

新型装配式可调电缆支架承载力特性及 设计方法研究

曾二贤¹, 王思宇¹, 冯衡¹, 黄佩¹, 黄凤华², 张大长^{2*}

(1. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071;

2. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 211816)

摘要: 为解决圆形隧道电缆支架存在的安装困难、形式多样等问题, 提出一种新型装配式可调电缆支架, 并对其承载力特性及设计方法开展研究。该支架可实现角度的精细化调整, 使其能够适用于圆形隧道的不同角度支撑面。与传统电缆支架相比, 新型装配式可调电缆支架构造简单、连接方便且施工精度高。建立可调电缆支架的有限元模型, 并在与试验结果对比验证的基础上, 对支架的变形特点、典型部位应力发展、承载力特性及其关键控制参数开展数值模拟; 基于支架的受力特点, 提出其承载力理论计算模型, 并给出横担与斜撑等主要部件的选型设计方法。研究表明: 新型电缆支架体系受力合理, 具有较好的强度、刚度和稳定性, 在电缆荷载作用下, 可调支架的破坏模式主要为斜撑失稳破坏, 伴随着横担滑槽处的屈曲变形; 横担的尺寸对支架刚度、承载力有显著影响, 而斜撑直径和水平螺栓直径对支架弹性刚度的影响较小, 但对承载力有一定的影响; 基于计算模型得到的支架关键部位应力水平与数值模拟值较为接近, 所提出的计算模型可用于指导新型支架横担、斜撑等主要部件的选型设计。

关键词: 装配式支架; 可调电缆支架; 承载力特性; 参数分析; 选型设计

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)02-0045-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20230918002

Bearing Capacity Characteristics and Design Method of a New Type of Assembled Adjustable Cable Support

ZENG Erxian¹, WANG Siyu¹, FENG Heng¹, HUANG Pei¹,

HUANG Fenghua², ZHANG Dachang^{2*}

(1. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

*Corresponding author: dczhangchina@163.com

Abstract: A new type of assembled adjustable cable support was proposed to address the issues of installation difficulties and diverse forms of circular tunnel cable supports. The bearing capacity characteristics and design methods of this new support were investigated. This support can achieve precise adjustment of the angle, making it suitable for different angle support surfaces of circular tunnels. Compared to traditional cable supports, the new assembled adjustable cable

收稿日期: 2023-09-18

基金项目: 中电工程中南电力设计院重点科技项目(40-1A-KY202219-T203), 国家自然科学基金(51678293)

作者简介:

曾二贤(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力工程设计方面的研究。E-mail: zengexian@csepedi.com。

王思宇(1995—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事输变电工程设计方面的研究。

通信作者:

张大长(1971—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构、组合结构、塔桅钢结构等方面的研究。E-mail: dczhangchina@163.com。

support has a simple structure, convenient connection, and high construction accuracy. A finite element model of the adjustable cable support was established and validated by experimental results, and numerical simulations were conducted to analyze the deformation characteristics, stress development at typical locations, and key control parameters of bearing capacity. Based on the bearing capacity characteristics of the support system, a theoretical calculation model for its bearing capacity was proposed, along with selection and design methods for main components such as cross arms and diagonal braces. The research results indicate that the new cable support is subjected to reasonable forces and possesses sufficient strength, stiffness, and stable bearing capacity. Under cable loads, the failure modes of the adjustable support are primarily characterized by buckling at the cross arm sliding groove and instability of diagonal braces. The dimensions of the cross arm significantly affect the stiffness and bearing capacity of the support, while the diameters of diagonal braces and horizontal bolt have a relatively minor impact on the elastic stiffness but affect the bearing capacity to some extent. The stress levels at critical locations of the support obtained from the calculation model are in good agreement with the numerical simulation, indicating the usability of the proposed calculation model for guiding the selection and design of main components such as cross arms and diagonal braces in the new support.

Keywords: assembled support; adjustable cable support; bearing capacity characteristic; parametric analysis; type selection design

地下通道的截面形式主要有矩形和圆形两种^[1],特别是在圆形截面隧道中,由于截面存在弧度,电缆支架的安装较为困难,如图1所示。电缆支架通常以预埋槽道的方式与圆形截面隧道固定,若支架角度固定,当沿圆形槽道移动支架时,支架将明显上扬或下倾,导致电缆安装困难,并且支架的实际受力情况与设计工况存在差异,从而对结构安全及电缆的运行产生不利影响^[2]。显然,圆形截面地下通道的电缆支架若具备一定的角度调节功能,则可显著降低倾角带来的不利影响,因此提出了一种新型的装配式可调支架,如图1b)所示。



a) 传统支架 b) 装配式可调支架

图1 圆型隧道内支架敷设方式

Fig. 1 Installation method of supports within circular tunnels

事实上,电缆支架承担电缆荷载时可被视为悬臂外伸梁结构,国内外对于此类结构的研究较为多见^[3-6],ÖZDEMİR等^[7]研究了悬挂结构在不同荷载和边界条件下的表现,发现截面上的加载和支撑位置对其屈曲能力有显著影响,提出了简单的悬挂结构设计建议;VACHARAJITTIPHAN等^[8]分析了平面变形对横向屈曲的影响,建立了受弯构件考虑屈曲前变形影响的弹性弯扭屈曲的平衡方程,研究表明经典的临界荷载或力矩计算方法较为保守;仲良^[9]对综合管廊内部支架进行了分析,通过计算托臂、固定螺栓、立柱及锚栓的强度,得到结构整体强度的允许值,证明了该支架结构设计的可行性,可供

其他类似工程参考。为解决圆形隧道电缆支架存在的安装困难、形式多样等问题,许多学者开展了关于装配式^[10-11]、模块化^[12]支架的研究。这些支架通过不同构件拼装完成,在运输、安装、敷设及接头等方面表现出较强的灵活性和稳定性^[13]。此外,复合材料也被运用于电缆支架的设计,范龙^[14]通过有限元软件对不同敷设方式、不同铺层厚度和层数下复合材料支架的承载力特性进行了分析,并与传统支架在经济性、安全性等方面进行了比较,明确了复合材料支架的优势。然而,现阶段装配式支架的试验、分析模型及理论计算研究并不全面,在承载力设计及构件选型方面上存在空缺^[15-18],尤其是现有装配式支架大多不具备调节角度的功能^[19-21],其在圆形截面隧道中仍然会遇到敷设难度大、精度难以保证等问题。

鉴于此,本文创新性地提出了一种新型装配式可调电缆支架,建立可调电缆支架的有限元模型,并在与试验结果对比验证的基础上,对支架变形特点、典型部位应力发展、承载力特性及其关键控制参数开展数值模拟,提出该支架的承载力理论计算模型,并给出横担与斜撑等主要受力部件的选型设计方法,旨在为该新型装配式支架的选型设计及工程应用提供数据支撑和理论指导。

1 支架构造及工作原理

新型装配式可调电缆支架主要由横担、可伸缩斜撑、耳板组成,各部件之间通过螺栓连接,如图2a)所示。横担采用C型钢截面,是布置电缆及承担荷载的主要受力部件,与可伸缩斜撑和端板形成了一个稳定的三角结构体系,横担两侧设有滑槽及卡槽,滑槽位置和卡槽数量满足支架调节角度($-45^{\circ}\sim 45^{\circ}$)要求,如图2b)、c)所示。通过水平螺栓在不同卡槽档位实现支架与隧道间的角度粗调,通过旋转内螺纹套筒控制可伸缩斜撑长度,实现支架角度的精细化调节,使支架适用于圆形隧道的不同角度支撑面。相比于传统的电缆支架,所提出的可调支架构

造简单、连接方便、构件制作和施工难度较低,可形成标 准化、系列化、模块化的装配式可调支架。

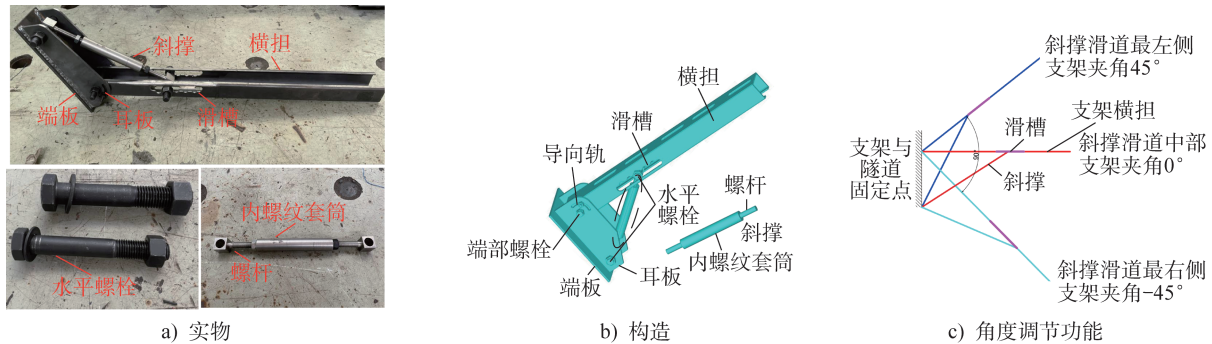


图2 装配式可调支架

Fig. 2 Assembled adjustable support

2 有限元模型

2.1 分析模型建立

为了进一步探讨新型装配式可调电缆支架的承载力特性、破坏模式及应变发展规律,采用ANSYS软件建立了不同角度下(-45°、0°、45°)装配式可调支架的有限元模型。模型部件均采用Solid185单元模拟,螺帽与耳板、横担均连成整体,以平衡运算成本及效率。接触单元Contact174和Target140用于模拟螺杆与孔壁,对于横担与耳板在支架受力过程中潜在的接触行为^[21],接触设置采用面接触,摩擦系数为0.35。螺栓网格尺寸为5 mm,斜撑网格尺寸为10 mm,端板、耳板及横担网格尺寸为20 mm,经测算该网格尺寸可以准确模拟支架的应力分布及变形特征。此外,为了符合支架的实际承载情况,固定模型端板端部,如图3所示。在横担加载点处采用位移加载,即竖向位移 D_{zk} 和水平位移 D_{zk} ,加载点位置基于电缆布置形式及位置确定。

支架端板、耳板、横担均选用Q355钢材,其屈服强度为355 MPa,极限强度为470 MPa;螺栓及水平斜撑采用6.8级高强螺栓,螺栓屈服强度为480 MPa,极限强度为600 MPa。所有材料的泊松比为0.3,弹性模量为200 GPa。材料的应力-应变关系均采用三折线模型,并服从 von Mises 屈服准则。

2.2 模型验证

2.2.1 试验概况

可调支架试件通过角度转换连接件与反力架相连,将其调整至45°进行试验,并用于有限元模型的验证。横担长度为725 mm,C型钢截面高度×宽度×厚度为65 mm×70 mm×4 mm,水平螺栓、端部螺栓以及斜撑的直径分别为20 mm、18 mm和14 mm。支架荷载通过定滑轮转向并由链式起重器施加,在横担梢端设置滑轮以控制加载方向,实现对支架平面内的竖向加载。试验数据通过力传感器与位移计采集,以实时获取试件的荷载

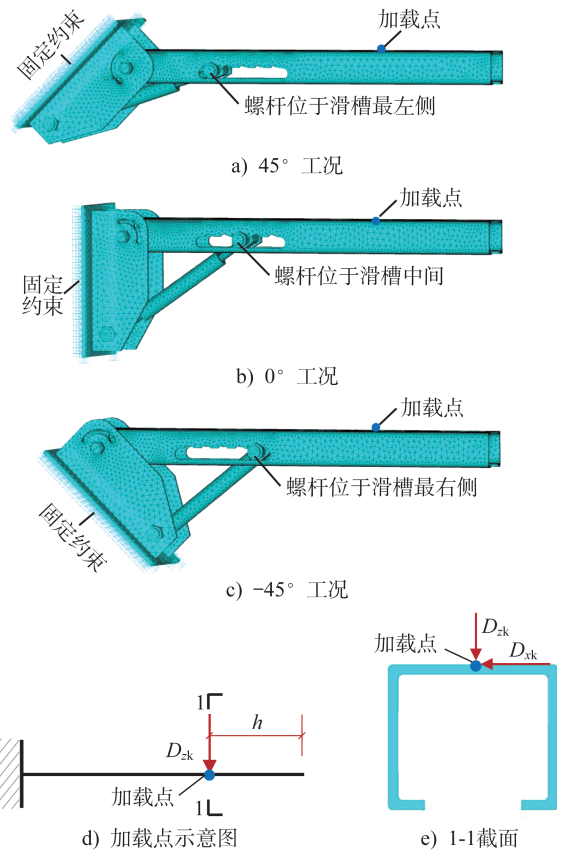


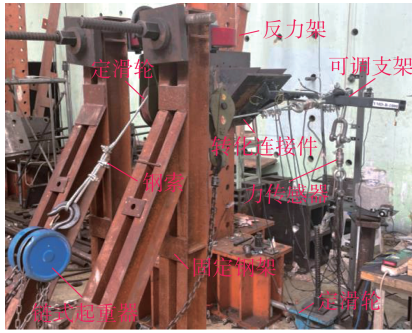
图3 有限元模型

Fig. 3 Finite element model

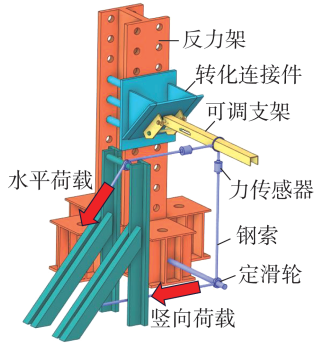
变形特性。试验装置及传感器布置如图4所示。试验采用分级加载机制,每次加载0.5 kN后停歇0.5~1.0 min,一旦发生构件破坏则立即停止加载。

2.2.2 试验与有限元结果对比

有限元模型采用了与试验试件相同的参数,包括结构尺寸、试件材料、加载方式(竖向加载)以及应力-应变关系。有限元模拟得到的荷载-位移曲线与试验结果的



a) 装置现场图



b) 装置示意图

图4 试验装置

Fig. 4 Test setup

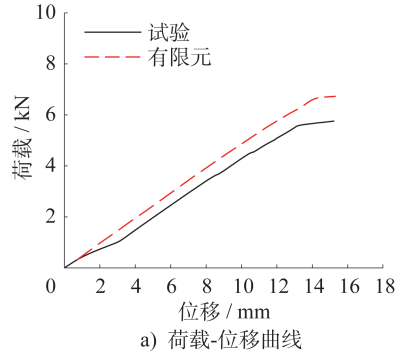
对比如图5a)所示。可以看出,两条曲线的发展趋势较为接近,呈现出明显的弹性阶段和塑性发展阶段,但试验的位移结果略大于模拟值。主要原因是试件材料本身可能存在缺陷或杂质以及加工过程存在的误差,导致承载力偏低,同时,有限元模型忽略了螺孔与螺栓之间的间隙,致使试件刚度的模拟值偏高。

图5b)、c)进一步给出了支架破坏模式试验结果与有限元结果的对比。试验和有限元分析得到的破坏模式一致,在极限荷载作用下,斜撑的螺杆发生整体失稳破坏,并伴随着横担受压区的弯曲变形,最终导致支架承载力性能的失效。综上所述,所建立的装配式支架有限元模型是可靠且准确的。

3 承载力分析结果

3.1 承载力变形特点

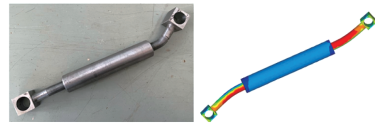
为了明确可调支架的最不利受力工况,开展了3个角度工况下(-45°、0°、45°)支架的承载力特性模拟,得到的荷载-位移曲线如图6所示。在仅受竖向荷载的情况下,随着角度的增加,支架的竖向弹性刚度、屈服承载力均呈下降趋势,并在45°工况下达到最小值。这是因为45°工况下,斜撑长度、横担悬臂长度均达到最大值,支撑处横担截面受力增大,并伴随着斜撑轴压稳定性的降低。在仅受横向荷载的情况下,弹性阶段角度的变化几乎不影响支架的承载力特性,但在屈服阶段,45°工况下支架



a) 荷载-位移曲线



b) 横担变形

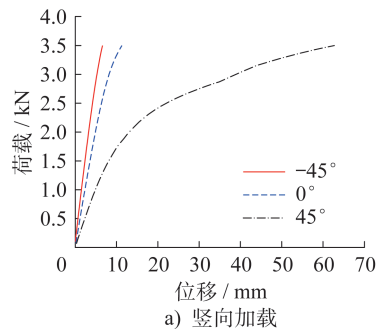


c) 斜撑变形

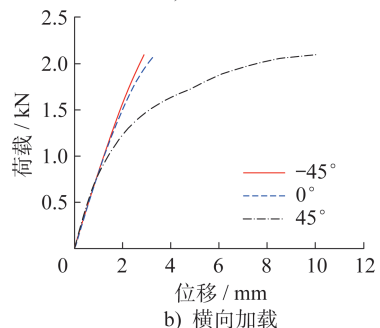
图5 试验及有限元结果对比

Fig. 5 Comparison of experimental and FE results

的屈服承载力、刚度要显著小于其他两种工况下的相应值。因此,取45°工况作为支架的最不利受力工况,后续支架的数值模拟均基于此工况展开。



a) 竖向加载



b) 横向加载

图6 不同角度工况下荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves under different angle cases

3.2 典型部位应力发展

不同荷载等级下支架及其各部件的应力云图如图7

所示,其中 F_u 为支架的极限承载力。由图7a)的整体支架云图可以发现,滑槽支撑处的横担截面应力发展迅速,在极限荷载作用下应力水平达到了400 MPa,超过了钢材的屈服强度。这主要是因为型钢截面在此处被滑槽削弱,并且此处为荷载传递的关键位置。其次,由于螺栓的挤压作用,耳板及横担螺孔周边存在较高的应力,尤其是横担端部螺孔周围,在极限荷载下出现了大范围的屈服。这是由于此处螺孔附近开设有导向轨槽,截面强度较弱。因此,在横担尺寸设计时需重点关注支撑处截面的强度。

斜撑及螺栓构件在不同荷载等级下的变化特征如图7b)~d)所示。斜撑作为支架结构体系中重要的传力构件,在竖向荷载作用下,其截面两侧存在较大应力差异,表现出整体失稳的趋势;位于斜撑端部的水平螺栓是连接横担、耳板的重要传力部件,为典型受弯构件,其应力呈现出中间高、两端低的特点;端部螺栓与水平螺栓不同,其承受由竖向荷载传递的剪力以及横向荷载在端部形成的力偶,最大应力出现在横担与耳板交界面处。通过典型部位的应力分析及对比,可确定各个部件的受力特性并提出其理想的简化计算模型,如斜撑构件在设计时可被简化为轴压杆件,需重点开展整体稳定承载力研究;水平螺栓构件在设计时可被简化为两端固定、中间承受集中荷载的梁式结构,而对于端部螺栓则主要进行抗剪强度的计算。

3.3 参数化分析

3.3.1 横担尺寸

横担C型钢不同截面尺寸下可调支架的荷载-位移曲线及参数影响下支架屈服承载力的变化趋势分别如图8、9所示,揭示了横担厚度、宽度及高度对支架承载力的

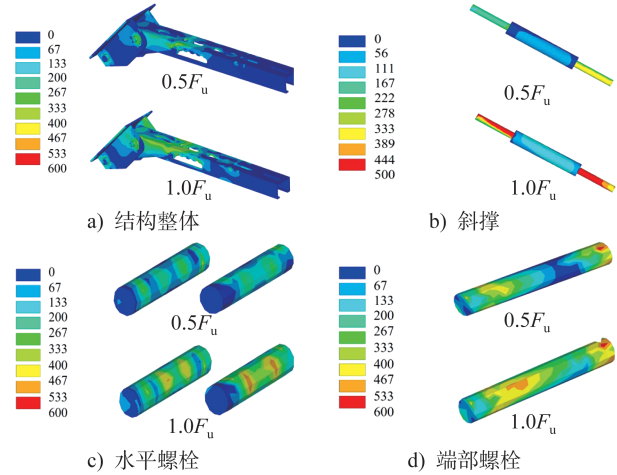


图7 不同荷载等级下的应力云图(单位:MPa)

Fig. 7 Stress contours under different load levels(unit:MPa)

影响。如图8a)、b)所示,随着C型钢截面厚度 t 的增大,支架承载力及弹性刚度提高,横向加载时 t 对屈服承载力的影响更为显著。如图8c)、d)所示,随着C型钢截面高度 h 的增大,支架竖向屈服承载力及弹性刚度呈减小趋势。这是因为随着 h 的增大,水平螺栓长度增大,其抗弯能力有所降低,但支架横向屈服承载力及刚度随着 h 的增大而增大。C型钢截面宽度 b 对支架性能的影响与截面高度 h 的影响相反,随着 b 的增大,支架竖向屈服承载力增加而横向承载力降低,如图8e)、f)所示。

3.3.2 斜撑直径

斜撑直径对可调支架承载力及刚度的影响规律以及参数影响下支架屈服承载力的变化趋势分别如图10、11

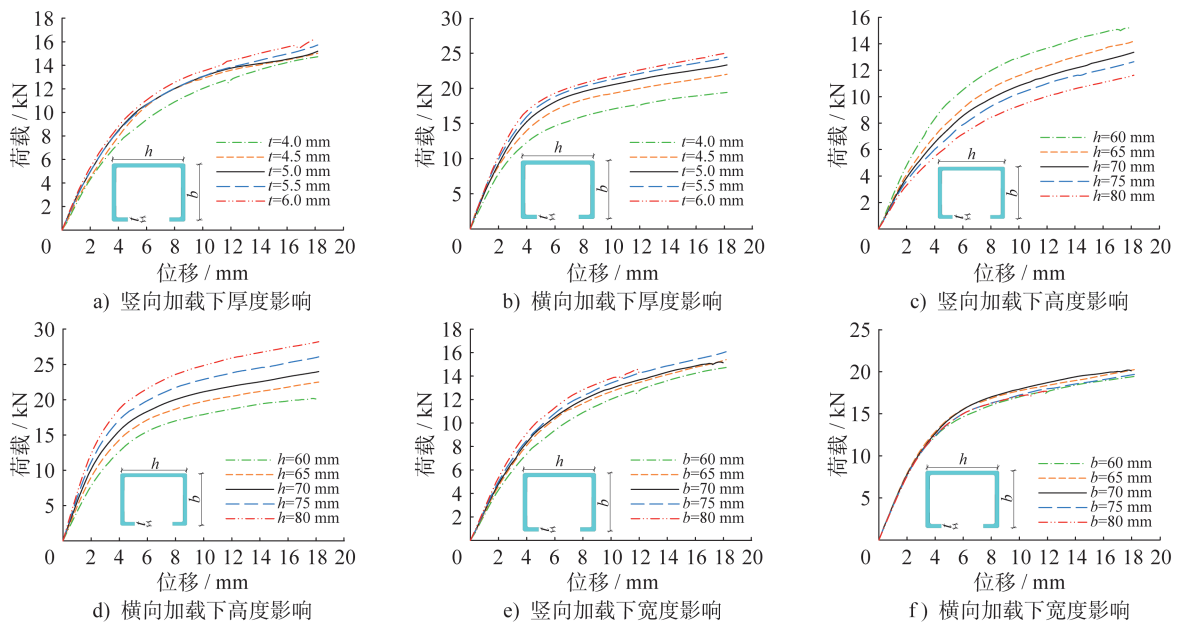


图8 横担截面尺寸的影响

Fig. 8 Influence of cross arm dimensions

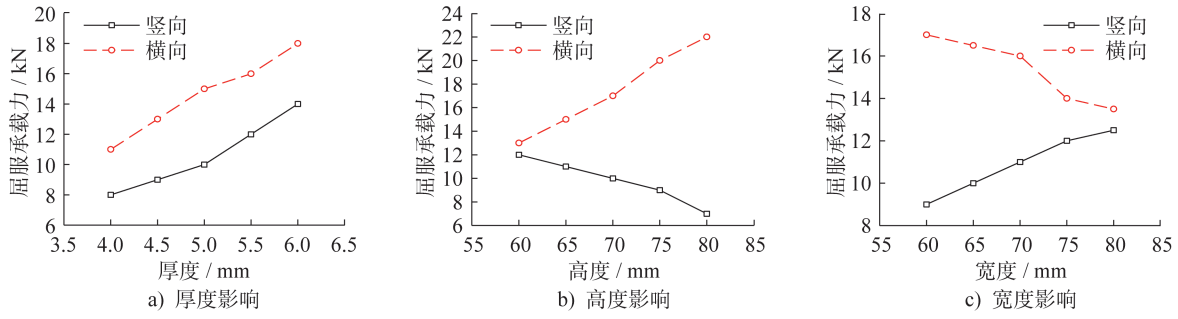


图9 横担截面尺寸影响下支架承载力的变化趋势

Fig. 9 Trend of bearing capacity of support under the influence of cross arm sectional dimensions

所示。随着斜撑直径的增大,支架的竖向承载力显著提升。这是因为斜撑直径的增大导致其轴向刚度增加,从而增强了斜撑的整体稳定性,进而提升了支架的承载力。相较而言,支架的横向承载力受斜撑直径的影响较小,尤其是在弹性阶段,几乎不受斜撑直径的影响。总体而言,当支架竖向承载力不足时,增大斜撑直径是提高竖向承载力的较为有效的措施。

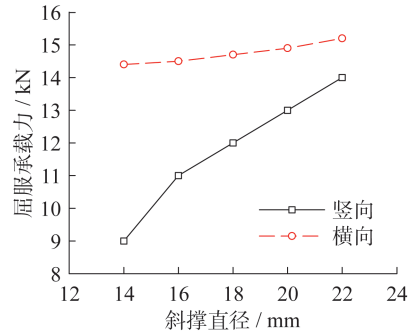


图11 斜撑直径影响下支架承载力的变化趋势

Fig. 11 Trend of bearing capacity of support under the influence of diagonal brace diameters

荷载有效传递至端部,使支架传力路径更为明确、受力更为合理,但水平螺栓直径过大亦会大幅削弱横担截面,从而导致支架的承载能力降低。

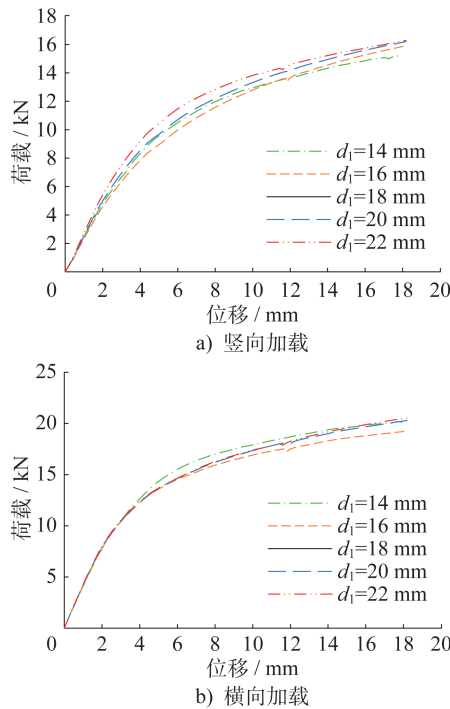


图10 斜撑直径的影响

Fig. 10 Influence of diagonal brace diameters

3.3.3 水平螺栓直径

水平螺栓直径对可调支架承载力及刚度的影响以及参数影响下支架屈服承载力的变化趋势分别如图12、13所示。随着水平螺栓直径的增大,支架竖向、横向极限承载力均呈下降趋势。这是因为随着水平螺栓直径的增大,滑槽宽度增加,直接导致横担截面被削弱,进而降低了支架的承载力。增加水平螺栓直径可以确保横担电缆

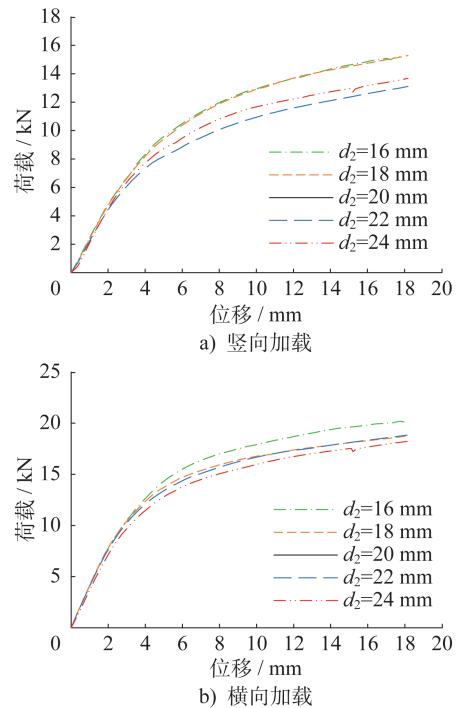


图12 水平螺栓直径的影响

Fig. 12 Influence of horizontal bolt diameters

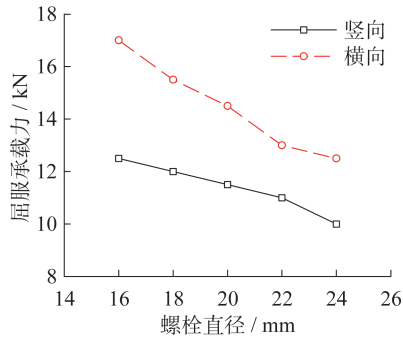


图13 水平螺栓直径影响下支架承载力的变化趋势
Fig. 13 Trend of bearing capacity of support under the influence of horizontal bolt diameters

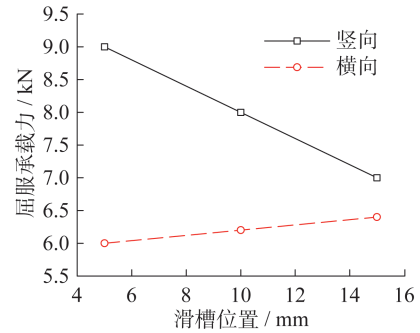


图15 滑槽位置影响下的支架承载力变化趋势
Fig. 15 Trend of bearing capacity of support under the influence of sliding groove positions

3.3.4 滑槽位置

以横担底面为基准线,选取3种不同高度的滑槽位置(5 mm、10 mm、15 mm),得到滑槽位置对可调支架承载力的影响规律以及参数影响下支架屈服承载力的变化趋势分别如图14、15所示。随着滑槽位置高度的增加,支架的竖向承载力和刚度呈线性下降趋势,相比之下,支架横向承载力及刚度受滑槽高度的影响较小。因此,设计滑槽高度时,应在满足构造要求的同时尽量选取靠近横担下平面的位置。

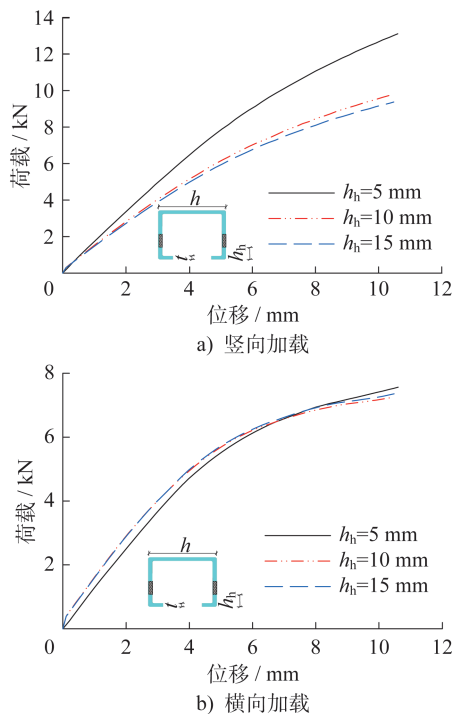


图14 滑槽位置的影响

Fig. 14 Influence of sliding groove positions

4 可调支架设计方法

4.1 计算模型

可调支架的受力计算简图如图16所示,其中 L_1 为斜撑

支撑处至端部螺栓的距离, L_2 为力作用点至斜撑支撑处的距离, F_1 、 F_2 分别为电缆的竖向及横向荷载。承担竖向荷载时,横担端部被简化为铰支座,斜撑被简化为二力杆,其对横担的作用力采用 F_b 表示;承担横向荷载时,横担端部被简化为固定支座,并通过一对力偶 Q_2 来表示端部弯矩。

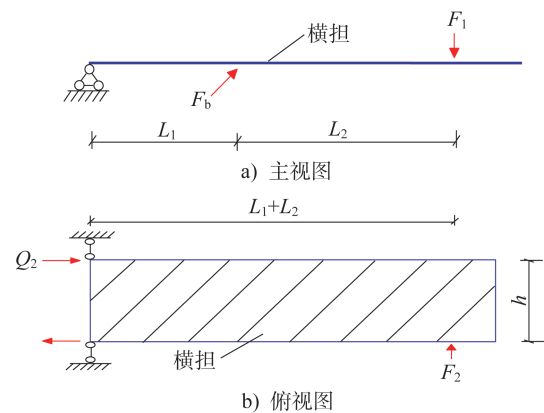


图16 支架受力计算简图

Fig. 16 Simplified force diagrams of support

4.2 关键部位应力理论计算

可调支架的设计需在保证承载力的前提下降低构件尺寸以提高其经济性。因此,基于支架计算模型和有限元分析结果,提出了可调支架的关键部位应力计算理论,包括横担、斜撑、水平螺栓及端部螺栓,以指导实际工程中支架结构的优化及选型。

(1) 横担

C型钢横担为典型的悬臂结构,主要承受由电缆引起的竖向和横向荷载。横担的弯曲正应力 σ_0 及剪切应力 τ_0 由式(1)计算。

$$\sigma_0 = \frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} = \frac{F_2 L_2}{W_x} + \frac{F_1 L_2}{W_y} \quad (1)$$

$$\tau_0 = \frac{VS}{I_y t} = \frac{F_1 (L_1 + L_2) \cdot S}{I_y t} \quad (2)$$

式中: W_x 、 W_y 分别为横担在 x 、 y 方向的截面模量; V 为横担剪力; S 为截面静矩; t 为横担厚度。对于带有滑槽的槽钢截面, 其 x 、 y 方向的换算惯性矩 I_x 和 I_y 分别由式(3)、(4)计算。

$$I_x = \frac{1}{12} h^3 t + \frac{1}{2} b_c h^2 t + \frac{1}{6} a^3 t + \frac{1}{2} a(h-a)^2 t \quad (3)$$

$$I_y = h y_2^2 t + \frac{1}{6} b_c^3 t + 2 b_c \left(\frac{b_c}{2} - y_2 \right)^2 t + 2 a \left(\frac{b_c}{2} - y_2 \right)^2 t \quad (4)$$

式中: h 为横担高度; b_c 为扣除滑槽高度后横担的有效宽度; a 为卷边长度; y_2 为非卷槽边到 y 轴的距离。横担截面详细参数如图17所示。

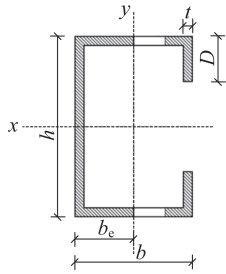


图17 横担截面参数

Fig. 17 Sectional parameters of cross arm

综合以上计算即可以确定横担的折算应力, 该应力不应超过钢材的屈服强度 f_y , 如式(5)所示。

$$\sqrt{\sigma_0^2 + 3\tau_0^2} \leq f_y \quad (5)$$

(2) 斜撑

在装配式支架结构中, 斜撑为典型的轴压杆件, 其计算长度系数基于两端铰接的假设确定。斜撑应力 σ_1 可通过式(6)计算。

$$\sigma_1 = \frac{F_b}{\varphi A} = \frac{F_1(L_1 + L_2)}{\varphi A_1 L_1 \sin\left(\tan^{-1} \frac{H}{L_1}\right)} \leq f_t \quad (6)$$

式中: φ 为稳定系数; A_1 为斜撑截面面积; H 为横担端部螺栓至下水平螺栓的间距; f_t 为水平螺栓的抗拉强度。

(3) 水平螺栓

设计中, 水平螺栓被定义为两端固定、中间受集中荷载的梁式结构。横担的弯曲正应力 σ_2 、剪切应力 τ_2 以及折算应力的计算公式如下:

$$\sigma_2 = \frac{M}{W_1} = \frac{F_b h}{8 W_1} \leq f_t \quad (7)$$

$$\tau_2 = \frac{V}{A_2} = \frac{F_b}{2 A_2} \leq f_v \quad (8)$$

$$\sqrt{\sigma_2^2 + 3\tau_2^2} \leq f_t \quad (9)$$

式中: W_1 为螺栓的截面模量; f_v 为水平螺栓的抗剪强度; A_2 为水平螺栓的截面面积。

(4) 端部螺栓

端部螺栓被定义为两端固定的杆结构, 螺杆两端受到竖向荷载传递的剪力, 以及横向荷载在螺杆上产生的力偶所转化的剪力作用。端部螺栓的剪应力 τ_3 如式(10)所示。

$$\tau_3 = \frac{V}{A_3} = \frac{\sqrt{Q_2^2 + \left(\frac{Q_1}{2}\right)^2}}{A_3} \leq f_v \quad (10)$$

$$Q_1 = \frac{F_1 L_2}{L_1} \quad (11)$$

$$Q_2 = \frac{F_2(L_1 + L_2)}{h} \quad (12)$$

式中: Q_1 为由竖向荷载引起的剪力; Q_2 为由横向荷载引起的剪力; A_3 为端部螺栓的截面面积。

(5) 端板及耳板孔壁承压计算

由有限元分析结果可知, 横担及耳板螺栓孔壁需具有较强的承压能力, 因此需进行端板及耳板孔壁承压计算, 如式(13)所示。

$$\sigma_4 = \frac{\sqrt{Q_2^2 + \left(\frac{Q_1}{2}\right)^2}}{\pi r t} \leq f_y \quad (13)$$

式中: r 为螺栓孔洞的半径; t 为端部或耳板的厚度; f_y 为钢材的孔壁承压强度。

4.3 计算结果对比

为了验算所采用的理论计算公式的可靠性及适用性, 将理论计算结果与数值模拟结果进行对比, 考虑了3组试件, 具体尺寸如表1所示, 对比结果如表2所示。可以发现横担、斜撑以及孔壁承压应力水平的计算误差非常小, 而水平螺栓与端部螺栓应力水平的计算误差相对较大, 这是因为水平螺栓在实际结构中受到均布荷载的影响, 但在计算模型中均布荷载被简化为集中荷载, 从而高估了弯矩水平; 端部螺栓在实际结构中受到横担的剪切作用, 会在接触面产生应力集中, 计算时未考虑这一因素。总体而言, 所提出的理论计算方法的误差在可接受范围内, 可用于指导可调支架横担与斜撑等主要部件的选型设计。

表1 试件尺寸参数

Table 1 Dimensions of specimens						mm
试件编号	支架长度	横担高度	横担宽度	横担厚度	斜撑直径	水平螺栓直径
ZJ-1	725	70	65	4	14	20
ZJ-2	725	80	75	4	16	20
ZJ-3	975	85	65	4	16	22

表2 折算应力的计算值与模拟值对比
Table 2 Comparison between calculated and simulated values of conversion stress

部件	ZJ-1			ZJ-2			ZJ-3		
	σ_{i1}/MPa	σ_{N1}/MPa	σ_{i1}/σ_{N1}	σ_{i2}/MPa	σ_{N2}/MPa	σ_{i2}/σ_{N2}	σ_{i3}/MPa	σ_{N3}/MPa	σ_{i3}/σ_{N3}
横担	331.00	343.84	0.963	328.25	334.27	0.982	335.43	351.60	0.954
斜撑	425.93	382.02	1.114	396.60	364.19	1.089	421.64	371.49	1.135
水平螺栓	349.53	300.74	1.162	409.54	359.56	1.139	449.28	382.37	1.175
端部螺栓	322.80	381.86	0.845	325.76	373.16	0.873	334.58	392.81	0.852
横担孔壁承压	372.00	337.67	1.102	347.46	322.34	1.076	330.34	302.51	1.092
耳板孔壁承压	248.41	287.59	0.864	295.81	324.15	0.913	321.93	358.89	0.897

注： σ_i 为理论计算值； σ_N 为数值模拟值。

5 结论

以新型装配式可调电缆支架为研究对象,开展了支架破坏模式、应力发展、承载力及其关键影响参数的数值模拟分析,并提出了相应的部件选型设计方法。主要结论如下:

(1) 新型电缆支架体系受力合理,具有较好的强度、刚度和稳定性,且具备一定的角度调节功能,工程应用价值高。

(2) 在电缆荷载作用下,装配式可调支架的破坏模式主要为斜撑失稳破坏,伴随着横担滑槽处的屈曲变形。

(3) 随着C型钢截面厚度的增大,支架极限承载力及刚度均得到显著提升;截面高度和宽度分别与支架的横向承载力和竖向承载力呈正相关;斜撑直径和水平螺栓直径对可调支架弹性刚度的影响较小,但对承载力有一定影响。

(4) 基于理论计算模型得到的支架关键部位的应力水平与数值模拟值较为接近,说明所提出的计算模型可用于指导新型支架的横担、斜撑等主要部件的选型设计。

参考文献:

[1] 姚炜峻,王振伟. 电力电缆隧道内的技术创新和应用[J]. 上海电力, 2006, 19(6): 621-625.
YAO Weijun, WANG Zhenwei. Technological innovation and application in power cable tunnels [J]. Shanghai Electric Power, 2006, 19(6): 621-625. (in Chinese)

[2] EARLS C J. Single angle geometric axis flexure II. design recommendations [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(6): 625-648. DOI: 10.1016/S0143-974X(01)00006-2.

[3] PI Y L, TRAHAI R N S, RAJASEKARAN S. Energy equation for beam lateral buckling [J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(6): 1462-1479. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1992)118:6(1462).

[4] 陈惠发,阿特苏塔 T. 梁-柱分析与设计[M]. 周绥平,刘西拉,译. 北京:人民交通出版社,1997:109-176.
CHEN Waifang, ATSUTA T. Theory of beam-columns [M].

ZHOU Suiping, LIU Xila, translated. Beijing: China Communications Press, 1997: 109-176. (in Chinese)

[5] PI Y L, BRADFORD M A, TRAHAI R N S, et al. A further study of flexural-torsional buckling of elastic arches [J]. International Journal of Structural Stability & Dynamics, 2005, 5(2): 163-183. DOI: 10.1142/S0219455405001568.

[6] PAPANGELIS J P, TRAHAI R N S. Flexural-torsional buckling tests on Arches [J]. Journal of Structural Engineering, 1987, 113(7): 1433-1443. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(1987)113:7(1433).

[7] ÖZDEMIR K M, TOPKAYA C. Lateral buckling of overhanging crane trolley monorails [J]. Engineering Structures, 2006, 28(8): 1162-1172. DOI: 10.1016/j.engstruct.2005.12.006.

[8] VACHARAJITTIPHAN P, WOOLCOCK S T, TRAHAI R N S. Effect of in-plane deformation on lateral buckling [J]. Journal of Structural Mechanics, 1974, 3(1): 29-60. DOI: 10.1080/03601217408907255.

[9] 仲良. 综合管廊支架选用及其受力计算 [J]. 中国给水排水, 2017, 33(20): 76-80. DOI: 10.19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2017.20.017.
ZHONG Liang. Bracket chosen and forces calculation of the urban utility tunnel [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(20): 76-80. DOI: 10.19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2017.20.017. (in Chinese)

[10] 李志良. 装配式活动电缆支架在高压电缆线路的应用 [J]. 云南电力技术, 2016, 44(增刊2): 133-134.
LI Zhiliang. Application of prefabricated movable cable support in high-voltage cable lines [J]. Yunnan Electric Power, 2016, 44(Suppl. 2): 133-134. (in Chinese)

[11] 于慧,狄勇,于子强. 装配式活动电缆支架在高压电缆线路的应用分析 [J]. 南方农机, 2019, 50(17): 150. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-3872. 2019. 17. 114.
YU Hui, DI Yong, YU Ziqiang. Application analysis of prefabricated movable cable support in high-voltage cable lines [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2019, 50(17): 150. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-3872. 2019. 17. 114. (in Chinese)