

三维矢量和方法在桥址岸坡稳定性分析中的应用

高国红¹, 梁栋才^{2,3}, 李 春⁴, 宋桂锋¹, 沈孟龙¹

(1. 云南交投集团投资有限公司, 云南 昆明 650028;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

3. 中国科学院大学, 北京 100000; 4. 云南玉临高速公路建设有限责任公司, 云南 临沧 677000)

摘 要: 矢量和安全系数法物理意义明晰, 是评价边坡稳定性的一种重要工具。以某顺层桥址岸坡为例, 考虑凝灰岩软弱夹层和卸荷裂隙的不利组合, 通过极限平衡方法得到了岸坡的最危险滑面。建立了考虑主要地层分布三维地质力学模型, 通过三维矢量和分析方法对不利滑面进行分析, 运用潘家铮最大最小原理确定三维矢量和安全系数的计算方向, 对桥址岸坡在自重、桥基荷载、地震作用、桥基荷载和地震联合作用这4种工况下的稳定性进行了分析, 结果表明岸坡的安全系数均满足稳定性要求。三维矢量和安全系数法与二维极限平衡法评价岸坡稳定性的结果一致性较好, 为大型边坡工程的三维计算提供了参考。

关键词: 边坡稳定性; 矢量和; 最大最小原理; 三维

中图分类号: TU457

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2021)01—0154—06

Bridge Bank Slope Stability Analysis Based on Three-Dimensional Vector Sum Factor Methods

GAO Guohong¹, LIANG Dongcai^{2,3}, LI Chun⁴, SONG Guifeng¹, SHEN Menglong¹

(1. Yunnan Communications Investment Group Investment Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650028, China;

2. State Key Laboratory of Geo-mechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100000, China;

4. Yunnan Yulin Expressway Construction Co., Ltd., Lincang, Yunnan 677000, China)

Abstract: Vector sum factor of safety (VFOS) is an important way to explore the slope stability. By taking the bank slope of a bedding bridge site as an example, the unfavorable combination of tuff interlayer and unloading crack is considered in this paper. The most dangerous sliding surface of the slope is obtained by the limit equilibrium method, and the 3D geomechanical model considering the main stratum distribution is established. The sliding surface is analyzed by VFOS. The direction of calculation is determined by using the Panjiazheng's extremum principle. The stability of the bank slope of the bridge site under the four working conditions of dead weight, bridge foundation load, seismic action, bridge foundation load and combined seismic action is analyzed. The positive results obtained by this method are in good agreement with the results obtained by the two-dimensional limit equilibrium method.

Keywords: slope stability; vector sum factor of safety; Panjiazheng's extremum principle; three dimensions

岸坡稳定性是影响施工进度的关键因素之一, 常用的方法有极限平衡法、强度折减法等^[1]。有专家^[2]指出, 极限平衡法和强度折减法前提假设边坡

已经失稳, 与边坡的真实状态有着一定的差别; 基于滑裂面应力分析的方法接近真实值, 但忽略了力的矢量性, 物理意义模糊。

矢量和法由葛修润^[3-5]于 1983 年提出,该法基于力的矢量性,将抗滑力与下滑力在整体滑动趋势上投影的比值作为安全系数。矢量和法从边坡当前的应力状态出发,克服传统方法的缺点。矢量和法凭借其独特的优势在边坡三维稳定性分析中有着广泛的运用。王伟等^[6]以应变软化模型替换塑性模型,建立了考虑张拉-剪切渐进破坏的边坡矢量和分析方法。徐佳成^[7]以矢量和法安全系数为基础,提出了一系列有限元模型建立、应力插值、临界滑裂面搜索的思路。吴振君等^[8]提出了一种基于通用条分法的基础上,严格满足平衡条件的矢量和安全系数。罗先启等^[9]提出一种求解边坡实际受力状态的矢量和安全系数的三维条分法。杨超等^[10]将指定滑面入口和出口搜索的矢量和分析法得到的最危险滑面与极限平衡法中 Morgenster-Price 法以及强度折减法得到的滑带进行了对比,得到了三者具有相似结果的结论。薛海滨^[11]以矢量和分析法为基础,建立了一种适用于黄土的,考虑边坡稳定性,具有渐变性的矢量和分析法。孙加平等^[12]结合了最小势能法和矢量和法,有效的降低了迭代程序。董士杰^[13]针对加筋土建立了二维分析模型,利用矢量和法得出该类型边坡抗震设计主要影响因素。何浪等^[14]采用矢量和法,针对黄土边坡进行了地震荷载下的稳定性探究。邹烨等^[15]结合了矢量和法和极限平衡法对三维边坡稳定性分析做了探究。王迪等^[16]利用有限元的思想对分层的边坡进行了临界高度的探究。

有关矢量和方法的研究应该关注力的矢量性本身,致力于提升计算中抗滑力的方向的准确性和合理性。本文利用极限平衡法确定的最危险滑面位置。在此已知滑面的基础上,利用潘氏原理确定出抗滑剪应力的方向,实现了矢量和方法关注点回归到力的矢量性上。在四种工况下,对岸坡工程实例进行评价,并与二维极限平衡稳定性分析结果进行了对比,以验证三维矢量和方法在岸坡稳定性评价的适用性。

1 三维岸坡稳定性矢量和分析方法

1.1 三维矢量和法的基本理论

矢量和方法^[17]是边坡整体稳定性分析的一种方法,其核心体现为考虑力的矢量特征。三维矢量和法安全系数可表达为:

$$K_{vs} = \frac{R}{T} \quad (1)$$

式中: R 为作用在滑面上总抗滑力矢在潜在滑体下滑趋势方向 $\hat{d}$ 上的投影; T 为作用在滑面上总滑动力在潜在滑体下滑趋势方向 $\hat{d}$ 上的投影,分别为:

$$R = \int_S \sigma'_s \cdot (-\hat{d}) dS \quad (2)$$

$$T = \int_S (\sigma_s \cdot \hat{d}) dS \quad (3)$$

式中: σ_s 为最大抗滑应力矢量。

1.2 三维矢量和法边坡滑动方向确定

学者^[18-20]根据滑坡体的特征提出了一个最大最小值原理。此原理表述如下:通过自动程序不断改变滑坡体中的内力分布,可以得到位置已确定的滑面上最大抗滑力。陈祖煜^[21]证明了该理论的合理性。在已知滑面上,切线上与整体下滑相反方向能实现最大抗滑能力。表示如下:

$$\hat{d}_r \cdot (-\hat{d}) = \|\hat{d}\| \|\hat{d}_r\| \cos\gamma = \cos\alpha \cos\beta \quad (4)$$

式中: α 为 $\hat{d}$ 与点 B 切平面之间的夹角; β 为 $\hat{d}$ 在切平面上投影方向的反方向与 $\hat{d}_r$ 之间的夹角; γ 为 $\hat{d}$ 的反方向与 $\hat{d}_r$ 之间的夹角。

组成任意一已知滑面的各点都有最大的抗滑力,根据摩擦力方向定义,认为整体滑动趋势方向为滑移面最大抗滑力矢量和反方向。

2 岸坡概况及计算参数

2.1 岸坡概况

岸坡是由多次火山喷发旋回形成的顺层坡,拟建悬索桥的一侧主墩设置于岸坡中部。岩层面产状与岸坡坡度产状近一致,岸坡的地形完全受控于缓倾角发育的凝灰岩软弱夹层,岸坡均存在陡缓交接的阶梯形特征,岸坡坡度一般在 $10^\circ \sim 21^\circ$ 之间,缓坡之间存在的陡坎坡度可达 $50^\circ \sim 60^\circ$ 。

岸坡总体走向近南北,卸荷强烈,卸荷深度大。卸荷带岩体的强度及变形能力差,部分卸荷裂隙延伸长,且充填次生泥等软弱物质,其抗剪强度低,对岸坡稳定影响较大。同时发育有与河道近于平行和正交的陡倾角节理。致密玄武岩等多层凝灰岩软弱夹层出露。构造运动导致岩层错动,岩体的完整性较差。此外,凝灰岩层存在泥化现象且贯通成层,岸坡稳定性有较大概率受泥化层影响。各部分的地层信息则通过剖面图获取。根据现有钻孔资料综合分析,浅部凝灰岩软弱夹层向下游渐变为火山角砾熔岩,呈尖灭状分布,存在空间上的不均匀性,是控制

岸坡稳定的最主要因素。

根据地勘报告,岸坡的主要地层和结构面信息如图 1 所示。

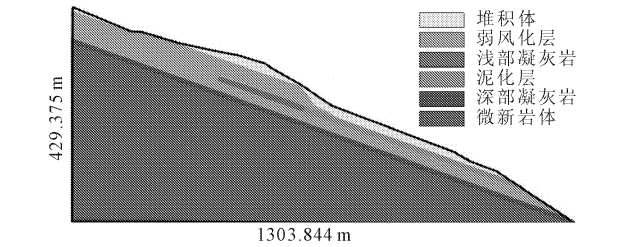


图 1 岸坡主要地层和结构面

2.2 材料参数

根据室内试验及参数反演结果,得到岸坡的岩土体材料参考见表 1。

表 1 岩土材料参数表

岩性	重度 γ $/(kN \cdot m^{-3})$	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/KPa	摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$
堆积体	24	25	0.38	50	34.0
弱风化层	30	8000	0.24	1200	39.0
浅部凝灰岩	29	80	0.30	549	35.3
泥化带	30	40	0.33	257	31.2
深部凝灰岩	29	80	0.30	>549	>35.3
微新岩体	30	20000	0.23	1500	43.0

2.3 计算工况

- 考虑岸坡所受的荷载有 4 种工况:
- (1) 自然条件下,岸坡只受重力荷载作用。
 - (2) 地震条件工况下,岸坡受重力荷载作用和地震荷载作用。
 - (3) 桥基荷载作用下,岸坡受重力和桥基荷载作用;
 - (4) 桥基荷载 + 地震作用,岸坡受重力、地震和桥基荷载作用。对于地震荷载采用拟静力法施加于岸坡上,力的方向指向不利于岸坡稳定的水平方向。

3 二维岸坡稳定性分析

浅部凝灰岩软弱夹层和后缘的陡倾结构面的强度特性为岸坡稳定性的控制因素,使用二维极限平衡法对岸坡稳定性进行计算分析。考虑两个潜在滑面,一是自然状态下卸荷带和浅部凝灰岩软弱夹层组成的滑面,另一个是考虑桥基荷载的陡倾结构面和浅部凝灰岩软弱夹层组成的滑面,将潜在滑面设置在浅部凝灰岩软弱夹层中,剪入口角度设为 75° (陡倾结构面的倾角),固定剪出口的角度 (浅部凝

灰岩软弱夹层的倾角) 与位置,通过滑面搜索分别得到不同工况下的最危险滑面,如图 2 所示。偏于安全考虑,桥基荷载作用下的岸坡稳定性分析只考虑摩擦桩情况。

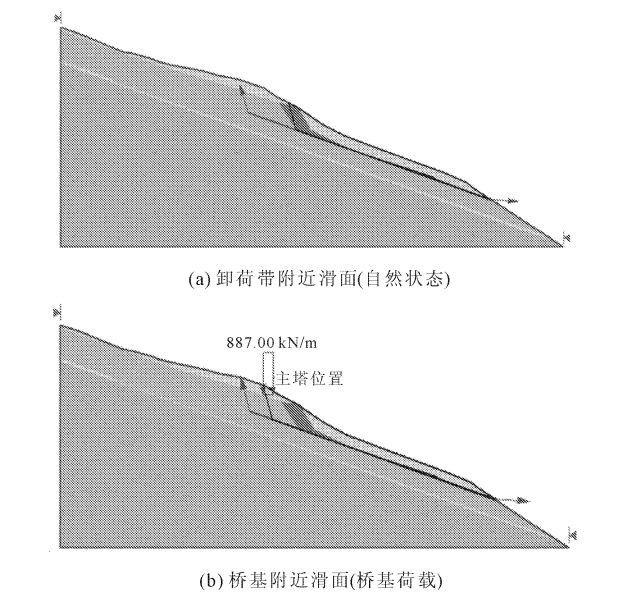


图 2 潜在滑动面示意图

各工况最小安全系数汇总情况见表 2。

表 2 剖面各工况最小安全系数汇总表

工况	自然状态		桥基荷载	
	自然	地震	桥基	桥基 + 地震
安全系数	1.984	1.640	1.803	1.526
控制标准 ^[22]	1.350	1.150	1.350	1.150

由表 2 可以看出,剖面在各种工况下的稳定性系数较高,满足工程稳定性要求。其中,地震作用下,剖面的稳定性相较自然条件下明显降低,下降幅度约 17%;施加桥基荷载后,桥基处的稳定性也有所降低,降幅约 10%。计算安全系数与工程规范要求对比均满足要求,是在只考虑桩基承受的荷载,并以面荷载的形式施加到承台的位置。桩基础对该范围土体的加固作用,并未考虑在内。边坡开挖后,在承台处施加桥基荷载。桥基荷载大小为 6 万 t,承台大小为 $26.3\text{ m} \times 26.3\text{ m}$,施加在单宽截面上均布荷载为 867 kN/m 。

4 三维岸坡稳定性矢量和法分析

数值分析环节充分考虑选址岸坡的结构特点,建立以桥址为轴线,沿河流方向延伸 400 m 宽,包括锚锭等主要建构筑物在内 1 300 m,从地质模型最顶点起算 600 m 深的三维模型。模型中结合地质勘察

资料,充分考虑了地层分布。

4.1 三维地质力学模型

三维矢量和法计算分析采用商业软件 ABAQUS,模型如图 3 所示。岩土体参数取值参考表 1。

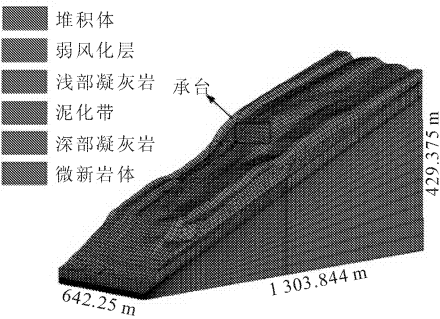


图 3 岸坡三维模型图

在图 3 模型中,三维模型的尺寸在 X 方向的长度是 1 303.844 m,在 Y 方向的长度是 429.375 m, Z 方向沿河谷向下取 642.25 m。边界条件为模型侧面为法向约束,底面为固定约束。采用多种体单元划分有限元网格,得出 94 225 个单元,53 203 个节点。计算实体基于弹塑性模型和摩尔-库仑强度准则基本理论建立。

4.2 三维岸坡稳定性

采用二维滑面在空间的延展来分析三维岸坡的稳定性,滑面在岸坡中的位置如图 4 所示。其中滑面对应的是极限平衡法中自然状态下泥化带附近滑面,滑面二对应的是桥基附近滑面。需要说明的是,滑面两侧的剪出面目前是由岸坡模型两侧向内部移动 30 m 且旋转一定角度(大约 30°)获取的,实际两侧剪出情况需要根据钻孔和地质情况来获取。

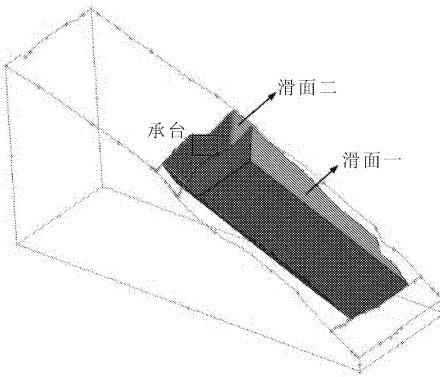


图 4 岸坡潜在滑面的空间位置展示

采用有限元法计算得到岸坡在四种计算工况下的最大主应力和最小主应力等色图(单位:Pa)如图

5—图 8 所示。

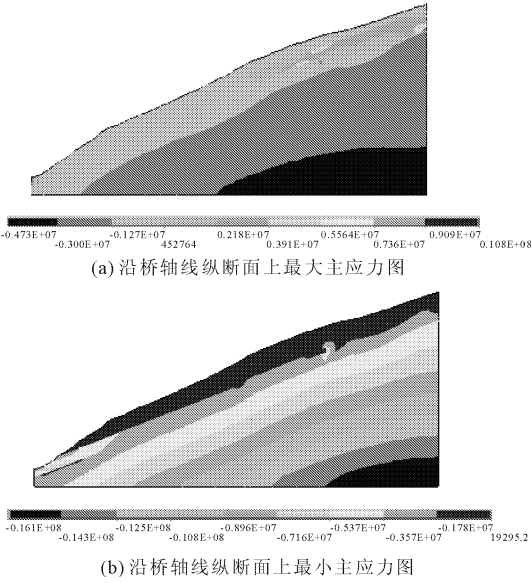


图 5 自然状态岸坡纵断面主应力等色图

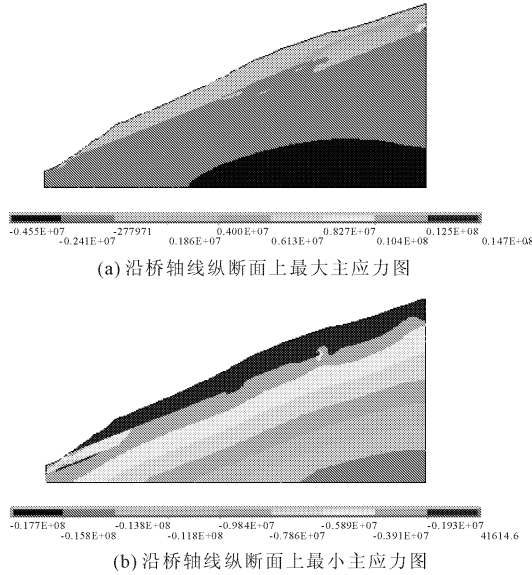


图 6 地震作用下岸坡纵断面主应力等色图

采用三维矢量和法计算得到的安全系数如表 3 和表 4 所示。岸坡稳定性在各种工况下均能满足工程稳定性要求。

表 3 自然条件下卸荷带附近滑面的稳定性计算结果对比

计算 工况	极限平 衡法 安全系数	三维矢 量和法 安全系数	三维矢量和法 下滑方向
自然条件	1.984	1.582	(-0.9246, 0.0575, -0.3765)
地震条件	1.640	1.302	(-0.93030, .0435, -0.3642)

间上分布不均匀造成的。虽然三维稳定性分析得到的岸坡安全系数较小,但仍满足工程稳定性要求。

5 结 论

该岸坡为顺向坡,存在浅部凝灰岩软弱夹层,岩体卸荷作用较明显,卸荷带前缘可能产生局部泥化。对该岸坡进行了三维建模并使用矢量和方法进行了稳定性评价,对比二维极限平衡稳定性的分析结果,得出如下结论:

(1) 根据地质条件分析,确定了岸坡的潜在滑动模式为陡倾结构面和浅部凝灰岩软弱夹层控制下的顺层滑移。

(2) 采用潘氏原理确定已知滑面的抗滑剪应力方向,将此作为矢量和法的计算方向,对岸坡进行了三维矢量和法计算,得到不同工况下的岸坡安全系数。

(3) 三维矢量和法和二维极限平衡法的岸坡安全系数一致性较好,自然条件下安全系数的误差在 20% 左右,桥基荷载作用下的误差为 0.7%。证明了该方法的适用性。三维矢量和计算得到的岸坡安全系数比二维结果低,主要是由于浅部凝灰岩软弱夹层在空间上分布不均匀造成的。

参考文献:

[1] 李修磊,陈洪凯,李金凤,等. 基于非饱和土强度理论的土质边坡浅层破坏稳定性分析[J]. 工程科学与技术,2019,51(2):61-70.

[2] 郭明伟,葛修润,李春光,等. 边坡和坝基抗滑稳定分析的三维矢量和法及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2010,29(1):8-20.

[3] 葛修润. 用 PC 型微机对岩体工程课题进行有限元分析[C]//第一届全国计算岩土力学研讨会论文集. 成都:西南交通大学出版社,1987.

[4] Ge Xiurun. Stability and deformation analysis of complex rock foundations of several large dams and hydropower stations in China[C]//Rotterdam: AA Balkema, 1995.

[5] 葛修润. 抗滑稳定分析新方法——矢量和分析法的基本原理及其应用[C]//第十一次全国岩石力学与工程学术大会会议论文集. 武汉:湖北科学技术出版社,2010.

[6] 王 伟,陈国庆,郑水全,等. 考虑张拉-剪切渐进破坏的边坡矢量和法研究[J]. 岩土力学,2019,40(S1):468-476.

[7] 徐佳成. 基于矢量和法安全系数的边坡稳定性研究[D]. 北京:中国地质大学,2009.

[8] 吴振君,葛修润. 求解边坡矢量和安全系数的条分法

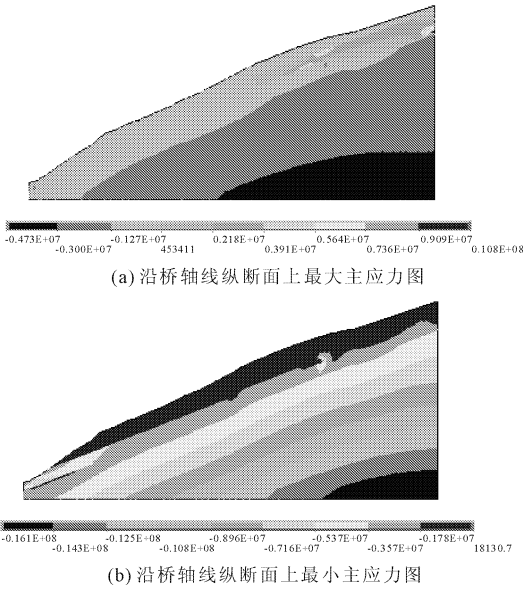


图 7 重力和桥基荷载下岸坡断面主应力等色图

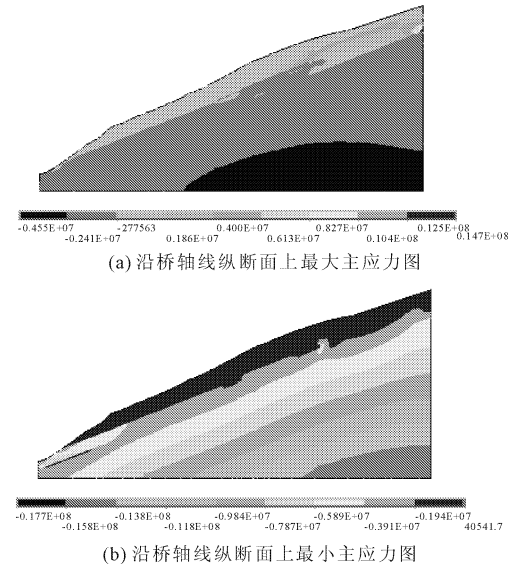


图 8 地震和桥基荷载下岸坡纵断面主应力等色图

表 4 桥基荷载作用下桥基附近滑面稳定性计算结果对比

计算 工况	极限平 衡法 安全系数	三维矢 量和法 安全系数	三维矢量和法 下滑方向
桥基荷载	1.803	1.790	(-0.9268,0.0415,-0.3732)
桥基荷载 + 地震荷载	1.526	1.480	(-0.9352,0.0302,-0.3528)

二维和三维分析表现出相同的趋势,仅存在细微差别。三维得出的安全系数比二维的低,其中自然工况下岸坡安全系数降低较大,下降 25.42%;桥基荷载作用下岸坡安全系数降低较小,不超过 0.7%。主要原因是由于浅部凝灰岩软弱夹层在空

- [J]. 岩土力学,2009,30(8):2337-2342.
- [9] 罗先启,袁 恒. 求解边坡矢量和安全系数的三维条分法[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(S1):2865-2870.
- [10] 杨 超,董立山,申俊敏,等. 边坡矢量和分析法最危险滑面搜索研究[J]. 安全与环境工程,2014,21(3):28-35.
- [11] 薛海斌. 考虑渐进破坏特性的黄土边坡稳定性矢量和分析法研究[D]. 西安:西安理工大学,2016.
- [12] 孙加平,魏 星,宋保保. 基于最小势能原理的三维边坡稳定矢量和法[J]. 长江科学院院报,2020,37(11):102-106.
- [13] 董士杰. 基于矢量和法的加筋土边坡动力稳定性分析[J]. 城市道桥与防洪,2018(7):275-279,26-27.
- [14] 何 浪,任其亮. 某高速公路黄土边坡稳定性研究[J]. 公路工程,2019,44(6):123-129,182.
- [15] 邹 烨,严东方. 基于矢量和法的三维边坡滑面搜索研究[J]. 水利与建筑工程学报,2019,17(4):107-111,171.
- [16] 王 迪,王宏权,王晓飞,等. 基于极限分析上限法双层土坡稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2020,18(4):209-214.
- [17] 郭明伟,葛修润,王水林,等. 基于矢量和方法的边坡动力稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(3):572-579.
- [18] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京:水利出版社,1980.
- [19] Ks S. Stability analysis of embankment sand slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1979, 12(105):1511-1524.
- [20] Donald C Z. Comparison between the limit equilibrium and limit analysis method[C]//Beijing: International Academic Publisher, 1995.
- [21] 陈祖煜. 建筑物抗滑稳定分析中“潘家铮最大最小原理”的证明[J]. 清华大学学报(自然科学版),1998(1):3-6.
- [22] 建筑边坡工程技术规范(附条文说明):GB 50330—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

(上接第 153 页)

- [12] 潘卫东,赵肃菖,徐伟泽,等. 热棒技术加强高原冻土区路基热稳定性的应用研究[J]. 冰川冻土,2003(4):433-438.
- [13] 李永强,韩龙武,崔 珑,等. 热棒在青藏高原风火山地区的实测效果分析[J]. 岩石力学与工程学报,2003(S2):2669-2672.
- [14] 潘卫东,连逢愈,邓宏艳,等. 寒区工程中热棒技术的应用原理和前景[J]. 岩石力学与工程学报,2003(S2):2673-2676.
- [15] 曹元平,曹 立. 应用于青藏铁路冻土路基的热棒效用分析[C]//推进铁路新跨越加快经济大发展——中国科协2004年学术年会铁道分会场论文集,2004.
- [16] 武俊杰,马 巍,孙志忠,等. 用估算热收支的方法评价热棒制冷效果[J]. 冰川冻土,2010,32(1):106-115.
- [17] Dong Y H, Yuan M L, Ming Y Z, et al. Laboratory test on the combined cooling effect of L-shaped thermosyphons and thermal insulation on high-grade roadway construction in permafrost regions[J]. Sciences in Cold and Arid Regions,2009,1(4):307-315.
- [18] 周亚龙,郭春香,王 旭,等. 基于热棒功率变化下多年冻土区输电塔热棒桩基的长期降温效果预测[J]. 岩石力学与工程学报,2019,38(7):1461-1469.
- [19] 周亚龙,王 旭,郭春香,等. 青藏铁路多年冻土区电力杆塔热桩基础的降温效果分析[J]. 冰川冻土,2019,41(1):100-108.
- [20] 孔 森,温 智,吴青柏,等. 热管在青藏高原多年冻土区高速公路应用中的适用性评价[J]. 中南大学学报(自然科学版),2019,50(6):1384-1391.
- [21] 张旭东. 多年冻土地区冻融循环下路基变形规律研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(3):19-24,106.
- [22] Zhang H, Zhang J M, Wang E L, et al. Thermal and settlement analyses under a riverbank over permafrost[J]. Computers and Geotechnics, 2017:91.
- [23] Zhang H, Zhang J M, Wang E L, et al. Analysis of thermal regime under riverbank in permafrost region[J]. Applied Thermal Engineering, 2017:123:963-972.
- [24] 陈 琳,喻文兵,易 鑫,等. 探地雷达在黑龙江漠河县城区冻土勘测中的应用[J]. 冰川冻土,2015,37(3):723-730.
- [25] 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 中国冰雪冻土图简要说明书[M]. 北京:中国地图出版社,1988.