

文章编号:1671-1637(2024)06-0106-15

钢管混凝土桁肋内栓钉 K 型节点 应力集中特性

刘君平¹, 杨倩¹, 刘华龙², 杨意图¹, 陈宝春¹

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430014)

摘要:为深入研究设置内栓钉对钢管混凝土桁肋 K 型节点应力分布的影响, 开展应力集中特性试验, 对比测试了不设置内栓钉的节点热点应力及应力集中系数; 建立内栓钉节点的精细有限元模型, 分析了内栓钉布置形式和几何尺寸对应力集中系数的影响; 基于试验和有限元参数分析结果, 提出了内栓钉的建议布置形式以及节点应力集中系数计算方法。研究表明: 内栓钉没有改变节点的热点应力分布规律, 最大应力集中系数均出现在受拉相贯区域主管侧冠点处, 但节点的应力集中程度被有效减小; 与不设置内栓钉节点相比, 设置内栓钉节点的热点应力最大值降低了 17.38%; 受拉相贯焊缝区域主管侧、相应支管侧的整体应力集中系数分别平均减小了 24.20% 和 12.30%, 主管环向截面应力降低 16.2%; 内栓钉对受压相贯焊缝区域的应力分布和应力集中程度的影响很小, 在 7% 以内; 应力集中系数受内栓钉环向排列角度和轴向排列间距的影响较大, 受内栓钉几何尺寸的影响较小; 建议内栓钉布置在主管轴向距节点中心至截面两侧各约支管直径的 2.7 倍范围内, 环向布设在连接支管侧的圆心角 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 内, 且相邻内栓钉间距不小于内栓钉直径的 6 倍但不超过 400 mm; 引入内栓钉轴向排列影响系数及环向排列影响系数的应力集中系数计算公式具有较高计算精度, 可用于评估钢管混凝土桁肋内栓钉 K 型节点的疲劳性能。

关键词:桥梁工程; 钢管混凝土拱桥; 节点; 内栓钉; 应力集中系数; 计算公式

中图分类号:U441.5 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2024.06.007

Stress concentration characteristics of concrete-filled steel tubular truss-rib K-joint with inner studs

LIU Jun-ping¹, YANG Qian¹, LIU Hua-long², YANG Yi-tu¹, CHEN Bao-chun¹

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China;

2. CCC second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430014, Hubei, China)

Abstract: To further study the influence of setting inner studs on the stress distribution of concrete-filled steel tubular truss-rib K-joints, a test on the stress concentration characteristics was conducted. The hot spot stress and stress concentration factor of joints without inner studs were compared and tested. The fine finite element models of the joints with inner studs were established. The influences of the arrangement and geometric dimensions of inner studs on the stress concentration factor were analyzed. Based on the results of the test and the finite element

收稿日期:2024-06-19

基金项目:国家自然科学基金项目(52078136)

作者简介:刘君平(1977-),男,江西安福人,福州大学研究员,工学博士,从事钢-混凝土组合结构桥梁及拱桥结构研究。

引用格式:刘君平,杨倩,刘华龙,等. 钢管混凝土桁肋内栓钉 K 型节点应力集中特性[J]. 交通运输工程学报, 2024, 24(6): 106-120.

Citation: LIU Jun-ping, YANG Qian, LIU Hua-long, et al. Stress concentration characteristics of concrete-filled steel tubular truss-rib K-joint with inner studs[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(6): 106-120.

parameter analysis, the recommended layout of the inner stud and the calculation method of the stress concentration factor of the joints were proposed. Research results show that the hot spot stress distribution of the joints is not changed with the inner studs, and the maximum stress concentration factor is found at the crown point of the main tube in the tensile weld area, but the stress concentration degree of the joints effectively reduces. Compared with the joint without inner studs, the maximum hot spot stress of the joint with inner studs reduces by 17.38%. The overall stress concentration factors of the main tube side and the corresponding branch tube side in the tensile weld area decrease by 24.20% and 12.30% on average, respectively, and the circumferential section stress of the main tube decreases by 16.2%. The influence of inner studs on the stress distribution and stress concentration in the compressive weld area is so slight to be within 7%. The stress concentration factors are affected greatly by the circumferential arrangement angle and the axial arrangement spacing of inner studs but less by the geometrical dimension of inner studs. The inner studs are suggested to be arranged within the range of approximately 2.7 times the diameter of the branch tube from the center of the joint to each side section in the axial direction of the main tube. The circumferential arrangement is within the range of $[-60^\circ, 60^\circ]$ of the central angle of connecting branch tube side. At the same time, the interval between adjacent studs should not be less than 6 times the diameter of the inner stud but not more than 400 mm. The calculation formula of the stress concentration factor introduced by the influence coefficient of axial arrangement and circumferential arrangement of inner studs can be used in evaluating the fatigue performance of concrete-filled steel tubular truss-rib K-joints with inner studs with high calculation accuracy. 3 tabs, 20 figs, 34 refs.

Key words: bridge engineering; CFST arch bridges; joint; inner stud; stress concentration factor; computing equation

Author resume: LIU Jun-ping(1977-), male, professor, PhD, liujunping@fzu.edu.cn.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52078136)

0 引 言

钢管混凝土(Concrete-Filled Steel Tube, CFST)拱桥由于结构承载力高、刚度大、施工方便等优点,在中国的桥梁建设中发挥了重要作用^[1-2]。随着钢管混凝土拱桥服役时间的增加,钢管与核心混凝土的脱粘问题以及钢管混凝土桁式拱肋节点的疲劳问题越来越引起大家的关注。目前,对于钢管与核心混凝土脱粘问题,已经开展了较多的研究,普遍认为脱粘难以避免,且会对拱肋受力产生不利影响^[3-6]。特别是对于桁肋节点,会导致腹杆内力无法传递至管内混凝土,使得实际受力与理论计算图式不符,脱粘还会加剧节点的疲劳开裂问题,影响结构的安全和耐久性。

为加强钢管与核心混凝土的共同作用,以及桁肋节点传力的需要,学者们提出了不同的改进措施。Myers等^[7]提出可以沿钢管纵向设置横向插板或者普通钢板加劲肋构造;刘永健等^[8-9]提出

在钢管内壁设置开孔钢板加劲板构造;陈宝春等^[10-12]提出在弦杆内壁设置内栓钉构造。相对而言,设置内栓钉具有经济实用、施工简便的特点,目前已经在贵州总溪河大桥^[13]、陕西石门水库大桥^[14]、重庆双堡特大桥^[15]等大跨径钢管混凝土桁式拱桥中得到了应用。

对于钢管混凝土节点的疲劳性能,已经开展了比较多的研究。Musa等^[16]的研究发现,在弦杆钢管内填混凝土,可以减少钢管变形,进而降低节点应力集中效应;姜磊等^[17-19]进行了不同结构形式焊接管节点的疲劳性能以及实桥节点的疲劳评估研究,结果表明钢管混凝土节点疲劳性能优于钢管节点;Zheng等^[20-22]分别开展了 T、Y、K 型钢管混凝土节点的疲劳性能研究,验证了内填混凝土对应力集中程度的缓解作用;Kim等^[23-27]开展了钢管混凝土节点应力集中系数(Stress Concentration Factor, SCF)的对比研究,发现内填混凝土能使 SCF 呈现不同程度的下降。如上所述,在钢管混凝土桁肋节

点设置内栓钉后,内栓钉将腹杆、弦杆钢管及核心混凝土连接在一起共同受力,增大了节点刚度,减小应力集中程度,从而使得节点的疲劳性能得到提高^[28]。吴庆雄等^[29]在开展钢管混凝土 K 型节点的疲劳试验时,还进行了在节点部位增加内栓钉的试探性研究,发现设置内栓钉可以改善节点的疲劳性能。目前,关于内栓钉在改善钢管混凝土桁架节点疲劳性能的作用方面,开展的研究很少,亟需开展更多的试验与理论研究,为内栓钉钢管混凝土节点疲劳性能的评估及计算提供更多依据。

为此,本文在钢管混凝土桁架内栓钉节点传力机理研究的基础上^[30],开展内栓钉节点的应力集中测试试验,并建立有限元模型,探讨内栓钉的布置形式和几何尺寸对节点相贯区域 SCF 的影响规律,并提出钢管混凝土桁架内栓钉节点的 SCF 计算公式,以期对钢管混凝土桁架内栓钉节点的应用及疲劳性能评估提供参考。

1 试验方法

1.1 试件设计与制作

试验共设计 2 个钢管混凝土 K 型节点试件:1 个在主管内设置内栓钉,编号为 CFST-KS;1 个作为对照试件,不设置内栓钉,编号为 CFST-K。构造如图 1 所示,其中: D 为主管直径; T 为主管壁厚; L 为主管长度; d 为支管直径; t 为支管壁厚; l 为支管长度; θ 为支主管夹角。表 1 为试件的几何参数,支主管直径比 β 为 0.517,主管径厚比 2γ 为 40.6,支主管壁厚比 τ 为 1.00,支主管夹角为 45° 。

表 1 试件参数

Table 1 Parameters of specimens

试件编号	主管尺寸/mm			支管尺寸/mm			是否设置内栓钉
	D	T	L	d	t	l	
CFST-K	325	8	2 000	168	8	1 020	否
CFST-KS							是

图 2 为试件 CFST-KS 内栓钉的布置形式,内栓钉直径为 13 mm,长度为 60 mm,以 2 根支管之间间隙的中点为中心,沿主管轴线方向均匀布置 7 行,行间距为 150 mm;沿主管圆周 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 环向区间均匀布置 5 列,排列角度为 30° 。

根据《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)的规定,对支管、主管钢材以及内栓钉进行取样并进行材性试验,测试结果如表 2 所示。

试件主管内填充混凝土的强度等级为 C60,根

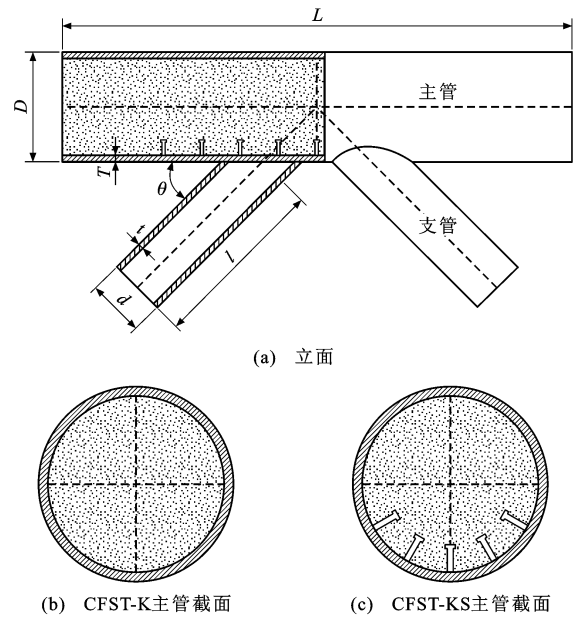


图 1 试件节点构造

Fig. 1 Joints structure of specimens

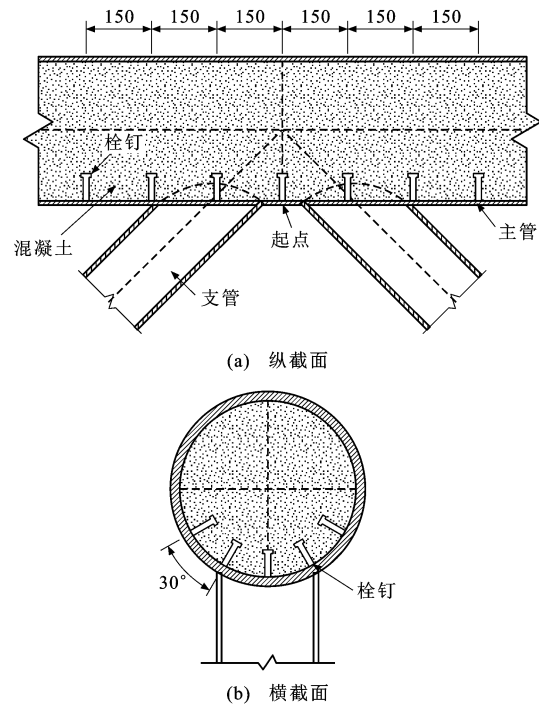


图 2 CFST-KS 内栓钉的布置(单位:mm)

Fig. 2 Inner stud arrangement of CFST-KS (unit: mm)

表 2 钢材力学性能

Table 2 Mechanical properties of steels

钢材名称	壁厚/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	弹性模量/GPa
主管	8	387.5	559.8	203
支管	8	372.6	541.9	204
内栓钉	13	349.1	486.4	204

据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)的规定,制作混凝土标准试块进行力

学性能试验,测得混凝土立方体抗压强度为 61.4 MPa,弹性模量为 36.2 GPa。

1.2 试验加载与测试

图 3 为试验的加载装置,采用 500 kN 的 MTS 液压伺服作动器进行加载,作动器水平放置,作动端与试件连接,非作动端锚于反力墙上。节点试件平躺放置,2 根支管,一根与作动器连接,另一根与反力铰支座连接,铰支座固定于地面。试件主管一端同样与反力铰支座连接,另一端通过滑动支座和钢滚轴垫平。



图 3 试验加载装置

Fig.3 Loading device of test

试验加载采用力控制,荷载分为 50、100、150、200、250、300 kN 六个级别,逐级加载,每级停留 5 min 后进行数据采集,加至 300 kN 后再逐级卸载。

热点应力是节点相贯焊缝周围的集中应力,也是疲劳损伤起源部位处的局部应力,将垂直于焊趾方向的外推结构应力作为节点的热点应力,并进行测量。外推区域依据 CIDECT 设计指南确定,热点应变同样由测点实测应变外推得到,在节点相贯焊缝区域主管侧和支管侧沿相贯线一周各设置 10 道梯度应变片,每道梯度应变片由 3 个单向应变片依次排列组成,测试方向垂直于焊缝。图 4 为热点应变的测点布置,两条相贯线合计 4 个应变测区,40 个应变测点,对应编号为 CX1~CX10、CF1~CF10、TX1~TX10、TF1~TF10,C 和 T 分别表示受压支管和受拉支管,X 和 F 分别表示主管侧和支管侧。C 系列测点位于受压支管与主管相贯焊缝区域附近,T 系列测点位于受拉支管与主管相贯焊缝区域附近,为叙述方便,分别命名为节点受压相贯区域和节点受拉相贯区域。

试验中除了需测试热点应力外,还需测试支管、主管的名义应力及主管环向截面应力,图 5 为支管、

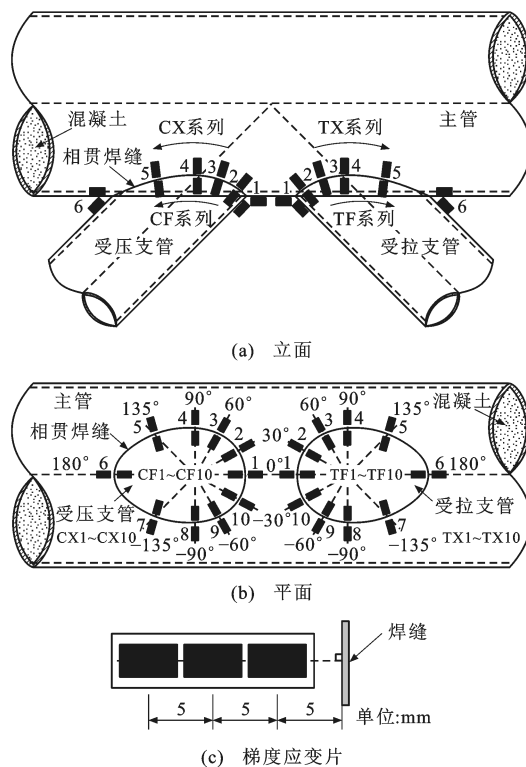


图 4 热点应力测点布置

Fig.4 Measuring points arrangement of hot spot stress

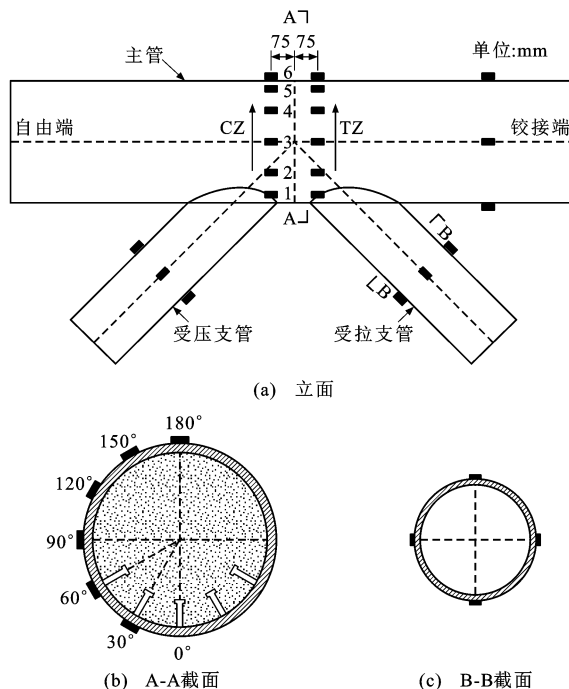


图 5 名义应力与主管环向截面应力测点布置

Fig.5 Measuring points arrangement of nominal stress and circumferential stress of main tube section

主管的测点布置。其中,主管环向应变片布置在距节点中心截面两侧各约 75 mm(位于两行内栓钉中间)的环向截面上,并以支主管相贯侧中线为起点,沿主管环向从 30°到 180°,每隔 30°在主管表面布置

一个单向应变片,测试方向与主管轴线方向平行。两个截面共计布置12个应变测点,受压支管侧截面的测点编号为CZ1~CZ6,受拉支管侧截面测点的编号为TZ1~TZ6。受压支管与受拉支管分别在杆件中间截面位置布置4个测点。

2 试验结果与分析

2.1 支管与主管名义应力

对支管与主管名义应力进行分析,假定拉力为正,压力为负。当节点施加荷载 F 为300 kN时,节点名义应力计算结果与实测结果的对比情况如表3所示,其中: σ_c 为受压支管表面的名义应力; σ_T 为受拉支管表面的名义应力; σ_z 为主管表面的名义应力。从表3可以发现:支管与主管名义应力的理论计算值与实测值误差均在5%以内,说明杆系模型计算结果可用于支管与主管的名义应力计算;受压支管与受拉支管的实测名义应力比值为-1.01,说明本文加载装置较合理,与实际节点的受力较为吻合;两个试件实测的支、主管名义应力均基本相同,说明设置内栓钉对支管和主管的名义应力影响较小。由于名义应力实测值与理论值相差不大,本文

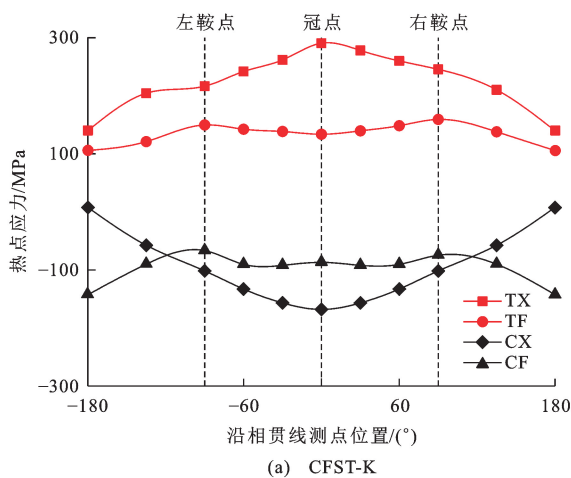


表3 名义应力计算结果和实测结果
Table 3 Calculated and measured results of nominal stress MPa

试件	名义应力计算结果			实测结果		
	σ_c	σ_T	σ_z	σ_c	σ_T	σ_z
CFST-K	-74.6	74.6	-53.3	-72.4	72.0	-51.0
CFST-KS	-74.6	74.6	-53.3	-71.5	71.9	-50.5

将受拉支管与受压支管实测名义应力绝对值的平均值用于计算SCF,其中试件CFST-K为72.2 MPa,试件CFST-KS为71.7 MPa。

2.2 节点相贯区域应力集中特性

2.2.1 热点应力分布

当荷载 $F=300$ kN时,试件的热点应力分布如图6所示,可以看出:2个试件的热点应力分布规律基本相同,最大值均出现在测点TX1处,即节点受拉相贯区域主管侧冠点位置;试件CFST-KS应力较试件CFST-K降了17.38%,说明内栓钉没有改变节点的最不利受力位置,但有效降低了节点的集中应力程度;试件CFST-KS的各热点应力曲线均在鞍点附近出现了突变,TX系列测点的曲线最明显,主要原因是该点附近设置有一个内栓钉,改变了该位置的刚度,进而曲线斜率改变。

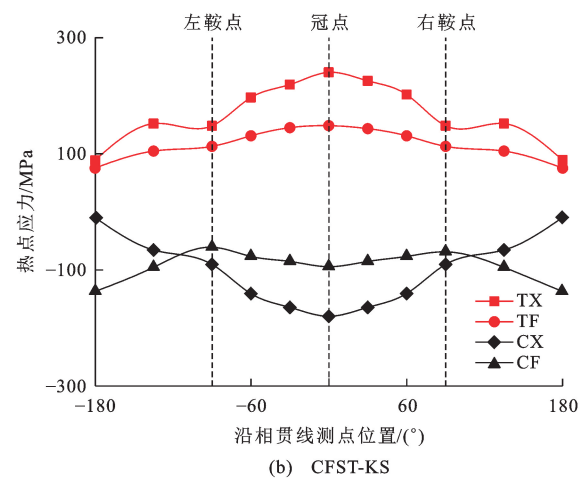


图6 试件的热点应力分布

Fig. 6 Hot spot stress distribution of specimens

2.2.2 应力集中系数分布与内栓钉的影响

荷载作用下的应力集中程度,可以采用应力集中系数SCF进行描述,其定义为热点应力与名义应力的比值。图7为试件相贯焊缝周围的SCF实测结果对比。可以看出,2个试件出现SCF最大值的位置相同,均为受拉相贯区域主管侧冠点处,且SCF具有相同的分布特征。

由图7(a)与7(b)可知:与试件CFST-K相比,试件CFST-KS受拉相贯区域的SCF明显下降,主

管侧整体应力集中程度平均减小了24.20%,支管侧整体应力集中程度平均减小了12.30%,表明设置内栓钉后,节点受拉相贯区域的应力集中现象得到了明显改善。

由图7(c)与7(d)可知:对于受压相贯区域情况,试件CFST-K和试件CFST-KS的SCF分别为0.11~2.33(平均值为1.32)、0.13~2.53(平均值为1.41),后者上升约6.82%,增幅不大;对应支管侧的SCF也基本相当,说明内栓钉对节点受压相贯

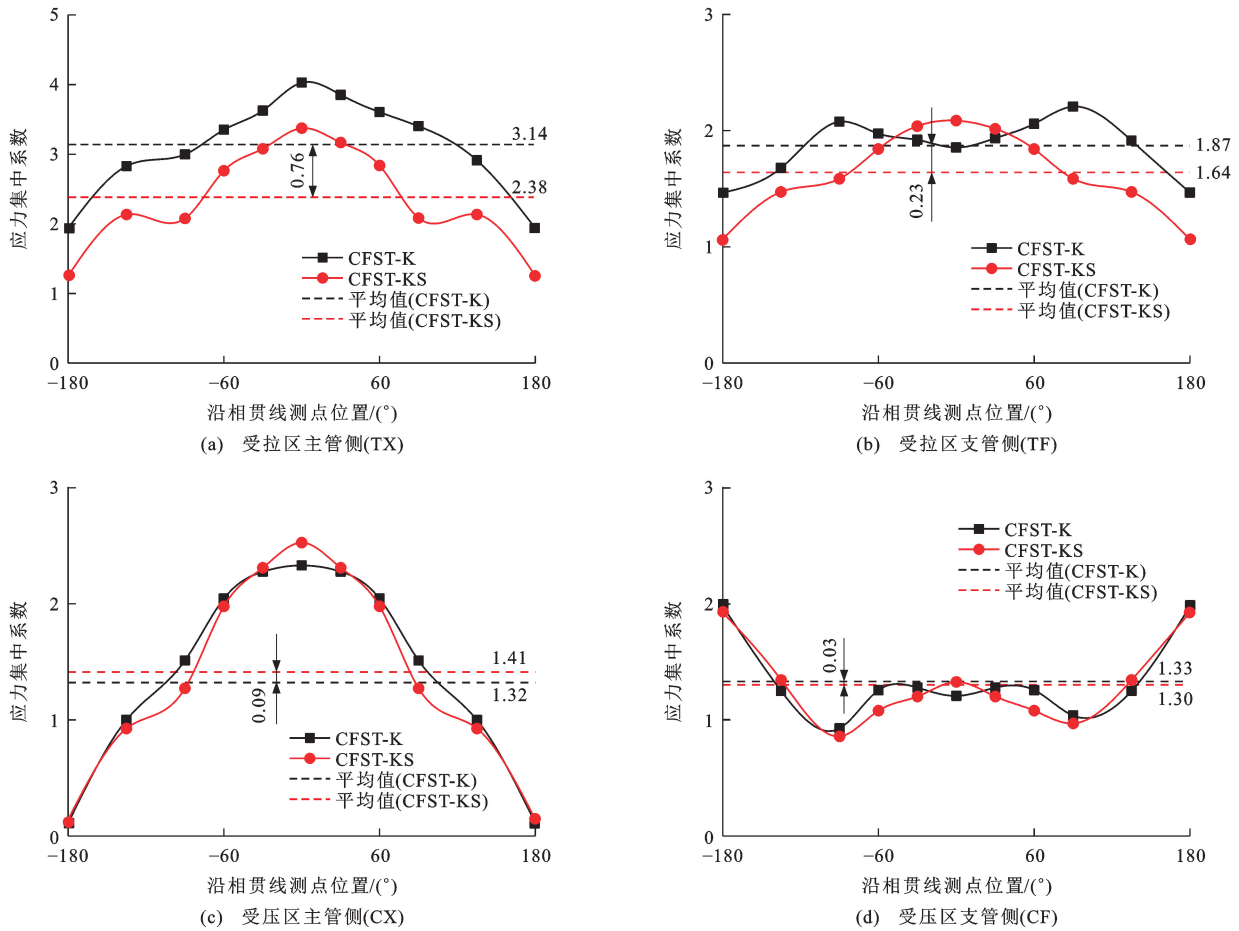


图 7 相贯区域应力集中系数分布

Fig. 7 Distributions of stress concentration factors in intersecting zones

区域的应力集中程度影响很小。

2.3 主管环向截面应力分布

图 8 为 2 个试件主管环向截面的应力测量结果。考虑到主管环向截面上应力分布对称,仅对半截面进行分析,并将环向圆心角 $[0^{\circ}, 60^{\circ})$ 命名为相贯区,即相贯焊缝区域;环向圆心角 $[60^{\circ}, 180^{\circ}]$ 命名

为非相贯区,即远离相贯焊缝区域。

根据图 8 中的主管环向截面应力分布情况,可得到以下结论。

(1)针对受拉主管区域,试件 CFST-K 与试件 CFST-KS 主管环向截面上的应力分布规律相似,最大拉应力均位于 TZ1 处,分别为 105.01 和 88.23 MPa,

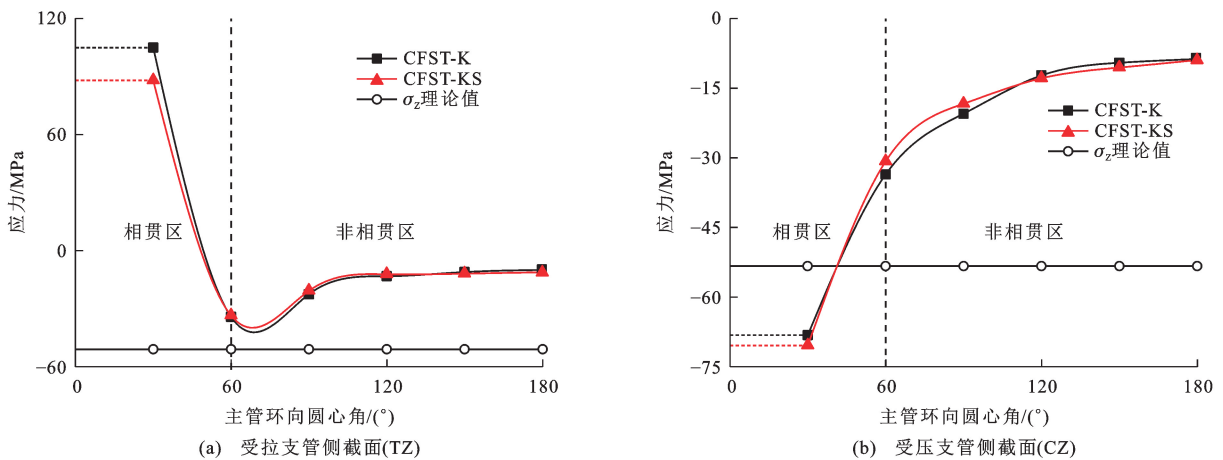


图 8 主管环向截面应力分布

Fig. 8 Circumferential stress distribution of main tube

高于主管名义应力,测点 TZ1 的 SCF 分别为 -1.97、-1.65,后者对比降低了 16.2%,说明内栓钉缓解了相贯区主管的应力集中程度,其余测点的 SCF 分别位于 0.19~0.64、0.21~0.63,应力水平均较低且结果相近,说明内栓钉对非相贯区主管应力的影响较小,因此,在节点受拉相贯一侧,内栓钉可以缓解相贯区内主管集中应力,在非相贯区,内栓钉的作用较小,也验证了内栓钉仅设置在节点主管环向 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 的合理性。

(2)在受压相贯侧,两试件主管环向截面应力的分布规律也相似,最大压应力分别为 68.13、70.35 MPa,均位于测点 CZ1 处,高于主管名义应力;最小压应力分别为 9.49、8.91 MPa,均位于测点 CZ6 处;2 个试件各测点的 SCF 位于 0.16~1.28、0.17~1.32,其中,测点 CZ1 的 SCF 最大,即相贯区主管的应力水平较高;其余测点的 SCF 明显减小,表明非相贯区主管的应力集中程度明显降低。总体上,2 个试件各测点的应力相差不大,说明内栓钉对节点受压相贯一侧主管环向截面上的应力分布和应力集中程度的影响很小。

3 内栓钉规格及布置方式影响分析

3.1 有限元建模与验证

为进一步分析内栓钉规格及布置形式对节点应力分布的影响,采用 ABAQUS 建立 2 种节点的有限元分析模型,如图 9 所示。其中,钢管、管内混凝土、内栓钉、端板均采用二十节点缩减积分格式的三维实体单元(C3D20R)模拟,相贯焊缝单独建模。相贯焊缝及其附近区域选用精细网格,以保证模型的计算精度;其余部件和区域选用稀疏网格,以提高模型的计算效率。钢管网格的平均尺寸为 40 mm,沿壁厚方向布置 2 层;混凝土和内栓钉网格的平均尺寸分别为 40、10 mm;相贯焊缝及其附近区域网

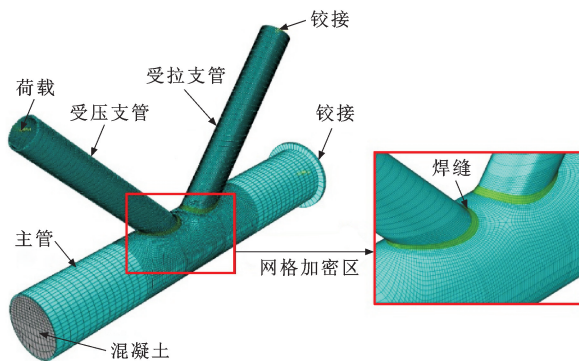


图 9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

格的平均尺寸为 4 mm。

3.1.1 材料本构

由于试验过程中,钢材始终处于弹性阶段,管内混凝土由于内栓钉的加劲可能出现开裂损伤,因此,有限元模拟中,钢材材性考虑弹性范围,弹性模量取 204.0 GPa,泊松比取 0.283;对于混凝土,弹性模量取 36.2 GPa,泊松比取 0.167,开裂损伤采用 ABAQUS 中典型塑性损伤模型进行模拟,受压行为采用韩林海等^[31]给出的应力-应变关系模型,表示为

$$y = \begin{cases} 2x - x^2 & x \leq 1 \\ \frac{x}{r(x-1)^2 + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: y 为混凝土应力与峰值应力的比值; x 为混凝土应变与峰值应变的比值; r 为影响系数,与混凝土圆柱体抗压强度及套箍系数相关。

受拉行为采用 ABAQUS 中的断裂能模型,断裂能 G_f 和开裂应力 σ_p 分别表示为

$$\begin{cases} G_f = 10^{-3} G_{f0} (f_{cu}/10)^{0.7} \\ \sigma_p = 1.4 (f_c/10)^{2/3} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度; f_c 为混凝土圆柱体抗压强度; G_{f0} 为基本断裂能。

3.1.2 焊缝模拟

焊缝模拟是有限元建模的关键,图 10(a)为焊缝几何形状模拟的细部构造,首先采用 Rhinoceros 软件建立相贯焊缝模型,见图 10(b),再将其作为部件导入到 ABAQUS 中。

3.1.3 接触关系与边界条件

主管钢管与管内混凝土之间的法向接触行为采用硬接触模拟,切向力学行为采用库仑摩擦模型模拟,界面摩擦因数取 0.4^[32]。支管、主管与相贯焊缝之间采用绑定功能模拟。对于内栓钉的模拟,采用绑定功能使内栓钉与主管连接,同时采用嵌入功能将内栓钉单元混合进混凝土单元中。

有限元模型的加载模式、边界条件与试验保持一致,即主管一端施加铰接约束,另一端自由;在一根支管端部施加铰接约束,另一根端部施加荷载。

3.1.4 模型验证

按照试验加载过程,对 2 个有限元模型逐级加载再逐级卸载,将计算得到的荷载-受压支管轴向位移关系曲线与试验结果进行对比,如图 11 所示,可以看出,有限元计算结果总体上略大于试验实测结果,试件 CFST-K 和试件 CFST-KS 的最大偏差分别为 6.92% 和 7.53%。

为进一步验证模型的可靠性,对比 2 个节点试

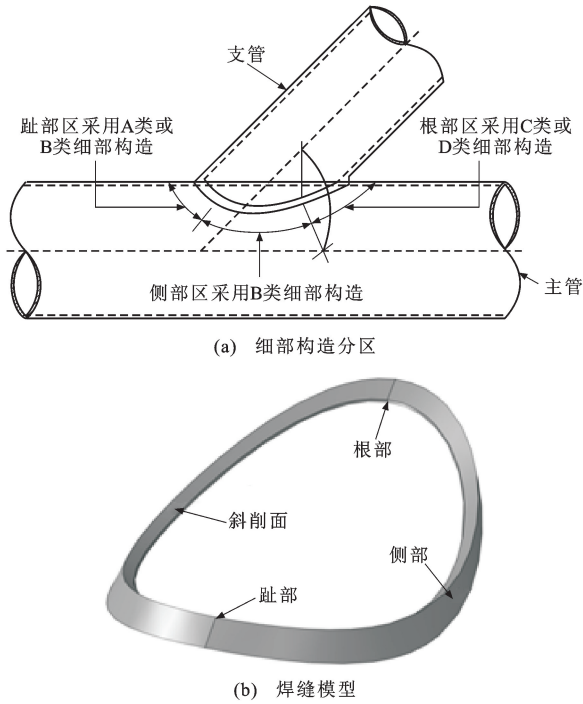


图 10 细部构造分区与焊缝模型

Fig. 10 Detailed structural partition and weld model

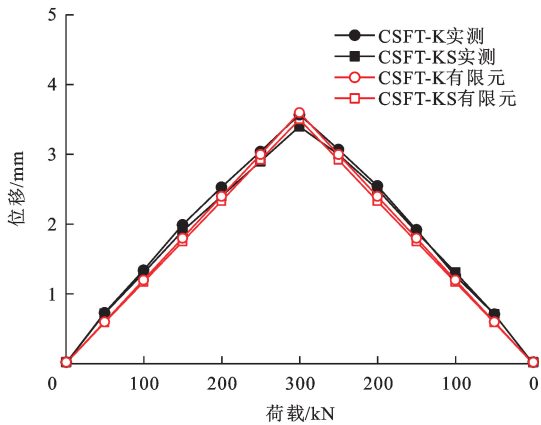


图 11 荷载-轴向位移曲线对比

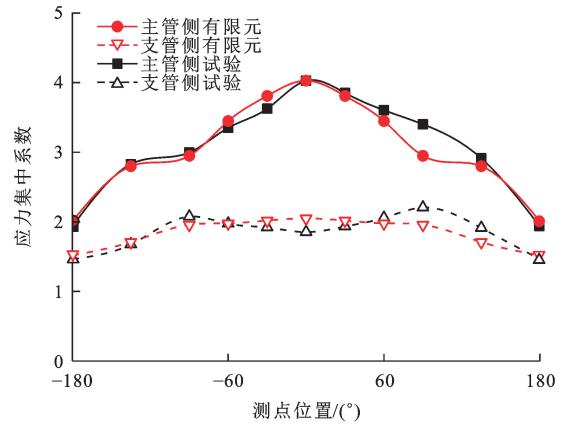
Fig. 11 Comparison of loading-axial displacement curves

件受拉相贯区域的 SCF 模拟值与实测值,如图 12 所示,可知:在荷载 300 kN 作用下,主管侧 SCF 和支管侧 SCF 的模拟值与实测结果吻合良好;对于试件 CFST-K,受拉相贯区域主管侧 SCF 和支管侧 SCF 的有限元模拟值与实测结果的比值分别为 0.921 和 0.935,试件 CFST-KS 的比值均值分别为 1.042 和 1.021,2 个节点模型的最大偏差分别为 7.89% 和 4.25%,表明模拟结果与试验实测结果吻合较好,有限元模型能够用于拓展参数分析。

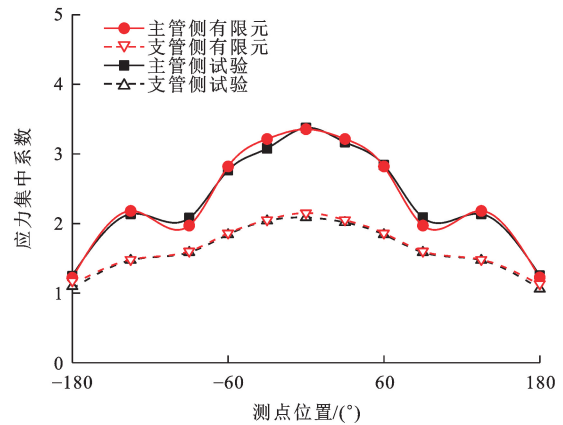
3.2 内栓钉布置方式的影响

3.2.1 参数取值范围

为进一步探讨内栓钉对节点受拉相贯区域主管



(a) CFST-K



(b) CFST-KS

图 12 SCF 模拟值与实测值对比

Fig. 12 Comparison of simulation and test results of SCF

侧 SCF 的影响规律,选取以下参数进行分析:环向排列角度、环向设置范围、轴向间距系数、设置长度系数、内栓钉的直径和长度。其中,轴向间距系数为相邻内栓钉轴向间距与内栓钉直径的比值,设置长度系数为内栓钉轴向设置总长度与支管直径的比值。各参数示意如图 13 所示,其中: a 为内栓钉轴向设置总长度; b 为相邻内栓钉轴向间距; h 为内栓钉长度; φ 为内栓钉直径。

以试件 CFST-KS 的内栓钉布置方式为基准,采用单一变量原则,进行内栓钉参数的取值,具体为:环向排列角度分别取 15° 、 30° 、 45° 和 60° ;环向设置范围分别取圆心角区间 $[-30^\circ, 30^\circ]$ 、 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 、 $[-90^\circ, 90^\circ]$ 和 $[-120^\circ, 120^\circ]$;轴向间距系数分别取 7.69、11.54、15.38 和 19.23;设置长度系数分别取 3.57、5.36 和 7.14;内栓钉直径分别取 10、13、19 和 25 mm;内栓钉长度分别取 20、40、60 和 80 mm。

3.2.2 环向布置方式

图 14(a)为环向排列角度的影响,考虑对称性,取一半测点(TX1~TX6)进行分析,可见:除测点 TX6 外,主管上其余各测点的 SCF 值均随着主管内

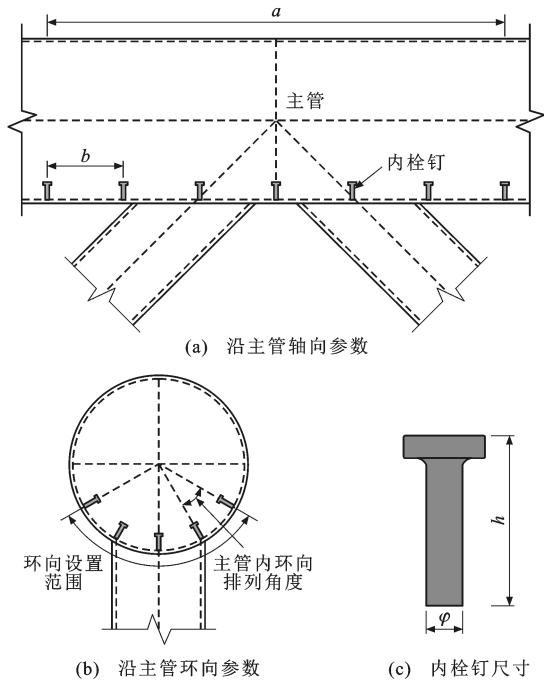


图 13 影响参数

Fig. 13 Influence parameters

环向排列角度的增大而提高,而 TX6 测点位于相贯线的跟部,本身应力集中程度就不高,故受内栓钉的影响较小;鞍点处(TX4)的 SCF 受主管内环向排列角度的影响最大,主要原因是模型中该点附近恰好布有一列内栓钉,主管内环向排列角度越小,该点局部刚度越大;最大 SCF 均在冠点(TX1),随主管内环向排列角度减小而降低,依次为 3.49、3.41、3.35、3.22,因此,减小内栓钉的环向排列角度可以较有效地降低应力集中程度。

图 14(b) 为环向设置范围的影响,可见:环向设置范围从 $[-30^\circ, 30^\circ]$ 增大到 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 时,主管上各测点的 SCF 均有减小趋势,降幅的平均值为 8.9%;环向设置范围超过 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 时,主管上各测点的 SCF 变化不大,表明内栓钉设置在主管环向圆心角小于 60° 时,能够充分发挥减小应力集中的作用,在该区间外,内栓钉发挥的作用很小。

3.2.3 轴向布置方式

图 15(a) 为轴向间距系数的影响,可见:随着轴向间距系数的增加,除测点 TX6 外,其余各测点的 SCF 均增加, TX6 出现特殊情况是因为该位置附近恰好布有一枚内栓钉,从而缓解该位置应力集中程度;轴向间距系数逐级增大,最大 SCF 始终出现在冠点处(TX1)位置,数值依次为 2.95、3.35、3.59、3.71,鞍点处(TX4)的 SCF 基本呈线性增加趋势。可知,轴向间距对节点受拉相贯区域主管侧的影响

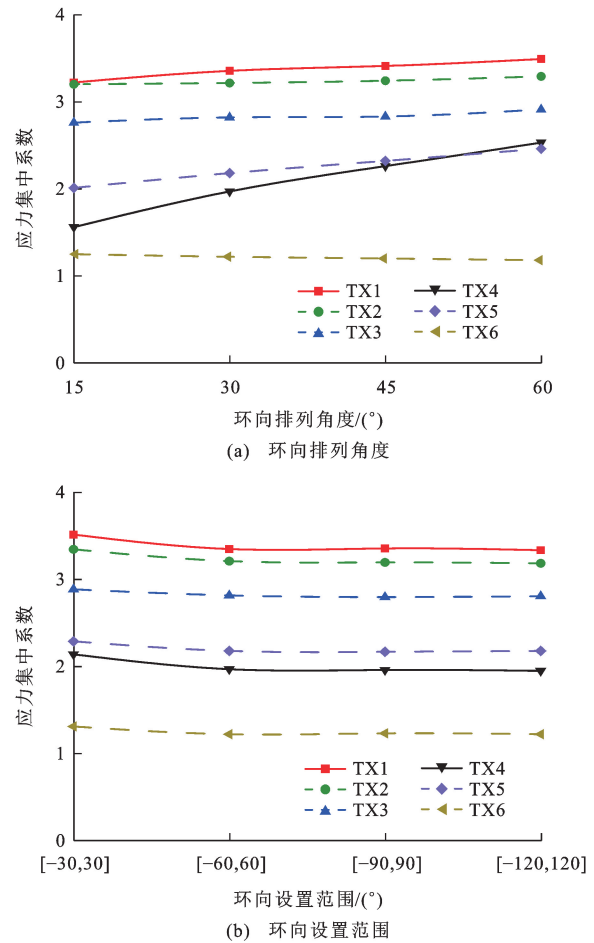


图 14 内栓钉环向布置方式对 SCF 的影响

较大,减小轴向间距可以较有效地改善节点的应力集中现象。

图 15(b) 为轴向设置长度系数的影响。当设置长度系数取为 3.57 时,轴向布置长度刚好涵盖节点相贯焊缝区域,当轴向设置长度系数发生变化时,主管上各测点的 SCF 变化不大,冠点处和鞍点处 SCF 的最大偏差量仅分别为 1.1%、0.5%,表明轴向设置长度超过节点相贯焊缝区域后,即 $a \geq D + \sqrt{2}d$,内栓钉对节点应力集中程度的影响较小。换言之,设置在节点相贯焊缝区域内的内栓钉可充分利用,远离该区域的内栓钉利用效率很低。

3.3 内栓钉几何尺寸的影响

图 16 为内栓钉直径与内栓钉长度对节点受拉相贯区域主管侧 SCF 的影响,可知,当内栓钉直径在 10~25 mm 变化、内栓钉长度从 20 mm 逐级增大到 80 mm 时,主管沿相贯线的 SCF 分布基本一致,各测点的 SCF 变化不大,最大 SCF 均在冠点处(TX1)不变,表明内栓钉的直径对节点的应力集中程度影响很小。

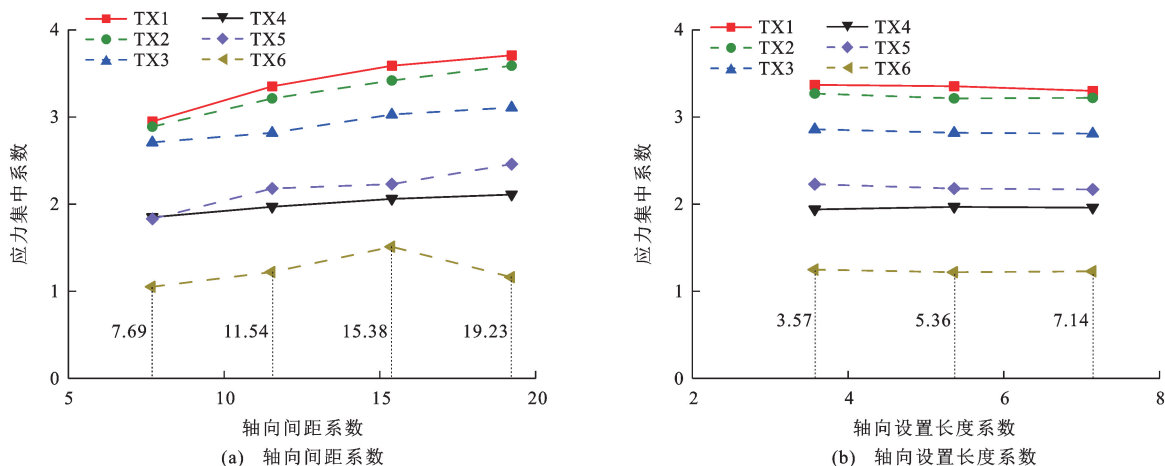


图 15 内栓钉轴向布置方式对 SCF 的影响

Fig. 15 Influence of axial layout of inner studs on SCFs

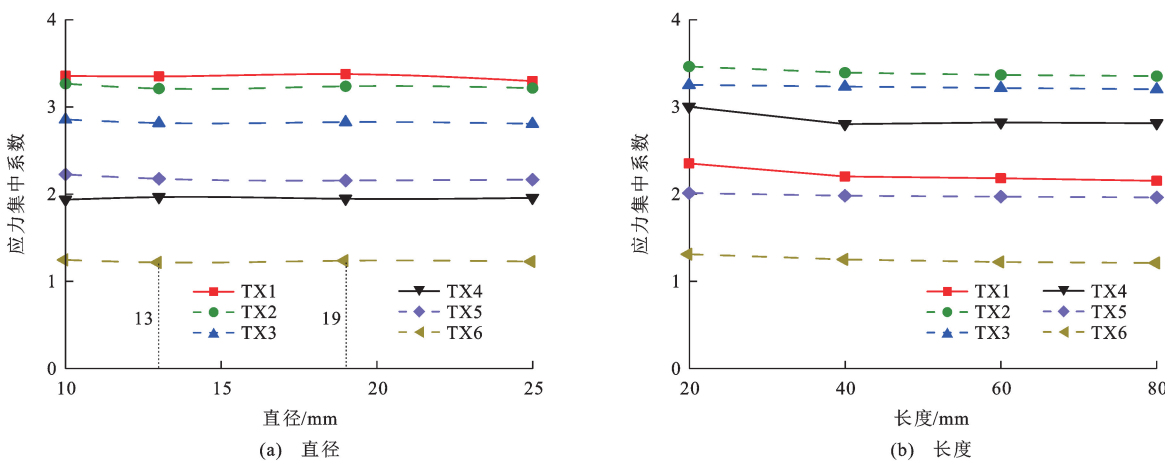


图 16 内栓钉几何尺寸对 SCF 的影响

Fig. 16 Influence of dimension of inner studs on SCFs

3.4 内栓钉布置建议

内栓钉的提出最初在于解决钢管混凝土桁肋节点脱粘后的传力问题。陈宝春等^[10-11]开展静力试验研究后,提出建议:在主管轴向,内栓钉宜布置在距离节点中心截面两侧各约 $2.7d$ 范围内,且相邻内栓钉间隔应大于 4.4φ ;在主管环向,内栓钉宜布置在节点相贯侧圆心角 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 内,且相邻内栓钉间隔应大于 3.4φ 。袁剑鸣^[30]开展内栓钉节点的传力机理试验后,提出建议:在主管轴向,内栓钉宜布置在距离节点中心截面以上 d 、以下 $2d$ 范围内,且相邻内栓钉间隔应大于 200 mm 但不超过 400 mm ;在主管环向,采用与文献[11]相同的建议布置范围。

综合上述建议与本文分析结果,图 17 给出了本文的建议布置形式:在主管轴向,内栓钉布置在节点中心截面两侧各约 $2.7d$ 范围内,且相邻内栓钉轴向间隔 b 不小于 6φ 但不超过 400 mm ;在主管环向,

内栓钉布置在节点相贯侧圆心角 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 内,相邻内栓钉的排列角度可取 30° ,但间隔应大于 3.4φ ;其余范围可以不布置内栓钉。

4 SCF 计算公式

4.1 现有钢管混凝土 K 型节点 SCF 计算公式的适用性分析

目前,仅有针对钢管混凝土 K 型节点 SCF 的计算公式,尚未见到设置内栓钉的钢管混凝土 K 型节点 SCF 的计算公式。对现有钢管混凝土 K 型节点 SCF 的计算方法进行总结分析,并探讨其对钢管混凝土桁肋内栓钉节点的适用性。

(1)《铁路桥梁钢管混凝土结构设计规范》(TB 10127—2020)建议公式

TB 10127—2020 参考挪威船级社 DVI 规范,给出了钢管 K 型节点主管 SCF 的计算方法,并将其用于钢管混凝土 K 型节点,公式为

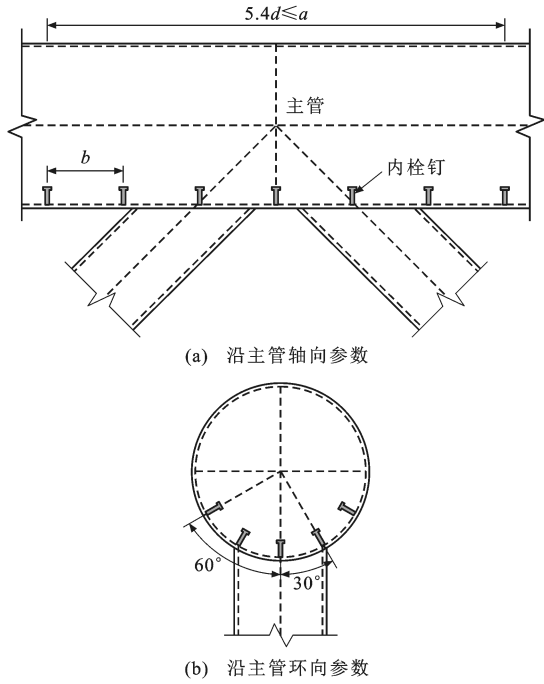


图 17 内栓钉布置建议

Fig. 17 Layout suggestions for inner studs

$$S_{K,1} = \tau^{0.9} \gamma^{0.5} (0.67 - \beta^2 + 1.16\beta) \sin(\theta) \cdot \left[1.64 + 0.29\beta^{-0.38} \arctan\left(\frac{8g}{D}\right) \right] \quad (3)$$

式中: $S_{K,1}$ 为 K 型节点应力集中系数; g 为受拉支管与受压支管间的最小净距。

(2)《钢管混凝土桥梁焊接节点疲劳技术规程》(DB 51/T 2515—2018)建议公式

DB 51/T 2515—2018 规定,宜将钢管混凝土节点管内混凝土按式(4)换算为等效钢管壁厚 T_c ,且节点主管冠点位置的应力集中系数 $S_{K,2}$ 应按式(5)进行计算

$$T_c = \frac{1}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - \frac{3.4E_{sc}A_{sc}}{\pi E_s}} \right) \quad (4)$$

$$S_{K,2} = (\gamma/12)^{0.4} (\tau/0.5)^{1.1} S_0 \quad (5)$$

式中: E_{sc} 为钢管混凝土截面组合弹性模量; A_{sc} 为钢管混凝土截面面积; E_s 为钢材弹性模量; S_0 为应力集中系数标准值,通过查规范中的附表 B 所得。

(3)文献[33]建议公式

文献[33]通过对钢管混凝土 K 型节点 SCF 的试验实测和有限元参数分析,提出主管冠点位置的应力集中系数 $S_{K,3}$ 计算方法,公式为

$$S_{K,3} = 7.16(7.24 - 21.49\beta + 18.29\beta^2) \beta^{1.61} (2\gamma)^{0.29} \tau^{0.77} [\sin(\theta)]^{1.05} \quad (6)$$

(4)文献[34]建议公式

文献[34]从节点几何刚度出发,通过理论推导,

提出了基于节点刚度的钢管混凝土 K 型节点应力集中系数 $S_{K,4}$ 计算方法

$$S_{K,4} = \left[1 - \frac{1}{\pi} \arcsin\left(\frac{2\lambda}{D}\right) \right] \left(\frac{Ddt}{T^3} \right)^{0.15} \left(\frac{D^3 T}{d^3 t} \right)^{0.08} \cdot \left[\frac{4.3D - 2.7d}{DT} t \tan(\theta) \right]^{0.75} \quad (7)$$

式中: λ 为尺寸相关参数^[34]。

图 18 为本文内栓钉节点试件的应力集中系数实测、有限元模型的计算结果与采用上述公式所得计算结果的对比情况,其中 χ 为公式计算结果与试验或有限元结果的比值。由图 18 可见:采用上述方法所得计算结果与试验实测或有限元分析结果的最小偏差分别为 93.3%、62.6%、37.2% 和 13.8%,最大偏差分别为 143.1%、104.2%、72.3% 和 43.2%,且 χ 均在 1.0 之上。总体而言,文献[34]建议公式的计算结果误差最小,但计算过程复杂,文献[33]建议公式的计算结果误差其次,但计算相对简便。

4.2 本文建议公式

综上分析,可知设置内栓钉可以有效降低钢管混凝土桁肋节点的应力集中程度,且降低程度主要与内栓钉环向排列角度和轴向排列间距有关;现有的钢管混凝土 K 型节点应力集中系数计算公式中,文献[33]建议公式(6)对内栓钉节点的适用性较好。因此,可在式(6)的基础上,引入轴向排列间距影响系数和环向排列角度影响系数,分别考虑内栓钉轴向排列间距和环向排列角度的影响,据此,可提出钢管混凝土桁肋内栓钉节点应力集中系数 S_K 的计算公式

$$S_K = 7.16\delta_1\delta_2(7.24 - 21.49\beta + 18.29\beta^2) \beta^{1.61} (2\gamma)^{0.29} \tau^{0.77} [\sin(\theta)]^{1.05} \quad (8)$$

式中: δ_1 为轴向排列间距影响系数; δ_2 为环向排列角度影响系数。

基于本文有限元计算结果,对两参数进行回归处理,首先拟合得到轴向间距系数同 δ_1 的关系曲线,见图 19(a),并在考虑 δ_1 的影响下,拟合得出 δ_2 同环向排列角度的关系曲线,见图 19(b)。

基于上述分析处理,分别得到 δ_1 和 δ_2 表达式

$$\delta_1 = 0.343 + 0.038s_L - 0.0009s_L^2 \quad (9)$$

$$\delta_2 = 0.926 + 0.127\sin(\alpha) \quad (10)$$

式中: s_L 为轴向间距系数; α 为环向排列角度。

需要注意的是,式(8)的适用范围为: $0^\circ < \alpha \leq 60^\circ$; $7.69 \leq s_L \leq 19.23$; $D + \sqrt{2}d < a$,基本涵盖了钢管混凝土桁肋节点内栓钉设置参数常用的取值

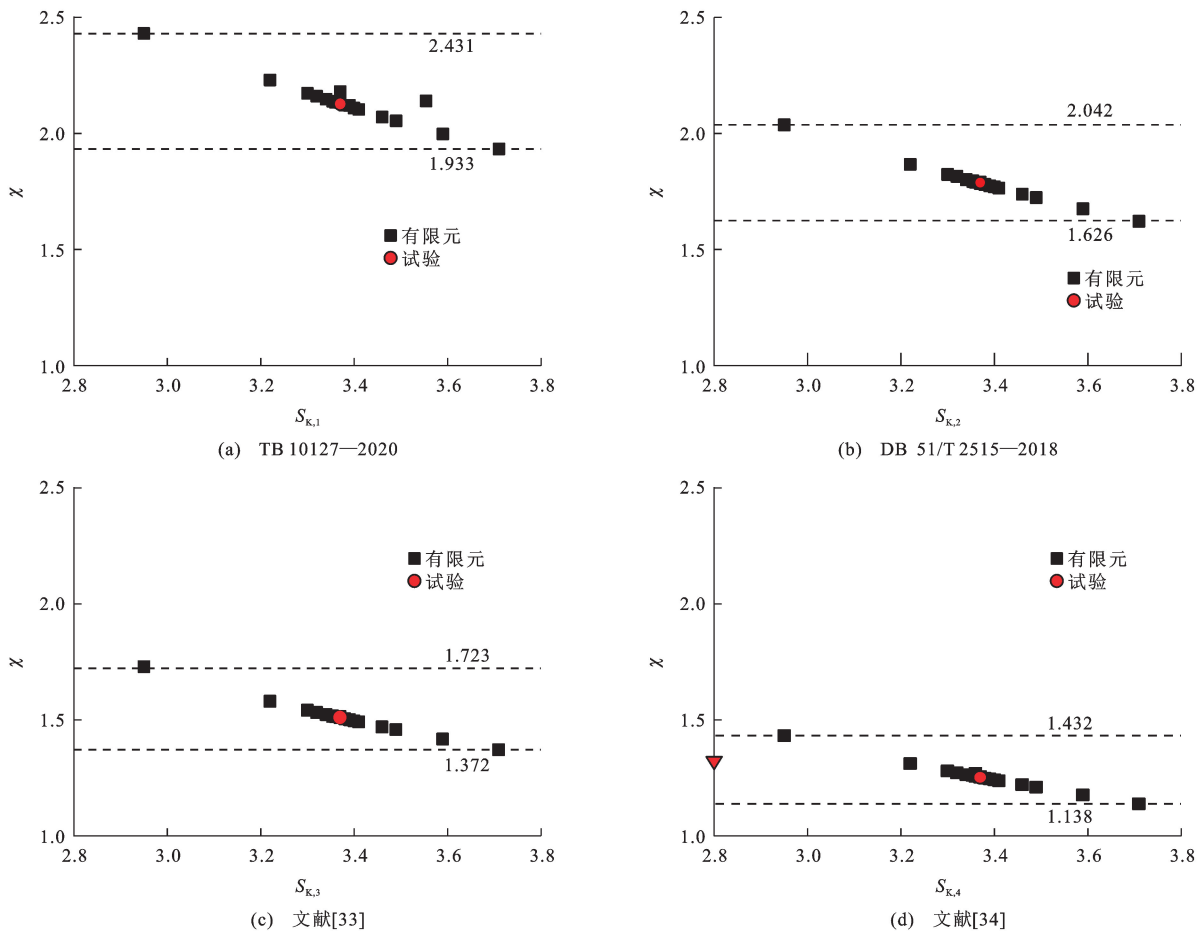


图 18 应力集中系数计算公式适用性分析

Fig. 18 Applicability analysis of calculation formulas of stress concentration factors

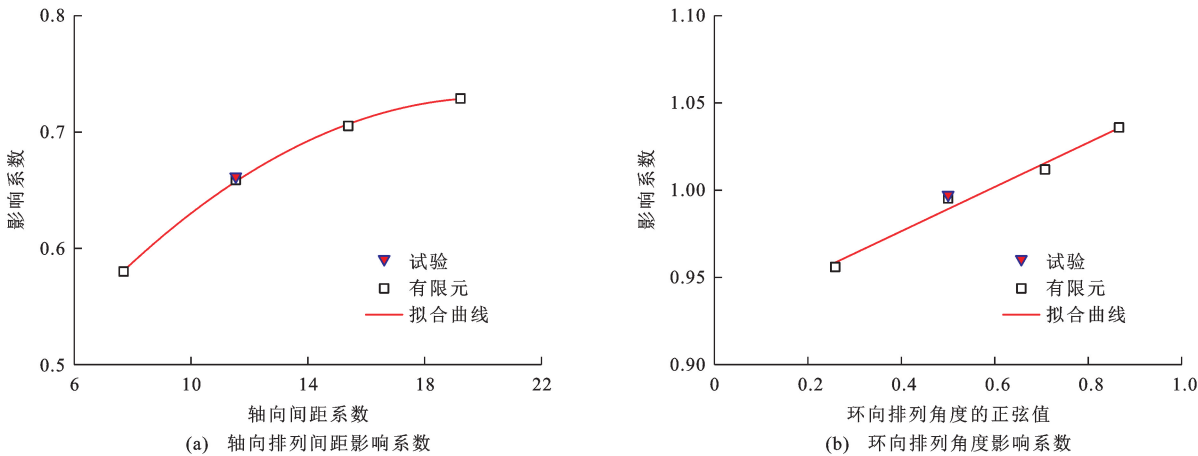


图 19 影响系数计算公式拟合

Fig. 19 Fitting of influence coefficient calculation formulas

范围。

图 20 为本文及文献[29]中试件、有限元模型采用式(8)所得计算结果与实际结果的比值,共 27 组数据,均值为 1.04,标准差为 0.001。计算结果与试验结果差值均在 10%以内,计算公式具有较高的计算精度。

5 结 语

(1)内栓钉不影响节点试件的热点应力分布规律,但设置内栓钉节点试件的热点应力最大值降低了 17.38%。

(2)内栓钉有效减小了节点受拉相贯区域的应

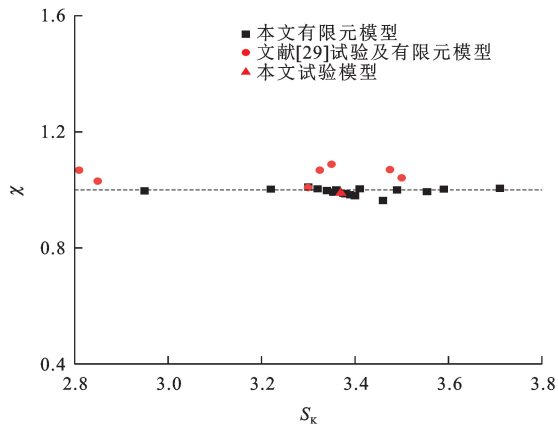


图 20 应力集中系数计算公式精度分析

Fig. 20 Precision analysis of calculation formulas for stress concentration factors

力集中程度,对受压相贯区域的影响较小。内栓钉主要在主管环向圆心角小于 60° 区间内起作用,在该区间外的作用很小。

(3)内栓钉对节点应力集中的降低程度与内栓钉的环向排列角度和轴向排列间距负相关,且减小角度影响更为明显;内栓钉自身尺寸对应力集中系数的影响相对较小。

(4)建议内栓钉主要布置在环向圆心角 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 和轴向距节点中心截面两侧各约 2.7 倍支管直径范围内,相邻内栓钉的环向排列角度可取 30° ,轴向间距应大于 6 倍内栓钉直径;其余范围可不布置。

(5)在现有钢管混凝土 K 型节点应力集中系数计算公式的基础上,引入轴向排列间距影响系数和环向排列角度影响系数,考虑内栓钉的影响,提出了钢管混凝土桁肋内栓钉节点的应力集中系数计算公式,可预测一定参数范围内此类节点的应力集中系数。

(6)设置内栓钉的钢管混凝土 K 型节点具有良好的疲劳性能,由于本文开展实验数量有限,为进一步验证本文计算方法正确性,同时给出钢管混凝土桁肋内栓钉 K 型节点的整体设计建议,后续可增加具有不同内栓钉布置形式、构件尺寸及材料强度的节点疲劳性能试验研究,对本文提出的 SCF 计算公式进行验证和修正,并为工程实际提供参考。

参考文献:

References:

[1] ZHENG Jie-lian, WANG Jian-jun. Concrete-filled steel tube arch bridges in China[J]. Engineering, 2018(4): 143-155.

[2] LIU Jun-ping, LI Xiao-fang, LIU Hua-long, et al. Recent application and development of concrete-filled steel tube arch bridges in China[C]// ICACE. The 6th International Conference

on Architecture and Civil Engineering. Kuala Lumpur: ICACE, 2022: 263-272.

- [3] 林春姣,郑皆连,秦 荣. 钢管混凝土拱肋混凝土脱空研究综述[J]. 中外公路, 2005, 24(6): 54-58.
- LIN Chun-jiao, ZHENG Jie-lian, QIN Rong. Research review on incompleteness filling of concrete-filled steel tubular arch rib[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2005, 24(6): 54-58. (in Chinese)
- [4] 涂光亚. 脱空对钢管混凝土拱桥受力性能影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- TU Guang-ya. Separation effect on mechanical behavior of concrete-filled steel tubular arch bridge[D]. Changsha: Hunan University, 2008. (in Chinese)
- [5] XUE Jun-qing, BRISEGHELLA B, CHEN Bao-chun. Effects of debonding on circular CFST stub columns[J]. International Journal of Constructional Steel Research, 2012, 69: 64-76.
- [6] SCHNABLS, JELENIC G, PLANINC I. Analytical buckling of slender circular concrete-filled steel tubular columns with compliant interfaces[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015(115): 252-262.
- [7] MYERS P T, BRENNAN F P, DOVER W D. The effect of rack/rib plate on the stress concentration factors in jack-up chords[J]. Marine Structures, 2001, 14(4/5): 485-505.
- [8] 刘永健,姜 磊,熊治华,等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土受拉节点热点应力集中系数计算方法[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(5): 1-15.
- LIU Yong-jian, JIANG Lei, XIONG Zhi-hua, et al. Hot spot SCF computation method of concrete-filled and PBL-stiffened rectangular hollow section joint subjected to axial tensions[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(5): 1-15. (in Chinese)
- [9] LIU Yong-jian, XIONG Zhi-hua, FENG Yun-cheng, et al. Concrete-filled rectangular hollow section X joint with PerfoBond Leister rib structural performance study: ultimate and fatigue experimental investigation[J]. Steel and Composite Structures, 2017, 24(4): 455-465.
- [10] 陈宝春,陈津凯. 钢管混凝土内栓钉抗剪承载力试验研究[J]. 工程力学, 2016, 33(2): 66-73.
- CHEN Bao-chun, CHEN Jin-kai. Experimental studies on shear-bearing capacity of headed stud in concrete-filled steel tube[J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(2): 66-73. (in Chinese)
- [11] 刘君平,陈津凯,陈宝春. 钢管混凝土桁肋内栓钉相贯节点受力行为试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(9): 150-157.
- LIU Jun-ping, CHEN Jin-kai, CHEN Bao-chun. Experimental studies on load-transferring mechanism of CFST directly-welded K-joints with studs[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(9): 150-157. (in Chinese)
- [12] 陈津凯,陈宝春,刘君平. 钢管混凝土多排多列内栓钉受剪性能[J]. 工程力学, 2017, 34(6): 178-189.
- CHEN Jin-kai, CHEN Bao-chun, LIU Jun-ping. Shear

- performance of multi-studs between steel tube and core concrete[J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(6): 178-189. (in Chinese)
- [13] 刘新华, 帅少辉, 彭元诚. 总溪河大桥主桥结构设计[J]. *桥梁建设*, 2016, 46(5): 95-99.
LIU Xin-hua, SHUAI Shao-hui, PENG Yuan-cheng. Structural design of main bridge of Zongxi River Bridge[J]. *Bridge Construction*, 2016, 46(5): 95-99. (in Chinese)
- [14] 林新元, 董向前, 刘冠之, 等. 钢管混凝土拱桥内栓钉的防脱空研究[J]. *施工技术*, 2017, 46(增): 854-857.
LIN Xin-yuan, DONG Xiang-qian, LIU Guan-zhi, et al. Study on anti-void at interface of concrete filled steel tube arch bridges built-in studs[J]. *Construction Technology*, 2017, 46(S): 854-857. (in Chinese)
- [15] 刘琪, 聂尚杰, 丁少凌, 等. 重庆渝湘复线双堡特大桥主桥设计[J]. *桥梁建设*, 2023, 53(增1): 16-24.
LIU Qi, NIE Shang-jie, DING Shao-ling, et al. Design of main bridge of Shuangbao Bridge of Second Chongqing-Hunan Railway in Chongqing[J]. *Bridge Construction*, 2023, 53(S1): 16-24. (in Chinese)
- [16] MUSA I A, MASHIRI F R, ZHU Xin-qun. Fatigue behaviour of concrete-filled steel tubular joints—a review[J]. *International Journal of Lifecycle Performance Engineering*, 2016, 2(1/2): 22-60.
- [17] 姜磊, 刘永健, 王康宁, 等. 焊接管节点结构形式发展及疲劳性能对比[J]. *建筑结构学报*, 2019, 40(3): 180-191.
JIANG Lei, LIU Yong-jian, WANG Kang-ning, et al. Development of welded tubular joints and comparison of fatigue behaviour[J]. *Journal of Building Structures*, 2019, 40(3): 180-191. (in Chinese)
- [18] 姜磊, 刘永健, 龙辛, 等. 基于热点应力法的矩形钢管混凝土组合桁架桥节点疲劳评估[J]. *交通运输工程学报*, 2020, 20(6): 104-116.
JIANG Lei, LIU Yong-jian, LONG Xin, et al. Fatigue assessment of joints in concrete-filled rectangular hollow section composite truss bridges based on hot spot stress method[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(6): 104-116. (in Chinese)
- [19] 姜磊, 刘永健, 刘彬, 等. 基于热点应力法的钢管混凝土桁式拱桥节点疲劳评估[J]. *桥梁建设*, 2022, 52(3): 69-76.
JIANG Lei, LIU Yong-jian, LIU Bin, et al. Joint fatigue assessment of concrete-filled steel tubular arch bridge based on hot spot stress method[J]. *Bridge Construction*, 2022, 52(3): 69-76. (in Chinese)
- [20] ZHENG Jian, NAKAMURA S, GE Ya-jing, et al. Formulation of stress concentration factors for concrete-filled steel tubular (CFST) T-joints under axial force in the brace[J]. *Engineering Structures*, 2018, 170: 103-117.
- [21] TONG L W, CHEN K P, XU G W, et al. Formulae for hot-spot stress concentration factors of concrete-filled CHS T-joints based on experiments and FE analysis[J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 136: 113-128.
- [22] XU Fei, CHEN Ju, JIN Wei-liang. Experimental investigation of SCF distribution for thin-walled concrete-filled CHS joints under axial tension loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 93: 149-157.
- [23] KIM I G, CHUNG C H, SHIM C S, et al. Stress concentration factors of N-joints of concrete-filled tubes subjected to axial loads[J]. *International Journal of Steel Structures*, 2014, 14(1): 1-11.
- [24] 孙传祺. 钢管混凝土K型间隙焊接节点热点应力与承载力试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.
SUN Chuan-qi. Studies on hot spot stress and ultimate capacity of CFST welded K-joints with gap[D]. Shanghai: Tongji University, 2008. (in Chinese)
- [25] 姜磊, 刘永健, 龙辛, 等. 矩形钢管混凝土桁架节点应力集中特性试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(2): 184-196, 214.
JIANG Lei, LIU Yong-jian, LONG Xin, et al. Experimental study on stress concentration characteristics of joints in concrete-filled rectangular steel tubular truss[J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(2): 184-196, 214. (in Chinese)
- [26] 陈康明, 黄汉辉, 吴庆雄, 等. 钢管混凝土K形节点应力集中系数计算方法[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(12): 94-104.
CHEN Kang-ming, HUANG Han-hui, WU Qing-xiong, et al. Calculation method of stress concentration factor for CFST K-joint[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(12): 94-104. (in Chinese)
- [27] CHEN Kang-ming, WU Qing-xiong, HUANG Han-hui, et al. Fatigue performance test and finite-element analysis of concrete-filled steel-tube K-joints[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2023, 28(3): 04023003.
- [28] HUANG Wen-jin, FENU L, CHEN Bao-chun, et al. Experimental study on K-joints of concrete-filled steel tubular truss structures[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 107: 182-193.
- [29] 吴庆雄, 郑樵风, 陈康明, 等. 阵列式布设内栓钉的钢管混凝土K型节点足尺模型疲劳性能研究[J]. *土木工程学报*, 2022, 55(2): 31-49, 72.
WU Qing-xiong, ZHENG Qiao-feng, CHEN Kang-ming, et al. Study on fatigue performance of full-scale model of concrete-filled steel tubular K-joints with array-aligned internal studs[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2022, 55(2): 31-49, 72. (in Chinese)
- [30] 袁剑鸣. 钢管混凝土节点内栓钉传力机理及对桁拱受力性能影响研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.
YUAN Jian-ming. Study on transfer mechanism of inner studs and impact on mechanical behavior of concrete-filled steel tubular truss arch ribs[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018. (in Chinese)
- [31] 韩林海, 冯九斌. 混凝土的本构关系模型及其在钢管混凝土数值分析中的应用[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1995(5): 26-32.
HAN Lin-hai, FENG Jiu-bin. Constitutive relation model of concrete and the application in numerical analysis of concrete-filled steel tube members[J]. *Journal of Harbin University of*

- Civil Engineering and Architecture, 1995(5): 26-32. (in Chinese)
- [32] 高春彦, 杨卫平, 李 斌. 圆钢管混凝土 K 型焊接相贯节点力学性能数值模拟[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(1): 18-22.
- GAO Chun-yan, YANG Wei-ping, LI Bin, et al. Numerical simulation on the mechanical behavior of the concrete-filled circular steel tubular welded K-joints[J]. Journal of Xi'an University of Architecture and Technology (Natural Science Edition), 2018, 50(1): 18-22. (in Chinese)
- [33] 童乐为, 陈昆鹏, ZHAO Xiao-ling. 钢管混凝土桁架节点疲劳性能研究进展[J]. 钢结构, 2014(增): 60-67.
- TONG Le-wei, CHEN Kun-peng, ZHAO Xiao-ling. Research advance in fatigue behavior of concrete-filled tubular truss joints[J]. Steel Construction, 2014(S): 60-67. (in Chinese)
- [34] CHEN Kang-ming, HUANG Han-hui, ZHENG Qiao-feng, et al. Experimental research on the calculating method of stress concentration factor for CFST K-joint [J]. Journal of Structural Engineering, 2023, 149(3): 04023006.