

文章编号: 1674—8247(2023)02—0024—04

DOI: 10. 12098/j. issn. 1674 - 8247. 2023. 02. 005

玄武岩纤维复合材料被动网立柱抗弯性能研究

任华锋

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘 要:西南山区铁路沿线地形地貌极为复杂,高位崩塌落石异常发育,被动网、帘式网等防护系统应用广泛,传统的钢立柱防护网普遍存在立柱抗弯能力弱、质量重、施工难度大等缺点。针对上述技术难题,本文通过分析玄武岩纤维复合材料的最佳配合比,采用理论计算、三维有限元数值模拟及室内试验等手段,对比研究了传统钢立柱和玄武岩纤维复合材料立柱的抗弯刚度及重量。研究表明,复合材料基体材料体积分量应控制在 25% ~ 35% 之间,立柱建议采用中空圆形结构,当圆截面外径为 $\phi 167$ 、内径为 $\phi 141$ 时,其抗弯刚度比传统的工字钢柱(18 号)提高 8 倍以上,重量比传统工字钢柱减轻约 50%。

关键词:危岩落石;被动网;立柱;玄武岩纤维复合材料;材料配合比

中图分类号: U417.1

文献标识码: A

A Study on Bending Resistance of Passive Mesh Posts Made of Basalt Fiber Composite Material

REN Huafeng

(China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: The topographical and geomorphological conditions along the railway in the mountainous area in southwest China are extremely complex, the high-place collapse and rockfall are abnormally developed, and the passive mesh, curtain mesh, and other protection systems are widely used, while the traditional protective mesh with steel posts cannot deal with these conditions due to insufficient bending resistance, large mass, and great construction difficulty. In view of the above technical difficulties, the bending stiffness and weight of traditional steel posts and basalt fiber composite posts were compared and studied by analyzing the optimal mix ratio of basalt fiber composite material, using theoretical calculation, three-dimensional finite element numerical simulation, and laboratory tests. The results show that the volume component of the composite matrix material shall be controlled between 25% and 35%, and it is recommended to adopt a hollow circular structure for the post. When the outer diameter of the circular section is $\phi 167$ and the inner diameter is $\phi 141$, its bending rigidity is "more than 8 times" higher than that of the traditional I-steel column (No. 18), and its weight is about 50% less than that of the traditional I-steel post.

Key words: overhanging rock and rockfall; passive mesh; post; basalt fiber composite material; material mix ratio

我国山地占国土面积的 70%,山体岩崩、滑坡、泥石流、雪崩等地质灾害时有发生,具有广泛性、频

繁性、偶然性和长期性的特点。地壳的运动、岩石不断风化、雨水侵蚀,加之森林、岩石、矿产资源的开采,

收稿日期: 2022-12-06

作者简介: 任华锋(1980-),男,高级工程师。

引文格式: 任华锋. 玄武岩纤维复合材料被动网立柱抗弯性能研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(2): 24-27.

REN Huafeng. A Study on Bending Resistance of Passive Mesh Posts Made of Basalt Fiber Composite Material[J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(2): 24-27.

公路、铁路、水电站等的修建,将不断滋生新的地质灾害,严重影响人们的生产活动和生命财产安全。因此,道路边坡的防护、地质灾害的治理是十分艰巨的任务。

柔性被动防护系统是道路边坡防护和山区地质灾害治理的有效措施之一。目前的柔性被动防护系统主要由工字钢立柱、钢绳菱形网或钢丝环形网、基座、钢丝格栅网、消能装置、固定锚杆、上下支撑绳、上下和侧拉绳、卸扣或缝合绳等部件构成^[1-3],如图1所示。柔性被动防护系统直立于山体斜坡之上,用于拦截斜坡上的滚石、泥砂,制止崩塌、落石、泥石流等对山下的道路或建筑物的直接冲击破坏。柔性被动防护系统克服了传统的刚性拦截系统防护效果差、易于损坏的弊端,被广泛应用于铁路、公路、水电边坡的防护工程项目之中。

在工程实践中,作为被动柔性防护系统中最重要部件,工字钢支撑立柱存在以下两大缺陷,至今未得到解决。其一,以工字钢制作而成的支撑“立柱”侧向抗弯能力严重不足,在危石的冲击下,工字钢柱发生塑性弯曲变形,防护网大片倒伏而失去拦截防护能力(如4 m长18号工字钢侧向抗弯力仅4.05 kN,正向抗弯力可达29.8 kN),且防腐蚀性能较差;其二,立柱重量大,在山区(特别是如渝西高速铁路等高山峡谷地区的建设项目)施工、材料搬运、系统安装等均十分困难,施工安全隐患大。

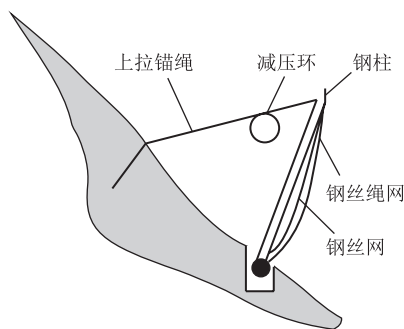


图1 被动防护网系统示意图

综上所述,尽管目前科研单位对山区柔性防护装置做了大量研究,但针对提高柔性防护强度、减轻系统重量、便于施工安装、提高防腐性能、减少施工安全隐患等功能的边坡防护装置罕有见闻。因此,很有必要开展适用于高山峡谷地区边坡被动防护装置的新型防护系统的研发、探究其生产工艺、形成市场化产品。而被动防护系统中最关键、重量最大的部件就是支撑立柱,因此,需在保证立柱抗弯能力的前提下,解决减轻立柱重量和防腐的问题。玄武岩纤维复合材

料具有密度小($1.9 \sim 2.1 \text{ g/cm}^3$)、重量轻、抗拉强度高($3\,500 \sim 4\,800 \text{ MPa}$)、耐腐蚀性好、使用寿命长等特点,若利用玄武岩纤维复合材料的性能优势,采用复合材料先进的制作工艺,研制一种新型结构的高强度玄武岩纤维复合材料立柱来替代传统的钢制立柱,具有十分重要的意义^[4-5]。这种复合材料不但有利于山区地质灾害的治理、加强了山区道路的边坡防护、也可为艰险山区铁路建设提供强有力的技术保证。

1 立柱设计

1.1 尺寸设计

立柱初步拟定由3部分拆装件组成:顶部构件(法兰)、底部金属构件(与底座连接)及中部复合材料柱体构件。现场调查发现,当柔性被动防护系统受到边坡落石猛烈冲击时,巨大的冲力通过防护网、支撑绳迅速传递到工字钢柱上,工字钢发生弯曲变形,且形成中部弯曲最大的变形状态,可在数学模型上等效为立柱中部受一集中力。

复合材料立柱中部柱体采用空心管造型,相较于实心管,空心管的优势在于截面二次矩大,节省材料成本,减轻柱体重量。假定柱长为5 m,复合材料抗拉强度为900 MPa时,立柱截面结构尺寸,一方面要考虑到立柱的稳定性和安装的需要,外径不能小于 $\phi 160$;另一方面为了让有限的材料获得更大的截面二次矩,又能满足抗弯力30 kN的要求。

经过大量的不同截面尺寸的抗弯截面系数优选编程计算,尽力将材料向边沿“堆积”,让有限的材料发挥更大的作用,最后确定立柱圆截面外径为167 mm,内径为141 mm。

1.2 材料设计

复合材料由至少两种不同性能、不同形态的各组分材料,通过复合工艺制作成的一种多相体。它与材料简单混合有本质的区别,因此,复合材料的性能是由复合材料组分的种类(增强体、基体)、性能,含量及分布决定的。复合材性能既保持了各组分材料的特点,又显示了原组分材料所没有的新性能。

为满足立柱的使用要求,在复合材料设计上采取了下列技术方案:

(1)增强体材料的选用以玄武岩纤维为主,兼用部分玻璃纤维或芳纶纤维。

(2)基体材料采用环氧树脂,酚醛树脂,聚氨酯中的一种或多种。

(3)根据复合定律(如式(1)), σ 复合材料应尽量增大增强体用量,减少基体用量,从而使复合材料强度

增大。为此,把复合材料中基体材料的质量百分比控制到 25%~35%,增强体的质量百分比为 75%~65%。例如选用玄武岩纤维抗拉强度 2 100 MPa,树脂抗拉强度 300~350 MPa,可配置的复合材料抗拉强度为 $S_{11}=800$ MPa, $S_{22}=80$ MPa, $S_{12}=50$ MPa。通过不同配方,复合材料抗拉强度可以获得 800~2 000 MPa。

$$\sigma_e = \sigma_f \varphi_f + \sigma_m \varphi_m \quad (1)$$

式中: σ_f ——增强体材料抗拉强度;

φ_f ——增强体材料体积百分比;

σ_m ——基体材料抗拉强度;

φ_m ——基体材料体积百分比。

(4)在纤维复合材料分布上,柱体表面层采用玄武岩纤维纱,中层采用玄武岩纤维布,内层采用玻璃纤维布。

(5)复合材料中添加抗老化剂:如抗氧化剂,光稳定剂。

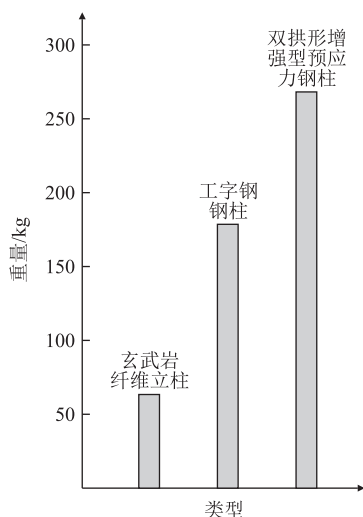


图2 不同柔性防护立柱的重量比较图

不同柔性防护立柱的重量如图2所示。由图2可知,玄武岩纤维复合材料柔性防护立柱的重量远小于工字钢柱、H型钢柱、双拱形预应力钢柱。

2 立柱抗弯力理论计算

2.1 抗弯标准研究

通过双拱形预应力钢柱试验检测和大量的工程实践经验证明,18号双拱形预应力钢柱侧向抗弯力为 28.01 kN 时,不会发生弯曲;22b 双拱形预应力钢柱侧向抗弯力为 29.5 kN 时,不会发生弯曲。通过 4 m 长 18 号工字钢和 5 m 长 20 a 工字钢柱在防护工程实践中发现:正向都未发生过弯曲变形;通过计算得出,前者的正向抗弯力为 29.8 kN,后者为 29.37 kN。

综上所述,柔性防护立柱抗弯能力为 28.01 kN、29.5 kN、29.8 kN、29.37 kN 时,立柱未发生弯曲塑性变形。为进一步提高防护立柱的安全性,把抗弯能力增加至 30 kN。因此,约定抗弯力 30 kN 是衡量柔性被动防护立柱不发生塑性弯曲变形的一个重要参数,称之为立柱的标称抗弯力。

2.2 玄武岩纤维复合材料立柱抗弯力计算

复合材料空心立柱长 $L=5$ m,外径 $D=167$ mm,内径 $d=141$ mm,抗拉强度 $\sigma_b=900$ MPa。

(1)惯矩计算:

$$J_z = J_y = \int_A y^2 dA = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = 1\,867.02 \text{ cm}^4 \quad (2)$$

(2)抗弯截面模量:

$$\begin{aligned} W_z = W_y = J_z / y_{\max} &= \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) / D/2 \\ &= \frac{\pi (D^4 - d^4)}{32D} = 223.93 \text{ cm}^3 \end{aligned} \quad (3)$$

(3)单位长度重量:

$$\begin{aligned} q &= \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \times L \times r = 12.55 \text{ kg/m} \quad (4) \\ r &= 2 \text{ t/m}^3 \end{aligned}$$

(4)安全系数:脆性材料 n_b (系数取 2~5),根据文献[6], n_b 取 4.8。

(5)安全容许应力 σ :

$$[\sigma] = \sigma_b / n_b = 1\,875 \text{ kg/cm}^2 = 187.5 \text{ MPa} \quad (5)$$

(6)弯矩 M_{\max} :

$$M_{\max} \leq W_z [\sigma] = 4\,198.69 \text{ kg/m} \quad (6)$$

(7)立柱抗弯力计算结果

$$P = \left(M_{\max} - \frac{1}{8} q L^2 \right) \times 4/L = 33.17 \text{ kN} \quad (7)$$

立柱抗弯力 P 为 33.17 kN,大于柔性立柱标称抗弯力 30 kN。

3 数值模拟分析

3.1 计算模型

复合材料柱内径取 141 mm,外径取 167 mm,立柱长 5 m,采用缠绕工艺成型,即径向(0°)铺层以及环向(60°)铺层,基于成型效率考虑,径向铺层采用单向布进行包覆,单层厚度约 0.6 mm,环向采用缠绕方式,单层厚度约 0.2 mm,即 1 次循环约 0.8 mm 厚,采用 18 次循环,柱重约 64.2 kg,结构总重约 97.4 kg。

结构三维有限元模型在计算中考虑连接件两端为简支,玄武岩柱中部承受 3.5 t 的外力作用,对于复合材料部分采用精度较高的四节点壳单元(S4R)进行离散,金属部分采用四面体单元(C3D6)以及六面体单元(C3D8R)离散,网格总数为 47 758 个,节点总数

为 64 753 个。

3.2 计算结果与分析

3.2.1 结构应力分析

复合材料属于各向异性材料,各个方向力学性能有较大区别,采用有限元分析软件 ABAQUS 进行仿真计算时,需考虑材料各铺层方向以及各向异性的影响,断裂依据也需考虑各向异性的影响,因此,断裂依据为:纤维方向极限应力 $S_{11} = 800$ MPa,垂直于纤维方向极限应力 $S_{22} = 80$ MPa,纵横剪切极限应力 $S_{12} = 50$ MPa。

因玄武岩纤维复合材料力学各向异性,采用才希尔准则进行失效判断。玄武岩纤维立柱向应力分布如图 3 所示,由图 3 可知,纤维方向最大应力 S_{11} 为 200.8 MPa, S_{22} 应力最大值为 44.78 MPa,剪切应力 S_{12} 最大值为 31.1 MPa,各方向应力均小于极限应力。抗弯工况下结构复合材料部分的蔡-吴(Tsai-Wu)失效系数最大值为 0.912,发生在载荷作用附近,小于 1。以上校核及判断表明,结构应力状态安全。

三维建模仿真计算表明:复合材料立柱中部在集中力 35 kN 的作用下是安全的,35 kN 与前述理论计算值 33.17 kN 很接近,都大于 30 kN,安全性好,说明复合材料立柱设计是合理的。

3.2.2 结构位移分析

立柱位移分布情况如图 4 所示,从图 4 中可以明显看出,立柱的最大位移位于中部,为 156.1 mm。玄武岩纤维复合材料立柱在弹性变形范围内有较大的形变位移发生,这是柔性防护系统功能所允许的。因为柔性防护系统功能本身就是以系统较大的变形来减弱危石的冲击力。同时,在外力消除后,变形的玄武岩纤维复合材料立柱又恢复如初。

4 室内试验

4.1 试验原理

为了确定产品的抗弯能力,检验产品的安全性、可靠性和有效性,采用 WDW 万能试验机对立柱进行抗弯力试验。万能试验机对两端固定水平放置的立柱中部逐步进行垂直施力,直到立柱发生塑性弯曲变形时,复合材料立柱发出爆竹声,此时万能试验机自动显示记录测试值 F_{\max} ,该值为立柱的抗弯力,以下公式为试验所遵循的原理, F_{\max} 为下式两端取等号时的数值。

$$1/4F_{\max}L + 1/8QL^2 \leq W\sigma \quad (8)$$

4.2 试验结果

对玄武岩纤维复合材料圆形立柱抗弯力测试加

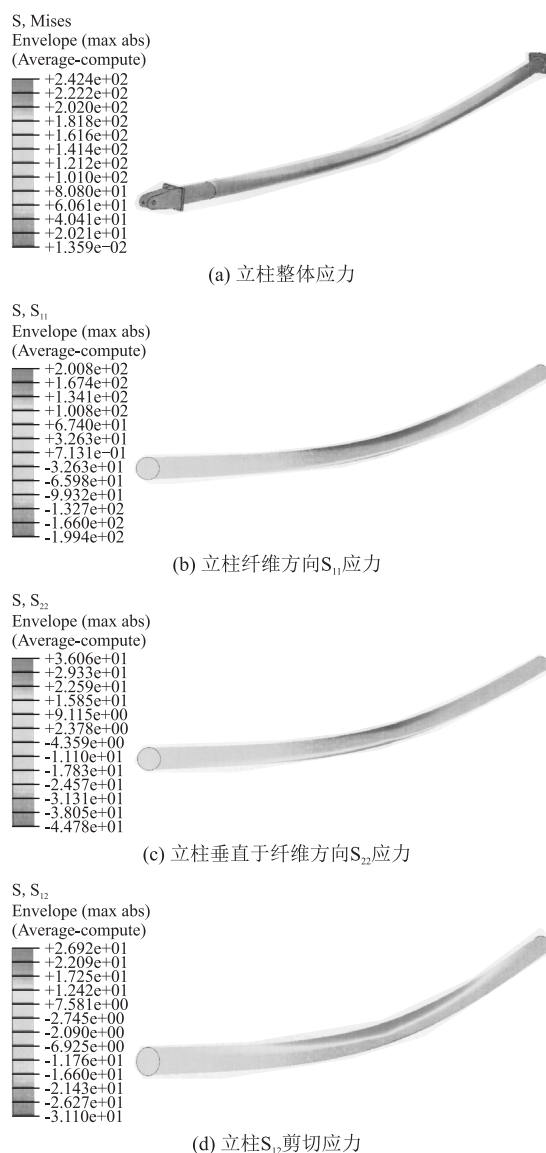


图 3 立柱应力分布云图

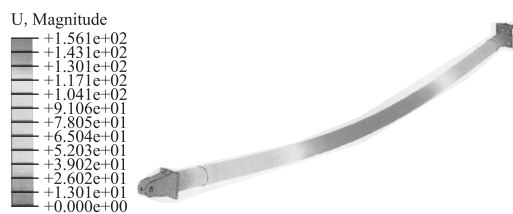


图 4 立柱位移分布云图

压 1 次 10 kN; 加压 2 次 20 kN; 加压 3 次 30 kN; 加压 4 次 35 kN。当压力加到 36.85 kN 时,圆形立柱出现破裂声,玄武岩纤维复合材料圆形立柱中部表层出现破裂声。不同柔性防护立柱的力值~位移曲线图如图 5 所示,18 号工字钢在压力加到 4.47 kN 时,工字

(下转第 32 页)

SHE Shouxian, ZHAO Yan. JERK (THE Time Rate of Change of Acceleration)—Impact, Passenger's Comfortability, Transition Curve [J]. Physics and Engineering, 2001, 11 (3) : 7 - 12, 22.

[12] 王国栋, 马俊海. 铁路三次抛物线缓和曲线的计算 [J]. 交通科技与经济, 2011, 13 (1) : 13 - 16.

WANG Guodong, MA Junhai. Calculation of Railway Cubic Parabola

Transition Curve [J]. Technology & Economy in Areas of Communications, 2011, 13 (1) : 13 - 16.

[13] Q/CR 9605 - 2017 高速铁路轨道工程施工技术规程 [S].

Q/CR9605 - 2017 Technical Specification for Construction of High-speed Railway Track Engineering [S].

(上接第 27 页)

钢柱出现了很大的弯曲塑性变形。

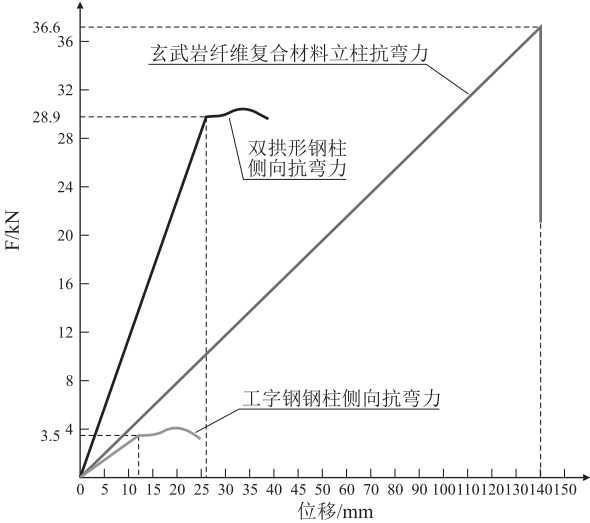


图 5 不同柔性防护立柱的力值~位移曲线图

5 结论

本文通过理论计算、数值模拟和室内试验对玄武岩纤维复合材料被动网立柱抗弯性能进行了对比研究,得出以下结论:

- (1) 确定了立柱所用玄武岩纤维复合材料的配合比的体积分量,建议基体材料体积分量控制在 25% ~ 35% 之间,以满足立柱抗弯能力的需要。
- (2) 玄武岩纤维复合材料柔性防护立柱采用中空圆形结构,圆截面外径为 167,内径为 141,理论计算、数值模拟及室内试验结果基本相近,其抗弯刚度比传统的工字钢柱(18 号)抗弯力提高了 8 倍以上,具有较广阔的应用前景。
- (3) 玄武岩纤维复合材料柔性防护立柱比传统的

工字钢柱重量减轻约 50%,大大降低了其搬运难度,提高了施工便捷性。

参考文献:

[1] 刘成清,陈林雅. 被动柔性防护网在边坡防护中的工程应用与研究 [J]. 公路, 2015, 60 (6) : 44 - 50.

LIU Chengqing, CHEN Linya. Application and Study of Passive Flexible Protective Net in Slope Protection [J]. Highway, 2015, 60 (6) : 44 - 50.

[2] 李念. SNS 边坡柔性安全防护系统工程应用 [M]. 西南交通大学出版社, 2009, 1 - 2.

LI Nian. Engineering Application of SNS Slope Flexible Safety Protection System [M]. Southwest Jiaotong University Press, 2009, 1 - 2.

[3] 赵世春,余志祥,韦韬,等. 被动柔性防护网受力机理试验研究与数值计算 [J]. 土木工程学报, 2013, 46 (5) : 122 - 128.

ZHAO Shichun, YU Zhixiang, WEI Tao, et al. Test Study of Force Mechanism and Numerical Calculation of Safety Netting System [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46 (5) : 122 - 128.

[4] 邓宗才,薛会青. 玄武岩纤维混凝土的抗弯冲击性能 [J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26 (1) : 80 - 83.

DENG Zongcai, XUE Huiqing. Flexural Impact Behavior of Basalt Fiber Concrete [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26 (1) : 80 - 83.

[5] 吴刚,魏洋,蒋剑彪,等. 玄武岩纤维与碳纤维加固混凝土矩形柱抗震性能比较研究 [J]. 工业建筑, 2007, 37 (6) : 14 - 18, 69.

WU Gang, WEI Yang, JIANG Jianbiao, et al. Comparative Study on Seismic Performance of Rectangular Concrete Columns Strengthened with BFRP and CFRP Composites [J]. Industrial Construction, 2007, 37 (6) : 14 - 18, 69.

[6] 同济大学航空航天与力学学院基础力学实验中心. 材料力学 [M]. 上海: 同济大学出版社, 2012.

Teaching and Research Department of General Mechanics, School of Aerospace Engineering and Applied Mechanics of Tongji University. Material Mechanics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2012.