

DOI: 10.11779/CJGE2015S2034

顺层页岩边坡稳定性分析及加固措施研究

张小勇¹, 杨占雷², 袁高昂¹, 梁居伟¹

(1. 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054; 2. 邢台路桥建设总公司, 河北 邢台 054000)

摘要: 在对承张高速某顺层页岩边坡资料收集和现场详细调查的基础上, 通过赤平投影法对边坡稳定性进行了分析, 确定了边坡的稳定性和边坡的滑移类型。结果表明: 该边坡处于不稳定状态且滑移类型为滑移-拉裂型。计算了边坡极限失稳长度和后缘拉裂深度, 并根据计算结果和实际情况设计确定采用微型桩对边坡进行加固, 加固后边坡稳定系数计算结果满足设计安全要求。该分析方法和加固设计措施为以后该类型边坡的稳定性分析和加固设计提供借鉴。

关键词: 边坡; 稳定性分析; 赤平投影法; 微型桩

中图分类号: TU457 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2015)S2-0176-05

作者简介: 张小勇 (1991-), 男, 研究生。2014年至今就读于西安科技大学地质工程专业, 从事地质工程与岩土工程研究。E-mail: 775451203@qq.com。

Stability analysis and reinforcement method for bedding shale slope

ZHANG Xiao-yong¹, YANG Zhan-lei², YUAN Gao-ang¹, LIANG Ju-wei¹

(1. College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2. Xingtai Luqiao

Construction Corporation, Xingtai 054000, China)

Abstract: Based on detailed data collection and field survey of bedding shale slope in Chengde-Zhangjiakou expressway, the slip mode and slope stability are analyzed and determined by using the stereographic method. The results show that this slope is unstable, and the slip mode is sliding-tension type. The limit length of the slope instability is calculated. According to the calculated results and the local geological conditions, the micro-pile is recommended for the slope reinforcement. The stability results of the slope with micro-pile reinforcement meet the design requirements. The analytical method and design measures can be references for stability analysis of this type of slope and in the future.

Key words: slope; stability analysis; stereographic method; micro-pile

0 引言

承张高速公路 TJ19 标段 K72+488—K72+681.9 深挖路堑位于河北省丰宁县凤山镇凤山村, 挖方边坡长度约 193.9 m, 线路走向 100°, 开挖形成最大边坡高度约 33.1 m, 路基设计标高在 650.48~653.12 m 之间^[1]。2014 年 7 月份由于开挖路堑, 导致该标段坡体向路基方向滑动, 并在坡顶产生 5~6 条裂缝, 对施工现场人员和财产造成了严重的威胁。

本文在对该顺层页岩边坡进行了野外详细地质调查和资料收集的基础上, 利用赤平投影法对边坡的稳定性进行分析, 该边坡已经处于不稳定状态且滑移类型为滑移-拉裂型, 计算得到了边坡的极限失稳长度和后缘拉裂深度, 并根据计算结果和实际情况设计采用了微型桩对边坡进行加固, 设计后边坡稳定系数满足设计安全要求, 该加固方法对以后处理该类型边坡有良好的借鉴作用。

1 工程地质概况

该边坡位于低山区, 山体斜坡较陡, 沟壑纵横。坡体出露岩性主要为白垩系西瓜园组页岩与砂岩互层。边坡岩体自上而下分别描述如下^[1]:

(1) 全风化页岩与砂岩互层 (K_{ls}): 黄褐色, 密实, 结构已破坏。

(2) 强风化页岩与砂岩互层 (K_{lx}): 灰褐色, 泥质结构, 具水平层理, 岩芯呈短柱状, 局部可见砂岩薄层, 节理裂隙发育。

(3) 中风化页岩与砂岩互层 (K_{ix}): 灰褐色, 泥质结构, 具水平层理, 岩芯呈短柱状, 节理裂隙发育。

2 野外地质详查

本次野外地质详查的地点位于丰宁县凤山镇凤山村 TJ19 标 K72+488—K72+681.9 段。详查的目的是对

当地的地形、地质状况进行详查并现场测量岩层产状，对边坡的稳定性进行初步判断。

本次详查场地的岩石如图 1 所示，主要以风化页岩与砂岩互层为主，泥质结构，具水平层理，硬度低，岩体的结构面以节理、裂隙为主。

斜坡自然坡面产状为 $20^\circ \angle 30^\circ$ ，已经开挖的边坡面产状为 $20^\circ \angle 51^\circ$ ，岩性为风化页岩夹砂岩，经测量得到该岩层产状为 $330^\circ \angle 25^\circ$ (J_1 结构面)，坡顶面发育两组裂隙，分别为 J_2 、 J_3 结构面， J_2 结构面延伸走向为 225° ，长约 58 m，最宽处约 1.2 m，产状为 $315^\circ \angle 60^\circ$ ； J_3 结构面出现在 J_2 结构面延伸方向约 9 m 处，延伸方向为 335° ，宽约 25 cm，产状为 $245^\circ \angle 60^\circ$ 。两组结构面分别如图 2 和图 3 所示。



图 1 K72+550 段风化岩石

Fig. 1 K72+550 section of weathered rock



图 2 K72+550 段 J_2 结构面出露图

Fig. 2 K72+550 section of J_2 structural plane



图 3 K72+550 段 J_3 结构面出露图

Fig. 3 K72+550 section of J_3 structural plane

图 4 为该边坡涵洞南侧出口处，调查时发现涵洞

开挖处下侧有渗水现象，渗水高度约为 3 m。根据现场情况初步判断渗水是由于地表降水在坡顶处的后缘拉裂处渗入，沿着岩层破碎带流动至该处渗出所致。



图 4 涵洞南侧出口岩层渗水

Fig. 4 Rock seepage in culvert export

3 边坡稳定性分析

赤平投影法是边坡稳定性分析中定性分析方法之一，是一种简便、直观的稳定性分析方法，在我国工程地质领域中得到广泛应用^[2-6]。本次边坡稳定性分析采用赤平投影法分别对每两组结构面构成的结构面组合进行分析，本文中赤平投影均采用上半球投影。

3.1 J_1 、 J_2 结构面稳定性分析

J_1 和 J_2 结构面赤平投影图见图 5， J_1 和 J_2 结构面的投影大圆交点 I 位于自然边坡投影大圆的外侧，两结构面的组合交线 IO 的倾向与边坡倾向相对一致，产状为 $33^\circ \angle 11.6^\circ$ ，两组结构面的组合交线虽然比开挖边坡面平缓，但由于坡顶面上存在切割面，因此，结构面组合切割体属较不稳定结构，结构面 J_1 的倾向线 AO 为滑动方向，即为岩层倾向，方向约为 330° 。

3.2 J_1 、 J_3 结构面稳定性分析

J_1 和 J_3 结构面赤平投影图见图 6， J_1 和 J_3 结构面的投影大圆交点 I 位于自然边坡投影大圆和边坡面投影大圆之间，两结构面的组合交线 IO 的倾向与边坡倾向相对一致，产状为 $318^\circ \angle 24.3^\circ$ ，也就是两结构面的组合交线的倾角比开挖坡面的倾角小，而比自然坡面的倾角大。现场调查后发现边坡组合交线在边坡面有出露，因此确定该结构面组合切割体属不稳定结构，滑动方向为 IO 方向，即约为 318° 。

3.3 J_2 、 J_3 结构面稳定性分析

J_2 和 J_3 结构面赤平投影图见图 7， J_2 和 J_3 结构面的投影大圆交点 I 位于开挖边坡面投影大圆的内侧，组合线 IO 的倾向相对于边坡倾向相反，产状为 $270^\circ \angle 53.6^\circ$ ，两结构面的组合交线 IO 的倾角比开挖边坡面的倾角陡，因此，结构面组合切割体属稳定结构。

根据以上分析可知, J_1 与 J_2 结构面组合切割体属较不稳定状态, 可能沿岩层面发生顺层滑动, 滑动方向约为 330° ; J_1 与 J_3 结构面组合切割体属较不稳定结构状态, 滑动方向约为 318° ; J_2 与 J_3 的稳定状态结构面组合切割体属稳定状态。

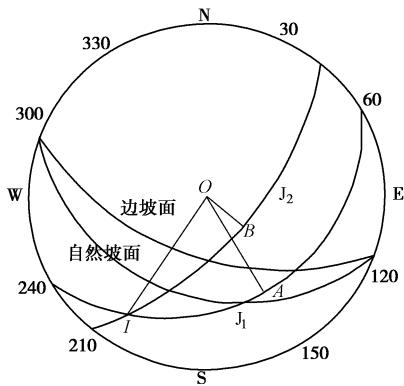


图 5 J_1 、 J_2 赤平投影图

Fig. 5 Stereographic projection of J_1 and J_2

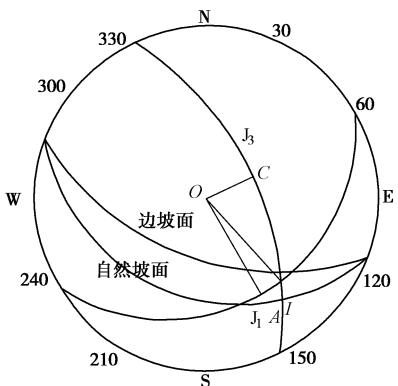


图 6 J_1 、 J_3 赤平投影图

Fig. 6 Stereographic projection of J_1 and J_3

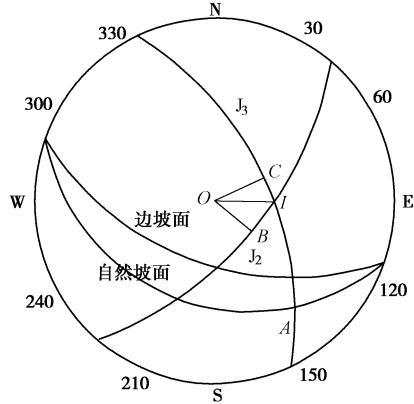


图 7 J_2 、 J_3 赤平投影图

Fig. 7 Stereographic projection of J_2 and J_3

4 边坡失稳的横向极限长度计算

根据滑坡现场调查和赤平投影法稳定性分析, 确定该滑坡的滑移类型是滑移-拉裂型, 采用文献[6]中

的方法进行滑坡失稳极限长度计算。

4.1 计算原理^[6]

计算模型如图 8 所示, 设开挖边坡坡顶 E_0 的 x 、 y 坐标值为 x_0 、 y_0 。边坡开挖后, 假设边坡岩体沿第 i 层岩体底面滑动, 坡体内沿节理和节理间的“岩桥”拉裂, x 为边坡失稳横向极限长度。

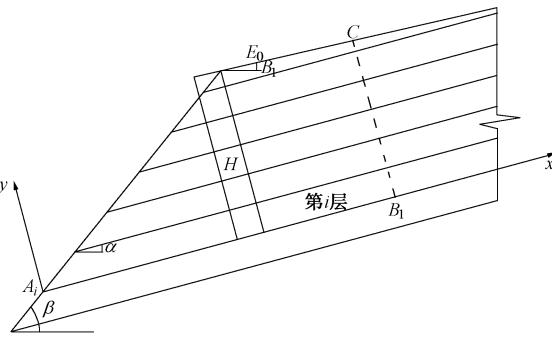


图 8 边坡计算模型

Fig. 8 Slope model

以块体为研究对象, 各参数有以下关系:

$$\left. \begin{array}{l} |A_i B_i| = x, \\ |B_i C| = H - (x - x_0) \tan(\alpha - \beta_1). \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$W_{A_i B_i C E_0} = -\frac{1}{2} \bar{\gamma} \tan(\alpha - \beta_1) x^2 + \bar{\gamma} [H + x_0 \tan(\alpha - \beta_1)] x - \frac{1}{2} \bar{\gamma} [H x_0 + x_0^2 \tan(\alpha - \beta_1)]. \quad (2)$$

所以, 对块体 $A_i B_i C E_0$ 而言, 有

$$\left. \begin{array}{l} F_{D_i} = W_{A_i B_i C E_0} \cdot \sin \alpha, \\ F_{R_i} = |B_i C| S_{t_i} + W_{A_i B_i C E_0} \cdot \cos \alpha \cdot \bar{f}_i + x \cdot \bar{c}_i. \end{array} \right\} \quad (3)$$

以上各式中: 岩层倾角为 α , 开挖边坡坡角为 β , 开挖边坡之上的自然边坡坡角为 β_1 ; $W_{A_i B_i C E_0}$ 为边坡四边形块体 $A_i B_i C E_0$ 的自重; $\bar{\gamma}$ 为第 i 层层面以上各岩层的加权平均重度; \bar{f}_i 、 \bar{c}_i 为滑动面 $A_i B_i$ 的加权平均抗剪强度指标; F_{D_i} 为块体 $A_i B_i C E_0$ 的下滑力; F_{R_i} 块体 $A_i B_i C E_0$ 的抗滑力。

$$F_{R_i} - F_{D_i} = 0. \quad (4)$$

当边坡岩体 $A_i B_i C E_0$ 处于极限平衡状态。将式(1)、(2)、(3)代入式(4)中, 可以计算出顺层岩质边坡岩层失稳横向临界长度。

4.2 计算结果

由于该边坡已经处于不稳定状态, 现场已经按照设计对边坡进行削坡处理, 将四级平台削坡为两级平台, 重新测量得到开挖坡角 $\beta=51^\circ$, 自然坡段坡角 $\beta_1=0^\circ$, 岩层倾角 $\alpha=25^\circ$, 平均重度为 $\lambda=26 \text{ kN/m}^3$ 。

将表 1 中的岩层参数代入上述式中, 求得该边坡各岩层失稳横向极限长度分别为: 第一层 23.56 m,

表 1 边坡岩层参数^[6]

Table 1 Parameters of slope rock

| 层号 | h_i /m | k_{fi} /m ⁻¹ | f_{pi} | f_n | k_{ci} (kPa·m ⁻¹) | c_{pi} /kPa | c_{ni} /kPa | k_{Si} (kPa·m ⁻¹) | S_{pi} /kPa | S_{ni} /kPa | L_0 /m |
|----|-------------|------------------------------|----------|-------|------------------------------------|------------------|------------------|------------------------------------|------------------|------------------|----------|
| 1 | 5.26 | 0.0039 | 0.364 | 0.306 | 0.4 | 10 | 6 | 1.33 | 20 | 0 | 15 |
| 2 | 3.1 | 0.0036 | 0.344 | 0.290 | 0.6 | 15 | 6 | 1.33 | 20 | 0 | 15 |

第二层 31.01 m。由计算结果可知: 该边坡顺层滑动的底部为第二层岩层底层面, 边坡失稳的横向极限长度 l 为 31.01 m; 后缘拉裂深度 h 为 3.06 m; 后缘拉裂位置距边坡边缘为 16.17 m。

5 边坡加固方案设计

5.1 加固方案选取

该边坡为顺层页岩边坡, 倾角较小, 若使用锚杆进行加固, 锚杆很难打穿滑动面, 且该边坡有两个潜在滑动面, 两个滑动方向接近垂直, 若全部使用锚杆, 工程造价较高, 且不一定达到预期效果。微型桩的特点是能够嵌入边坡潜在滑面足够深度, 能够有效控制坡面上加固区域拉裂缝的形成、开展, 桩-岩土体复合型结构刚度较大, 也可以有效地控制边坡的变形, 且微型桩便于在边坡平台施工^[7-10]。结合以上分析及工程地质条件, 该边坡加固措施选择微型桩加固。

5.2 滑坡推力计算

选取单位长度为 1 m 宽的坡体作为计算单元进行滑坡推力计算。取安全系数 $K=1.25$, 计算得到滑坡推力 E 为 533.26 kN。

5.3 微型桩尺寸的初步确定

设计微型桩的直径为 $d=150$ mm, 钻孔内放置外径 108 mm、壁厚 6 mm 的热轧无缝钢管。初步拟定桩间距为 2.0 m, 排距 2.0 m, 梅花型布置。一级平台桩长为 15 m, 二级平台桩长 20 m。

5.4 微型桩支护体系验算

微型桩设计计算时选取单位长度为 2 m 宽的坡体作为计算单元。根据文献[7]中的验算方法对方案进行整体抗滑稳定性和滑面处整体抗剪力验算。

根据设计每 2 m 宽的坡体内共有微型桩 5 根。钢材抗剪 $f_v=125$ MPa, A 是钢管的横截面积, 则平台处桩结构抗剪力

$$R_c = n \cdot f_v \cdot A = 1201.05 \text{ kN} \quad (5)$$

(1) 整体抗滑稳定性验算

滑面抗剪强度由滑面的抗剪强度和桩的抗剪强度组成。滑面倾角 $\alpha=25^\circ$, 长度 $l=31.01$ m, 滑体自身产生的抗剪强度 R_f 为 1857.67 kN,

$$F_s = \frac{R_f + R_c}{T} = \frac{2 \times 1857.67 + 1201.05}{2 \times 1912.75} = 1.29 > 1.25 \quad (6)$$

故满足设计安全要求。

(2) 滑面处整体抗剪力验算

按最不利原则考虑滑坡推力由微型桩全部承担且不考虑注浆与岩体对抗剪强度的影响。微型桩结构抗剪力计算如下:

$$R_c = 1201.05 \text{ kN} > 2 \times 533.36 \text{ kN} = 1066.52 \text{ kN} \quad (7)$$

故满足设计安全要求。

6 微型桩施工措施

微型桩的主要施工流程为^[11]: 平整场地—注浆钢管制作焊接—测量放线—孔距定位—钻孔机就位钻孔—清孔—注浆机安装—安装下放钢管—安装注浆管—拌制水泥浆—注水泥浆。主要工艺如下:

(1) 成孔。成孔前为保证桩的垂直度, 需有水平尺前后、左右调整好钻机的水平度。钻机每进尺累计达到 200 m 之后要测量钻头一次。

(2) 注浆管制作。设计微型桩的直径 $d=150$ mm, 钢管下部 4 米范围内每隔 400 mm 梅花型布设出浆孔, 出浆孔直径 15 mm, 注浆下管前用透明胶带封孔, 加压后自动开封出浆。

(3) 水泥浆液配制要求。水泥浆液要严格按照 0.5 : 1 的比例配置, 配置时水泥以每袋 50 kg 计算, 水泥浆在搅拌桶内至少搅拌 3 min 后才可以开始注浆, 从而达到搅拌均匀。

7 结论

(1) 利用赤平投影对边坡稳定性进行初步判断, 分析得到结构面组合切割体属较不稳定结构, 边坡处于不稳定状态。

(2) 根据滑坡现场调查和赤平投影稳定性分析, 确定该滑坡的滑移类型是滑移-拉裂型, 并计算得到滑坡失稳极限长度。

(3) 采用微型桩对边坡进行加固设计, 按设计加固方案加固后的边坡稳定系数计算结果满足设计安全要求。

(4) 该分析方法和加固设计措施可为以后该类型边坡的稳定性分析和加固设计提供借鉴。

参考文献:

- [1] 承德至张家口高速公路详细工程地质勘察报告[R].

- (Engineering geological investigation report of Chengde to Zhangjiakou highway[R]. (in Chinese))
- [2] 徐开礼, 朱志澄. 构造地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1984. (XU Kai-li, ZHU Zhi-cheng. Structural geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984. (in Chinese))
- [3] 张倬元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994. (ZHANG Zhuo-yuan, WANG Shi-tian, WANG Lan-sheng. Principles of engineering geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994. (in Chinese))
- [4] 苏生瑞, 王贵荣, 黄强兵. 地质实习教程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005. (SU Sheng-rui, WANG Gui-rong, HUANG Qiang-bing. Geological practice course[M]. Beijing: China Communications Press, 1988. (in Chinese))
- [5] 卢 达. 基于赤平投影法的岩质边坡稳定性分析[J]. 铁道建筑, 2010(11): 69 - 71. (LU Da. Analysis on rock slope based on stereographic projection method[J]. Railway Construction, 2010(11): 69 - 71. (in Chinese))
- [6] 姚 环, 郑 振, 简文彬, 等. 公路岩质高边坡稳定性的综合评价研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(5): 558 - 563. (YAO Huan, ZHENG Zhen, JIAN Wen-bin, et al. Comprehensive evaluation and research on stability of high lithological slope of expressway[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(5): 558 - 563. (in Chinese))
- [7] 邓荣贵, 周德培, 李洪安, 等. 顺层岩质边坡不稳定岩层临界长度分析[J]. 土木工程学报, 2002(3): 178 - 182. (DENG Rong-gui, ZHOU De-pei, LI Hong-an, et al. On the critical length of unstable rock stratum on bedrock slope[J]. China Civil Engineering Journal, 2002(3): 178 - 182. (in Chinese))
- [8] 何 晖. 微型桩加固浅层堆积层膨胀土滑坡机理与应用研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2013. (HE Hui. Research on micropile reinforcing mechanism and application of expansive soil landslides in shallow accumulative layer[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2013. (in Chinese))
- [9] 孙书伟, 陈 冲, 丁 辉, 等. 微型桩群加固土坡稳定性分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(12): 2306 - 2314. (SUN Shu-wei, CHEN Chong, DING Hui, et al. Stability analysis of earth slopes reinforced with micropiles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(12): 2306 - 2314. (in Chinese))
- [10] 孙书伟, 朱本珍, 马惠民, 等. 微型桩群与普通抗滑桩抗滑特性的对比试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(10): 1564 - 1570. (SUN Shu-wei, ZHU Beng-zhen, MA Hui-min, et al. Model tests on anti-sliding mechanism of micropile groups and anti-sliding piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(10): 1564 - 1570. (in Chinese))
- [11] 杨汉臣. 微型钢管桩在边坡治理中的应用及其机理分析[D]. 长沙: 中南大学, 2007. (YANG Han-chen. Application and mechanism analysis of mini steel-tube piles in treatment of landslide[D]. Changsha: Central South University, 2007. (in Chinese))

(本文责编 明经平)