

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2021.03-13

破碎岩质边坡锚墩式主动防护网设计方法

吴 兵^{1,2}, 梁 瑶¹, 赵晓彦², 唐晓波¹, 吴晓春¹, 罗天成²

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017; 2. 西南交通大学地球科学与环境工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 现有公路(铁路)工程中的高陡岩质边坡,特别是风化作用强烈地区的岩质边坡,浅表层岩体多呈碎裂状。采用传统 SNS 主动防护网加固后,仍经常产生局部失稳、掉块等现象,部分甚至引起整体失稳。因此,针对破碎岩质边坡的加固防护迫切需要进行结构及其设计方法改进。本文提出一种锚墩式主动防护网新型组合结构及其受力计算和设计方法,可有效防止碎裂岩质边坡坡面破坏,同时保证边坡整体稳定。工程应用表明,该组合防护结构具有良好的破碎岩质边坡加固效果,值得在工程建设中推广应用。

关键词: 破碎岩质边坡; 锚墩; 主动防护网; 设计方法

中图分类号: P694;U213.1⁺58

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2021)03-0101-08

Design method of anchor pier type active protective net on fractured rock slopes

WU Bing^{1,2}, LIANG Yao¹, ZHAO Xiaoyan², TANG Xiaobo¹, WU Xiaochun¹, LUO Tiancheng²

(1. *Sichuan Communication Surveying & Design Institute, Co. Ltd., Chengdu, Sichuan 610017, China*; 2. *Faculty of Geosciences and Environment Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China*)

Abstract: The shallow surface rock mass of the high and steep rock slopes in the existing highway (railway) projects, especially with severe weathering slope rock mass, is mostly cataclastic. After the traditional SNS active protective net is adopted to reinforce the slope, the rock slope has been locally unstable or subject to overall instability. Therefore, it is necessary to improve the structure and the corresponding design method for the reinforcement and protection of cataclastic rock slope. A new type of combination structure of anchor-pier active protection net as well as the stress calculation and design method is put forward, which can effectively prevent the destruction of cataclastic rock slope surface and ensure the overall stability of the slope. It can be seen from the engineering application that the combined protective structure has good reinforcing effect on the cataclastic rock slope, and it could be applied in the engineering construction.

Keywords: fractured rock slope; anchorage pier; active protection net; design method

0 引言

随着我国公路、铁路等基础设施建设的推进,工程中遇到了大量的岩质边坡崩塌破坏、风化剥落等问题,尤其在西部山区国(省)干道的升级改造过程中,这种现

象最为严重^[1-5]。由于山区道路地形地质复杂,地质构造运动剧烈,表层岩体风化剥蚀强烈,多呈碎裂状态。在地震、暴雨及工程开挖卸荷扰动等因素共同作用下,边坡整体稳定性和浅表层稳定性问题共同构成影响道

收稿日期: 2020-07-04; 修订日期: 2020-12-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41672295); 四川省交通运输科技立项支持项目(2015B1-1); 中国铁路总公司科技研究开发计划系统性重大项目(P2018G047)

第一作者: 吴 兵(1986-),男,湖南岳阳人,博士研究生,工程师,主要从事公路工程、岩土工程的生产与科研工作。E-mail: 245603702@qq.com

通讯作者: 赵晓彦(1977-),男,河南延津人,教授,博导,主要从事边坡稳定性及边坡加固方面的研究。E-mail: xyzhao2@swjtu.cn

路运营安全的重要因素。

学者们对该类岩质边坡变形破坏开展了大量研究,贺凯等^[6]针对高陡岩体底部压裂失稳模式,提出了考虑底部薄弱区域损伤演化的边坡整体稳定性评价方法。张科等^[7]基于运动单元法对岩质边坡复合型破坏机制进行研究,表明,岩桥位置、结构面贯通度和结构面倾角是控制力学行为的三个主要因素。罗洪成等^[8]利用现场勘测和数值模拟方法分析了富水破碎岩质边坡的滑坡成因和特征,指出岩体后缘拉裂引起前部剪切破坏,最后导致边坡整体失稳。张广甫等^[9]基于贯通率法对危岩主控结构面主要强度参数、取值进行了研究。严豪等^[10]基于 Voronoi 节理模型分析了碎裂岩质边坡破坏是从坡顶以一定深度向坡脚贯通发展的。徐前卫等^[11]通过室内模型试验总结出坡顶岩体张拉破坏与坡脚岩体压剪破坏共同造成直立软弱破碎岩质边坡塌方,具有渐进性特征。霍宇翔等^[12]通过对碎裂岩质边坡监测表明,稳定性由多组相交结构面控制,受结构面产状及分布规律影响较大。曹兴松^[13]则通过分析碎裂岩质边坡病害特征,总结出边坡破坏模式、形成机制和失稳过程,指出边坡高陡、岩体风化及降雨软化等是主要影响因素。

由此可知,目前对岩质边坡研究,多集中于边坡整体稳定性加固防护方面,设计治理也多采用框架或垫墩锚索等^[14-16]。针对边坡浅表层岩土体失稳,多在坡表采用与短锚杆相结合的 SNS 主动防护网进行加固^[17-19](图 1)。



图 1 汶川—马尔康高速汶川出口处碎裂岩质陡坡

Fig. 1 Cataclastic rock steep slope at Wenchuan exit of Wenchuan—Barkam expressway

对破碎岩质边坡浅表层岩体防护,通常采用 SNS 主动防护网^[17-18]。即通过 3~4 m 长的短锚杆将主动防护网固定于坡面上,通常锚杆拉力不超过 50 kN。实际上,此类短锚杆并不能为边坡提供足够的锚固力,一

旦坡体发生整体失稳,难以起到加固作用,并不是严格意义上的主动防护。现阶段对 SNS 主动防护网的研究主要为工程应用介绍及防护效果评价,对其防护作用机理及受力特点也多局限于单元网格结构受力分析^[18-20]。

综上,目前针对深层加固的锚索+浅层防护的 SNS 主动防护网的联合协同受力研究较少。基于此,本文提出锚墩式主动防护网新型结构设计方法,以有效克服山区破碎岩质边坡加固防护难题。

1 锚墩式主动防护网组合结构

1.1 锚墩式主动防护网结构组成

锚墩式主动防护网的突出特点在于:在主动防护网结构的节点处设置垫墩锚索代替传统的短锚杆,以实现该结构对边坡的深层加固(图 2)。

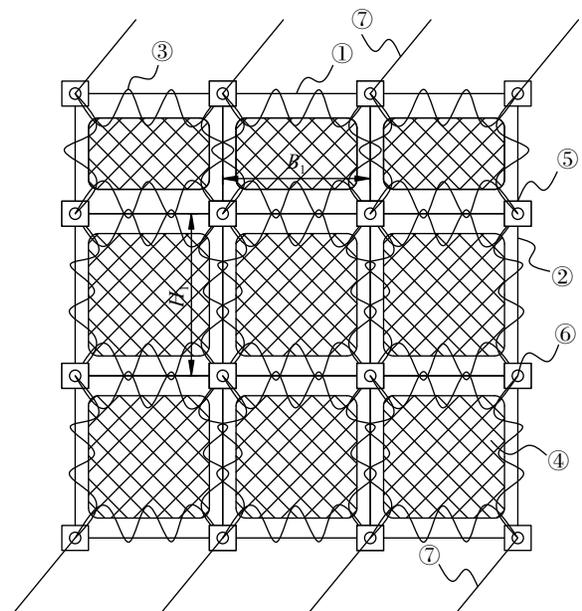


图 2 锚墩式主动防护网平面结构图

Fig. 2 Anchor-pier active protection net structure plan

其结构主要由以下部分组成:横向支撑绳①、纵向支撑绳②、缝合绳③、高强度钢绳网④、锚墩⑤、加固锚索⑥及固定短锚杆⑦。

其特征是:设置于坡顶与坡脚处的固定短锚杆主要起定位高强度钢绳网的作用。设置于网格节点处的锚墩和加固锚索,锚墩与网格节点处的纵向支撑绳、横向支撑绳形成固定连接,加固锚索则穿越坡体内潜在深层滑动面锚入稳定基岩体中,主要起到深层加固作用。高强度钢绳网呈曲面状铺设于坡面,通过缝合绳与网格周边的纵向支撑绳、横向支撑绳连接,并分隔成网格状。通过向张拉缝合绳与支撑绳施加作用力对高强度钢绳

网进行预张拉,主要起到表层防护作用。

工程应用中的支撑绳与缝合绳应选用满足工程使用年限的钢丝绳(如磷化涂层钢丝绳),当需对锚墩间主动防护网单元进行破损置换或修补时,可通过解开缝合绳将主动防护网与支撑绳进行分离。

为防止水泥锚墩与主动防护网中支撑绳之间因压缩产生磨损及切割作用^[21],在锚墩接触面处单独设立双层硬橡胶垫片或双层尼龙垫片(图3)。在支撑绳受力时,通过给予足够的变形空间,使得锚墩与支撑绳之间能够变形协调,保护主动防护网结构不产生切割破坏。

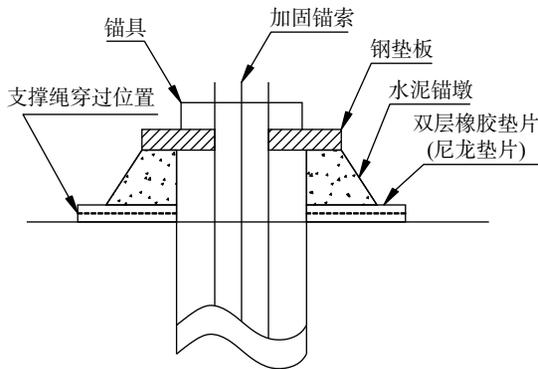


图3 锚墩与主动网接触处示意图

Fig. 3 Diagram of contact between anchor pier and active protection net

1.2 锚墩式主动防护网加固机理

加固锚索前端通过锚墩作用于坡面之上,后端则穿越坡体内潜在深层滑动面,锚入稳定基岩体之中。通过对锚索施加预应力进行边坡加固,可有效提高边坡稳定性,防止产生整体失稳破坏。

高强度钢丝绳网覆盖岩质边坡坡面,利用钢丝绳的预张拉作用力及粗糙坡面之间的摩擦力,可阻止破碎岩质边坡锚墩间岩土体向外侧的移动,有效的加固区域内边坡浅表层破碎块体,防止发生局部块体崩落。

由此可知,锚墩式主动防护网能同时解决边坡整体失稳与浅表层失稳问题,是山区道路破碎岩质边坡工程中行之有效的主动防护结构。

2 锚墩式主动防护网设计方法

2.1 设计计算模型

在锚墩式主动防护网中以相邻的4个锚墩所围成的封闭区域作为研究对象,将其视为一个防护网格单元(图2)。在进行锚墩式主动防护网设计时,根据边坡浅表层岩体情况,在计算表层岩土体失稳带来的锚索轴力增量时,可按以下两种情况进行考虑。

(1)若单元格内有可探明结构和力学参数的危岩体,则可按图4所示力学模型进行计算。设危岩体主控结构面水平夹角为 $\beta_1(^{\circ})$,黏聚力为 $c_1(\text{kN}/\text{m}^2)$,内摩擦角为 $\varphi_1(^{\circ})$,竖向高度为 $H_1(\text{m})$,岩体单宽自重为 $G_1(\text{kN}/\text{m})$ 。结构面处稳定岩体对危岩体的单宽作用力为 $N_1(\text{kN}/\text{m})$ 。主动防护网加固浅表层岩体的分布力为 $q_1(\text{kN}/\text{m}^2)$,由于钢绳网为柔性结构,可将其等效于一个水平夹角为 $\theta_1(^{\circ})$ 的单宽合力 $F_1(\text{kN}/\text{m})$ 。破碎岩质边坡,具有高陡、易风化等特点,在岩体风化作用下结构面裂隙不断扩展,边坡失稳主要表现为产生水平向外的位移^[22-25],为了简化分析,可取 θ_1 为 0° 。

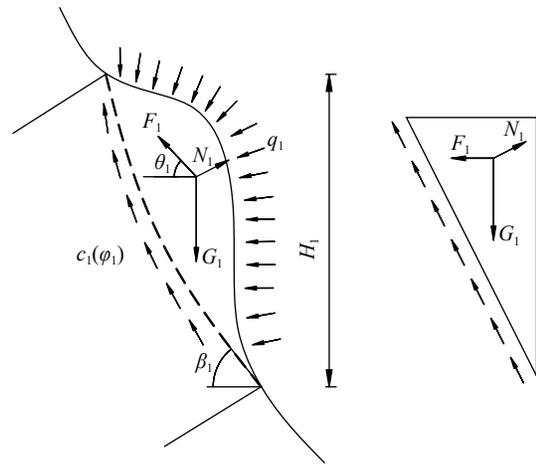


图4 单元格内危岩有可探明结构时边坡力学模型

Fig. 4 Mechanical model of slope with exploitable dangerous rock in the grid

根据危岩体稳定性计算方法,安全系数 F_s ,可按公式(1)进行计算。

$$F_s = \frac{F_1 \cos \beta_1 + (G_1 \cos \beta_1 + F_1 \sin \beta_1) \tan \varphi_1 + c_1 \frac{H_1}{\sin \beta_1}}{G_1 \sin \beta_1} \quad (1)$$

式中: c_1 ——危岩体结构面黏聚力/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-2})$;
 φ_1 ——危岩体结构面内摩擦角/ $(^{\circ})$;
 β_1 ——危岩体主控结构面水平夹角/ $(^{\circ})$;
 H_1 ——危岩体竖向高度/ m ;
 G_1 ——危岩体单宽自重/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$;
 F_1 ——钢绳网单宽作用力合力/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-1})$ 。

按规范要求确定安全系数 F_s 后,钢绳网单宽作用力合力 F_1 ,可按式(2)进行反算:

$$F_1 = \frac{F_s G_1 \sin^2 \beta_1 - G_1 \sin \beta_1 \cos \beta_1 \tan \varphi_1 - c_1 H_1}{\sin \beta_1 \cos \beta_1 + \sin^2 \beta_1 \tan \varphi_1} \quad (2)$$

根据静力平衡条件可知,主动防护网通过锚索提供

的锚固力和边坡浅表层岩土体对主动防护网的作用力是一对平衡力。如图 2 所示,设锚索间距为水平间距 $B_1(\text{m}) \times$ 沿坡面竖向间距 $H_1(\text{m})$, 考虑到每个单元格内有 4 束锚索共同作用(每束锚索为 4 个单元格提供锚固力),由图 5 可知,每束锚索由边坡浅表层失稳带来的轴力增量 $\Delta f_1(\text{kN})$,可按公式(3)进行计算。

$$\Delta f_1 = \frac{1}{4} \cdot \frac{B_1 F_1}{\cos \alpha_1} \cdot 4 = \frac{B_1 F_1}{\cos \alpha_1} \quad (3)$$

式中: α_1 ——锚索的锚固角/(°);

B_1 ——锚索水平间距/m。

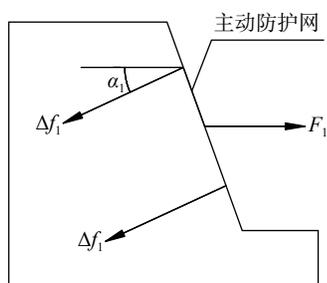


图 5 锚索因浅表层失稳产生的轴力增量
Fig. 5 Axial force increment of anchor rope due to shallow surface instability

(2)若单元格内岩体无明显主控结构面或为坡面较完整的高陡切方岩质边坡,则可按图 6 所示力学模型进行计算。通过在网格节点的锚墩位置处作两条与锚索夹角为 $45^\circ + \varphi_2/2$ 的作用线,由坡面线与两条作用线所围成区域即为边坡浅表层潜在不稳定滑体部分。

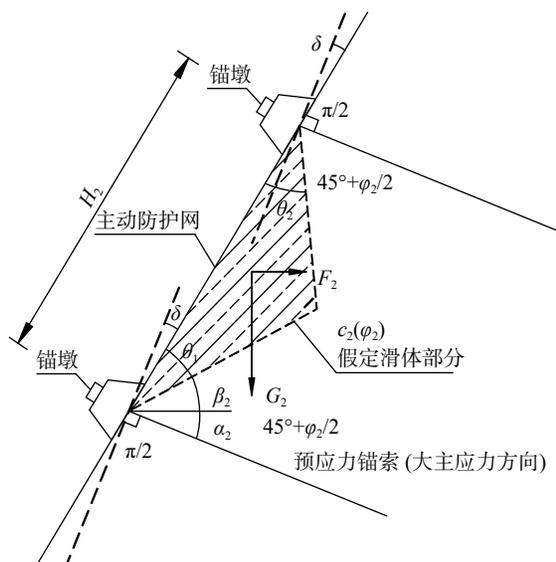


图 6 单元格内无明显危岩体时边坡力学模型
Fig. 6 Slope mechanical model in the grid without significant dangerous rock mass

此时,可参照地基基础设计计算,通过对锚索施加

预应力,锚墩会对坡面产生作用力,可将锚墩作为一个方形基础考虑。如图 7(a)所示,根据硬质土整体剪切破坏模式,当荷载达到某一数值时,基础边缘土体先发生剪切破坏,随着荷载增加,破坏区不断扩大,最后形成连续滑动面,导致基底土体向四周挤出,产生整体失稳破坏。如图 7(b)所示,地基中 I 区为三角形压密区,该区岩土体直接受压并向两侧挤压,称为主动区; II 区为被动变形区,该区岩土体受 I 区挤压产生被动变形,称为被动区;基础底部外侧 III 区,由于有临空面为三角形极限平衡区。根据摩尔应力圆图(图 7c), I 区与 II 区分界面 AC 和 BC 与基础底面 AB(大主应力作用面)的夹角为 $45^\circ + \varphi_2/2$; II 区与 III 区分界面 AE(DE)和 BE'(D'E')与临空面 AD、BD'(小主应力作用面)的夹角为 $45^\circ - \varphi_2/2$ 。

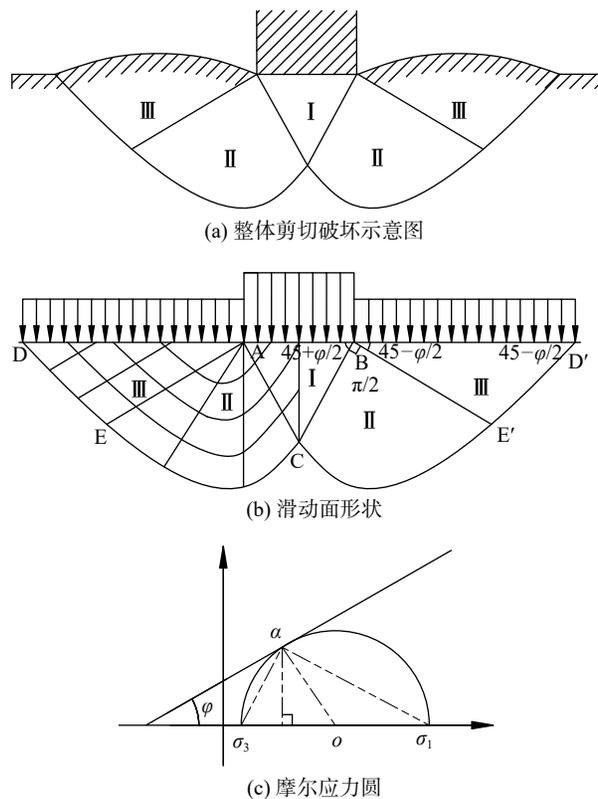


图 7 硬质土整体剪切破坏模式
Fig. 7 General shear failure mode for hard soils

根据以上分析可知,将锚墩视作方形基础后,锚索锚固力作用方向即为大主应力方向。如图 6 所示,由坡面线与锚索夹角为 45° 的两条作用线所围成的是锚墩外侧受挤压的潜在不稳定岩土体区域,即为图 7(b)中的 III 区。在进行锚墩式主动防护网设计时,需考虑该区域浅表层岩土体失稳带来的锚索轴力增量影响。

划定潜在滑体范围后(图 6),各参数设置及简化计算假定与情况 1 相同,同理安全系数 F_s 计算公式为:

$$F_s = \frac{F_2 \cos \beta_2 + (G_2 \cos \beta_2 + F_2 \sin \beta_2) \tan \varphi_2 + c_2 L_2}{G_2 \sin \beta_2} \quad (4)$$

其中: $L_2 = \frac{H_2}{2} \left(\frac{1}{\cos \theta_1} + \frac{1}{\cos \theta_2} \right)$,

$$\theta_1 = 45^\circ - \frac{\varphi_2}{2} - \delta, \theta_2 = 45^\circ - \frac{\varphi_2}{2} + \delta;$$

式中: F_2 ——钢绳网单宽作用力合力/(kN·m⁻¹);

β_2 ——潜在滑体滑动面水平夹角/(°);

G_2 ——潜在滑体单宽自重/(kN·m⁻¹);

φ_2 ——潜在滑面内摩擦角/(°);

c_2 ——潜在滑面黏聚力/(k·Nm⁻²);

L_2 ——潜在滑体滑动面长度/m;

H_2 ——潜在滑体沿坡面竖向高度/m;

θ_1 ——下部潜在滑面与坡面的夹角/(°);

θ_2 ——上部潜在滑面与坡面的夹角/(°);

δ ——坡面线与锚索法向线的夹角/(°)。

按规范要求确定安全系数 F_s 后,钢绳网单宽作用力合力 F_2 ,可按式(4)进行反算:

$$F_2 = \frac{F_s G_2 \sin^2 \beta_2 - G_2 \sin \beta_2 \cos \beta_2 \tan \varphi_2 - c_2 L_2 \sin \beta_2}{\sin \beta_2 \cos \beta_2 + \sin^2 \beta_2 \tan \varphi_2} \quad (5)$$

同理可得每束锚索由边坡浅表层失稳带来的轴力增量 Δf_2 (kN)的计算公式:

$$\Delta f_2 = \frac{1}{4} \cdot \frac{B_2 F_2}{\cos \alpha_2} \cdot 4 = \frac{B_2 F_2}{\cos \alpha_2} \quad (6)$$

式中: α_2 ——锚索的锚固角/(°);

B_2 ——锚索水平间距/m。

由上可知,锚墩式主动防护网加固设计关键在于确定浅表层潜在不稳定岩土体范围。根据边坡稳定性设计要求,计算出加固该区域岩土体的所需的锚固力。并将该部分锚固力计入主体防护结构,如预应力锚索的锚固力设计中。

2.2 设计计算步骤

为使锚墩式主动防护网新型组合结构加固边坡实现受力协调,提出以下设计计算步骤(图8)。

(1) 边坡加固适用性论证

根据边坡地质条件勘察报告,评估锚墩式主动防护网加固的适用性。

(2) 边坡稳定性分析

根据规范要求的设计安全系数,通过对预加固边坡进行稳定性分析计算,获得以下结果:

① 确定锚索布置及初始锚固力 P_0

通过边坡整体滑动稳定性分析,计算剩余下滑力,确定锚索布设位置、间距、锚固角及初始锚固预应力 P_0 。

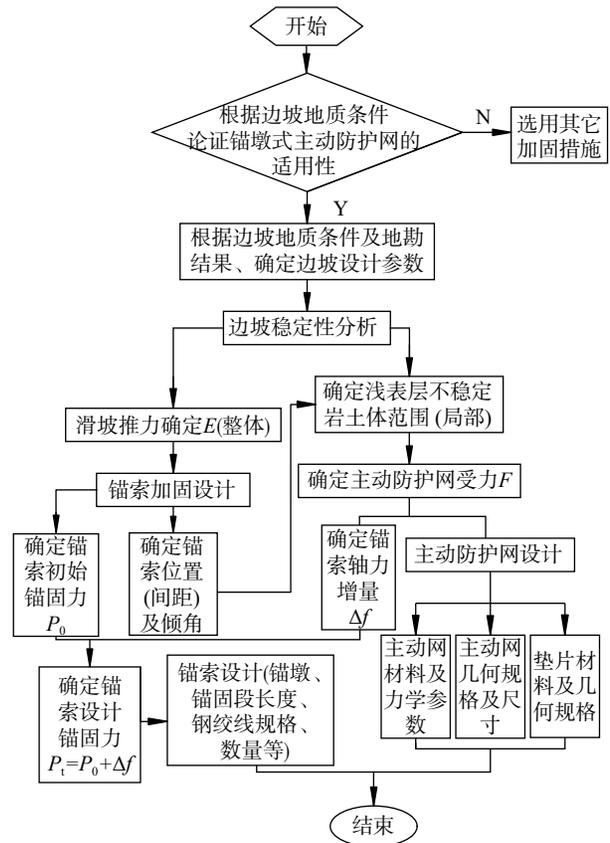


图8 锚墩式主动防护网设计流程图

Fig. 8 Designflow chart of anchor-pier active protection net

② 确定主动防护网受力 F

通过边坡浅表层地质情况结合锚索布置,确定每个防护单元内岩土体浅表层滑动破坏区域,进行坡面稳定性分析,计算主动防护网结构受力 F 。

(3) 计算锚索预应力 P_i

通过主动防护网受力 F ,计算作用在锚索上的轴力增量 Δf ,确定锚索预应力 $P_i = P_0 + \Delta f$ 。

(4) 锚墩式主动防护网设计

在锚索布置间距和主动防护网单元尺寸大小,结构受力等情况明确的条件下进行锚墩式主动防护网设计。

3 工程设计实例

3.1 边坡概况

实例边坡位于中江县太安镇境内,在沪蓉高速南充至成都扩建段 K1 895+750—K1 895+860(双向4车道扩建为8车道)左侧,长约110m。边坡属浅丘地貌,覆盖层很薄,层厚约0.5~1m;下伏基岩为侏罗系上统蓬莱镇组(J_3p)粉砂质泥岩、砂岩,产状: $321^\circ \angle 7^\circ$ 。钻孔揭示厚度达35m,其中强风化带厚2~5m,强卸荷带厚3~7m。表层岩体破碎、裂隙密集、岩芯多呈薄片

状,无明显主控结构面,且粉砂质泥岩具有饱水软化、失水开裂特性。原挖方边坡高度约 47 m,采用缓坡

比+宽平台方式开挖(综合坡比 1 : 1.0 ~ 1 : 1.25),泥岩段采用护面墙进行护面(图 9)。

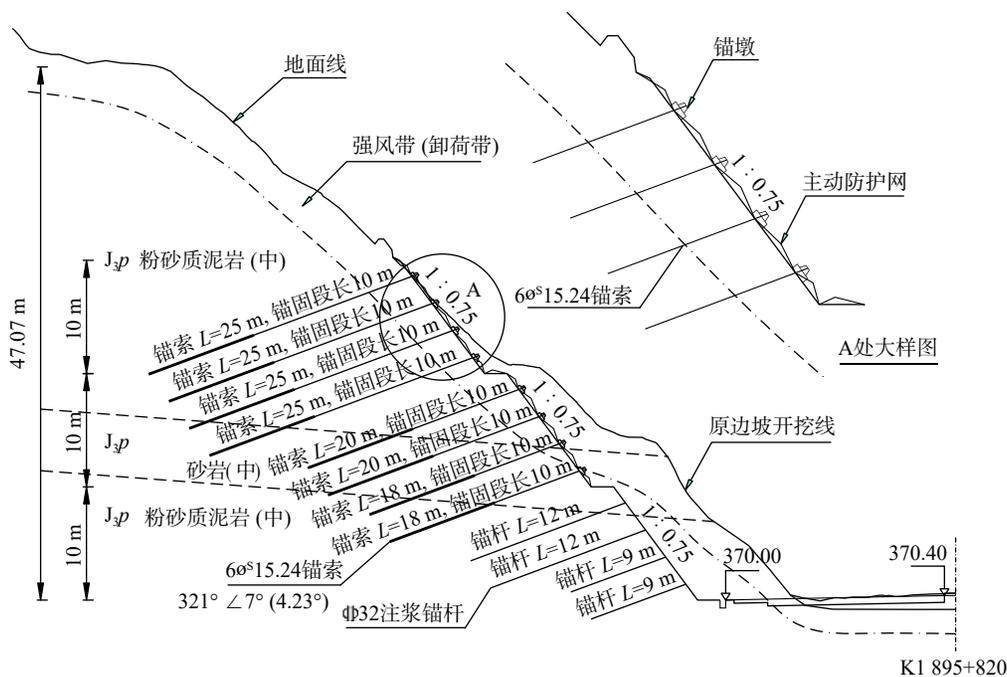


图 9 实例边坡锚墩式主动防护网加固代表断面图

Fig. 9 Example of typical cross-sectional view of reinforcement for anchor-pier active protection net

3.2 边坡扩挖防护设计

本段路基为双侧加宽段,其单侧加宽 $3.75 \times 2 = 7.5$ m。设计采用陡坡比+强措施进行开挖收坡,经计算边坡坡脚开挖后,存在整体失稳风险,需进行加固防护。由 3.1 节可知,开挖坡面位于卸荷裂隙密集的强风化带内,同时应防止浅表层坡体发生失稳破坏。为防止边坡二次开挖失稳,设计第一级边坡采用框架锚杆防护,第二、三级边坡采用锚墩式主动防护网防护(图 9)。

采用锚索间距 $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$, 锚固角 20° , 坡比 1 : 0.75, 岩体参数: $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$, $c = 8 \text{ kN/m}^2$, $\varphi = 25^\circ$; 经计算设计初始锚固力 $P_0 = 637.17 \text{ kN}$, 主动防护网作用力 $F = 103.26 \text{ kN}$, 锚索轴力增量 $\Delta f = 112.49 \text{ kN}$, 锚索锚固力 $P_1 = 740.43 \text{ kN}$ 。设计锚索采用 6 根 $\varnothing 15.24$ 低松弛钢绞线(1 860 MPa 级), 锚索长 18 ~ 25 m, 锚固段长 10 m, 满足边坡整体及浅表层加固设计要求。

通过以上计算得出,由浅表层岩体失稳带来的锚索轴力增量可达到初始锚索轴力的 15% ~ 20%, 这将使防护结构偏于不安全; 因此,在高陡破碎岩质边坡加固设计中应考虑这一影响因素。

3.3 边坡施工及工后状况

如图 10 所示,施工后主动防护网结构与锚墩形成固定连接,共同对边坡进行防护。

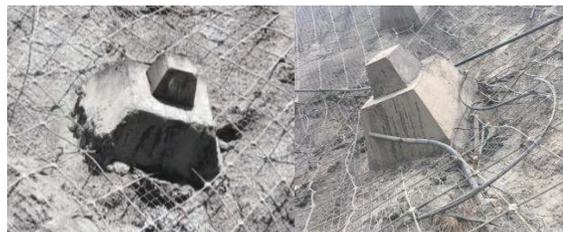


图 10 锚墩式主动防护网施工成形照片

Fig. 10 Construction of anchor-pier active protection net

根据工后边坡观测及坡面调查,由于锚索设计时考虑了主动防护网对其产生的锚固力增量,边坡整体稳定性良好。高强度钢绳网覆盖整个加固区坡面,经调查坡表未出现局部块体崩塌、滑移等地质灾害现象,边坡整体防护加固效果良好。

4 结论

(1) 锚墩式主动防护网新型结构将预应力锚索与主动防护网有效联合,实现二者协同受力,可同时完成碎裂岩质边坡的整体加固和坡面防护。

(2) 锚墩式主动防护网中主动网的受力应为预应力锚索加固后锚墩间坡面局部岩土体的作用力,局部岩土体的上、下边界分别与坡面呈 $45^\circ - \varphi/2 + \delta$ 、 $45^\circ - \varphi/2 - \delta$

的夹角。预应力锚索的受力除了应满足边坡整体稳定外,还应将主动网受力计入。

(3)锚索预应力设计时宜考虑 15%~20% 的预留量,以应对坡面岩土体在地震或暴雨等条件下对主动网的张拉。

参考文献 (References) :

- [1] 阳友奎,周迎庆,姜瑞琪,等. 坡面地质灾害柔性防护的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2005. [YANG Youkui, ZHOU Yingqing, JIANG Ruiqi, et al. The theory and practice of flexible protection for the geological hazard of slope[M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)]
- [2] 谢洪波,刘正疆,文广超,等. 四川金川-小金公路沿线滑坡、崩塌影响因素分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(1): 10-17. [XIE Hongbo, LIU Zhengjiang, WEN Guangchao, et al. Influencing factors of landslide and rockfalls along the Jinchuan-Xiaojin highway in Sichuan [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(1): 10-17. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 胡朝旭. 汶川-马尔康高速公路高陡边坡地质灾害调查及防治 [J]. 公路, 2018, 63(9): 62-67. [HU Chaoxu. Investigation and prevention of geological hazards for high-steep slope of the Wenchuan to Maerkang expressway [J]. Highway, 2018, 63(9): 62-67. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 陈全明,方琼,罗冠枝,等. 缓倾顺层岩质斜坡破坏条件和变形机制分析: 以常吉高速公路朱雀洞滑坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2020, 31(2): 18-23. [CHEN Quanming, FANG Qiong, LUO Guanzhi, et al. Failure conditions and mechanism of the gentle dip bedding slopes: a case study of the Zhuqudong Landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2020, 31(2): 18-23. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 贺凯,高杨,殷跃平,等. 基于岩体损伤的大型高陡危岩稳定性评价方法 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(4): 82-89. [HE Kai, GAO Yang, YIN Yueping, et al. Stability assessment methods for huge high-steep unstable rock mass based on damage theory [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(4): 82-89. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 孙伟峰. 永吉高速沿线破碎岩质边坡锚杆支护方式研究 [J]. 公路工程, 2017, 42(4): 271-274. [SUN Weifeng. Study on bolt support patterns of fractured rock slope in Yong-Ji expressway [J]. Highway Engineering, 2017, 42(4): 271-274. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 张科,侯杰. 岩质边坡复合型破坏机制的改进运动单元法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 95-101. [ZHANG Ke, HOU Jie. Investigation on combined failure mechanism of rock slope based on the improved kinematical element method [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 95-101. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 罗洪成,梁邦伟,黄成伟,等. 富水破碎岩质边坡滑塌成因分析及关键处治技术 [J]. 施工技术, 2018, 47(9): 105-108. [LUO Hongcheng, LIANG Bangwei, HUANG Chengwei, et al. The genetic analysis and key treatment technology for the slope slump of water-rich broken rock masses [J]. Construction Technology, 2018, 47(9): 105-108. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 张广甫,吴琦,崔孝飞,等. 危岩主控结构面抗剪强度参数取值研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(1): 164-167. [ZHANG Guangfu, WU Qi, CUI Xiaofei, et al. Shear strength parameters determination of structural planes controlling the rock block stability [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(1): 164-167. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 严豪,宋彦辉,陈子玉. 基于Voronoi节理模型的碎裂岩边坡稳定性分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(1): 34-39. [YAN Hao, SONG Yanhui, CHEN Ziyu. Stability analysis of broken rock slope based on Voronoi joint net model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(1): 34-39. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 徐前卫,朱合华,丁文其,等. 软弱破碎直立岩质边坡渐进性破坏及其锚固效应的模型试验研究 [J]. 土木工程学报, 2012, 45(4): 139-147. [XU Qianwei, ZHU Hehua, DING Wenqi, et al. Model test study on the progressive failure of weak and fractured vertical rock slopes and the effect of anchoring [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(4): 139-147. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 霍宇翔,黄润秋,巨能攀,等. 碎裂结构边坡变形机理及治理对策研究 [J]. 工程地质学报, 2009, 17(3): 317-321. [HUO Yuxiang, HUANG Runqiu, JU Nengpan, et al. Deformation mechanism and stabilization measures of broken granitic rock slope that experienced Wenchuan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(3): 317-321. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 曹兴松. 碎裂岩体路堑高边坡失稳机理及防治技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006. [CAO Xingsong. Research on instability mechanism and controlling techniques for cutting high slope in disintegration rock mass[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 朱少瑞,韩继欢,秦哲,等. 预应力锚索加固技术在高陡岩质边坡中的应用 [J]. 煤炭技术, 2015, 34(8): 30-32. [ZHU Shaorui, HAN Jihuan, QIN Zhe, et al. Application of prestressed anchor cable in strengthening steep rocky slope [J].

- Coal Technology, 2015, 34(8): 30–32. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 刘瑞懿,肖碧,李洪斌,等.某岩质高边坡稳定性分析及预应力锚索加固设计 [J] . 人民长江, 2016, 47(21): 77–80. [LIU Ruiyi, XIAO Bi, LI Hongbin, et al. Stability analysis of a high rocky slope and its pre-stress anchorage cable design [J] . Yangtze River, 2016, 47(21): 77–80. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 吴兵,梁瑶,唐晓波,等.锚索与抗滑桩组合加固折线型滑面高边坡受力计算及优化设计 [J] . 公路交通科技, 2021, 38(3): 40–48. [WU Bing, LIANG Yao, TANG Xiaobo, et al. Force calculation and optimal design for high slope with broken-line sliding surface reinforced by combination of anchor cable and anti-slide pile [J] . Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(3): 40–48. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 吴国庆,俞弘志,黄刚. SNS柔性主动防护网在赛白高速公路上的应用 [J] . 公路, 2013, 58(1): 242–246. [WU Guoqing, YU Hongzhi, HUANG Gang. Application of safety netting system to Sai-bai expressway [J] . Highway, 2013, 58(1): 242–246. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 赵雅娜,齐欣,余志祥,等.主被动混合式柔性防护网联合作用效果初步分析 [J] . 中国地质灾害与防治学报, 2016, 27(1): 111–116. [ZHAO Yana, QI Xin, YU Zhixiang, et al. Preliminary study of hybrid flexible rockfall protection net [J] . The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2016, 27(1): 111–116. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 潘勤学,查旭东,杨博.岩质路堑边坡柔性支护系统防护性能分析 [J] . 中外公路, 2014, 34(5): 19–22. [PAN Qinxue, ZHA Xudong, YANG Bo. Protection property of flexible supporting system for rock cutting slope [J] . Journal of China & Foreign Highway, 2014, 34(5): 19–22. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 汪敏,石少卿,阳友奎.边坡主动防护网力学性能的试验与数值分析 [J] . 土木建筑与环境工程, 2011(增刊2): 24–28. [WANG Min, SHI Shaoqing, YANG Youkui. Mechanical tests and numerical simulation research on the slope active protection nets [J] . Journal of Civil, Architectural& Environment Engineering, 2011(Sup2): 24–28. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 吕庆,孙红月,尚岳全,等.预应力锚固作用下破碎岩质边坡表层压缩效应 [J] . 浙江大学学报(工学版), 2006, 40(12): 2168–2173. [LYU Qing, SUN Hongyue, SHANG Yuequan, et al. Surface compress effects of crush rock slope under prestressed cables anchorage forces [J] . Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2006, 40(12): 2168–2173. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 陈洪凯,秦鑫,唐红梅.危岩带扶壁式拦石网计算方法及应用 [J] . 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(6): 58–63. [CHEN Hongkai, QIN Xin, TANG Hongmei. Calculation method and its application of counterforted rock-fall barrier of dangerous rock zone [J] . Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2017, 36(6): 58–63. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王鳌杰.预应力锚索抗滑桩支挡结构在路基边坡防护中的应用研究 [J] . 公路工程, 2018, 43(1): 145–148. [WANG Aojie. Application of stabilizing piles with prestressed anchor cables retaining structure in subgrade slope protection [J] . Highway Engineering, 2018, 43(1): 145–148. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 魏淑艳,吴碧中.某公路高边坡稳定性分析及防护措施研究 [J] . 公路工程, 2018, 43(6): 274–277. [WEI Shuyan, WU Bizhong. Stability analysis and protective measures of a highway high slope [J] . Highway Engineering, 2018, 43(6): 274–277. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 屠义伟.复杂地质条件下山区公路边坡稳定性评价及加固方法设计 [J] . 公路工程, 2018, 43(1): 169–174. [TU Yiwei. Stability evaluation and reinforcement method design of mountain highway slope under complex geological conditions [J] . Highway Engineering, 2018, 43(1): 169–174. (in Chinese with English abstract)]