

K 型钢管混凝土节点疲劳性能试验研究

钟新谷, 杨 胜, 石卫华

(湖南科技大学, 湖南湘潭 411201)

[摘要] 以湘潭四大桥桁架拱为工程背景,进行了三种规格的 K 型钢管混凝土节点的疲劳试验,基于热点应力计算了 K 型钢管混凝土节点的疲劳荷载幅值,表明热点应力法能够较好地评估钢管混凝土节点的疲劳寿命;试验表明 K 型钢管混凝土节点的疲劳性能明显优于 K 型钢管节点。在此基础上初步提出了 K 型钢管混凝土节点的 S—N 曲线,对建立 K 型钢管混凝土节点疲劳寿命设计准则具有一定的参考意义。

[关键词] K 型钢管混凝土节点;疲劳性能; S—N 曲线

[中图分类号] TU392.3; TU312 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2011)09-0097-04

1 前言

我国是研究和应用钢管混凝土结构最多的国家,钢管混凝土结构在房屋、大型公共建筑中得到了大量应用。据不完全统计,目前跨径大于 200 m 的钢管混凝土拱桥有 33 座。钢管混凝土拱桥的主拱肋一般分为实体和桁式结构。实体拱肋构造相对简单,主要适用 120 m 以下的跨径,对于跨径大于 120 m 的钢管混凝土拱桥主拱肋一般为桁式结构,如石潭溪大桥、广西三岸邕江大桥、髻沙大桥、湘潭四大桥、茅草街大桥等;同时铁路桥梁中也采用钢管混凝土桁架拱^[1]。国内外学者对空心钢管桁架的 K 型及 N 型管节点的静力性能、疲劳性能都进行了深入研究,并取得了丰富的成果^[2~9]。随着钢管混凝土桁架拱桥梁在我国数量的日益增多,目前国内学者开始关注钢管混凝土节点的疲劳性能研究^[10],但系统的研究成果较少。特别是在疲劳寿命设计方面主要参考空心管节点的研究成果^[11],但钢管混凝土节点与空心管节点无论是静力性能还是疲劳特性都是有区别的。笔者等进行了 1 个 K 型空心管节点和 3 个 K 型钢管混凝土节点的疲劳性能试验,研究了 K 型钢管混凝土节点的疲劳性能。研究结果

可为相关研究和设计提供参考。

2 疲劳试验

2.1 试验模型设计

试验设计了 3 种规格共 4 个试件,其中试件 K1 为空心钢管焊接节点,试件 K2、K3、K4 为主管浇注混凝土、支管空心的钢管混凝土焊接节点。试验主要研究 K 型空心管节点及钢管混凝土节点在轴向荷载作用下相贯线焊缝周围的应力分布、热点处应力集中系数以及热点位置。试件由武汉桥机厂制作,制作工艺与湘潭四大桥钢管拱制作工艺相同,焊缝质量符合文献[11,12]的要求。试件设计参数详见表 1,制作完成后试件见图 1。

表 1 K 型钢管焊接节点试件尺寸
Table 1 Geometric parameters of K joints

试件编号	D/mm	T/mm	d/mm	t/mm	$\theta_1/$ (°)	$\theta_2/$ (°)	e/mm	g/mm
K1	219	114	6	4	45	45	0	58.8
K2	219	114	6	4	45	45	0	58.8
K3	219	114	6	4	50	65	4.4	12
K4	219	114	6	4	50	90	61.5	12.5

注: D、T 分别为主管外径和厚度; d、t 分别为支管的外径和厚度; e 为两支管交线到主管轴线的垂直距离(交点在主管下方为正,上方为负); g 为两支管之间的间距; θ_1 、 θ_2 为支管轴线与主管轴线的夹角

[收稿日期] 2009-12-02

[作者简介] 钟新谷(1962—),男,湖南宁乡县人,湖南科技大学教授,主要从事桥梁工程的教学与科研; E-mail: 464397070@qq.com



图1 平面K型钢管焊接节点试件
Fig.1 Configuration of a tubular K joints specimen

圆钢管采用 Q235B 钢;焊缝方法采用 E43 型焊条手工全焊透焊缝;主管内填充 C50 混凝土。

2.2 试验加载装置

试验采用在主管的轴向方向施加轴力,如图2所示,K型试件的两支管端部与型钢梁通过铰支座相连,模拟近似铰接的边界条件;型钢梁与反力架的钢柱用螺栓固定,形成自平衡加载系统。由液压千斤顶在主管端部施加轴向荷载。



图2 K型节点试验加载装置
Fig.2 Test loading device of K joints

2.3 管节点应力集中系数 SCF(几何热点应力方法)
疲劳试验前,进行静载试验,得到管节点的应力

集中系数沿焊缝周向分布和最大应力集中系数及位置^[13]。文献[13]通过试验和数值分析,得到了4个节点基于热点应力法的最大应力集中系数,如表2所示。可以看出,试验结果与数值分析吻合较好。

表2 管节点应力集中系数

Table 2 Stress concentrations factors of tubular K joints

节点编号	K1	K2	K3	K4
试验	4.01	1.274	1.615	1.92
有限元	4.121	1.515	1.721	2.402

2.4 疲劳幅值计算

疲劳试验采用常幅正弦波荷载,按照文献[9]、表2计算各试件节点的弹性承载力和极限承载力确定疲劳试验的常幅荷载幅值如表3所示,其中疲劳荷载均为作用于主管端部钢板的轴向荷载。

表3 管节点疲劳荷载情况

Table 3 Fatigue load list of K joints

节点	上限荷载/kN	下限荷载/kN	荷载幅值/kN	荷载设计频率/Hz
K1	95	45	50	3
K2	95	45	50	3
K3	75	25	50	3
K4	75	25	50	3

3 试验结果及分析

3.1 空心管节点

试件 K1 钢管节点在疲劳荷载为 400 万次时,主管和拉管焊缝处没有发现裂纹。根据表2的管节点应力集中系数,采用热点应力法计算出 K1 节点的疲劳应力幅^[14]。将试件节点焊缝分别看做角焊缝和对接焊缝时,按照文献[9]给出的 S—N 曲线计算出节点的疲劳寿命次数并与试件节点的试验疲劳荷载次数进行比较,如表4所示。

表4 K1节点疲劳寿命评估比较

Table 4 Comparison of fatigue life of specimen K1

项目名称	试验应力幅/MPa	疲劳试验次数/万次	按角焊缝计算寿命/万次	按对接焊缝计算寿命/万次	节点破坏情况
K1节点	104.97	408.98	36.69	746.55	没有开裂

实际钢管节点的主管和支管之间是对接焊接,根据文献[9]钢管焊接节点应该看做角焊缝计算。

由表4可知,按角焊缝计算试件 K1 节点的疲劳寿命过于保守,按照对接焊缝计算试件节点疲劳寿命

可能要比实际节点试件的疲劳寿命长,对于 K1 钢管节点的疲劳寿命实际评估计算应为介于角焊缝和对接焊缝之间。

3.2 钢管混凝土节点

试件 K2 钢管混凝土节点在疲劳次数为 610 万次时,主管和拉管焊缝处没有发现裂纹。试件 K3 钢管混凝土节点在疲劳次数为 240 万次时,同样没有发现裂纹。试件 K4 节点在疲劳次数为 36 万次

时,节点主管和拉管焊缝处开裂。裂缝沿相贯线处冠点位置开裂(起始),逐渐发展至鞍部区域。

应用表 2 列出的 K2、K3 和 K4 节点焊缝处的最大应力集中系数,计算出节点的疲劳应力幅。将试件节点焊缝分别看做角焊缝和对接焊缝,按照文献 [9] 给出的 S—N 曲线计算出节点的疲劳寿命次数并与试件节点的试验疲劳荷载次数进行比较,如表 5 所示。

表 5 K 型钢管混凝土节点疲劳寿命评估比较

Table 5 Comparison of fatigue life of concrete filled steel tubular K joints

项目名称	试验应力幅/MPa	疲劳试验次数/万次	按角焊缝计算寿命/万次	按对接焊接计算寿命/万次	节点破坏情况
K2 节点	36.133	610.25	869.098	50 510	没有开裂
K3 节点	66.186	240.46	141.414	4 486	没有开裂
K4 节点	146.873	36.55	12.941	185	开裂破坏

比较试件 K1 和 K2,由于钢管混凝土节点的应力集中系数较小,节点的疲劳寿命要大的多。按角焊缝计算,K1 节点的疲劳寿命最大只有 46 万次,K2 节点的疲劳寿命超过 800 万次。节点在弹性工作时,钢管混凝土节点的疲劳性能和疲劳寿命要优于钢管节点。K4 节点弹性静力试验计算得到的疲劳寿命次数要小于实际试件节点破坏时的疲劳荷载次数。基于试验的热点应力法评估钢管混凝土节点试件的疲劳寿命比较安全。

初步试验表明采用对接焊缝计算疲劳寿命次数要大于实际试件节点破坏时的疲劳荷载次数。对于 K 型钢管混凝土节点,基于试验的热点应力法来评估计算节点的疲劳寿命,将节点焊缝看做是角焊缝较为适合,如将节点焊缝看做对接焊缝评估,得到的疲劳寿命不安全,高估了节点的疲劳寿命。

4 K 型钢管混凝土节点的 S—N 曲线建议

前述对于 K 型钢管混凝土节点的疲劳寿命评估方法,一是将 K 型钢管混凝土节点焊缝视为角焊缝的热点应力法(试验和数值分析结果都适合);二是通过疲劳试验方式直接得到节点的疲劳寿命。采用基于几何热点应力法的管节点基本疲劳寿命设计曲线^[15]和将节点焊缝视为实际对接焊缝的热点应力评估法,均偏高评估了节点疲劳寿命。试件 K4 节点的疲劳荷载次数和应力幅作为计算 K 型钢管混凝土节点的 S—N 曲线其中一个点,K3 节点(焊

缝视为角焊缝时)基于试验的热点应力法评估节点的疲劳寿命所对应的试验应力幅值和计算疲劳寿命次数作为另外一个点。疲劳寿命 S—N 曲线为:

$$\lg N = \lg C - m \lg(\Delta \sigma) \quad (1)$$

式(1)中,N 为疲劳次数;m 为双对数坐标 S—N 曲线斜率; $\Delta \sigma$ 为几何热点应力幅。根据试验结果可知,K3 节点试验应力幅值和试验疲劳破坏时次数分别为: $\Delta \sigma = 66.186 \text{ MPa}$, $N = 141.414$ 万次;K4 节点试验应力幅值和试验疲劳破坏时次数分别为: $\Delta \sigma = 146.873 \text{ MPa}$, $N = 36.55$ 万次。得到基于热点应力法的 K 型钢管混凝土节点疲劳寿命评估 S—N 曲线公式为:

$$\lg N = 10.695 - 2.369 \lg \Delta \sigma \quad (2)$$

以疲劳寿命的对数为横坐标,几何热点应力幅的对数为纵坐标,可得 K 型钢管混凝土节点疲劳寿命 S—N 曲线如图 3 所示。

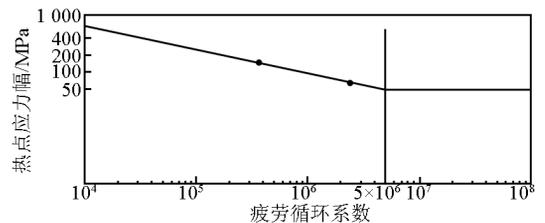


图 3 基于几何热点应力法的 K 型钢管混凝土节点疲劳曲线

Fig. 3 $\Delta \sigma$ —N curve of concrete filled steel tubular K joints based on the geometry hot spot stress method

5 结语

通过1个K型钢管节点和3个K型钢管混凝土节点的常幅疲劳试验研究,基于试验的热点应力法均能够较好地评估节点的疲劳寿命和疲劳强度。文献[9]规定的以角焊缝来评定钢管节点疲劳寿命的计算公式过于保守,对于K型钢管混凝土节点,热点应力法能够较好地评估节点的疲劳寿命和疲劳强度,K型钢管混凝土节点的疲劳性能明显优于K型钢管节点。文章提出的基于几何热点应力法的K型钢管混凝土节点S—N曲线及评估公式,需进一步进行大量的试验,评估其可靠性。笔者等所做的工作还是初步的,开展K型钢管混凝土节点的疲劳性能及相关参数优化对建立K型钢管混凝土节点疲劳寿命设计准则和钢管混凝土桁架具有重要意义。

参考文献

- [1] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 1 - 100.
- [2] Kim J R R, Anthony S H. Tests of X and K Joints in CHS stainless steel tubes[J]. *Journal of Structure Engineering*, 2001, 127(10): 1183 - 1189.
- [3] Jubran J S, Cofer W F. Finite element modeling of tubular joints - I: numerical results[J]. *Journal of Structural Engineering*, 1995,

- 121(3): 496 - 507.
- [4] Vegte G J. The static strength of uniplanar and multiplanar tubular T and X joints [D]. Delft: Delft University, 1995.
- [5] Design guide for hollow section structures[R]. CIDECT TUV Verlag, 1998.
- [6] International Standards Organisation. Petroleum and Natural Gas Structures - Part 2: Fixed Steel Structures[M]. Committee Draft, 1995.
- [7] 范文理. 管结构节点疲劳设计[C]//中国公路学会桥梁和结构工程学会2001年桥梁学术讨论会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [8] 武振宇, 张耀春. 直接焊接钢管节点静力工作性能的研究现状[J]. *哈尔滨建筑大学学报*, 1996, 29(6): 102 - 109.
- [9] 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [10] 艾智能. 钢管混凝土拱桥节点疲劳寿命研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
- [11] 钢结构工程施工质量验收规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- [12] 建筑钢结构焊接技术规程[S]. 北京: 中国计划出版社, 2001.
- [13] 杨 胜. 钢管混凝土拱桥桁架局部应力及疲劳性能研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2009.
- [14] International Institute of Welding(IIW). Recommended Fatigue Design Procedure for Hollow Section Joints—Part I: Hot Spot Stress Method for Nodal Joints[M]. Strasbourg: International Institute of Welding, 1985.
- [15] 沃登尼尔. 钢管截面的结构应用[M]. 上海: 同济大学出版社, 2004.

Experiment study on fatigue property of concrete filled steel pipe K joints

Zhong Xingu, Yang Sheng, Shi Weihua

(Hunan University of Science and Technology, Xiangtan, Hunan 411201, China)

[Abstract] Based on the truss arch of Xiangtan 4th Bridge, we made fatigue property test on concrete filled steel pipe K joints of three different specifications, and calculated the amplitude of fatigue load of concrete filled steel pipe K joints with hot spot stress approach in this paper, which presented that hot spot stress approach can be used to assess fatigue life of concrete filled steel pipe, and fatigue property of concrete filled steel pipe K joints was obviously better than that of steel pipe K joints. Moreover, the S—N curve of concrete filled steel pipe K joints proposed by this paper would be of referential significance for building design criterion of fatigue life of concrete filled steel pipe K joints.

[Key words] concrete filled steel pipe K joints; fatigue property; S—N curve