

文章编号: 1674—8247(2019)06—0030—05
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2019.06.006

考虑滑带强度分区的基覆式滑坡抗滑桩设计推力算法

闫玉平 肖世国

(西南交通大学, 成都 610031)

摘 要:为了在抗滑桩设计中充分考虑坡体滑带上各点所处的峰值与残余抗剪强度状态的差异性,针对基岩—覆盖层式滑坡,文章将数值模拟与极限平衡法相结合,基于弹塑性有限元分析法获得抗滑桩加固后坡体的应力场,根据滑带土一点剪应力与抗剪强度大小关系,同时考虑滑带土的峰值强度和残余强度,采用不平衡推力法进行边坡稳定性分析。最终提出了与设计安全系数相对应的滑带土强度状态的分区方法和滑带土抗剪强度参数分区段取不同值的桩上设计推力的计算方法。通过对实例进行分析,结果表明本文算法得到的桩后剩余推力值与考虑残余强度的既有方法较为接近,二者的桩前剩余抗力差异较显著,本文算法得出的桩上设计推力值相对偏大。

关键词:基覆式;滑坡;抗滑桩;推力;滑带强度;不平衡推力法

中图分类号:P642.23 文献标志码:A

30

Calculation Method for Design Thrust Force on Anti-slide Pile for Bedrock-covered Landslide Considering Strength Partition of Landslide Zone

YAN Yuping XIAO Shiguo

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to fully consider the difference between the peak values and between the residual shear strengths of each point on the landslide zone in the design of the anti-slide pile, aiming at the bedrock-covered landslide, this paper combines the numerical simulation with the limit equilibrium method, and obtains the stress field of the slope reinforced by anti-slide pile based on the elastic-plastic finite element analysis method. According to the relationship between the shear stress and the shear strength of a point on the landslide zone and the peak strength and residual strength of the soil in the landslide zone, the slope stability is analyzed by unbalanced thrust method. This paper put forwards the partition method of the strength state of the landslide zone soil corresponding to the design safety factor and the calculation method of the design thrust on the pile with different values of the shear strength parameters of the landslide zone soil. Through the analysis of an example, the results show that the residual thrust value after the pile obtained by calculation method in the paper is close to that by the existing method considering the residual strength, and the difference between residual resistances in front of anti-slide pile obtained by the two calculation methods is significant. The design thrust value on the pile obtained by calculation method in the paper is relatively larger than that obtained by the existing method.

Key words: bedrock-covered; landslide; anti-slide pile; thrust force; strength of landslide belt; imbalanced thrust force method

收稿日期:2019-08-08

作者简介:闫玉平(1989-),男,在读博士研究生。

基金项目:国家自然科学基金项目(51578466)

引文格式:闫玉平,肖世国.考虑滑带强度分区的基覆式滑坡抗滑桩设计推力算法[J].高速铁路技术,2019,10(6):30-34.

YAN Yuping, XIAO Shiguo. Calculation Method for Design Thrust Force on Anti-slide Pile for Bedrock-covered Landslide Considering Strength Partition of Landslide Zone [J]. High Speed Railway Technology, 2019, 10(6): 30-34.

抗滑桩由于其抗滑性能的可靠性与施工便捷性在滑坡治理中被广泛使用,桩上滑坡推力的合理确定是抗滑桩工程设计的重要环节之一^[1-2]。基岩上覆堆积体式滑坡(以下简称基覆式滑坡)广泛分布于我国西部地区^[3],该类滑坡基覆界面(潜在滑带)表现出应变软化的特性,即界面不同位置抗剪强度不同步发挥,相应的抗剪强度参数存在差异^[4]。这必然影响边坡的稳定性^[5-11]和桩上的设计滑坡推力。以往求解桩上滑坡推力的主要方法为:①将滑体假设为刚塑性体,基于极限平衡理论计算滑坡剩余推力^[12-16];②利用数值模拟方法,采用强度折减技术计算设计滑坡推力^[17-19]。这些方法均未涉及滑带土应变软化效应。

范志强^[20]等人基于传统的不平衡推力法,在条块间引入简单的应变协调方程反映滑带土体的应变软化效应,以此计算设计滑坡推力。其提出的简化应变软化方法可在一定程度上考虑滑带土应变软化效应,但也存在两个问题:①该法假定滑带各点处厚度相同,在对滑带分区时,分区点一般位于滑面折点处,不完全符合实际,且不适于直线型滑面的滑坡;②该法对滑带土应力应变关系曲线依赖性极高,且对一些关键参数,如: γ_r (残余抗剪强度对应的剪应变)、 γ_p (峰值抗剪强度对应的剪应变)等极为敏感,而这些参数值的获取却具有较大的不确定性。

本文采用数值模拟与极限平衡分析相结合的方法,以抗滑桩加固滑坡为分析模型,基于弹塑性有限元法获得加固坡体的应力场,利用摩尔-库仑强度准则

判断滑带不同位置的应力状态,进而对滑带抗剪强度参数进行分区,并结合不平衡推力法,求解桩上设计滑坡推力。

1 分析原理

1.1 滑带土应变软化机理

滑带土的应变软化曲线一般模式^[21],如图1(a)所示,在滑带土剪切变形(剪应变为 γ)过程中,当滑带上某点的剪应力 τ 达到其峰值抗剪强度 τ_p (相应剪应变为 γ_p)时,该点发生破坏;随着剪切变形发展($\gamma > \gamma_p$),该点土体的抗剪强度逐渐降低,直至达到残余抗剪强度 τ_r (相应剪应变为 γ_r);随着剪切变形进一步增大($\gamma > \gamma_r$),土体抗剪强度保持为 τ_r 不变。因此,在整个滑带上,土体可能处于三种强度状态:峰值强度及其以前的状态(简称峰前状态)、残余强度状态(简称残余状态)以及介于二者之间的过渡强度状态(简称过渡状态)。

根据库仑强度理论,土体抗剪强度可分为与内摩擦角 φ 有关的分量(简称为内摩擦分量)和与粘聚力 c 有关的分量(简称为粘聚力分量)。因此,土体应变软化效应可进一步用图1(b)解释,即土体之所以出现软化是由内摩擦角和粘聚力弱化造成的。在图1(b)中, γ_p 对应土体的峰值粘聚力 c_p 和内摩擦角 φ_p ; γ_r 对应土体的残余粘聚力 c_r 和内摩擦角 φ_r 。由此,针对滑带土体峰前、过渡和残余状态阶段,土体强度参数分别对应取峰值、过渡和残余值。

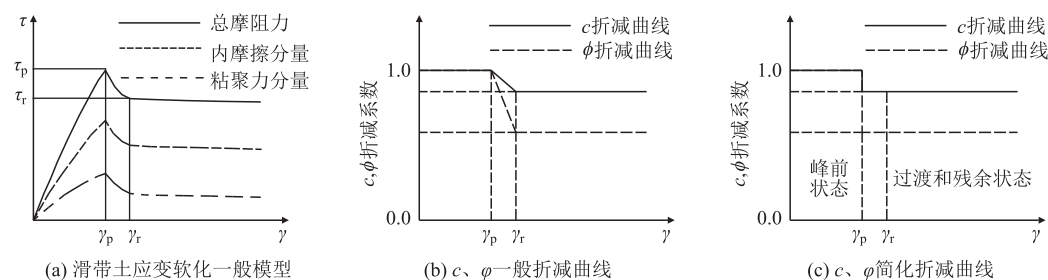


图1 滑带土应变软化模型

大量土体应变软化试验表明^[21],土体达到峰值抗剪强度状态后,只需很小的剪应变增量,便会跌落到残余抗剪强度状态,即滑带土处于过渡状态时相应的剪应变增量很小。因此,本文简化处理偏保守,滑带土强度参数随剪应变变化关系如图1(c)所示,即峰前状态取峰值强度参数值,过渡和残余状态统一取残余强度参数值。

1.2 滑带土强度状态分区方法

由于滑带上各点的抗剪强度与该点的应力水平密

切相关,因此,合理确定抗滑桩加固后坡体的应力场是正确判断滑带上各点所处强度状态的前提。可运用有限元法分析,以加固后坡体为分析模型,采用理想弹塑性本构模型、摩尔-库仑强度准则和非关联流动法则模拟边坡岩土体,桩采用弹性本构模型,以此获得加固坡体应力场。在此基础上,对滑面上的任一点C(第j条底面中点,如图2所示),根据静力平衡对微元体应力变换,可得该点沿滑面的法向与切向应力 $\sigma_{\alpha j}$ 、 $\tau_{\alpha j}$ 分别为:

$$\sigma_{\alpha j} = \frac{\sigma_{xj} + \sigma_{yj}}{2} \cos 2\alpha + \frac{\sigma_{xj} - \sigma_{yj}}{2} \sin 2\alpha - \tau_{xyj} \sin 2\alpha \quad (1)$$

$$\tau_{\alpha j} = \frac{\sigma_{xj} - \sigma_{yj}}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xyj} \cos 2\alpha \quad (2)$$

式中: α ——C点处滑面切向与竖向夹角,其变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。

进而根据库仑强度定理,可得该点的峰值抗剪强度 τ_{pj} 为:

$$\tau_{pj} = \sigma_{\alpha j} \tan \varphi_{pj} + c_{pj} \quad (3)$$

式中: φ_{pj} 、 c_{pj} ——分别为C点处滑面的峰值内摩擦角和峰值粘聚力。

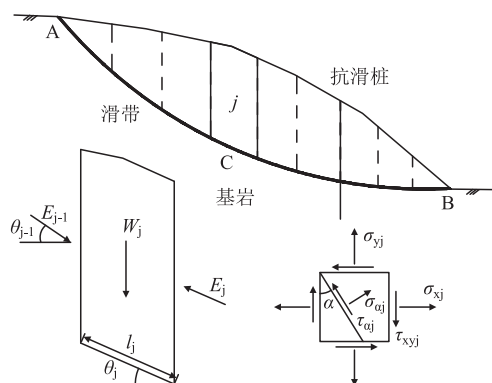


图2 抗滑桩加固基覆式滑坡滑带分区计算模型

令无量纲参数 $\beta = \tau_{\alpha j} / \tau_{pj}$,采取如下步骤对滑带土所处强度状态进行分区。

(1)在给定的加固边坡稳定性设计安全系数 F_s 条件下,滑带土取峰值强度参数,并采用强度折减方法,判断 $1 - \beta$ 最小值所在的条块 i ;

(2)在条块 i 以上(后缘)的各条块,因其沿滑面方向位移大于第 i 块,均接近或达到破坏状态,按残余强度参数取值;在条块 i 以下(前缘)的各条块,其沿滑面方向位移小于第 i 块,均处于非破坏状态(峰前状态),因此按峰值强度参数取值;

(3)利用传递系数法^[3]得到坡体稳定系数计算值 F_{sc} 。

$$E_i = W_i \sin \theta_i - W_i \cos \theta_i \frac{\tan \varphi_i}{F_{sc}} - l_i \frac{c_i}{F_{sc}} + \psi_i E_{i-1} \quad (4)$$

$$\psi_i = \cos(\theta_{i-1} - \theta_i) - \sin(\theta_{i-1} - \theta_i) \frac{\tan \varphi_i}{F_{sc}} \quad (5)$$

式中: E_i 、 E_{i-1} 、 θ_i 、 θ_{i-1} ——分别为第 i 、 $i-1$ 条块的剩余下滑力与滑面倾角;

W_i 、 l_i 、 c_i 、 φ_i ——第 i 条块的自重、滑面长度、滑面

粘聚力和内摩擦角;

ψ_i ——第 $i-1$ 与 i 条块间剩余下滑力传递系数。

1.3 桩上设计滑坡推力计算

在分区结果的基础上,根据前述各区段滑带抗剪强度参数取值原则,按照不平衡推力法(如式(4)所示),可求得桩后设计滑坡推力曲线,其一般示意如图3所示。对于桩前坡体抗力设计值,可在同样设计安全系数下仍根据前述分区结果采用不平衡推力法得到(即剩余抗滑力)。于是,桩上设计滑坡推力值即为桩后设计推力减去桩前设计抗力,如图3中ED段所示。

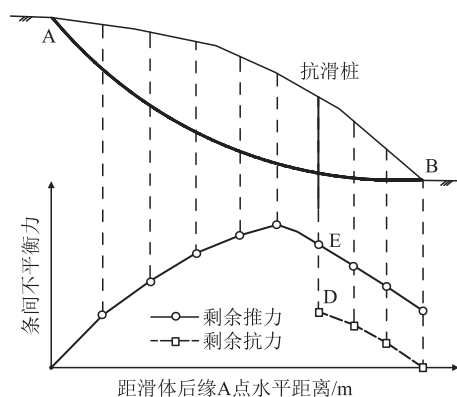


图3 抗滑桩设计推力计算图

2 实例分析

2.1 实例一

边坡位于四川境内宝成铁路沿线,该潜在滑坡下伏中风化砂岩,上覆块石土堆积体。坡体主要物理力学参数如表1所示,设计安全系数取1.3。

表1 实例一坡体主要物理力学参数表

地层	重度 /(kN/m ³)	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	弹性模量 /MPa	泊松比
块石土	22	16 (11.9)	22.6 (19.8)	50	0.33
中风化砂岩	23	500	38	600	0.22

注:括号内为残余值

采用FLAC3D获得抗滑桩加固后的坡体应力场。根据强度分区方法,将滑带分区结果用不同线型示于图4中。在滑带分界点P点以后(坡体后缘一侧) $\beta = 1$,说明该区段滑带处于破坏状态;P点以前(坡体前缘一侧) $\beta < 1$,说明该区段滑带处于峰前状态。基于此分区结果及前述强度参数取值原则,采用不平衡推力法(传递系数法)计算得到该自然边坡稳定系数为1.057。在设计安全系数取为1.30时,桩后剩余推力与桩前剩余抗力曲线如图4所示,从而得到桩上设计推力值为2 887.2 kN/m。

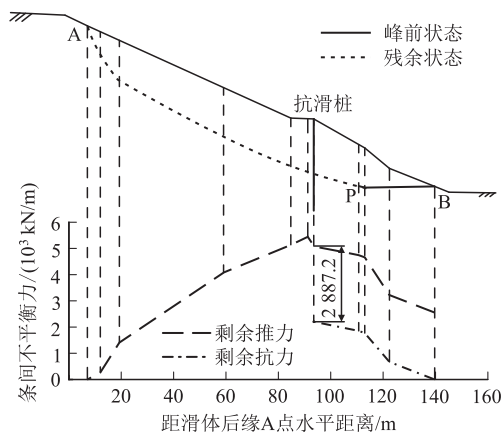


图4 实例一加固边坡滑带分区及桩上设计推力结果

2.2 实例二

边坡位于遵义市正安县庙塘镇半边街,潜在滑坡下伏中风化粉砂岩,上覆碎石土堆积体。坡体主要物理力学参数如表2所示,设计安全系数为1.3。

表2 实例二坡体主要物理力学参数表

地层	重度 /(kN/m ³)	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	弹性模量 /MPa	泊松比
碎石土	20.5	7.3 (2.8)	12.9 (12.9)	40	0.33
中风化粉砂岩	21.9	420	34	550	0.25

注:括号内为残余值

采用前述方法得到滑带分区结果如图5所示。滑带AQ段为残余状态段,BQ段则处于峰前状态。采用传递系数法计算得到该自然边坡稳定系数为1.041。在设计安全系数为1.3时,桩后剩余推力与桩前剩余抗力曲线如图5所示,从而得到此时桩上设计推力值为840.6 kN/m。

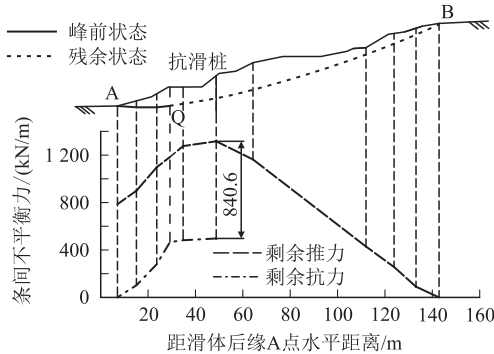


图5 实例二加桩后滑带分区以及抗滑桩设计推力计算结果

3 滑带土参数取值方法对桩体受力影响

以实例一、实例二为例,进一步说明不同的滑带土强度参数取值方法(包括强度分区方法、简化应变软

化方法、滑带均取峰值参数法、滑带均取残余参数法)对桩上设计推力的影响。

实例一、实例二采用4种不同强度参数取值方法的桩后剩余推力与桩前剩余抗力曲线如图6、图7所示。从图中可以看出:强度分区方法与简化应变软化方法和残余参数法的桩后剩余推力值较为接近,其计算值分别约大于峰值强度法的40%(实例一)和35%(实例二);但对于桩前剩余抗力,强度分区方法与其余3种方法有明显差异,其计算值介于其余3种方法之间,分别约小于峰值强度法的14%(实例一)和13%(实例二)。

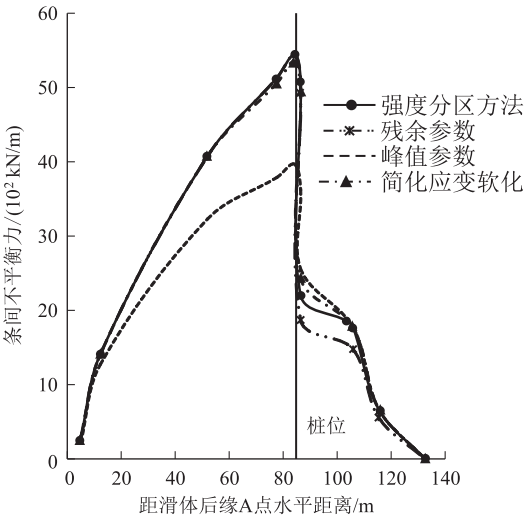


图6 实例一不同参数取值方法的设计推力曲线

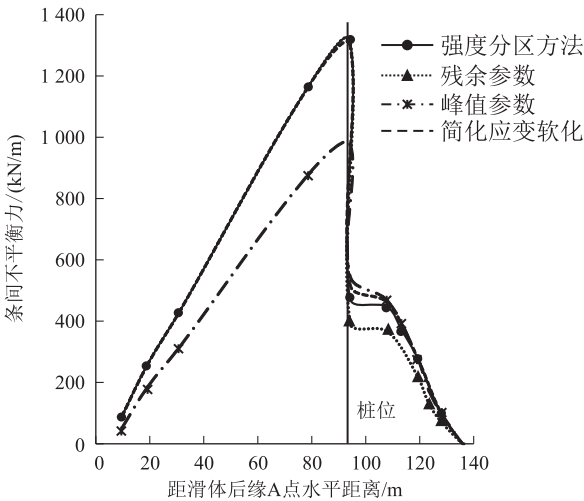


图7 实例二不同参数取值方法的设计推力曲线

实例一、实例二采用4种不同强度参数取值方法得到的抗滑桩设计推力值计算结果(设计安全系数均为1.3)如表4所示。从表4可以看出,强度分区方法计算值比简化应变软化方法分别偏大14.9%(实例

一)和7.3%(实例二),但这两种改进方法的计算值均介于峰值参数法和残余参数法之间,且相对接近于残余参数法。

表4 桩上设计推力的4种方法计算结果(kN/m)

实例	峰值参数	强度分区方法	简化应变软化方法	残余参数
实例一	1 067	2 887.2	2 512.3	3 221.2
实例二	431.2	840.6	783.6	920.6

4 结论

本文采用数值模拟与极限平衡相结合的方法,以抗滑桩加固边坡为分析模型,基于弹塑性有限元分析法获得的坡体应力场,给出了滑带抗剪强度参数分区取值方法,进而采用传递系数法计算桩上设计滑坡推力。主要得到如下结论:

(1)根据滑带上任一点处剪应力与抗剪强度大小关系,同时考虑滑带土的峰值强度和残余强度,基于不平衡推力法(传递系数法)进行边坡稳定性分析,确定与设计安全系数相对应的滑带土强度状态的分区方法。

(2)基于滑带强度分区方法与不平衡推力法,可分别计算出在给定设计安全系数下的桩后剩余推力和桩前剩余抗力,从而确定出抗滑桩上的设计推力值。

(3)实例分析表明,强度分区方法得到的桩后剩余推力值与简化应变软化方法较为接近,而桩前剩余抗力则差异明显。强度分区方法的桩上设计推力值比简化应变软化方法偏保守,但二者均相对接近于残余参数法。

参考文献:

[1] 铁道部第二勘测设计院. 抗滑桩设计与计算[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983.
The Second Survey and Design Institute of Ministry of Railways. Design and Calculation of Stabilizing Piles [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1983.

[2] 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.
ZHENG Yingren, CHEN Zuyu, WANG Gongxian, et al. Engineering Treatment of Slope & Landslide [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.

[3] 徐邦栋. 滑坡分析与防治[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2001.
XU Bangdong. Landslide Analysis and Prevention [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2001.

[4] 邹宗兴,唐辉明,熊承仁,等. 大型顺层岩质滑坡渐进破坏地质力学模型与稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2222-2231.
ZOU Zongxing, TANG Huiming, XIONG Chengren, et al.

Geomechanical Model of Progressive Failure for Large Consequent Bedding Rockslide and Its Stability Analysis [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (11): 2222-2231.

[5] LAW K T, LUMB P. A Limit Equilibrium Analysis of Progressive Failure in the Stability of Slopes [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15 (1): 113-122.

[6] Yamagami T, Takimazaka Z, Jiang J. Progressive failure analysis of slopes based on LEM [C]//Performance and Evaluation of Soil Slopes under Earthquake and Rainstorm. Dalian: [s. n.], 1998: 35-48.

[7] MIAO Tiande, MA Chongwu, WU Shengzhi. Evolution Model of Progressive Failure of Landslides [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, 125 (10): 827-831.

[8] 张嘎,张建民. 基于瑞典条分法的应变软化边坡稳定性评价方法[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 12-16.
ZHANG Ga, ZHANG Jianmin. Stability Evaluation of Strain-softening Slope Based on Swedish Slice Method [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (1): 12-16.

[9] 沈华章,王水林,郭明伟,等. 应变软化边坡渐进破坏及其稳定性初步研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(1): 175-184.
SHEN Huazhang, WANG Shuilin, GUO Mingwei, et al. A Preliminary Study of the Progressive Failure and Stability of Slope with Strain-softening Behavior [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(1): 175-184.

[10] TRONCONE A. Numerical Analysis of a Landslide in Soils with Strain-softening Behavior [J]. Géotechnique, 2005, 55 (8): 585-596.

[11] POTTS D M, DOUNIAS G T, VAUGHAN P R. Finite Element Analysis of Progressive Failure of Carsington Embankment [J]. Géotechnique, 1990, 40 (1): 79-101.

[12] 戴自航. 抗滑桩滑坡推力和桩前滑体抗力分布规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 517-521.
DAI Zihang. Study on Distribution Laws of Landslide Thrust and Resistance of Sliding Mass Acting on Antislides Piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21 (4): 517-521.

[13] 王亮清,唐辉明,胡新丽,等. 剩余下滑力曲线在水库滑坡抗滑桩设计中的应用[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 2019-2022.
WANG Liangqing, TANG Huiming, HU Xinli, et al. Application of Residual Pushing Force Curve to Reservoir Landslide Anti-slide Pile Design [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26 (12): 2019-2022.

[14] 程建军,廖小平,王浩,等. 滑坡推力计算方法的对比研究与应用[J]. 水文地质工程地质, 2008, 35(1): 44-48.
CHENG Jianjun, LIAO Xiaoping, WANG Hao, et al. Comparative Research and Application of Landslide Thrust Calculation Methods [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008, 35 (1): 44-48.

[15] 和海芳,祁生文,伍法权,等. 抗滑桩设计推力计算方法研究[J]. 工程地质学报, 2008, 16(5): 694-698.
HE Haifang, QI Shengwen, WU Faquan, et al. Calculation Method of Designed Thrust for Anti-slide Pile [J]. Journal of Engineering Geology, 2008, 16 (5): 694-698.

LIU Yanqiong. Research on Application of Intelligent Fault Diagnosis Algorithm of ZPW-2000A Track Circuit [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2014, 11(1): 29 – 32.

[3] 李冠楠, 燕翔. 简谈客专 ZPW-2000A 轨道电路故障诊断技术的发展[J]. 铁路通信信号工程技术, 2016, 13(2): 93 – 96.

LI Guannan, YAN Xiang. Development of Fault Diagnosis Technology for ZP-2000A Track Circuit [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2016, 13(2): 93 – 96.

[4] 公续刚. 客专 ZPW-2000A 移频信号传输仿真与故障诊断研究 [D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2015.

GONG Xugang. Research on Frequency Shift Signal Transmission Simulation and Fault Diagnosis for Passenger Dedicated Line ZPW-2000A [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2015.

[5] 王婷. ZPW-2000A 无绝缘轨道电路故障预测研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

WANG Ting. Research on Fault Prediction for ZPW-2000A Railway Jointless Track Circuits [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

[6] 韦凤结, 韦玉梅. 运用监测系统分析处理客专 ZPW-2000A 轨道电路故障[J]. 铁路通信信号工程技术, 2015, 12(2): 73 – 75.

WEI Fengjie, WEI Yumei. Troubleshooting of ZPW-2000A Track Circuit by Monitoring System [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2015, 12(2): 73 – 75.

[7] 王秋实. ZPW-2000A 型无绝缘移频轨道电路智能故障诊断方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

WANG Qiushi. Research on Intelligent Fault Diagnosis for ZPW-2000A Track Circuits [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

[8] 马建忠. 浅谈快速处理 ZPW – 2000A 自闭区段电码化故障[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(3): 20 – 23.

MA Jianzhong. Discussion on Processing Coding Faults Occurring in ZPW – 2000A Automatic Block Section [J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(3): 20 – 23.

(编辑:车晓娟 张红英)

(上接第 34 页)

[16] 胡明军, 刘光华, 黄霞. 剩余下滑力曲线在滑坡治理设计中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(S1): 587 – 589.

HU Mingjun, LIU Guanghua, HUANG Xia. Application of Residual Pushing Force Curve in Landslide Treatment Design [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30 (S1): 587 – 589.

[17] 郑颖人, 雷文杰, 赵尚毅, 等. 抗滑桩设计中的两个问题[J]. 公路交通科技, 2005, 22(S1): 45 – 51.

ZHENG Yingren, LEI Wenjie, ZHAO Shangyi, et al. Two Problems in Design Methods of Anti-slide Piles [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (S1): 45 – 51.

[18] 杨波, 郑颖人, 赵尚毅, 等. 双排抗滑桩在三种典型滑坡的计算与受力规律分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(S1): 237 – 244.

YANG Bo, ZHENG Yingren, ZHAO Shangyi, et al. Two-row Anti-slide Piles in Three Kinds of Typical Landslide Computations and Stress Rule Analysis [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 237 – 244.

[19] 唐芬, 郑颖人, 杨波. 双排抗滑桩的推力分担及优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(S1): 3162 – 3168.

TANG Fen, ZHENG Yingren, YANG Bo. Thrust to Share and Optimization Design for Two-row Anti-slide Piles [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29 (S1): 3162 – 3168.

[20] 范志强, 唐辉明, 汪丁建, 等. 考虑土体应变软化特性的滑坡抗滑桩设计推力研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(S2): 665 – 672.

FAN Zhiqiang, TANG Huiming, WANG Dingjian, et al. A Method for Designed Thrust of Anti-slide Pile Considering Strain Softening Properties of Soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37 (S2): 665 – 672.

[21] SKEMPTON A W. Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and the Laboratory [J]. Géotechnique, 1985, 35 (1): 3 – 18.

(编辑:赵立红 白雪)