\text{ kPa}$, $\varphi=24^{\circ}$;滑面浸水段抗剪强度为 $c=15\text{ kPa}$, $\varphi=23.78^{\circ}$ 。考虑凉水井滑坡最不利工况,即水位从 175 m 降低到 145 m,历时 30 d,经(10)式浸润线计算得出条块④、⑤、⑥、⑦、⑧浸水。将相关参数代入(1)~(4)式计算凉水井滑坡动水压力和稳定性,并与《规范》相比较,计算结果见表 1。

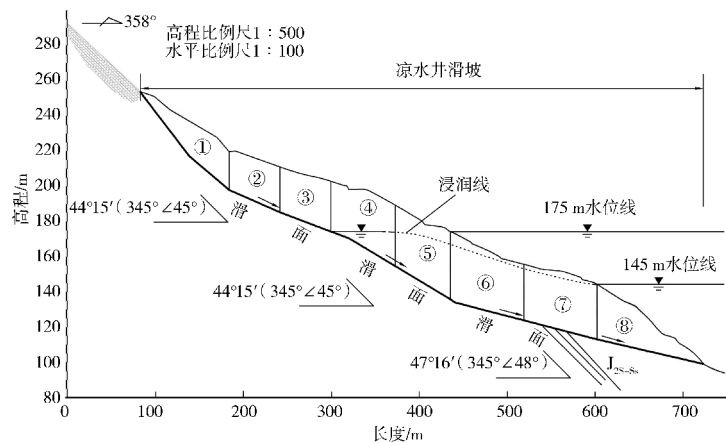


图 3 凉水井滑坡地质剖面图及条块划分

Fig. 3 The geological profile map and slice division of Liangshuijing landslide

表 1 凉水井滑坡动水压力及稳定性计算

Tab. 1 The hydrodynamic force and stability calculation of Liangshuijing landslide

参数	条块号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
条块总面积/ m^2	798.64	719.20	791.50	1 164.11	1 117.33	1 440.45	1 346.34	1 045.50
条块饱水面积/ m^2				325.43	811.09	1 306.25	1 244.46	1 045.50
滑面倾角度/ $^{\circ}$	40.5	24.0	20.0	31.0	31.0	15.0	13.0	13.0
滑面长度/m	75.61	31.74	30.82	41.42	36.58	43.56	42.83	61.96
动水压力(《规范》方法)/kN	0	0	0	681.57	1 698.73	1 231.11	1 303.19	
动水压力(本文方法)/kN				1 057.00	1 438.30	810.05	797.01	0.00
地震力/kN	459.22	413.54	455.11	675.87	658.69	854.38	799.03	622.07
地震作用系数					0.025			
稳定系数(《规范》方法)					1.061			
稳定系数(本文方法)					1.074			

将表 1 的动水压力作曲线得到图 4。对于条块④,《规范》中的方法动水压力小于本文方法;而对于条块⑤、⑥、⑦,动水压力却是《规范》法较大;同时,得出《规范》中的方法动水压力总和为 4 914.61 kN,本文方法得到的动水压力总和为 4 102.36 kN,两者相差达 812.25 kN。因此,动水压力的精确计算问题不容忽视。

《规范》中的方法和本文方法对凉水井滑坡进行稳定性计算得到的稳定系数分别为 1.061 和 1.074,显然《规范》中的方法是偏于安全的;虽然稳定系数仅相差 0.013,但对于凉水井滑坡而言,若设计安全系数为 1.15,则《规范》中的方法得到的治理剩余下滑力为 6 467.00 kN,本文方法得到的治理剩余下滑力为 5 455.83 kN,差值达到 1 011.17 kN。若采用抗滑桩进行设计,至少增加截面面积 1.5 m²方能达到安全指标。初步估算,凉水井滑坡抗滑桩设计截面面积增加 1.5 m²将导致造价增加约 1 000 万元。因此,对于大型、特大型岸坡,考虑渗流驱动力精细化计算的修正稳定性计算是相当必要的。

4 结论

本文针对《规范》中岸坡渗流驱动力计算的缺陷,建立了土质岸坡渗流驱动物理模型,提出了岸坡渗流驱动力精细化计算方法,考虑渗流驱动力修正了岸坡稳定性计算的传递系数法。

对凉水井滑坡实例分析表明,《规范》中的方法和本文方法得到的稳定系数分别为 1.061 和 1.074,《规范》中的方法关于渗流驱动力计算过于保守;考虑渗流驱动力精细化计算方法对于大型、特大型岸坡稳定性计算具有实际工程意义。

参考文献:

- [1] SAADA Z, MAGHOUS S, GARNIER D. Stability analysis of rock slopes subjected to seepage forces using the modified Hoek-Brown criterion[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 55: 45-54.
- [2] ATHANI S S, SHIVAMANTH, SOLANKI C H, et al. Seepage and stability analyses of earth dam using finite element method[J]. Aquatic Procedia, 2015, 4: 876-883.
- [3] AHMADI-ADLI M, TOKER N K, HUVAJ N. Prediction of seepage and slope stability in a flume test and an experimental field case[J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2014, 9(4): 189-194.
- [4] VANDAMME J, ZOU Q P. Investigation of slope instability induced by seepage and erosion by a particle method[J]. Computers and Geotechnics, 2013, 48: 9-20.
- [5] ÖZER A T, AKAY O, FOX G A, et al. A new method for remediation of sandy slopes susceptible to seepage flow using EPS-block geofoam [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2014, 42(2): 166-180.
- [6] AKAY O, ÖZER A T, FOX G A, et al. Behavior of sandy slopes remediated by EPS-block geofoam under seepage flow[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 37: 81-98.
- [7] 郑颖人, 时卫民, 孔位学. 库水位下降时渗透力及地下水浸润线的计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(18): 3203-3210.
ZHENG Y R, SHI W M, KONG W X. Calculation of seepage forces and phreatic surface under drawdown conditions [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(18): 3203-3210.
- [8] 缪海波, 殷坤龙, 郭付三, 等. 金属矿山尾矿坝渗流场模拟及稳定性数值分析[J]. 金属矿山, 2010, 39(3): 134-138.
- [9] MIU H B, YIN K L, GUO F S, et al. Seepage field simulation and numerical analysis of stability of metal mine tailings dam[J]. Metal Mine, 2010, 39(3): 134-138.
- [8] 唐红梅, 周云涛, 沈娜, 等. 三峡库区类土质岸坡破坏机制研究一以巫山县江东寺岸坡为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(4): 32-40.
TANG H M, ZHOU Y T, SHEN N, et al. Study on failure mechanism and control of earthy-soil bank slope in the Three Gorges reservoir: taking Jiangdongsi bank slope in Wushan county as an example [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2016, 33(4): 32-40.
- [9] 杨春宝, 朱斌, 孔令刚, 等. 水位变化诱发粉土边坡失稳离心模型试验[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(7): 1261-1271.
YANG C B, ZHU B, KONG L G, et al. Centrifugal model tests on failure of silty slopes induced by change of water level [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(7): 1261-1271.
- [10] 陈五一, 罗玉龙. 渗流对土质边坡稳定性影响分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(3): 306-309.
CHEN W Y, LUO Y L. Influence of seepage on stability of soil slopes [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2010, 43(3): 306-309.
- [11] 于玉贞, 林鸿州, 李荣建, 等. 非稳定渗流条件下非饱和土边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2892-2998.
YU Y Z, LIN H Z, LI R J, et al. Stability analysis of unsaturated soil slope under transient seepage flow state [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2892-2998.
- [12] 涂国祥, 邓辉, 黄润秋. 水位变动速度对某库区岸坡堆积体稳定性的影响[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(4): 515-520.

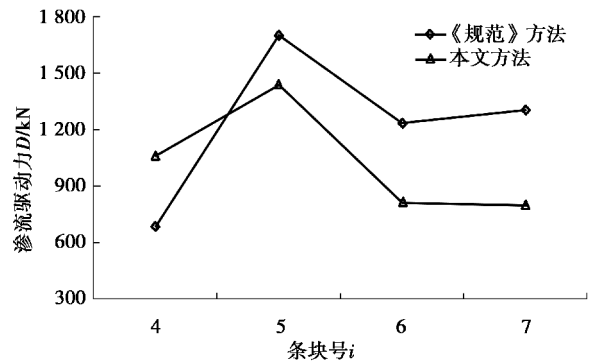


图4 不同条块的渗流驱动力

Fig. 4 seepage force of different slices

- TU Z G, DENG H, HUANG R Q. Influence on a bank slope accumulations' stability of the rising or falling speed of a reservoir water level[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2011, 43(4): 515-520.
- [13] 毛昶熙, 段祥宝. 关于渗流的力及其应用[J]. 岩土力学, 2009, 30(6): 1569-1574.
- MAO C X, DUAN X B. On seepage forces and application [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1569-1574, 1582.
- [14] 年廷凯, 刘成, 万少石, 等. 水位下降条件下黏性土边坡稳定性的图表法[J]. 岩土力学, 2012, 32(2): 569-576.
- NIAN T K, LIU C, WANG S S, et al. Graphic method for stability of clay slopes during water level drawdown[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 32(2): 569-576.
- [15] 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, 2302.
- NIAN T K, WANG S S, JIANG J C, 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.
- [16] 张文杰, 陈云敏, 凌道盛. 库岸边坡渗流及稳定性分析[J]. 水利学报, 2005, 36(12): 1510-1516.
- ZHANG W J, CHEN Y M, LING D S. Seepage and stability analysis of bank slopes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(12): 1510-1516.
- [17] 张芳枝, 陈晓平. 非饱和堤岸的渗流特征及其稳定性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1561-1567.
- ZHANG F Z, CHEN X P. On seepage flow and stability of unsaturated soil embankment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1561-1567.
- [18] 高小育, 廖红军, 丁春华. 渗流对土质边坡稳定性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(1): 69-72.
- GAO X Y, LIAO H J, DING C H. Seepage effects on soil slope stability[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(1): 69-72.
- [19] 徐东强, 姜芳禄, 赵晓艳, 等. 渗流作用下边坡最危险圆弧滑面的优化解[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 214-217.
- XU D Q, JIANG F L, ZHAO X Y, et al. Accurate solution of most dangerous circle slip surface in seepage soil and rock mass[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(5): 214-217.
- [20] 重庆市建设委员会, 重庆市国土资源和房屋管理局. 重庆市地方规范: 重庆市地质灾害防治工程设计规范(DB50 5029-2004)[S]. 重庆: [s.n.], 2004.
- Chongqing Municipal Commission of Urban-Rural Development, Chongqing Administration of Land, Resources and Housing. The local standard of Chongqing: the geological disasters prevention engineering design standard for Chongqing(DB50 5029-2004)[S]. Chongqing: [s.n.], 2004.
- [21] 周云涛, 唐红梅, 陈洪凯. 三峡水库泄水期间类土质岸坡渗流驱动压剪破坏机制研究[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2016, 33(6): 37-44.
- ZHOU Y T, TANG H M, CHEN H K. Study on tensile and shear failure mechanism of soil bank slope under reservoir filling [J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2016, 33(6): 37-44.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Revised Transfer Coefficient Method of Seepage Stability for Quasi Soil Bank Slope: a Case Study of Liangshuijing Landslide in Three Gorges Reservoir Area

TANG Hongmei¹, ZHOU Yuntao^{2,3}, CHEN Hongkai¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;

2. Technical Center for Geological Hazard Prevention and Control, CGS, Chengdu 611734;

3. Institute of Exploration Technology CAGS, Chengdu 611734, China)

Abstract: [Purposes] It aims to propose the revised transfer coefficient method of bank slope acted by seepage force. [Methods] It analyzed the deficiency of seepage force calculation of the quasi soil bank slope in "Standard", and established the physical model of soil, and proposed the fine seepage force calculation method of the quasi soil bank slope, then revised the transfer coefficient method for the quasi soil bank slope thinking of the seepage force. [Findings] The case of Liangshuijing landslide analysis showed that stability coefficients by the "Standard method" and this paper's method respectively were 1.061 and 1.074; calculation about the seepage force by the "Standard method" was conservative. [Conclusions] Considering the fine seepage force calculation method has the practical engineering significance to larger-scale and super larger-scale bank slope stability calculation.

Key words: seepage force; revised transfer coefficient method; the quasi soil bank slope; Three Gorges reservoir area

(责任编辑 许甲)