

赵川, 付成华, 欧阳朝军, 等. 水位下降对某悬索桥桥基边坡稳定性影响分析[J]. 灾害学, 2016, 31(4): 134–138.
[ZHAO Chuan, FU Chenghua, OUYANG Chaojun, et al. Stability Analysis of a Suspension Bridge Foundation Slope under Drawdown Condition[J]. Journal of Catastrophology, 2016, 31(4): 134–138. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.023.]

水位下降对某悬索桥桥基边坡稳定性影响分析*

赵川^{1,2,3}, 付成华¹, 欧阳朝军^{2,3}, 刘晓辉¹

- (1. 西华大学 能源与动力工程学院, 四川 成都 610039;
2. 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;
3. 中国科学院·水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 悬索桥桥基边坡由锚碇和桥墩构成复杂的结构体系, 其变形特点与天然边坡有很大区别。为深入研究水位下降对桥基边坡稳定性的影响, 以某拟建悬索桥桥基边坡为例, 采用有限元强度折减法计算了锚碇与桥墩耦合作用下水位下降不同高度边坡的位移、塑性点和安全系数变化规律。结果表明: 随着河道水位逐渐下降, 边坡发生主要水平位移的部位也随之下移, 锚碇附近岩体位移受降水前期影响大; 坡体内部塑性点主要分布在锚碇附近, 分布范围随水位降低先增加后减少并最终趋于稳定; 边坡安全系数随水位的下降先减小后增加, 水位下降 40 m 后安全系数稳定在 1.28; 通过分析桥基边坡潜在滑裂面, 确定了锚碇受拉是桥基边坡稳定性大小的控制性因素。计算成果可为大桥修建过程中边坡的稳定性评估提供参考。

关键词: 悬索桥; 水位下降; 锚碇; 位移; 安全系数

中图分类号: TU43; P642; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2016)04-0134-05

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2016.04.023

河道水位下降对涉水边坡的稳定性具有重要影响, 据不完全统计, 大约有 60% 的涉水边坡失稳是由于水位下降造成的。与天然状态的涉水边坡相比, 桥基边坡由于受外部荷载作用和水位变化综合影响, 其稳定性大小影响因素也更加复杂。因此, 研究河道水位下降过程中的桥基边坡的稳定性具有十分重要的现实意义^[1-3]。目前, 国内外学者对水位变化过程中边坡的稳定性大小进行了大量研究。Griffiths 和 Lane^[4-5]将边坡内的浸润线假定为直线, 采用有限元强度折减法分析了稳定渗流条件下的土坝坝坡稳定性大小; 郑颖人等^[6]根据包辛涅斯克(Boussinesq)非稳定渗流微分方程, 通过拉普拉斯正变换和逆变换, 得到了库水位下降时坡体内浸润线的计算公式, 并通过极限平衡法计算了水位下降高度对边坡安全系数的影响; 廖红建等^[7]利用 Geo-Slope 软件中的 Seep 渗流程序计算得到了水位下降期间不同渗透系数下坡体的渗流场, 得到了库区降水速度和渗透系数与边

坡稳定性之间的关系; 年廷凯等^[8]在考虑边坡土体的非饱和-非稳定渗流过程的基础上, 研究了水位下降过程中岸坡的整体稳定性, 发现水位下降速率对高渗透性土坡内孔压的影响显著。

综上所述, 采用极限平衡法和有限元强度折减法对水位下降过程中边坡稳定性的研究已经日趋成熟, 但针对水位下降对锚碇与桥墩耦合作用的桥基边坡影响的研究还很少, 有必要进行深入研究^[9-11]。因此, 本文以某拟建悬索桥桥基边坡为例, 采用有限元强度折减法定量分析水位下降不同高度时边坡的稳定性, 并深入探讨水位下降过程中坡体内位移场和塑性区分布的变化规律。

1 计算方法简介及合理性验证

1.1 有限元强度折减法

强度折减法最早是由 Zienkiewics^[12]在土工弹塑性有限元数值分析中提出的, 此法广泛应用于

* 收稿日期: 2016-02-29 修回日期: 2016-04-26

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAL05B01); 西华大学流体及动力机械教育部重点实验室(重点研究基地)开放课题(szjj2015-039); 西部之光青年学者计划 A 类; 中国科学院科技服务网络计划(STS 计划)(KFJ-EW-ST5-094)

第一作者简介: 赵川(1989-), 男, 四川内江人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程稳定及地质灾害分析。

E-mail: zhaochuanvip@163.com

通讯作者: 付成华(1978-), 女, 湖北襄阳人, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水利水电工程的教学和研究工作。

E-mail: fuchh_xhu@163.com

各类土质和岩质边坡的稳定性分析。强度折减法是指将边坡岩体的真实抗剪强度除以一个折减系数 F 后再进行塑性计算, 并逐渐增加 F 的大小, 直到达到极限破坏状态为止, 此时的折减系数即为边坡的安全系数^[13-15]。其计算公式为:

$$c' = \frac{c}{F}; \quad (1)$$

$$\varphi' = \arctan \frac{\tan \varphi}{F}. \quad (2)$$

式中: c 和 φ 为岩土体真实的黏聚力和内摩擦角; c' 和 φ' 为折减后的黏聚力和内摩擦角。

1.2 合理性验证

为了验证有限元强度折减法在水位下降过程中边坡稳定性计算的合理性, 选取文献[5]、[8]的案例进行说明。验证所采用的边坡模型如图1所示, 其中 $L(-)$ 、 $L(+)$ 是指为以边坡顶平面作为基准, 上、下水位的高度。边坡模型几何尺寸与材料参数如下: 坡高 $H = 10$ m, 坡度为 2:1, 土体黏聚力 10 kPa, 内摩擦角 20° , 变形参数 105 kPa, 泊松比取 0.3, 重度 γ 为 20 kN/m^3 。水位下降的模式与文献相同, 即认为浸润线为折线, 且与边坡水位同步下降。

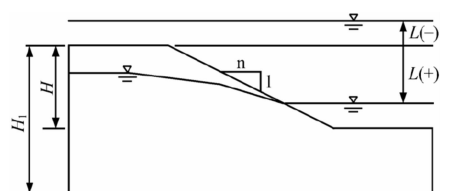


图1 边坡降水模式 [5,8]

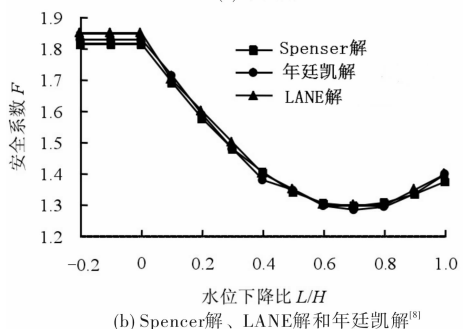
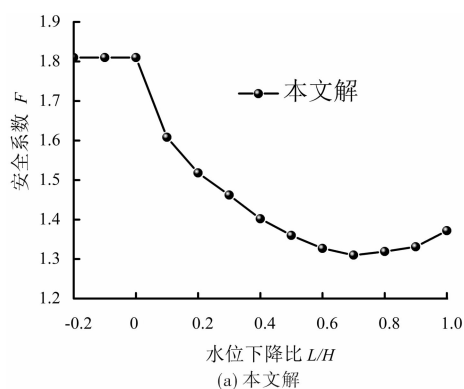


图2 水位不同下降比与边坡安全系数关系曲线

L/H 表示水位下降比, 以 0.1 为间隔 (L 为水位下降高度), 本文计算的相应水位下降比与边坡安全系数关系曲线如图 2a 所示, 图 2b 为 Spencer 解、LANE 解和年廷凯解。分析可知本文计算的边坡安全系数变化规律与文献[5]、[8]的计算结果很接近, 安全系数最小值均在 $L/H = 0.7$ 处取得, 本文计算最小值为 1.31, 年廷凯解为 1.285, LANE 解为 1.30。说明采用有限元强度折减法进行水位下降条件下边坡稳定性分析是可行的。

2 模型建立及计算条件

拟建悬索桥位于四川和云南交界处, 横跨金沙江而设, 为主跨 465 m 双塔单跨吊悬索桥, 下部结构采用双桩柱式桥墩。桥位区表面覆盖坡积层碎石土, 厚 1~5 m, 河道左岸岩体为白云岩, 按风化程度划分为强风化层和中风化层。其中强风化层岩石裂隙发育, 裂面可见黄褐色氧化铁薄膜或斑点, 岩芯呈碎块状、块状, 个别为短柱状, 厚 4.3~10.5 m; 中风化层岩石裂隙一般不发育, 岩芯呈柱状或块状, 最大揭露厚度 36.10 m。

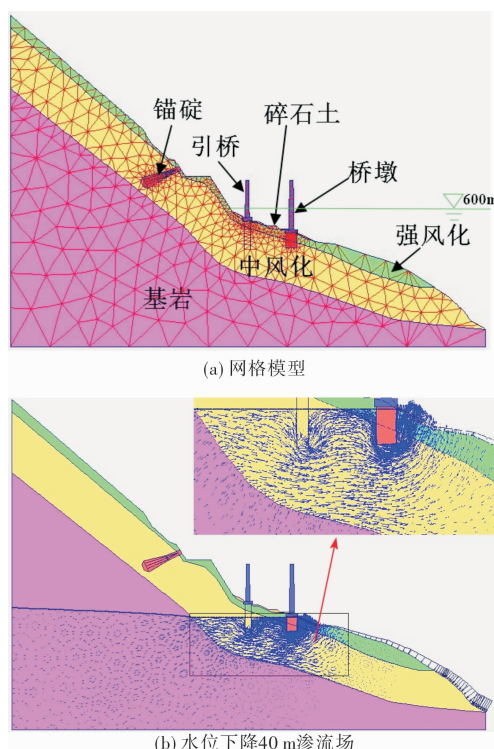


图3 桥基边坡有限元模型

2.1 模型建立

根据相关资料, 并结合数值计算的需求, 对实际边坡进行一定程度地简化, 最终建立的桥基边坡有限元模型长 543 m, 高 380 m。除了天然状态的边坡模型以外, 模型还加入了锚碇、引桥和

表 1 桥基边坡模型有限元力学参数

岩体类别	容重/(kN/m ³)	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	渗透系数/(m/d)	
						k_x	k_y
碎石土	21	0.35	10	29	0.02	0.5	0.5
强风化白云岩	25	0.31	200	31	1.6	3.0×10^{-5}	3.0×10^{-5}
中风化白云岩	26	0.3	350	40	4.5	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}
基岩	27	0.25	1200	45	10	1.0×10^{-9}	1.0×10^{-9}

桥墩, 锚碇位置高程 637.00 m, 引桥墩基础顶面高程 580.00 m, 桥墩基础顶面高程 565.50 m, 并考虑了水位下降的影响, 最高水位高程为 600 m, 网格模型见图 3a, 图 3b 为有限元渗流耦合计算的渗流场, 可以发现渗流场绕过桩基和主桥墩底部, 说明渗流计算的结果是合理的。

2.2 参数选取

根据桥基岩体地质勘测资料, 选取了边坡各类岩体有限元物理力学参数, 见表 1。另外, 在锚碇区施加最大等效拉应力 95 000 kN, 引桥桥台和主桥墩主要受压, 分别施加压力 4 500 kN 和 25 000 kN, 由于弯矩数值相对较小, 对计算结果影响不大, 故在此不考虑弯矩的影响。

2.3 工况设置

河道内最高水位和最低水位高程分别为 600 m 和 510 m, 落差达 90 m, 而降水初期水面位于锚碇与桥墩之间, 距离锚碇和桥墩位置很近, 对锚碇和桥墩区域影响相对更大, 降水后期影响则更小。故在设置降水梯度时, 设置初期降水相对密集, 最终设置降水高度分别为 10 m、20 m、30 m、40 m、60 m 和 90 m。由于本文研究重点是水位下降高度对桥基边坡稳定性的影响, 故设置降水速率为定值 1 m/d。

3 计算结果及分析

3.1 水位下降对桥基边坡位移影响

为了研究水位下降过程中边坡位移场的变化规律, 图 4 给出了水位不同下降高度时边坡岩体的水平增量位移。所谓“增量位移”: 是指仅相对于上一个阶段发生的位移, 例如图 4 b 表示的是: 水位下降 10 m 到下降 20 m 时发生的水平位移, 是指以下降 10 m 为基准, 将已经产生的位移清零, 水位再次下降 10 m 而造成的水平方向位移, 以此类推。规定水平位移以顺坡向位移为正(向右), 逆坡向位移为负(向左), 由于篇幅限制, 仅给出水位下降不同高度的水平增量位移。

分析可知, 随着河道内水位的逐渐降低, 边坡内部岩体将发生不同程度的水平位移。图 4 a 表示了水位下降 10 m 时边坡发生的水平位移, 可以发现, 水面从最高水位降低 10 m 后, 边坡锚碇区域附近发生的水平位移集中, 最大值为 0.119 mm, 方向水平向右。距离锚碇越远, 发生的位移也越小, 其中引桥部位发生的位移很小, 桥墩顶部位置相对大一些。

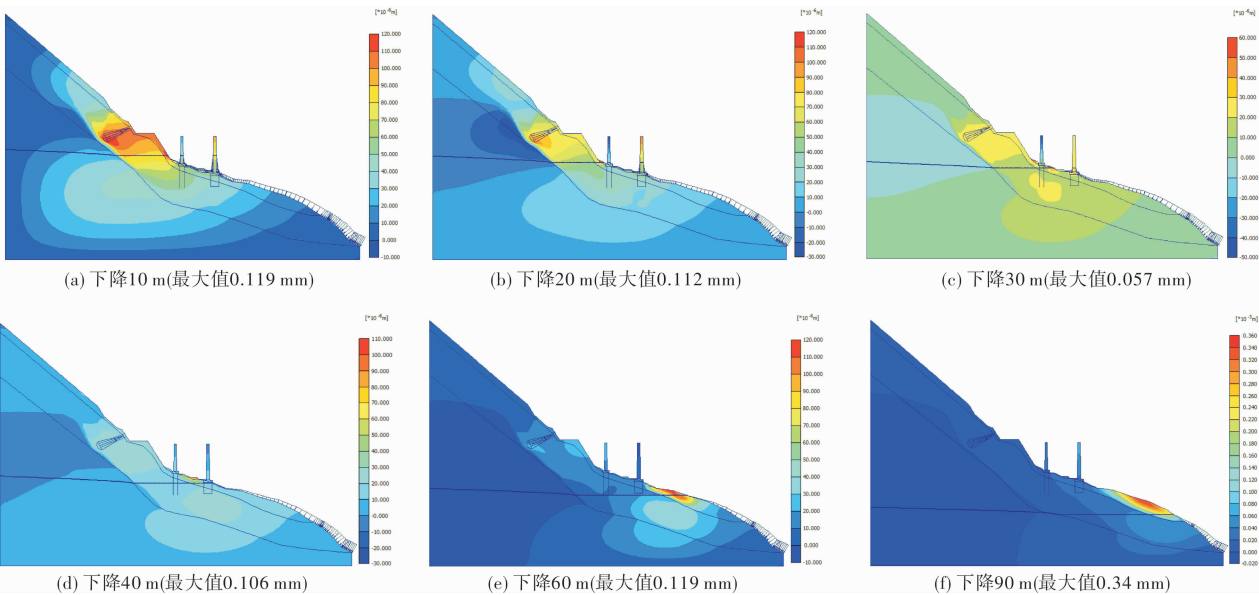


图 4 水位不同下降高度边坡水平位移增量

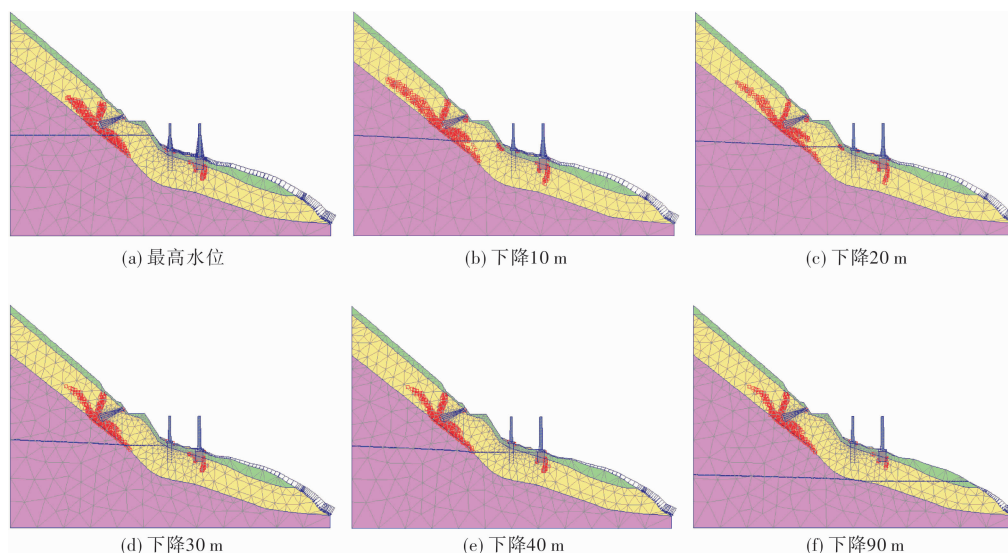


图5 水位不同下降高度边坡塑性点分布

随着河道水位的进一步降低, 边坡岩体发生的位移集中区逐渐随着水位的降低而下降, 如图4c和图4d为水位下降30 m和40 m时发生的位移, 此时发生水平位移的集中区域位于引桥和桥墩附近的表层碎石土, 最大值分别为0.057 mm和0.106 mm, 而锚碇区域内岩体产生的位移很小, 说明此时水位下降对锚碇区的影响已经减小。图4f为水面降低到最低水位时发生的水平方向位移(30 m落差), 此降水阶段内水面已经逐渐远离桥基区域, 距离锚碇更远。发生位移的区域也下降, 位于最低水面表层的强风化岩体, 此阶段内发生最大的水平位移为0.34 mm, 方向向右。

3.2 水位下降对桥基边坡塑性区影响

为进一步分析水位下降过程中, 桥基边坡内部岩体塑性区的变化规律, 图5给出了各降水阶段内边坡内部塑性点的分布情况。分析可知, 在最高水位时, 坡体内部塑性点主要分布在锚碇末端附近岩体, 并分别沿中风化层和基岩界面向上部 and 下部扩展, 且在与锚碇夹角约 60° 位置形成贯通的拉断破坏, 见图5a。另外, 在引桥和桥墩底部分布有少量塑性点, 对边坡的稳定性影响不大。

当水位开始下降, 如图5b为下降10 m时坡体塑性点分布, 此时, 沿中风化层和基岩界面的塑性点分布范围增加明显, 向上部和下部岩体扩张, 不利于边坡的整体稳定。之后, 随着水位的进一

步降低, 坡内塑性点分布范围逐渐减小, 并最终趋于稳定。

针对上述水位降低对坡体内部塑性点分布的分析可以发现: 锚碇区岩体塑性点集中分布, 分布范围随着水位的降低呈现先增加后减少并最终趋于稳定的变化趋势, 表明水位下降过程中桥基边坡存在一个最危险水位, 此时边坡的稳定性最差。

3.3 水位下降对桥基边坡稳定安全系数影响

为确定水位下降过程中桥基边坡存在的最危险水位, 采用强度折减法计算得到了水位下降过程中边坡的安全系数, 见表2所示。

表2 水位下降不同高度边坡安全系数

水位降低高度/m	0	10	20	30	40	60	90
安全系数	1.31	1.23	1.26	1.27	1.28	1.28	1.28

分析可知, 左岸边坡最小安全系数发生在水位下降10 m左右位置, 此时安全系数仅有1.23, 原因是水位下降初期距离最危险的锚碇区最近, 加上降水区边坡的坡度较陡, 所以降水初期对边坡安全系数影响最大; 之后, 随着水位的进一步下降, 安全系数有所增加, 最终在降低40 m时边坡安全系数为1.28, 之后不再变化。这与上述边坡内部塑性点分析结论相同, 即降水初期边坡的稳定最差。

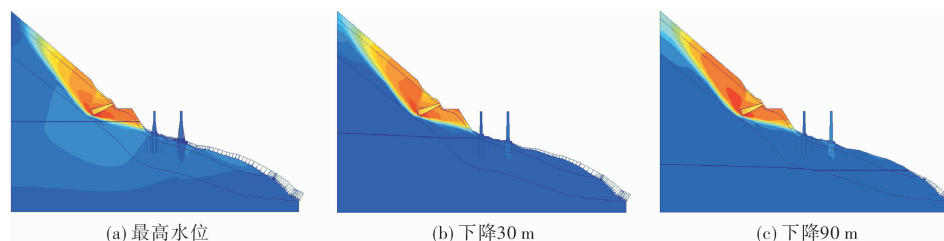


图6 水位下降不同高度边坡内部潜在滑裂面

通过上述分析可知:随着水位的降低,左岸边坡稳定安全系数先减小,后增加,最后趋于稳定。这是因为河水的静水压力反向垂直作用于坡面,坡面越陡,静水压力水平方向的分力也越大,这有利于边坡的稳定。左岸边坡降水初始阶段涉及的边坡坡度很陡,造成了边坡安全系数明显减小,而降水后期,随着孔隙水压力的消散,有效应力逐渐增加,边坡安全系数也有所增加,最终趋于稳定,但低于最初的 1.31。

由图 6 水位降低不同高度时边坡的潜在滑裂面分布可见,无论水位降低多少,左岸边坡的滑裂面均相同:起于坡顶,终止于引桥桥墩上部位置,内部与中风化与基岩交界面相切,且在锚碇位置形成贯通的拉断破坏区,说明锚碇受拉是左岸边坡的稳定性的控制性因素。

4 结论

基于有限元强度折减法,在考虑锚碇与桥墩耦合作用的基础上,定量分析了水位下降对某桥基边坡的位移、塑性区和安全系数变化规律,得到以下结论:

(1) 锚碇区岩体在水位下降初期发生较大水平位移,随着水位的降低,受影响程度也越来越小;发生位移的部位主要位于水面附近岩体。

(2) 塑性点主要分布在锚碇区内部岩体附近,分布范围随着水位的下降呈现先增加后减少并最终趋于稳定的变化趋势。

(3) 锚碇受拉是悬索桥桥基边坡稳定性的控制性因素。边坡安全系数随着水位的降低呈先减小后增加的变化趋势,并最后稳定在 1.28。水位下降 10 m 时安全系数最小,仅有 1.23,应重视降水初期桥基边坡的稳定性。

参考文献:

- [1] 时卫民,郑颖人. 库水位下降情况下滑坡的稳定性分析[J]. 水利学报, 2004(3): 67-71.
- [2] 周火明,吴万平,黄正加,等. 西南某桥基边坡稳定性及加固措施研究[J]. 长江科学院院报, 2009, 26(1): 33-37.
- [3] 师华鹏,余宏明,陈鹏宇. 极端灾害天气下临河岩质边坡的倾覆稳定性分析[J]. 灾害学, 2016, 31(2): 176-181.
- [4] Griffiths D V, Lane P A. Slope stability analysis by finite elements[J]. Geotechnique, 1999, 49(3): 387-403.
- [5] Lane P A, Griffiths D V. Assessment of stability of slopes under drawdown conditions[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, 2000, 126(5): 443-450.
- [6] 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.
- [7] 廖红建,盛谦,高石夯,等. 库水位下降对滑坡体稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(19): 3454-3458.
- [8] 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.
- [9] 胡松山,童申家,刘斌清,等. 基于非均质边坡强度折减法的三维桥基边坡稳定性分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(S2): 653-661.
- [10] Stianson J R, Fredlund D G, Chand. Three-dimensional slope stability based on stresses from a stress-deformation analysis[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 48(6): 891-904.
- [11] 李秀珍,何思明. 基于 Mein-Larson 入渗模型的浅层降雨滑坡稳定性研究[J]. 灾害学, 2015, 30(2): 16-20.
- [12] Zienkiewicz O C, Humpheson C, Lewis R W. Associated and non-associated visco-plasticity and Plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique, 1975, 25(4): 671-689.
- [13] 赵川,付成华,何欢,等. 锦屏水电站缆机平台高陡边坡开挖支护数值模拟[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(8): 94-98.
- [14] 郑颖人,陈祖煜,王恭先,等. 边坡与滑坡工程治理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [15] 郑颖人,赵尚毅,张鲁渝. 用有限元强度折减法进行边坡稳定分析[J]. 中国工程科学, 2002, 4(10): 57-62.

Stability Analysis of a Suspension Bridge Foundation Slope under Drawdown Condition

ZHAO Chuan^{1,2,3}, FU Chenghua¹, OUYANG Chaojun^{2,3}, LIU Xiaohui¹

(1. School of Energy and Power Engineering of Xihua University, Chengdu 610039, China;

2. Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Process, CAS, Chengdu 610041, China;

3. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China)

Abstract: Suspension bridge foundation slope is a complex structure system with anchor and pier, the deformation characteristics are very different from the natural slope. For further study of the stability of the bridge foundation slope under drawdown condition, a proposed suspension bridge foundation slope is simulated by finite element strength reduction method to analyze the slope displacement, plastic zones and safety coefficient when the anchorage and pier coupling. The results show that with the water level decreasing gradually, the position of main horizontal displacement section of slope is also decreased, and the displacement over anchorage is affected by early drawdown seriously; the plastic points mainly of slope is distributed in the vicinity of the anchorage, ranges increasing firstly and then decrease and finally tends to be stable along with the drawdown; the slope safety coefficient decreases firstly and then increases, stable at 1.28 after the level decreases 40m; and anchor tension is the key factor of the bridge foundation slope stability by analysis of potential slipping surface. The conclusions can provide some reference for the stability evaluation of the slope during the bridge construction.

Key words: suspension bridge; drawdown; anchorage; displacement; safety factor