

文章编号:1673-2049(2017)04-0072-06

方钢管混凝土柱-钢梁半刚性节点参数分析

徐 嫒^{1,2}, 梁思雨¹, 张力滨¹, 陈 玉³, 韩振宁¹

(1. 东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 中国地震局工程力学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080; 3. 中国兵器工业规划研究院, 北京 100053)

摘要:为了研究方钢管混凝土柱-钢梁半刚性节点的力学性能和影响因素,以方钢管混凝土柱-钢梁半刚性节点为研究对象,采用数值模拟分析方法研究了节点角钢厚度、角钢短肢长肢比及螺栓直径等参数对该类节点受力性能的影响规律,并给出了节点初始转动刚度的建议公式。结果表明:角钢厚度的变化对节点初始刚度影响较小,但对节点的塑性刚度和承载力影响较大;角钢短肢长肢比在一定范围内对节点刚度和承载力影响较明显,超过范围后只对节点的承载力有较大影响;螺栓直径的变化对节点承载力和刚度有一定影响,但影响程度较小,可不作为主要的影响参数。

关键词:方钢管混凝土柱;半刚性节点;数值模拟分析;力学性能

中图分类号:TU398 **文献标志码:**A

Parameter Analysis on Concrete-filled Square Steel Tubular Column-steel Beam Semi-rigid Connection

XU Man^{1,2}, LIANG Si-yu¹, ZHANG Li-bin¹, CHEN Yu³, HAN Zhen-ning¹

(1. School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China;
2. Institute of Engineering Mechanics, CEA, Harbin 150080, Heilongjiang, China;
3. Norinco Group Planning and Research Institute, Beijing 100053, China)

Abstract: In order to study the mechanical properties and influencing factors of semi-rigid connections between concrete-filled square steel tubular column and steel beam, the concrete-filled square steel tubular column-steel beam semi-rigid connection was taken as research object. The influence laws of the parameters such as the angle steel thickness, short and long limb length ratio of angle steel, bolt diameter on the mechanical behavior of the joint were investigated by numerical simulation. The formula for the initial rotational stiffness of the connection was given. The results show that the change of the thickness of angle steel has little influence on the initial stiffness of the connection, but it has great influence on the plastic stiffness and the bearing capacity of the connection. The short and long limb length ratio of angle steel has obvious influence on the stiffness and bearing capacity of the connection within a certain range, and it only has great influence on the bearing capacity of the connection beyond the scope. The change of bolt diameter has some influence on the bearing capacity and stiffness of the connection, but the influence degree is small, and it is not the main parameter.

Key words: concrete-filled square steel tubular column; semi-rigid connection; numerical simulation analysis; mechanical property

收稿日期:2016-12-01

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51408106);黑龙江省博士后资助项目(LBH-Z13210)

作者简介:徐 嫒(1982-),女,黑龙江五常人,东北林业大学讲师,工学博士,E-mail:xuman306@126.com。

0 引 言

钢管混凝土柱由钢管和混凝土共同作用来抵抗外力,其综合了钢与混凝土的优点,具有承载力高、延性与耐久性强的特点,被广泛使用^[1-3]。相对于圆钢管混凝土柱,方钢管混凝土柱具有各向同性、与其他构件较易连接、使用观感好的特点,因此方钢管混凝土柱已被大量应用在实际工程中^[4-5]。

节点在梁与柱之间起着传递弯矩和剪力的作用,是框架结构设计中的关键部位,也是施工中的难点^[6-7]。因此,钢管混凝土柱-钢梁结构节点受到了设计和研究人员的广泛重视。

节点根据连接性能的不同,分为刚接、铰接和半刚性连接^[8-9]。传统意义上的钢管混凝土柱-钢梁连接形式一般为刚接,但近年来的试验表明刚接节点的抗震性能较差,并且由于其连接形式的特殊性往往造成材料的浪费^[10],而完全铰接与实际工程不符。因此,为了克服完全刚接或铰接的缺点,应将梁柱节点处设计成半刚性连接。半刚性连接的节点形式能使梁端的转动能力得到提高,相对于刚接和铰接更能满足结构对于抗震的要求^[11-12]。目前较为普遍的半刚性连接形式为外伸端板连接和 T 形钢连接,但由于外伸端板连接节点的转动刚度非常大,对制作精度要求很高,并且端板变形会增大节点受荷;对于 T 形钢连接的节点,其刚度非常大,几乎为刚性。本文对钢管混凝土柱-钢梁半刚性节点的连接形式进行改进,以角钢、连接板辅以焊接作为节点的连接形式。

本文根据文献[13]提出的新型半刚性节点形式,通过有限元分析软件 ABAQUS 建立半刚性节点模型,对影响节点力学性能的主要因素进行参数分析,给出了设计建议。

1 研究模型的确定

1.1 半刚性节点形式

半刚性节点形式如图 1 所示。方钢管混凝土柱与钢梁之间采用连接角钢和连接板通过螺栓和焊缝连接,实现梁柱间半刚性连接。节点的具体构造方式详见文献[13]。节点具体尺寸如表 1 所示,混凝土强度为 C30。

1.2 加载控制

对于实际框架结构,其上柱反弯点假定为竖直方向可移动的铰,下柱反弯点假定为固定铰;梁的反弯点可视为在水平方向能移动的铰。根据以上边界

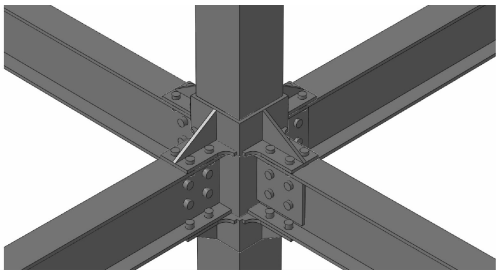


图 1 方钢管混凝土柱-钢梁半刚性节点
Fig. 1 Concrete-filled Square Steel Tubular Column-steel Beam Semi-rigid Connection

表 1 构件尺寸

Tab. 1 Component Size

构件	型号	尺寸
柱	Q235B	160 mm×160 mm×5 mm
钢梁	HN200×100b	200 mm×100 mm×5.5 mm×8 mm
螺栓	M16(10.9 级)	16 mm
角钢	Q235B	100 mm×150 mm×10 mm

条件,在柱顶部设置可转动的铰支座,限制支座的各向位移;柱底部设置铰支座,铰支座的两侧用限位梁夹紧,使支座在柱底可沿轴线方向移动。

加载方式采用柱下端施加轴向力(固定轴压比 $n=0.23$)和梁自由端施加静力荷载的方式。通过对节点受荷后位移变形的计算分析得到半刚性节点的刚度特征及承载力。构件加载如图 2 所示。

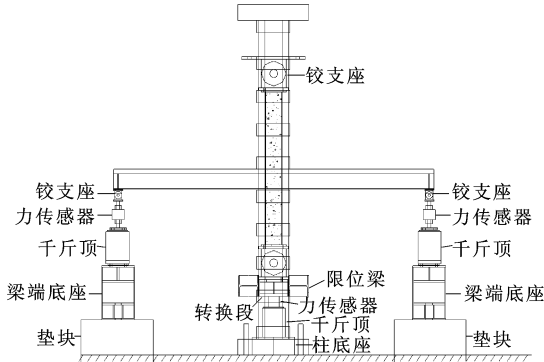


图 2 构件加载

Fig. 2 Loading of Component

根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)中对加载制度的规定,模型施加的总荷载为 60 kN。最初施加荷载时荷载间距为 10 kN,当荷载增大到节点屈服荷载的 80%后,减少加载间距。这是因为在开始施加荷载时荷载值较小,对构件的影响小,但当荷载达到一定数值后,每增加一级荷载,对构件的影响比原来更加显著。

2 参数分析

分析的参数有角钢厚度、角钢短肢长肢比及螺

栓直径。通过控制变量法逐一对上述参数进行分析,得到节点荷载-位移曲线($P-\Delta$ 曲线)和弯矩-转角曲线($M-\theta$ 曲线)。

2.1 角钢厚度

角钢厚度 t 分别采用 8,9,10,11,12 mm 进行数值模拟研究。图 3 为不同角钢厚度下节点的 $P-\Delta$ 曲线。表 2 为不同角钢厚度下的节点承载力。从图 3 可以看出,在加载初期($P=0\sim 20$ kN)5 条曲线基本重合,角钢厚度变化对节点初始转动刚度并无太大影响。当荷载 $P=20\sim 40$ kN 时,随着角钢厚度增大,承载力随之增大,增长幅度逐渐降低。 $t=8$ mm 的曲线与其他曲线相比,斜率明显较小,并且曲线斜率下降幅度较大, $t=9\sim 12$ mm 的曲线斜率在 $P=30\sim 40$ kN 阶段较 $P=10\sim 20$ kN 下降了 50% 左右,而 $t=8$ mm 的曲线斜率却下降了 75.2%。由不同角钢厚度下角钢应力云图(图 4)和上述数据可知,出现这种现象的原因是角钢厚度过薄,因此得出 $t=8$ mm 节点的破坏形态是由角钢厚度控制。

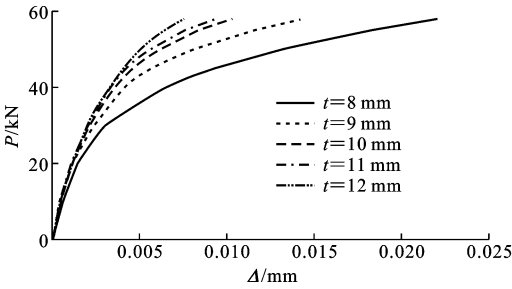


图 3 不同角钢厚度下的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 3 $P-\Delta$ Curves Under Different Thicknesses of Angle Steels

表 2 不同角钢厚度下的节点承载力

Tab. 2 Carrying Capacities of Connections Under Different Thicknesses of Angle Steels

t/mm	曲线斜率/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$		下降幅度/%
	$P=10\sim 20$ kN	$P=30\sim 40$ kN	
8	11 700	2 910	75.2
9	14 300	5 750	59.7
10	14 300	6 900	51.7
11	15 900	7 690	51.7
12	16 000	7 750	51.4

图 5 为不同角钢厚度下节点的 $M-\theta$ 曲线。从图 5 可以看出,角钢厚度对节点初始转动刚度影响不是很大,但当对曲线初始阶段($M=0\sim 20$ kN \cdot m)进行放大后可以看出,随着角钢厚度的增加,节点初始转动刚度增大。当弯矩值达到 $M=13$ kN \cdot m 时,节点转角差值最大,其中 $t=8$ mm 的转角最大,

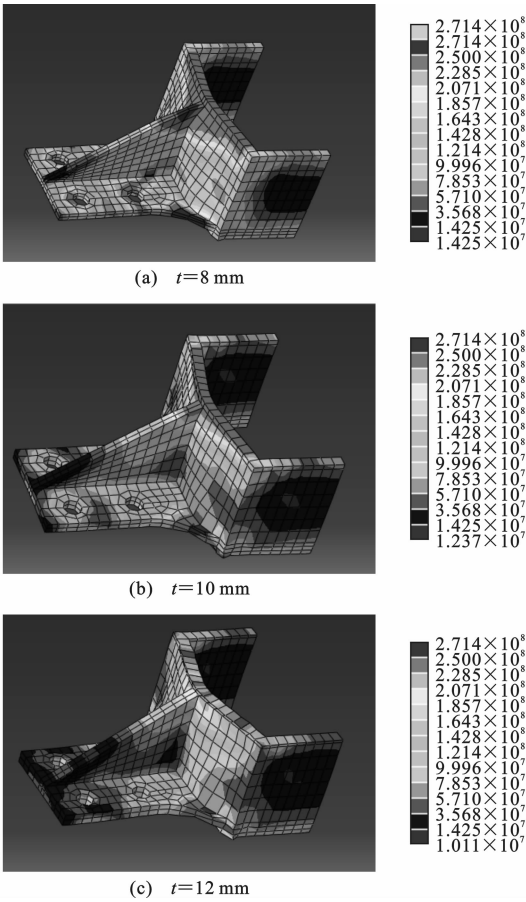


图 4 不同角钢厚度下的角钢应力云图(单位:MPa)

Fig. 4 Stress Nephograms Under Different Thicknesses of Angle Steels (Unit: MPa)

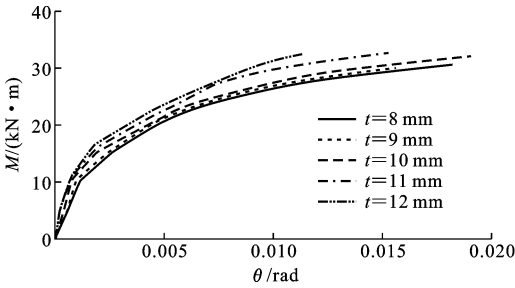


图 5 不同角钢厚度下的 $M-\theta$ 曲线

Fig. 5 $M-\theta$ Curves Under Different Thicknesses of Angle Steels

为 $\theta=1.34\times 10^{-2}$ rad, $t=12$ mm 的转角最小,为 $\theta=4.99\times 10^{-3}$ rad,此时可得到由于角钢厚度增大转角减少了 63%。

结合图 3,5,由曲线间距可以看出,当 $t=8\sim 10$ mm 时角钢厚度变化对节点承载力影响较大,当 $t=10\sim 11$ mm 时角钢厚度对节点转动刚度影响较明显,由于 $t=8$ mm 时节点承载力和转动刚度都很低,因此节点角钢厚度的最适范围在 $t=9\sim 11$ mm。

2.2 角钢短肢长肢比

角钢长肢长度保持 150 mm 不变,通过改变短肢长度研究短肢长肢比对角钢性能的影响。角钢短肢长度及短肢长肢比 k 取值如表 3 所示。

表 3 角钢短肢长肢比

Tab. 3 Short and Long Limb Ratios of Angle Steels

短肢长度 l/mm	80	90	100	110	120
k	0.53	0.60	0.67	0.73	0.80

图 6 为不同短肢长肢比下节点 $P-\Delta$ 曲线。从图 6 可以看出,加载初期($P=0\sim 20\text{ kN}$)至加载中期($P=20\sim 40\text{ kN}$)这一过程中,5 条曲线由基本重合发展到有细微差别,但总体上并无太大差别,短肢长肢比在荷载较小的情况下对节点影响不显著。当加载到 $P=40\text{ kN}$ 后,随着短肢长肢比的增加,承载力明显增大(表 4)。由表 4 中斜率下降幅度可以看出,在 $k=0.60\sim 0.73$ 期间每增加一级荷载,承载力下降幅度较小,平均值仅为 18.11%,而 $k=0.53$ 和 $k=0.80$ 时下降幅度却较大; $k=0.53$ 与 $k=0.60$ 相比,下降幅度最大,下降了 23.15%; $k=0.80$ 与 $k=0.73$ 相比,下降了 19.66%。

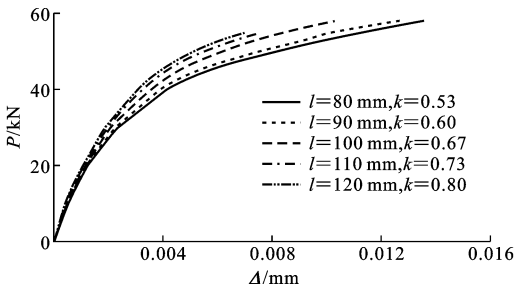


图 6 不同角钢短肢长肢比下的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 6 $P-\Delta$ Curves Under Different Short and Long Limb Ratios of Angle Steels

表 4 不同角钢短肢长肢比下的节点承载力

Tab. 4 Carrying Capacities Under Different Short and Long Limb Ratios of Angle Steels

k	曲线斜率/ $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$		下降幅度/%
	$P=40\sim 43\text{ kN}$	$P=43\sim 45\text{ kN}$	
0.53	3 614	2 777	23.148 1
0.60	4 000	3 125	18.840 6
0.67	5 357	4 347	18.840 6
0.73	6 000	5 000	16.666 7
0.80	6 382	5 128	19.658 1

图 7 为不同短肢长肢比下节点的 $M-\theta$ 曲线。从图 7 可以看出,在加载初期($M=0\sim 10\text{ kN}\cdot\text{m}$)短肢长肢比对节点初始转动刚度影响不明显。当节点加载在 $M=10\sim 20\text{ kN}\cdot\text{m}$ 阶段时,随着短肢长肢

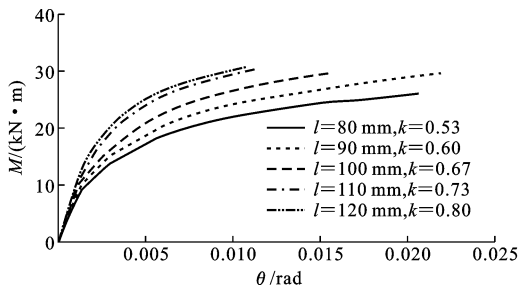


图 7 不同角钢短肢长肢比下的 $M-\theta$ 曲线

Fig. 7 $M-\theta$ Curves Under Different Short and Long Limb Ratios of Angle Steels

比增加,节点转动刚度增大,在 $k=0.53\sim 0.73$ 阶段时增大幅度显著,但当短肢长度达到 120 mm 时,节点转动刚度增长幅度明显降低。当节点转角 $\theta>0.075\text{ rad}$ 时,节点刚度相差不大。

从图 6,7 可以看出:当短肢长肢比 $k<0.60$ 时,节点承载力降低幅度小,刚度降低幅度大;当短肢长肢比 $k>0.73$ 时,节点承载力和刚度的增长幅度都不明显。由此可知,角钢短肢长肢比的最优范围为 $0.60\sim 0.73$ 。

2.3 螺栓直径

虽然实际应用中并没有 M17,M19 两种型号的螺栓,但为使得分析数据更全面,分别采用直径 d 为 16,17,18,19,20 mm 的 10.9 级摩擦型高强螺栓。在《钢结构设计规范》(GB 50017—2003)中规定 M16 与 M20 高强螺栓对应的预紧力分别为 100 kN 和 155 kN。M17,M18,M19 三种型号螺栓预紧力均通过线性内插求得,具体数值见表 5。

表 5 螺栓预紧力

Tab. 5 Pre-tightening Forces of Bolts

d/mm	16	17	18	19	20
预紧力/kN	100	110	125	140	155

图 8 为不同螺栓直径下节点的 $P-\Delta$ 曲线。M17 与 M16 螺栓相比,刚度增长幅度较大;随着螺栓直径增大,节点刚度增大,但刚度增长幅度随着直径增大逐渐降低(表 6)。表 7 为节点变形为 0.703 mm 时不同螺栓直径下节点所受荷载,其中 M18,M19 和 M20 螺栓的承载力接近,并未有大幅度提升;由表 7 可知,在同一变形条件下,节点承载力随着螺栓直径的增加而增加,但增幅较小。

图 9 为不同螺栓直径下节点的 $M-\theta$ 曲线。由图 9 可知,节点转动刚度随着螺栓直径增大而增大。结合表 6 可知,节点初始转动刚度增长幅度随着螺栓直径增大而逐渐减小。

由图 8,9 和表 6 可知:当螺栓直径由 16 mm 增

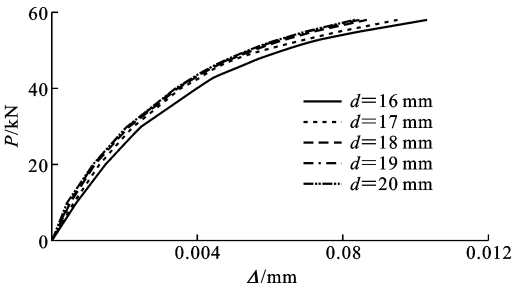


图 8 不同螺栓直径下的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 8 $P-\Delta$ Curves Under Different Bolt Diameters

表 6 不同螺栓直径下的节点力学性能
Tab. 6 Mechanical Properties of Connections Under Different Bolt Diameters

d/mm	转动刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$)	转动刚度增 长幅度/%	线刚度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$)	线刚度增 长幅度/%
16	5 258		1 604	
17	5 342	1.60	1 948	0.21
18	6 282	17.60	2 112	0.08
19	7 114	13.25	2 290	0.08
20	8 036	13.01	2 343	0.02

表 7 不同螺栓直径下的节点承载力

Tab. 7 Carrying Capacities of Connections Under Different Bolt Diameters

d/mm	变形/mm	承载力/kN
16	0.703	52.83
17	0.703	52.99
18	0.703	54.46
19	0.703	54.93
20	0.703	54.99

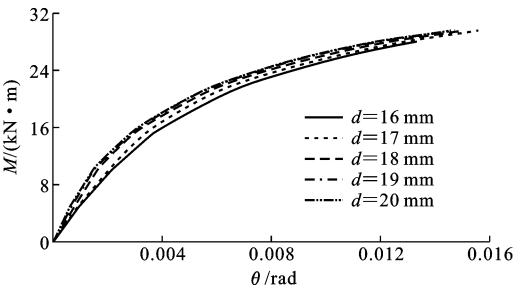


图 9 不同螺栓直径下的 $M-\theta$ 曲线

Fig. 9 $M-\theta$ Curves Under Different Bolt Diameters

加到 20 mm 时节点刚度增长了 23.82%，转动刚度增长了 55.30%，承载力增长了 25.86%；随着螺栓直径增大，刚度和承载力都有所增大，但增长幅度逐渐减小。螺栓 M19 与 M20 的曲线接近于重合，说明螺栓直径增长到一定程度后(M19)，继续增加螺栓直径，节点力学性能并不会大幅度提升。

2.4 节点刚度公式

通过对角钢厚度、短肢长肢比和螺栓直径 3 个

参数的研究，得到螺栓直径对节点刚度和承载力的影响较小，因此仅以角钢厚度和短肢长肢比 2 个参数作为计算节点初始转动刚度公式的影响参数，利用已知节点的刚度推算出节点关于角钢厚度和短肢长肢比两参数的公式。随着角钢厚度 t 和短肢长肢比 k 的变化，节点初始转动刚度 S 如表 8 所示。

表 8 节点的初始转动刚度

Tab. 8 Initial Rotational Stiffnesses of Connections

组号	t/mm	k	$S/(\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1})$
1	8	0.67	8 567
2	9	0.67	11 552
3	10	0.67	12 532
4	11	0.67	11 455
5	12	0.67	10 098
6	10	0.53	6 512
7	10	0.73	12 041
8	10	0.80	11 759

由以上数据经过 Auto2Fit 进行数值计算后得到 t 和 k 对节点初始转动刚度的影响，由于短肢长肢比数值过小，因此将其放大 100 倍后代入公式 (1)，(2) 中，得

$$S = -675t^2 - 14n^2 + 206tn + 4\,351 \quad (1)$$

$$n = 100k \quad (2)$$

不同角钢厚度和短肢长肢比的节点初始转动刚度公式(1)所得计算值与真实值存在一定差异，将结果列于表 9。

表 9 初始转动刚度计算值与真实值对比

Tab. 9 Comparisons Between Calculated and True Values of Initial Rotational Stiffnesses

组号	初始转动刚度/($\text{kN} \cdot \text{m} \cdot \text{rad}^{-1}$)		相对误差/%
	计算值	真实值	
1	8 721	8 567	1.78
2	11 048	11 552	4.37
3	12 025	12 532	4.04
4	11 652	11 455	1.71
5	9 929	10 098	1.67
6	6 705	6 512	2.95
7	12 625	12 041	4.84
8	12 051	11 759	2.48

通过验算，可认为公式(1)基本可量化节点初始转动刚度随着角钢厚度和短肢长肢比的变化而改变的规律。

3 结 语

(1)角钢厚度变化对节点初始转动刚度影响较小，但对节点塑性刚度和承载力影响较大。随着角

钢厚度增大,节点承载力和刚度逐渐增大,当角钢厚度较薄时,节点破坏主要由角钢厚度控制。

(2)当角钢短肢长肢比小于 0.60 时,随着短肢增加,节点承载力和刚度无明显变化;当 k 在 0.60~0.73 之间时,对节点影响较大;当 k 大于 0.73 时,短肢增加可提高节点承载力,但对刚度影响较小。

(3)随着螺栓直径增加,节点刚度和承载力都有所增长,但增长幅度随着螺栓直径增加而逐渐降低,说明螺栓直径达到一定程度后不能继续作为影响节点刚度和承载力的主要参数。

(4)通过研究角钢厚度、短肢长肢比和螺栓直径 3 个参数对节点力学性能的影响,给出了钢管混凝土柱-钢梁角钢连接半刚性节点初始转动刚度建议计算公式。

参考文献:

References:

- [1] 钟善桐,张文福,屠永清,等. 钢管混凝土结构抗震性能的研究[J]. 建筑钢结构进展,2002,4(2):3-15.
ZHONG Shan-tong, ZHANG Wen-fu, TU Yong-qing, et al. The Research of Seismic Behaviors for Concrete-filled Steel Tubular (CFST) Structures[J]. Progress in Steel Building Structures, 2002, 4(2): 3-15.
- [2] 王铁成,张磊,赵海龙,等. 钢管混凝土柱抗震性能参数影响分析[J]. 建筑结构学报,2013,34(增1):339-344.
WANG Tie-cheng, ZHANG Lei, ZHAO Hai-long, et al. Analysis of Parameter Influence on Seismic Behavior of Concrete Filled Square Steel Tubular Columns[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(S1):339-344.
- [3] CORINALDESI V. Mechanical and Elastic Behaviour of Concretes Made of Recycled-concrete Coarse Aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2010,24(9):1616-1620.
- [4] 胡莉娜. 圆钢管再生混凝土柱力学性能研究[D]. 长沙:中南大学,2014.
HU Li-na. Mechanical Performance of Recycled Concrete-filled Circular Steel Tubular Columns[D]. Changsha:Central South University,2014.
- [5] LEE E T, YUN B H, SHIM H J, et al. Torsional Behavior of Concrete-filled Circular Steel Tube Columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2009, 135(10):1250-1258.
- [6] 徐桂根,聂建国. 方钢管混凝土柱内隔板贯通式节点核心区抗震性能的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011,44(8):25-32.
XU Gui-gen, NIE Jian-guo. Experimental Study of Connections of Concrete-filled Square Steel Tubular Columns with Continuous Diaphragms[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(8): 25-32.
- [7] 于长亮,郑宏,袁晓洒,等. 带侧板钢节点力学性能研究[J]. 建筑科学与工程学报,2012,29(4):74-82.
YU Chang-liang, ZHENG Hong, YUAN Xiao-sa, et al. Mechanical Behavior of Moment Resisting Connection with Side Plate Under Cyclic Loading[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(4):74-82.
- [8] 王静峰,李国强. 半连续组合梁的抗弯和转动性能[J]. 清华大学学报:自然科学版,2007,47(3):313-318.
WANG Jing-feng, LI Guo-qiang. Bending and Rotational Behavior of Semi-continuous Composite Beams[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2007, 47(3):313-318.
- [9] HABASHI H R, ALINIA M M. Characteristics of the Wall-frame Interaction in Steel Plate Shear Walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2010, 66(2):150-158.
- [10] 刘飞鹏. 新型方钢管混凝土柱-钢梁锚定式刚接节点的承载力性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2005.
LIU Fei-peng. Study on Load-carrying Capacity of New Concrete-filled Square Tubular Column to Steel Beam Connections with Anchorages[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2005.
- [11] THAI H T, UY B, KANG W H, et al. System Reliability Evaluation of Steel Frames with Semi-rigid Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121:29-39.
- [12] RAZAVI M, ABOLMAALI A. Earthquake Resistance Frames with Combination of Rigid and Semi-rigid Connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 98:1-11.
- [13] 徐嫚. 钢管混凝土柱-钢梁节点拉弯性能及框架连续倒塌性能[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
XU Man. Tension-bending Behavior of CFST Column-steel Beam Connections and Progressive Collapse Performance of Frames[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011.