

植被混凝土生态防护技术中锚钉参数的确定

陈 毅¹, 刘大翔², 姚小月¹, 许文年²

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:岩石边坡生态恢复工程常采用植被混凝土防护技术。为了分析该技术中锚钉的受力情况,通过静力平衡条件,结合莫尔-库伦强度理论、锚钉的受力变形以及抗拔稳定性,推导出了锚钉在不同坡度、不同岩质边坡的最佳锚固间距、锚钉直径范围以及最小锚固深度的表达式。并结合工程实例,对计算值与实际工程采用值进行了对比分析,结果表明,计算值与以往实际工程采用值基本吻合。可为实际工程中锚钉支护方案的设计提供理论支持。

关 键 词:岩质边坡; 锚钉直径; 锚固间距; 锚固深度; 植被混凝土

中图法分类号: TU457 文献标志码: A DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.21.006

植被混凝土生态防护技术是一种能有效防护裸露高陡坡面的生态护坡方式,该技术与传统的土木工程护坡中的锚钉支护、挂网等相结合,可有效实现坡面的生态植被恢复与防护,不仅具有保持水土的功能,还可以改善当地环境和人文景观。

然而边坡岩体所处的环境千差万别,再加上对锚钉的设计大多靠实践经验,这就使很多具体工程的设计和施工千篇一律,造成了不必要的资源浪费。本文主要通过研究岩石边坡生态修复基材层的稳定性,探讨在不同岩石类型和不同坡比的坡面上设置锚钉的最佳锚固间距、锚钉直径以及最佳锚固深度,旨在对实际工程的锚钉支护提出合理的设计方案,从而加快施工的速度、节约成本。

1 植被混凝土生态防护技术原理

植被混凝土生态防护技术主要应用在不同坡度的各类岩质边坡、混凝土边坡以及硬化河道上,主要的施工方法是:在岩质(混凝土)边坡上铺设 14 号镀锌机编活络铁丝网,网孔尺寸 50 mm × 50 mm,并用

HRB235 锚钉固定,然后将拌和好的绿化基材、植物种子、保水剂等按一定比例喷射到边坡上,厚度一般为 10 cm;喷射完毕后,用一层无纺布洒水养护^[1],基本构造剖面如图 1 所示。

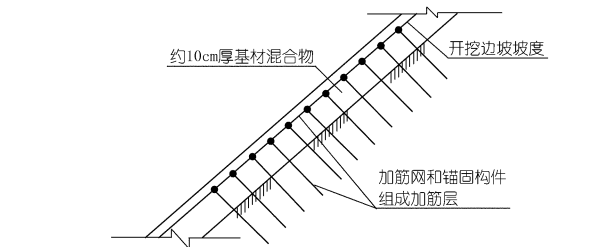


图 1 植被混凝土生态防护技术剖面示意

在植被混凝土生态防护技术中起稳定作用的主要是锚钉构件和加筋金属网,锚钉构件和加筋金属网可以有效增加基材混合物的抗拉、抗剪能力,从而减缓护坡的塑性流动和滑塌,使基材稳定地平铺在岩石表面。在基材混合物和岩体中,锚钉构件、加筋金属网以及岩体共同承担外荷载和基材混合物的自身重力。在这个系统中,锚钉首先要满足稳定性的要求,整个护坡才能

保持稳定状态。

2 锚钉构件支护方案设计

2.1 单个锚钉承受拉力 T 的计算

锚钉承受的拉力主要由基材混合物的自重应力产生。为了进行受力分析,对边坡中的基材混合物、岩体层、锚钉等特作以下假设:① 基材混合物均匀地平铺在岩体层上(平面应变问题);② 锚钉沿边坡平面均匀地分布在岩体之中,为连续、均质、各向同性的线弹性介质;③ 锚钉各断面的轴向应力呈均匀分布^[2]。

基材混合物受力分析简图如图 2 所示。

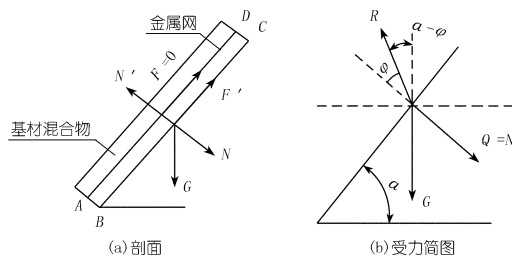


图 2 基材混合物受力分析

对基材混合物以锚钉为中心沿坡面分块,边长为 L 。单元内基材混合物所受重力 $G = bL^2\gamma$, 其中 b 为基材混合物的厚度, γ 为基材混合物与金属网的总容重; F' 为岩体边坡对基材混合物的摩擦力, N' 为岩体对基材混合物的法向支撑力,其合力为 R ,与岩体边坡的夹角为基材混合物的内摩擦角 φ (当基材混合物处于破坏临界点时, F' 、 N' 分别视为库伦公式中的 τ 、 σ ,即与原坡面产生的相对滑动夹角为内摩擦角 φ); Q 为铁丝网和锚钉对基材混合物的作用力,是铁丝网与基材混合物接触面上产生的摩擦力 F 与锚钉拉力 N 的合力,与 AD 面法线间的夹角应等于基材混合物与铁丝网间的摩擦角 δ ,由于铁丝网与基材混合物接触的面积很小且铁丝网较光滑,可视铁丝网与绿化基材层间的摩擦角 $\delta = 0^\circ$,则 $Q = N$,方向与 AD 面垂直^[3-5]。考虑基材混合物静力平衡条件,由 $\sum F_y = 0$ 和 $\sum F_x = 0$ 可得

$$R\cos(\alpha - \varphi) = G + Q\cos\alpha \quad (1)$$

$$R\sin(\alpha - \varphi) = Q\sin\alpha \quad (2)$$

$$G = bL^2\gamma \quad (3)$$

由(1)~(3)式可得

$$Q = \frac{bL^2\gamma\sin(\alpha - \varphi)}{\sin\varphi} \quad (4)$$

根据《建筑边坡工程技术规范》GB50330 - 2013 要求^[6],锚钉拉力 $T = kQ$ 。考虑到锚钉为永久性锚钉以及边坡工程的安全等级,取 $K = 2.2$,那么单元内单

个锚钉承受的拉力为

$$T = \frac{kbL^2\gamma\sin(\alpha - \varphi)}{\sin\varphi} \quad (5)$$

2.2 锚钉最佳锚固间距计算

在一个单元受力系统内,先不考虑锚钉自身条件,同时认为锚钉在基材混合物的作用力下是稳定的,并且基材混合物在加筋金属网的作用下是连续、均质、各向同性的线弹性介质,可以把两个锚钉作为支点,基材混合物作为梁,形成一个简支梁系统。对单元内最不利点,即简支梁中最大弯矩进行受力分析,如图 3 所示。

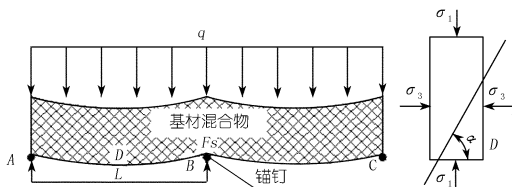


图 3 基材混合物受力示意

根据材料力学,在 B 点,基材混合物受到来自锚钉的剪应力,同时也受到铁丝网的包裹以及牵扯作用,发生的塑性变形可以忽略不计。此时基材混合物的危险界面点应该在 AB 的中点 D 处。根据(4)式,可得均布荷载 $q = Q/L$;于是可得 AB 间最大弯矩为 $M_{\max} = \frac{1}{8}qL^2$;此时,危险截面 D 点正应力为 $\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_z}$,其中 W_z 为截面弯矩系数,即 $W_z = \frac{bL^2}{6}$ 。由以上(3)式可得 D 点最大正应力为

$$\sigma_{\max} = \frac{3L\gamma\sin(\alpha - \varphi)}{4\sin\varphi} \quad (6)$$

为了使基材混合物处在平衡状态,在平面内,根据莫尔-库伦强度理论

$$\sigma_3 = \sigma_1 \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) - 2c \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (7)$$

而此时 D 点受水平方向的单轴应力,因此 σ_1 为零,结合(6)式即可得到锚钉间距

$$L \leq \frac{8c\sin\varphi \tan(45^\circ - \frac{\varphi}{2})}{3\gamma\sin(\alpha - \varphi)} \quad (8)$$

2.3 锚钉直径计算

由于在边坡中,起稳定作用的主要是锚钉,因此以锚钉为中心划分单元,边长为相邻锚钉的间距,由于实际工程中锚钉与坡面有一定夹角,方向沿坡面向上,这里作不利情况处理,即视锚钉垂直于坡面,假设锚钉在基材混合物的作用力下是稳定的,且受均布荷载,如图 4 所示。

容易得出锚钉 AB 的弯矩方程为 $M_{(x)} = -\frac{1}{2}q(b-x)^2$, 其中 x 为从端点 A 向右的任意距离, b 为锚钉突出段长度。

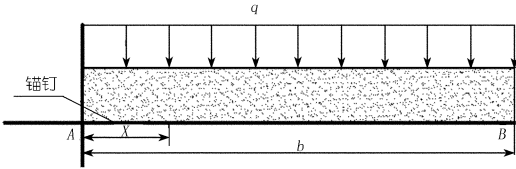


图 4 锚钉突出端荷载示意

由材料力学容易得到最外端 B 点的挠度方程为 $W_B = \frac{qb^4}{8EI}$, 其中 E 为锚钉的弹性模量, 根据《混凝土结构设计规范》GB50010-2010^[7], 取 $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$; I 为锚钉截面对中轴的惯性矩, 由于是圆形截面, 即 $I = \frac{\pi d^4}{64}$, d 为锚钉直径。

结合锚钉突出段所受的均布荷载可以推导出

$$W_B = \frac{8kb^4L^2\gamma\sin(\alpha-\varphi)}{E\pi d^4\sin\varphi} \tag{9}$$

考虑到在实际工程中保证工程持久性安全, 防止金属网从锚钉端脱落, 锚钉在突出端不至于有明显变形, 同时兼顾经济效益, 因此可以酌情选择锚钉的直径范围。

2.4 锚钉锚固深度计算

作为受拉杆件的锚钉, 其承受拉力 T 的能力取决于两个方面: ① 锚钉自身的抗拉强度 E_i ; ② 锚固段的抗拔力 F_i 。而锚固段的抗拔力又取决于砂浆与岩体的结合力 F_{i1} 和锚钉与砂浆界面的粘结力 F_{i2} 。由于锚钉对坡面施压的破坏形式与抗拔的破坏形式均为剪切破坏, 因此只作最小粘结强度计算。考虑到直径大于 12 mm 的 A3 螺纹钢的抗拉力远大于单元内基材混合物对锚钉的拉力, 因此锚钉承受拉力的能力 $T = \min(F_{i1}, F_{i2})$ 。

由于在实际工程中一般使用 M30 号水泥砂浆, 根据《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2013^[6], 锚钉与砂浆界面的粘结强度 $\tau_2 = 2.4 \text{ MPa}$, 不同岩质与锚固体极限粘结强度 τ_1 从 270 kPa 到 2 600 kPa 不等。因此锚钉承受拉力的能力主要取决于 τ_1 , 即需满足 $F_{i1} \geq K_m T$, 其中 K_m 为锚钉的抗拔安全系数, 一般取 $K_m = 2.5$ 。

由于 $F_{i1} = \pi dl\tau_1$, 结合(5)式可得锚钉的锚固深度为

$$l \geq \frac{K_m kbL^2\gamma\sin(\alpha-\varphi)}{\pi d\tau_1\sin\varphi} \tag{10}$$

3 工程实例分析

自植被混凝土生态防护技术发明以来, 在我国众多地区得到了广泛应用, 取得了巨大的生态、社会和经济效益。如在某地区岩石边坡生态修复工程中, 坡度约为 75°, 最大坡高达 35 m, 坡面为石灰岩, 根据《建筑边坡工程技术规范》GB50330-2013^[6], 石灰岩与砂浆的粘结强度为 1 000 kPa。根据前人研究经验^[8], 植被混凝土容重 γ 取 13.867 kN/m³, 内摩擦角 φ 取 30°, 凝聚力 c 取 9.5 kPa, 铺设厚度 b 取 0.1 m。将基本参数代入(8)式可得锚钉间距 $L \leq 0.75 \text{ m}$ 。

取锚钉间距为 0.75 m, 锚钉直径 d 分别取 10, 12, 14, 16 mm 和 18 mm, 代入(9)式试算可得挠度分别为 9.70, 1.49, 0.80, 0.47 mm 和 0.29 mm, 兼顾力学稳定 and 经济效益, 选取锚钉直径范围为 12~18 mm。

选择适用锚钉的最小直径 0.12 代入(10)式, 可得锚固深度 $l \geq 13.8 \text{ cm}$ 。

锚钉总长度 $l' \geq l + b = 13.8 + 10 = 23.8 \text{ cm}$ 。

而实际工程中, 根据工程经验, 该岩石坡面采用的锚钉构件支护方案为: 间距 80 cm, 锚钉直径为 14 mm, 锚钉总长度为 30 cm。因此可以看出, 所给出的 3 个公式是满足工程需求的。

在其他地区生态修复工程中, 锚钉参数的实际值与计算值见表 1 (计算步骤略)。

表 1 实际边坡生态修复工程锚钉参数

工程样地	边坡工况		实际锚钉			计算锚钉		
	坡度/(°)	坡面岩质	间距/m	长度/cm	直径/mm	间距/m	长度/cm	直径/mm
某环山公路	75	软质岩边坡	0.8	40	16	0.75	30	12~18
某破损失山体	65	土石混合边坡	0.8	40	16	0.92	38	12~18
某采石场	65	硬质岩边坡	0.8	30	16	0.92	23	12~18
某水电站 1	70	硬质岩边坡	0.8	30	16	0.82	25	12~18
某水电站 2	75	硬质岩边坡	0.8	30	16	0.75	23	12~18

由表 1 可以看出, 在实际工程中, 不同工况的锚钉直径以及锚钉长度均估计过量, 特别是锚钉长度, 个别工程竟超出计算值 20%~30%, 这对材料造成不必要的浪费。而本文推导的 3 个公式可以有效计算出不同工况下锚钉的参数, 可为工程成本目标、进度目标的完成提供保障, 为工程价值的提升创造条件。

4 结 语

岩石边坡生态修复是一个新兴的交叉学科, 涉及到多个学科领域的知识, 本文主要从岩土力学、工程力学等方面阐述锚钉的受力问题, 通过基材混合物单元分割, 简化分析, 推导出了锚钉在不同坡度、不同岩质边坡的最佳锚固间距、锚钉直径范围以及最小锚固深度的表达式。结合实际工程中植被混凝土生态防护技

术锚钉支护方案的设计进行对比,所给公式的计算结果与实际工程中选用标准十分接近,表明所给出的 3 个公式可用于植被混凝土生态防护技术锚钉支护设计中,可为实际工程锚钉构件支护方案设计提供理论参考。

参考文献:

- [1] 叶建军,周明涛,许文年.谈喷射护坡绿化技术[J].水土保持研究,2004,11(2):194-197.
- [2] 甄晓云,孙乔宝,王文龙,等.岩石边坡生态恢复技术中锚杆受力分析研究[J].公路交通科技,2005,22(8):159-162.
- [3] 郭春丽,李利明.锚杆在客土喷播技术中的受力状况分析[J].林

业建设,2008,(5):44-48.

- [4] 郑明月.锚杆-土工网垫喷播植草护坡技术在岩质边坡生态防护中的应用[D].青岛:青岛理工大学,2012.
- [5] 隋明昊.岩质高陡边坡锚杆-土工网垫喷播植草生态护坡结构稳定性研究[D].青岛:青岛理工大学,2012.
- [6] GB50330-2013 建筑边坡工程技术规范[S].
- [7] GB50010-2010 建筑边坡工程技术规范混凝土结构设计规范[S].
- [8] 许文年,夏振尧,周明涛,等.植被混凝土生态防护技术理论与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2012.

(编辑:徐诗银)

Determination of anchor parameters in vegetation – growing concrete ecological protection technology

CHEN Yi¹, LIU Daxiang², YAO Xiaoyue¹, XU Wennian²

(1. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: The vegetation – growing concrete ecological protection technology is commonly used in the ecological restoration of rocky slope. To analyze the stress of the anchor, through the static equilibrium conditions, the expressions of the optimal anchor spacing under different slopes and rocks, range of anchor pin diameter and the minimum anchorage depth are deduced according to the Mohr – Coulomb criteria, the deformation of the anchor and pulling – resistant stability. The calculated value was compared with the value adopted in actual projects and the comparative analysis showed that the two are consistent with each other.

Key words: rocky slope; anchor pin diameter; anchoring spacing; anchoring depth; vegetation – growing concrete

(上接第 7 页)

示以及洪灾发生时的应急转移能力,为上级领导进行防洪减灾决策提供直观展示,增强长江流域防汛管理的水平,使防汛管理工作的效率和质量得到较大提升,将极大减少洪灾造成的直接和间接经济损失,有力保障社会和经济的可持续性发展、人民生活的安定和社会和谐稳定。

参考文献:

- [1] 李安强,张建新,仲志余,等.长江流域上游控制性水库群联合防洪调度研究[J].水利学报,2013,44(1):59-66.
- [2] 李书飞,陈肃利,何小聪.水库群联合防洪调度系统建设关键技术——以金沙江下游梯级和长江三峡水库为例[J].水电与新能源,2014,(2):1-5.
- [3] 郑守仁.三峡工程利用洪水资源与发挥综合效益问题探讨[J].人民长江,2013,44(15):1-6.

(编辑:李慧)

Design of decision support system for flood control operation in Yangtze River Basin

YU Shan^{1,2}, LUO Bin^{1,2}, ZHANG Hengfei^{1,2}

(1. National Dam Safety Research Center, Wuhan 430010, China; 2. Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research, Wuhan 430010, China)

Abstract: To improve the timeliness and reliability of flood control decision – making of Yangtze River Basin, it is necessary to establish an intelligent support system of flood control management for multi – level users. Through the establishment of the topological relations of Yangtze River network and the control nodes, the module of core functions is designed, which has achieved the integration of flood forecast and dispatch, including hydrological forecasting, flood routing, flood control operation and flood risk analysis. Based on the core business model and information expansion interface, the Yangtze River Basin flood control decision support system is developed by using GIS visualization and interactive Web Service technology, which can realize the real – time query of water and rainfall information and the rapid simulation of flood control operation scheme, and provide professional, scientific and accurate technical support for flood control decision making.

Key words: flood control operation; decision – making support; dispatching system; Yangtze River Basin