

文章编号:1000-582X(2012)04-065-07

弦支穹顶索撑节点滑移性能试验

罗永峰¹, 王 飞^{1,2}, 倪建公², 许立新³

(1. 同济大学 建筑工程系, 上海 200092; 2. 中船第九设计研究院 工程有限公司, 上海 200063;
3. 上海宝冶集团有限公司, 上海 200941)

摘 要:为精确研究弦支穹顶索撑节点对拉索的约束性能,以某在建的弦支穹顶钢屋盖为例,采用试验方法,对索撑节点的滑移性能进行了足尺模型试验,得到了该类节点的失效和破坏模式。提出了滑移力密度的概念,并用于描述此类节点的滑移性能,获得了拉索在节点中的实测静摩擦系数,并与有限元分析的结果进行对比。针对节点在张拉后对拉索约束力不足的缺点,提出了在节点凹槽内加肋的改进措施,并与未加肋节点的抗滑移性能进行了对比。试验与分析结果表明,密封套筒与插耳造成了约 10% 的预应力损失,施工中应进行超张拉以补偿这部分损失。原设计节点的破坏模式为拉索从节点中滑出,并伴随有外包 PE 的损坏,节点的最大实测滑移力为 150 kN,滑移力密度为 18.3 kN/mm,实测拉索与节点间静摩擦系数为 0.24,与有限元分析数据吻合。加肋改进节点最大实测滑移力为 240 kN,实测滑移力密度为 26 kN/mm,滑移力密度提高了 42%,较好地改善了节点对拉索的约束效果,提高了节点的抗滑移性能。

关键词:弦支穹顶;索撑节点;滑移性能;滑移力密度

中图分类号:TU394

文献标志码:A

Experimental research on the slipping performance of cable-strut joints

LUO Yong-feng¹, WANG Fei^{1,2}, NI Jian-gong², XU Li-xin³

(1. Building Department of Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China; 2. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd, Shanghai 200063, P. R. China; 3. Shanghai Baoye Group Corp., LTD, Shanghai 200941, P. R. China)

Abstract: Based on an actual project of a suspen-dome steel roof under construction, the constraint performance of cable-strut joint of a suspen-dome is studied precisely. Experiments of a full-scale cable-strut joint are conducted on and both the slipping performance and the failure mode of the joint are obtained. The concept of slipping force density is proposed to describe the slipping performance of the joint. The static friction factor is also gained in the test and the test values are compared with analytical ones. In comparison with the smooth clamping groove, the ribbed clamping groove is proposed against the deficiency of clamping strength of the joint after the cable being tensioned. The experimental and analytical results demonstrated that 10% prestress loss occurs in seal sleeve and socket ear, so that pre-stretching is recommended as compensation. In the experiment, primary joint fails with pulling out of the cable and damage of the out layer PE. The maximum slipping force for primary joint is 150 kN with the slipping force density of 18.3 kN/mm. The measured friction factor is 0.24, which agrees well with the FEM results.

收稿日期:2011-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51078289)

作者简介:罗永峰(1957-),同济大学教授,博士生导师,主要从事大跨空间钢结构施工力学、钢结构稳定及抗震性能研究,(E-mail)yfluo93@mail.tongji.edu.cn。

The maximum slipping force for the ribbed joint is 240 kN, and the measured slipping force density is 26 kN/mm, which increase, up to 42% compared with that of primary joint. It is indicated that the ribbed damping groove can fasten the cable more efficiently, and improve the sliding-resistance performance of the cable-strut joint. The research provides references for the application of this joint.

Key words: suspen-dome; cable-strut joint; slipping performance; slipping force density

弦支穹顶是一种将刚性的单层网壳和柔性索杆体系组合在一起形成的新型杂交空间结构体系^[1-5]。弦支穹顶结构撑杆的下节点(又称索撑节点)是弦支穹顶中撑杆、径向拉索和环向拉索的汇交点,是下弦环索将拉力转换为对上部钢网壳支承力的关键结构构件,因此,索撑节点的构造形式对其预应力损失大小及整体稳定承载力有决定性的影响^[6-7]。目前索撑节点的研究主要集中在 2 个方面:一是施工时滑动环索张拉过程中环索预应力损失及其对结构性能的影响,主要针对数值模拟方法的研究,如魏建东提出的滑移索单元法^[8],王树等采用有限元软件进行的非线性接触分析^[7],郭彦林等采用的冷冻-升温法^[9-10]及刘红波提出的环索预应力滑移摩擦损失的迭代算法^[11]等;二是新型节点形式的开发研究,如文献^[12]提出的带滑轮的新型索撑节点,山东茌平体育馆撑杆下节点就用该种节点形式。

以上方法均基于考虑和解决弦支穹顶预应力环索张拉施工过程中索撑节点处滑移摩擦导致的预应力损失及其对结构性能的影响,而对于在施工超张拉过程中或成形后,当节点两侧拉索存在不平衡力时(如半跨受荷)节点对环索的约束性能的研究,国内某制索厂家进行过内部测试分析^[13],试验采用抗压受载的方式模拟拉索受拉,直至节点与拉索主体出现相对滑移为止,以此测试拉索的抗滑移性能,但试验方法值得商榷。

以某体育馆弦支穹顶钢屋盖为工程背景,对索撑节点在两端拉索不平衡力的作用下,节点对拉索滑移的约束性能及其失效模式进行试验及理论研究,提出了索撑节点对拉索约束性能的改进措施,并与原节点的性能进行对比。鉴于目前国内外对索撑节点的抗滑移性能没有明确的设计标准,提出了滑移力密度的概念,并对节点的约束性能、临界失效状态及荷载进行量化,以此作为节点失效的标准;最后针对上述节点模型,进行了带摩擦接触有限元分析,并与试验结果进行对比,给出了该种节点的滑移静摩擦系数。

1 节点试验

1.1 试验目的

试验的主要目的包括:1)测试索撑节点对外包

PE 拉索的约束性能及节点滑移失效的机理及破坏模式,提出对节点的改进措施并进行对比试验验证;2)获得索撑节点与拉索间静摩擦系数的合理取值。

1.2 试件设计与制作

试件节点为某体育馆弦支穹顶钢屋盖结构第 2 圈环索转折处的撑杆下节点(见图 1),材料为 Q345B 铸钢,图 2 为其加工图,其中与环索接触的索撑节点内壁曲线由 AB、BC、CD 3 段组成,BC 为圆弧段,AB 和 CD 均为与 BC 相切的直线段,其延长线夹角为 155°。试验中为了比较不同凹槽摩擦面对节点抗滑移性能的影响,增制了一种新夹持面,即在原设计的光滑凹槽夹持面上,加肋的改进凹槽夹持面,凹槽内带肋夹持面肋痕的构造为沿凹槽弧线间隔 18 mm 布置,为 4 根 $\Phi 6$ 的弧形圆钢筋,如图 3 所示。2 种节点并分别记为 JD-1 和 JD-2,2 节点除肋痕外其余尺寸完全相同。

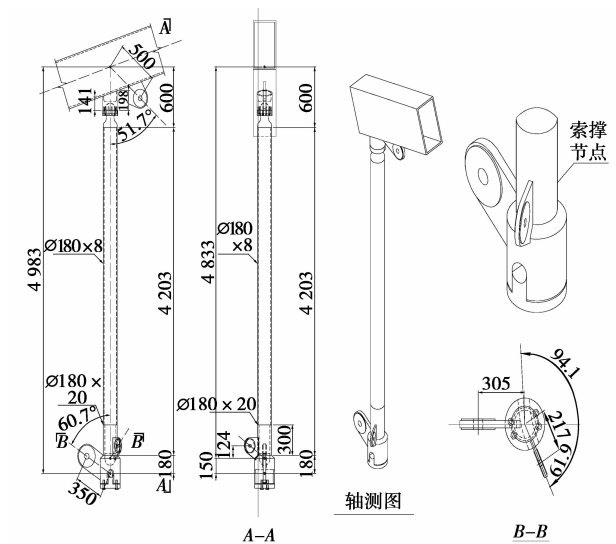


图 1 索撑节点连接构造

试验采用的钢索取自原设计用钢索,为 $\Phi 5 \times 121$ 高强度低松弛冷拔镀锌钢丝束^[14],强度等级为 1 670 MPa,外包双层 PE 管,内层黑色,外层白色,材料为高密度聚乙烯,钢索外径 75 mm。锚具采用双耳内旋式锚头,由专门制索厂加工,图 4 为其加工图,试验用拉索全长为 5 620 mm。

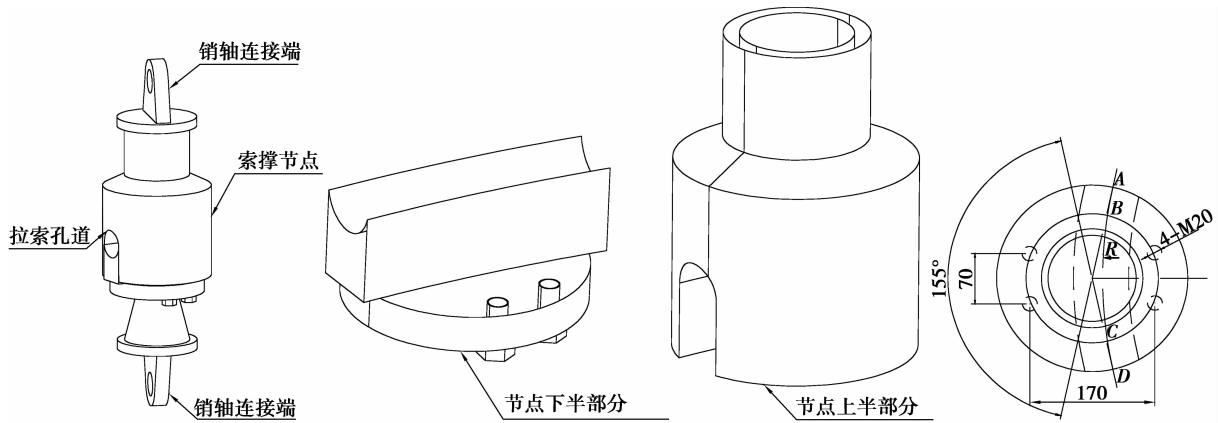


图 2 JD-1,2 加工构造示意

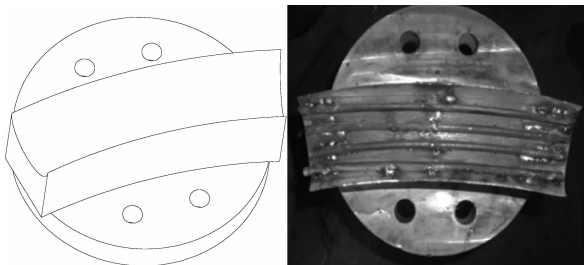


图 3 JD-1 光滑凹槽与 JD-2 带肋凹槽

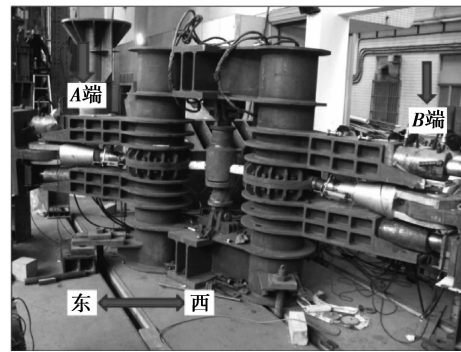


图 5 加载系统现场照片

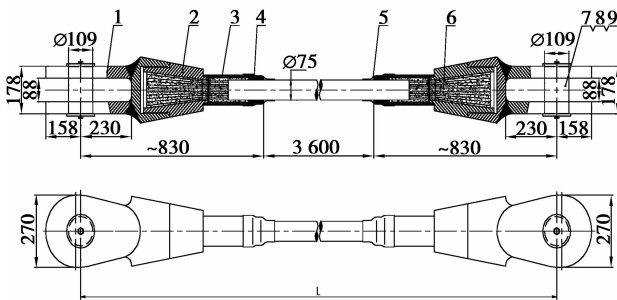


图 4 拉索加工图

1.3 反力架的设计与制作

为了便于对拉索两端加载,设计了自平衡反力架加载系统,包括自平衡反力架、与试件相连的销轴和 2 个加载端。反力架从中间被剖分成 2 部分,采用 8.8 级 M30 高强螺栓连接,试件与反力架以及加载端板与拉索端头均为销轴连接。图 5 为加载系统现场安装照片。

1.4 试验方法

1.4.1 加载方案

为了模拟节点在结构中的真实受力状态,忽略撑杆和斜拉索对节点的影响,将外包 PE 保护层的钢索安装于图 2 所示节点体的上、下 2 部分中间的

凹槽内,并通过拧紧设置于节点体下部的 4 颗预紧螺栓(预紧力为 620 kN),使节点体的上、下 2 部分抱紧,同时夹紧其中的钢索,而后将节点内置于反力架中。与撑杆相连的节点上端采用销轴连接的方式固定于反力架,为了保证加载过程中节点平面外的稳定性,亦将节点下端通过销轴连于反力架。拉索两端的拉力通过 2 对 100 t 的液压千斤顶在加载端加载,加载端连于拉索锚固端处的 U 型插耳,先两端同时加载,再对一端继续加载。

1.4.2 测点布置及测量

为得到准确的实测数据在试验中采用钢丝束上贴应变片的方法将钢索外包 PE 拨开一小口,在钢丝束上下各布置 1 枚应变片,用于测量拉索中的拉力。位移计布置于拉索端部靠近锚固端,方向沿拉索张拉方向,其一端与反力架相连,另一端与拉索端部绑定,用于测量张拉过程中拉索端部的相对滑移。为了标定拉索在节点中的滑移,在拉索外包白色 PE 上靠近节点端部均用彩笔做了标记,如图 6 所示。

1.5 试验现象与破坏模式

1.5.1 节点模型 JD-1

在试验过程中发现,JD-1 不能完全约束索的

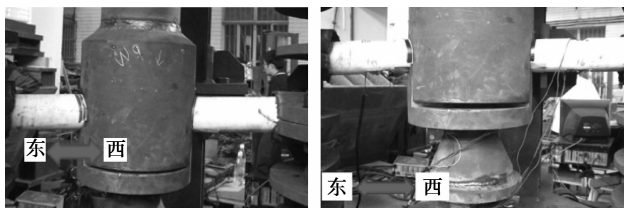


图 6 拉索滑移标定

滑移,自初始加载步,就存在索滑移的趋势和现象,随着荷载的增大,滑移现象更加明显,加载过程中拉索两端的拉力始终不平衡。当节点 JD-1 拉索的 B 端施加拉力荷载至 160 kN 时,拉索 A 端千斤顶荷载读数显示拉力为 240 kN,拉索两侧标定线无明显滑动,但拉索 A 端位移计显示向东(外侧)滑移 16 mm,拉索 B 端位移计显示向东(内侧)滑移 12 mm。当 B 端拉力加至 320 kN 时,A 端千斤顶荷载读数显示拉力为 480 kN,节点东侧标定线向东(外侧)滑出约 20 mm,西侧标定线仍无明显滑动,此时拉索 A 端位移计显示向东(外侧)滑移 27.6 mm,而拉索 B 端位移计显示向东(内侧)滑移 21.4 mm。当 B 端加载至 480 kN 时,拉索 A 端千斤顶荷载读数显示拉力为 660 kN,节点东侧标定线继续向东(外侧)滑移至 30 mm,西侧标定线仍无明显滑动,此时 A 端位移计显示向东(外侧)滑移至 31 mm,B 端位移计显示向东(内侧)滑移至 22 mm。当 B 端加载至 640 kN 时,拉索 A 端千斤顶荷载读数显示拉力为 826 kN,拉索东侧标定线不再滑动,西侧标定线仍无明显滑动,此时 A 端位移计显示向东(外侧)滑移至 33.6 mm,B 端位移计显示向东(内侧)滑移至 23 mm。当 B 端加载至 800 kN 时,拉索 A 端千斤顶荷载读数显示拉力为 950 kN,拉索两侧标定线无明显变化,A 端位移计显示向东(外侧)滑移至 38.5 mm,B 端位移计显示向东(内侧)滑移至 26 mm。当 B 端加载至 900 kN 时,拉索 A 端千斤顶荷载读数显示拉力为 1 220 kN,拉索两侧标定线无明显变化,此时 A 端位移计显示向东(外侧)滑移至 46 mm,B 端位移计显示向东(内侧)滑移至 26.6 mm,此时拉索上表面与节点体的上半部分不再紧密接触而是脱开一条缝隙,且与节点的下部接触的 PE 层有被撕裂的现象,节点下半部分外表面不再与节点外表面平齐,且两者间脱开一条缝隙(如图 7 所示),节点失效。卸载后,拉索东侧标定线恢复部分位移,但离节点卡口约尚有 5 mm 的变位。

1.5.2 节点模型 JD-2

改进后的节点 JD-2,其基本加载制度与加载

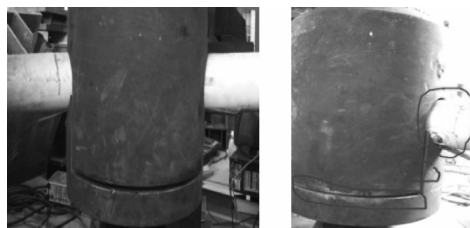


图 7 JD-1 节点破坏模式

过程与模型 JD-1 相同。节点在试验过程中的变形特征与破坏模式较之模型 JD-1,主要有以下区别:1)在相同荷载级别下,索外包 PE 上标定线的滑移量明显偏小;2)拉索两端的滑移量与相对滑移量偏小;3)节点失效后拉索外表 PE 无破损,PE 与节点卡口仍保持紧密接触,节点上、下两半间缝隙无明显增大现象(如图 8 所示)。

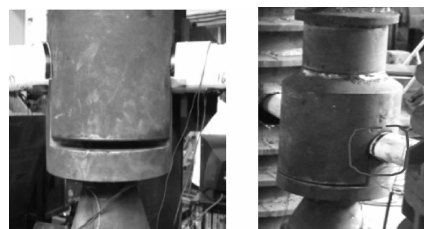


图 8 JD-2 节点破坏模式

2 试验结果分析

为测试索撑节点的抗滑移性能,除布置应变片外,拉索端头亦各布置 2 个位移计用以监测拉索张拉过程中拉索的滑移距离。为定量比较拉索在节点中的滑移,现定义如下概念:滑移力密度 SFD (Slipping Force Density),为拉索两端的实测索力差值即 $\Delta T_{AB} = T_{SA} - T_{SB}$ 与拉索两端的相对滑移量 Δ_{AB} 的比值,即 $SFD = \Delta T_{AB} / \Delta_{AB}$, T_{SA} 、 T_{SB} 分别为 A、B 端拉索实测拉力, Δ_{AB} 为位移计实测拉索端部移差值。为了真实地反应张拉中节点对拉索的约束性能,位移计实测值中 2 项对其影响较大,一是拉索由松弛状态到张紧状态后两者的变形差值,二是拉索在张拉过程中拉索自身的伸长量值。

2.1 松弛状态到张紧状态变形值

图 9 为此过程的计算简图,松弛状态下拉索的形状为弧 \widehat{AC} ,张紧后为直线 L_{AC} ,其中 A 点为位移计布置处。实测直线 $L_{AC} = 1\ 340$ mm,由直角三角形 AOD 可计算得到 $R = 2\ 257$ mm,弧长 $\widehat{AC} = 1\ 352.2$ mm,由此变形量 $\Delta_{AC} = \widehat{AC} - L_{AC} = 12.2$ mm,此即为拉索由松弛状态到张紧状态拉索

的位形变化量。

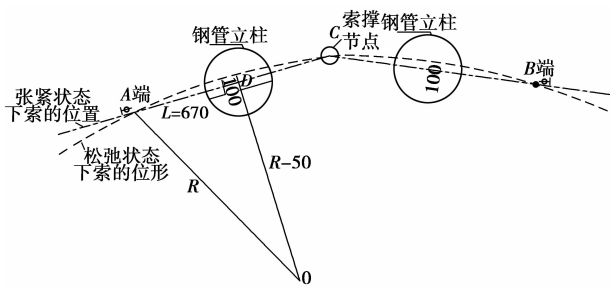


图9 拉索由松弛状态到张紧状态的计算简图

2.2 拉索自身伸长引起的变形量

此变形量为变量,随张拉力的增大而增大,计算公式为: $\Delta_s = TL_0/E_c A_c$,其中 T 为张拉过程中的实测预拉力, L_0 为拉索张紧后的直线长度,即直线 AC , E_c 、 A_c 为拉索的弹性模量和截面积。

图10、图11为考虑以上2种影响因素后得出的拉索两端张拉力差值与拉索两端实测位移值之间的荷载—位移曲线。

2.3 静摩擦系数的确定

静摩擦系数的确定,可采用工程界广泛应用的库仑摩擦模型^[15],即

$$F_f = \mu N_f, \quad (1)$$

$$\mu = \frac{F_f}{N_f}, \quad (2)$$

其中: F_f 为静摩擦力; μ 为测算摩擦系数; N_f 为拉索挤压力。

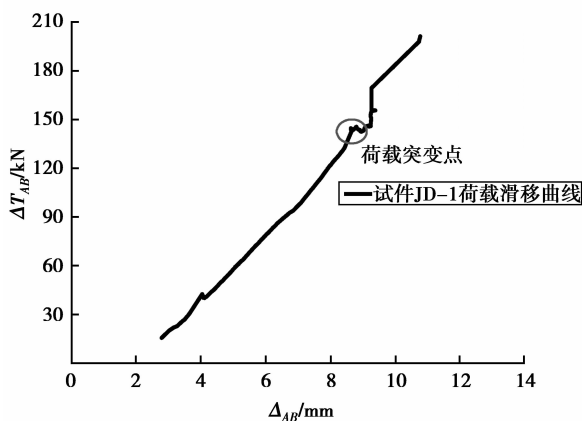


图10 JD-1 荷载滑移曲线

由图10~11 荷载滑移曲线可以得出以下结论:

1)2种形式索撑节点预拉力—滑移曲线规律基本一致,呈现出滑移距离随荷载线性增长,至最大荷载点曲线突然变陡,出现突变点,两端位移差减小接近于零,位移近似同步,表明此时节点对拉索的紧固

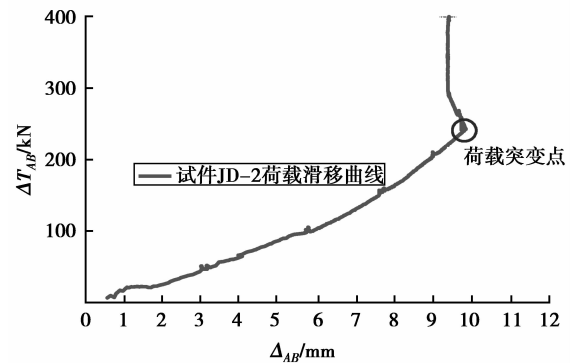


图11 JD-2 荷载滑移曲线

性能失效,拉索近似刚体运动;

2)图10中JD-1两端的滑移量达8.2mm时,拉索两端的拉力差值为150kN,其后两端的位移差值不再变化,节点两端滑移开始同步,索撑节点对拉索的静摩擦握裹力失效,节点对拉索的作用由静摩擦转化成动摩擦,计算得出JD-1的滑移力密度为18.3kN/mm,按式(2)测算得到的JD-1的静摩擦系数为0.24;

3)图11中JD-2两端拉力差值达240kN后,随着荷载的增大两张拉端的位移差产生回退,至位移差值达9.6mm时两端不再有新的差值产生,节点对拉索的静摩擦握裹力失效,此时JD-2的滑移力密度为26kN/mm,加肋后测算得到的JD-2的静摩擦系数为0.4,说明做了加肋改进后的JD-2,抗滑移能力有了明显的增长,约束效果增强,增长率达42%。

3 试验与有限元结果对比

为了进一步分析节点的受力机理和验证改进节点的合理性和可行性,在试验研究的同时,对JD-1模型进行带接触的非线性有限元分析^[11,19-20]。对铸钢索撑节点及拉索采用SOLID95单元进行网格划分(见图12),目标单元采用TARGE170,接触单元采用CONTA173,图13给出了有限元计算中接触对的设置。索撑铸钢节点弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比采用0.3,钢丝绳索弹性模量采用 2.0×10^5 MPa,泊松比取0.3,以上各材料特性均依据文献^[17]确定。环索经过索撑节点处弯曲形状与下节点内壁曲线曲率一致,经过圆BC段后,为直线段,索与索撑节点内壁接触状态为刚刚接触。施加的荷载分别有底部预紧螺栓的总预紧力,以及环索轴力设计值,节点顶部采用固端约束。分析中固定拉索两端的拉力差值(即前文 ΔT_{AB}),通过反复迭代

确定拉索与节点间静摩擦系数为 0.3, 计算结果如图 12~图 14 所示, 表 1 为试验和有限元结果对比。



图 12 节点模型及网格划分



图 13 接触单元的设置

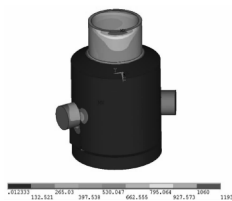


图 14 Von-Mises 应力云图

表 1 有限元与试验结果对比

模型 1	最大滑移力/kN	摩擦系数
JD-1	150	0.24
JD-2	240	0.40
生产商数据 ^[13]	—	0.18
FEM	150	0.30

图 14 显示在滑移状态下节点上端与撑杆连接处有一部分应力集中区, 这是由于拉索两端的拉力在 X 方向有分量, 导致其偏心受压所致, 但整个节点的应力水平不高, 表明索撑节点的安全满足要求; 节点对拉索卡口处有较大的应力集中, 这与前文试验现象中此处 PE 被撕裂现象一致, 实际节点此处的接触区域应进行光滑倒角处理。

有限元计算固定节点最大滑移力为 150 kN, 此时与之相对应的摩擦系数为 0.3, 较之实测数据偏大, 这是由于拉索外包 PE 降低了与节点间的摩擦系数, 导致拉索在节点中易于滑动; 节点中加肋可以较大幅度的提高节点对拉索的握裹力, 但同时也增加了与拉索之间的摩擦系数, 这可能会造成张拉过程中拉索在节点中滑动时, 产生较大的预应力损失,

实际应用时应对肋进行特殊的工艺处理, 使之表面尽量光滑, 以易于拉索在凹槽中滑动。

JD-1 凹槽光滑状态下测得的摩擦系数为 0.24, 较之索厂提供的摩擦系数 0.18 偏大, 这可能是不同的试验方法差异所致, 实际应用时可根据需要合理的确定摩擦系数。

4 结 论

1) 试验研究发现, 在光滑凹槽的上、下两半铸钢节点以原设计预紧螺栓的方式对外包 PE 的拉索施加握裹力的方法效果不佳, 铸钢节点夹持处不能有效的防止外包 PE 的拉索在节点中滑动。张拉过程中发现, 卡口会对外包 PE 造成一定的侵入, 对外包白色 PE 造成一定的损坏, JD-1 的破坏模式为拉索在节点中滑出, 并伴随有外包 PE 的损坏;

2) 试验中发现, 原设计节点预紧螺栓的位置设定不甚合理, 减小了上、下凹槽与拉索的接触面积, 使铸钢节点不能很好的形成对拉索的握裹力, 使节点在承受较大拉力时, 一侧有较大的缝隙出现;

3) JD-1 最大滑移力实测值为 150 kN, 而加肋后节点的最大滑移力实测值为 240 kN, 采用凹槽加肋改进的节点一方面提高了节点对拉索的握裹力, 使抗滑移摩擦力提高 42%, 同时也减小了拉索在节点中的弯折, 避免 PE 被撕裂, 较好地保护了拉索;

4) 采用滑移力密度的概念用于描述索撑节点的抗滑移能力, 使节点的滑移能力相互间有了比较的依据, 实测 JD-1 的极限滑移力密度为 18.3 kN/mm, 而 JD-2 的极限滑移力密度为 26 kN/mm, 滑移力密度数值越大, 表明节点对拉索约束效果越好, JD-2 肋的存在可以较大地提高节点的滑移性能;

5) 通过实测数据和有限元分析, 给出了该种节点外包 PE 拉索与节点间的静摩擦系数为 0.24;

6) 在施工张拉过程中, 为避免拉索在索撑节点中滑移过大造成较多的预应力损失, 需要 PE 与节点间的摩擦系数较小; 但较小的摩擦系数会降低节点对拉索的预紧效果, 而加肋的节点形式, 由于 PE 的存在可以保证张拉过程中的滑移能力, 又较好地提供了节点对拉索的预紧效果, 不失为一种可行的改进方法。

参考文献:

- [1] KAWAGUCHI M, ABE M, HATATO T, et al. On a structural system "suspension-dome" system [C]// Proceedings of IASS Symposium, May 24-28, 1993, Istanbul, Turkey. [S. l.]: [s. n.]: 1993: 523-530.

- [2] KAWAGUCHI M, ABE M, HATATO T, et al. Structural tests on the "suspen-dome" system [C]// Proceedings of IASS Symposium. May 30-June 3, 1994, Istanbul, Turkey. [S. l.] [s. n.]: 1994: 384-392.
- [3] TATEMICH I, HATATO T, ANMA Y, et al. Vibration tests on a full-size suspen-dome structure [J]. International Journal of Space Structure, 1997, 12(3-4): 217-224.
- [4] KAWAGUCHI M, ABE M, TATEMICH I. Design, tests and realization of "suspen-dome" system [J]. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures, 1999, 40(3): 179-192.
- [5] 陈志华. 弦支穹顶结构[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [6] 葛家琪, 张国军, 王树, 等. 2008 奥运会羽毛球馆弦支穹顶结构整体稳定性能分析研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 22-30.
GE JIA-QI, ZHANG GUO-JUN, WANG SHU, et al. The overall stability analysis of the suspend-dome structure system of the badminton gymnasium for 2008 Olympic Games [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 22-30.
- [7] 王树, 张国军, 张爱林, 等. 2008 奥运会羽毛球馆索撑节点预应力损失分析研究[J]. 建筑结构学报, 2007, 28(6): 39-44.
WANG SHU, ZHANG GUO-JUN, ZHANG AI-LIN, et al. The prestress loss analysis of cable-strut joint of the badminton gymnasium for 2008 Olympic Games [J]. Journal of Building Structures, 2007, 28(6): 39-40.
- [8] 魏建东. 滑动索系结构分析中的摩擦滑移索单元[J]. 工程力学, 2006, 23(9): 66-70.
WEI JIAN-DONG. Friction gliding cable element in analysis of gliding cable structures [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(9): 66-70.
- [9] 郭彦林, 崔晓强. 滑动索系结构的统一分析方法——冷冻-升温法[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 156-160.
GUO YAN-LIN, CUI XIAO-QIANG. A unified analytical method for gliding cable structures-frozen-heated method [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 156-160.
- [10] 崔晓强, 郭彦林, 叶可明. 滑动环索连接节点在弦支穹顶结构中的应用[J]. 同济大学学报, 2004, 32(10): 1300-1303.
CUI XIAO-QIANG, GUO YAN-LIN, YE KE-MING. Application of gliding hoop cable joint in suspen-dome structures [J]. Journal of Tongji University: Nature Science, 2004, 32(10): 1300-1303.
- [11] 刘红波, 陈志华, 周婷. 弦支穹顶结构预应力张拉的摩擦损失[J]. 天津大学学报, 2009, 42(12): 1055-1060.
LIU HONG-BO, CHEN ZHI-HUA, ZHOU TING. Prestress loss induced by friction in suspendome construction [J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(12): 1055-1060.
- [12] 陈志华, 毋英俊. 弦支穹顶滚动式索节点研究及其结构体系分析[J]. 建筑结构学报, 2010(增刊 1): 234-240.
CHEN ZHI-HUA, WU YING-JUN. Design of roll cable-strut joint in suspendome and analysis of its application in the whole structure system [J]. Journal of Building Structures, 2010(S1): 234-240.
- [13] 巨力索具股份有限公司. 索夹滑移试验报告[R]. 保定: 巨力索具股份有限公司, 2005.
- [14] 巨力索具股份有限公司. 拉索使用说明书[R]. 保定: 巨力索具股份有限公司, 2009.
- [15] 王勋成. 有限单元法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [16] GARRIDO J A, FOCES A, PARIS F. An incremental procedure for three-dimensional contact problems with friction [J]. Computer and Structures, 1994, 50(2): 201-215.
- [17] 中国工程建设标准化协会. CECS 212-2006 预应力钢结构技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2006.

(编辑 陈移峰)

(上接第 64 页)

- [16] 赵毅, 汪黎东, 王小明, 等. 烟气脱硫产物—亚硫酸钙非催化氧化的宏观反应动力学研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(8): 116-120.
ZHAO YI, WANG LI-DONG, WANG XIAO-MING, et al. Study on the macroscopical uncatalyzed oxidation kinetics of desulfurization residual product-calcium sulfite [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2005, 25(8): 116-120.
- [17] 蒋旭光, 李琦, 李香排, 等. 燃煤过程中钙基及镁基吸收剂对 HCl 吸收作用的试验研究[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 626-630.
JIANG XU-GUANG, LI QI, LI XIANG-PAI, et al. Chloride of emission control by calcium-based and magnesium-based sorbents during coal combustion [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 626-630.

(编辑 陈移峰)