

# 轴向受力下钢管混凝土 K 型节点 应力集中系数影响分析

郑建

(厦门市市政交通规划设计院有限公司, 福建 厦门 361009)

**摘要:** 钢管混凝土 K 型节点广泛应用于钢管混凝土桁式拱桥, 但该类型节点的疲劳破坏已在现有的桥梁中发现。以实际工程建立钢管混凝土 K 型节点有限元模型, 进行了主管径厚比  $2\gamma$ , 主支管的壁厚比  $\tau$ 、管径比  $\beta$ 、夹角  $\theta$  和偏心率  $\rho$  五个参数分析, 揭示其在轴向受力下几何参数对应力集中系数的影响。研究表明: 钢管混凝土 K 型节点最大 SCF 远小于空钢管 K 型节点, 尤其在受压支管周边; 各影响参数中, 主支管的管径比参数  $\beta$  对 SCF 的影响是最显著的, 主管的径厚比参数  $2\gamma$  对 SCF 的影响是最小的。

**关键词:** 桥梁工程; 钢管混凝土 K 型节点; 应力集中系数; 参数分析

**中图分类号:** U448.21; U446.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1144(2021)06-0094-06

## Stress Concentration Factors Impact Analysis of Concrete-filled Steel Tubular K-joints Under Axial Force

ZHENG Jian

(Xiamen Municipal Traffic Planning and Design Institute Co., Ltd., Xiamen, Fujian 361009, China)

**Abstract:** Concrete-filled steel tubular (CFST) K-joints have been widely used in CFST trussed arch bridges, but fatigue damage of the joint has been observed in existing bridges. Based on a practical engineering, the finite element model of K-joint of CFST was established. Five parameters (main diameter-thickness ratio  $2\gamma$ , wall thickness ratio  $\tau$  of main branch pipe, diameter ratio  $\beta$ , angle  $\theta$  and eccentricity  $\rho$ ) were provided for the parametric analysis under axial force to reveal the influence of the parameters on SCFs. The results show that the maximum SCF of K-joints of CFST is much smaller than that of hollow tubular K-joints, especially around the compression branch pipe. Among the influence parameters, the diameter ratio  $\beta$  of the main branch pipe has the most significant effect on SCF, and the diameter to thickness ratio  $2\gamma$  of the main pipe has the least effect on SCF.

**Keywords:** bridge engineering; CFST K-joints; stress concentration factors; parametric analysis

自从第一座钢管混凝土拱桥建成投入使用以来, 钢管混凝土拱桥在中国得以快速的发展和建设。迄今为止, 已建成超过 400 座的钢管混凝土拱桥, 其中桁式拱桥是主要的结构形式, 约占钢管混凝土拱桥总数的 38%<sup>[1-3]</sup>。

桁式拱桥的拱肋截面由钢管混凝土主管和空心钢管支管组成, 一般采用完全溶透焊缝进行相贯连接形成一系列的钢管混凝土节点, 包括 K 型节点、T 型节点、Y 型节点和 N 型节点等。其中, K 型节点是

最常用的一种节点形式。但是由于在主支管相贯区域存在高应力集中问题, 导致钢管混凝土节点成为整个结构的薄弱部位。目前, 国内规范未有适用于钢管混凝土节点的疲劳设计准则, 《公路钢管混凝土拱桥设计规范》<sup>[4]</sup> (JTG/T D65-06-2015) 仅给出名义应力幅容许值用于钢管混凝土节点的疲劳验算。在实际工程应用中, K 型节点的疲劳裂缝被发现于一座中承式钢管混凝土桁式拱桥中<sup>[5]</sup>, 该桥和疲劳裂缝分别如图 1 和图 2 所示。

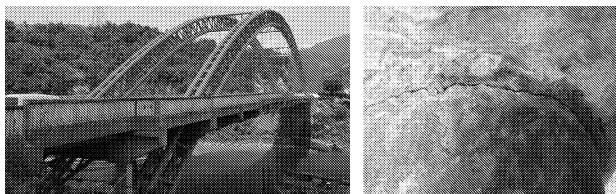


图1 钢管混凝土拱桥

图2 疲劳裂缝

现有大量的研究主要针对圆形空心钢管节点的疲劳问题,而且有部分国家出版了适用该类型节点的疲劳设计规范。然而,对于钢管混凝土节点的疲劳研究还较少<sup>[6]</sup>。Tong等<sup>[7]</sup>通过试验表明钢管混凝土K型节点比空钢管K型节点的应力集中系数(SCF)要小和均匀。Wang等<sup>[8]</sup>的研究发现面内弯矩作用下钢管混凝土T型节点的最大SCF小于空钢管T型节点。Wang等<sup>[5]</sup>的研究揭示钢管混凝土节点疲劳裂缝萌生位置、裂缝的扩展路径和最终疲劳破坏形式,并提出需要进一步针对钢管混凝土节点的研究以提出可靠的设计S-N曲线。Chen等<sup>[9]</sup>的试验研究发现空钢管节点的SCF计算公式用于估算钢管混凝土节点是非常保守的。吴庆雄等<sup>[10]</sup>通过试验揭示了钢管混凝土K型节点的应力集中现象,并根据有限元分析结果揭示SCF分布规律。Liu等<sup>[11-12]</sup>通过试验和理论分析得到PBR可以有效提高节点抗拉强度和疲劳耐久性。上述研究大多进行钢管混凝土节点与空钢管节点的SCF的对比,但关于钢管混凝土节点几何参数对SCF影响的研究较少。

因此,本研究通过参数分析揭示5种几何参数对主管和支管均在轴力作用下钢管混凝土K型节点的热点SCF的影响。分析的几何参数有主支管的管径比( $\beta = d/D$ )、主管的径厚比( $2\gamma = D/T$ )、主支管的壁厚比( $\tau = t/T$ )、主支管之间的夹角( $\theta$ )和偏心率( $\rho = e/D$ ),几何参数详见图3。分析结果旨在得到钢管混凝土K型节点的几何参数和SCF之间的关系。

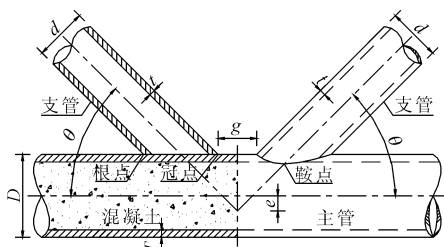


图3 几何参数

## 1 有限元建模

### 1.1 有限元模型

有限元模型采用分析软件 MSC. Marc 进行建模。钢管混凝土的有限元建模方法在文献[13]中已验证。因此,采用验证过的数值建模方法计算在轴力作用下钢管混凝土K型节点的热点应力分布。钢管和混凝土的弹性模量分别设置为  $2.05 \times 10^5$  MPa 和  $3.25 \times 10^4$  MPa,泊松比分别设置为 0.3 和 0.2。焊缝的材料特性设置成和钢管一致。焊缝在主管和支管的焊脚长度分别设置为  $t$  和  $0.5t$ 。模型单元采用线性完全积分八节点六面体实体单元,并采用了“假定应变”的分析功能。钢管厚度方向的单元层数由主支管相贯区域的单元边长比例约为 1 来进行控制划分,相贯区域单元的尺寸约为 2 mm。

主管与填充混凝土之间的接触界面性能采用“Touch”功能进行模拟。该功能允许接触体在法向方向可以接触和分离,在切向方向进行摩擦滑动。由于摩擦系数( $\mu$ )对于钢管混凝土节点SCF的影响不能忽略,则摩擦系数取值为 0.3<sup>[14]</sup>。模型的边界条件为:主管的一端为固定约束,主管的另一端和两支管的端部为自由。根据前述出现疲劳裂缝的桥梁在疲劳车辆作用下的分析结果<sup>[3]</sup>,有限元模型中支管的轴向拉力和轴向压力施加为 37.50 kN,主管的轴向压力施加为 109.84 kN。有限元模型和相关区域的局部网格划分如图4和图5所示。

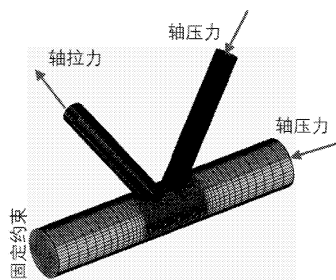


图4 有限元模型

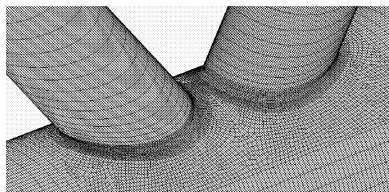


图5 相贯区域的局部网格

### 1.2 热点应力和SCF计算方法

主管相贯区域的热点应力采用数值分析结果

进行线性外推计算。由于应力分布近似线性,两个获取分析结果的节点位置即外推区域,如图 6 和表 1 所示。分析中的获取第一和第二个节点距离焊缝位置分别约为  $0.4T$  (但距离焊缝位置的最小取值大等于  $4\text{ mm}$ ) 和  $1.0T$ 。节点 SCF 一般定义为热点应力与名义应力之间的比值<sup>[11]</sup>。因此,支管轴力( $F$ )作用下的钢管混凝土 K 型节点的名义应力取值为 ( $\sigma_n = F/A$ ),其中  $A$  为支管的截面面积。

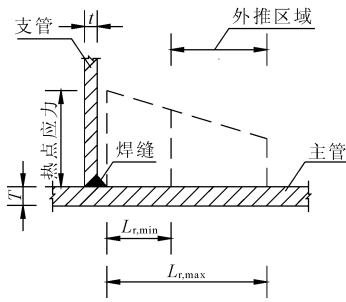


图 6 外推区域的定义

表 1 外推区域的边界定义

距焊缝的 距离	主管		支管	
	鞍点	冠点	鞍点	冠点
$L_{r,min}^*$		$0.4T$		$0.4t$
$L_{r,max}^{**}$	$0.045D$	$0.4\sqrt[4]{0.25DTdt}$		$0.65\sqrt{0.5dt}$

注: \*  $L_{r,min}$  的最小值为  $4\text{ mm}$ ; \*\*  $L_{r,max}$  的最小值为  $L_{r,min} + 0.6t$ 。

### 1.3 有限元模型尺寸

有限元分析的标准模型几何尺寸如表 2 所示。参数分析中的每一个几何参数的取值范围分别为:  $\gamma = [20, 40]$ ,  $\tau = [0.4, 1.0]$ ,  $\beta = [0.30, 0.45]$ ,  $\theta = [30^\circ, 57^\circ]$  和  $\rho = [-0.13, 0.43]$ 。参数分析时,某一个几何参数值变化,其他的几何参数值固定为与标准模型一致。参数分析共有 19 个有限元模型,具体的有限元模型参数组合如表 3 所示。

表 2 标准模型

$D/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$T/\text{mm}$	$t/\text{mm}$	$\theta/(\text{^\circ})$
550	219	8	8	57
$\gamma$	$\tau$	$\beta$	$\rho$	
34.38	1.0	0.4	0	

表 3 有限元模型参数

$\gamma$	20.00	30.00	34.38	40.00			
$\tau$	0.4	0.6	0.8	1.0			
$\beta$	0.30	0.35	0.40	0.45			
$\theta/(\text{^\circ})$	30	40	50	57			
$\rho$	-0.130	-0.110	-0.090	-0.045	0.000	0.090	0.430

## 2 钢管混凝土节点与空钢管节点之间的对比

通过有限元分析得到钢管混凝土 K 型节点和空钢管 K 型节点的主支管相贯区域最大 SCF。钢管混凝土 K 型节点的主支管相贯区域的变形如图 7 所示。由于主管与混凝土的分离,钢管混凝土 K 型节点受拉支管与主管相贯区域周边的力学性能与空钢管 K 型节点相似。然而,混凝土可以给受压的支管提供强大的支撑。主管与混凝土在冠点的周边接触面是较为平顺的,导致其比其他部位承受更多的荷载。因此,钢管混凝土 K 型节点的受拉支管最大 SCF 通常出现在鞍点,与空钢管 K 型节点相似。但钢管混凝土 K 型节点的受压支管最大 SCF 出现在冠点。空钢管 K 型节点在 CIDECT 设计规范<sup>[15]</sup>中的 SCF 参数化方程式如公式(1)所示:

$$SCF = \left[ \frac{\gamma}{12} \right]^{\chi_1} \left[ \frac{\tau}{0.5} \right]^{\chi_2} \cdot SCF_0 \quad (1)$$

指数  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  是由荷载类型和相关位置确定,  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  和  $SCF_0$  取值在设计规范附录 D 中给出<sup>[11]</sup>。方程式的计算有效范围为:  $2\gamma = [24, 60]$ ,  $\tau = [0.25, 1.00]$ ,  $\beta = [0.30, 0.60]$ ,  $\theta = [30^\circ, 60^\circ]$ 。特别指出本分析中部分模型的  $2\gamma$  取值比其应用范围稍大,而 CIDECT 规范角度  $\theta$  的图示定义为主管与支管外表面的夹角,对于等截面的主管或支管,钢管外表面线与其轴线是平行的。

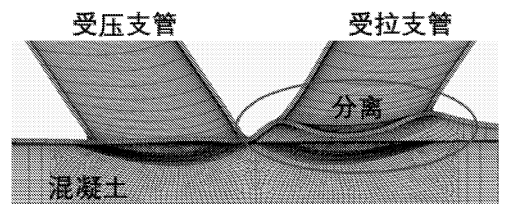


图 7 主管与混凝土之间的放大变形

有限元分析计算得到的空钢管 K 型节点的最大 SCF 与公式(1)的计算值对比如图 8—图 11 所示。由于钢管混凝土节点和空钢管节点的主管 SCF 均大于支管 SCF,则图中的最大 SCF 取值于主管。空钢管节点的有限元值与公式(1)的计算值吻合。

图 8—图 12 显示钢管混凝土节点与空钢管节点最大 SCF 之间的对比,表明钢管混凝土节点的最大 SCF 远小于空钢管节点,特别是受压支管周边相贯区域。另外,每个参数对钢管混凝土节点受拉支管周边相贯区域的最大 SCF 的影响与空钢管节点

是相似的。同时,主管的径厚比( $2\gamma = D/T$ )、主管的管径比( $\beta = d/D$ )和偏心率( $\rho = e/D$ )对钢管混凝土节点受压区域最大 SCF 的影响是不同于空钢管节点。

### 3 各参数对钢管混凝土节点 SCF 的影响

#### 3.1 主管的径厚比 $2\gamma$ ( $= D/T$ ) 影响

如图8所示,随着参数  $2\gamma$  的增大,钢管混凝土 K 型节点受拉支管周边相贯区域的最大 SCF 增大变化斜率为 0.08,但受压支管周边的最大 SCF 减小变化斜率为 -0.05。

当  $D$  值和参数  $\tau$  保持不变时,  $T$  和  $t$  值会随着参数  $2\gamma$  的增大而减小。 $T$  值的减小会导致主管在受拉支管周边相贯区域的局部抗弯刚度的减小,在该区域主管和混凝土的分离引起主管的热点应力变大。在支管轴力不变下,  $t$  值的减小会导致名义应力的增大。随着壁厚的减小,抗弯刚度的减小幅度通常大于轴向刚度的减小幅度,导致热点应力的增大幅度可能大于名义应力的增大幅度。因此,导致较高的应力集中。

然而,由于混凝土提供强大的支撑,主管在受压支管周边相贯区域的局部抗弯刚度几乎不减小。因此,热点应力同样几乎不减小。名义应力随着参数  $2\gamma$  的增大而变大,导致 SCF 变小。

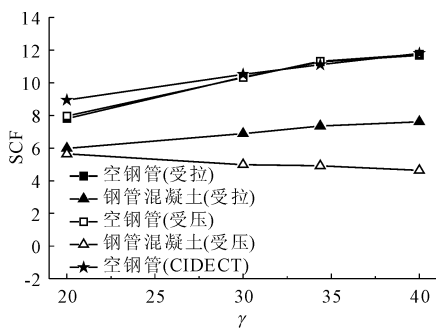


图8 参数  $2\gamma$  与最大 SCF 的关系

#### 3.2 主管的壁厚比 $\tau$ ( $= t/T$ ) 影响

随着参数  $\tau$  的增大,钢管混凝土 K 型节点受拉和受压支管周边相贯区域的最大 SCF 的增大变化斜率分别为 3.92 和 4.67,如图9所示。这是由于主管和支管之间的相对刚度变化引起的。随着参数  $\tau$  的增大,  $t$  值相对于  $T$  值逐渐变大,导致主管在相贯区域的局部刚度相对于支管逐渐变小,引起主管的应力集中变大。

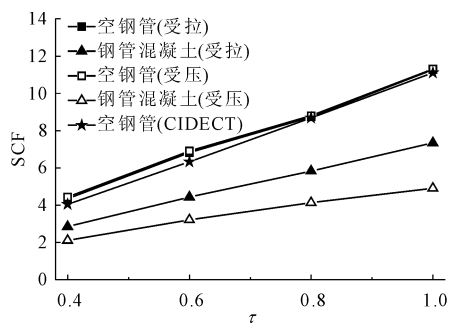


图9 参数  $\tau$  与最大 SCF 的关系

#### 3.3 主管的管径比 $\beta$ ( $= d/D$ ) 影响

随着参数  $\beta$  的增大,钢管混凝土 K 型节点受拉支管周边相贯区域的最大 SCF 的减小变化斜率为 -8.47,而受压支管周边相贯区域的最大 SCF 的增大变化斜率为 16.53,如图10所示。在轴力不变下,参数  $\beta$  的增大会导致名义应力和热点应力的减小。受拉支管周边相贯区域的最大 SCF 出现在鞍点,垂直于主管表面的分力随着参数  $\beta$  的增大而变小,可能引起最大热点应力的减小幅度大于名义应力的减小幅度。因此,应力集中效应变小。

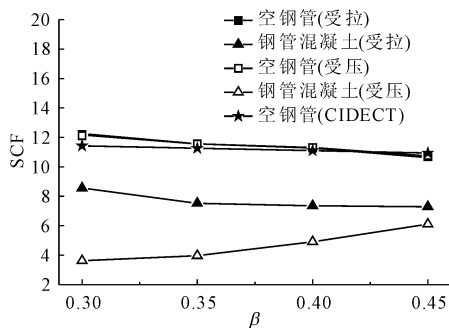


图10 参数  $\beta$  与最大 SCF 的关系

然而,受压支管周边相贯区域的最大 SCF 出现在冠点。随着参数  $\beta$  增大,  $g$  值逐渐变小,主管和受拉支管之间的应力传递逐渐不均匀,导致最大热点应力几乎不减小。因此,应力集中效应变大。

#### 3.4 主管之间的夹角 $\theta$ 影响

随着参数  $\theta$  的增大,钢管混凝土 K 型节点受拉和受压支管周边相贯区域的最大 SCF 的增大变化斜率分别为 0.16 和 0.14,如图11所示。随着参数  $\theta$  从  $30^\circ$  增大到  $57^\circ$ ,支管轴力的竖向分力从  $0.5F$  增大到  $0.84F$ ,即竖向分力增大为 1.68 倍。受拉和受压支管周边相贯区域的最大 SCF 分别增大为 2.34 倍和 4.50 倍。最大 SCF 的变化主要由于支管轴力的竖向分力的变化引起的,以及在不同的参数  $\theta$  下  $g$  值的变化共同引起的。随着参数  $\theta$  从  $30^\circ$  增大到  $57^\circ$ ,  $g$  值从 515

mm 减小到 96 mm, 即  $g$  值减小为 0.19 倍。

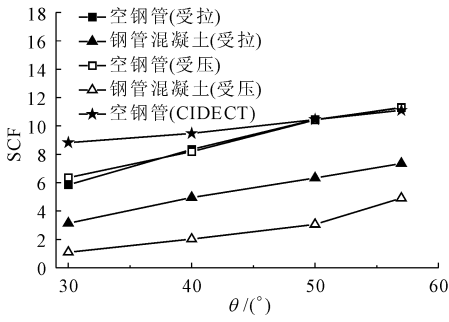


图 11 参数  $\theta$  与最大 SCF 的关系

### 3.5 偏心率 $\rho$ ( $=e/D$ ) 的影响

随着参数  $\rho$  的增大, 钢管混凝土 K 型节点受压支管周边相贯区域的最大 SCF 减小变化斜率为 -9.66, 但受拉支管周边的最大 SCF 增大变化斜率约为 3.48, 如图 12 所示。

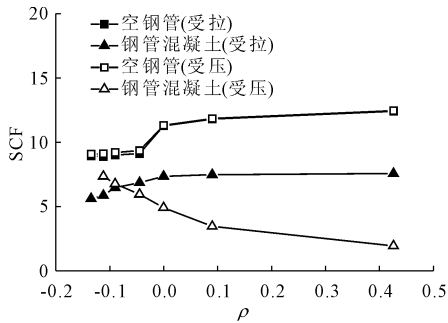


图 12 参数  $\rho$  与最大 SCF 的关系

当参数  $\rho$  是较小的情况时, 在不同参数  $\rho$  下, 主管在受压支管周边相贯区域的热点总是出现在冠点, 这是由较为平坦的接触面和冠点附近因钢管和混凝土分离引起的弯曲变形共同引起的。钢管和混凝土之间的分离不仅出现在受拉支管周边, 并且在受压支管周边同样存在分离, 如图 13 所示。当参数  $\rho$  是很大的情况时, 分离只存在受拉支管周边, 受压支管周边的分离效应可以被忽略。受压支管周边在没有分离的情况下, 混凝土强大的支撑可以使应力集中得以减轻。

在不同参数  $\rho$  下, 主管在受拉支管周边相贯区域的热点总是出现在鞍点, 这是由于拉力作用下主管较大的面外弯曲变形导致的, 如图 13 所示。当参数  $\rho$  增大时, 两支管之间的间隙 (即  $g$  值) 也会增大, 并且两支管逐渐互相远离。主管在相关区域周边的面外弯曲变形会增大, 导致主管在受拉支管周边相贯区域存在较大的应力集中。

### 3.6 参数分析总结

钢管混凝土 K 型节点的几何参数对 SCF 的影响总结如表 4 所示。钢管混凝土 K 型节点受拉支管周边相贯区域的最大 SCF 出现在鞍点, 受压支管周边相贯区域的最大 SCF 出现在冠点。参数  $\beta$  对 SCF 的影响变化斜率在五个参数中是最为显著的。另外, 参数  $2\gamma$  对 SCF 的影响变化斜率是非常小的。

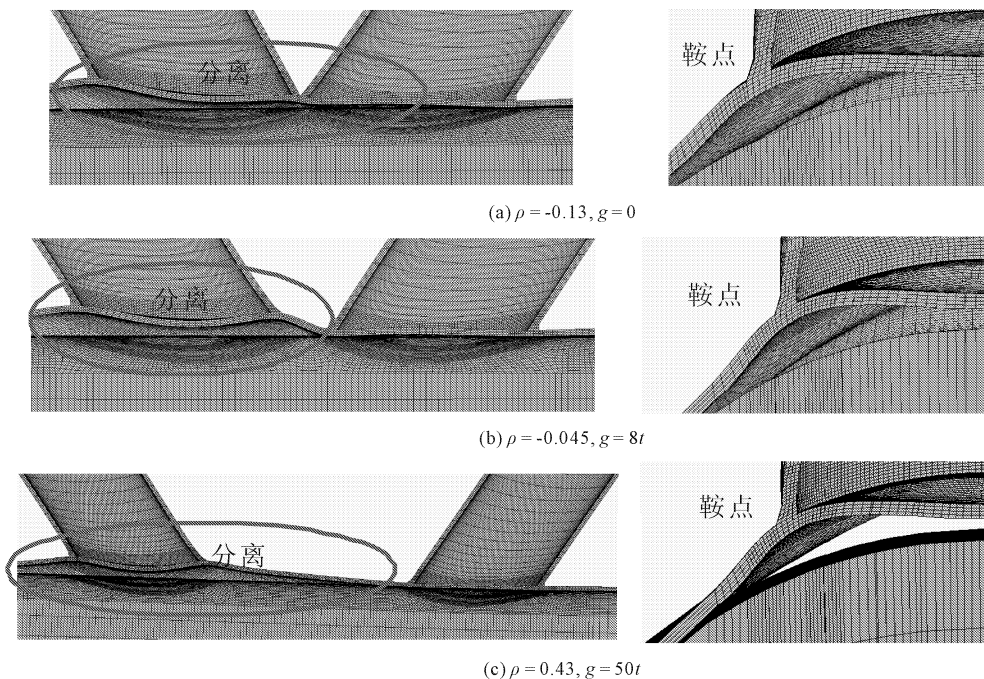


图 13 不同参数  $\rho$  下主管与混凝土之间的放大变形

表 4 几何参数对最大 SCF 的影响

支管参数	支管受拉		支管受压		
	SCF	斜率	SCF	斜率	
$\gamma$	20 → 40 (↗)	5.98 → 7.61 (↗)	0.08	5.64 → 4.63 (↘)	-0.05
$\tau$	0.4 → 1.0 (↗)	5.00 → 7.35 (↗)	3.92	2.11 → 4.91 (↗)	4.67
$\beta$	0.30 → 0.45 (↗)	8.56 → 7.29 (↘)	-8.47	3.62 → 6.10 (↗)	16.53
$\theta$	30° → 57° (↗)	3.14 → 7.35 (↗)	0.16	1.09 → 4.91 (↗)	0.14
$\rho$	-0.13 → -0.43 (↗)	5.62 → 7.57 (↗)	3.48	7.35 → 1.94 (↘)	-9.66

注:→表示从某一个值变为另一个值,↗表示增大,↘表示减小。

## 4 结 论

(1) 进行了钢管混凝土 K 型节点主管径厚比  $2\gamma$ 、主支管的壁厚比  $\tau$ 、管径比  $\beta$ 、夹角  $\theta$  和偏心率  $\rho$  参数分析,揭示其在轴向受力下几何参数对应力集中系数的影响。

(2) 钢管混凝土 K 型节点受拉支管周边相贯区域的最大 SCF 出现在鞍点,受压支管周边相贯区域的最大 SCF 出现在冠点。均远小于空钢管 K 型节点,尤其在受压支管周边。

(3) 本文所考虑的主支管的管径比 ( $\beta = d/D$ )、主管的径厚比 ( $2\gamma = D/T$ )、主支管的壁厚比 ( $\tau = t/T$ )、主支管之间的夹角 ( $\theta$ ) 和偏心率 ( $\rho = e/D$ ) 五个几何参数中,主管的管径比参数  $\beta$  对 SCF 的影响是最显著的,主管的径厚比参数  $2\gamma$  对 SCF 的影响是最小的。

## 参考文献:

- [1] 陈宝春,韦建刚,周俊,等.我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J].土木工程学报,2017,50(6):50-61.
- [2] 王吉忠,刘连鹏,叶浩.钢管-混凝土组合柱在我国的研究进展与展望[J].水利与建筑工程学报,2014,12(4):143-149.
- [3] 王占锋,翁光远,张松雷.某钢管混凝土拱桥拱肋拼装力学分析[J].水利与建筑工程学报,2012,10(5):33-36.
- [4] 公路钢结构桥梁设计规范:JTG/T D65-06-2015[S].北京:中国人民交通出版社,2015.
- [5] Wang Q, Nakamura S, Chen K M, et al. Fatigue evalua-

tion of k-joint in a half-through concrete-filled steel tubular trussed arch bridge in china by hot spot stress method [J]. Proceedings of Constructional Steel, Japanese Society of Steel Construction, 2016(24):633-640.

- [6] 吴庆雄,黄汉辉,陈康明,等.钢管 K 型节点足尺模型疲劳性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(5):157-167.
- [7] Tong L W, Sun C Q, Chen Y Y, et al. Experimental comparison in hot spot stress between CFCFS and CHS K-joints with gap [C]//Proceedings of 12th International Symposium on Tubular Structures, 2008:389-395.
- [8] Wang K, Tong L W, Zhu J, et al. Fatigue behavior of welded T-joints with a CHS brace and CFCFS chord under axial loading in the brace [J]. Journal of Bridge Engineering, 2011,18(2):142-152.
- [9] Chen J, Chen J, Jin W L. Experiment investigation of stress concentration factor of concrete-filled tubular T joints [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010,66(12):1510-1515.
- [10] 吴庆雄,黄汉辉,陈康明,等.钢管混凝土 K 型节点足尺模型疲劳性能试验[J].建筑结构学报,2020,41(10):80-89.
- [11] Liu Y J, Xiong Z H, Feng Y C, 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.
- [12] Liu Y J, Xiong Z H, Luo Y L, et al. Double-composite rectangular truss bridge and its joint analysis[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), 2015,2(4):9.
- [13] Zheng J, Nakamura S, Okumatsu T, et al. Validation of finite element model of concrete-filled steel tubular (CFST) T-joint for hot spot stress calculation [C]// Proceeding of Annual Conference of Japan Society of Civil Engineers, 2017.
- [14] Zheng J, Nakamura S, Ge Y J, 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.
- [15] Zhao X L, Herion S, Packer J A, et al. Design guide for circular and rectangular hollow section joints under fatigue loading[S]. CIDECT, TUV, 2000.