

文章编号:1673-2049(2011)02-0106-08

RC梁-CCFST柱加强环式节点 抗剪承载力计算分析

金怀印,薛伟辰,周德源

(同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:对钢筋混凝土(RC)梁-圆形钢管混凝土(CCFST)柱节点核心区的抗剪机理进行了分析;基于商用软件ABAQUS,建立了综合考虑材料非线性、几何非线性以及接触非线性的有限元模型,在此基础上,对影响节点抗剪承载力的主要因素进行了参数分析,研究了轴压比、材料强度、核心区钢管壁厚、加劲肋及加强环等对节点抗剪承载力的影响;提出了RC梁-CCFST柱节点抗剪承载力的计算公式。研究结果表明:节点抗剪承载力主要由核心区混凝土、钢管及加劲肋承担,其中混凝土及钢管的相对贡献在95%左右;当轴压比从0增至0.26时,节点抗剪承载力提高近10%;节点抗剪承载力公式计算值与有限元分析结果吻合较好。

关键词:圆形钢管混凝土柱;钢筋混凝土梁;加强环;抗剪承载力;有限元分析

中图分类号:TU392.4

文献标志码:A

Calculation and Analysis of Shear Capacity of Connection with Stiffening Rings Between RC Beam and CCFST Column

JIN Huai-yin, XUE Wei-chen, ZHOU De-yuan

(School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The shear mechanism of panel zone of connection between reinforced concrete (RC) beam and circular concrete-filled steel tubular (CCFST) column was analyzed. The nonlinear finite element analysis models considering factors, such as material, geometrical and contact nonlinearities were established by using the business software of ABAQUS. Then, parametric analyses were carried out to investigate the main influences of axial compression ratio, material strength of steel tube and concrete in the panel zone, thickness of steel tube, rib stiffeners and stiffening rings and so forth on shear capacity of the connection. The calculation formula of shear capacity of connection between RC beam and CCFST column was put forward. The study results show that the shear capacity of the connection is mainly contributed by the concrete, the steel tube and the rib stiffeners in the panel zone, and the relative contribution of the concrete and the steel tube is about 95%. The shear capacity of the connection approximately increases by 10% when axial compression ratio increases from 0 to 0.26. The calculation results by the formulae are in good agreement with the results by the finite element analysis.

Key words: circular concrete-filled steel tubular column; reinforced concrete beam; stiffening ring; shear capacity; finite element analysis

0 引言

在钢管混凝土(CFST)结构中,由于钢管与核心混凝土之间具有良好的共同工作特性,不仅可改善核心混凝土的力学性能,而且可有效地避免钢管的内向局部屈曲,因此,CFST 柱具有很高的承载力和良好的延性。根据钢管截面形状的不同,CFST 柱可分为圆形钢管混凝土(CCFST)柱、矩形钢管混凝土(RCFST)柱。

目前,钢筋混凝土(RC)梁-圆形钢管混凝土(CCFST)柱框架结构体系在实际工程中应用较多,工程中常用的 RC 梁-CCFST 柱框架节点形式主要有加强环式节点、钢筋混凝土环梁式节点、钢筋贯通式节点、钢筋环绕梁变宽度式节点、劲性环梁节点等。这些节点形式各有其适用范围,其中加强环式节点具有传力明确、节点区应力分布均匀、刚度大、塑性性能好、承载力高等优点,在实际工程中应用最多。但国外现行规范尚无 RC 梁-CCFST 柱加强环式节点的相关规定,中国现行规程^[1-2]仅有部分构造规定,而未给出此类节点抗剪承载力的设计计算方法,因此有必要开展 RC 梁-CCFST 柱加强环式节点抗剪承载力计算方法的研究。

自 20 世纪 90 年代以来,为了在钢管混凝土框架结构中采用 RC 梁代替钢梁以节约钢材,中国学者开始对 RC 梁-CFST 柱框架节点进行了一些试验研究和理论分析。李至钧等^[3]进行了 3 个 RC 梁-CCFST 柱加强环式节点的试验研究,验证了此类节点的抗震性能及在震区的应用可行性,并提出了加强环应避免应力集中处颈缩断裂的建议。陈洪涛等^[4]对 RC 梁-CCFST 柱钢筋贯通式节点进行了试验研究,验证了钢筋穿心并辅以环形抗剪钢牛腿节点的整体抗震性能,并提出了钢管开洞处的加强构造措施。吕西林等^[5]进行了方钢管混凝土柱外置式钢筋混凝土环梁节点的抗震性能试验研究,试件的破坏均为梁铰破坏,并基于试验结果,提出了该类节点的设计方法,但此类节点刚度较小,不宜用于高烈度地区。曲慧等^[6]对 RC 梁-CCFST 柱钢筋环绕式节点进行了抗震性能试验研究,节点核心区钢管外包混凝土发生了剪切破坏,但核心区钢管内侧混凝土并无明显剪切破坏形态,试验结果表明,此类节点满足现行规范的抗震设计要求。李松柏等^[7]对 RC 梁-CCFST 柱加强环式节点钢筋与加强环式节点的连接形式(搭接、焊接)进行了对比试验研究,并提出了优先选用焊接连接等设计建议。目前,国外对

RC 梁-CFST 柱框架节点的相关研究尚属空白。

综上所述,目前各国针对 RC 梁-RCFST 柱框架节点抗剪承载力计算方法的研究刚刚起步,而针对 RC 梁-CCFST 柱加强环式节点抗剪承载力计算方法的研究尚属空白。本文中笔者以在建的湖南省黄花国际机场新航站楼所采用的 RC 梁-CCFST 柱加强环式节点为研究对象,对其抗剪机理进行了研究,并应用有限元分析软件 ABAQUS 对影响抗剪承载力的主要因素进行了参数分析,最后提出了 RC 梁-CCFST 柱加强环式节点抗剪承载力的计算公式。

1 节点抗剪机理分析

RC 梁-CCFST 柱加强环式节点核心区主要由钢管、混凝土、水平加强环及竖向加劲肋构成,节点构造如图 1 所示。水平地震作用下,节点核心区处于压、弯、剪复合受力状态,其受力如图 2 所示,其中, M_{ct} 、 M_{cb} 为柱端弯矩, V_{bl} 、 V_{br} 为梁端剪力,梁端弯矩 M_{bl} 、 M_{br} 及柱端剪力 V_{ct} 、 V_{cb} 将在节点核心区产生水平剪力 V_u ,水平剪力 V_u 通过加强环传至核心区钢管及竖向加劲肋,再由钢管传至核心混凝土,即水平剪力主要由核心区钢管、混凝土及加劲肋承担。

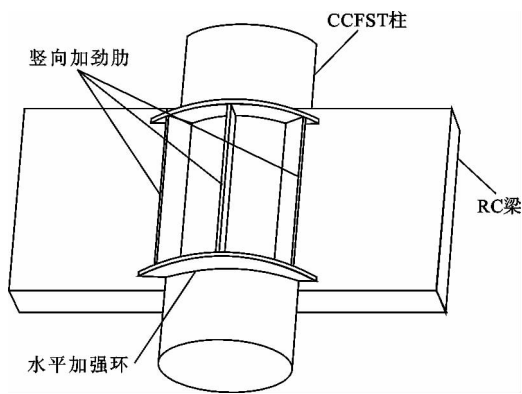


图 1 节点构造

Fig. 1 Connection Details

取节点核心区上半部分作为隔离体,如图 3 所示,其中, $V_{bl} = M_{bl}/d_b$, $V_{br} = M_{br}/d_b$,由隔离体水平剪力平衡关系可知,节点核心区的水平剪力 V_u 主要由核心区钢管、混凝土及加劲肋承担,即

$$V_u = \frac{M_{bl} + M_{br}}{d_b} - V_{ct} = V_j = V_{tn} + V_{cn} + V_{rn} \quad (1)$$

式中: d_b 为梁截面拉压合力作用点之间的距离,取其等于牛腿翼缘内侧之间的距离; V_j 为节点核心区抗剪承载力; V_{tn} 、 V_{cn} 、 V_{rn} 分别为核心区钢管、混凝土和加劲肋的抗剪贡献。

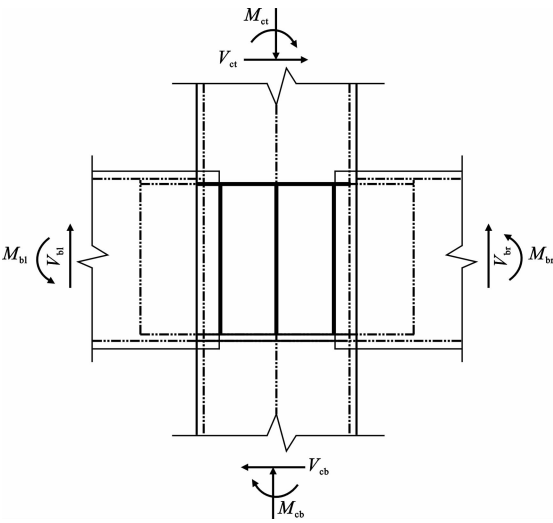


图 2 节点核心区受力

Fig. 2 Force of Connection in Panel Zone

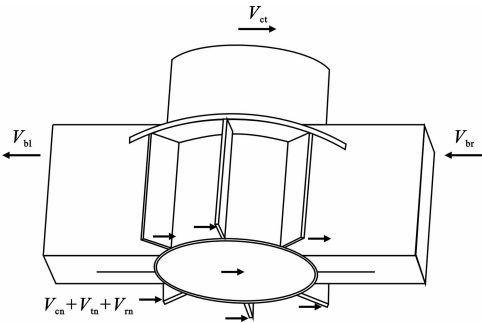


图 3 节点核心区抗剪机理

Fig. 3 Shear Mechanism of Connection in Panel Zone

2 有限元建模与试验验证

2.1 有限元建模

基于 ABAQUS/Standard 模块建立了综合考虑材料非线性、几何非线性以及接触非线性的有限元分析模型,并采用 Newton-Raphson 增量迭代(变刚度迭代)方法进行非线性增量方程组的求解。

2.1.1 单元选型及网格划分

型钢采用 8 节点二次减缩积分壳单元 S8R, S8R 单元对剪力锁闭和薄膜锁闭均不敏感。为满足一定的计算精度,在壳单元厚度方向采用 9 个 Simpson 积分点。梁柱混凝土采用三维 20 节点的二次减缩积分单元 C3D20R,以避免在复杂应力状态下单元锁死。纵筋和箍筋采用分离式模型,单元采用 2 节点的三维线性杆单元 T3D2,并采用 Embedded 命令将箍筋嵌入混凝土中,以考虑其与混凝土的相互作用。采用弹簧单元 Spring2 模拟纵筋与混凝土之间的纵向粘结滑移。

为了避免因单元出现畸异而导致求解困难,本

文中采用结构化的网格划分方法,以得到较为规整的单元形状,并对重点关心的节点核心区部位单元网格适当加密。

2.1.2 边界条件

为了真实地模拟水平荷载作用下框架结构中节点的受力状态,有限元模型中需设定以下边界条件:约束柱底截面对称中线的 3 个平动自由度,以模拟柱底固定铰支座;梁端仅约束竖向及平面外方向的 2 个平动自由度,并放松梁轴线方向的平动自由度,以模拟梁端活动铰支座。需着重说明的是,梁端活动铰支座约束应待竖向荷载施加完毕后施加^[8]。

2.1.3 材料模型

钢材采用基于经典金属塑性理论的弹塑性材料模型,在多轴应力状态下满足 Mises 屈服准则、相关流动法则。单调荷载作用下,采用等向强化法则,当塑性应变发生时,屈服应力在各个方向同等增加;反复荷载作用下,采用随动强化法则,以考虑包辛格效应。材料参数依据材性试验结果确定,泊松比为 0.3,其应力-应变关系采用三折线模型。

混凝土采用 ABAQUS 所提供的损伤塑性模型,即采用各向同性弹性损伤结合各向同性拉伸和压缩塑性理论来表征混凝土的非弹性行为。梁混凝土采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)所提供的应力-应变关系,材料参数依据材性试验结果确定,泊松比为 0.2。钢管核心混凝土为约束混凝土,需考虑钢管的约束作用对其强度及变形的影响,采用文献[9]中提出的约束混凝土的应力-应变关系。

2.1.4 界面模型

型钢与混凝土的界面模型由界面法线方向的接触和切线方向的粘结滑移构成。法线方向的接触采用硬接触,垂直于接触面的法向压力可以完全地在界面间传递。采用允许“弹性滑移”的罚摩擦公式模拟界面切向力的传递,摩擦因数为 0.3,弹性滑移量为单元特征长度的 0.005 倍。

采用非线性弹簧单元 Spring2 模拟梁钢筋与混凝土沿梁纵向的粘结滑移行为,同时采用约束方程约束另外 2 个方向的自由度。

2.1.5 加载方式

有关研究工作表明:反复荷载下钢-混凝土组合框架节点的有限元模拟较为复杂,容易导致收敛困难^[10];单调荷载作用下的荷载-位移曲线与低周反复作用下的滞回曲线的外包络线(骨架曲线)基本一致^[11],因此,本文中重点对单调荷载下节点的抗剪

受力性能进行有限元模拟与分析。具体加载流程为:①柱顶施加竖向荷载,加至轴力设计值后,保持竖向荷载恒定;②柱顶单调施加水平位移,直至节点破坏。

2.2 试验验证

为了验证上述有限元分析模型的正确性及适用性,对文献[7]中所研究的 RC 梁-CCFST 柱加强环式节点进行了非线性有限元分析,限于篇幅,仅以试件 J1-B、J2-B 为例予以说明。试件 J1-B、J2-B 节点尺寸与构造如图 4 所示,有限元几何模型如图 5 所示。

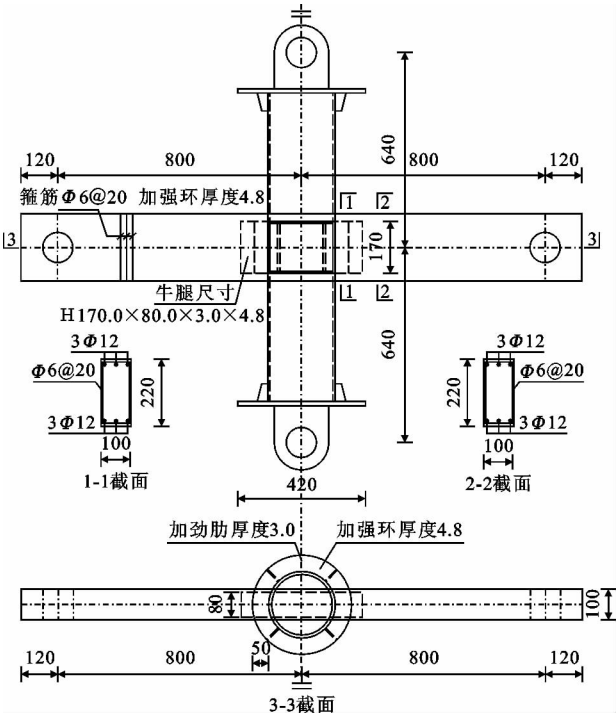


图 4 节点尺寸与构造(单位:mm)

Fig. 4 Dimensions and Details of Connections (Unit:mm)

有限元计算结果表明,试件 J1-B、J2-B 梁端混凝土首先开裂,纵筋屈服早于柱端钢管及核心区钢管,梁端首先出现塑性铰,与试验破坏现象基本一致。有限元计算柱顶荷载-位移($P-\Delta$)曲线与试验骨架曲线的比较如图 6 所示,其中 J1-B-EXP 为试件 J1-B 的试验结果,J1-B-FEM 为试件 J1-B 的有限元计算结果,其他类推。由图 6 可知:有限元计算 $P-\Delta$ 曲线与试验骨架曲线吻合较好,峰值荷载较为接近;试验骨架曲线的刚度退化较有限元计算 $P-\Delta$ 曲线显著,主要是由于有限元分析过程中未考虑钢材残余应力、支座滑移、试件初始缺陷等因素对计算结果的影响。虽然存在以上不利因素的影响,但是有限元分析结果与试验结果相差不大,因此,可用其对

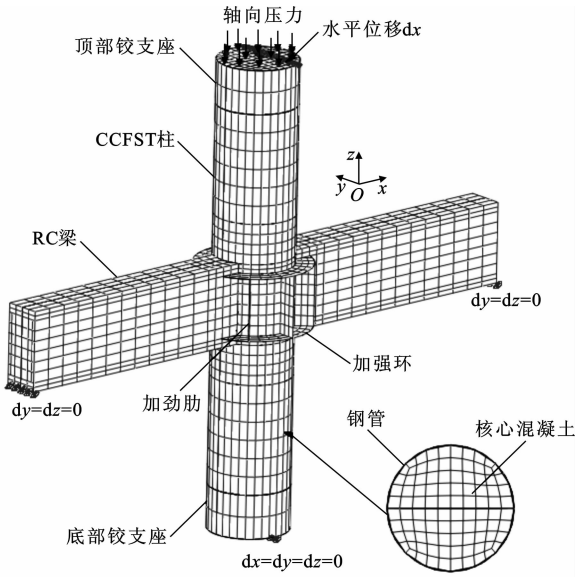
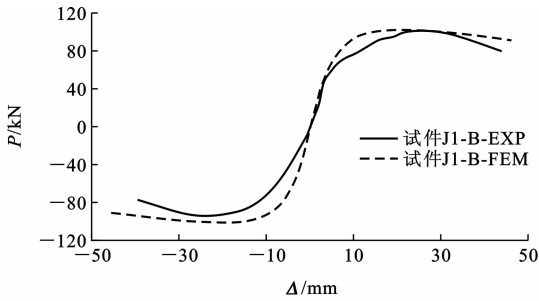
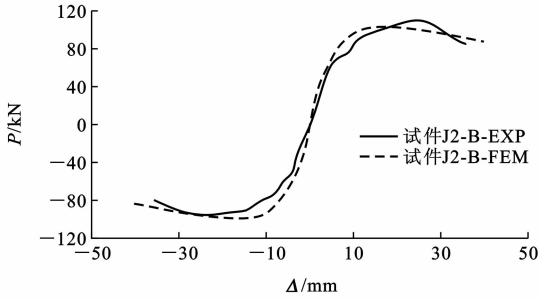


图 5 节点有限元模型

Fig. 5 Finite Element Model of Connections



(a) 试件 J1-B



(b) 试件 J2-B

图 6 有限元计算 $P-\Delta$ 曲线与试验骨架曲线对比

Fig. 6 Comparisons Between Experimental Skeleton Curves and Finite Element Analysis Results of $P-\Delta$ Curves

RC 梁-CCFST 柱加强环式节点进行分析。

3 影响因素分析

3.1 试件参数设计

抗剪机理分析表明:RC 梁-CCFST 柱加强环式节点核心区水平剪力主要由核心区钢管、混凝土及竖向加劲肋承担;上下加强环板与翼缘部位核心区钢管及竖向加劲肋组成空间钢框架,其强度及刚度

的大小将对核心区钢管、竖向加劲肋及核心区混凝土的抗剪贡献的产生一定的影响。轴压比的增大将提高核心区混凝土的约束程度,并且依据第四强度理论可知,轴压比的增大将导致核心区钢管的抗剪贡献有所降低^[12],因此,应考虑轴向压力对钢管混凝土柱框架节点抗剪承载力的影响。

综上所述,影响节点抗剪承载力的主要因素包括:①材料参数,核心区钢管、混凝土、加劲肋及加强环的强度;②几何参数,核心区钢管壁厚、加劲肋及加强环的几何尺寸;③轴压比。

为了研究上述因素对节点抗剪承载力 V_j 的影响,笔者对 RC 梁-CCFST 柱加强环式节点进行了参数分析。试件具体参数如下:①RC 梁,钢牛腿尺寸为 $H170\text{ mm} \times 80\text{ mm} \times 6\text{ mm} \times 9.6\text{ mm}$,钢筋屈服强度为 420 MPa,混凝土强度为 50 MPa,普通钢筋为 $4\Phi18$,钢筋屈服强度为 400 MPa;②上下 CCFST 柱,直径和厚度分别为 219、12 mm,钢筋屈服强度为 345 MPa,混凝土强度为 50 MPa;③核心区 CCFST 柱,直径和厚度分别为 219、6 mm,钢筋屈服强度为 345 MPa,混凝土强度为 30 MPa;④加劲肋尺寸为 $170\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,钢筋屈服强度为 345 MPa;⑤加强环,外径、内径、厚度分别为 319、219、9.6 mm,钢筋屈服强度为 345 MPa;⑥实际轴压比 $n=0.26$ 。

各试件参数设置如表 1 所示。

3.2 计算结果分析

3.2.1 材料强度的影响

节点核心区钢管及混凝土强度对节点核心区剪力-剪切变形 ($V_j-\gamma$) 曲线影响情况如图 7 所示,其中, f_y 为钢管强度, f_t 为混凝土强度。由图 7 可知,节点核心区抗剪承载力 V_j 随核心区混凝土及钢管强度的提高而增大,同时剪切变形能力有所降低。与钢管强度相比,核心区混凝土强度对节点核心区抗剪承载力的影响程度相对较小。

3.2.2 几何参数的影响

节点核心区钢管、加劲肋及加强环几何尺寸对节点核心区 $V_j-\gamma$ 曲线影响情况如图 8 所示,其中, T_p 为核心区钢管壁厚, T_R 为核心区加筋肋厚度, T_D 为加强环厚度, W_D 为加强环宽度。由图 8 可知:①随核心区钢管壁厚的增大,核心区抗剪承载力增大,但其剪切变形能力有所降低;②随加劲肋厚度的增大,节点核心区抗剪承载力稍有提高,剪切变形能力有所降低,但改变幅度均较小;③加强环的厚度、宽度的改变对节点核心区抗剪承载力无明显影

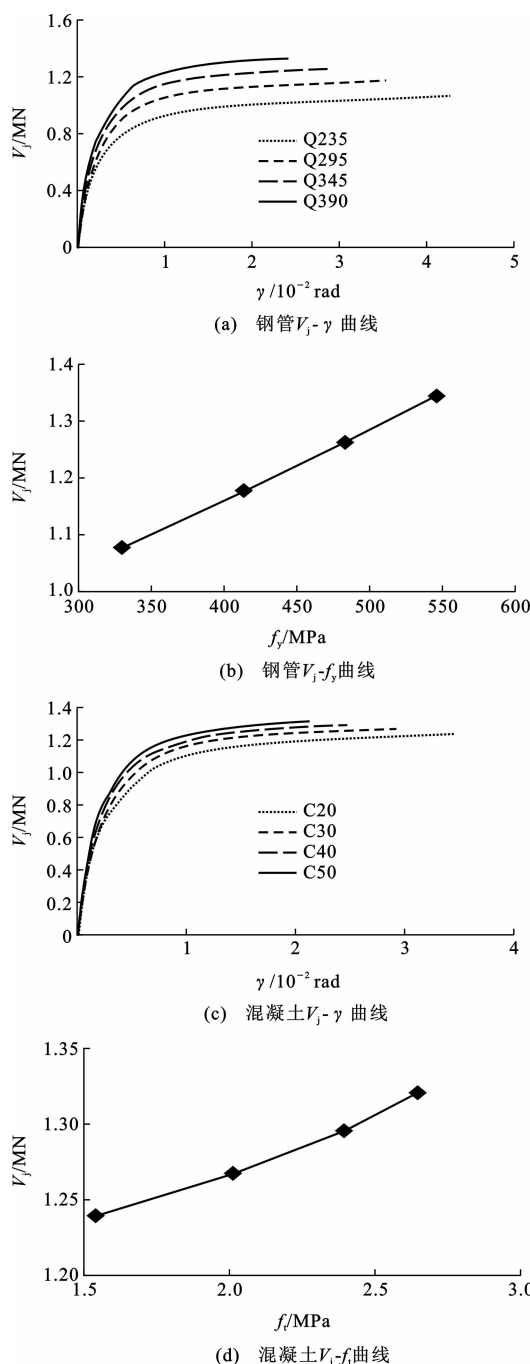


图 7 核心区钢管及混凝土强度的影响

Fig. 7 Effects of Strength of Steel Tube and Concrete in Panel Zone

响,但加强环的厚度及宽度应满足现行规程的构造要求,以确保加强环安全可靠,传力均匀,保证核心区钢管与混凝土的协同工作性能。

3.2.3 轴压比的影响

《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、《型钢混凝土组合结构技术规程》(JGJ 138—2001)表明,轴压比对钢筋混凝土框架节点及型钢混凝土框架节点均具有有利作用,但轴压比对钢管混凝土柱

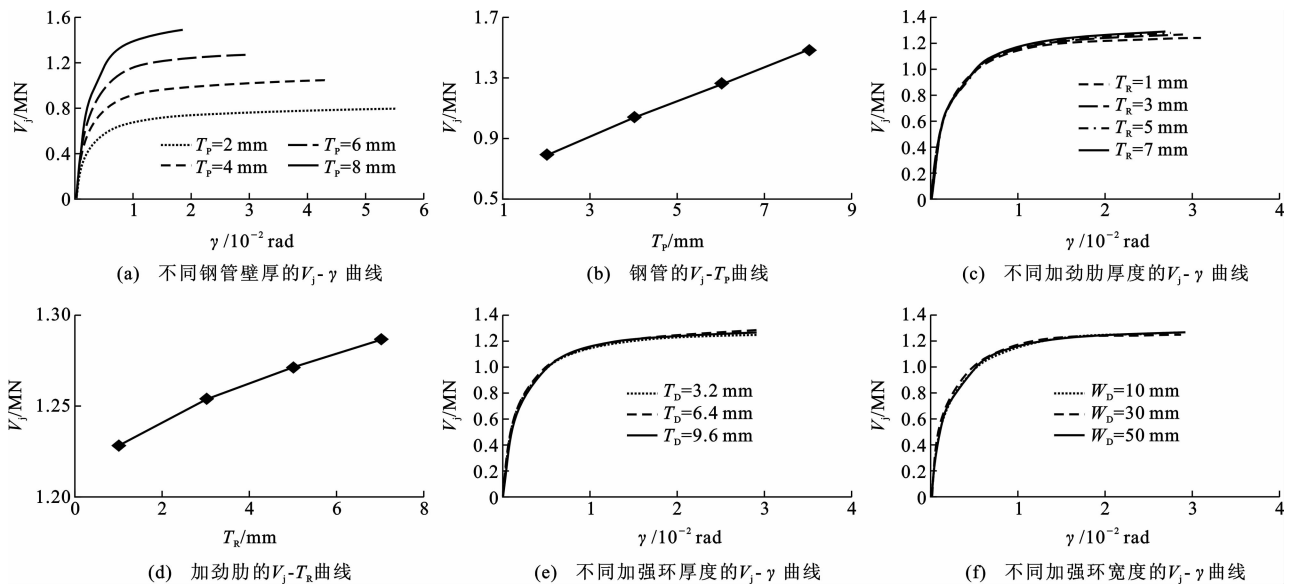


图 8 核心区钢管、加劲肋及加强环几何尺寸的影响

Fig. 8 Effects of Geometric Dimensions of Steel Tube, Rib Stiffeners and Stiffening Rings in Panel Zone

表 1 试件参数							
Tab. 1 Parameters of Specimens							
试件 编号	几何参数				材料参数		轴压 比
	核心区钢 管壁厚/ mm	加劲肋 厚度/ mm	加强环 厚度/ mm	加强环 宽度/ mm	核心区 钢管强 度/MPa	核心区 混凝土 强度/MPa	
J1	2	3	9.6	50	345	30	0.26
J2	4	3	9.6	50	345	30	0.26
J3	6	3	9.6	50	345	30	0.26
J4	8	3	9.6	50	345	30	0.26
J5	6	1	9.6	50	345	30	0.26
J6	6	5	9.6	50	345	30	0.26
J7	6	7	9.6	50	345	30	0.26
J8	6	3	3.2	50	345	30	0.26
J9	6	3	6.4	50	345	30	0.26
J10	6	3	9.6	10	345	30	0.26
J11	6	3	9.6	30	345	30	0.26
J12	6	3	9.6	50	235	30	0.26
J13	6	3	9.6	50	295	30	0.26
J14	6	3	9.6	50	390	30	0.26
J15	6	3	9.6	50	345	20	0.26
J16	6	3	9.6	50	345	40	0.26
J17	6	3	9.6	50	345	50	0.26
J18	6	3	9.6	50	345	30	0.00
J19	6	3	9.6	50	345	30	0.13
J20	6	3	9.6	50	345	30	0.39
J21	6	3	9.6	50	345	30	0.52

框架节点抗剪承载力的影响情况尚需进一步研究。工程中钢管混凝土柱的实际轴压比 n ($n = N_0 / N_u$, N_0 为柱轴向压力标准值, N_u 为柱的轴压强度承载

力标准值^[13])一般不超过 0.50,因此,本文参数分析中轴压比的限值依据实际工程确定,其上限取为 0.50。

轴压比对节点核心区 V_j - γ 曲线影响情况如图 9 所示。由图 9 可知,节点核心区抗剪承载力 V_j 随轴压比的增大而增大,当轴压比 $n = 0$ 增至 $n = 0.26$ 时,节点核心区抗剪承载力 V_j 提高 9.75%,并且随着轴压比的增大,有继续提高的趋势。主要原因在于,核心区混凝土的抗剪机理为斜压杆机理,轴向压力的增加使斜压杆的斜度变小、斜压杆面积增大,因而核心区混凝土的抗剪贡献随轴压比的增大而增大。

3.3 节点核心区水平剪力分配

为了分析节点核心区钢管、混凝土及加劲肋抗剪贡献的发展变化趋势,并对节点核心区水平剪力分配关系受各参数的影响情况进行研究。根据有限元计算结果,分别提取核心区钢管、混凝土及加劲肋的最大水平剪力,进行对比分析。

以参数分析中心试件 J3 为例,说明节点核心区混凝土、钢管及加劲肋抗剪贡献的发展变化情况,如图 10 所示。由图 10 可知:①核心区钢管达到极限强度之前,随着核心区剪切变形发展,核心区钢管及混凝土的抗剪贡献迅速增加,并且核心区钢管抗剪贡献增加速度相对较快,而核心区加劲肋的抗剪贡献很小,可忽略不计;②核心区钢管达到极限强度之后,核心区钢管的抗剪贡献基本保持不变,核心区混凝土的抗剪贡献随着剪切变形的发展继续增加,但增加速度逐渐变小,核心区加劲肋的抗剪贡献增加速度有所增大,但其抗剪贡献仍远小于核心区钢管及混凝土的抗剪贡献。

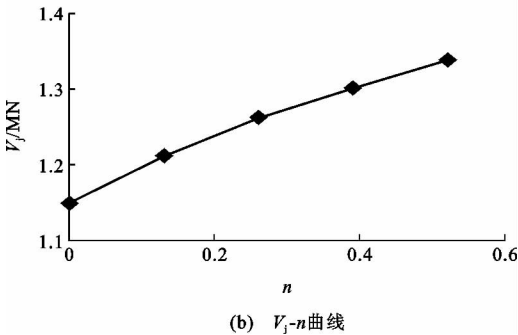
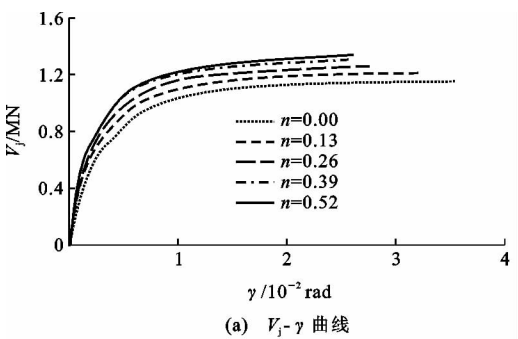


图 9 轴压比的影响

Fig. 9 Effects of Axial Compression Ratios

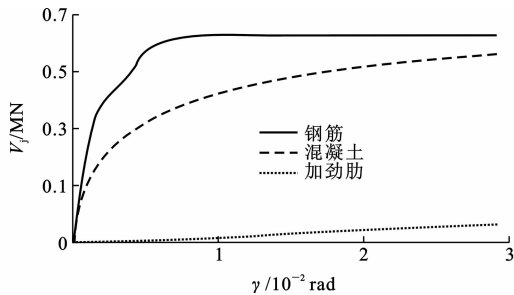


图 10 试件 J3 的节点核心区水平剪力分配

Fig. 10 Horizontal Shear Force Distributions of Specimen J3 in Panel Zone

部分试件节点核心区水平剪力分配情况如表 2 所示,由表 2 可知:

(1)节点核心区抗剪承载力 V_j 主要由核心区钢管及混凝土承担,抗剪相对贡献在 95% 左右,而加劲肋的抗剪贡献较小,抗剪相对贡献仅为 5%。

(2)核心区钢管的抗剪贡献随钢管壁厚及钢管强度的增大而增大,轴压比从 0 增至 0.26 时,核心区钢管的抗剪贡献略有降低,降低幅度小于 1%。

(3)核心区混凝土的抗剪贡献,随混凝土强度及轴压比的增大而增大。

(4)随着加劲肋厚度的增大,加劲肋抗剪贡献有所提高,核心区钢管及混凝土的抗剪贡献基本不变。

4 抗剪承载力计算方法

由 RC 梁-CCFST 柱加强环式节点抗剪机理及

表 2 各参数对节点核心区水平剪力分配的影响
Tab. 2 Effects of Different Parameters on Distributions of Horizontal Shear Forces in Panel Zone

试件参数		抗剪贡献/kN				抗剪相对贡献/%		
		核心区 混凝土	核心区 钢管	加劲肋	节点核 心区	核心区 混凝土	核心区 钢管	加劲 肋
核心区	Q235	614.6	390.2	71.2	1 076.0	57.1	36.3	6.6
钢管	Q295	615.4	494.7	65.5	1 175.7	52.3	42.1	5.6
强度	Q345	613.4	588.1	59.5	1 261.0	48.6	46.6	4.7
核心区	C20	586.0	585.3	64.4	1 235.7	47.4	47.4	5.2
混凝土	C30	613.4	588.1	59.5	1 261.0	48.6	46.6	4.7
强度	C40	634.7	598.1	54.2	1 287.1	49.3	46.5	4.2
核心区	2	583.4	193.1	17.1	793.7	73.5	24.3	2.2
钢管壁	4	607.6	383.4	48.5	1 039.5	58.5	36.9	4.7
厚/mm	6	613.4	588.1	59.5	1 261.0	48.6	46.6	4.7
加劲肋	3	613.4	588.1	59.5	1 261.0	48.6	46.6	4.7
厚度/ mm	5	610.3	590.8	72.6	1 273.8	47.9	46.4	5.7
	7	608.1	593.1	83.6	1 284.7	47.3	46.2	6.5
轴压比	0.00	504.0	593.2	54.8	1 149.0	43.9	51.4	4.8
	0.13	558.2	591.9	61.1	1 211.1	46.1	48.9	5.0
	0.26	613.4	588.1	59.5	1 261.0	48.6	46.6	4.7

参数分析结果可知,节点抗剪承载力为节点核心区钢管、混凝土及加劲肋项抗剪贡献的叠加,并需考虑轴压比的有利影响。

节点抗剪承载力 V_j 的计算公式为

$$V_j = V_{cn} + V_{tn} + V_{rn} + V_n \tag{2}$$

式中: V_n 为轴压力的抗剪贡献。

参照《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2002)、日本规范 AIJ 相关节点抗剪承载力的表达形式,可将式(2)表示为

$$V_j = \alpha f_t \frac{\pi (d_c - 2t_p)^2}{4} + \frac{1}{\sqrt{3}} \beta \frac{\pi d_c}{2} t_p f_p + \eta \frac{f_r}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^n (\omega_r t_r \cos \theta_i) + \delta n \frac{\pi d_c^2}{4} \tag{3}$$

式中: α 、 β 、 η 、 δ 为待定系数,具体根据有限元参数分析结果确定; d_c 、 t_p 分别为核心区钢管外径和核心区钢管壁厚; f_p 、 f_r 分别为核心区钢管强度设计值和加劲肋强度设计值; ω_r 、 t_r 、 θ_i 分别为加劲肋宽度、加劲肋厚度和第 i 个加劲肋与梁轴线方向夹角;当 $n > 0.50$ 时,取 $n = 0.50$ 。

基于 21 个试件的有限元参数分析结果,回归得 $\alpha = 6.9$ 、 $\beta = 1.2$ 、 $\eta = 0.05$ 、 $\delta = 10.3$,故 RC 梁-CCFST 柱加强环式节点抗剪承载力计算公式为

$$V_j = 6.9 f_t \frac{\pi (d_c - 2t_p)^2}{4} + 1.2 \times \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{\pi d_c}{2} t_p f_p + 0.05 \frac{f_r}{\sqrt{3}} \sum_{i=1}^m (\omega_r t_r \cos \theta_i) + 10.3 n \frac{\pi d_c^2}{4} \tag{4}$$

将21个试件的公式计算结果与有限元参数分析结果对比可知,两者吻合较好。

5 结 语

(1)对RC梁-CCFST柱加强环式节点的抗剪机理进行了分析,结果表明,节点抗剪承载力主要由核心区钢管、混凝土及加劲肋承担。

(2)基于商用软件ABAQUS,建立了综合考虑材料非线性、几何非线性以及接触非线性的RC梁-CCFST柱加强环式节点有限元模型,有限元分析结果与试验结果吻合较好。

(3)对影响RC梁-CCFST柱加强环式节点抗剪承载力的主要因素进行了参数分析。结果表明:核心区钢管及混凝土的抗剪相对贡献在95%左右;当轴压比从0增至0.26时,节点核心区抗剪承载力提高近10%;加强环对节点抗剪承载力影响不明显,主要起到传力的作用。

(4)基于节点核心区抗剪机理及有限元参数分析结果,提出了RC梁-CCFST柱加强环式节点抗剪承载力的计算公式。

参考文献:

References:

[1] DBJ 13-51—2003, 钢管混凝土结构技术规程[S].
DBJ 13-51—2003, Technical Specification for Concrete-filled Steel Tubular Structures[S].

[2] DL/T 5085—1999, 钢-混凝土组合结构设计规程[S].
DL/T 5085—1999, Code for Design of Steel-concrete Composite Structure[S].

[3] 李至钧, 阎善章. 钢管混凝土框架梁柱刚性抗震节点的试验研究[J]. 工业建筑, 1994, 24(2): 8-15.
LI Zhi-jun, YAN Shan-zhang. The Experimental Research on Rigid Aseismatic Beam-column Joints of Concrete Filled Steel Tubular Frame[J]. Industrial Construction, 1994, 24(2): 8-15.

[4] 陈洪涛, 吴时适, 肖永福, 等. 钢管混凝土框架钢筋贯通式刚性节点的实验研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1999, 32(2): 21-25.
CHEN Hong-tao, WU Shi-shi, XIAO Yong-fu, et al. The Experimental Research of Steel Bar Passed Through Rigid Joint of CFST Frame[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1999, 32(2): 21-25.

[5] 吕西林, 李学平. 方钢管混凝土柱外置式环梁节点的试验及设计方法研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(1): 7-13.

LU Xi-lin, LI Xue-ping. Experimental Study on Ring-beam Connections Located Outside the Concrete-filled Rectangular Steel Tubular Columns[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(1): 7-13.

[6] 曲 慧, 陶 忠, 韩林海. CFST柱-RC梁钢筋环绕式节点抗震性能试验[J]. 工业建筑, 2006, 36(11): 27-31, 22.
QU Hui, TAO Zhong, HAN Lin-hai. Experimental Investigation on Cyclic Performance of Cast Column-RC Beam Joints Enclosed by Rebars[J]. Industrial Construction, 2006, 36(11): 27-31, 22.

[7] 李松柏, 李桢章, 梁继忠. 钢管混凝土柱与钢筋混凝土梁不穿心节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(8): 27-31.
LI Song-bai, LI Zhen-zhang, LIANG Ji-zhong. Experimental Research on Seismic Behavior of Non-through-core Joints of Concrete Beams and Concrete Filled CHS Columns[J]. Building Structure, 2009, 39(8): 27-31.

[8] 金怀印, 薛伟辰, 杨 晓, 等. 预应力SRC梁-CFST柱节点受力性能研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(增2): 160-164.
JIN Huai-yin, XUE Wei-chen, YANG Xiao, et al. Research on Mechanical Behavior of Connections Between Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams and Concrete-filled Steel Tubular Columns[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(S2): 160-164.

[9] 尧国皇. 钢管混凝土构件在复杂受力状态下的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2006.
YAO Guo-huang. Research on Behaviour of Concrete-filled Steel Tubes Subjected to Complicated Loading States[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.

[10] LI W, HAN L H. Seismic Performance of CFST Column to Steel Beam Joints with RC Slab: Analysis[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(1): 127-139.

[11] 朱伯龙. 结构抗震试验[M]. 北京: 地震出版社, 1989: 134-147.
ZHU Bo-long. Earthquake-resistance Test of Structures [M]. Beijing: Earthquake Publishing House, 1989: 134-147.

[12] 赵鸿铁. 钢与混凝土组合结构[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 161-178.
ZHAO Hong-tie. Steel-concrete Composite Structure [M]. Beijing: Science Press, 2001: 161-178.

[13] CECS 28:90, 钢管混凝土结构设计与施工规程[S].
CECS 28:90, Specification for Design and Construction of Concrete-filled Steel Tubular Structures[S].