

马淑芝,刘小浪,席人双,等. 开挖对顺向岩质高边坡稳定性影响及锚索加固效果分析[J]. 地球科学与环境学报,2018,40(5):637-644.

MA Shu-zhi, LIU Xiao-lang, XI Ren-shuang, et al. Analysis of the Influence of Excavation on Stability of High Lithological Bedding Slope and the Reinforcement Effect of Anchor Cable[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(5): 637-644.

开挖对顺向岩质高边坡稳定性影响 及锚索加固效果分析

马淑芝¹, 刘小浪¹, 席人双², 王哲²

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司道路交通设计研究院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 顺向岩质高边坡的稳定性通常较差, 在工程上格外受到重视, 利用锚索锚固是较为理想的加固方案。利用 Sarma 法对厦沙高速公路某段石英片岩顺向岩质高边坡在施加锚索和不加锚索两种工况下的应力特征和边坡稳定性系数进行对比分析。结果表明: 不加锚索时, 各条块底面正压力随开挖过程呈降低趋势, 越靠近边坡顶部, 各条块底面正压力受到开挖卸荷的影响越大, 降低趋势越明显; 条块底面正压力的降低使边坡抗滑力减小, 当减小幅度较大时, 边坡稳定性会受到明显影响, 整个开挖过程中边坡整体稳定性系数呈下降趋势, 最低为 1.243; 施加锚索能够增大条块底面正压力, 提高条块底面的抗滑力, 有效降低条块底面受到的剪切力, 限制上部条块的滑动趋势, 减小其对下部条块的挤压和相对错动, 且随着开挖的加深, 这种效应表现得越明显; 对某个条块而言, 施加锚索可以提高底面抗剪强度, 降低底面和侧面剪切力、条块下滑力, 从而提高边坡稳定性; 施加锚索后边坡稳定性系数提高到 1.630。综上所述, 边坡开挖对于顺向岩质高边坡稳定性影响很大, 而施加锚索加固可以显著提高边坡稳定性, 达到加固边坡的目的。

关键词: 岩体力学; 岩质边坡; 稳定性; Sarma 法; 加固; 开挖卸荷; 锚索; 高速公路

中图分类号: P642; U416.1⁺4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2018)05-0637-08

Analysis of the Influence of Excavation on Stability of High Lithological Bedding Slope and the Reinforcement Effect of Anchor Cable

MA Shu-zhi¹, LIU Xiao-lang¹, XI Ren-shuang², WANG Zhe²

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China;
2. Research Institute of Railway and Traffic Design, China Railway SIYUAN Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan 430063, Hubei, China)

Abstract: The stability of high lithological bedding slope is usually poor, and it pays extra attention in the engineering practice, and anchor cable is an ideal reinforcement scheme. The Sarma method was applied to compare the stress characteristics and the slope stability coefficient of quartz schists in high lithological bedding slope of Xia-Sha expressway with and without anchor cable. The results show that the positive pressure of each slice bottom decreases with the excavation process without anchor cable, and the closer to the top of the slope, the greater the positive pressure of each slice is subjected to excavation unloading, and the more obvious the

收稿日期: 2018-03-18; 修回日期: 2018-06-12

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572278)

作者简介: 马淑芝(1974-), 女, 回族, 安徽砀山人, 教授, 工学博士, E-mail: maszyy@163.com。

decreasing trend; the decrease of the positive pressure at the slice bottom decreases the sliding resistance force of the slope, and when the reduction is large, the slope stability will be significantly affected, and the stability coefficient of the slope decreases with a minimum of 1.243 during the whole excavation process; the positive pressure at the slice bottom increases with anchor cable, the sliding resistance force at the slice bottom can be improved, and the shear stress at the slice bottom also decreases, the sliding trend of the slice top can be limited, the extrusion and relative dislocation of the slice lower part are reduced, these above phenomena appear more obviously with the deepening of the excavation; furthermore, when the shear strength at the slice bottom is improved with anchor cable, the shear stresses of the slice bottom and side are reduced, and the sliding force of the slice is reduced, the purpose of slope reinforcement is achieved with the stability coefficient of 1.630. In conclusion, the slope excavation has great influence on the stability of the high lithological bedding slope, and the reinforcement with anchoring measures can significantly improve the stability of the slope and achieve the purpose of slope reinforcement.

Key words: rock mass mechanics; lithological slope; stability; Sarma method; reinforcement; excavation unloading; anchor cable; expressway

0 引言

顺向岩质边坡广泛存在于各类工程建设中,其稳定性问题是众多工程技术人员研究的热点课题之一。在高速公路建设中,合理的边坡稳定性分析评价不仅对公路工程建设可行性决策产生重要的控制性作用,而且在很大程度上影响高速公路工程的建设投资和运营使用效益^[1]。

实际工程中,岩质边坡稳定性分析方法有赤平投影分析法、块体理论分析法、极限平衡法、数值分析法等。Sarma 法^[2]是极限平衡法的一种,在国内外很多边坡工程中得到广泛应用^[3-10]。基于传统 Sarma 法,研究人员根据实际情况对该方法作出改进。熊将等针对库区岩体淹没在水下的情况,在 Sarma 法中考虑了浮力的作用,得到合理的计算结果^[11];冯君等在 Sarma 法中考虑了岩质边坡开挖地应力释放荷载,使该方法在分析高地应力地区岩质边坡稳定性方面有较好的适宜性^[12-13];周志军等将安全稳定性系数与临界加速度系数之间的函数关系引入 Sarma 法,结果表明改进后的 Sarma 法不存在收敛性问题,使用方便^[14];孙少锐等改进了 Sarma 法的假设条件,二次开发了基于 GOCAD 三维地质模型网格的 Sarma 法程序,实际应用表明该程序可以分析多种介质的复杂边坡^[15];郑文等开发了可考虑基质吸力的 Sarma 法条分程序,并用于非饱和土的滑坡稳定性分析^[16];谯礼将蒙特卡洛 (Monte Carlor) 法与改进的 Sarma 法耦合应用于边坡稳定性可靠度的计算中^[17];徐昱将岩体结构面网络模拟

及连通率计算成果应用于 Sarma 法,成功实现了在岩质边坡稳定性分析中考虑岩体各向异性^[18];符贵军等将地震加速度以方位角的形式施加到条块上,结果表明改进后的 Sarma 法可以满足边坡稳定性工程评价需要^[19]。目前在 Sarma 法中考虑加锚的研究相对较少,因此,本文在传统 Sarma 法基础上考虑锚固力的作用,以分析加锚岩质边坡稳定性。

1 边坡概况

厦沙高速公路 ZK113+630~ZK113+805 岩质高边坡位于福建省尤溪县境内肖板隧道北 300 m,地层主要由石英片岩构成,设计 9 级开挖形成路堑,最大坡高约为 78.5 m,坡度为 39°~44°,属于典型的顺向岩质高边坡。该边坡的稳定性制约着厦沙高速公路建设的推进及后续运营维护,因此,研究该边坡的稳定性及加固措施具有重要意义。

1.1 边坡的构成

经前期勘察,边坡工程地质剖面图如图 1 所示。 Q^{el+dl} 为第四系残坡积层碎块石土,AnZ 为前震旦系石英片岩,片理面倾角大于自然坡角和开挖后坡角。根据钻孔资料,边坡表层为约 1 m 厚的残坡积层,下伏分别为 6~18 m 厚的强风化层、7~10 m 厚的中等风化层,揭露最深为微风化层。

1.2 边坡岩体的物理力学参数

对现场不同风化程度的石英片岩采样,进行密度测试、单轴抗压试验、三轴压缩试验,结合现场点荷载强度测试,得到石英片岩物理力学参数见表 1。对岩样进行结构面剪切试验,不同风化程度石英片

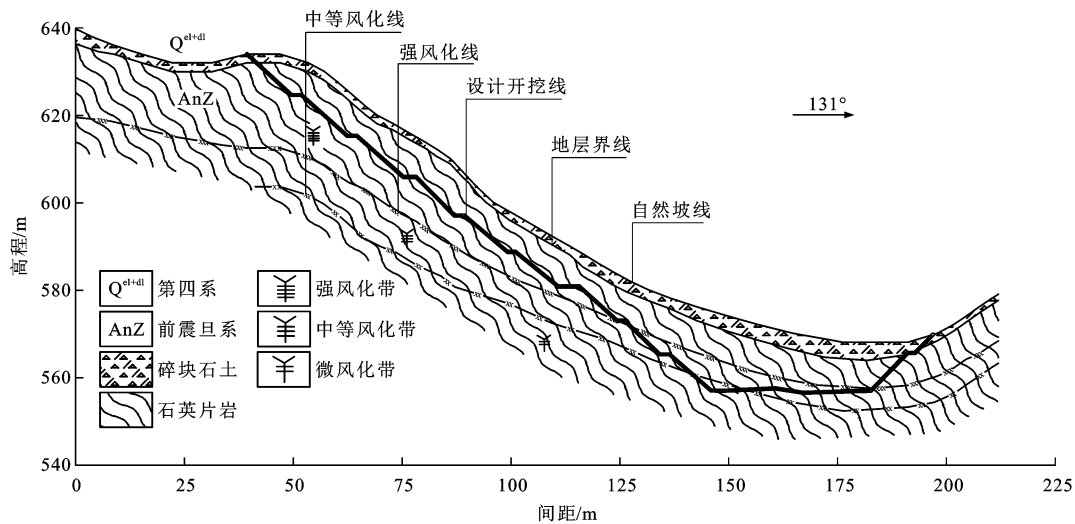


图 1 厦沙高速公路某段边坡工程地质剖面

Fig. 1 Engineering Geological Section of Slope in a Segment of Xia-Sha Expressway

岩片理力学强度建议值见表 2。

表 1 石英片岩物理力学参数

Tab. 1 Physical and Mechanical Parameters of Quartz Schists

物理力学参数	强风化 石英片岩	中等风化 石英片岩	微风化 石英片岩
重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	18.0	24.0	25.5
抗压强度/MPa	4.5	20.0	45.0
内聚力/MPa	4.1	8.3	14.0
内摩擦角/($^{\circ}$)	12.5	25.0	42.5
弹性模量/MPa	50	500	3 000
泊松比	0.30	0.28	0.25

表 2 石英片岩片理力学强度建议值

Tab. 2 Recommended Mechanical Strength Values
of Quartz Schists Foliation

强度指标	强风化 石英片岩	中等风化 石英片岩	微风化 石英片岩
内聚力/MPa	0.024 5	0.035 0	0.140 0
内摩擦角/($^{\circ}$)	22.05	31.50	34.65

1.3 边坡岩体的工程分类

根据《工程岩体分级标准》(GB/T 50218—2014)^[20]和 RMR 分类法^[21],石英片岩工程分类结果见表 3,可见强风化和中等风化石英片岩工程性质差,微风化石英片岩工程性质相对较好。

1.4 边坡可能的变形破坏形式

由试验参数和工程分类结果可见,石英片岩风化越严重,其岩块和片理面强度越低。微风化石英片岩片理面强度较高,相对而言不容易剪切破坏,强风化和中等风化石英片岩片理面在剪切力的作用下容易形成破裂面。中等风化与微风化石英片岩强度

表 3 石英片岩工程分类结果

Tab. 3 Engineering Classification Results of Quartz Schists

分类方法	分类结果		
	微风化 石英片岩	中等风化 石英片岩	强风化 石英片岩
《工程岩体分级标准》	Ⅲ	V	V
RMR 分类	Ⅲ	Ⅳ	V

差异较大,因此,易在其分界面上形成贯通的滑动面,与片理面的破裂面结合起来,导致岩质边坡失稳。

2 加锚 Sarma 法基本原理

图 2 为一个岩质边坡模型,边坡被结构面分割成 n 个块体单元。第 i 块体单元受力分析模型如图 3 所示。其中, K_c 为临界加速度系数; W_i 为作用在第 i 块体单元上的重力; E_i 、 E_{i+1} 分别为作用在第 i 块体单元左、右侧面正压力; X_i 、 X_{i+1} 分别为作用在第 i 块体单元左、右侧面剪切力; N_i 为作用在第 i 块体单元底面正压力; T_i 为作用在第 i 块体单元底面剪切力; C_i 为作用在第 i 块体单元上的锚索锚固力; α_i 为第 i 块体单元底面的倾角; δ_i 、 δ_{i+1} 分别为第

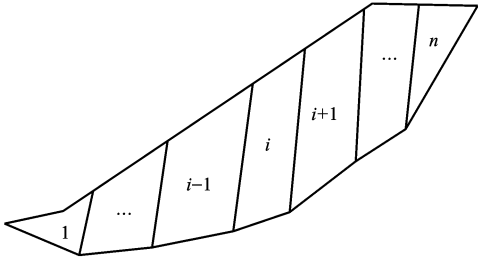
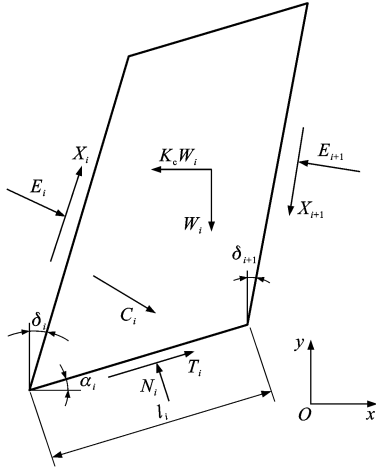


图 2 岩质边坡模型

Fig. 2 Lithological Slope Model

图3 第*i*块体单元受力分析模型Fig. 3 Mechanical Analysis Model of Slice *i*

i 块体单元左、右侧面与垂直面的夹角; l_i 为第 *i* 块体单元底面的长度。

根据第 *i* 块体单元极限平衡条件,垂直方向力平衡方程为

$$N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i + X_i \cos \delta_i - E_i \cos \delta_i - X_{i+1} \cos \delta_{i+1} + E_{i+1} \sin \delta_{i+1} = W_i + C_{iy} \quad (1)$$

水平方向力平衡方程为

$$-N_i \sin \alpha_i + T_i \cos \alpha_i + X_i \sin \delta_i + E_i \cos \delta_i - X_{i+1} \sin \delta_{i+1} + E_{i+1} \cos \delta_{i+1} = K_c W_i + C_{ix} \quad (2)$$

临界加速度系数 K_c 表达式为

$$K_c = \frac{a_n + a_{n-1}e_n + a_{n-2}e_n e_{n-1} + \dots + a_1 e_n e_{n-1} \dots e_3 e_2}{p_n + p_{n-1}e_n + p_{n-2}e_n e_{n-1} + \dots + p_1 e_n e_{n-1} \dots e_3 e_2} \quad (3)$$

$$a_i = \theta_i [W_i \sin(\varphi_i - \alpha_i) + R_i \cos \varphi_i + s_{i+1} \sin(\varphi_i - \alpha_i - \delta_{i+1}) - s_i \sin(\varphi_i - \alpha_i - \delta_i)] \quad (4)$$

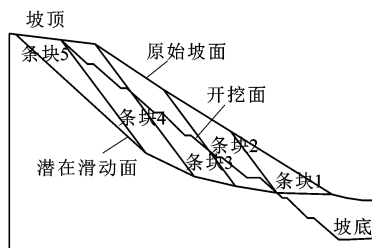
$$p_i = W_i \theta_i \cos(\varphi_i - \alpha_i) \quad (5)$$

$$e_i = \theta_i \frac{\cos(\varphi_i - \alpha_i + \varphi'_i - \delta_i)}{\cos \varphi'_i} \quad (6)$$

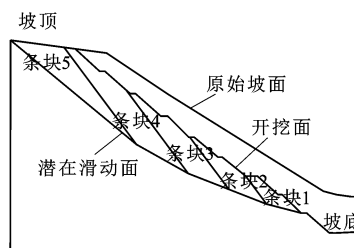
$$\theta_i = \frac{\cos \varphi'_{i+1}}{\cos(\varphi_i - \alpha_i + \varphi'_i - \delta_{i+1})} \quad (7)$$

$$R_i = c_i l_i - U_i \tan \varphi_i \quad (8)$$

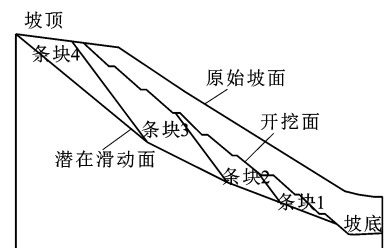
$$s_i = c'_i d_i - p_{wi} \tan \varphi'_i \quad (9)$$



(a) 前7级开挖潜在滑动面



(b) 第8级开挖潜在滑动面



(c) 第9级开挖潜在滑动面

图4 边坡计算剖面

Fig. 4 Computed Sections of Slope

式中: C_{ix} 和 C_{iy} 为 C_i 的水平和竖直分量; a_i 、 e_i 、 p_i 、 θ_i 、 s_i 及 R_i 均为中间变量; U_i 为作用在第*i*块体单元底面的水压力; c_i 为第*i*块体单元底面的内聚力; φ_i 为第*i*块体单元底面的内摩擦角; c'_i 、 c'_{i+1} 分别为第*i*块体单元左、右侧面的内聚力; φ'_i 、 φ'_{i+1} 分别为第*i*块体单元左、右侧面的内摩擦角; d_i 为第*i*块体单元左侧面的长度; p_{wi} 为作用在第*i*块体单元左侧面的水压力。

计算边坡稳定性系数时,先假设稳定性系数为 F_r ,将 c_i 、 φ_i 、 c'_i 、 φ'_i 分别用 c_i/F_r 、 φ_i/F_r 、 c'_i/F_r 、 φ'_i/F_r 替代,计算出所有的未知数和 K_c 值。当计算出的 $K_c=0$ 时,对应的 F_r 即为不考虑地震作用的边坡稳定性系数。

3 边坡稳定性及加固分析

3.1 计算模型简化

根据边坡工程地质剖面中岩体风化情况和工程分类结果假设可能的滑动面,经计算对比找出稳定性系数最低的潜在滑动面。前7级开挖潜在滑动面见图4(a),第8级开挖潜在滑动面见图4(b),第9级开挖潜在滑动面见图4(c)。残坡积层较薄,在模型中忽略不计。地下水埋深较大,故不考虑地下水的作用。

3.2 Sarma 法计算结果

不加锚索工况下,各级开挖边坡稳定性系数计算结果见表4。前两级开挖边坡稳定性系数比未开挖时略有提高,推测这是因为边坡开挖卸荷减轻条块自重,体系下滑力减小程度大于抗滑力的减小程度。开挖到第3级,边坡稳定性系数发生明显的下降,这是因为大量开挖卸荷后,条块底面正压力降低,导致抗滑能力减弱。

图5为不加锚索工况下前7级开挖过程中各条块底面正压力随开挖过程的变化曲线。越靠近边坡顶部,正压力受到开挖卸荷的影响越大,总体上处于快速减小的趋势;底部较为平稳,在开挖达到第5级时才受到明显影响。图5所示规律可解释表4中稳

表 4 不加锚索工况下各级开挖边坡稳定性系数

Tab. 4 Stability Coefficients of Slope in Excavation at Different Levels Without Anchor Cable

开挖程度	未开挖	第 1 级	第 2 级	第 3 级	第 4 级	第 5 级	第 6 级	第 7 级	第 8 级	第 9 级
稳定性系数	1.734	1.760	1.767	1.736	1.682	1.580	1.424	1.337	1.250	1.243

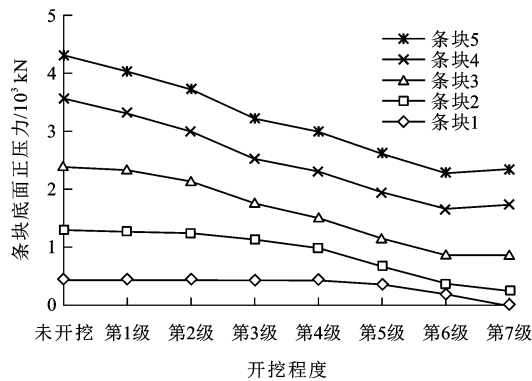
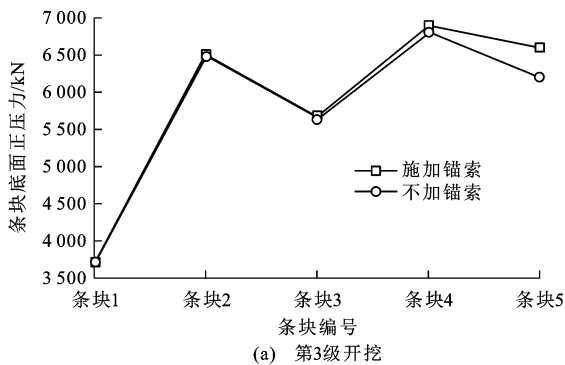


图 5 条块底面正压力随开挖过程变化

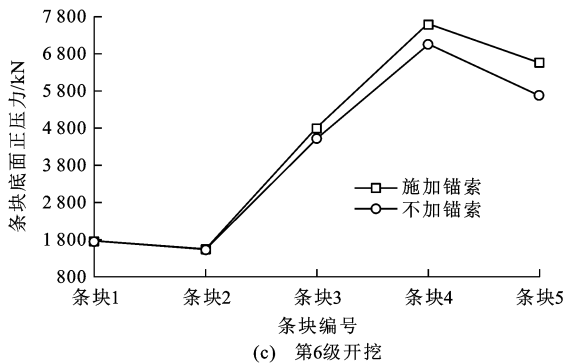
Fig. 5 Changes of Positive Pressure of Slice Bottom with Excavation Process

定性系数的变化趋势。

考虑到开挖至第 3 级后边坡稳定性系数明显持续下降,至第 9 级时降到 1.243,小于《建筑边坡工程技术规范》^[22]规定的边坡稳定安全系数 1.35,应对边坡进行处理。本工程拟采取边开挖边加固治理措施,在第 3、5、6、8 级开挖后分别设计两排锚索,布置间距 2 m,锚索长 28 m,锚固段长 12 m,入射角



(a) 第3级开挖



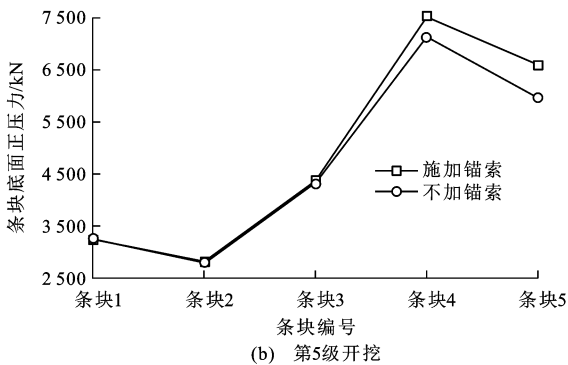
(c) 第6级开挖

30°,设计锚固力 700 kN。

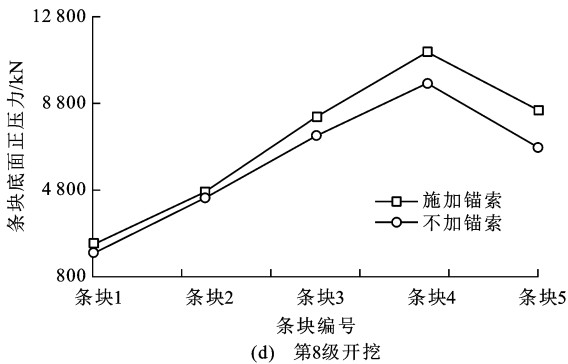
利用本文施加锚索岩质边坡 Sarma 法,将施加锚索工况下第 3、5、6、8 级各条块底面正压力和剪切力与不加锚索工况进行对比,结果分别见图 6、7。从第 3 级到第 6 级开挖,施加锚索使得条块 5、条块 4、条块 3 底面的正压力显著增大(图 6),可以提高条块底面的抗滑力。施加锚索降低了条块底面受到的剪切力,且随着开挖加固的深入,这种降低表现得越明显(图 7)。以条块 1 为例,第 3 级开挖施加锚索使剪切力降低 65 kN,第 5 级开挖降低 147 kN,第 6 级开挖降低 155 kN。

将施加锚索工况下第 3、5、6、8 级各条块右侧正压力和剪切力与不加锚索工况对比,结果分别见图 8、9。施加锚索增大条块底面的抗滑力,限制了上部条块的滑动趋势,减小其对下部条块的挤压和相对错动,因此,施加锚索后条块右侧正压力和剪切力都不同程度地减小。条块间正压力减小使得条块下滑力减小,条块间剪切力减小使得条块间不易发生剪切破坏。

综上所述,对某个条块而言,施加锚索可以提高



(b) 第5级开挖



(d) 第8级开挖

图 6 施加锚索和施加锚索工况下条块底面正压力对比

Fig. 6 Comparisons of the Positive Pressure of Slice Bottom with and Without Anchor Cable

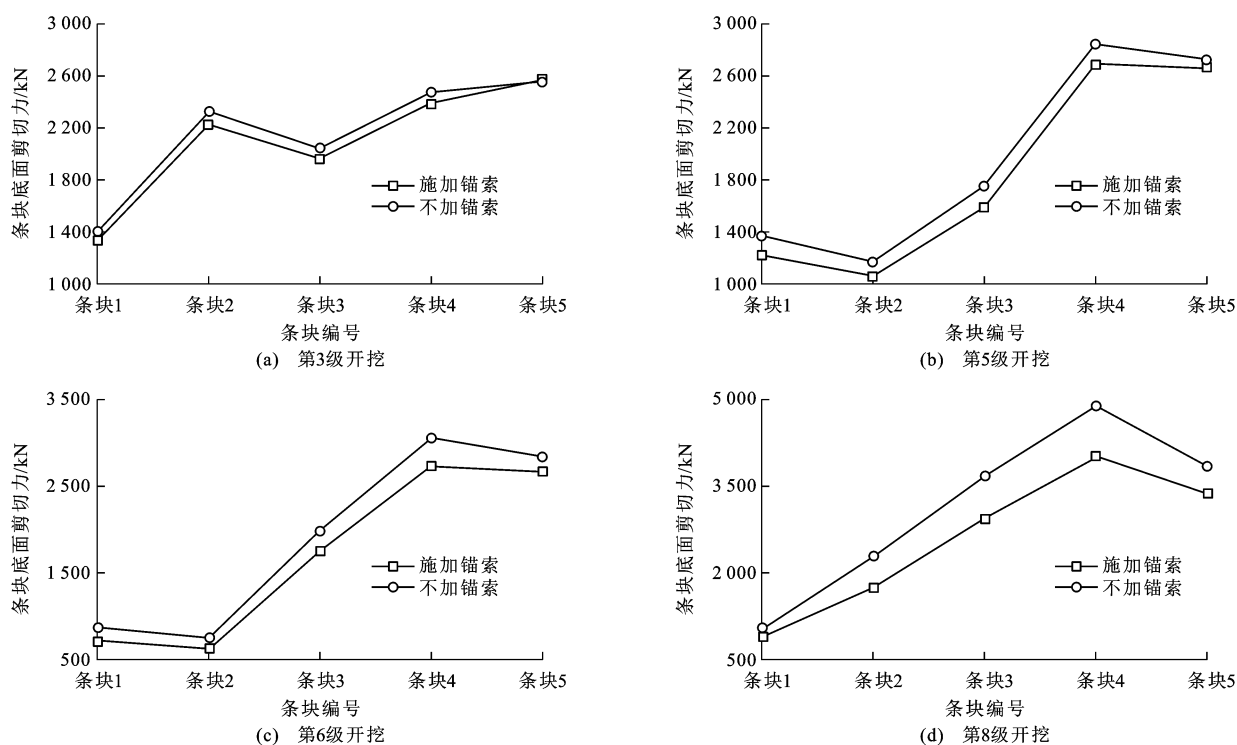


图 7 施加锚索和不加锚索工况下条块底面剪切力对比

Fig. 7 Comparisons of the Shear Force of Slice Bottom with and Without Anchor Cable

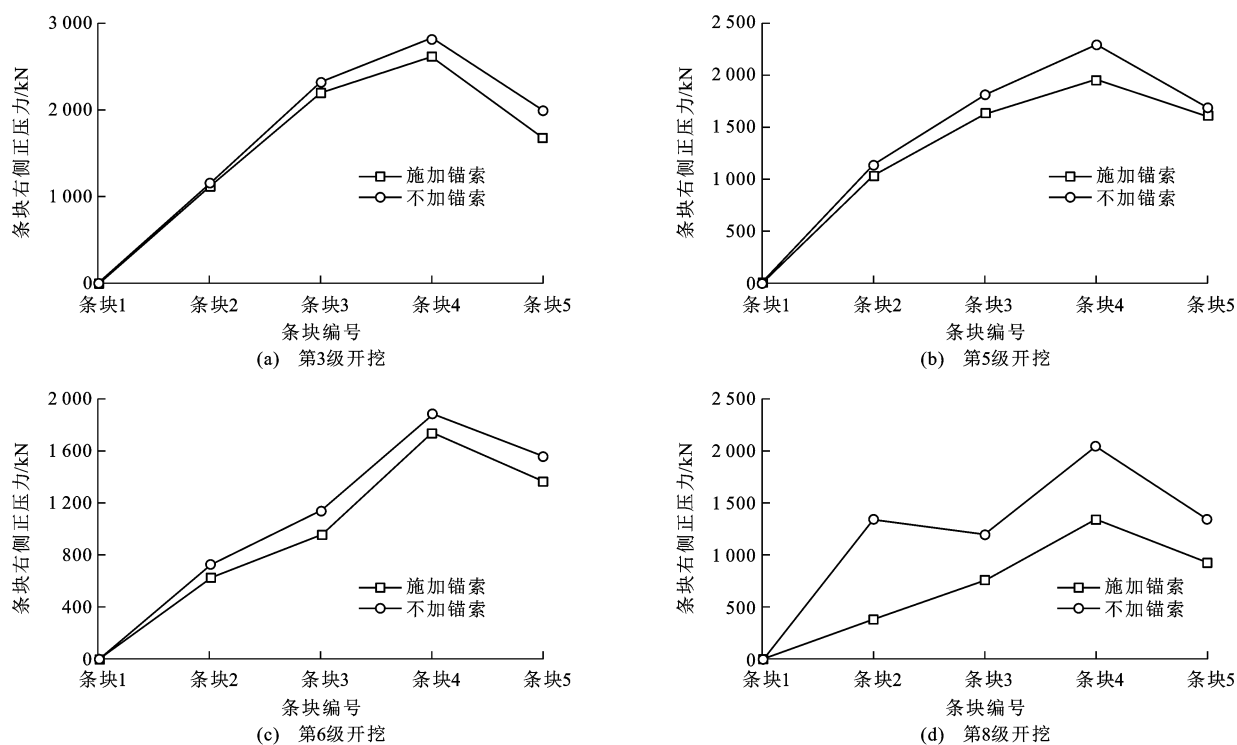


图 8 施加锚索和不加锚索工况下条块右侧正压力对比

Fig. 8 Comparisons of the Positive Pressure at the Right of Slice with and Without Anchor Cable

底面抗剪强度,降低底面和侧面剪切力、条块下滑力,从而达到加固岩质边坡的目的。

将计算出的施加锚索后边坡稳定性系数与未施加锚索稳定性系数进行对比(图 10),结果显示不加

锚索工况下,最低稳定性系数为 1.243,施加锚索后的最低稳定性系数提高至 1.630,大于《建筑边坡工程技术规范》^[22]规定的边坡稳定安全系数(1.35)的要求。施加锚索使得开挖边坡稳定性系数显著提

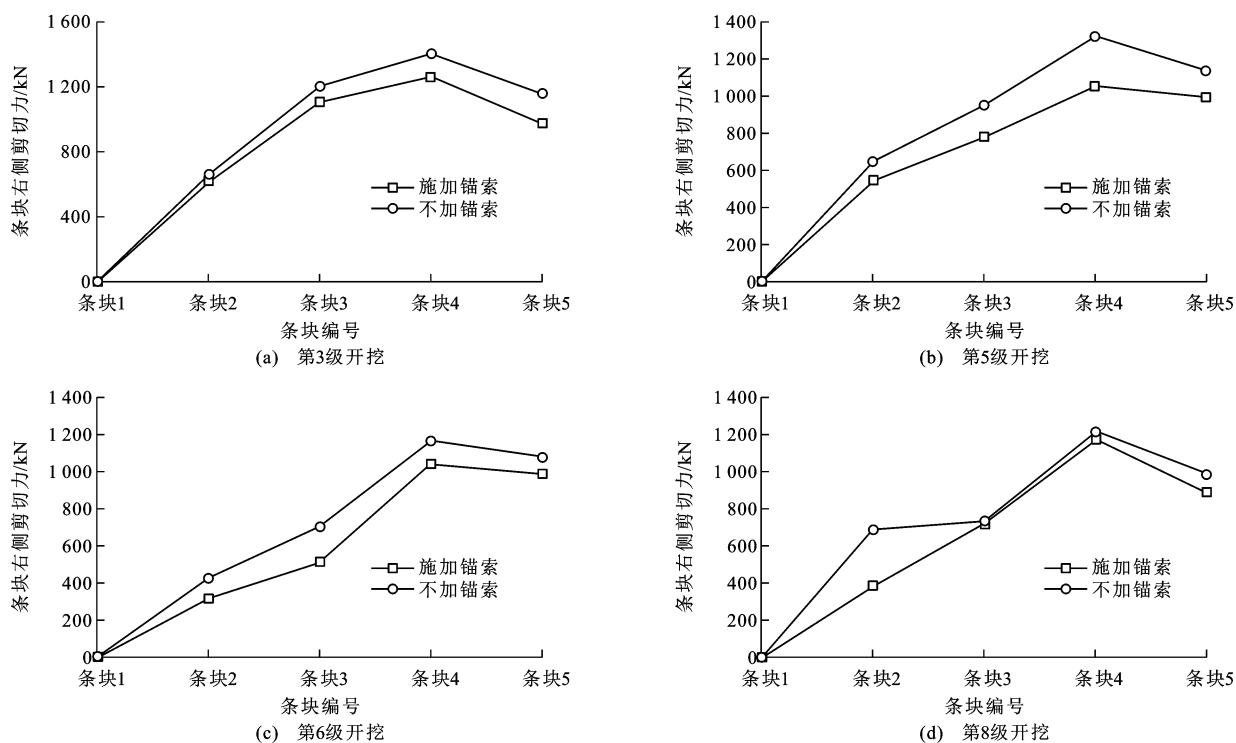


图9 施加锚索和不加锚索工况下条块右侧剪切力对比

Fig. 9 Comparisons of the Shear Force at the Right of Slice with and Without Anchor Cable

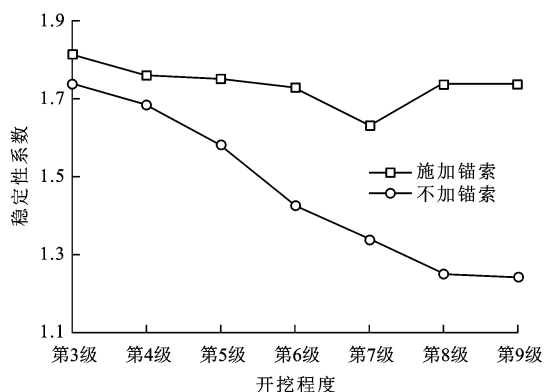


图10 施加锚索与不施加锚索稳定性系数对比

Fig. 10 Comparison of the Stability Coefficients with and Without Anchor Cable

高,说明系统锚杆穿过潜在滑动面与滑床基岩结合作用,提高了边坡岩体的抗剪强度,降低了软弱结构面之间的剪切力,使得边坡整体更稳定。

4 结 语

(1)岩质边坡开挖卸荷使条块底面正压力降低,从而影响到抗滑力;当抗滑力减小幅度大于下滑力减小幅度时,边坡稳定性会降低。

(2)施加锚索能够增大条块底面的正压力,提高条块底面抗剪强度;边坡上某个条块加固稳定对下部条块挤压作用力降低,使下部条块下滑力降低。

上述两方面综合作用提高了边坡的整体稳定性。

(3)厦沙高速公路 ZK113+630~ZK113+805 岩质边坡开挖会降低其稳定性。当开挖揭露到微风化石英片岩时,形成 7 级边坡,边坡稳定性系数降低到 1.243,施加锚索加固后边坡最小稳定性系数提高至 1.630,加固效果显著,达到规范要求。

参考文献:

References:

- [1] 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.
- [2] SARMA S K. Stability Analysis of Embankments and Slopes[J]. Geotechnique, 1973, 23(3): 423-433.
- [3] HE L, TIAN G, ZHAO Z Y, et al. Rock Slope Stability and Stabilization Analysis Using the Coupled DDA and FEM Method; NDDA Approach[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(6): 04018044.
- [4] HARABINOVA S. Assessment of Slope Stability on the Road[J]. Procedia Engineering, 2017, 190: 390-397.
- [5] SUN J P, NING Y J, ZHAO Z Y. Comparative Study

- of Sarma's Method and the Discontinuous Deformation Analysis for Rock Slope Stability Analysis[J]. Geomechanics and Geoengineering, 2011, 6(4): 293-302.
- [6] 王东玮. 基于 Matlab 的土坡稳定性三维极限平衡法程序开发及应用[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- WANG Dong-wei. Programming Development and Application of Three Dimensional Limit Equilibrium Method for Slope Stability Based on Matlab[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [7] 黄波. 爆破振动对边坡稳定性影响及控制技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2017.
- HUANG Bo. Research on Influence of Blasting Vibration on Slope Stability and Control Technology [D]. Guiyang: Guizhou University, 2017.
- [8] 曾程. 利用 Sarma 法进行路堑高边坡稳定性分析[J]. 建筑技术开发, 2016, 43(5): 5, 7.
- ZENG Cheng. High Side Slope Stability Analysis Method Utilizing Sarma [J]. Building Technology Development, 2016, 43(5): 5, 7.
- [9] 高连通, 晏鄂川, 谢良甫. 考虑地下水作用的 Goodman-Bray 方法改进及应用[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(2): 78-83.
- GAO Lian-tong, YAN E-chuan, XIE Liang-fu. Improved Goodman-Bray Method in Consideration of Groundwater Effect[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(2): 78-83.
- [10] 田延哲, 徐拴海. 基于萨尔玛法的露天矿边坡稳定性评价[J]. 露天采矿技术, 2015, 30(5): 5-7.
- TIAN Yan-zhe, XU Shuan-hai. Slope Stability Evaluation Based on Sarma Method in Open-pit Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2015, 30(5): 5-7.
- [11] 熊将, 王涛, 盛谦. 库区边坡稳定性计算的改进 Sarma 法[J]. 岩土力学, 2006, 27(2): 323-326.
- XIONG Jiang, WANG Tao, SHENG Qian. Improved Sarma Method for Computing Slope Stability in Reservoir Region[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(2): 323-326.
- [12] 冯君, 宋胜武, 周德培, 等. 考虑边坡开挖中地应力释放的改进 Sarma 法[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(1): 50-53.
- FENG Jun, SONG Sheng-wu, ZHOU De-pei, et al. Improved Sarma Method with Considering the Release of Earth Stress during Slope Excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(1): 50-53.
- [13] 苏付安, 盛松涛. 改进 Sarma 法在岩质高边坡开挖稳定分析中的应用[J]. 人民长江, 2010, 41(10): 42-44.
- SU Cun-an, SHENG Song-tao. Improved Sarma Method and Its Application in Analysis of Stability of Rock High Slope Excavation[J]. Yangtze River, 2010, 41(10): 42-44.
- [14] 周志军, 牛涌, 张铁柱. 基于改进 Sarma 法的岩质边坡稳定性分析[J]. 交通运输工程学报, 2013, 13(1): 15-19.
- ZHOU Zhi-jun, NIU Yong, ZHANG Tie-zhu. Stability Analysis of Rock Slope Based on Improved Sarma Method[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2013, 13(1): 15-19.
- [15] 孙少锐, 吴继敏, 宋京雷. 基于三维地质建模和改进 Sarma 法的边坡稳定性评价方法[J]. 勘察科学技术, 2013(6): 1-6.
- SUN Shao-rui, WU Ji-min, SONG Jing-lei. Evaluation Method of Slope Stability Based on 3D Geological Model Construction and Modified Sarma Method[J]. Site Investigation Science and Technology, 2013(6): 1-6.
- [16] 郑文, 艾熙昭. Sarma 法中非饱和计算功能的实现探讨及应用评价[J]. 价值工程, 2014(28): 74-76.
- ZHENG Wen, AI Xi-zhao. The Realization and the Application Evaluation of the Unsaturated Calculation in Sarma Method[J]. Value Engineering, 2014(28): 74-76.
- [17] 谯礼. 基于改进 Sarma 法的土质路堑边坡可靠度研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- QIAO Li. The Reliability Study of Soil Cutting Slope Based on the Modified Sarma Method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [18] 徐昱. 节理岩体连通率计算与应用研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2016.
- XU Yu. Study on the Calculation and Application of the Persistent Ratio in Joined Rock[D]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2016.
- [19] 符贵军, 任伟中, 陈浩, 等. Sarma 法的改进及在边坡稳定性研究中的应用[J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43(6): 113-119.
- FU Gui-jun, REN Wei-zhong, CHEN Hao, et al. Improvement of Sarma Method and Its Application of Investigation of Slope Stability[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2017, 43(6): 113-119.
- [20] GB/T 50218—2014, 工程岩体分级标准[S].
- GB/T 50218—2014, Standard for Engineering Classification of Rock Mass[S].
- [21] BIENIAWSKI Z T. Determining Rock Mass Deformability: Experience from Case Histories[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1978, 15(5): 237-247.
- [22] GB 50330—2013, 建筑边坡工程技术规范[S].
- GB 50330—2013, Technical Code for Building Slope Engineering[S].