

大连梭鱼湾足球场密封索索夹节点抗滑移试验研究*

孙立领¹ 林羽佳² 薛佳兴¹ 安琦³ 韩硕¹ 孙国军²

(1. 巨力索具股份有限公司, 河北保定 071000; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124; 3. 青岛理工大学
土木工程学院, 山东青岛 266520)

摘要: 由于大跨空间结构具有受力性能合理、轻质高强、结构形式美观等优点, 在许多体育馆、展览馆、大会堂等建筑中被广泛使用。大连梭鱼湾足球场作为一个大型民用建筑, 结构形式是平面为四心圆的索桁架结构, 上弦索体斜交, 下弦索体呈放射状, 相比常规的轮辐式索桁架结构, 该体系具有更强的面内刚度和整体抗扭能力。因为其结构形式复杂, 下环索需要固定8道拉索和其他下弦径向索构件。为了满足该使用需求, 设计了一种直径125 mm、带有6个高强螺栓的贴板压合型索夹节点。对设计的索夹节点开展2项试验, 分别研究该节点张拉拉索时高强螺栓的紧固力损失情况和顶推索夹时该节点的抗滑移极限承载能力。首先组装索夹节点, 静置24 h后再分三级张拉拉索至破断荷载的50%, 再顶推索夹, 直至索夹产生大幅度滑动。整个过程实时监测高强螺栓的紧固力变化、拉索直径变化和顶推阶段索夹位移变化。研究表明: 高强螺栓受时间效应损失11%的紧固力; 在第二步张拉拉索时, 高强螺栓紧固力受拉索直径变小一共损失了17.8%的紧固力; 第三步顶推索夹时, 根据得到的位移-顶推力曲线, 以曲线第一个拐点为抗滑移承载力极限值, 得到该索夹节点的抗滑移承载力值为500 kN, 代入抗滑移承载力计算公式得到索夹孔道与索体间的摩擦系数为0.165。试验得到的高强螺栓拧紧力矩值和抗滑移承载力值可以作为贴板压合型索夹节点的设计依据, 为现场安装监测和施工提供坚实的理论基础。

关键词: 大直径密封索; 索夹节点; 抗滑移试验; 力检测; 位移监测

0 引言

轮辐式索桁架屋盖结构一般是由一个有刚度的受压外环, 通过径向布置的索桁架连接到中心的受拉内环, 索桁架的张拉力与外环压力平衡, 形成自平衡受力体系。该结构因为具有自重轻, 造型美观, 符合绿色发展理念等特点而具有广阔的应用前景。大连梭鱼湾足球场相比常规的轮辐式索桁架结构, 具有更强的面内刚度和整体抗扭能力, 且其上弦采用斜交索网, 利用两个方向斜索交织的网格组成上弦索网, 索网网格由内向外加大, 实现“炫彩叠浪”的水面涟漪效果^[1]。由于屋盖结构形式新, 选取的索夹节点复杂, 环索在施工张拉阶段以及施工完成以后, 索夹两侧产生了较大的不平衡力, 而现行的规范^[2-4]中并不能根据公式得到准确的索夹节点抗滑移承载力数值, 计算结果过于保守。

国内外学者已经针对不同实际工程和索夹节点形式进行了有限元模拟和试验研究。同时也提

出了一些新的抗滑移承载力计算公式^[5-7], 这些公式综合考虑了高强螺栓预紧力、拉索直径、索夹长度、索夹与拉索间的摩擦情况。曹永超等^[8]对下部为钢筋混凝土框架看台和上部为单层索网的霞田文体育场进行索网找形, 并对连接承重索和抗风索的索夹节点进行足尺试验研究, 确保其抗滑移承载力满足设计要求。苑玉彬等^[9]为验证徐州奥体中心体育场预应力拉索铸钢节点的抗滑移能力, 分别对其径索节点和径、环索节点进行抗滑移承载力的理论计算和足尺试验, 其结果均比模型计算的最不利工况下索节点的最大不平衡力大, 保证了索夹节点的实际使用需求。一些学者对实际工程为索穹顶

*山东省自然科学基金项目(ZR2020QE243)。

第一作者: 孙立领, 工程师, 主要从事智能制造与索结构研究, sunljl@163.com。

通信作者: 孙国军, 博士, 副教授, 主要从事空间结构与钢结构研究, sunguojun@bjut.edu.cn。

收稿日期: 2024-03-29

结构的索夹节点,进行了单索和群索的足尺试验,保证其在结构中的正常使用^[10-11]。然后对于实际工程为索拱桁架结构的索夹节点,有学者进行了索夹节点的有限元模拟和试验研究,保证了其使用要求,得到了这类结构所使用的索夹节点的索夹孔道与拉索之间的摩擦系数大小^[12-14],可为其他类似工程提供参考依据。还有考虑使用不同钢丝镀层对索夹节点抗滑移性能产生影响,并得到不同镀层情况下的索夹孔道与拉索之间的摩擦系数大小^[15-16]。上述研究多集中于实际工程,其结论对于不同结构形式的索夹节点不具有普遍适用性。而且大连梭鱼湾足球场因其结构形式复杂,上下环索需要分别设置索夹进行固定。上环索夹共固定4道拉索,并与上斜索、内环撑杆等构件相连,下环索夹固定8道拉索,并与下弦径向索等构件相连。为了确保结构体系的稳定与安全,验证索夹节点结构设计的合理性,需要对设计的索夹节点进行足尺试验。本文着重介绍下环索夹的足尺试验过程,并为后续相关建筑工程的施工设计建立基础。

1 工程概况

大连梭鱼湾足球场位于大连市甘井子区梭鱼湾,总建筑面积135922.2 m²。屋盖下部为混凝土框架结构,看台顶标高44.6 m。屋顶罩棚为索架结构,平面投影外轮廓为四心圆。索架支承于钢压环上,压环支承于56根直钢柱上,钢柱柱底、柱顶铰接,并在柱间设置人字支撑。索架内侧设置索拉环,拉环内侧设置钢挑棚,挑棚悬挑9.3~13.6 m,整个体育场中心开口尺寸长轴114.4 m,短轴96.2 m,具体结构形式见图1。

因为大连梭鱼湾足球场结构形式复杂,所以下环索夹需固定8道拉索,并与下弦径向索等构件相连。为保证所有节点的使用要求,选取该结构中连

接最为复杂的索夹节点群进行足尺试验,选取的试验点位置见图2。

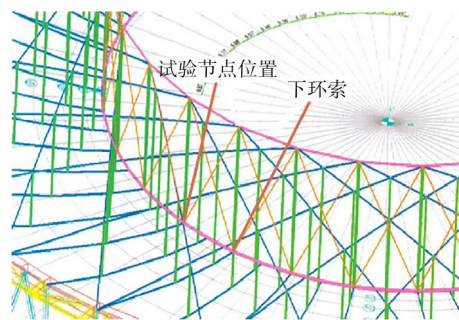


图2 试验取点位置

Fig. 2 The position of the measuring point

2 节点试验方案

索夹的抗滑移试验指群索的抗滑移承载力试验,在试验装置上安装环索,然后在环索上安装3个索夹和配套的压力传感器,张拉拉索至目标力,顶推索夹至其产生滑移,观察索夹的滑移情况,并实时监测高强螺栓的紧固力变化。根据实时监测的位移计得到位移-顶推力曲线,确定本施工项目所设计的索夹节点高强螺栓紧固力衰减程度、实际极限抗滑移承载力和索夹摩擦系数的实测值。

2.1 试验节点

本次试验选取下环索索夹为试验对象,索体是直径125 mm的外层Z型钢丝密封索,M27高强螺栓安装采用沉孔式,索夹内表面喷锌1 mm,试验节点样式见图3。

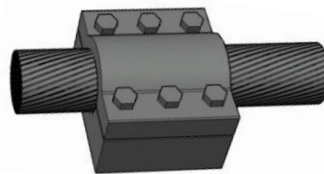


图3 试验节点样式

Fig. 3 Schematic diagram of the test joint

2.2 试验设备

试件材料主要是密封索、环索夹、高强螺栓,试验设备主要是油压表、位移计等其他测量安装设备,具体规格和数量见表1。

2.3 试验加载方案

2.3.1 组装节点与紧固螺栓

将下环索、索夹、高强螺栓及其配套的载荷压力传感器与试验机连接在一起,并安装连接采集仪

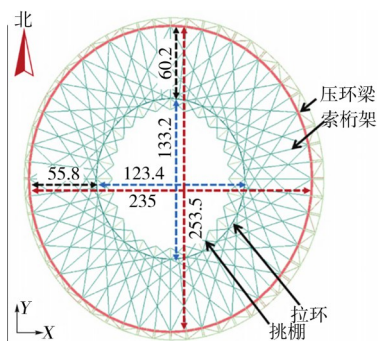


图1 屋盖结构体系平面 m

Fig. 1 Plan of the roof structure system

表1 试验材料与设备情况

Table 1 List of materials and equipment for testing

系统构成	型号、规格	数量	说明
下环索-索夹试验组装件	φ125下环索-索夹组件	3组	含配套高强螺栓
锚索计垫板	详见图纸	6个	—
索夹顶推设备	YCW60穿心式千斤顶	2台	顶推索夹
	压力表、油管等	若干	
扭力扳手	力矩扳手	1个	—
锚具位置的垫板	—	若干	—
位移计	位移计/百分表	1个	监测滑移位移量,索径变化量
测力计	MS30T	2个	监测高强螺栓轴力
读数仪	609A	1个	监测测力计内力
试验台座	—	1个	2000 t

器,进行初始化设置。用扭力扳手根据计算好的扭矩值对高强螺栓进行拧紧,螺栓拧紧时需遵守先拧中间,再往两边按照对角方式顺时针拧紧螺栓的原则。通过压力传感器对高强螺栓紧固力进行实时监测,若发现终拧后实测螺栓预紧力没有到达设计要求的预紧力,需再增加螺栓的终拧扭矩值,反复调试拧紧至要求的紧固力值 253 kN,并记录此时的拧紧力矩值(1200 N·m)作为实际工程拧紧高强螺栓的参考依据。将安装好的试验试件放置 24 h,并根据压力传感器实时监测螺栓预紧力损失情况。组装完成的试验节点见图 4。



图4 索夹节点试验装置

Fig. 4 Test devices for the cable clamp joint

2.3.2 拉索加载方案

试验索夹节点组装完成后对拉索进行张拉,采用 2000 t 的拉力试验机对环索分级张拉至环索破断荷载的 50%,即 7800 kN。分三级分别张拉至破断荷载的 15%,30% 和 50%,并在每级张拉结束后测量拉索的索径,得到拉索索径变化规律。

2.3.3 索夹节点加载方案

张拉拉索完成后对索夹节点分 5 级施加荷载至不平衡力设计值,每级荷载持荷 5 min,在此过程中,若索夹产生大幅度滑动则试验结束;若索夹没有产生滑动,则按照每级 50 kN 继续施加荷载,每级持荷 5 min,直至索夹产生大幅度滑动,认为试验结束。记录位移计和油压表的数值,得到索夹节点的位移-顶推力曲线。

2.4 索夹摩擦系数理论计算

将位移计装在环索上顶住索夹,索体两侧各安置一个位移计测量索夹相对于索体的位移,此后顶推索夹至滑移得到顶推力滑移曲线,记录数据并根据 JTG/T D65-05-2015《公路悬索桥设计规范》^[2]中关于索夹抗滑移系数的规定,得到索夹夹紧力与索夹的抗滑摩阻力计算公式:

$$F_{fc} = kuP_{tot} \quad (1a)$$

$$P_{tot} = n_{cb}P_b^c \quad (1b)$$

$$u = \frac{F_{fc}}{kn_{cb}P_b^c} \quad (1c)$$

式中: k 为紧固压力分布不均匀系数,取 2.8; u 为摩擦系数; P_{tot} 为索夹上所有连接螺栓的总夹紧力; P_b^c 为索夹上单根螺栓设计夹紧力; n_{cb} 为索夹上安装的螺栓总根数。

将高强螺栓有效紧固力和索夹节点抗滑移承载力数值代入式(1)中,计算得到索夹孔道和拉索的摩擦系数值。

3 试验过程与结果分析

3.1 试验准备阶段

组装试验索夹节点时按照试验方案紧固螺栓,为达到 253 kN 的紧固力设计值,用机械扭力扳手施

加了 1200 N·m 的拧紧力矩,随后静置 24 h,根据高强螺栓上连接的压力传感器实时测量高强螺栓紧固力值。

根据试验数据可得在拧紧完毕后的静置阶段,高强螺栓紧固力降低了 11%,此时的高强螺栓紧固力值为 225.17 kN。根据时间和高强螺栓紧固力损失数据,得到高强螺栓静置阶段的紧固力大小计算公式为:

$$y_1 = -1.16x_1 + 253 \quad (2)$$

式中: x_1 为静置阶段静置时间,h; y_1 为高强螺栓紧固力值,kN。

3.2 拉索张拉阶段

采用 2000 t 的拉力试验机对环索进行分级张拉至环索破断荷载的 50%,即 7800 kN。张拉分级荷载为 2340、4680、7800 kN。并在张拉前、张拉 15%、张拉 30% 和张拉 50% 时进行索体直径测量,得到每阶段张拉索体直径变化曲线,见图 5。可知:索体第

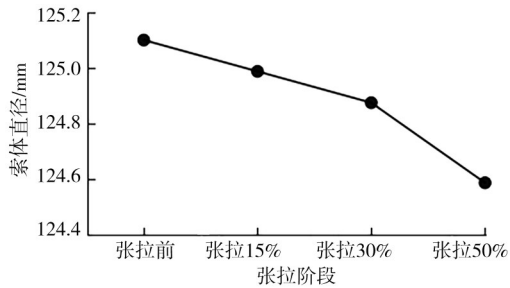


图5 索体直径变化

Fig. 5 Changes in cable diameter

一级张拉结束后径缩了 0.01%,第二级张拉后径缩了 0.1%,第三级张拉结束后径缩了 0.33%。可见,一级张拉结束后索体直径变化非常小,因为密封索外层钢丝是异形钢丝,异形钢丝之间结合更加紧密、相互作用更强,对于内部圆形钢丝的紧固作用也更强,故变形较小。一级张拉后直径变小的幅度变大,此时拉索应是处于弹性阶段。三级张拉之后拉索直径变小斜率变大,此时拉索处于弹塑性阶段,且随着力的增加,拉索截面转动,钢丝捻角减小,一定程度上也会使得索径相对于之前更小,这一现象更好地模拟了实际索夹节点在工程结构中的受力情况。

高强螺栓紧固力各阶段预紧力值变化见图 6,由图中数据计算两个高强螺栓紧固力平均值可得:第一级拉索张拉后,高强螺栓紧固力损失了 3.5%;第二级张拉完毕后,高强螺栓紧固力损失了 8.3%;

第三级张拉完毕后高强螺栓紧固力损失了 6%,此时高强螺栓紧固力值为 180.136 kN,根据索体张拉程度和高强螺栓紧固力损失情况,得到高强螺栓张拉阶段紧固力计算式为:

$$y_2 = -109.173x_2 + 225.17 \quad (3)$$

式中: x_2 为张拉阶段拉索直径缩小值,mm; y_2 为高强螺栓紧固力值,kN。

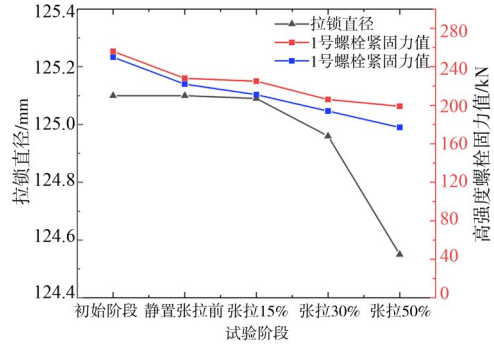


图6 试验静置张拉阶段拉索直径和高强螺栓预紧力变化

Fig. 6 Changes in cable diameter and high-strength bolt preload during the static tensioning stage of the experiment

结合上述高强螺栓紧固力损失结果可知高强螺栓紧固力会随着索体直径收缩而减小,说明在拉索张拉的过程中,索体直径变小,使得松弛状态下紧固的高强螺栓对拉索的挤压作用变小,从而导致高强螺栓的紧固力值也随着减小。

3.3 索夹顶推阶段

在环索上设置位移计,测量索夹与索体的相对位移,再用 2 台 60 t 千斤顶分级加载顶推索夹,用油压表数值控制加载过程,实时监测顶推力大小。按照试验方案中的加载方案对索夹节点进行加载,直到索夹产生大幅度滑移,认为试验结束。顶推加载过程见图 7。

根据油压表实时监测并记录加载的力值和位

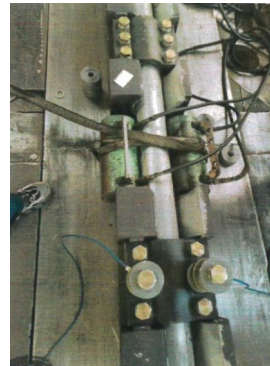


图7 顶推索夹过程

Fig. 7 Cable clamp jacking process

移计数值得到索夹节点位移-顶推力曲线,见图8。
可知:

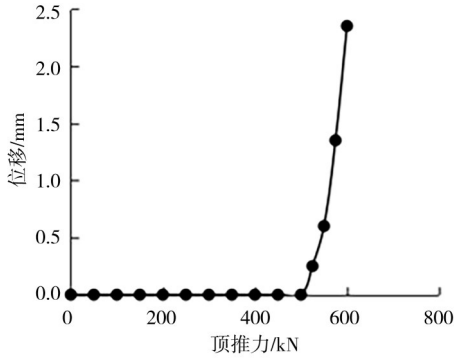


图8 索夹节点顶推力-位移曲线

Fig. 8 Jacking force-displacement curve of the cable clamp joint

1)在第一个拐点之前,索夹节点并没有产生滑动,说明此时的顶推力小于索夹孔道与拉索的静摩擦力值。第一个拐点之后,索夹开始滑动,索夹顶推端靠近索夹孔洞的位置随着顶推力的增加,应力也逐渐增大。在整个顶推的过程中高强螺栓受到索夹剪切力的作用,且由于其在张拉拉索阶段紧固力已经减小导致拉索受到的正压力减小,故索夹孔道和拉索之间的摩擦力也减小。所以当高强螺栓又受到较大的剪切力作用时,高强螺栓对索夹节点的紧固作用随着顶推力的增加逐渐降低,这会使索夹更趋向于滑动,直到顶推力到达500 kN,即图中第一个拐点时,只要增加小幅度顶推力,索夹节点就会产生大幅度滑动,说明此时整个索夹节点到达了抗滑移的极限承载能力。

2)将该承载力值(500 kN)和高强螺栓的有效紧固力实测平均值(180.136 kN)代入式(1c),可以得到试验索夹节点的拉索和索夹之间的摩擦系数为0.165,为后续其他类似形式的索夹节点对于综合摩擦系数的使用提供参考。

4 抗滑移承载力不同公式结果对比分析

各国针对索夹节点抗滑移承载力都有不同的计算公式,国内主要参考JTG/T D 65-05-2015《公路悬索桥设计规范》^[2]和T/CECS 1010-2022《建筑索结构节点设计标准》^[3],国外主要统一使用欧洲规范的计算公式^[4]。但是根据现有的试验和有限元模拟结果可知,这些规范公式的计算结果偏于保守,所以众多学者通过试验和有限元模拟提出了新的计算公式^[5-6]。具体公式结果对比如下。

1)根据T/CECS 1010-2022^[3]进行计算,计算式为:

$$R_{fc} = 2 \frac{\bar{u} P_{tot}^e}{\gamma_M} \quad (4a)$$

$$P_{tot}^e = (1 - \varphi_B) P_{tot}^o \quad (4b)$$

式中: R_{fc} 为索夹抗滑移设计承载力,N; γ_M 为索夹抗滑移设计承载力安全系数,宜取1.65; P_{tot}^o 为索夹上所有高强度螺栓的初始紧固力之和,N; P_{tot}^e 为索夹上所有高强度螺栓的有效紧固力之和,N; φ_B 为高强螺栓折减系数,取0.25~0.55; $\bar{u}$ 为索夹与索体间的综合摩擦系数,外裸的密封索取0.2。

将螺栓有效紧固力180.136 kN代入式(4)得:

$$R_{fc} = 2 \frac{\bar{u} P_{tot}^e}{\gamma_M} = 2 \times \frac{0.2 \times 6 \times 180.136}{1.65} = 262.016 \text{ kN}$$

2)根据欧洲规范EN 1993-1-11^[4]进行计算,计算式为:

$$F_{Ed\parallel} \leq \frac{(F_{Ed\perp} + F_r)u}{\gamma_{M,fr}} \quad (5)$$

式中: $F_{Ed\parallel}$ 为平行于钢索的外部构件的设计荷载; $F_{Ed\perp}$ 为垂直于钢索的外部构件的设计荷载; F_r 为可能降低的径向夹紧力; $\gamma_{M,fr}$ 为摩擦分项系数,取1.65; u 为索夹与索体间的摩擦系数,取0.1。

已知高强螺栓有效紧固力为180.136 kN, u 为0.1,代入式(5)得:

$$\frac{(F_{Ed\perp} + F_r)u}{\gamma_{M,fr}} = \frac{0.1 \times 6 \times 180.136}{1.65} = 65.504 \text{ kN}$$

3)根据文献[5]中提到的算式进行计算,计算式为:

$$F_f = 2unP_{tot}a_b b_L \quad (6a)$$

$$a_b = -0.0023D + 0.7983 \quad (6b)$$

式中: F_f 为索夹抗滑移承载力; u 为密封索的综合摩擦系数,取0.23; n 为螺栓数量; P_{tot} 为单个螺栓初始紧固力; a_b 为索径影响系数; b_L 为索夹长度影响系数,当索长 $L \leq 360$ mm时,取0.8;360 mm $< L \leq 540$ mm时,取0.9; $L > 540$ mm时,取1.0。

根据试验已知高强螺初始紧固力为253 kN,高强螺栓个数为6,代入式(6)得:

$$a_b = -0.0023D + 0.7983 = -0.0023 \times 125 + 0.7983 = 0.5108$$

$$F_f = 2unP_{tot}a_b b_L = 2 \times 0.23 \times 6 \times 253 \times 0.5108 \times 0.8 = 285.345 \text{ kN}$$

4)根据文献[6]中提到的算式进行计算,计算式为:

$$F_{fc} = n \bar{u} P_e \quad (7a)$$

$$P_e = \gamma_1 m (P_0 - \Delta P) \quad (7b)$$

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_S \quad (7c)$$

$$\Delta P_T = \gamma_2 P_0 \quad (7d)$$

$$\Delta P_S = \gamma_3 P_0 \quad (7e)$$

式中: F_{fc} 为索夹抗滑移承载力; n 为索夹与索体接触面数量, 一般为 2; $\bar{u}$ 为综合摩擦系数, 取 0.22; m 为高强螺栓个数; P_e 为高强螺栓有效紧固力; P_0 为高强螺栓设计预紧力; ΔP 为高强螺栓预紧力损失值; ΔP_T 为索力增加引起的高强螺栓预紧力损失值; ΔP_S 为高强螺栓自身应力松弛引起的预紧力损失; γ_1 为高强螺栓超拧或欠拧系数, 一般情况下取 0.1, 同时施工中考虑超拧, 超拧系数为 i , 则取 $i+1$, 如超拧 10%, 取 1.1, 若拧紧过程中有操作误差, 取 0.9; γ_2 为索力增加和横向荷载引起的预紧力损失系数, 螺杆净长明确, 按照式(8)计算, 若螺杆净长不明确, 取 45%; γ_3 为高强螺栓自身应力松弛系数, 取 4%。

$$\gamma_2 = \frac{5v\Delta FE_b E_r l_a d^2}{E_a R P_0 (10E_r l_b + 7\pi E_b d^2)} \quad (8)$$

式中: E_a 为拉索轴向弹性模量; E_r 为径向弹性模量; v 为拉索轴向与径向泊松比; R 为拉索直径; ΔF 为高强螺栓预紧后拉索索力增加值; l_a 为索孔道长度; l_b 为高强螺栓螺杆净长(索夹压盖板上表面与主体下表面之间的螺杆长度); E_b 为高强螺栓弹性模量; d 为螺杆直径。

根据试验已知高强螺初始紧固力为 253 kN, 高强螺栓个数为 6, 代入式(7)、(8)得:

$$F_{fc} = n \bar{u} P_e = n \bar{u} m P_e (1 - \gamma_2 - \gamma_3) = 2 \times 0.22 \times 6 \times 253 \times (1 - 0.45 - 0.04) = 340.639 \text{ kN}$$

将上述抗滑移承载力计算数值列于表 2。

表 2 抗滑移承载力值对比

Table 2 Comparisons of anti-slip capacity values kN

来源	抗滑移承载力值
文献[3]	262.016
文献[4]	65.504
文献[5]	285.345
文献[6]	340.639
本文试验	500.000

对比国内标准、欧洲规范和各理论计算公式可以得到, 欧洲规范的计算结果最为保守, 李金飞提出公式的计算结果^[6]较为贴近实际, 但计算结果仍然与试验结果有较大差异。综上可知, 现行的理论计算结果都偏于保守, 不够经济合理。而试验测试

结果可以较好地索夹节点在后续工程施工过程中提供安装依据, 为其他同类型的工程结构施工奠定了基础。

5 结 论

通过对大连梭鱼湾足球场下环索索夹节点进行抗滑移试验, 深入研究了索夹节点上高强螺栓紧固力的损失情况和索夹节点的滑移规律, 总结得到以下结论:

1) 理论计算的高强螺栓拧紧力矩值并不能到达实际需要的紧固力值, 需增加拧紧力矩至 1200 N·m 才能达到设计预紧力 253 kN, 该数值对本工程项目具有实际参考价值。且高强螺栓紧固力在拧紧完毕后的静置阶段产生了损失, 此时高强螺栓紧固力降低了 11%, 为 225.17 kN。

2) 拉索张拉阶段结束后, 高强螺栓紧固力一共损失了 17.8%, 此时高强螺栓紧固力值为 180.136 kN。拉索径缩程度是造成高强螺栓紧固力损失的主要原因, 占总损失值的 62%。随着拉索张拉力逐渐变大, 拉索直径变小导致高强螺栓的紧固作用变小, 说明高强螺栓紧固力损失与拉索径缩程度呈正相关。

3) 根据试验结果可以得到该设计试验索夹节点的抗滑移承载力为 500 kN, 根据式(1c)计算可以得到索夹与索体之间的摩擦系数为 0.165, 与相关规范相比存在差异, 本文试验得到的数值更好地满足了本工程项目的实际使用需求和安全要求。

4) 对比现行的规范和推导的理论计算公式的计算结果发现, 得到的抗滑移承载力数值较为保守, 对实际工程设计索夹节点时不够经济合理, 本文所做试验验证了设计的贴板压合型索夹节点满足实际工程各方面力学性能要求, 且相比于理论公式的计算结果对实际工程更具有参考价值。

参考文献

- [1] 陈一, 朱忠义, 张琳, 等. 大连梭鱼湾足球场罩棚结构设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(18): 75-80.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 公路悬索桥设计规范: JTG/T D65-05—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015.
- [3] 中国工程建设标准化协会. 建筑索结构节点设计标准: T/CECS 1010—2022 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- [4] European Committee for Standardization. Eurocode 3: design of steel structures -part 1-11: design of structures with tension components: EN 1993-1-11 [S]. Brussels: European Committee

- for Standardization, 2006.
- [5] 王国庆,刘红波,陈志华,等. 密封索索夹节点抗滑移影响因素及索丝应力分布研究[J]. 空间结构,2022,28(2):63-70.
- [6] 李金飞. 高应力全密封索-索夹抗滑移性能分析和试验研究[D]. 徐州: 东南大学,2017.
- [7] Miao R S, Shen R L, Wang L, et al. Theoretical and numerical studies of the slip resistance of main cable clamp composed of an upper and a lower part[J]. Advances in Structural Engineering, 2021,24(4):691-705.
- [8] 曹永超,霍文营,施泓,等. 霞田文体园体育场单层索网设计[J]. 钢结构(中英文),2023,38(10):42-48.
- [9] 苑玉彬,胡新赞,蔡兴东,等. 徐州市奥体体育场索夹受力试验研究[J]. 低温建筑技术,2013,35(8):81-83.
- [10] 李嘉,刘火明,刘盟盟,等. 密封索索夹抗滑移试验研究[J]. 建筑施工,2021,43(12):2639-2642.
- [11] 罗永峰,王飞,倪建公,等. 弦支穹顶索撑节点滑移性能试验[J]. 重庆大学学报,2012,35(4):65-71.
- [12] 杨宗林. 索拱桁架体系索夹抗滑移试验[J]. 计算机辅助工程,2019,28(1):36-39.
- [13] 石硕,李亚明,罗晓群. 枣庄体育中心体育场内环索桁架单索索夹抗滑移试验研究[J]. 建筑结构,2017,47(21):20-24.
- [14] 陈耀,冯健,盛平,等. 新广州站内凹式索拱结构索夹节点抗滑性能分析[J]. 建筑结构学报,2013,34(5):27-32.
- [15] 张海良,何旭初,汤亮,等. 体育场支撑环索抗滑移性能研究[J]. 金属制品,2020,46(5):53-59.
- [16] Wang Z Q, Han Q H, Lu Y, et al. Anti-slip performance of cast steel cable clamps for prestressed cables [J]. Structures, 2022, 46:353-368.

Experimental Research on Anti-Slip Performance of Closed Cable Clamp Joints in Dalian Suoyuwan Football Stadium

Liling Sun¹ Yujia Lin² Jiaying Xue¹ Qi An³ Shuo Han¹ Guojun Sun²

(1. Juli Rigging Co., Ltd., Baoding 071000, China;

2. College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract:

Due to the advantages of reasonable stress performance, light weight, high strength, and beautiful structural form, long-span space structures have been widely used in many stadiums, exhibition halls, assembly halls, and other buildings. As a large-scale civil building, Dalian Suoyuwan Football Stadium features a cable-truss structure with a four-center circle in plan. Its upper chords are obliquely crossed, while the lower chords follow a radial layout. Compared with conventional spoke-type cable-truss structures, the football stadium system demonstrates improved in-plane stiffness and overall torsional resistance. Because of its complex structure, the lower loop cable needs to fix 8 cables and other lower-chord radial cable members. To meet the requirements, a 125-mm-diameter plate press-fit cable clamp joint with six high-strength bolts was designed. Two experimental studies were carried out on the designed cable clamp joint. The paper investigated the tightening force loss of high-strength bolts during cable tensioning and the ultimate anti-slip capacity of the joint under cable clamp jacking conditions. Firstly, the cable clamp joint was assembled and left undisturbed for 24 hours. Then, the cable was tensioned in three stages up to 50% of its breaking load, followed by the cable clamp jacking until significant sliding occurred. The entire process was monitored in real time for high-strength bolt tightening force changes, cable diameter changes, and cable clamp displacement changes. The results showed that the tightening force of high-strength bolts was lost by 11% due to the time effect. The high-strength bolts experienced a 17.8% tightening force loss due to the reduction of the diameter of the tension cable when the cable was tensioned in the second step. During the third-step cable clamp jacking, the first inflection point of the displacement-jacking force curve was taken as the limit value of anti-slip capacity, and the anti-slip capacity value of the cable clamp joint was determined as 500 kN. The friction coefficient between the cable clamp channel and the cable body was 0.165 by introducing the anti-slip capacity formula. The tightening torque value and anti-slip capacity value of high-strength bolts obtained by the test can be used as the design basis for plate press-fit cable clamp joints, providing a solid theoretical basis for on-site installation monitoring and construction.

Keywords: large-diameter closed cables; cable clamp joint; anti-slip test; force detection; displacement monitoring