

DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.0238

覆板和加劲板加强的 Q460C 方钢管 X 型节点试验

范余哲, 初汉增*, 王万祯, 黄益洲

(宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 对覆板加强主管和支主管间设置加劲板的 Q460C 方钢管 X 型节点与常规节点进行了主管轴压静力加载试验, 考察了覆板和加劲板对 X 型节点受力性能的影响, 获得了节点的破坏模式、荷载—位移曲线、极限承载力、极限位移、刚度、延性、节点区应变分布演化等力学性能参数。试验结果显示: 覆板和加劲板加强的 Q460C 方钢管 X 型节点的主要破坏模式为上支管根部附近覆板上半区向外鼓曲, 下半区向内凹陷; 覆板和主管连接处上半区焊缝开裂, 覆板脱落; 与上支管相连的加劲板根部焊缝开裂, 上支管和覆板凸起; 下支管根部的覆板和支管壁凹陷。覆板和加劲板构造明显提高了 Q460C 方钢管 X 型节点的承载力、变形能力、延性和刚度, 加强节点的极限承载力、极限变形和延性较常规节点分别提高 51.9%~105.3%、19.3%~38.2%和 0~34.7%。

关键词: Q460C 方钢管; X 型节点; 覆板; 加劲板; 试验; 承载力

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2023) 05-0058-11

高强方钢管桁架具有质量轻、外形美观、传力明确、承载力高、力学性能和抗震性能好、便于加工和施工等优点, 在土木工程中应用前景广阔。

节点是桁架结构的关键部位, 直接影响桁架结构安全。桁架节点形式主要有 Y 型、K 型、N 型和 X 型等。与 Y、K、N 型节点相比, X 型节点构造简单、受力明确, 受到关注和研究。

周春波^[1]、Zhao 等^[2]、常鸿飞等^[3]、刘帅鹏^[4]对方钢管混凝土 X 型节点进行了数值分析和试验, 结果表明, 破坏位置随支主管宽度比不同而变化, 槽型套管加强可有效保护主管, 节点失效模式由主管或焊缝破坏转移为支管破坏。王峰等^[5]、Zhao 等^[6]、Gao 等^[7]对钢管混凝土 X 型节点进行的轴压荷载作用下的非线性分析和压弯构件承载力试验结果显示, 相贯角度、宽厚比、混凝土强度对承载力影响较大, 竖向连接板的厚度、衬板厚度对承载力影响较小。黎冠楠^[8]对方钢管混凝土压弯构件承载力可靠性和灵敏度进行了数值分析, 发现局部灵敏度中, 对功能函数影响最大的是钢管横截面

边长和压弯构件计算模式的不定性。侯蓓蓓^[9]、尹青青^[10]对方钢管混凝土轴压承载力进行了数值分析, 结果显示, 钢材的屈服强度、混凝土的抗压强度以及含钢率对方形钢管混凝土柱承载力有显著影响。刘艳等^[11]、Zhao 等^[12]、江锐等^[13]进行的方钢管 X 型节点平面内抗弯性能试验表明, 设置内隔板可显著提升 X 型节点的平面内抗弯能力, 加劲 X 型节点的支管转动受到明显的抑制, 节点的抗弯能力得到显著提高。倪威康等^[14]对变截面方钢管轻骨料混凝土边柱—钢箱梁隔板贯通节点的试验显示, 节点连接区焊缝多发生断裂问题, 降低了节点承载力和延性。

目前覆板与加劲板加强 X 型钢管节点受静力荷载性能的影响因素作用规律尚不清晰, 本文研制了覆板加强主管和支主管间设置加劲板的 Q460C 方钢管 X 型节点构造, 进行主管轴压静力加载试验, 考察覆板和加劲板对 X 型节点极限承载力和变形等受力性能的影响, 获得该类节点的破坏模式、荷载—位移曲线、节点区应变分布等

收稿日期: 2023-02-23.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省基础公益技术研究的计划 (LGF18E080007)。

第一作者: 范余哲 (1998—), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 钢结构和组合结构。E-mail: fanyuzhe123@qq.com

*通信作者: 初汉增 (1979—), 男, 山东莱芜人, 讲师, 主要研究方向: 钢结构。E-mail: chuhanzeng@nbu.edu.cn

力学性能参数, 为其工程应用提供试验依据。

1 Q460C 方钢管 X 型节点设计

参照《钢管结构设计标准》^[15], 试验共设计 1 个 Q460C 方钢管 X 型常规节点试件 X0 和 3 个覆板加强主管与支柱间设置加劲板的 X 型节点试件 X1~X3, 分别如图 1 和图 2 所示。

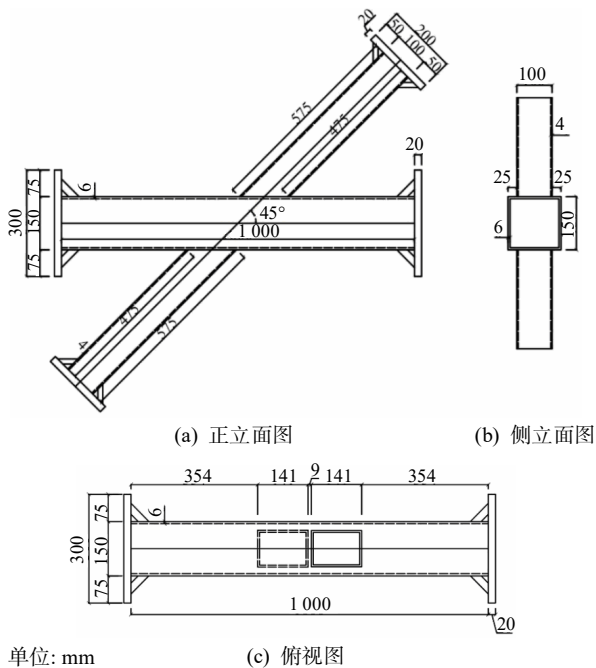


图 1 常规节点试件 X0 的细部构造

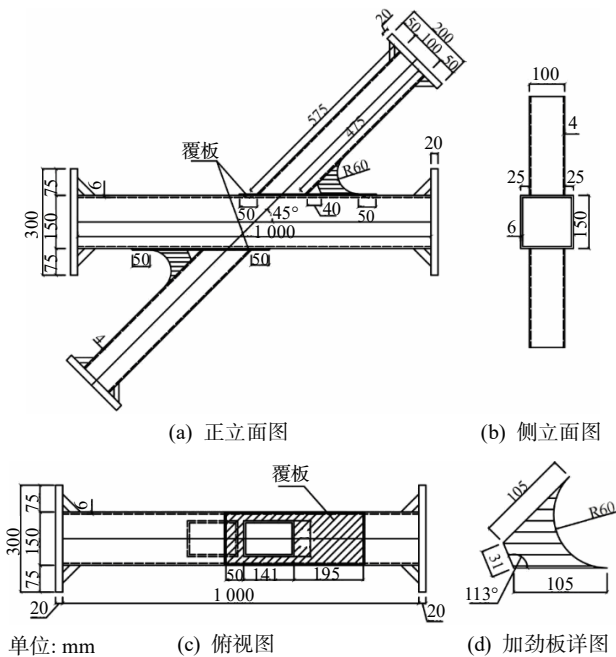


图 2 加强节点试件 X1~X3 的细部构造

具体构造为: 2 根规格相同的无缝矩形支管沿 45°反对称焊接于方形主管上, 主、支管截面分别为 150 mm×150 mm 和 100 mm×100 mm, 厚度分别为 6 mm 和 4 mm; 为避免加劲板与支管焊缝和主管焊缝堆积, 在图 2 所示的支主管根部焊接厚度为 6 mm 的圆弧梯形加劲板。所有试件均采用 Q460C 钢、E55 型焊条手工焊接加工, 试件 X1~X3 的覆板厚度分别为 4、5 和 6 mm。

2 Q460C 钢和焊缝材性试验

参照《金属材料 室温拉伸试验方法》^[16]和《焊接接头拉伸试验方法》^[17]制作 Q460C 钢试件和 E55 焊缝材性试验试件, 焊缝材性试验试件的焊接方法同 X 型节点。表 1 为材性试验测得的 Q460C 钢和 E55 焊缝的力学性能参数。

表 1 Q460C 钢和 E55 焊缝的力学性能参数

试样	屈服强度 (f_y)/MPa	极限强度 (f_u)/MPa	弹性模量 (E)/GPa	泊松比 (ν)
4 mm 覆板	540.82	628.99	202.63	0.28
5 mm 覆板	539.96	590.07	198.33	0.27
6 mm 覆板	548.94	577.16	205.99	0.28
焊缝	719.50	802.22	202.08	0.28

3 Q460C 方钢管 X 型节点试验现象和破坏规律

3.1 测试方案

图 3 为 X 型节点试验加载图, H 型钢反力架分别固定在混凝土反力墙及地面, 两对带槽孔的铰支座采用高强螺栓固接于 H 型钢反力架上, X 型节点的两支管端部通过 10.9 级高强度螺栓和端板与铰支座相连。采用加载吨位为 1 000 kN 的液压千斤顶对主管下端施加轴压力, 两支管则被动受拉和受压。在主管下端板上安装 2 个位移计 D1 和 D2, 记录千斤顶的加载行程。

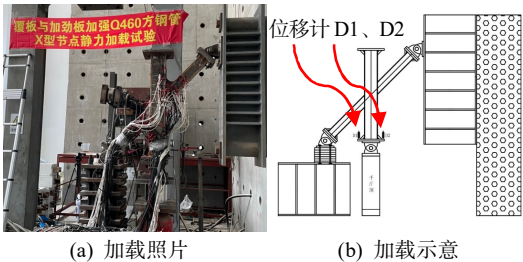


图 3 X 型节点试验加载图

采用单调静力加载方案,以 10 kN 为梯度逐级加载,同步采集每级荷载下各测点的应变.当荷载无法继续增加或试件产生明显破坏时停止加载.试验前施加一定的预荷载,消除试验台与节点间空隙,确保应变片、位移计、数据采集仪正常工作.

图 4 为应变测点布置.

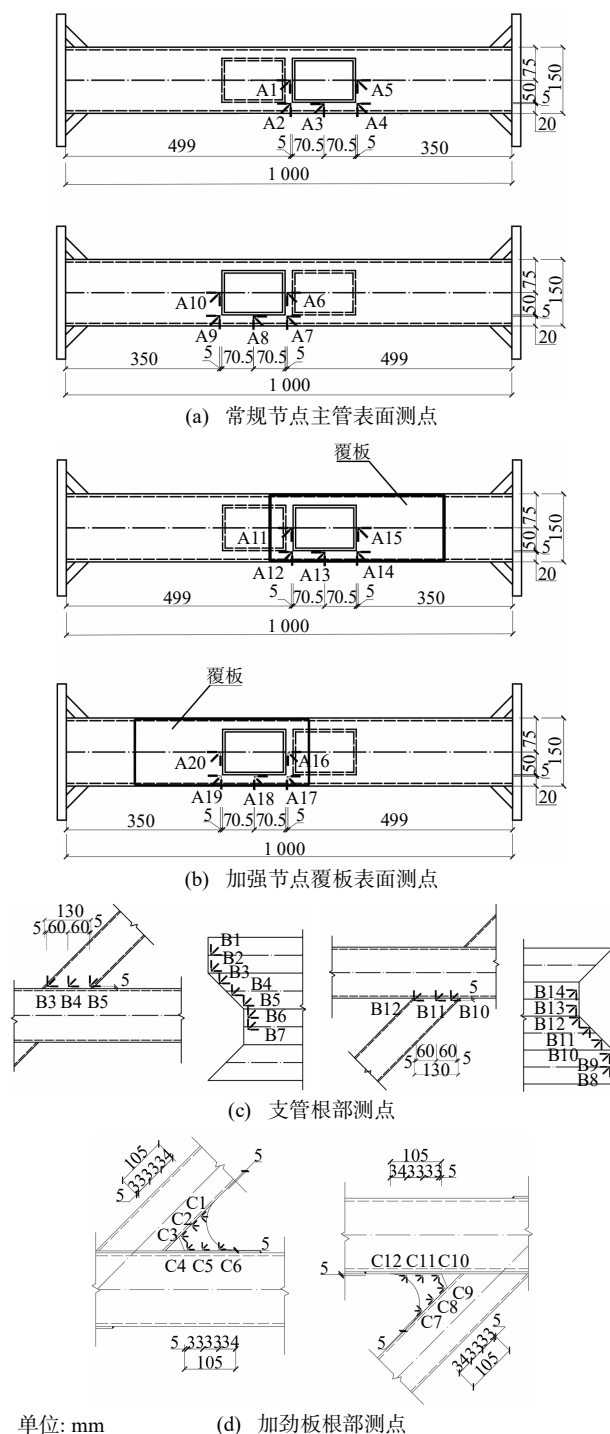


图 4 应变片测点布置

常规节点中,测点 A1~A10 布置在支管根部附近的主管表面;加强节点中,测点 A11~A20 布置在支管根部附近的覆板上.布置在支管根部的应变测点 B1~B14 在立面图上无法标示,标示在支管展开图上.加劲板上的应变测点 C1~C12 均布置在加劲板根部的主管表面.应变片的摆放位置:距离端部和边缘均为 5 mm,应变片之间等间距摆放.

3.2 试验现象

3.2.1 常规节点试件 X0

试件 X0 加载至 48 kN,上支管与下支管均出现轻微变形,上支管变形大于下支管;加载到 60 kN,主管倾斜,上支管与主管夹角张开,与上支管根部上侧相连的主管壁局部凸起;加载到 63 kN,传来了“咯啦”声响;加载到 70 kN,靠近上支管根部下侧的主管壁轻微凹陷,上下支管均出现弯曲(图 5);加载到 74 kN,上支管根部附近的主管焊缝开裂,裂缝长 40.0 mm,上支管与主管相连焊缝开裂,靠近上支管根部上侧的主管壁凸起,继续加压,荷载不再上升,裂纹扩展至长 130.0 mm、宽 7.0 mm,停止加载,此时上支管根部的上角部也出现裂缝.

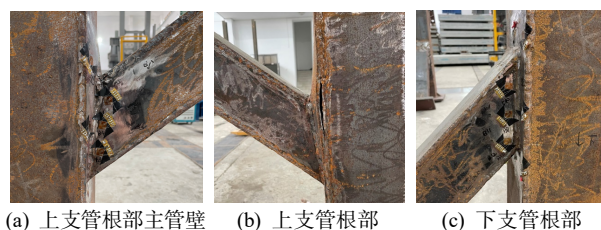
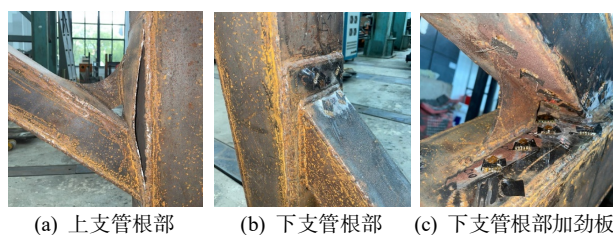


图 5 试件 X0 的破坏形态

3.2.2 加强节点试件 X1

试件 X1 加载至 60 kN,上下支管均发生轻微变形,上支管变形大于下支管;加载至 90 kN,传来连续的“咯啦”声,上下支管均发生弯曲;加载至 100 kN,主管与覆板间焊缝开裂;加载至 105 kN,与上支管根部相连的覆板两侧裂缝张开,发出巨响;继续加载,裂缝不断扩展,但压力传感器示数由 110 kN 跌落至 95 kN,加载结束.图 6 为试件 X1 的破坏形态,上支管根部覆板发生脱落、凸起和凹陷,一侧出现长 272.0 mm、宽 1.9 mm 的裂缝,另一侧出现长 248.0 mm、宽 12.4 mm 的裂缝,在上加劲板根部的角部形成长 70.0 mm、宽 1.0 mm 的裂缝.



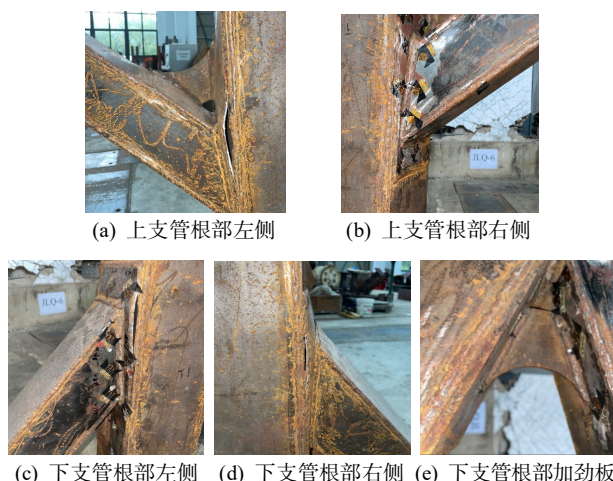
(a) 上支管根部 (b) 下支管根部 (c) 下支管根部加劲板

图6 试件 X1 的破坏形态

3.2.3 加强节点试件 X2

试件 X2 加载至 130 kN, 主管与覆板间焊缝出现长 22.2 mm、宽 1.0 mm 的裂纹; 加载至 133 kN, 裂纹扩展到长 65.2 mm、宽 3.7 mm。加载至 138 kN, 裂纹扩展到长 76.7 mm、宽 4.5 mm; 加载至 153 kN, 传来“嘣”的一声响, 覆板与主管间两侧焊缝均开裂, 荷载由 153 kN 降至 120 kN, 结束加载。

图 7 为试件 X2 的破坏形态, 上支管根部的覆板与主管间焊缝的一侧出现长 55.0 mm、宽 2.1 mm 的裂缝, 另一侧出现长 122.0 mm、宽 7.7 mm 的裂缝, 下支管根部的覆板与主管间焊缝的两侧分别出现长 110.0 mm、宽 4.5 mm 和长 62.7 mm、宽 2.0 mm 的裂缝, 上加劲板根部的角部形成长 16.0 mm 的裂缝; 上加劲板根部支管表面明显凸起, 上支管根部覆板表面凹陷与凸起; 下支管根部覆板表面凸起, 但凹陷程度小于未加强节点试件 X0, 下加劲板根部支管表面轻微凹陷。



(a) 上支管根部左侧 (b) 上支管根部右侧

(c) 下支管根部左侧 (d) 下支管根部右侧 (e) 下支管根部加劲板

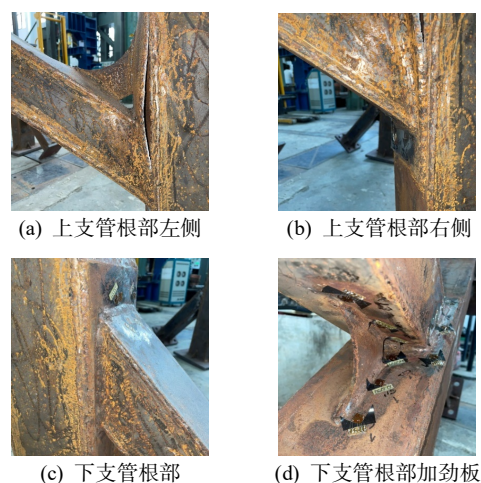
图7 试件 X2 的破坏形态

3.2.4 加强节点试件 X3

试件 X3 加载至 100 kN, 传来细密的“咯啦”响声; 从 110 kN 加载到 120 kN 的过程中, 突然传来“啵”的一声巨响, 荷载由 115 kN 下降至 100 kN,

继续加载, 荷载继续上升, 焊缝并无开裂, 可能是节点支座发生滑移; 从 130 kN 加载至 140 kN, 荷载突然从 130 kN 下降至 120 kN, 此时上支管与主管间加劲板根部焊缝开裂, 加劲板根部支管壁局部凸起; 加载至 125 kN, 主管与覆板间焊缝出现长 48.4 mm、宽 2.6 mm 的裂缝; 加载至 130 kN, 裂缝扩展为长 130.9 mm、宽 8.0 mm; 继续加载, 荷载跌落至 125 kN, 裂缝扩展为长 147.1 mm、宽 10.0 mm; 荷载跌落至 121 kN 时, 裂缝扩展为长 220.0 mm、宽 14.9 mm, 加载结束。

图 8 为试件 X3 的破坏形态, 上支管根部的覆板与主管间两侧焊缝分别出现长 190.0 mm、宽 8.2 mm 和长 210.0 mm、宽 9.6 mm 的裂缝; 上加劲板根部的支管、覆板均发生凸起, 上支管根部下半区的覆板发生凹陷, 下支管根部轻微变形。



(a) 上支管根部左侧

(b) 上支管根部右侧

(c) 下支管根部

(d) 下支管根部加劲板

图8 试件 X3 的破坏形态

3.3 X 型节点破坏规律

Q460C 方钢管 X 型常规节点的破坏模式为: (1) 靠近支管根部的主管壁上半区向外鼓曲, 下半区向内凹陷; (2) 上支管根部上半区附近主管角部焊缝开裂; (3) 上支管和主管相贯区焊缝开裂。

覆板和加劲板加强的 Q460C 方钢管 X 型节点的破坏模式为: (1) 上支管根部附近覆板表面上半区向外鼓曲, 下半区向内凹陷; (2) 覆板和主管连接上半区附近焊缝开裂, 覆板脱落; (3) 上支管加劲板焊缝开裂, 与之连接的支管和覆板凸起; (4) 下支管加劲板根部覆板与支管壁轻微凹陷。

与常规节点试件相比, 加强节点的主管角部焊缝未开裂, 裂缝出现在覆板与主管焊缝和加劲

板根部焊缝处,可见覆板与加劲板对主管起到了有效的保护作用。

4 Q460C 方钢管 X 型节点试验结果及分析

4.1 荷载—位移曲线

图 9 为 4 个节点试件的荷载—位移曲线,可以看出,试件 X0、X1、X2、X3 的刚度逐个提升,说明覆板和加劲板明显增加了节点刚度,覆板越厚,节点的刚度越大。

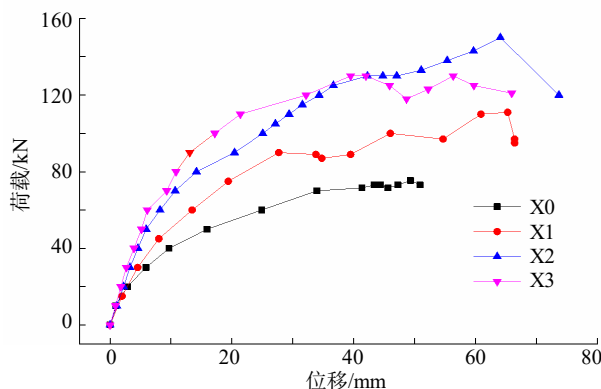


图 9 各试件的荷载—位移曲线

试验测得的 4 个试件的极限承载力和极限位移见表 2。加强节点试件 X1、X2、X3 的极限承载力和极限位移较常规节点试件 X0 分别提高了 51.9%、105.3%、77.9%和 38.2%、35.9%、19.3%,说明覆板和加劲板加强构造显著提高了 X 型节点的承载力和变形能力。

表 2 各试件的极限承载力和极限位移

试件	极限承载力/kN	极限承载力提高百分比/%	极限位移/mm	极限位移提高百分比/%
X0	73.00	—	47.25	—
X1	111.00	51.9	65.30	38.2
X2	150.00	105.3	64.20	35.9
X3	130.00	77.9	56.35	19.3

4.2 节点延性

节点延性是指节点破坏时的变形程度,表征地震作用下节点的塑性变形能力^[18],可由延性系数 μ 衡量, μ 越大,延性越好。

$$\mu = \delta_u / \delta_y, \quad (1)$$

式中: δ_u 为极限承载力对应的极限位移; δ_y 为屈服位移,即荷载—位移曲线偏离直线时的位移。

表 3 计算的各试件的极限位移、屈服位移和延

性系数表明,加强节点的延性较常规节点提高 0~34.7%。随着覆板厚度的增加,加强节点的延性下降,覆板厚度最大加强节点试件 X3 的延性系数与常规节点试件 X0 持平。腹板厚度大,节点刚度增加,变形能力和延性系数下降。

表 3 各试件的延性系数

试件	δ_y /mm	δ_u /mm	μ	延性提高百分比/%
X0	7.80	47.25	6.06	—
X1	8.00	65.30	8.16	34.7
X2	8.21	64.20	7.82	29.0
X3	9.31	56.35	6.05	0

4.3 节点区焊缝应变分析

由材性试验测得 Q460C 钢和 E55 焊缝的屈服强度和弹性模量, Q460C 钢和 E55 焊缝的屈服应变分别计算为: $\varepsilon_{ys} = 2.70 \times 10^{-3}$ 、 $\varepsilon_{ys} = 3.56 \times 10^{-3}$ 。

4.3.1 常规节点的应变演化分析

图 10 为常规节点试件 X0 上支管根部附近主管壁的应变分布及演化,位于下半区的测点 A1 和 A2 均受压;加载结束时,上支管根部主管壁上半区应变增幅最大的是位于主管壁中部的测点 A5,测点 A4 与 A5 均已屈服,与节点试验中主管上半区表面凸起变形、主管角部焊缝开裂的破坏现象吻合;位于主管翼缘的测点 A4、A3 和 A2 的应变依次从受拉过渡到受压,相比于测点 A3 和 A4,位于受压区的测点 A2 应变幅值较小,测点 A3 和 A4 均已屈服,与试验中主管壁凹陷和凸起变形一致。

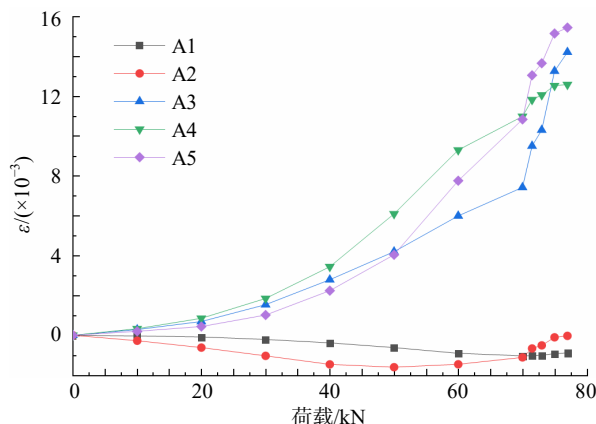


图 10 试件 X0 上支管根部附近主管壁的应变分布及演化

图 11 为试件 X0 下支管根部附近主管壁的应变分布及演化。上半区应变变化最快的是测点 A6,测点 A6 和 A7 均已屈服;下半区进入屈服的是测

点 A9, 这与试验中下支管根部主管表面下半区出现凹陷的破坏现象吻合; 下支管根部附近的主管翼缘上的测点 A7、A8 和 A9 均进入屈服, 应变变化最快的是测点 A9.

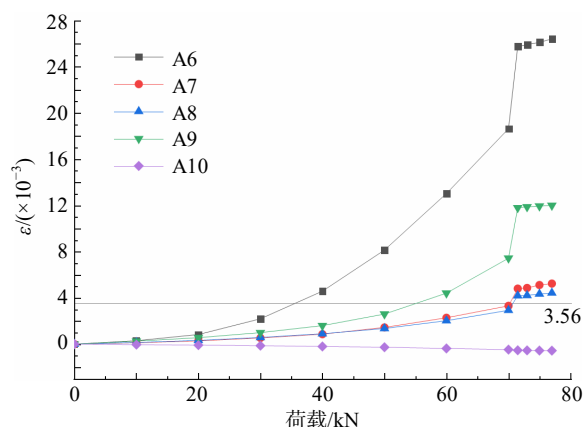


图 11 试件 X0 下支管根部附近主管壁的应变分布及演化

图 12 为试件 X0 上支管根部支管壁的应变分布及演化. 下半区测点 B1 和 B2 的应变变化幅度均不大; 上半区测点中, 靠近支管角部焊缝处进入屈服的测点 B6 的应变发展速度明显快于测点 B7; 支管侧壁测点 B5 的应变发展速度最快, 最早进入屈服, 测点 B3 的应变无显著变化, 说明距上半区越近的测点, 应变发展越迅速, 应变幅值越大.

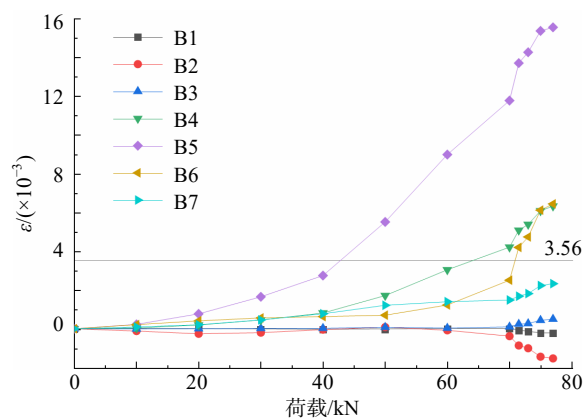


图 12 试件 X0 上支管根部支管壁的应变分布及演化

图 13 为试件 X0 下支管根部支管壁的应变分布及演化. 支管根部上半区测点 B8、B9 均为拉应变, 均未屈服; 测点 B9 的应变发展最快, 最终应变值为 2.480×10^{-3} ; 位于下支管根部下半区的测点应变均较小, 最终应变值不到 1.000×10^{-3} , 与支管根部无明显变形的试验现象相吻合; 支管侧壁测点 B10 受拉, 测点 B12 受压, 均未屈服.

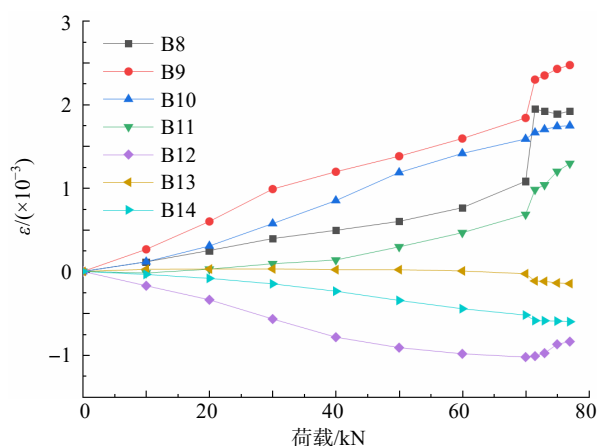


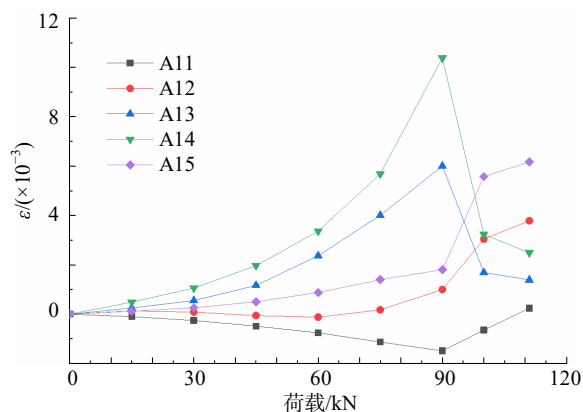
图 13 试件 X0 下支管根部支管壁的应变分布及演化

4.3.2 加强节点的应变演化分析

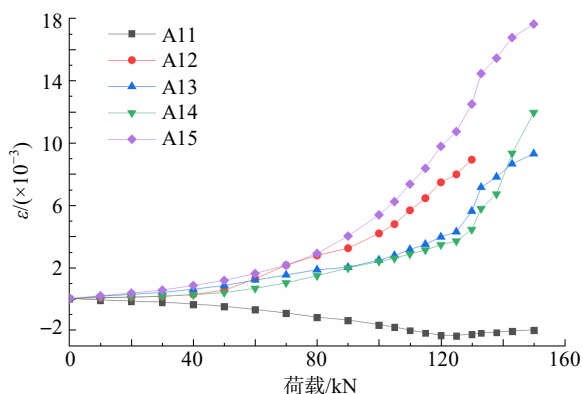
图 14 为加强节点上支管根部覆板测点的应变分布及演化. 图 14(a)显示, 试件 X1 上支管根部下半区测点中, 靠近主管角部焊缝的测点 A12 进入屈服, 最大应变值为 3.788×10^{-3} , 中部测点 A11 未屈服; 上半区测点中, 最先进入屈服的是靠近主管角部焊缝的测点 A14, 在加载到 100 kN 时, 测点 A14 和 A15 均进入屈服; 上支管根部覆板翼缘应变变化最快的是测点 A14、A13, 加载至 90 kN 时, 达到应变峰值, 加载结束时, 测点 A12 也进入屈服. 试验中上支管根部位于测点 A14 附近的覆板与主管连接焊缝开裂, 裂缝逐渐扩展到测点 A13, 测点 A13、A14 的应变变化与试验现象一致. 图 14(b)表明, 试件 X2 支管根部下半区测点 A11 的应变变化幅度不大, 位于主管角部焊缝附近的测点 A12 为拉应变, 且进入屈服, 与节点试验中发生的上支管根部覆板表面凹陷现象相吻合; 上半区测点 A14 和 A15 均进入屈服, 且位于中部的测点 A15 应变变化更快, 幅值更大, 是因为加劲板改变了节点的传力路径; 上支管根部覆板翼缘测点 A13 和 A14 的应变变化趋势相似, 变化速度与幅值均略小于 A12, 3 个测点均已屈服. 由图 14(c)可见, 试件 X3 上支管根部下半区测点 A11 受压应力, 测点 A12 受拉应力, 测点 A12 在加载至 115 kN 时进入屈服, 与节点试验中覆板凹陷的现象相吻合; 上半区与覆板翼缘区测点的应变变化趋势相似, 试验结束时均已进入屈服.

加强节点各测点的应变演化速度较常规节点明显减缓. 加载至 60 kN 时, 常规节点试件 X0 受拉

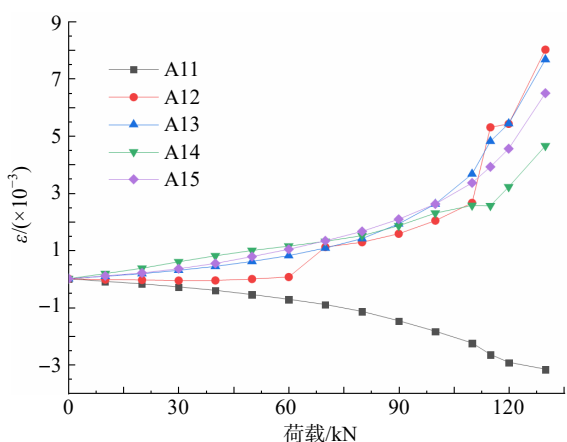
区测点的平均应变约为 7.600×10^{-3} , 加强节点试件 X1、X2、X3 受拉区测点的平均应变分别约为 2.230×10^{-3} 、 1.145×10^{-3} 和 0.993×10^{-3} , 说明覆板和加劲板构造推迟了节点屈服进程, 提升了节点的承载力; 随着覆板厚度增加, 加强节点进入屈服的进程滞后。



(a) 试件 X1



(b) 试件 X2

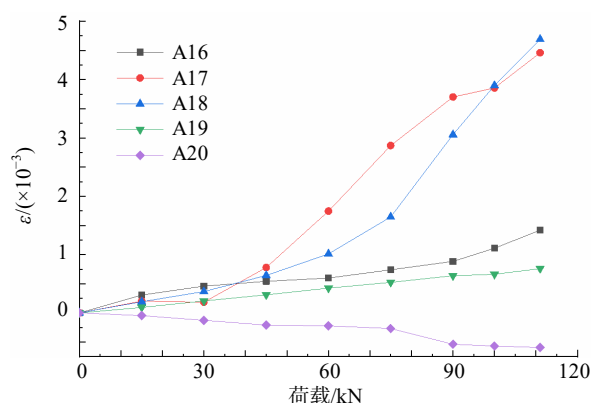


(c) 试件 X3

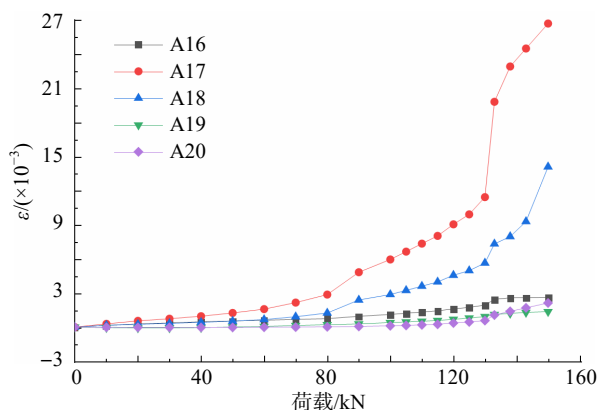
图 14 加强节点上支管根部覆板的应变分布及演化

图 15 为加强节点下支管根部覆板的测点应变

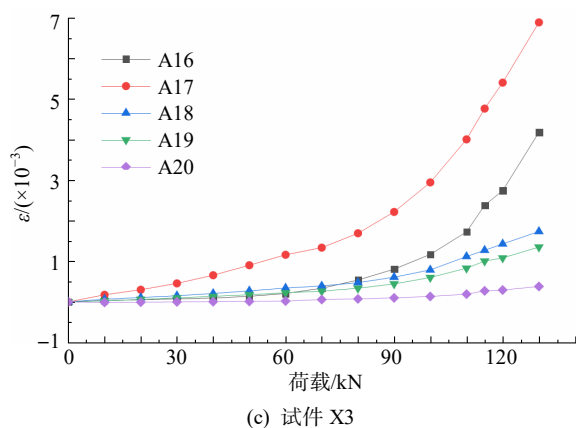
分布及演化。



(a) 试件 X1



(b) 试件 X2



(c) 试件 X3

图 15 加强节点下支管根部覆板的应变分布及演化

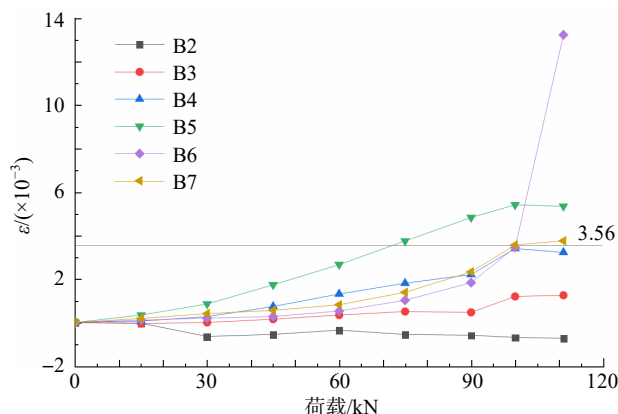
图 15(a)显示, 试件 X1 下支管根部上半区应变增长最快的是靠近主管角部焊缝的测点 A16、A17, 较好解释了试验中试件 X1 下支管根部最先发生破坏, 测点 A16、A17 的最大应变值约为 1.420×10^{-3} ; 下半区测点 A19 和 A20 的应变变化均不大; 覆板翼缘区测点 A17 和 A18 均进入屈服。图 15(b)表明, 试件 X2 下支管根部覆板表面测点中 A17 和 A18

进入屈服, 试验结束时位于支管角部附近的测点 A17 应变达到 2.670×10^{-2} , 与试验中测点 A17 开裂的破坏现象吻合. 由图 15(c)可见, 试件 X3 下支管根部上半区应变变化最快的是靠近支管角部与主管角部的测点 A17, 加载至 130 kN 时, 测点 A16、A17 均进入屈服; 下半区测点 A19 与 A20 未屈服; 覆板翼缘区除测点 A17 外, 其他测点应变变化不大, 解释了试验中覆板表面下半区无破坏的现象.

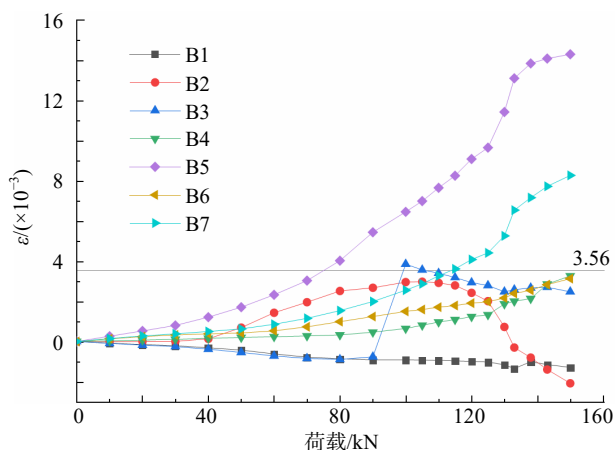
加强节点下支管根部主管壁的应变幅值远小于常规节点, 加载至 75 kN, 常规节点试件 X0 的测点 A6~A9 均进入屈服, 加强节点试件 X1 仅有测点 A17 的应变达到 2.700×10^{-3} , 试件 X2、X3 下支管根部覆板表面测点均未屈服.

图 16 为加强节点上支管根部壁板的应变分布及演化. 图 16(a)显示, 试件 X1 上支管根部下半区测点 B2 的应变幅值较小, 上半区测点 B6 和 B7 均进入屈服, 位于支管角部焊缝的测点 B6 应变幅值较大; 上支管根部侧壁从下半区至上半区, 各测点应变逐渐增大, 测点 B4 和 B5 均进入屈服. 图 16(b)表明, 试件 X2 上支管根部下半区测点中, 测点 B1 受压, 应变变化幅值较小, 测点 B2 起初受拉, 加载后期受压, 测点 B1 和 B2 均未屈服; 上半区靠近加劲板的测点 B7 应变较大, 已进入屈服, 节点试验中加劲板根部支管壁凸起导致该测点应变激增; 上支管根部侧壁靠近支管根部上半区角部的应变增幅远大于其他测点. 由图 16(c)可见, 试件 X3 上支管根部下半区测点 B2 受拉, 应变变化速率与幅值远大于测点 B1, 测点 B2 进入屈服; 上半区靠近加劲板附近的测点 B7 应变幅值更大且进入屈服, 测点 B6 加载结束时应变仅约为 2.500×10^{-3} , 较好解释了节点试验中加劲板根部支管壁凸起破坏; 上支管根部侧壁测点应变分布与试件 X1 类似.

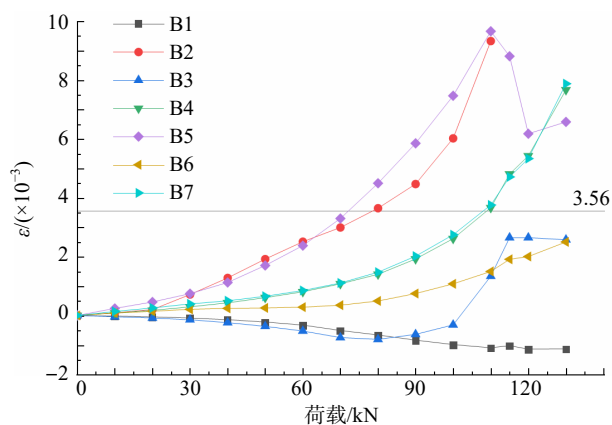
加强节点上支管根部下半区支管壁和支管侧壁测点的应变分布及演化规律与常规节点类似; 加强节点上支管根部上半区支管壁的应变变化与常规节点不同, 加强节点试件 X2、X3 的测点 B7 率先屈服, 而常规节点试件 X0 的测点 B6 先屈服, 这是因为加强节点测点 B7 附近的加劲板改变了传力路径, 保护了支管与覆板间焊缝. 此外加强节点上支管根部支管表面的应变幅值小于常规节点, 这得益于覆板和加劲板的加强作用.



(a) 试件 X1



(b) 试件 X2

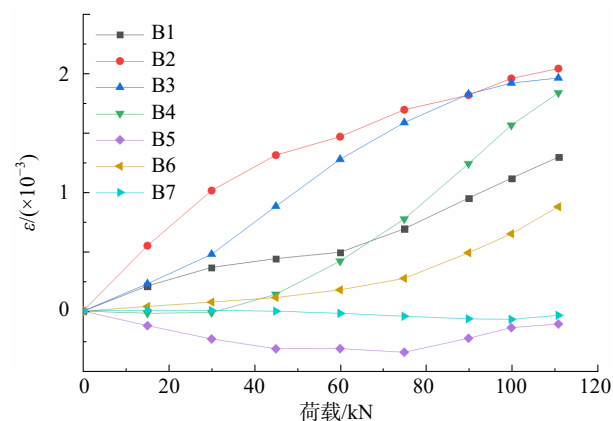


(c) 试件 X3

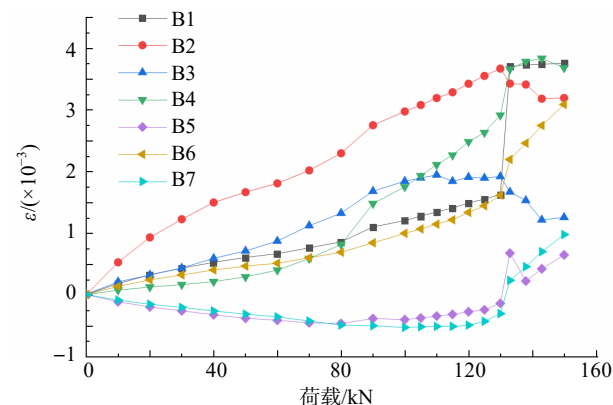
图 16 加强节点上支管根部壁板的应变分布及演化

图 17 为加强节点下支管根部壁板的应变分布及演化, 可见测点 B10、B12 受压, 其他测点均受拉, 试件 X2 的测点 B8、B11 和试件 X3 的测点 B9 进入屈服, 节点试验中试件 X2 和 X3 的下加劲板根部支管表面发生凹陷破坏, 加剧了该处应变发展. 加强节点下支管根部支管表面的应变变化情

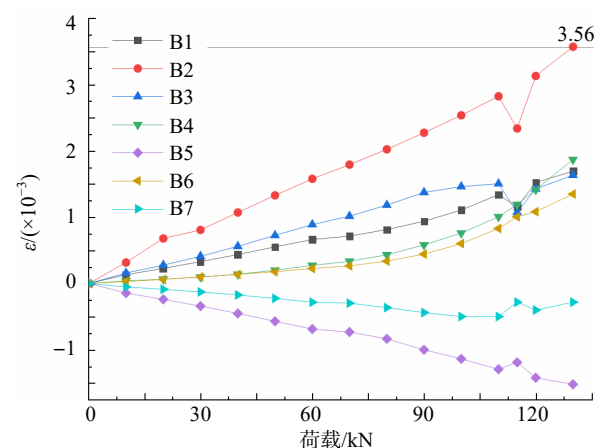
况与常规节点试件 X0 基本相同, 说明加劲板对该位置的应变影响不大。



(a) 试件 X1



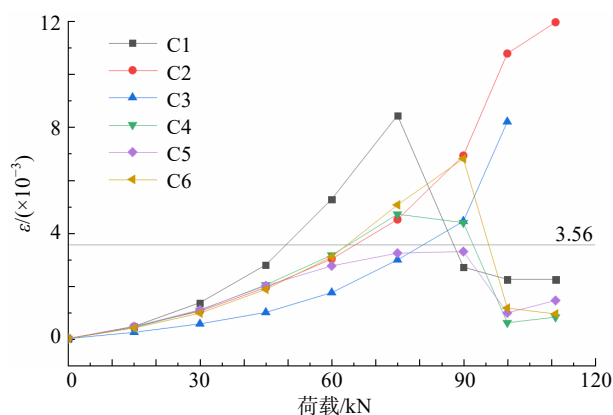
(b) 试件 X2



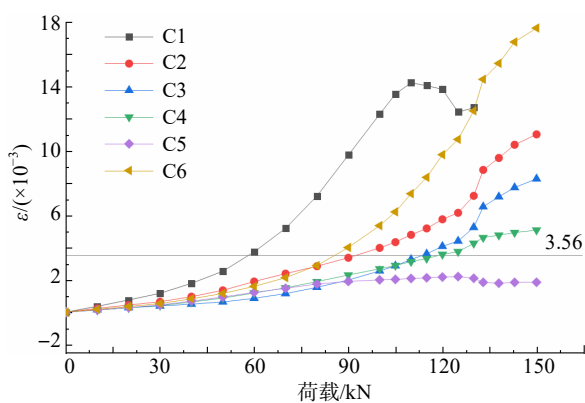
(c) 试件 X3

图 17 加强节点下支管根部支管壁的应变分布及演化

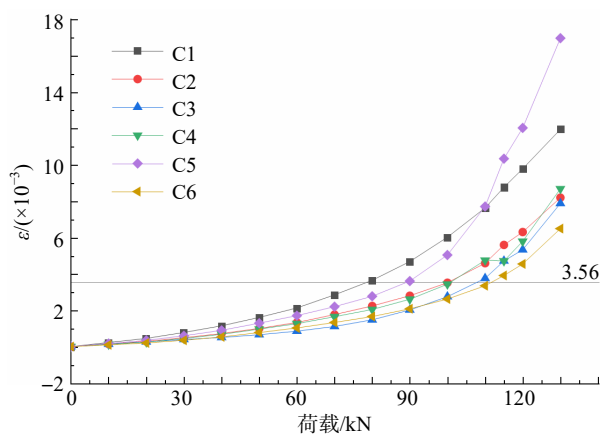
图 18 所示的上加劲板(上支管与腹板连接处加劲板)根部测点的应变分布表明, 加强节点的上加劲板测点均受拉且大多进入屈服, 与节点试验中上加劲板根部覆板与支管凸起的破坏现象相吻合。



(a) 试件 X1



(b) 试件 X2



(c) 试件 X3

图 18 加强节点上加劲板根部支管壁与覆板的应变分布及演化

由图 19 所示的加强节点下加劲板根部测点的应变分布可见, 加强节点的测点 C7~C12 皆未达到焊缝的屈服应变, 仅试件 X2 的测点 C8 达到钢材屈服应变, 这较好解释了节点试验中试件 X1、X3 的下加劲板根部未发生明显变形, 试件 X2 下加劲板根部支管表面发生轻微凹陷的现象。

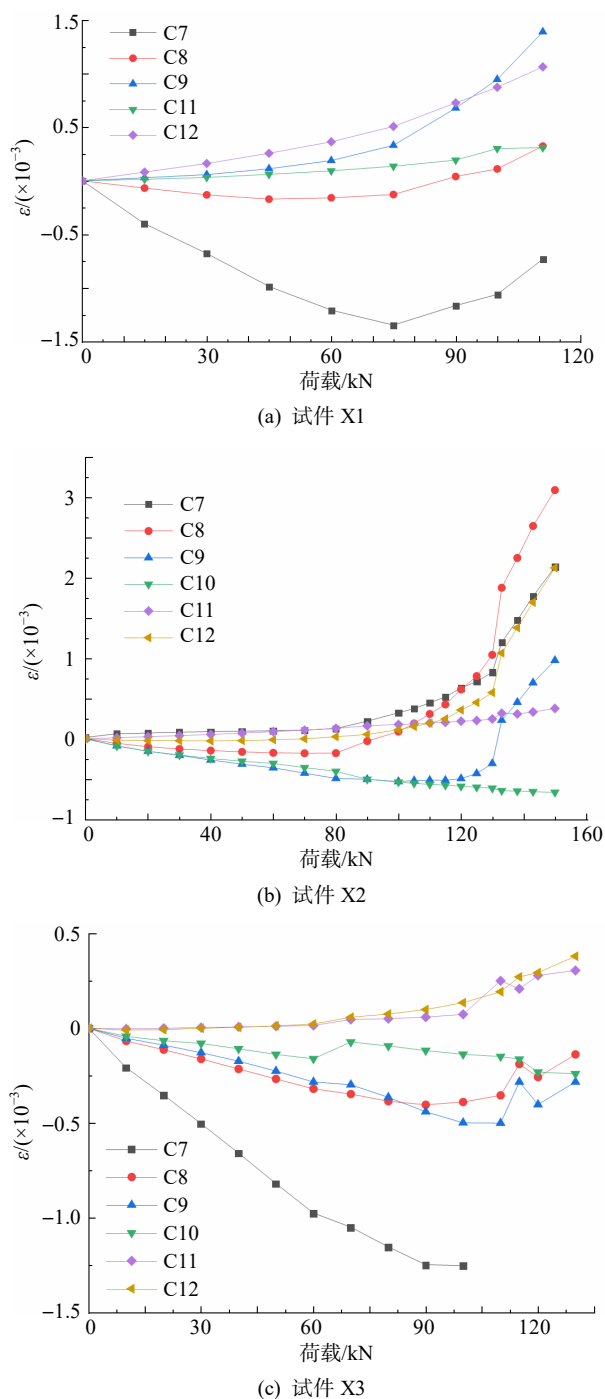


图 19 加强节点下加劲板根部支管壁与覆板的应变分布及演化

4.4 X 型节点破坏机理分析

4.4.1 常规 X 型节点破坏机理

常规 X 型节点破坏时, 与上支管相连的主管壁除下半区外均进入塑性, 与下支管相连的主管壁均进入塑性; 上支管根部局部进入塑性, 塑性区集中在受拉区, 下支管根部均未进入塑性。其破坏

机理为上下支管根部附近的主管壁塑化, 上支管根部主管壁凸起, 主管角部焊缝开裂。

4.4.2 覆板与加劲板加强的 X 型节点破坏机理

覆板和加劲板加强的 X 型节点破坏时, 上支管根部覆板基本进入塑性, 下支管根部覆板只有受拉区进入塑性。上支管根部局部进入塑性, 下支管根部少数位置进入塑性, 塑性区集中在支管根部的角部焊缝附近。上加劲板根部的支管壁与覆板均进入塑性, 下加劲板根部的支管壁与覆板基本未进入塑性。覆板和加劲板加强节点的破坏机理为上支管根部覆板与上加劲板根部覆板塑化, 覆板与主管角部间焊缝断裂; 上加劲板根部支管壁塑化, 凸起变形, 上加劲板根部与支管间焊缝开裂; 下支管根部受拉区覆板进入塑性, 凸起变形, 下支管根部受拉区覆板与主管间焊缝开裂。

5 结论

对 3 个覆板加强主管和支主管间设置加劲板的 Q460C 方钢管 X 型节点和 1 个常规 X 型节点进行了主管轴压工况下的静力加载试验, 考察了覆板和加劲板对节点破坏模式、荷载—位移曲线、节点区应变分布等力学性能的影响, 得到以下结论:

(1)Q460C 方钢管 X 型节点破坏机理。常规节点的破坏模式为上下支管根部附近的主管塑化, 主管角部焊缝开裂。覆板和加劲板加强节点的破坏模式为上支管根部附近的覆板塑化, 覆板与主管间焊缝断裂; 上加劲板根部支管壁塑性变形, 上加劲板根部与支管间焊缝开裂; 下支管根部受拉区覆板塑性变形, 下支管根部受拉区覆板与主管间的焊缝开裂。

(2)覆板和加劲板构造对 Q460C 方钢管 X 型节点力学特性的影响。覆板和加劲板构造明显提高了 Q460C 方钢管 X 型节点的承载力、变形能力、延性和刚度, 加强节点的极限承载力、极限位移和延性较常规节点分别提高 51.9%~105.3%、19.3%~38.2%和 0~34.7%; 加强节点的承载力和刚度随覆板厚度的增加而提高, 当覆板过厚($\geq 6\text{ mm}$)时, 节点延性有所下降。

参考文献:

- [1] 周春波. 新型加强 X 型方钢管节点平面内受弯滞回性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.

- [2] Zhao B D, Li F L, Liu C Q, et al. Hysteretic behavior of CHS X-joints under in-plane bending moment[J]. Structures, 2022, 43:1790-1806.
- [3] 常鸿飞, 李照伟, 左文康, 等. 槽型套管加强方钢管 X 形节点平面内受弯性能试验[J/OL]. 工程力学, 2022 [2023-02-10]. <https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2022.05.0407>.
- [4] 刘帅鹏. 槽型套管加强 X 型方钢管节点平面外受弯性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- [5] 王峰, 史庆轩, 王朋, 等. 圆钢管混凝土 X 型节点轴压承载力研究[J]. 钢结构, 2017, 32(7): 38-43.
- [6] Zhao B D, Zheng J Y, Liu C Q, et al. Study on the brace axial force-local deformation behavior of unstiffened CHS X-joints[J]. Archive of Applied Mechanics, 2021, 91(1):205-221.
- [7] Gao C Z, Zhang D C, Cui M C, et al. Bearing capacity test and calculation theory on CHS X-Joints stiffened with joint-plates[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(2):848-864.
- [8] 黎冠楠. 方钢管混凝土压弯构件承载力可靠性研究及灵敏度分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [9] 侯蓓蓓. PBL 加劲型矩形钢管混凝土受拉 X 型节点有效分布宽度研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- [10] 尹青青. 方钢管混凝土短柱轴压力学性能分析及工程应用研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [11] 刘艳, 薛旭辉, 张红光, 等. X 形方钢管节点平面内抗弯性能试验研究[J]. 中国科技论文, 2018, 13(13): 1505-1510.
- [12] Zhao B D, Shao Z H, Liu C Q, et al. Influence of brace-to-chord angle on the seismic behavior of circular hollow section X-joints under in-plane bending[J]. Engineering Structures, 2022, 264:114419.
- [13] 江锐, 江力强. 曲线 CHS 主钢管 X 形节点平面内受弯性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2019, 21(1):72-79.
- [14] 倪威廉, 王万祯, 贾真, 等. 变截面方钢管轻骨料混凝土边柱-钢箱梁折线隔板贯通节点破坏机理和承载力研究[J]. 工程力学, 2019, 36(10):122-133.
- [15] 赵熙元, 陈东伟, 谢国昂. 钢管结构设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [16] GB/T 228.1—2021. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法[S].
- [17] GB/T 2651—2008. 焊接接头拉伸试验方法[S].
- [18] 成丽娜. Q460 高强钢材焊接空心球节点双向受力性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.

Tests on X-joints of Q460C steel square tubes strengthened with cover plate and ribs

FAN Yuzhe, CHU Hanzeng*, WANG Wanzhen, HUANG Yizhou

(School of Civil & Environmental Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Static loading tests under axial compression on chord are performed on X-joints of Q460C steel square tubes with cover plate strengthening chord and ribs between braces and chord. The effects of cover plate and ribs on the mechanical properties of X-joints are investigated, and the mechanical performance parameters are obtained for failure modes, load-displacement curves, ultimate bearing capacity, ultimate displacement, stiffness, ductility and strain distribution evolution in the panel zone, and so on. The test results show that the failure modes of the X-joints strengthened with cover plate and ribs are the buckling outward to and inward from the upper half and the lower half of the cover plate at the upper brace root. The weld between cover plate and the chord in the upper half of the connection zone crack, and the covered plates fall off. The weld at the root of the stiffening plate is connected with the upper brace crack, and the upper brace and the cover plate bulge. The cover plate at the root of the lower brace and the brace wall are found to be concave. The bearing capacity, deformation, ductility and stiffness of Q460C square steel tube X-joints are obviously improved by cover plate and ribs. The ultimate bearing capacity, ultimate deformation and ductility of the reinforced joints are 51.9%–105.3%, 19.3%–38.2% and 0–34.7% higher than those indices of traditional joint respectively.

Key words: Q460C steel square tube; X-joint; covered plates; ribs; test; bearing capacity

(责任编辑 韩 超)