

主管内填混凝土对矩形钢管节点 受力性能的影响

刘君平^{1,2}, 刘永健³

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518029;
3. 长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室, 陕西 西安 710064)

摘 要:为研究主管内填混凝土对矩形钢管节点受力性能的影响, 探讨主管内填混凝土矩形钢管节点的受力机理, 对比分析了主管内填混凝土矩形钢管节点和空钢管节点的受压、受拉和受弯性能, 结果表明主管内填混凝土能够改善节点的受力性能, 显著提高矩形钢管受压节点的承载力, 受压节点的破坏模式转变为横向局部承压破坏; 对矩形钢管受拉节点承载力提高不明显, 但提高了节点的刚度, 改变节点的破坏模式; 能够提高受弯节点的刚度和承载力, 其破坏模式可采用支管受拉翼缘有效宽度模型。主管内填混凝土后矩形钢管节点的承载力可根据对应的破坏模式来计算。

关键词:主管内填混凝土; 矩形钢管节点; 受压性能; 受拉性能; 受弯性能; 破坏模式; 承载力计算

中图分类号: TU528.59; TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2011)01-0018-07

矩形钢管桁架已被广泛应用于大跨度空间结构^[1], 矩形钢管桁架的设计理论也比较成熟, 各国设计规范均有设计方法相关条文^[2-5]。矩形钢管桁架中支主管的截面尺寸通常是根据最不利内力来选择的, 但由于主管管壁柔性较大, 结构破坏常发生在节点区域的主管管壁, 如果增加整根主管的截面, 这将造成较大的浪费; 在节点部位粘贴钢板又影响美观, 而且施工比较复杂。为改善节点受力性能, 可以在矩形钢管桁架主管内填充或部分填充混凝土, 利用混凝土协助钢管受力, 减小受压主管截面面积, 并防止管壁局部屈曲, 能较好地改善矩形钢管桁架结构性能。同时, 空钢管节点就变成为主管内填混凝土钢管节点。

为研究主管内填混凝土对矩形钢管节点受力性能的影响, 本文在相关试验及研究基础上^[6-12], 进行主管内填混凝土对矩形钢管节点受压、受拉和受弯性能的影响分析, 研究主管内填混凝土对矩形钢管节点刚度、破坏模式的影响, 为该类型结构的研究应用提供参考依据。

1 节点类型划分与节点构造

1.1 节点类型的划分

桁架节点通常可以根据节点几何形式和节点杆件内力平衡方式来进行划分。按几何形式分类, 节点可分为单平面节点和多平面节点(也称空间节点)两大类, 单平面节点为所有杆件轴线处于同一平面的节点, 其余为空间节点。目前, 包括我国钢结构设计规范^[5]在内的国内外大多数相关规范规程, 都是根据节点几何形式来划分节点的类型。为研究节点传力方式的本质, 还可以根据节点各构件内力的平衡方式来划分, AISC 空心管结构设计规程中就提出节点类型应根据与节点各杆件内力的平衡方式来划分^[4]。本文根据支管荷载形式, 将轴心受压、轴心受拉和受弯支管与主管相连接的节点区域分别称为受压节点、受拉节点和受弯节点。

收稿日期: 2009-09-21 修改稿日期: 2010-12-22

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0855); 国家西部交通建设科技资助项目(2006 319 812 112); 交通部应用基础研究项目(2006 319 812 130)

作者简介: 刘君平(1977-), 男, 江西安福人, 博士, 主要从事钢混组合结构研究工作。

1.2 节点的构造参数

主管内填混凝土的矩形钢管桁架支管为矩形空钢管,主管内填混凝土,支管钢管直接焊接于主管钢管表面,如图 1 所示,图中规定了本文所表述的节点参数符号.其中,支主管宽度比 $\beta=(b_1+b_2+h_1+h_2)/4b_0$ (K 型节点), $\beta=b_1/b_0$ (T、Y、X 型节点);支管高度与主管宽度比 $\eta=h_1/b_0$;主管 1/2 宽度与厚度比 $\gamma=b_0/2t_0$;支主管钢材屈服强度 f_{y0} 、 f_{yi} .

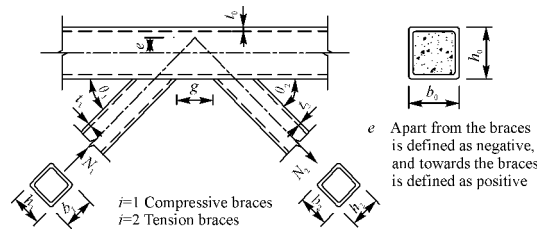


图 1 节点参数与构造
Fig. 1 Parameters of joint

2 主管内填混凝土对受压节点的性能影响

2.1 受压节点受力机理分析

T 型受压节点受压支管作用于主管的横向荷载是由主管横截面剪力来平衡的.对于矩形钢管节点,主管壁较柔,节点变形主要集中在节点区域,节点承载力较低,通常直接采用简支梁模型进行研究.由于主管中填充了混凝土,提高了主管的横向抗压刚度和抗压承载力,避免了主管连接面钢板过大的挠曲变形,节点承载力得到提高,采用简支梁模型将有可能导致梁的破坏先于节点破坏,得不到节点的实际承载力.图 2a 将主管横截面的剪力等效为主管另一侧的连续支座反力,但所示模型很可能出现节点承载力取决于支管抗压承载力的情形,同样得不到节点的破坏.为了避免支管破坏模式的出现,揭示受压节点受力性能,模型进一步等效为图 2b 所示的矩形钢管混凝土横向局部承压模型. Y 型受压节点与 T 型节点相似,支管的竖向分力同样使主管横向局部受压. K 型间隙节点由于主管内部混凝土的存在,节点区域受压支管作用处同样为主管横向局部承压,受力特点与 T、Y 型受压节点相似.

对于 X 型受压节点,一根支管的压力通过主管与另一根支管平衡,主管横向局部承压,主管内混凝土局部受压.为避免支管破坏,同样也可以等效为如图 3 所示横向局部承压模型,横向局部承压面积应 $A_b=b_1h_1/\sin\theta_1$. 根据中国混凝土结构设计规范^[13],混凝土局部承压底面积应按照“同心对称的原则”确定, T 型和 Y 型受压节点计算底面积 A_d 与 X 型节点的数值是相同的,这为受压节点承载力采用相似的计算方法提供了依据.

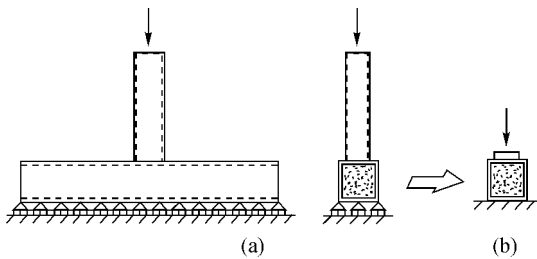


图 2 T 型节点横向局部承压模型
Fig. 2 Local transverse compression mode of T-joint

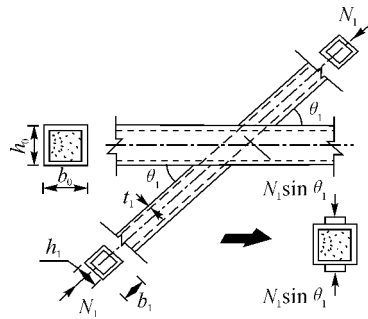


图 3 X 型节点横向局部承压模型
Fig. 3 Local transverse compression mode of X-joint

2.2 受压节点破坏模式及承载力计算

从以上分析可以知道,无论是哪种形式节点,受压节点支管的垂直分力均使主管横向局部承压,主管内混凝土局部受压,受压节点破坏模式为横向局部承压破坏,这是受压节点的主要特征,如图 4 所示.为考虑内填混凝土对矩形钢管受压节点的影响,图 5 为试验结果与按我国钢结构设计规范^[5]空钢管节点计算值的比较, N_{tu}^T 为试验结果, N_c 为按规范空管节点计算值,从图中可以看出,主管内填混凝土后,受压节点承载力大幅提高,但计算结果离散性比较大. Packer 在研究矩形钢管桁架节点加强方法时,进行了 31 个钢管混凝土桁架 X、T、K 型节点承载力的试验研究,对于支管在轴压荷载作用下的节点, Packer 给出了基于管内混凝土局部承压强度的节点承载力计算公式^[14],公式虽然考虑了管内混凝土的

作用,却忽略了钢管的作用.图 6 为试验结果与仅考虑管内素混凝土局部承压强度计算结果的比值, N_{uc} 为分别按我国混凝土结构设计和欧洲混凝土结构设计规范 CEB-FIP 确定素混凝土局部承压强度的计算结果,可以看出,无论用哪种方法,仅按管内素混凝土计算的横向局部承压强度提高系数与实测值均有较大的误差,可见不能忽略钢管的作用.

基于钢管混凝土的套箍作用,文献[6]给出对应于横向局部承压破坏的承载力计算公式(1).以计算承载力为横坐标,实测承载力为纵坐标,将试验数据和计算结果数据绘于图 7 中,可见受压支管节点试验承载力均位于等值线之上,基本在等值线附近,且试验受压支管节点承载力试验值均大于或接近于承载力计算公式理论值.

$$N_{1u} = (1 + k_s) \beta_c \beta_l f_c A_1 \quad (1)$$

其中 k_s 为钢管参与横向局部承压工作系数, β_c 为混凝土强度影响系数, β_l 为管内混凝土局部承压强度提高系数, f_c 为混凝土抗压强度设计值, A_1 为局部受压面积.

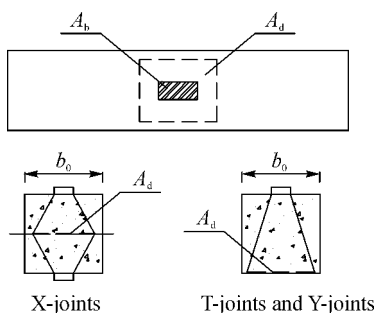


图 4 受压节点破坏模式

Fig. 4 Failure modes of compression joint

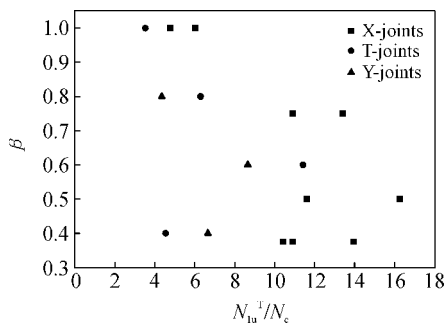


图 5 N_{1u}^T 与 N_c 结果比较

Fig. 5 Comparison of N_{1u}^T with N_c

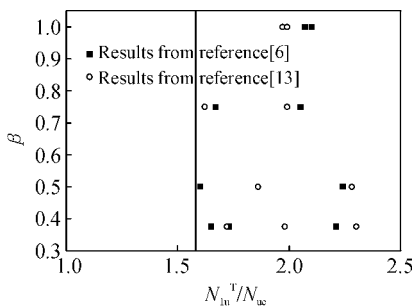


图 6 N_{1u}^T 与 N_{uc} 结果比较

Fig. 6 Comparison of N_{1u}^T with N_{uc}

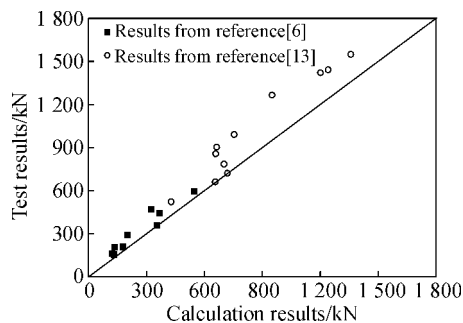


图 7 N_{1u}^T 与 N_{1u} 结果比较

Fig. 7 Comparison of N_{1u}^T with N_{1u}

3 主管内填混凝土对受拉节点的性能影响

3.1 受拉节点受力机理分析

矩形钢管空心受拉节点在支管垂直分力作用下使得主管顶板挠曲变形较大,节点承载力受支管垂直分力控制,主管内填混凝土后节点与矩形钢管空心节点类似,但主管内混凝土阻止了主管侧板的内凹变形(即阻止了主管角部的转动),从而使主管顶板产生较大的膜张力,因此主管内填混凝土后节点的刚度要高于矩形钢管节点.将矩形钢管受拉节点简化为框架模型,而主管内填混凝土后节点简化为固支梁模型,对矩形钢管 X 型受拉节点和主管内填混凝土后节点的变形特点进行比较,如图 8 所示.

取固支梁和框架构件截面宽度为单位宽度,截面高度为主管壁厚,支管荷载等效为作用于支管两侧板的集中荷载,则可得到简化模型中主管内填混凝土后节点与矩形钢管节点的弹性刚度之比 $k_{c/h}$ 为:

$$k_{c/h} = 1 + \frac{3\alpha(1+\beta)}{(1+\alpha)(1-\beta)(1+2\beta)}$$

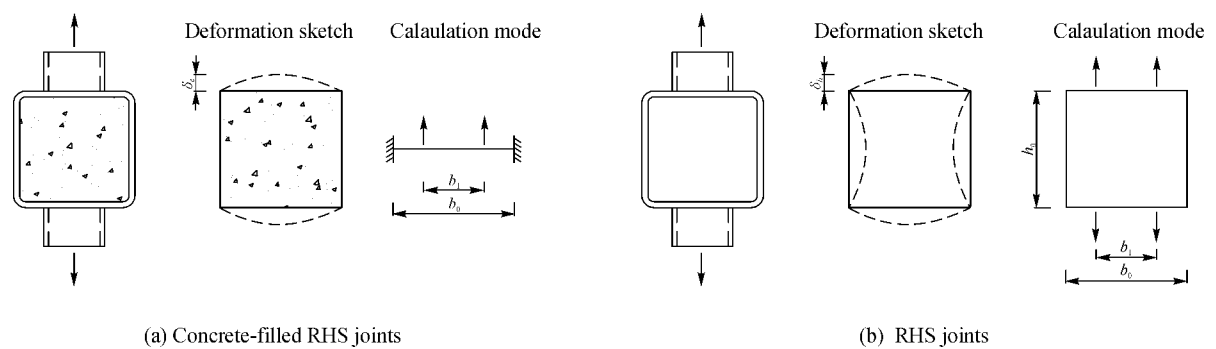


图 8 矩形钢管混凝土与矩形钢管节点受拉变形比较

Fig. 8 Deformation comparison between concrete-filled RHS tension joints with RHS tension joints

式中 $\beta=b_1/b_0<1, \alpha=h_0/b_0$, 由图 9 中 $k_{c/h}$ 与 α 的关系可见, 主管内填混凝土后受拉节点弹性刚度是矩形钢管受拉节点的 2 倍以上, 且随主管高宽比 α 、支主管宽度比 β 的增加而增加。

矩形钢管 T 型节点试验数据表明^[15-16]: 当 β 在 0.3~0.6 之间时, 节点承载力受节点变形控制. 据此原则, 当支主管宽度比 β 较小, 节点承载力由节点变形控制时, T、Y、X 型受拉节点主管内填混凝土后节点承载力应高于相应矩形钢管节点的承载力; 当 β 较大, 节点承载力由主管顶板受冲剪强度或侧壁屈服强度控制时, 二者承载力相似。

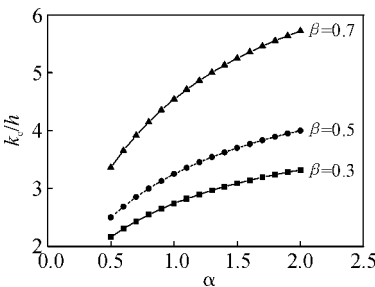


图 9 $k_{c/h}$ 与 α 的关系

Fig. 9 Relationship of $k_{c/h}$ and α

3.2 受拉节点破坏模式及承载力计算

从受拉节点的受力机理知道, 内填混凝土对矩形钢管节点受拉性能的影响主要表现在对节点刚度的影响上, 内填混凝土强度对其影响不明显. 因此, 影响受拉节点性能的主要因素是支主管宽度比、主管宽厚比和主管钢材的屈服强度等, 与矩形钢管节点相同, 主管内填混凝土后受拉节点破坏模式由节点几何参数控制. 当支主管宽度比 β 较小时, 节点的承载力是由节点的变形来控制, 发生屈服线模式破坏, 当支主管宽度比 β 较大时, 节点的破坏是主管翼缘板冲剪破坏或侧壁的屈曲破坏, 破坏模式如图 10 所示. 对于 K 型节点, 由于受压支管作用处节点具有较高的承压强度, 节点承载力将取决于受拉支管连接强度, 节点破坏模式与两支管之间的间隙 g 有关, 当 g 较小时, 间隙处主管顶板弯曲变形较小, 节点受拉支管作用处趋于冲剪破坏; 当 g 较大时, 间隙处主管顶板弯曲变形较大, 节点受拉支管作用处易形成屈服线, 矩形钢管混凝土 K 型节点由此成为一对 Y 型节点^[10].

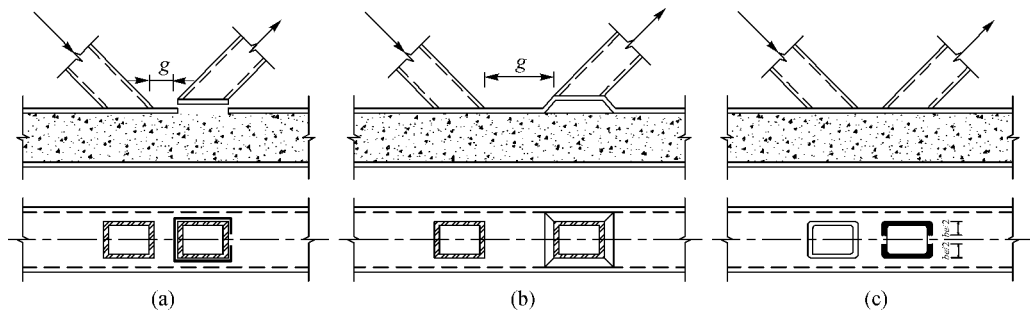


图 10 受拉节点破坏模式

Fig. 10 Failure modes of tension joint

对于受拉节点, Packer 建议采用相应的矩形空心管节点的承载力计算公式, 这样处理是偏于安全的. 图 11 为试验结果、有限元计算值与按我国钢结构设计规范^[5]空钢管节点计算值的比较, N_{2u}^T 为试验结果, N_i 为按规范空管节点计算值, 可以看出, 受拉支管节点的试验承载力比规范计算承载力要大. 考虑到受拉节点变形较大, 节点承载力应由节点变形控制, 虽然 Packer 的建议采用相应破坏模式的矩形空心钢管

节点计算偏于保守,但为便于计算,并考虑到内填混凝土提高了节点的刚度,建议矩形钢管受拉节点在主管内填混凝土后可以根据与其对应的破坏模式,套用矩形钢管节点受拉节点承载力的计算方法^[6],如式(2)~(4)所示,图 12 为受拉支管节点试验值与公式计算值比较,图中可以看出,试验受拉支管节点承载力试验值均大于承载力计算公式理论值。

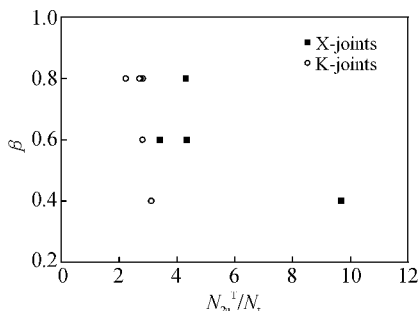


图 11 N_{2u}^T 与 N_t 结果比较

Fig. 11 Comparison of N_{2u}^T with N_t

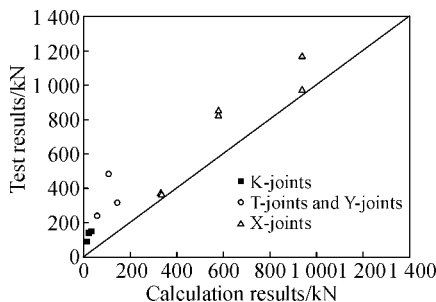


图 12 N_{2u}^T 与 N_{2u} 结果比较

Fig. 12 Comparison of N_{2u}^T with N_{2u}

当支主管宽度比 $\beta < 0.85$ 的受拉节点承载力可按屈服线破坏模式计算,受拉支管承载力为:

$$N_{2u} = \frac{f_{y0} t_0^2}{(1-\beta) \sin \theta} \left[\frac{2h_2}{b_0 \sin \theta} + 4 \sqrt{1-\beta} \right] \quad (2)$$

当支主管宽度比 $1 \geq \beta \geq 0.85$ 时可分别按冲剪破坏和有效宽度破坏计算,取两者较小值:

有效宽度破坏

$$N_{2u} = f_{y2} t_2 (2h_2 - 4t_2 + b_2 + b_e) \quad (3)$$

冲剪破坏

$$N_{2u} = \frac{\sqrt{3}}{3} f_{y0} t_0 (2h_2 / \sin \theta_2 + b_2 + b_{cp}) / \sin \theta_2 \quad (4)$$

$$\text{其中 } b_e = \frac{10}{b_0 / t_0} \frac{f_y t_0}{f_{y2} / t_2} b_2 \leq b_2 Z, b_{cp} = \frac{10}{b_0 / t_0} b_2 \leq b_2.$$

4 主管内填混凝土对受弯节点的性能影响

4.1 受弯节点受力机理分析

受弯节点支管所受弯矩可等效为拉压组合作用,与受压节点相似,支管受压翼缘侧主管顶板下凹变形受到主管内混凝土的限制;而支管受拉侧与受拉节点相似,但主管内混凝土阻止了主管侧板的内凹变形,顶板产生的挠曲变形小于相应的矩形钢管节点,主管内填混凝土后受弯节点承载力和抗弯刚度将高于相应的矩形钢管节点.由于受弯节点承载力由支管受拉侧控制,因此,影响受弯节点性能的主要因素与受拉节点相同.

4.2 受弯节点破坏模式及承载力计算

矩形钢管混凝土受弯节点可能的破坏模式见图 13 所示,图 13 左图为 β 较小时,支管受拉侧主管顶板产生较大挠曲变形的屈服线破坏模式;图 13 右图为 β 较大时,支管受拉侧主管顶板冲剪破坏模式.弯曲是拉压的组合,因此可以参考支管轴心受力的矩形钢管节点承载力的计算公式.图 14 为按屈服线模式和有效宽度模式计算理论值与试验值的比较,相比可以发现采用受拉支管有效宽度破坏模式计算矩形钢管混凝土节点抗弯承载力更为合理,更能够反映节点实际的破坏形式,故受弯节点承载力可以按式(5)进行计算.

$$M_u = f_{yi} (Z_i - (1 - b_e / b_i) b_i t_i (h_i - t_i)) \quad (5)$$

式中: Z_i 为支管塑性抵抗矩; b_e 为支管翼缘的有效宽度.

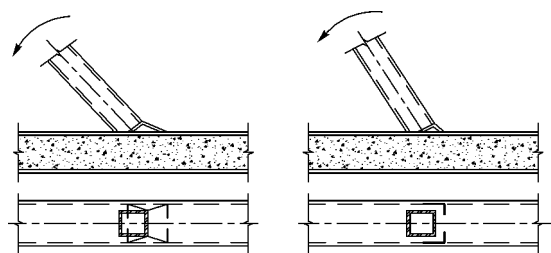


图 13 受弯节点破坏模式
Fig. 13 Failure mode of bending joints

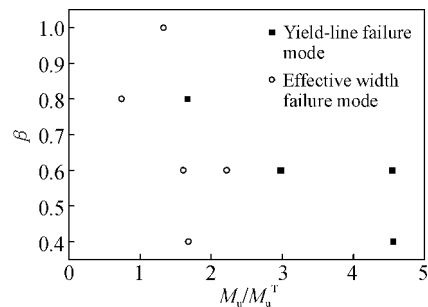


图 14 屈服线和有效宽度计算值与试验值比较
ig. 14 Comparison of test results with those of the calculation

5 结 论

本文分析了主管内填混凝土矩形钢管节点的受力机理和破坏模式,比较了主管内填混凝土和空钢管节点的受压、受拉和受弯性能,根据分析结果,可以得到如下结论:

- (1)主管内填混凝土后,受压节点较矩形钢管节点抗压承载力有明显的提高,受拉节点承载力提高不明显,影响主要体现在节点刚度上,受弯节点抗弯刚度和抗弯承载力均高于相应的矩形钢管节点受弯节点。
- (2)主管内填混凝土后改变了矩形钢管节点的破坏形式,主要的破坏模式有:受压节点为横向局部承压破坏模式;受拉节点破坏模式为屈服线破坏、冲剪破坏和有效宽度破坏;受弯节点可采用支管受拉翼缘有效宽度模型。
- (3)主管内填混凝土后节点的承载力可根据对应节点的破坏模式进行计算。

参考文献 References

[1] WARDENIER J. Hollow sections in structural applications[M]. Australia:John Wiley & Sons,2001.

[2] PACKER J A. Design guide for rectangular hollow section(RHS) joints under predominantly static loading[S]. Köln: Verlag TÜV Rheinland,1992.

[3] API RP2A-WSD. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design[S]. Washington: API Publishing Services, 2000.

[4] AISC. Load and Resistance Factor Design Specification for Steel Hollow Structural Sections[S]. Chicago AISC, 2000.

[5] GB 50017-2003,钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2003.

GB 50017-2003,Code for design of steel structures[S]. Beijing: China planning Press, 2003.

[6] 刘永健. 矩形钢管混凝土桁架节点极限承载力试验与设计方法研究[D]. 长沙:湖南大学,2003.

LIU Yong-jian. Experiments on ultimate bearing capacity and research on design method of joints of concrete-filled rectangular steel tube truss[D]. Changsha: Hunan University, 2003.

[7] 刘永健,周绪红,刘君平. 矩形钢管混凝土 T、Y 型节点受压性能试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008, 28 (5): 48-52.

LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, LIU Jun-ping. Behavior of concrete filled rectangular steel tube T-joints and Y-joints under compression[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(5): 48-52.

[8] 刘永健,周绪红,邹银生,等. 矩形钢管混凝土横向局部承压强度的试验研究[J]. 建筑结构学报,2003,24(2):42-48.

LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, ZOU Yin-sheng, at al. Experimental research on local bearing strength of steel tube under transverse concrete filled rectangular load [J]. Journal of Building Structures, 2003,24(2):42-48.

[9] 刘永健,周绪红,刘君平. 主管内填混凝土的矩形钢管 X 型节点受拉和受弯性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009,30(1):82-86,94.

- LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, LIU Jun-ping. Experimental research on rectangular steel tube X-joints with chord concrete-aside subjected to tension and bending[J]. Journal of Building Structures, 2009,30(1): 82-86,94.
- [10] 刘永健,周绪红,刘君平. 矩形钢管混凝土 K 型节点受力性能试验[J]. 建筑科学与工程学报,2007, 24(2):36-42.
- LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, LIU Jun-ping. Experiment on Force Performance of Concrete-filled Rectangular Steel Tube K-joints[J]. Journal of Building Structures, 2007, 24(2):36-42.
- [11] 周绪红,刘永健,莫涛,等. 矩形钢管混凝土桁架设计[J]. 建筑结构,2004,34(1):20-23.
- ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian, MO Tao, et al. Design of trusses with concrete-filled rectangular steel tube members [J]. Building Structure, 2004,34(1):20-23.
- [12] 刘永健,周绪红,肖龙. 矩形钢管混凝土桁架受压节点承载力[J]. 建筑结构,2004,34(1):24-26.
- LIU Yong-jian, ZHOU Xu-hong, XIAO Long. Load bearing capacity of compression joints of trusses with concrete-filled rectangular steel tube members [J]. Building Structure, 2004,34(1):24-26.
- [13] GB 50010-2002, 混凝土结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2002.
- GB 50010-2002, Code for design of concrete structures[S]. Beijing: China planning press, 2002.
- [14] PACKER J A. Concrete-Filled HSS connections [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3): 458-467.
- [15] ZHAO Xiao-Ling. Deformation limit and ultimate strength of welded T-joints in cold-formed RHS sections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2000, 53(2): 149-165.
- [16] 赵必大,王伟,陈以一,等. 钢管混凝土柱-箱梁内加劲节点的性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2010, 42(1): 15-21.
- ZHAO Bi-da, WANG Wei, CHEN Yi-yi, et al. Study on the behavior of inner2stiffened CFT column to box beam joint[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(1): 15-21.

Effect of concrete filled in chord tube on the mechanical behavior of RHS steel tube joints

LIU Jun-ping^{1,2}, LIU Yong-jian³

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Shenzhen Municipal Design and Research Institute Co., Ltd, Shenzhen 518029, China;

3. Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shaanxi Province, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To study the mechanical behavior of rectangular hollow section (RHS) steel tube joints with concrete filled in chords, mechanical behavior of compression, tension and bending are analyzed in this paper and compared with RHS steel tube joints. The results show that concrete filled in chord can improve the mechanical behavior of joints. It can obviously enhance the ultimate bearing capacity and rigidity of compression joint, and the failure mode of compression joints is local transverse compression failure. It does not have much effect on the ultimate bearing capacity of tension joints, but can enhance the rigidity of joints; and it can change the range of geometric parameters of failure mode; the failure modes of tension joint are punching failure mode, effective width failure mode and flange yield-line failure mode. The bending rigidity and ultimate bending capacity of joints are greater than RHS steel tube joints, and the failure mode of bending joints is considered as tension flange effective width failure mode of branch tube. The bearing capacity formula for three types joint are recommended according to its failure modes.

Key words: concrete-filled in chord; rectangular hollow section steel tube joints; compression; tension; bending; bearing capacity formula