

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.046



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



填充混凝土对钢管内外法兰节点轴拉性能的影响

刘永生,王昊,陶欣,林刚,张传瑾,王秋临

(南京电力设计研究院有限公司,南京 210009)

摘要:钢管内外法兰节点广泛应用于大跨越输电杆塔,主管填充混凝土成为提高节点承载力和改善钢管受力的有效手段。为揭示轴向拉伸荷载下填充混凝土对钢管内外法兰节点力学性能的影响,设计2组填充混凝土内外法兰节点(CFIOF)和2组内外法兰节点(IOF)进行轴拉试验,对比分析失效模式、法兰板张开量、关键部位的应变发展和外内圈螺栓轴拉力比 β 。建立并验证了CFIOF有限元模型,用于开展参数分析,揭示法兰板厚度、螺栓间距和混凝土强度对 β 的影响规律。研究发现:CFIOF的失效模式与IOF基本一致,均为法兰板张开,伴随螺栓螺纹区变形;当张开量相同时,填充混凝土能使承载力提高5%以上;填充混凝土能使内外圈螺栓受力更为均匀。随着法兰板厚度增加, β 呈现先增大后减小的趋势,并逐渐趋近于1;随着螺栓间距和混凝土强度的增大, β 逐步降低并趋于1,其中混凝土强度对 β 的影响最小。

关键词:输电杆塔;填充混凝土;内外法兰节点;失效模式;承载力;螺栓轴拉力比

中图分类号: TU391 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Influence of filling concrete on the axial tensile performance of steel tube inner and outer flange joints

LIU Yongsheng, WANG Hao, TAO Xin, LIN Gang, ZHANG Chuanjin, WANG Qiulin

(Nanjing Electric Power Design & Research Institute Co. Ltd., Nanjing 210009, P. R. China.)

Abstract: Steel tube inner and outer flange joints are widely used in large-span transmission towers. Filling concrete in chord has become an effective method to improve the bearing capacity and the stress on steel tubes. In order to reveal the influence of filled-concrete on the mechanical properties of steel tube inner and outer flange joints under axial tensile load, two concrete-filled inner and outer flange joints (CFIOF) and two inner and outer flange joints (IOF) were designed for axial tensile tests. The failure mode, flange opening deformation, strain development of key parts and axial tension ratio β of outer and inner bolts were compared and analyzed. Then, a CFIOF finite element model was established and validated for parameter analysis to reveal the influence of flange thickness, bolt spacing, and concrete strength on β . The study found that the failure mode of CFIOF is basically the same as that of IOF, both of which are flange plate opening, accompanied by deformation of the bolt thread area. When the opening deformation is the same, the bearing capacity can be increased by more than 5%. Filling concrete can make the inner and outer bolts more uniformly under stress. As the thickness of the

收稿日期: 2025-02-18

基金项目: 国网江苏省电力有限公司省管产业单位科技项目(JC2024085)

作者简介: 刘永生(1984-),男,高级工程师,主要从事输电线路结构性能研究,E-mail: 909780460@qq.com。

Received: 2025-02-18

Foundation item: State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Provincial Management Industry Unit Science and Technology Project (No. JC2024085)

Author brief: LIU Yongsheng (1984-), senior engineer, main research interest: structural performance of transmission lines, E-mail: 909780460@qq.com.

flange plate increases, β shows a trend of first increasing and then decreasing, gradually approaching one. With the increase of bolt spacing and concrete strength, β decreases gradually and tends to 1. The effect of concrete strength on β is the smallest.

Keywords: transmission towers; filled-concrete; inner-to-outer flange joint; failure mode; bearing capacity; bolt axial tension ratio

随着电力需求的日益增加,跨海、跨江等大跨越输电线路建设不断发展。其中,钢管塔是电力传输中的重要一环。法兰节点是钢管塔中最主要的连接方式,包括柔性法兰节点^[1]、刚性法兰节点^[2]、内外法兰节点^[3]等。尽管法兰连接提高了节点的刚度和承载力,塔腿屈曲仍然是钢管塔最主要的失效模式。为了避免该现象,填充混凝土成为了一种有效的方案,这有利于改善主管和节点的受力^[4]。然而,鲜少有学者考虑混凝土对节点轴拉承载力的影响。

关于法兰节点的研究主要集中在单圈空心钢管法兰的受力性能。Van-Long 等^[5]介绍了一种螺栓连接法兰节点的测试流程,分析了节点在单一荷载作用下的受力特性。Wang 等^[6]研究了圆管和方管法兰的抗弯性能,并提出屈服线理论简化计算方法。Huang 等^[7]在研究法兰节点受拉性能中提出了螺栓撬力计算公式。王元清等^[8-9]、宗亮等^[10-11]开展了法兰节点抗弯承载力试验及有限元分析,推导出钢管结构法兰连接节点抗弯及拉弯承载力计算及设计方法。在内外法兰节点研究方面,陈聪^[12]研究了内外双层法兰的拉弯和压弯力学性能。Deng 等^[13-14]研究了多层钢管法兰在轴拉荷载作用下的力学性能,发现多层钢管法兰具有较高的延性和承载力。孙传琦等^[15]、段军等^[16]开展内外法兰节点纯弯及偏压承载力试验研究,确定了承载力设计时旋转轴的位置。李泽仁等^[17]通过试验和数值模拟得到了钢管内外法兰节点的内外圈螺栓拉力比,偏拉工况下旋转轴的位置。陈前等^[4]在内外法兰节点中填充混凝土,发现填充混凝土可有效避免钢管发生局部屈曲,总结了内外圈螺栓内力分布规律及旋转轴位置取值。由此可见,钢管混凝土法兰节点具有广阔的应用前景,而填充混凝土对钢管混凝土法兰轴拉性能的影响仍尚未可知。

笔者针对是否填充混凝土的内外法兰节点开展研究。设计 2 组填充混凝土的内外法兰节点和 2 组未填充混凝土的内外法兰节点。通过轴拉承载力特性试验,分析失效模式、承载力变形特性及典型部位应变发展,揭示外内圈螺栓轴拉力比的发展规律。同时通过数值模拟探讨了法兰板厚、螺栓间距和混凝土强度等关键参数对外内圈螺栓轴拉力比的影响。

1 试验概况

1.1 试件设计

为了揭示填充混凝土对内外法兰节点轴拉承载力特性、传力机理和内外圈螺栓轴拉力分担比例,同时为了增强试验结果普适性,设计了 2 组填充混凝土内外法兰节点(CFIOF-1、CFIOF-2)进行轴拉试验,考虑了不同的内外螺栓参数。同时,设计了 2 组未填充混凝土的内外法兰节点(IOF-1、IOF-2)作为对比试件。试件设计细节如图 1 所示,钢管为 $\Phi 610 \times 16$;法兰板内径 D_{pi} 和厚度分别为 468 mm 和 20 mm;内螺栓圆直径 D_{bi} 为 518 mm;法兰板外径 D_{po} 和外螺栓圆直径 D_{bo} 等参数见表 1。试件中的主管、法兰板和加劲肋均采用 Q355 钢,通过材性实验得到 Q355 钢的屈服强度和极限强度分别为 380、576 MPa。同样地,6.8S 螺栓和 8.8S 螺栓的屈服强度分别为 570、770 MPa,极限强度分别为 680、930 MPa。对于填充的混凝土,经过 28 d 养护后,测得其标准抗压强度为 36.9 MPa。

1.2 加载方案

由于钢管混凝土内外双圈法兰承载力较高,常规千斤顶加载装置无法满足荷载需求,因此设计了如图 2 所示的加载装置,采用 1000 t 电液伺服压剪机进行加载。该加载装置主要由 4 部分组成:内外法兰节点、环形支撑反力架、矩形传力框架和压剪

表 1 试件尺寸

Table1 Specimen dimensions

试件编号	内螺栓			外螺栓			加劲肋/mm	法兰板			混凝土等级
	D_{bi} /mm	等级	数量规格	D_{bo} /mm	等级	数量规格		D_{pi} /mm	D_{po} /mm	厚度/mm	
IOF-1	518	6.8 S	28M16	670	6.8 S	28M16	770×10	468	720	20	
IOF-2	518	8.8 S	28M16	680	6.8 S	32M20	770×10	468	740	20	
CFIOF-1	518	6.8 S	28M16	670	6.8 S	28M16	770×10	468	720	20	C35
CFIOF-2	518	8.8 S	28M16	680	6.8 S	32M20	770×10	468	740	20	C35

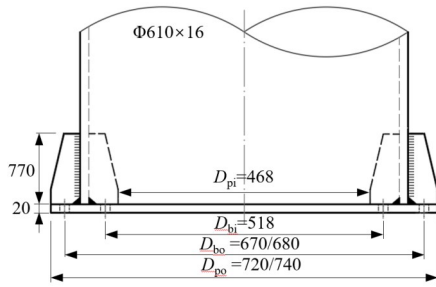


图1 试件设计

Fig.1 Specimen design

机。具体地,环形支撑反力架由方钢管和箱梁焊接形成,矩形传力框架由上下分配梁和钢管混凝土柱连接形成。环形支撑反力架和矩形传力框架中均预留孔洞以实现与内外法兰节点的独立连接。内外法兰节点的上端通过螺栓与箱梁连接形成约束端;同样地,内外法兰节点的下部与下分配梁连接形成加载端。为了保证法兰试验受轴拉作用,在设计加载装置时,试件两侧的钢管混凝土柱沿法兰节点轴线左右对称布置在下分配梁上,布置上分配梁时,保证上分配梁的中轴线到两根钢管混凝土柱的距离相等,并在中轴线位置处进行标记,加载时保证压剪机的加载点位置与标记点重合即可。

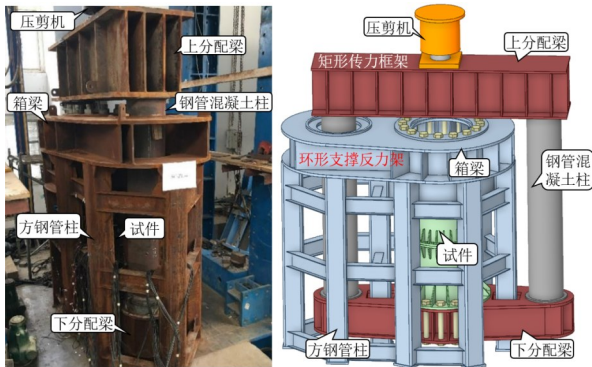


图2 内外法兰轴拉试验装置

Fig.2 Inner-outer flange axial tension test device

在组装阶段,通过预置式扭矩扳手对螺栓施加预紧力。根据《架空输电线路杆塔结构设计技术规程》(DL/T 5486—2020)^[18]中法兰螺栓预紧扭矩值的规定,对 6.8M16、8.8M16、6.8M20 螺栓分别施加 80、110、160 N·m 扭矩。在正式加载前,对试件进行预加载以消除构件间间隙等因素对试验结果的影响,预加载值取设计荷载的 10%。正式加载采用分级加载制度,当荷载小于设计荷载时,使用力控制加载速度,以设计荷载的 10% 为增量逐级加载。当荷载达到设计荷载后,采用位移加载制度,每级按 0.5 mm 进行,直至螺栓应变达到极限应变值时停止加载。

1.2 测试方案

测点布置如图3所示。为精确捕捉加载过程中

上下法兰板的张开量,在法兰板上表面布置4个位移计 D1~D4,位移计 D5~D8 对称布置在下表面。每个位移计环向间隔 90°,形成中心对称。法兰板的张开意味着混凝土可能出现裂缝发展,因此在法兰板啮合平面混凝土内部对称布置两个应变计 C1 和 C2,用于考察加载过程中混凝土的开裂情况。在轴拉作用下,节点的受力关于法兰板表面对称,仅在单侧布置应变片以获得钢管、加劲肋、法兰板和螺栓的变形发展:1)与位移计布置方式一致,在钢管外壁表面沿轴向布置4个应变片 T1~T4;2)选取环向间隔 60°的单区格,在内外加劲肋上沿斜向布置4个应变片 S1~S4;3)与加劲肋的单区格对应,在内外法兰板表面沿环向布置4个应变片 P1~P4;4)在同样的单区格内,每个螺栓对称布置了两个轴向应变片以获得轴拉力,外螺栓应变片为 B1~B4,内螺栓应变片为 B5~B9。

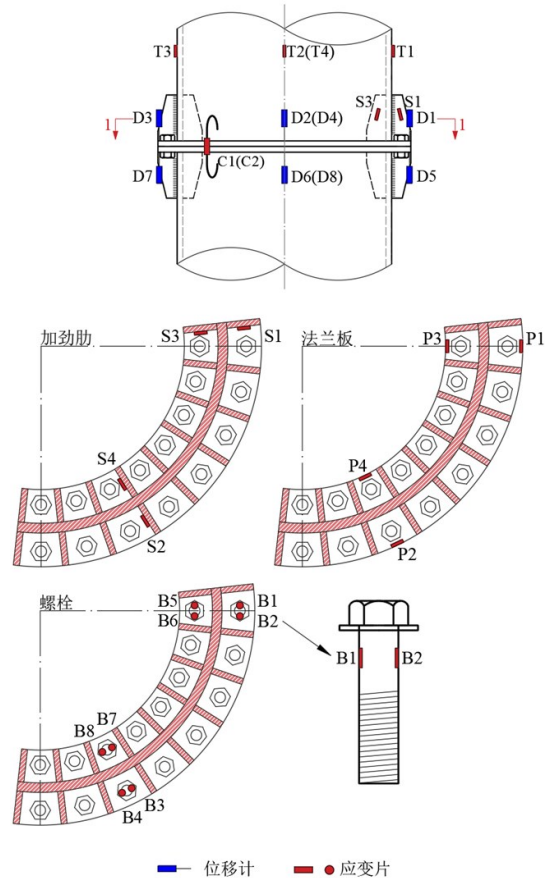


图3 测点布置

Fig.3 Layout of measuring points

2 试验结果分析

2.1 失效模式

CFIOF 的典型失效模式如图4所示。无论内外法兰节点内部是否填充混凝土,失效模式均为法兰板张开,伴随着螺栓螺纹区的颈缩破坏。同时,

极限荷载对应的法兰板张开量约 3 mm,这意味着内部的混凝土出现了裂缝。当混凝土出现裂缝退出工作后,由内外双圈螺栓承担全部轴拉力,法兰节点的极限承载力由螺栓强度决定。但在内外法兰节点的两端并未观察到显著的裂纹,填充的混凝土和内外法兰之间也没有滑移分离现象。这表明填充的混凝土和内外法兰具有较好的整体性,对内圈连接螺栓、内侧法兰板和加劲肋形成包裹以限制其变形,有利于改善内外法兰节点的受力。

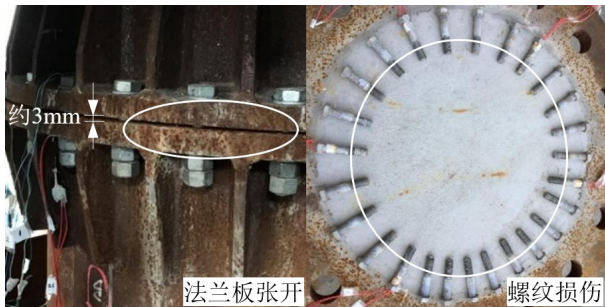


图4 失效模式

Fig.4 Failure mode

2.2 荷载-变形特性

法兰的张开量是判断内外法兰节点受拉性能的主要因素。法兰板上下位移量之和为张开量,得到的4组试件的荷载-张开量发展情况如图5所示。由于4个位置的张开量变化趋势一致,仅以测点D1和D5进行对比讨论。加载初期,4组节点均处于弹性阶段内,轴向荷载和法兰板张开量基本呈线性发展。随着荷载的增加至约 500 kN,上下法兰板间开始出现缝隙,此时混凝土并未开裂。当荷载达到法兰设计荷载时,两法兰板已完全分离,意味着CFIOF-1和CFIOF-2试件啮合面处混凝土已经开裂,且螺栓螺纹出现颈缩。可以看出,相比于IOF-1和IOF-2,CFIOF-1和CFIOF-2的承载力分别提升了 5.85% 和 5.24%。内螺栓等级和外螺栓数量规格的增加对承载力的提升效果约为 35.71%。虽然填充混凝土对承载力的提升较小,但是填充混凝土

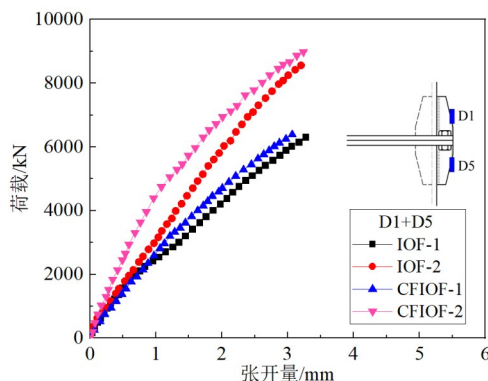


图5 荷载-张开量曲线

Fig.5 Load-opening deformation curves

对张开量的发展具有限制作用。具体地,荷载相同时,CFIOF的张开量发展更加缓慢且小于IOF。这表明填充混凝土能够有效分担螺栓所受轴向拉力,改善节点受力。

2.3 典型部位应变发展特性

2.3.1 混凝土应变特点

由于内部混凝土裂纹无法直接观测,法兰板啮合处的混凝土应变发展显得尤为重要。CFIOF-1和CFIOF-2试件法兰板啮合处混凝土荷载-应变曲线如图6所示。当轴向荷载小于 2 000 kN时,随着荷载的持续增加,混凝土的应变几乎为 0,意味着混凝土并未受力。这是因为所有螺栓施加了预紧力,而轴向荷载并未克服螺栓预紧力的作用。随着荷载的增加,混凝土的应变开始非线性发展。对于CFIOF-1和CFIOF-2,当荷载分别达到 4 040 kN 和 4 700 kN 时,混凝土应已超出极限拉应变 $2\,000 \times 10^{-6}$,表明啮合面处混凝土已受拉开裂,退出工作。此外,相同荷载下,内外螺栓数量和规格的增加使得混凝土的应变发展更加缓慢。

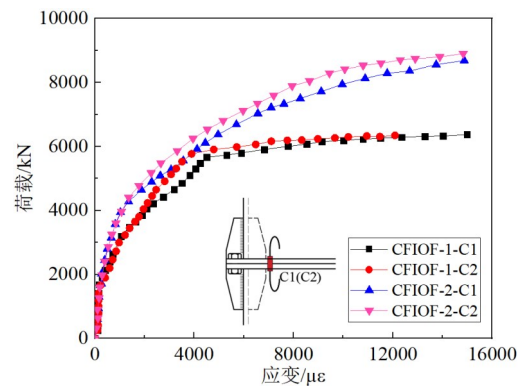


图6 荷载-混凝土应变

Fig.6 Load-concrete strain curves

2.3.2 法兰板应变特点

法兰板的荷载-应变曲线如图7所示。与张开量类似,对比相同的单区格内应变发展。在整个加载过程中,4组试件的法兰板处于弹性阶段,均未发生屈服。法兰板的应变均为负值,处于受压状态,这是因为法兰板的变形主要由连接螺栓的挤压造成。对于IOF-1与IOF-2试件,内外法兰板应变发展较为接近,表明内外螺栓的受力几乎相同,共同分担了单区格的管壁轴拉力。在CFIOF-1和CFIOF-2试件中,由于管内填充的混凝土使得内侧法兰板刚度得到提升,内圈螺栓承受的轴拉力变大,所以内侧法兰板应变发展速度稍快于外侧法兰板。此外,相同荷载下,内外螺栓数量和规格的增加,导致轴向拉伸荷载下螺栓受力更加均匀,使得法兰板应变减小。

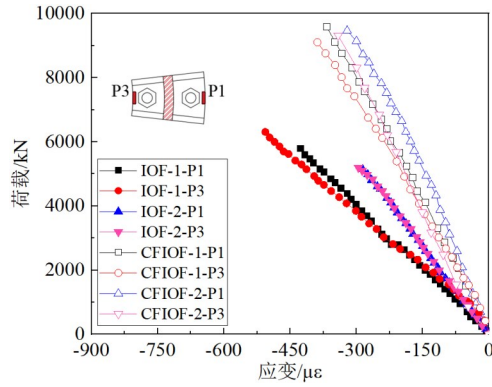


图7 法兰板荷载-应变曲线

Fig.7 Load-strain curves of flange plate

2.3.3 加劲肋的应变特点

加劲肋的荷载-应变曲线如图8所示。4组试件的加劲肋荷载-应变曲线在加载过程中呈线性发展,与法兰板应变发展特点类似。未填充混凝土的IOF-1与IOF-2试件内外加劲肋应变发展趋势相近;在填充混凝土的CFIOF-1与CFIOF-2试件中,混凝土对加劲肋形成包裹效应,约束了加劲肋的变形。具体地,环向加劲肋之间的混凝土限制了加劲肋面外变形,其余混凝土限制了加劲肋的面内变形。这增强了混凝土与内侧加劲肋协同受力,使得内侧加劲肋刚度增大,导致内部加劲肋应变S3发展速度小于外侧加劲肋应变S1。同样,两组填充混凝土的内外法兰节点加劲肋应变发展速度均小于未填充试件,这也表明了填充混凝土可以改善加劲肋受力。同样地,内外螺栓数量和规格的增加也可以减小法兰板应变。

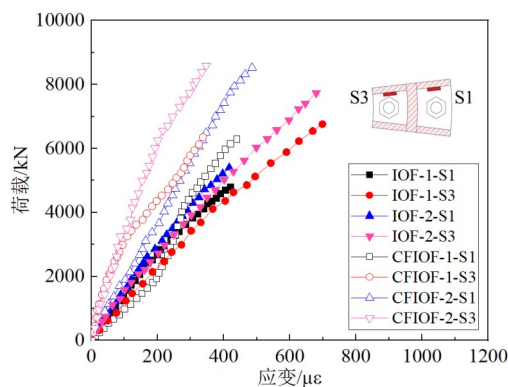


图8 加劲肋荷载-应变曲线

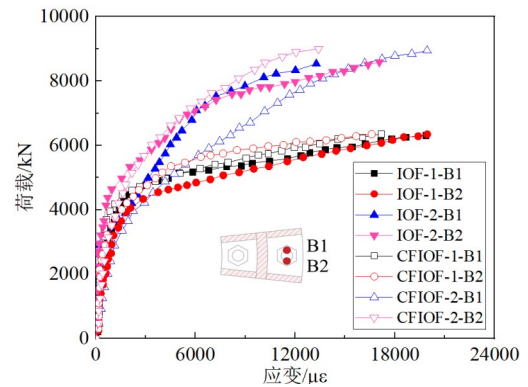
Fig.8 Load-strain curves of stiffener

2.4 螺栓应变和轴拉比发展特点

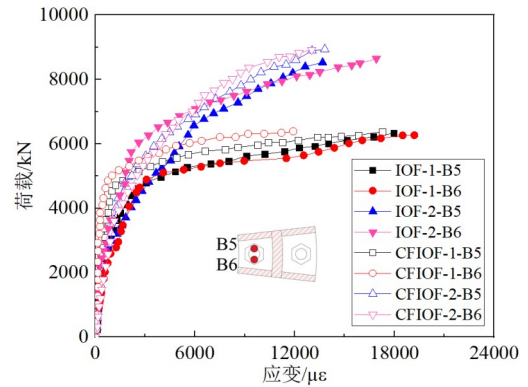
2.4.1 螺栓应变特点

在轴拉荷载作用下,螺栓是最重要的受力部件。4组试件内外圈螺栓的荷载-应变曲线如图9所示。IOF-1和IOF-2试件由内外圈螺栓承受全部轴拉力,螺栓应变发展略快;CFIOF-1和CFIOF-2试件螺栓与管内混凝土共同承受轴拉力,螺栓应变随

荷载增加变化缓慢。加载初期,内外双圈螺栓均处于弹性阶段内。由于螺栓初始预紧力的存在,此时螺栓的应变变化微小。随荷载的增加,CFIOF-1和CFIOF-2试件的混凝土出现裂缝并退出工作,此后由螺栓单独承受轴拉力,进入非线性发展阶段,其应变随荷载增加发展迅速。比较内外两圈螺栓应变可知,外圈螺栓应变较内圈螺栓发展略快,说明外圈螺栓在加载过程中分担了较大轴拉力,意味着外圈与内圈螺栓的轴拉力存在比例关系。加载终止后,4组试件内外圈螺栓应变均已超过其屈服应变,与试验结束后螺栓呈现颈缩现象吻合。



(a) 外圈螺栓



(b) 内圈螺栓

图9 螺栓的荷载-应变曲线

Fig.9 Load-strain curves of bolts

2.4.2 内外螺栓轴拉比发展

为了揭示外内圈螺栓轴拉力的比例,取两个应变测点的平均值计算螺栓的轴向拉力。以加载过程中轴向拉力 P 与设计荷载 F 的比值为横坐标,并定义外内圈螺栓轴拉力比为 β 。4组内外法兰节点试件的外内螺栓轴拉力比如图10所示。其中,IOF-1和IOF-2的最终轴拉比分别为1.080和1.232,根据DL/T 5629—2021^[19]中轴拉比公式计算结果分别为1.118和1.213,误差分别为3.5%和1.6%,证明试验结果的可靠性。根据IOF-1和CFIOF-1的轴拉力比发展可以发现,当内外圈螺栓数量规格相同

时, IOF-1 和 CFIOF-1 的外内螺栓轴拉力比 β 随荷载增大而减小。此时, 外内螺栓轴拉力比 β 更接近 1。从 IOF-2 和 CFIOF-2 试件轴拉力比可以看出, 当内圈螺栓等级提高, 外圈螺栓数量和规格变大时, 外内螺栓轴拉力比 β 随荷载增大而增大, 不断接近 1.25。填充混凝土的试件外内螺栓轴拉力比 β 均小于未填充混凝土的试件, 说明填充混凝土能够使内外双圈螺栓各自分担的轴力更为均匀, 提高节点的抗拉承载力。

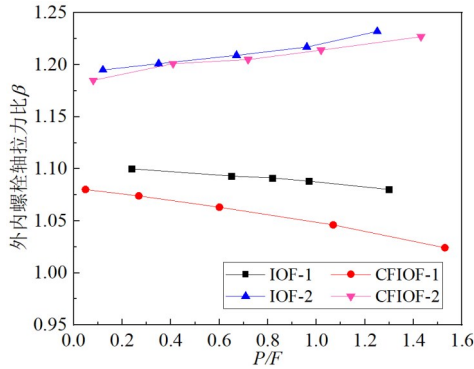


图 10 外内螺栓轴拉力比

Fig.10 Axial tension ratio of outer and inner bolts

3 数值模拟分析

3.1 模型建立

由于模型和荷载均为轴对称, 基于 ANSYS 建立了一半模型进行分析, 以减少计算成本。钢管、法兰板、加劲肋和螺栓部件选用 Solid185 单元进行模拟, 选用 Solid65 单元模拟管内混凝土。在试验中没有观察到焊缝的破坏, 焊缝的影响在 FEM 中被忽略。填充混凝土的内外法兰节点轴拉模型如图 11 所示, 建模完成后使用 sweep 命令对各部件进行网格划分。用 Target170 和 Contact174 单元模拟有限元模型中可能出现的所有接触行为。具体地, 上、下法兰板和螺栓与法兰板间摩擦系数为 0.2^[20], 混凝土外壁与法兰内壁摩擦系数为 0.6^[21]。

模型的下部为固定端, 对固定端的钢管设置固

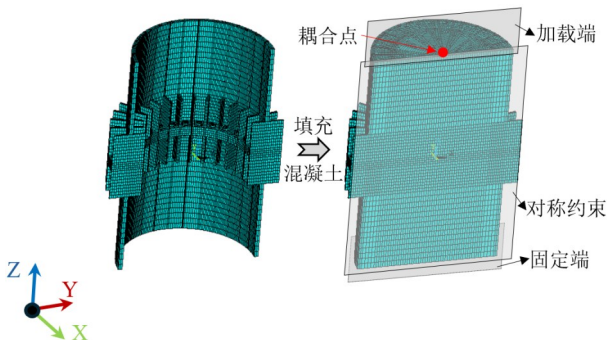


图 11 内外法兰有限元模型

Fig.11 Finite element model of inner and outer flanges

定约束。在模型的对称面上, 所有节点均设置对称约束。模型的上部为加载端, 使用 MPC184 单元对加载端钢管节点进行耦合, 在耦合点施加轴向拉伸位移, 并提取耦合点的荷载-位移数据。在有限元模型中使用 Prest179 单元对螺杆施加预紧力以贴合试验。钢材和螺栓均采用三折线等向强化模型且服从 Von-Mises 屈服准则, 弹性模量 $E=2.06 \times 10^5$ MPa, 泊松比为 0.3, 本构曲线如图 12(a) 所示。对于管内填充的混凝土, 采用多线性随动强化模型 KINH 来模拟, 应力-应变关系曲线如图 12(b) 所示^[22]。

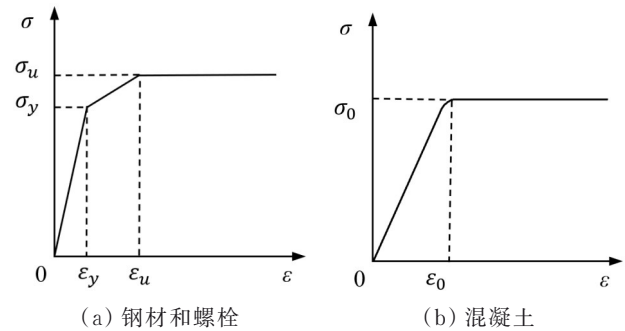


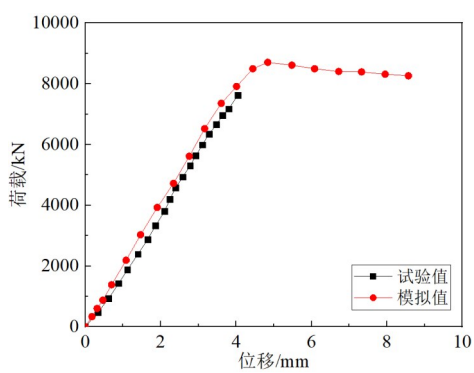
图 12 本构模型

Fig.12 Constitutive model

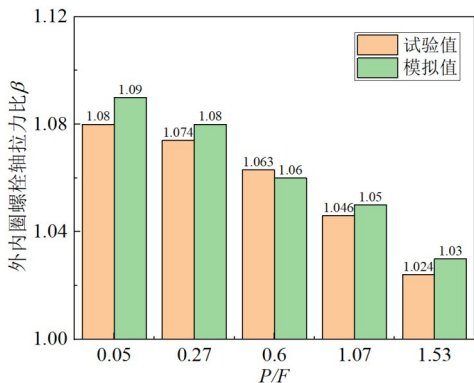
3.2 模型验证

选取 CFIOF-1 试件进行数值模拟验证。试验和模拟的加载点荷载-位移曲线如图 13(a) 所示。弹性阶段内荷载-位移曲线呈线性发展, 试验和模拟的刚度基本吻合。由于试验中加载装置的限制, 并未加载至节点完全失效。在模拟中, 节点极限荷载为 8 700 kN, 随后承载力缓慢下降。试验和模拟中外内螺栓拉力比 β 如图 13(b) 所示。试验和模拟的最大误差约为 1%。其中, 模拟值几乎全部高于试验值, 这是因为模拟分析时法兰上下盘面及螺栓与法兰板紧密贴合在一起, 而试验时存在间隙, 不可能完全贴合。基于荷载-位移曲线变化和内外螺栓轴拉力比 β 的对比可以判断, 模拟可以较好地反映混凝土填充内外法兰节点的受力特性。

试验和模拟的失效模式如图 14 所示。由图 14 可以看出, 试验和模拟的法兰板均出现了张开变形, 钢管和法兰板等部位处于低应力水平, 未发生明显变形。虽然内部的混凝土失效模式无法捕捉, 但在模拟分析中同样发现了法兰板啮合面是混凝土开裂失效的主要部位。相比之下, 螺杆上应力水平较高, 说明在法兰啮合面处混凝土被拉裂后由螺栓承受轴拉力, 内外双圈螺栓发生明显的颈缩变形。由于模拟中未考虑螺纹的细节, 颈缩部位发生在螺栓中部, 而试验中的螺栓螺纹颈缩主要发生在



(a) 法兰轴拉荷载-位移曲线



(b) 外内圈螺栓拉力比

图 13 荷载与螺栓受力验证

Fig.13 Verification of load and bolt force

螺纹区。综上所述,模拟的失效模式与试验失效模

式基本相同,验证了建立的有限元模型的可靠性。

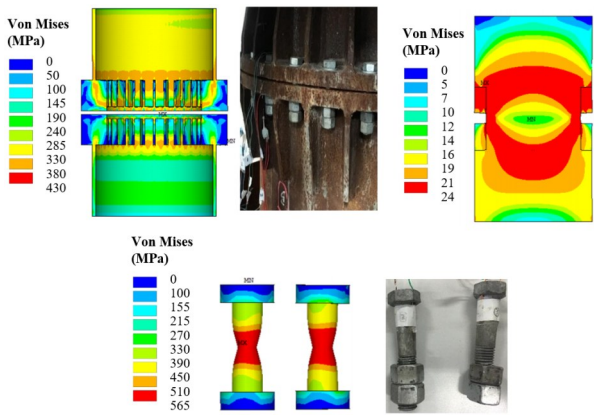


图 14 破坏模式对比验证

Fig.14 Comparison and verification of destructive modes

3.3 参数化分析

3.3.1 参数选取

从试验结果可以看出,COIOF 抗拉承载能力由内外双圈连接螺栓强度决定,因此有必要对螺栓传力特性进行深入研究。外内螺栓轴拉力比 β 可以直观反映外内圈螺栓各自承担荷载情况。为探讨法兰节点设计参数对外内螺栓轴拉力比 β 的影响,基于已验证可行的有限元模型,开展参数分析。以法兰板厚、螺栓间距和混凝土强度为参数,建立 17 组钢管混凝土内外法兰轴拉模型,各模型具体尺寸参数见表 2。

表 2 参数选取

Table 2 Parameter selection

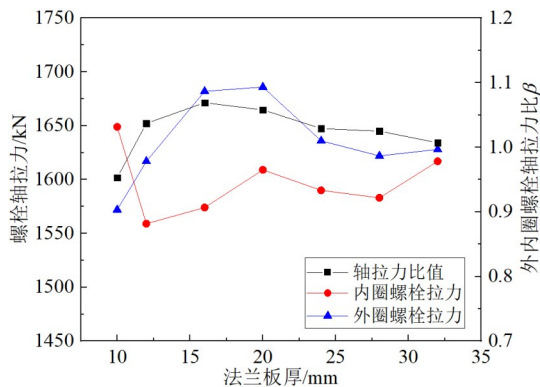
编号	法兰板厚度/mm	内螺栓		外螺栓		混凝土强度等级
		螺栓圆直径/mm	数量规格	螺栓圆直径/mm	数量规格	
SPE1	10	518	28M16	670	28M16	C35
SPE2	12	518	28M16	670	28M16	C35
SPE3	16	518	28M16	670	28M16	C35
SPE4	20	518	28M16	670	28M16	C35
SPE5	24	518	28M16	670	28M16	C35
SPE6	28	518	28M16	670	28M16	C35
SPE7	32	518	28M16	670	28M16	C35
SPE8	20	508	16M20	680	16M20	C35
SPE9	20	508	20M20	680	20M20	C35
SPE10	20	518	20M16	670	20M16	C35
SPE11	20	518	24M16	670	24M16	C35
SPE12	20	518	28M16	670	28M16	C35
SPE13	20	518	28M16	670	28M16	C25
SPE14	20	518	28M16	670	28M16	C30
SPE15	20	518	28M16	670	28M16	C35
SPE16	20	518	28M16	670	28M16	C40
SPE17	20	518	28M16	670	28M16	C45

3.3.2 法兰板厚度

为揭示法兰板厚对外内圈螺栓轴拉力比 β 的影

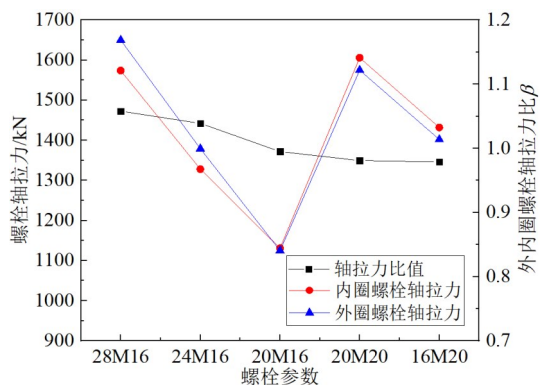
响规律,选取编号 SPE1 至 SPE7 有限元模型,法兰板厚度依次为 10、12、16、20、24、28、32 mm,经模拟

计算得到的结果如图 15 所示。可以发现,当法兰板厚为 10 mm 时,内圈螺栓拉力大于外圈螺栓拉力,其余法兰板厚下,内圈螺栓拉力均小于外圈螺栓拉力。外内圈螺栓轴拉力比 β 整体呈现先递增后减小趋势,当法兰板厚从 10 mm 增至 20 mm 时,比值从 0.953 增至 1.058。当板厚继续增大时,比值开始降低并逐步趋近于 1。这是因为法兰板厚度较小时,这是由于在法兰板厚度相对较小时,管内混凝土所承担轴力相对较大,对管内法兰刚度提升效果较为明显,伴随着板厚的增加,提升效果降低。

图 15 法兰板厚对 β 的影响Fig.15 Influence of flange thickness on β

3.3.3 螺栓间距

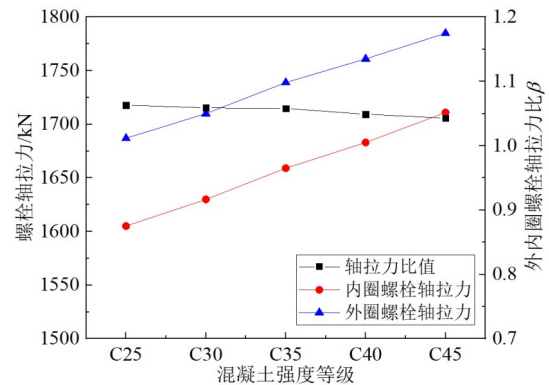
为探讨螺栓间距对外内圈螺栓轴拉力比 β 的影响,选取编号 SPE8 至 SPE12 有限元模型,如图 16 所示。当螺栓规格不变时,随着内外圈螺栓数量的减少,螺栓间距增大,外内圈螺栓轴拉力比随之减小。这是螺栓数量的减少导致螺栓对上下法兰板的约束效应减弱,使得内圈螺栓需承担的拉力变大,外内圈拉力比降低并逐步趋向于 1。

图 16 螺栓间距对 β 的影响Fig.16 Influence of bolt spacing on β

3.3.4 混凝土强度

选取编号 SPE13 至 SPE17 有限元模型,混凝土强度等级分别为 C25、C30、C35、C40 和 C45,分析混凝土强度对外内圈螺栓轴拉力比 β 的影响,如图 17

所示。随着混凝土强度的增加,螺栓轴拉力显著提升。模拟计算得到的外内圈螺栓轴拉力比 β 分别为 1.063、1.059、1.058、1.049 和 1.043。可以看出,混凝土强度对外内圈螺栓轴拉力比 β 影响较小,外内圈螺栓轴拉力比 β 随混凝土强度增大而减小,这是由于管内填充的混凝土与内圈螺栓协同受力,提高了内圈法兰的抗拉刚度,内圈螺栓受力比例增大,导致外内圈螺栓轴拉力比降低。

图 17 混凝土强度对 β 的影响Fig.17 Influence of concrete strength on β

4 结论

基于 IOF 和 COIOF 轴向拉伸性能试验对比及有限元分析,可得以下主要结论:

1) 轴向拉伸荷载下,IOF 和 COIOF 的失效模式均为上下法兰板张开和螺栓螺纹区颈缩失效,螺栓强度决定法兰节点极限承载力。

2) 相比于未填充混凝土的试件,CFIOF 承载力提升了 5% 以上,内螺栓等级和外螺栓数量规格的增加使承载力提升了约 35.71%。

3) 加载过程中,法兰板和加劲肋均处于弹性阶段,未发生明显变形。混凝土达到极限拉应变开裂后,螺栓承担全部荷载,导致螺栓应力水平较高。

4) 随着法兰板厚的增加,外内圈螺栓轴拉力比 β 呈现先增大后减小的趋势,并逐渐趋近于 1。随着螺栓间距和混凝土强度的增大, β 逐步降低并趋于 1。混凝土强度对 β 的影响最小。

参考文献

- [1] LUAN Y, GUAN Z Q, CHENG G D, et al. A simplified nonlinear dynamic model for the analysis of pipe structures with bolted flange joints [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(2): 325-344.
- [2] 邓洪洲, 高英赫, 张亮亮, 等. 钢管杆方形法兰受弯性能试验研究与有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(7): 44-52.
- DENG H Z, GAO Y H, ZHANG L L, et al.

- Experimental research and finite element analysis on square flange joint used in steel poles under bending moments [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35 (7): 44-52. (in Chinese)
- [3] 孟宪乔, 张树林, 齐方乐, 等. 非对称内外刚性法兰连接力学性能分析与优化设计[J/OL]. 力学与实践, 2024: 1-15. (2024-12-02). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=LXYS20241128001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. MENG X Q, ZHANG S L, QI F L, et al. Mechanical analysis and optimal design of asymmetric inner-and-outer rigid flange connections [J/OL]. Mechanics in Engineering, 2024: 1-15. (2024-12-02). <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=LXYS20241128001&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>. (in Chinese)
- [4] 陈前, 张凯旋, 郭勇, 等. 钢管填充混凝土对内外法兰节点抗弯承载力特性影响研究[J]. 建筑结构, 2021, 51 (2): 71-77.
CHEN Q, ZHANG K X, GUO Y, et al. Study on the influence of concrete filled steel tube on the flexural bearing capacity of inner and outer flange joints [J]. Building Structure, 2021, 51(2): 71-77. (in Chinese)
- [5] VAN-LONG H, JEAN-PIERRE J, JEAN-FRANÇOIS D. Behaviour of bolted flange joints in tubular structures under monotonic, repeated and fatigue loadings I: Experimental tests [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 85: 1-11.
- [6] WANG Y Q, ZONG L, SHI Y J. Bending behavior and design model of bolted flange-plate connection [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 84: 1-16.
- [7] HUANG F H, ZHANG D C, HONG W, et al. Mechanism and calculation theory of prying force for flexible flange connection [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 132: 97-107.
- [8] 王元清, 宗亮, 石永久. 钢管结构法兰连接节点抗弯承载力简化设计方法[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(1): 1-9.
WANG Y Q, ZONG L, SHI Y J. Simplified design method for flange-plate connections of steel tubular structures under bending moment [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2011, 27(1): 1-9. (in Chinese)
- [9] 王元清, 宗亮, 石永久. 钢管结构法兰连接节点抗弯承载力性能的试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2011, 38(7): 13-19.
WANG Y Q, ZONG L, SHI Y J. Experimental study on flange-plate connections of steel tubular structures under bending moments [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2011, 38(7): 13-19. (in Chinese)
- [10] 宗亮, 王元清, 石永久. 钢管结构法兰连接节点抗弯承载力性能的有限元分析[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 431-436.
ZONG L, WANG Y Q, SHI Y J. Finite element analysis of load-carrying properties of flange-plate connections of steel tubular structures under bending moment [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2011, 32(4): 431-436. (in Chinese)
- [11] 宗亮, 王元清, 石永久. 钢管结构法兰连接节点拉弯承载力简化设计方法[J]. 钢结构, 2012, 27(1): 28-31.
ZONG L, WANG Y Q, SHI Y J. Simplified design method for flange-plate connections of steel tubular structures under tension and moment [J]. Steel Construction, 2012, 27(1): 28-31. (in Chinese)
- [12] 陈聪. 输电铁塔多环板加劲节点及内外双层法兰节点承载力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
CHEN C. Research on bearing capacity of multi-plates-reinforced joint and inner-and-outer flange joint in transmission tower [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017. (in Chinese)
- [13] DENG H Z, SONG X Q, CHEN Z H, et al. Experiment and design methodology of a double-layered flange connection in axial loads [J]. Engineering Structures, 2018, 175: 436-456.
- [14] DENG H Z, LI C, SONG X Q, et al. Tensile resistance and design model of an external double-layered flange connection [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 161: 309-327.
- [15] 孙传琦, 高志林, 邢月龙, 等. 大跨越钢管塔内外法兰连接节点纯弯承载力特性试验研究[J]. 钢结构, 2018, 33(11): 21-25, 6.
SUN C Q, GAO Z L, XING Y L, et al. Experimental research on the bearing capacity of inner-outer double layered flange of a long-span steel tubular tower under pure bending [J]. Steel Construction, 2018, 33(11): 21-25, 6. (in Chinese)
- [16] 段军, 张黎军, 孙传琦, 等. 大跨越钢管塔内外法兰节点偏压承载力特性试验研究[J]. 钢结构, 2018, 33(4): 7-12.
DUAN J, ZHANG L J, SUN C Q, et al. Experimental research on bearing capacity characteristics of inner-outer double layered flange of long-span steel pipe tower under eccentric compression [J]. Steel Construction, 2018, 33 (4): 7-12. (in Chinese)
- [17] 李泽仁, 刘海锋, 范孝良, 等. 轴拉荷载下内置加劲肋内外刚性法兰承载力性能研究[J]. 钢结构(中英文), 2019, 34(10): 30-35.
LI Z R, LIU H F, FAN X L, et al. Research on bearing capacity of a rigid flange with inner and outer rings of bolts and built-in stiffening ribs under axial tensile load [J]. Steel Construction, 2019, 34(10): 30-35. (in

Chinese)

[18] 架空输电线路杆塔结构设计技术规程: DL/T 5486—2020 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2020.
Code for design of steel supporting structures of overhead transmission line: DL/T 5486—2020 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2020. (in Chinese)

[19] 架空输电线路钢管混凝土结构设计技术规程: DL/T 5629—2021 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
Technical specification for the design of concrete filled steel tubular structures with steel framework of overhead transmission line: DL/T 5629—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021. (in Chinese)

[20] MONTUORI R, NASTRI E, PILUSO V, et al. Finite element analysis of concrete filled steel tubes subjected to cyclic bending [J]. Engineering Structures, 2024, 314: 118364.

[21] LIU X C, CUI F Y, JIANG Z Q, et al. Tension-bend-shear capacity of bolted-flange connection for square steel tube column [J]. Engineering Structures, 2019, 201: 109798.

[22] 何宣. 大跨径钢管混凝土拱桥非线性稳定研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
HE X. Nonlinear stability study of large-span steel-tube concrete arch bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2024. (in Chinese)

(编辑 XXX)