

文章编号:1671-6833(2021)02-0007-06

KK形圆钢管相贯节点平面外受弯抗震性能研究

赵必大, 蔡扬政, 姚泽阳

(浙江工业大学 土木工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:为了研究KK形圆钢管相贯节点的平面外受弯抗震性能,对KK形节点进行平面外往复弯矩加载试验,并将KK形节点的试验结果与已有钢管相同的X形节点的试验结果进行对比分析,考察2类节点的平面外受弯性能的差异。试验结果表明:KK形圆钢管节点的破坏模式为主管管壁塑性开裂,开裂后承载力下降缓慢,节点主要依靠主管管壁塑性发展和开裂后的裂纹扩散来耗能,节点的延性系数超过6,表现出良好的抗震性能和变形能力。而由于相邻支管相互作用,KK形节点在一根支管处的平面外抗弯承载力比相应的X形节点低了约23%,接近EC3规范关于X形节点平面外抗弯承载力公式计算值。此外,通过受力机理分析和有限元分析发现,在平面外弯矩作用下,KK形节点的核心区的受力方式为4角承受拉力作用,而X形节点的核心区则为2个对角方向拉力作用,KK形节点的塑性发展比X形节点更加均匀,且覆盖面更广。2个节点的试验结果对比也表明,KK形节点的耗能能力、变形能力以及延性均比X形节点更强。

关键词:KK形圆钢管相贯节点;X形圆钢管相贯节点;平面外受弯抗震性能;延性;耗能

中图分类号: TU528.1

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2021.02.012

0 引言

圆钢管相贯节点是大跨单层网壳钢管结构中常用的节点形式,比如上海光源工程的屋盖结构^[1]、成都双流国际机场航站楼屋盖结构^[2]均采用这种节点形式。支管直接焊接到主管表面的构造特点,使得圆钢管相贯节点的承载力往往低于相邻杆件(支管)。对采用圆钢管相贯节点的大跨扁平单层网壳结构进行抗震设计时,圆钢管相贯节点的平面外往复运动能够在节点破坏和耗能过程中起到关键作用,故需要研究节点的平面外受弯抗震性能。

国内外关于圆钢管相贯节点抗震性能的研究多为管桁架节点(往复支管轴力和平面内弯矩)。Kurobane^[3]对支管轴向往复荷载作用下K形节点的滞回性能进行研究;Qin等^[4]对搭接支管轴向往复力作用下的N形圆钢管全搭接节点的滞回性能进行了研究;陈以一等^[5]对承受轴力作用的空间KK形圆钢管节点滞回性能进行了研究;Wang等^[6]对T形圆钢管相贯节点的轴向和平面

内受弯滞回性能进行了研究;Zhao等^[7]对K形搭接节点进行了轴向滞回性能的研究。近年来,圆钢管相贯节点平面外受弯抗震性能也受到关注。孟宪德等^[8]对X形厚壁圆钢管相贯节点的平面外受弯抗震性能进行了研究;陈以一等^[9]对不同荷载工况作用下平面KK形圆钢管相贯节点平面外受弯滞回性能进行了研究;赵必大等^[10]研究了支主管夹角对X形圆钢管相贯节点平面外受弯性能的影响;孟宪德等^[11]和Zhao等^[12-13]则从构建X形圆钢管节点平面外受弯滞回模型的角度进行了研究。

对比X形节点,平面KK形圆钢管相贯节点的主管每侧有2根支管,即使是间隙型平面KK形节点也存在相邻2根支管相互作用的效应,目前鲜见关于这种相互作用对圆钢管相贯节点抗震性能影响的研究。本文在X形圆钢管相贯节点平面外受弯抗震性能研究的基础上^[10],进行圆钢管的几何尺寸和材质都相同的间隙型平面KK形圆钢管相贯节点(如无另外说明,本文的KK节点都指间隙型平面KK形节点)平面外受弯抗震性

收稿日期:2020-09-15;修订日期:2020-11-23

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(LY20E080020),浙江省教育厅科研项目(Y201330024)

作者简介:赵必大(1976—),男,浙江瑞安人,浙江工业大学讲师,博士,主要从事钢结构与组合结构、结构抗震的研究,E-mail: zhaobida@126.com。

能试验,对比分析 2 类节点(X 形和 KK 形)的性能,考察相邻支管相互作用对圆钢管相贯节点平面外受弯性能的影响。

1 试验

1.1 试件设计

本文设计了 1 个平面 KK 形圆钢管相贯节点试件 KKOH,如图 1 所示。根据有限元分析结果,当试件主管和支管长度分别大于各自直径的 7 倍时,边界条件对节点性能的影响可以忽略不计。因此,试件的主管和支管的长度分别设计为 1 800、1 258 mm,以避免试件边界约束条件对节点性能的影响。试件的其他几何参数见表 1。试件采用 Q345 钢,试验前进行了材性试验,结果见表 2。支管与主管之间采用部分坡口熔透焊接与角焊缝组合连接,形式和尺寸均符合 GB 50661—2011《钢结构焊接规范》^[14]的要求。为了便于对比分析,KKOH 的支管和主管的几何尺寸、材料性质同文献[10]中的 X 形节点圆钢管试件 XOH-1 (即图 1 去除支管 3、4)。

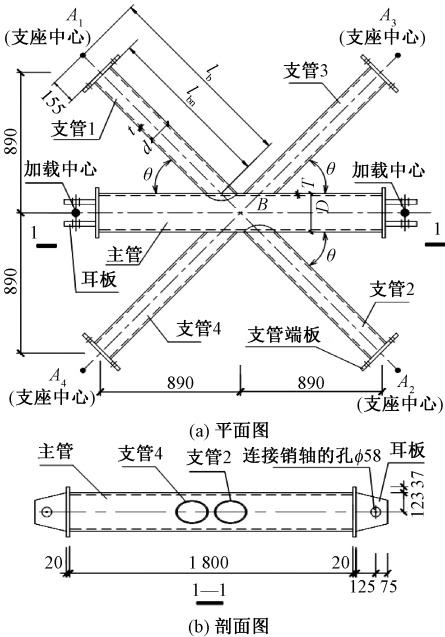


图 1 KKOH 简图 (mm)
Figure 1 KKOH diagram (mm)

表 1 KKOH 的几何参数
Table 1 Size of KKOH

试件	D/mm	T/mm	d/mm	t/mm	β	γ	τ	$\theta/(^{\circ})$
KKOH	245	8	146	6	0.60	15.31	0.75	45

注:D 和 T 为主管外径和壁厚;d 和 t 为支管外径和壁厚; $\beta=d/D$; $\gamma=D/2T$; $\tau=t/T$; θ 为支管和主管间的夹角。

1.2 加载装置和测点布置

试验加载装置采用文献[10]中关于 X 形节

表 2 圆钢管材料材性(平均值)
Table 2 Measured material properties (average value)

截面/mm ²	f_y /MPa	f_u /MPa	δ /%	$E/10^5$ MPa
245×8	375	545	32.7	2.09
146×6	373	558	30.8	2.16

注:E 为弹性模量; δ 为延伸率; f_y 为屈服强度; f_u 为极限强度。

点的加载装置:支管端部通过销轴连接于底座,底座固定在底部箱型梁(反力梁)上,试件的主管水平放置,且两端与固定在顶部反力梁的伺服仪连接,采用主管两端的伺服仪同步推拉的加载方式实现主管相对支管的平面外往复运动,模拟节点承受平面外往复弯矩作用。为了便于对比,试件 KKOH 采用与试件 XOH-1^[10]相同的加载制度,即前 3 周加载端位移幅值依次为 ± 7 、 ± 14 、 ± 22 mm,然后每一级的位移幅值在上一级的基础上增加 3 mm,直至试件破坏。其中 22 mm 为有限元计算所得 XOH-1 节点屈服时的加载端位移值。试验加载装置、加载制度见图 2。

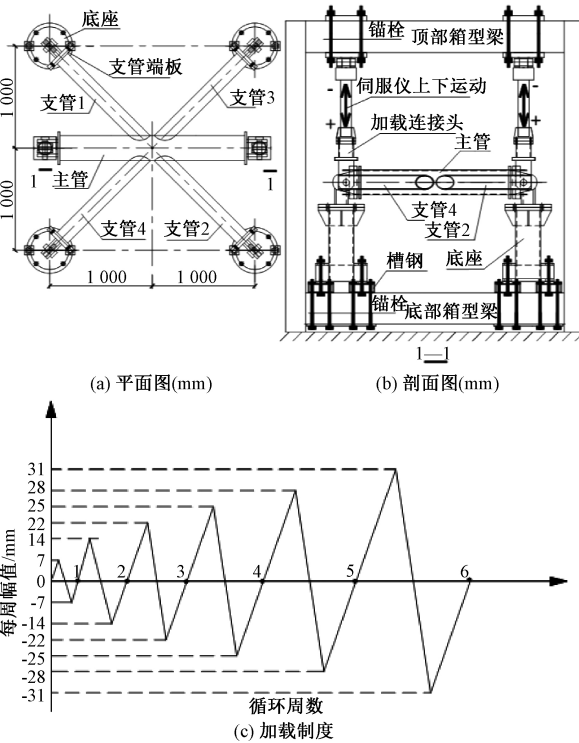


图 2 KKOH 加载装置和加载制度
Figure 2 Loading device and loading system of KKOH

为了获得支管相对主管的变形、节点转角、以及节点域应力分布等,进行了如图 3 所示的位移计和应变片布置。图中位移计 D1~D4 用来测试支管端(支座处)的竖向位移;D5 和 D6 用来测试主管跨中的竖向位移,并监控主管是否产生扭转;D7 和 D8 用来测试主管端的竖向位移,并与 D9

和 D10 测得的加载端位移相互校验。应变片测点方面,三向片 T1~T8 用来测试相贯线附近主管上下表面的应变;单向片 S1~S12 用来测试支管或主管在该处截面的弯矩,以监控主管端的实际加载情况,观察支管端部的支座反力是否相同;S13~S20 用来测量支管根部的应变。

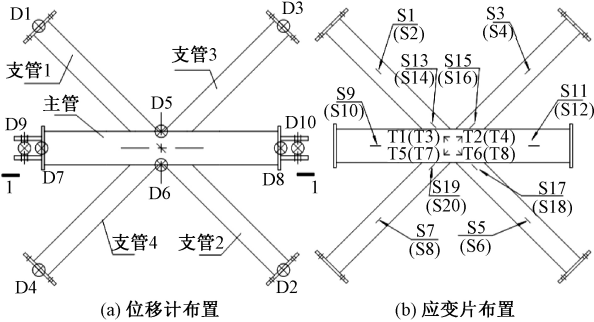


图 3 KKO 的位移计与应变片布置
Figure 3 Location of strain gauges and displacement sensors of KKO

2 结果分析

2.1 试验现象与破坏模式

试件 KKO 在主管两端同步推、拉加载过程中,在第 3 级加载($\pm 22\text{ mm}$)时,节点域应变测点首次出现屈服,加载端伺服仪的荷载在 $\pm 55\text{ mm}$ 加载过程中达到最大值,随即节点域主管上表面管壁开始出现肉眼可见的裂缝。此后,加载端的荷载逐渐下降,裂纹不断扩大, $\pm 91\text{ mm}$ 加载级时,最大的裂纹长度约为 330 mm ,节点承载力下降了约 $1/4$ 。节点的破坏模式可认为相贯线附近主管管壁塑性开裂(与 XOH-1^[10]类似),如图 4 所示。

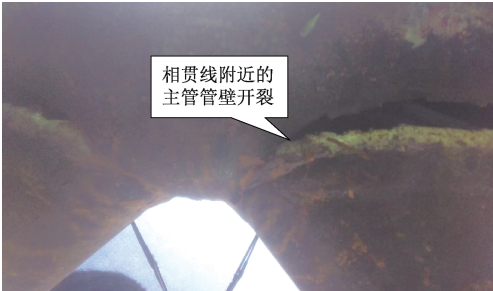


图 4 节点破坏模式
Figure 4 Failure modes after test

2.2 滞回曲线

根据荷载和位移换算得到试件 KKO 的平面外弯矩-转角($M_o-\psi_o$)滞回曲线。其中,节点弯矩取支管根部鞍点处的弯矩 $M_o=Pl_b$, P 为等效支管端荷载。根据对称性和力平衡原理取为伺服仪荷载 F 的一半(试验中测点 S1~S8 的应变测值相

近,证实了 4 根支管端支座反力的大小相等), l_b 为支座中心至鞍点的距离(见图 1)。节点转角 $\psi_o=(\delta-\delta_b)/l_{bn}$, δ 为支管端相对于主管中心的位移,由支主管相交中心的位移(取位移计 D5 和 D6 的平均值)扣除支管端位移得到; δ_b 为支管作为杆件的弯曲变形(根据弹性梁理论计算); l_{bn} 为支管净长度(见图 1)。最终得到节点的 $M_o-\psi_o$ 滞回曲线,见图 5。鉴于 4 根支管的 $M_o-\psi_o$ 曲线几乎相同,为节省篇幅,图 5 仅给出支管 1 的曲线,图中同时给出了支管截面边缘屈服弯矩理论值 $M_{by}=33.2\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

由图 5 可知,节点平面外抗弯承载力极值为 $26.6\text{ kN}\cdot\text{m}$ (约 $0.8M_{by}$),说明试验过程中支管基本处于弹性受力状态,用弹性梁理论计算支管弯曲变形 δ_b 是合理的;也说明节点主要依靠相贯线附近主管管壁的塑性变形及开裂后的裂纹扩展来耗能。节点的滞回曲线饱满,开裂后承载力下降缓慢,表现出良好的抗震性能。

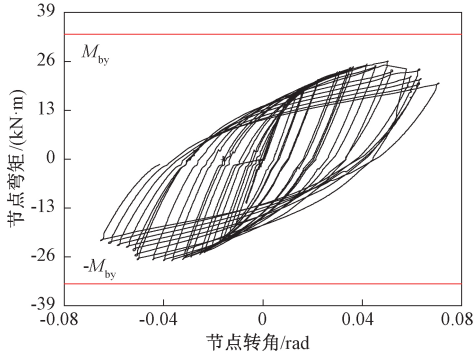


图 5 KKO 节点的平面外弯矩-转角($M_o-\psi_o$)滞回曲线
Figure 5 Moment-rotation ($M_o-\psi_o$) hysteretic curves of KKO

图 6 给出了试件 KKO 相贯线附近的支管、主管管壁的应变随着支管端相对荷载 P/P_y ($P_y=M_{by}/l_b$ 为支管根部截面边缘屈服荷载理论值)的变化图,用来考察节点域应变强度变化,分析平面外弯矩作用下节点域的塑性发展。限于篇幅,仅给出支管 1 根部的相贯线附近测点(T1、T3、S13、S14)的应变-荷载曲线,图 6 中 ε_y 为按材料性试验得出的屈服应变。其中三向片换算成应变强度 ε_i ,表达式为:

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} \quad (1)$$

式中: ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为第一至第三主应变。对于平面应变情况, ε_2 为 0, ε_1 、 ε_3 由直角应变计算得出。

由图 6 可知,KKO 节点在接近破坏时,支管根部基本上处于弹性,但靠近支管根部主管管壁有

明显的塑性发展,说明节点主要依靠相贯线附近主管管壁的塑性变形以及开裂后的裂纹扩展来耗能。

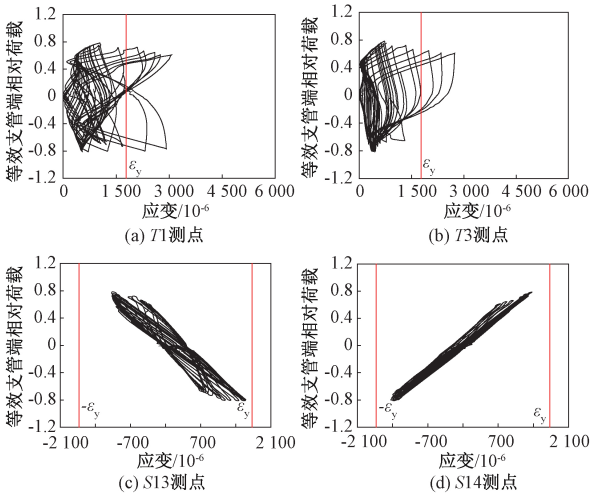


图 6 等效相对荷载-应变强度滞回曲线
Figure 6 Equivalent load-strain hysteretic curves

2.3 延性

根据图 5 的滞回曲线得到节点的弯矩-转角骨架曲线,用来分析节点的延性,列于表 3。其中,延性系数 $\mu_u = \psi_u / \psi_y$ 。屈服转角 ψ_y 按文献[15]的方法确定:在骨架曲线图中做出斜率为 0.779 倍节点初始刚度的直线,与骨架曲线相交,交点的横坐标即为 ψ_y 。极限转角 ψ_u 取骨架曲线[15]中抗弯承载力极限下降 20%后弯矩对应的转角。由表 3 可知,KKOH 的极限转角超过 0.06,延性系数超过 6,表现出很好的变形能力和延性。

表 3 节点延性分析 Table 3 Ductility ratio of the specimen						
支管	ψ_{y+}/rad	ψ_{y-}/rad	ψ_{u+}/rad	ψ_{u-}/rad	μ_{u+}	μ_{u-}
1	0.009 7	0.009 5	0.067	0.064	6.92	6.73
2	0.009 4	0.010 0	0.067	0.066	7.12	6.58
3	0.010 0	0.010 0	0.069	0.064	6.91	6.42
4	0.009 5	0.009 8	0.067	0.065	7.05	6.64

注:下标+、-分别表示伺服仪向下、向上运动时的相关量。

3 KK 形节点与 X 形节点的对比

3.1 耗能能力对比

图 7 给出了 KK 形节点试件 KKOH 和 X 形节点试件 XOH-1^[10](二者圆钢管尺寸和材料均相同)的支管端等效弯矩-相对位移($P-\delta$)滞回曲线对比。根据图 7 各个加载级所得 $P-\delta$ 曲线包络面积的总和,取峰值荷载下降 20%的那一级作为最后一个加载级,可计算得到每根支管根部相贯线

附近节点域的累计耗能。计算得到的 KKOH 的累计耗能(21 439 kN·mm)略大于 XOH-1(20 357 kN·mm)。前者承载力明显低于后者,这是因为前者在管壁开裂后承载力下降明显比后者缓慢(开裂后的耗能更多)。考虑到 KKOH 是 4 根支管参与耗能,而 XOH-1 仅 2 根支管参与耗能,故 KKOH 的总耗能明显大于 XOH-1。说明相邻支管相互作用虽然使得节点承载力降低,但开裂后强度退化更加缓慢,从而提高了抗震性能和耗能能力。

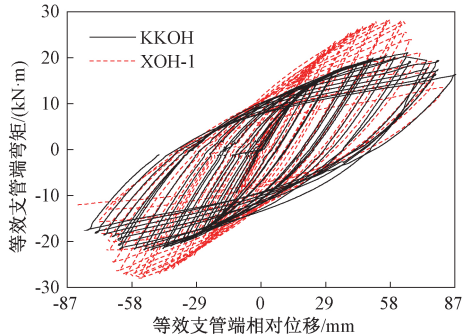


图 7 等效支管弯矩-相对位移滞回曲线对比
Figure 7 Equivalent moment-displacement hysteretic curves between specimens KKOH and XOH-1

3.2 延性和承载力对比

根据 2.3 节的方法计算得到 XOH-1^[10]的延性系数(取 2 根支管的平均值) $\mu_u = \psi_u / \psi_y = 0.053 0 / 0.009 5 = 5.578 9$,明显小于 KKOH 的延性系数(平均值为 6.810 0),这是因为 KKOH 的极限转角(0.066)明显大于 XOH-1 的极限转角,说明相邻支管相互作用的节点的延性性能和变形能力更强。

试件 KKOH(KK 形节点)的抗弯承载力实测值为 26.6 kN·m,明显小于 XOH-1(X 形节点)的实测值 34.5 kN·m^[10],但接近按照 EC3 规范^[16]计算的 X 形节点的平面外受弯承载力计算值 25.9 kN·m,大于按照《钢管结构技术规程》^[17]计算的 X 形节点的平面外受弯承载力计算值 17.4 kN·m。这说明相邻支管相互作用会降低圆钢管相贯节点的平面外抗弯承载力,但这种相互作用带来的不利影响被现行规范计算式的保守估计抵消(当 θ 较小时,规范用 $1/\sin \theta$ 项反映 θ 对节点平面外抗弯承载力的影响是偏保守的^[10])。故 EC3 规范^[16]的 X 形节点承载力计算公式低估了 XOH-1 的实际承载力,但却较好地预测了 KKOH 的实际承载力。从试验结果看,《钢管结构技术规程》^[17]没有关于 KK 形节点抗弯承载力计算式,但可用其关于 X 形节点抗弯承载力计算式(明显偏保守)来预测或估计 KK 形节点的承

载力。

3.3 受力机理对比

无论是 KK 形节点还是 X 形节点,平面外弯矩均可简化为支管根部上下鞍点的一对力偶 F ,同时沿着对称面将节点分成上下两部分,取承受拉力作用的上半部分,得到如图 8 所示的 KK 形和 X 形节点在平面外弯矩作用下的受力机理分析。由图 8 可知, KK 形节点在节点域核心区(ABCD 区)承受 4 角($A_1 \sim A_4$)向外拉力作用,而 X 形节点的核心区则承受对角 A_1A_2 方向拉力作用(形成拉力带)。拉力带的受力特点为节点域的屈服和塑性发展集中在 2 个对角鞍点及鞍点之间的拉力带上,而 4 角受力的特点为节点域的屈服和塑性发展更加均匀地分布在核心区上。因此, KK 形节点的耗能模式和耗能能力更好。

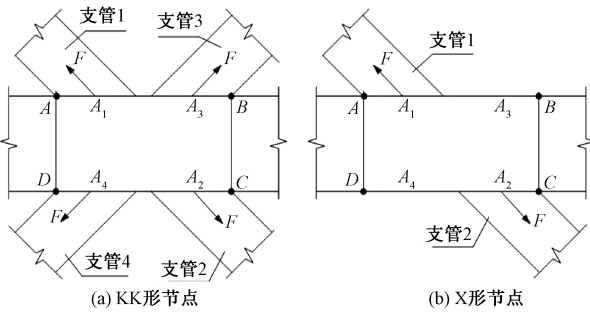


图 8 KK 形节点和 X 形节点的受力机理分析对比
Figure 8 Comparison of load carrying mechanism between KK-joints and X-joints

图 9 给出了长为 900 mm、两端固定约束的半圆筒壳体有限元模型(模拟主管上半表面)在相同荷载 F 作用下(按图 8 受力模式)的应力云图,有限元模型采用 S4R 单元,网格尺寸为壳厚度,材料本构关系采用双线性强化模型(弹性模量和屈服强度与表 2 中的主管材料相同)。图 9 中的灰色和红色分别为屈服区和高应力区,有限元结果验证了前面的定性分析结论。

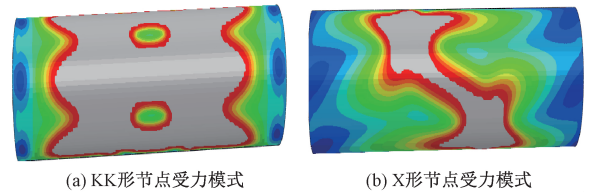


图 9 KK 形节点和 X 形节点受力模式的应力云图对比
Figure 9 Comparison of stress distribution between KK-joints and X-joints

另外, KK 形节点在鞍点 A_1 附近除了因支管 1 传来的荷载而产生的变形和应变,还因相邻支管 3 的荷载作用而产生额外的变形和应变,故 KK

节点在鞍点 A_1 附近比 X 形节点更早进入屈服。这种相邻支管带来的额外应变,也使得屈服后 KK 形节点的塑性发展也比 X 形节点更快(支管根部荷载增量相同时),故 KK 形节点的屈服荷载 F_y 以及极限荷载 F_u 均小于 X 形节点。但 KK 形节点有 4 根支管承担外荷载,而 X 形节点仅 2 根支管承担,相邻支管产生的额外应变(应力)通常小于本支管自己产生的,故 KK 形节点承载总外荷载反而比 X 形节点更大,比如试件 KKOH 和 XOH-1 承受的最大总外荷载(2 台伺服仪最大值之和)分别为 87.1 kN 和 56.2 kN。

4 结论

(1) KK 形节点试件的破坏模式为相贯线附近的主管壁塑性开裂破坏,节点承载力在管壁开裂后缓慢下降,表现出良好的抗震性能。整个试验过程中,支管处于弹性受力状态,节点主要通过主管管壁塑性发展和裂纹扩展(开裂后)来耗能。

(2) 在平面外弯矩作用下, KK 形节点的每一根支管根部的连接承载力明显低于相同钢管的 X 形节点,但 KK 形节点有 4 根支管承担外荷载,而 X 形节点仅有 2 根支管承担外荷载,故在工程实际结构中 KK 形节点能承受比 X 形节点更大的总外荷载。

(3) 有限元分析结果表明,对比 X 形节点的塑性发展集中在 2 根支管根部鞍点及其之间的拉力带上,钢管相同的 KK 形节点在节点域核心区的塑性发展更均匀和广泛,故表现出更好的延性、耗能模式、耗能能力。

(4) KK 形节点的平面外抗弯承载力明显低于相同钢管的 X 形节点,但这个不利影响被现行规范 EC3 关于支、主管夹角 θ 较小时 X 形节点承载力的保守估计所抵消,故规范 EC3 的 X 形节点承载力计算公式能较好地预测支主管直径比和夹角均相对较小的 KKOH 节点试件的实际抗弯承载力。但关于 X 形节点承载力公式是否适用于计算 KK 形节点以及使用范围,需要更多试验数据和进一步研究确定。

参考文献:

[1] 王伟,陈以一,杜纯领,等.上海光源工程屋盖钢管节点平面外受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2009,30(1):75-81.
[2] 李常虹,陈志强,肖克艰,等.成都双流国际机场 T2 航站楼钢结构屋盖相贯节点极限承载力分析[J].

- 建筑结构, 2010, 40(9): 20-22, 26.
- [3] KUROBANE Y. Static behaviour and earthquake resistant design of welded tubular structures[J]. CISM international centre for mechanical sciences, 1998, 394(1): 53-116.
- [4] QIN F, FUNG T C, SOH C K. Hysteretic behavior of completely overlap tubular joints[J]. Journal of constructional steel research, 2001, 57(7): 811-829.
- [5] 陈以一, 沈祖炎, 翟红, 等. 圆钢管相贯节点滞回特性的实验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 57-62.
- [6] WANG W, CHEN Y Y. Hysteretic behaviour of tubular joints under cyclic loading[J]. Journal of constructional steel research, 2007, 63(10): 1384-1395.
- [7] ZHAO X Z, LIU J T, XU X B, et al. Hysteretic behaviour of overlapped tubular k-joints under cyclic loading[J]. Journal of constructional steel research, 2018, 145: 397-413.
- [8] 孟宪德, 王伟, 陈以一, 等. X 型厚壁圆管相贯节点平面外受弯抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(5): 126-131.
- [9] 陈以一, 赵必大, 王伟, 等. 平面 KK 型圆钢管相贯节点平面外受弯性能研究[J]. 土木工程学报, 2010, 43(11): 8-16.
- [10] 赵必大, 蔡扬政, 王伟. 支主管夹角对 X 形圆钢管节点平面外受弯性能影响[J]. 工程力学, 2019, 36(7): 99-108.
- [11] 孟宪德, 陈以一, 王伟. X 形圆钢管相贯节点平面外受弯滞回模型研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(8): 8-14.
- [12] ZHAO B D, CHEN Y Y. A smart multi-spring assembling model for simulation of hysteretic behavior of unstiffened CHS X-joint[C]//14th International Symposium on Tubular Structures. Boca Raton: CRC Press, 2012: 549-556.
- [13] ZHAO B D, SUN C, CAI Y Z, et al. An out-of-plane bending hysteretic model for multi-planar CHS X-connections[J]. Structures, 2020, 23: 335-350.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构焊接规范: GB 50661—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [15] KUROBANE Y, MAKINO Y, OCHI K. Ultimate resistance of unstiffened tubular joints[J]. Journal of structural engineering, 1984, 110(2): 385-400.
- [16] Eurocode 3: Design of steel structures, part 1.8: Design of joints; BS EN 1993-1-8-2005[S]. Brussels: European Committee for standardization, 2005.
- [17] 中国工程建设标准化协会. 钢管结构技术规程: CECS 280—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.

Study on Seismic Behavior of Unstiffened Circular Hollow Section KK-joints under Out-of-plane Bending

ZHAO Bida, CAI Yangzheng, YAO Zeyang

(College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: To study the out-of-plane bending seismic behavior of Unstiffened circular hollow section (CHS) KK-joints, an out-of-plane bending cyclic loading test was performed. Moreover, the test results of the KK-joints were compared with the existing test results of the corresponding X-joints (with same tubular dimension and material of the KK-joints), to investigate the seismic performance difference between the KK-joints and the X-joints. Additionally, the performance difference was further interpreted by the load-carrying mechanism analysis. The results showed that the failure mode of the KK-joints was chord wall crack after plasticizing, and the resistance decreases slowly after cracking. The energy dissipated of the KK-joints mainly relied on plastic deformation and crack propagation of the chord wall. The ductility ratio of the KK-joints was large than 6, which demonstrated excellent deformability and seismic behavior. It also found that the stress characteristics of the adjacent brace interaction made the out-of-plane flexural strength of KK-joints about 23% lower than that of the corresponding X-joints, but close to the value calculated by the predict equation of CHS X-joints of the EC3 specification. Moreover, the results of load-carrying mechanism analysis and FE analysis showed that the joint-zone of the KK-joints and the X-joints were subjected to tension in the four corners and in two diagonal directions respectively. Therefore, the KK-joints would develop more uniform and extensive plastic at joint-zone than that of X-joints. The comparison of test results between the two type joints also showed that the deformability, ductility, and energy dissipation of the KK-joints were also better than that of the corresponding X-joints.

Key words: unstiffened circular hollow section (CHS) KK-joints; unstiffened CHS X-joints; out-of-plane flexural seismic behavior; ductility; energy dissipation