第 33 卷 第 1 期 石家庄铁道大学学报(自然科学版) Vol. 33 No. 1
2020 年 3 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition) Mar. 2020

基于"锚杆框架梁+主动防护网"的裂隙岩质边坡治理措施研究

薛彦雨[1]， 李家欣[2]， 袁 维[2]

(1. 中铁二十四局集团有限公司，上海 200433；
2. 石家庄铁道大学 土木工程学院，河北 石家庄 050043)

摘要：以某高速公路某处岩质边坡为研究对象，采用极限平衡法并结合 Hoek-Brown 经验强度准则对边坡的治理措施进行有效性评估。该处边坡最典型的特点是岩层层理较薄，节理发育，受风化作用严重，都处于极限平衡状态，较难直接确定计算参数。因此，首先通过现场地质调查获取边坡基本地质信息并确定边坡的典型计算剖面形态，然后采用 slide 软件反演合适的岩体计算参数，为设计合理的边坡支护方案奠定基础。最后，针对提出的设计方案，分析在 3 种工况(正常工况、暴雨工况、地震工况)下边坡防护措施的有效性，对治理后的边坡稳定性进行了评估。

关键词：岩质边坡；Hoek-Brown 强度准则；参数反演；稳定性评估

中图分类号：TU47 **文献标志码**：A **文章编号**：2095-0373(2020)01-0044-05

0 引言

近年来，裂隙岩体边坡的变形破坏机制与稳定性的评估已成为岩土工程领域的研究热点之一。国内外许多学者就此问题开展了相应研究，并取得了较为丰富的成果。然而，岩质边坡变形破坏机制与边坡稳定性的研究主要针对层状岩体或存在明确滑动面的节理岩体，对于裂隙发育型岩体边坡的稳定性研究还相对缺乏，制约裂隙发育型岩体边坡稳定性分析的关键因素就是裂隙岩体的力学参数取值问题。因此，对该类边坡岩体的边坡稳定性进行分析，并提出针对性的治理措施，具有重要的工程意义。以某高速公路某处具有典型滑坡趋势的岩质边坡为研究对象，首先通过现场地质调查手段获取坡高、坡角、岩性、节理、裂隙等地质信息，确定边坡的典型计算剖面形态，然后采用 Bishop 法、Morgenstern-Price 法和 Spencer 法并利用 Hoek-Brown 经验强度准则反演边坡岩石的计算参数，为提出边坡支护方案奠定基础。最后，针对提出的设计方案，考虑 3 种工况(正常工况、暴雨工况、地震工况)对边坡防护措施的有效性进行分析，评估边坡治理后的稳定性。

1 Hoek-Brown 经验强度准则基本原理

相关研究表明：岩体的破坏包线并非 Mohr-Coulomb 强度准则表述的线性关系，而为抛物线形状，岩体破坏时的极限强度 σ-τ 和 σ_1-σ_3 往往呈现非线性的破坏特征，即使对完整、坚硬的均质岩块也不例外[1]。而这种非线性破坏强度，是线性的 Mohr-Coulomb 强度准则所不能表述的。Hoek-Brown 准则由 E. Hoek 在 1980 年提出并于 1992 年进行了修正，该准则综合考虑岩块强度、结构面强度、岩体结构等多种因素的影响，能够更好地反映岩体的非线性破坏特征。因此，已被岩土工程的学者们广泛应用到裂隙岩体的稳定性分析中。广义的 Hoek-Brown 准则的表达式如下

收稿日期：2018-08-20 责任编辑：车轩玉 DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20180820001

作者简介：薛彦雨(1986—)，男，工程师，研究方向为机械设计及理论。E-mail：1561245222@qq.com

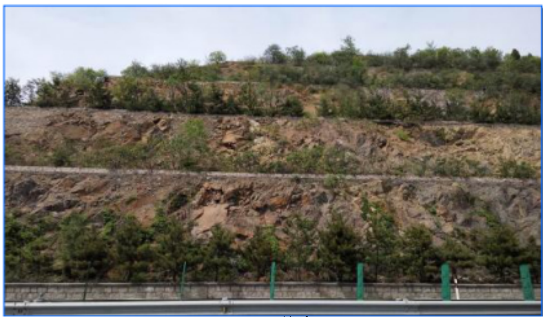
薛彦雨，李家欣，袁维. 基于"锚杆框架梁+主动防护网"的裂隙岩质边坡治理措施研究[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2020，33(1)：44-48.

$$\sigma_1=\sigma_3+\sigma_c\left(m_b\frac{\sigma_3}{\sigma_c}+s\right)^a \tag{1}$$

式中，m_b 为经验参数 m 的值，m 反映岩石的软硬程度，其取值范围在 0.000 000 1～25 之间，对严重扰动岩体取 0.000 000 1，对完整的坚硬岩体取 25；s 反映岩体的破碎程度，其取值范围在 0～1 之间，对破碎岩体取 0.0，对完整岩体取 1.0；a 为经验参数，取值范围在 0.5～0.6 之间，块状岩体取 0.5，破碎岩体取 0.6；σ_c 表示岩块的饱和单轴抗压强度。

2　工程地质概况

某路段为一石质挖方路段，边坡高度为 42.2 m，边坡坡率为 1∶0.4，共 5 级台阶。边坡岩层为第四系地层的更新世与全新世冲积、坡积黏性土和砾类土。砾类土主要为中侏罗系后城组厚层砾岩夹杂色凝灰质砂岩，砖红色砂砾岩，多为混积。坡面岩石裂隙横纵交错，较为破碎，岩层节理面结合很差，岩体破碎严重，有大块碎石裸露，极易形成危石坠落和滑塌，岩层产状 N65-75°E/SW35°。节理 3 组，平均间距 1.1 m，节理面结合很差，岩体体积节理数 J_v 为 9～20。由于坡面岩石受风化作用影响，造成坡面岩石松动、滚落现象，局部出现小型滑坡，阻塞道路，严重影响道路安全运营。坡面岩体形态如图 1 所示。



(a)形态 1

(b)形态 2

图 1　某高速公路岩质边坡

3　边坡计算参数反演

目前边坡抗滑稳定计算方法主要有极限平衡法和强度折减法，极限平衡法最为常用，目前较为常用的极限平衡法有：Fellenius 法，Bishop 法，Janbu 法，Spencer 法，Morgenstern-Price 法等。对土质边坡和呈碎裂结构、散体结构的岩质边坡可采用瑞典圆弧法、Bishop 法、Morgenstern-Price 法、不平衡推力传递法等[2]。因此，针对京承高速某处结构碎散、风化严重，具有典型滑坡趋势的岩质边坡，采用 Bishop 法、Morgenstern-Price 法和 Spencer 法对边坡进行参数反演。

为了评价此处裂隙岩质边坡的稳定性并确定其潜在的滑塌范围，根据该边坡剖面形态，利用 silde 软件建立边坡的二维地质模型，整个边坡模型分为一层，坡高为 42.2 m，坡率为 1∶0.4，分有 5 级台阶，台阶宽度为 2 m，见图 2。利用极限平衡法和 Hoek-Brown 岩体经验强度准则，通过反复试算，得到的反演参数结果见表 1。

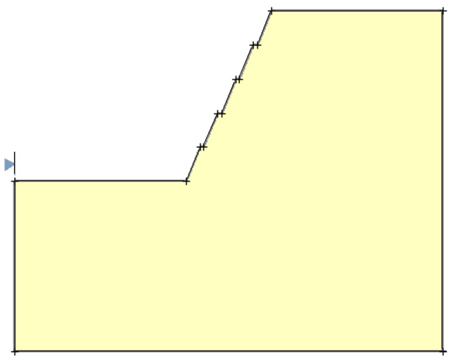


图 2　参数反演模型

表 1　参数反演结果

岩土层	重度/(kN·m^{-3})	单轴抗压强度/MPa	岩体软硬程度 m	岩体破碎程度 s
土石混合体	26.6	22	0.2	0.000 004

反演得到边坡状态安全系数、潜在临界滑动面和位移场如图 3 和图 4 所示。由图 3 可知，边坡现状的

最小安全系数为 1.096,处于临界滑动状态;由图 4 可知,边坡现状的最大位移值达到 7.2 cm。

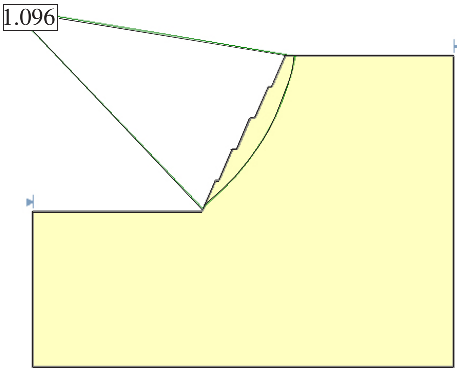


图 3　反演的边坡滑动面示意图

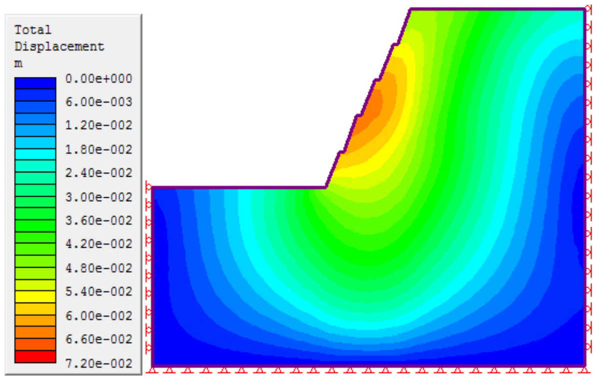


图 4　反演的边坡位移场

4　防护措施安全性评价

在裂隙岩体边坡的安全防护方面,锚杆框架防护和主动防护网是 2 种有效的治理措施,其中锚杆框架防护是近年来在总结锚杆挂网喷浆防护的经验教训后发展起来的,它既保留了锚杆对风化破碎岩石边坡主动加固作用,防止岩石边坡经开挖卸荷和爆破松动而产生的局部楔形破坏,又吸收了浆砌片石骨架防护的造型美观的优点[3],适用于稳定性较差土质边坡和坡体中无不良结构面、风化破碎的岩石路堑边坡;主动防护网系统常用于坡面崩塌、危岩、落石、风化剥落、溜坍、溜滑或塌落类地质灾害加固防护,其明显特征是采用系统锚杆固定,并根据柔性网的不同,分别通过支撑绳和缝合张拉(钢丝绳网和铁丝格栅)或预应力锚杆(TECCO-65 格栅)来对柔性网部分实现预张,从而对整个边坡形成连续支撑,其预张拉作业使系统尽可能紧贴坡面并形成了抑制局部岩土体移动或在发生局部位移或破坏后将其裹缚(滞留)原位附近的预应力,从而实现其主动防护(加固)功能[4]。

该边坡的设计方案如下:

1、2 级边坡采用锚杆框架梁支护,3、4、5 级边坡设置主动防护网,全长粘结型锚杆杆体材料采用直径为 32 mm 的 HRB335 级钢筋,锚杆长度 12 m,锚杆垂直间距 2 m,纵向间距 3 m,锚固角度为 20°,钻孔直径为 90 mm,注浆水泥砂浆强度为 M30;矩形框架梁单元尺寸不宜小于 3 m×3 m。主动防护网采用施加主动荷载的方式进行模拟,即在 3、4、5 级边坡表面垂直坡面施加 1.0 kPa。

通过采用极限平衡法(Bishop 法、Spencer 法、Morgenstern-Price 法),并结合 Hoek-Brown 准则对支护后边坡进行安全系数计算,结果表明,以上支护参数符合规范要求。详细计算过程如下所述:

(1)正常工况。《公路路基设计规范》JTG D30—2015 中规定[5],正常工况下边坡的安全系数值为 1.2～1.3。支护后正常工况下以上 3 种计算方法的安全系数见表 2,位移场分布见图 5。由表 2 可知,各种计算方法的安全系数均大于规范的要求值,同时,由图 5 可知,治理后正常工况的最大位移值为 0.84 cm,因此,可认为边坡在正常工况下是符合稳定性要求的。

表 2　正常工况下安全系数

计算方法	Bishop 法	Spencer 法	Morgenstern-Price 法
安全系数	1.252	1.237	1.234

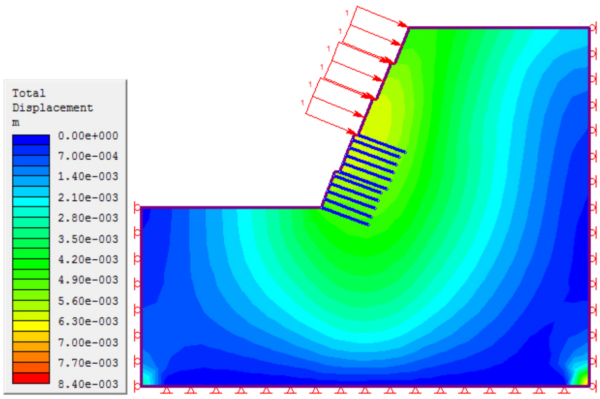


图 5　治理后正常工况下的位移场

(2)暴雨工况。《公路路基设计规范》JTG D30—2015 中规定[5],暴雨工况下,边坡的安全系数建议取 1.1～1.2。根据文献[6]中的方法,当模拟暴雨工况时,假定整个边坡全部被水浸润(即浸润线

位于边坡表面)，且岩体强度按照正常工况下的0.8倍进行折减。支护后暴雨工况下各种计算方法得到的安全系数见表3，位移云图见图6。由表3可知，各种计算方法的安全系数均大于规范的要求值，同时，由图6可知，治理后暴雨工况的最大位移值为0.96 cm，因此，可认为边坡在暴雨工况下是符合稳定性要求的。

表3　暴雨工况下安全系数

计算方法	Bishop法	Spencer法	Morgenstern-Price法
安全系数	1.177	1.160	1.156

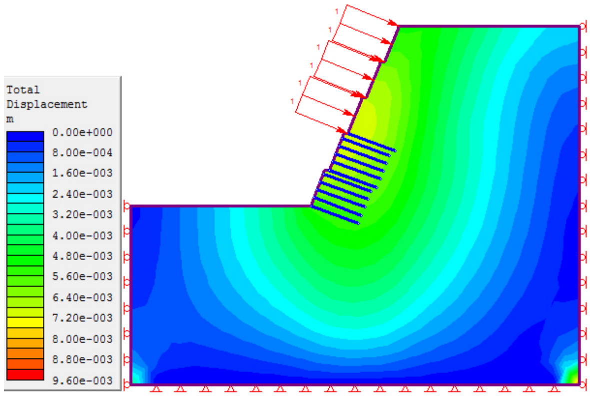


图6　治理后暴雨工况下的位移场

(3)地震工况。《公路路基设计规范》[5] JTG D30—2015中规定，边坡在地震工况下的安全系数建议取1.05～1.1。根据《建筑抗震设计规范》GB 50011—2010中附录A的要求[7]，该地区的地震加速度峰值取0.05g。根据《公路工程抗震规范》JTG B02—2013中8.2.6条规定[8]，采用拟静力法进行抗震稳定性验算，根据公式8.2.6-1和公式8.2.6-2可知，该边坡的水平地震作用系数为0.034，竖向地震作用系数为0.0。因此，支护后地震工况下各种计算方法得到的安全系数见表4，位移云图见图7。由表4可知，各种计算方法的安全系数均大于规范的要求值，同时，由图7可知，治理后地震工况的最大位移值为1.08 cm，因此，可认为边坡在地震工况下是符合稳定性要求的。

表4　地震工况下安全系数

计算方法	Bishop法	Spencer法	Morgenstern-Price法
安全系数	1.123	1.117	1.111

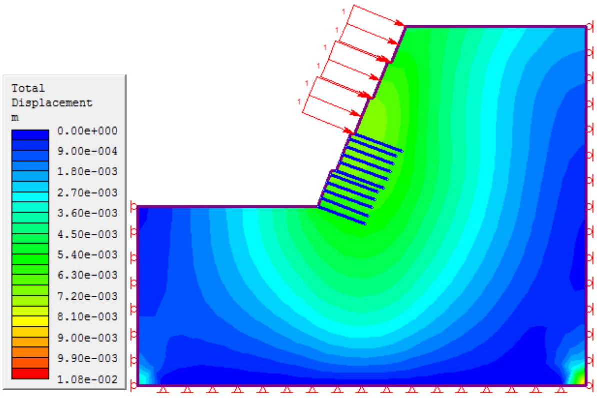


图7　治理后地震工况下的位移场

5　结论

以某高速公路具有典型滑坡趋势的岩质边坡为研究对象，通过地质调查和数值模拟相结合的方法对某处边坡的稳定性进行了分析，对边坡的计算参数进行了反演，并对具体支护措施进行了安全性评价，取得的主要结论如下：

(1)假定临界状态边坡安全系数等于1.0，基于临界状态边坡实际破坏状态，通过采用极限平衡法并结合Hoek-Brown经验强度准则，对边坡的岩体参数进行了反演分析，反演得到的破坏形态与现场实际情况较为吻合，从而认为反演得到的参数即为边坡临界状态的力学参数，该参数为评价边坡稳定性和支护结构合理性提供重要参数依据。

(2)通过反复试算，得到该边坡的整体治理方案为：1、2级边坡采用锚杆框架梁支护，3、4、5级边坡设置主动防护网。采用3种极限平衡法(Bishop法、Spencer法、Morgenstern-Price法)对治理后的边坡在正常工况、暴雨工况和地震工况下的安全系数进行了计算，结果表明，正常工况的安全系数最大，暴雨工况次之，地震工况的安全系数最小，3种工况皆满足相关规范对应的安全系数要求，因此，锚杆框架梁+主动防护网可以提高此处边坡的安全性。

参　考　文　献

[1]宋建波，张倬元. 岩体经验强度准则在地质工程中研究和应用现状[J]. 地球科学进展，2004(S1)：305-311.
[2]张启兵. 边坡稳定性分析的计算方法及特点[J]. 安徽建筑，2016，23(5)：196-198.
[3]林瑜. 混凝土框架锚杆在边坡加固中的应用[J]. 四川建材，2010，36(2)：56-57.

[4]李秀清.SNS柔性主动防护网在太古公路病害治理中的应用[J].山西建筑,2017,43(21):116-117.
[5]中交第二公路勘察设计研究院有限公司.JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].北京:人民交通出版社,2015.
[6]王光进,袁利伟,孔祥云,等. 边坡工程稳定与不确定性分析Slide程序的应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2015.
[7]中国建筑科学研究院.GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
[8]中交路桥技术有限公司.JTG B02—2013 公路工程抗震规范[S].北京:人民交通出版社,2014.

Research on Protection of Fractured Rock Slope Based on Anchor Frame Beam Combined with Active Net

Xue Yanyu[1], **Li Jiaxin**[2], **Yuan Wei**[1]

(1. China Railway 24th Bureau Group Co. LTD, Shanghai 200433, China;
2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Selecting two rock slopes of a certain highway as research objects, and the effectiveness of slope treatment measures is evaluated by using the limit equilibrium method and Hoek-Brown empirical strength criterion. The most typical characteristics of the two slopes that the layers of strata are thinner and the fractures is developed well, which are in a state of the maximum balance and it is difficult to directly determine the calculation parameters. Firstly, the basic geologic information is acquired from geological survey and the typical calculated section shape of the slope is confirmed. Secondly, back analysis of geomechanical parameters is obtained by using the slide software, which provides evidence for the feasibility of the slope protection program. At last, for existing protection program, this paper analyzes the effectiveness of slope protection measures in three conditions (normal conditions, heavy rain conditions, earthquake conditions), and evaluates the slope stability after the treatment.

Key words: rock slope; Hoek-Brown strength criteria; back analysis of parameters; stability analysis