

预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架节点核心区受剪承载力研究

王琨^{1,2}, 时金雨¹, 徐冠普¹, 顾明君¹

(1. 扬州大学建筑科学与工程学院, 江苏 扬州 225127; 2. 江苏邗建集团有限公司, 江苏 扬州 225127)

摘要 目的 提出预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架节点核心区受剪承载力计算公式, 实现此类节点的工程应用。方法 建立预应力及非预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架中节点试件的数值模型, 并与试验结果对比, 研究预应力度、轴压比、型钢腹板厚度、钢板配箍率及角钢配钢率对试件柱顶水平荷载-曲线和节点核心区剪力-剪切变形的影响。结果 提高预应力度、角钢配钢率和型钢腹板厚度以及配箍率均可一定程度提高节点核心区的受剪承载力, 其中腹板的厚度对抗剪承载力影响最明显; 随着轴压比的增加, 节点的抗剪承载力增加并不显著, 但水平峰值荷载对应的位移在减小, 下降段延性在降低。结论 建立了预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架节点核心区的抗剪承载力计算公式, 公式计算结果与试验结果吻合较好, 可应用于工程设计。

关键词 预应力; 型钢混凝土梁; 角钢混凝土柱; 受剪承载力; 框架节点

中图分类号 TU318

文献标志码 A

Shear Capacity of Joints of Prestressed Steel Reinforced Concrete Beams to Angle-steel Concrete Columns

WANG Kun^{1,2}, SHI Jinyu¹, XU Guanpu¹, GU Mingjun¹

(1. College of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, China, 225127; 2. Jiangsu Hanjian Group Company Limited, Yangzhou, China, 225127)

Abstract: Based on parameter analysis, to study the influence of pre-stress, axial compression ratio, web thickness, steel hoop ratio and angle steel ratio on the horizontal load-curve of the specimen column and the shear-shear deformation in the core area of the node. A formula for calculating the shear bearing capacity of the core area of the prestressed steel concrete beam-angle steel concrete column frame joint is proposed. The numerical model of the node specimens in the

收稿日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(51878589, 51508495); 2018年江苏省“双创计划”资助项目; 2018年扬州市“绿扬金凤计划”资助项目; 中国博士后科学基金项目(2019M651762); 扬州大学2020年研究生实践创新计划(YSJCX20_013, XSJCX20_023); 扬州大学优秀青年骨干教师人才项目(2016)

作者简介: 王琨(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事钢-混凝土组合结构和工程抗震等方面研究。

prestressed and non-prestressed steel concrete beam-angle steel concrete column frame was established and compared with the test. As result, increasing the degree of prestress, the ratio of angle steel distribution, the thickness of the section steel web and the ratio of hooping can all improve the shear bearing capacity of the core area of the node to a certain extent. The thickness of the web has the most obvious influence on the shear bearing capacity; With the increase of compression ratio, the shear capacity of the joint is not significantly increased, but the displacement corresponding to the horizontal peak load is decreasing, and the ductility of the descending section is decreasing. The calculation formula for the shear bearing capacity of the core area of the prestressed steel concrete beam-angle steel concrete column frame joint is established, which is in good agreement with the experimental results.

Key words: prestressing; steel reinforced concrete beam; angle-steel concrete column; shear capacity; frame joint

预应力型钢混凝土梁结合了型钢混凝土梁与预应力混凝土梁的优点,如较高的承载力、刚度及良好的抗震性能,目前已在跨度和重荷等结构中得到了广泛的应用^[1-5]。角钢混凝土柱是将普通钢筋混凝土柱中的钢筋替代为角钢、箍筋替代为钢板箍所形成的一种空腹式型钢混凝土构件,与普通钢筋混凝土柱相比,具有更高的承载力和延性^[6-8]。在此基础上形成的预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架结构也表现出优良的抗震性能,已应用于既有房屋的套建增层改造中^[9-12]。

在前期工作中,本课题组开展了型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架边节点的有限元数值模拟,探讨了此类节点的受剪性能^[13]。在此基础上,完成了预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架中节点的滞回性能试验^[14],研究了不同预应力度和轴压比下节点的抗震性能。目前,有关预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架节点的设计方法目前还鲜有报道。然而,由于预应力对节点核心区抗剪承载力的提高可能受到角钢的影响,同时角钢和钢板箍对节点核心区的约束作用也不明确,节点内钢梁腹板屈服范围亦难以界定。因此,笔者在试验基础上,建立了预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架节点的有限元模型,并开展参数分析,揭示了预应力度、轴压比、型钢腹板厚度、钢板配箍率及角钢配箍率对节点水平荷载-位移曲线和核心区剪力-

剪切变形的影响,提出了基于型钢腹板、钢板箍、预应力筋和混凝土贡献的核心区抗剪承载力计算公式。研究表明,节点核心区的抗剪承载力计算公式计算结果与试验值吻合较好,可为我国在实际工程中推广应用此类框架结构和相关规范修订提供基础资料和技术支撑。

1 试验概况

笔者制作了3个预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱组合节点(编号分别为SJ-1、SJ-2、SJ-3)以及1个非预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱组合节点(编号为SJ-4)。4个试件轴压比分别为0.15、0.31、0.15、0.15,构造配筋如图1所示。为便于理论分析,预应力筋直线布置。所有试件混凝土均采用C40,实测混凝土立方体抗压强度为46.8 MPa;节点试件内型钢采用I22a,型钢锚脚采用I10a,加劲肋采用厚7.5mm钢板,屈服强度分别为289.3 MPa、282.1 MPa、344.0 MPa;梁内纵筋分别采用 Φ 8和 Φ 12,屈服强度分别为394.9 MPa和399.2 MPa;梁内箍筋采用8,屈服强度为388.4 MPa;柱内角钢和钢板箍的屈服强度分别为306.9 MPa和295.8 MPa;实测预应力筋 Φ 12.7和 Φ 15.2的抗拉强度分别为1 710.0 MPa和1 940.0 MPa。试验中,水平低周往复荷载施加于柱顶,柱底与刚性地梁铰接,梁端设置可产生水平侧移的可动铰支座。

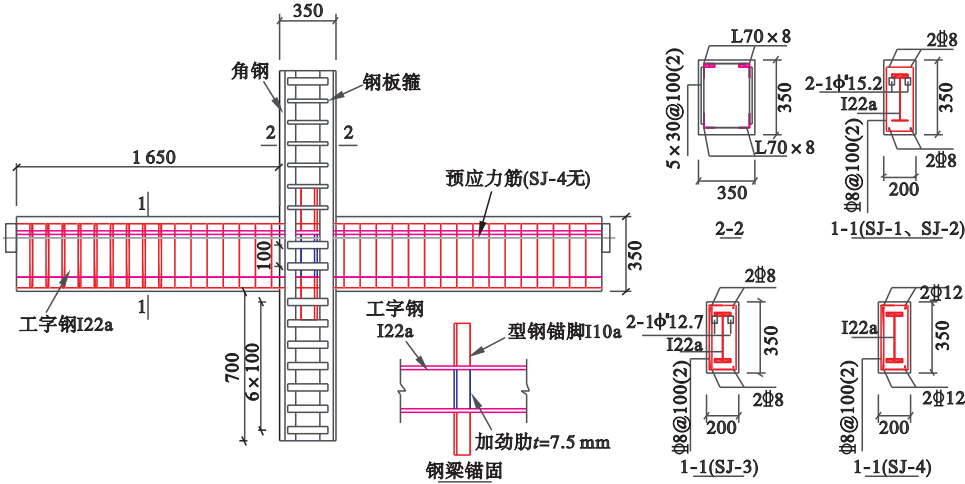


图 1 试件构造及配筋

Fig. 1 Reinforcement of specimen structure

2 有限元模型的验证

2.1 材料本构关系

梁柱内箍筋和钢板箍将分别对受压混凝土产生约束作用。在模拟中将钢板箍视作同等面积的钢筋,同时忽略工字钢对梁核心区混凝土的约束作用,则预应力型钢混凝土梁和角钢混凝土柱截面混凝土可划分为保护层和箍筋(钢板箍)约束区两个部分(见图 2)。对预应力型钢混凝土梁内箍筋约束区混凝土、角钢混凝土柱内钢板箍约束区混凝土的受压应力-应变关系采用文献[15]中的约束混凝土模型;梁柱保护层混凝土的受压本构关系以及所有混凝土受拉本构关系均采用《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)^[16]

提供的双参数本构模型;纵筋、箍筋、工字钢、角钢以及钢板箍均采用理想弹塑性本构模型;预应力筋本构关系采用三折线模型^[17]。

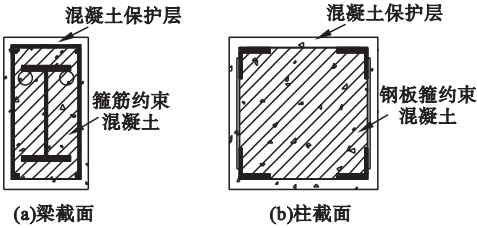


图 2 混凝土截面划分

Fig. 2 Concrete section division

2.2 单元类型与荷载施加

预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱节点试件有限元模型见图 3。混凝土采用实体单元,钢管和工字钢采用壳单元,纵筋、箍筋

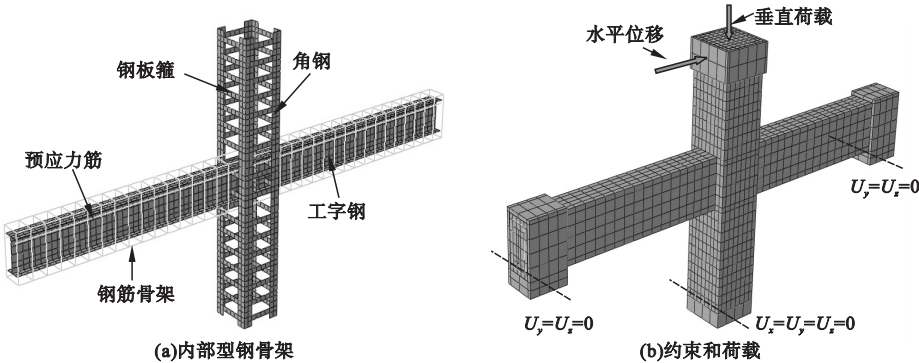


图 3 节点试件有限元模型

Fig. 3 Finite element models of joint specimens

和预应力筋均采用三维桁架单元。混凝土网格尺寸控制在 80 mm 以内,型钢网格控制在 35 mm 以内。建模过程中不考虑钢筋、型钢、钢板箍等与混凝土之间粘结滑移影响因素,其与混凝土之间的相互作用均采用 Embedded region 定义,非预应力框架节点类似。有限元模型采用位移加载方式。

2.3 结果分析

根据有限元数值模型,分析模拟得到 SJ-1 ~ SJ-4 在柱顶水平荷载作用下的荷载 - 位移 ($P-\Delta$) 曲线,并与试验滞回曲线进行对比,结果如图 4 所示。由图可知,模拟曲线的初始刚度与试验结果相比略大,水平峰值荷载与试验结果较为一致。

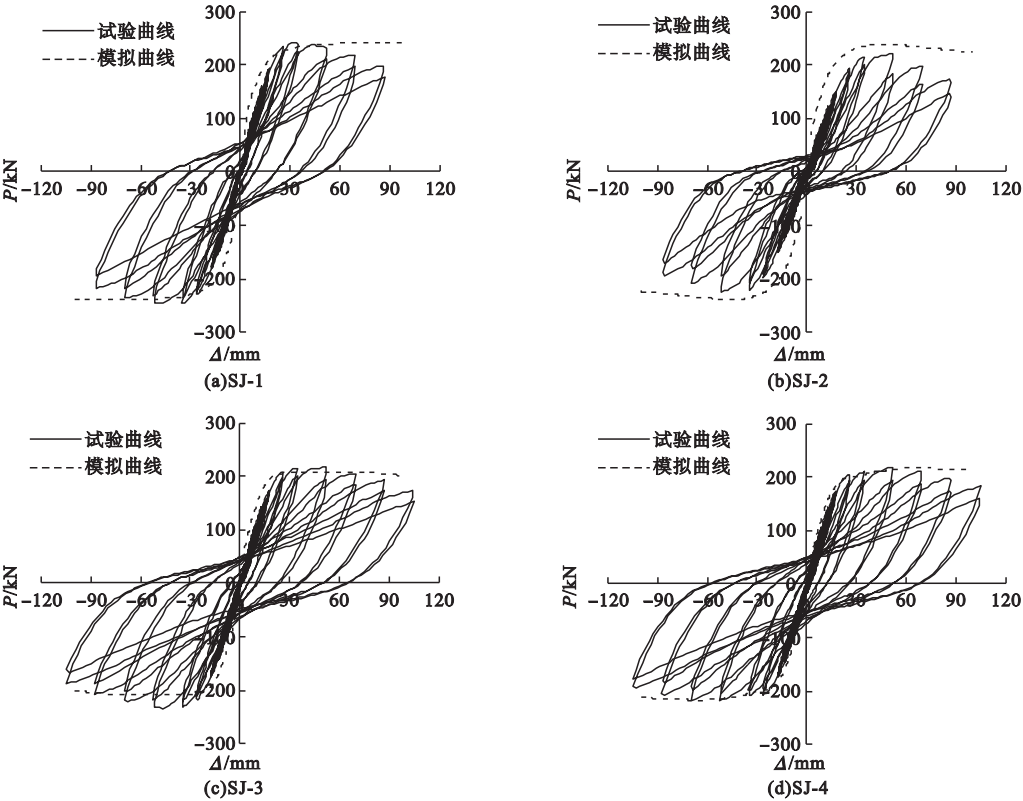
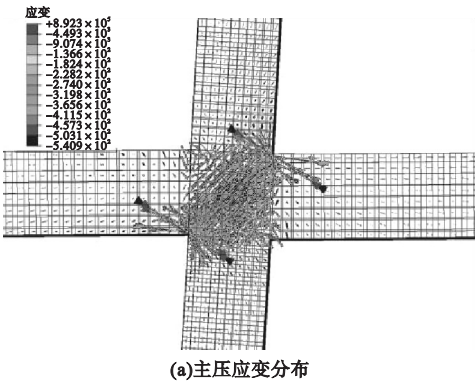


图 4 荷载-位移曲线对比结果

Fig. 4 Comparison of calculation curves and test curves

以试件 SJ-1 为例,图 5 给出了当水平荷载下降为峰值荷载的 85% 时,计算得到的节

点核心区和周边范围混凝土主压应变分布以及节点试件的实际破坏形态。



(a)主压应变分布



(b)节点破坏形态

图 5 混凝土主压应变分布及破坏形态

Fig. 5 Principle compressive strain and failure mode of concrete

通过图 5(a) 可知,在达到极限状态时,梁端受压区有小范围的混凝土超过了极限压应变,表明梁端发生了一定程度的弯曲破坏,同时节点核心区混凝土也已形成了范围较宽且呈 45° 的非常明显的斜压杆,其压应变超过了极限压应变,表明节点核心区混凝土最终发生了剪切破坏。

不同阶段的内部型钢骨架 Mises 应力分布如图 6 所示。从图中可以看出,试件屈服

时,角钢骨架范围的工字钢腹板大部分区域达到了屈服强度,同时节点域钢板箍也已屈服;荷载达到峰值时,角钢骨架范围内的工字钢腹板和钢板箍均达到了屈服,而此时角钢未出现屈服,梁端型钢翼缘屈服,表明梁端也形成了明显的塑性铰;在达到破坏荷载时,节点核心区工字钢腹板屈服区域进一步扩展,并向节点域外延伸,与梁端部工字钢腹板的屈服区域相连。

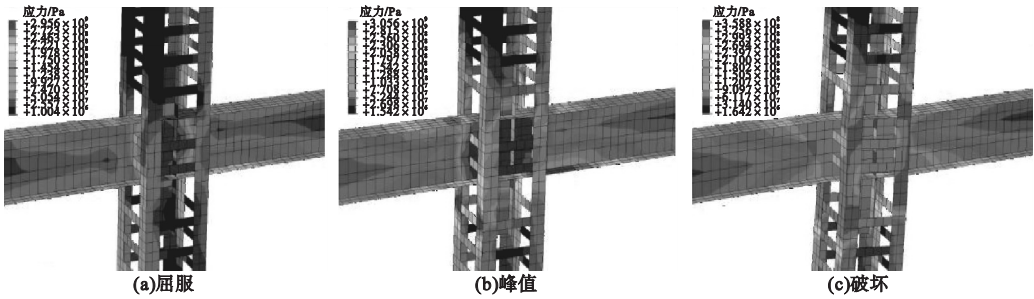


图 6 不同阶段型钢骨架应力分布

Fig. 6 Stress distribution of embedded steel at different stages

3 节点受剪承载力

3.1 节点核心区剪力与剪切变形计算方法
节点试件和其核心区域受力如图 7 所示,不考虑二阶效应的影响。

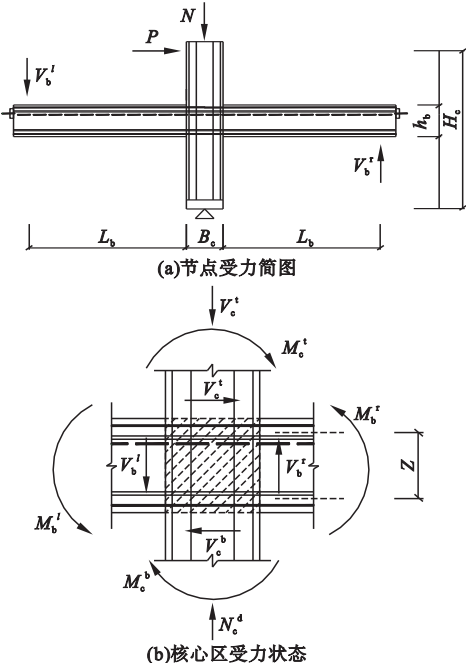


图 7 节点剪力计算示意图

Fig. 7 Joint shear calculation diagram

根据图 7(a) 可得力矩平衡方程 (1), 将式 (1) 代入式节点核心区剪力计算式 (2) 中, 可求得节点核心区剪力 V_j 。图 7 中, P 为柱顶水平荷载; N 为柱顶竖向荷载; M_b^l 、 M_b^r 分别为左右梁端弯矩; M_c^l 、 M_c^r 分别为上下柱端弯矩; V_b^l 、 V_b^r 分别为左右梁端剪力; V_c^l 、 V_c^r 分别为上下柱端剪力; N_c^l 、 N_c^r 分别为上下柱端轴力; H_c 为上下柱反弯点间的高度; Z 为梁端截面拉、压合力点之间的距离; h_b 为梁截面高度。

$$V_b^l L_b + V_b^r L_b = P H_c. \tag{1}$$

$$V_j = \frac{(M_b^l + M_b^r)}{Z} \left(1 - \frac{Z}{H_c - h_b} \right) = \frac{V_b^l L_b + V_b^r L_b}{Z} \left(1 - \frac{Z}{H_c - h_b} \right) = \frac{P H_c}{Z} \left(1 - \frac{Z}{H_c - h_b} \right). \tag{2}$$

受剪力作用时,节点核心区将由矩形转变为菱形(见图 8),可按式(3)计算核心区的剪切变形:

$$\gamma = \alpha_1 + \alpha_2 = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2ab} (a_1 + a_2 + b_1 + b_2). \tag{3}$$

式中: γ 为试件核心区的剪切角; α_1 、 α_2 分别为变形后的菱形边与原矩形边的夹角; a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 分别为核心区对角线上的缩短和伸长量。

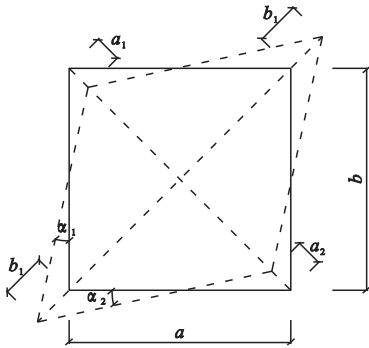


图 8 节点核心区变形

Fig. 8 Shear deformation of panel zone

3.2 参数分析

为研究预应力度 λ 、轴压比 n_0 、型钢腹板厚度 t_w 、核心区配箍率 ρ_{sv} 以及柱角钢配钢率 ρ_a 等参数对试件中节点核心区受剪承载性能的影响,进行有限元模型分析。其中预应力度 λ 分别为0、0.4、0.48,采用的预应力筋为 $2\phi^{s}12.7$ 和 $2\phi^{s}15.2$;轴压比 n_0 分别为0.1、0.3、0.5、0.7、0.9;型钢腹板厚度 t_w 分别为5 mm、7.5 mm、10 mm;核心区配箍率 ρ_{sv} 分别为1.96%、2.45%、2.94%,对应的钢板厚度为4 mm、5 mm、6mm;柱角钢配钢率 ρ_a 分别为2.59%、3.45%、4.31%,对应的角钢分别为L70×6、L70×8、L70×10。

不同参数下荷载-位移($P-\Delta$)曲线及剪力-剪切角($V_j-\gamma_j$)曲线见图9~图13。

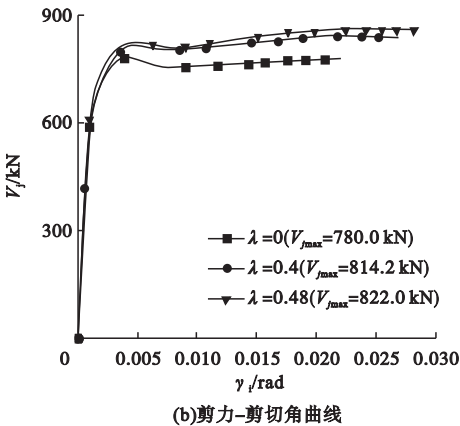
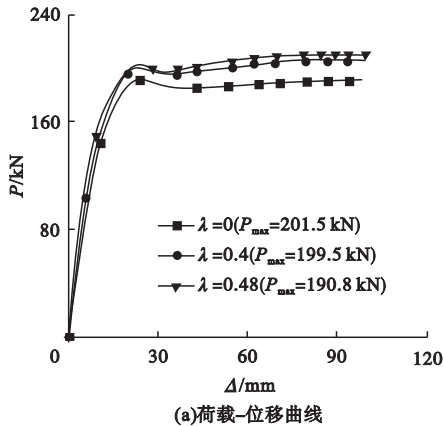


图 9 预应力度的影响

Fig. 9 Influence of prestressing level

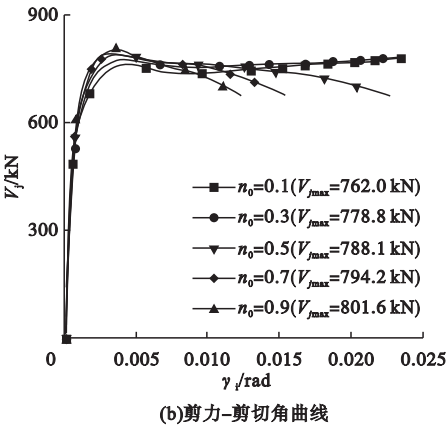
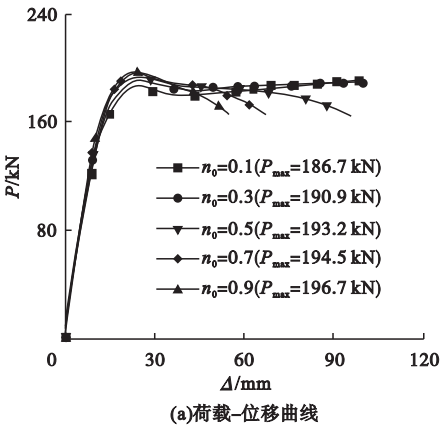


图 10 轴压比的影响

Fig. 10 Influence of axial compression ratio

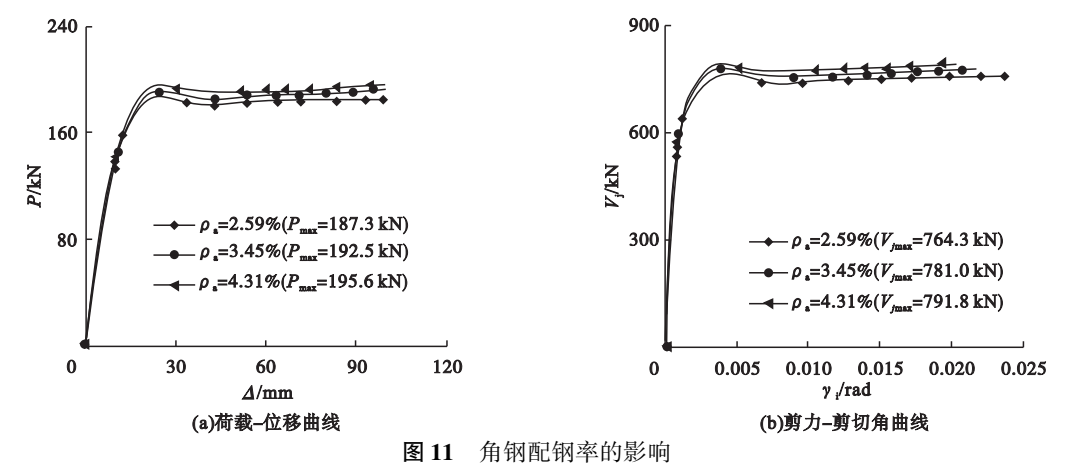


图 11 角钢配钢率的影响

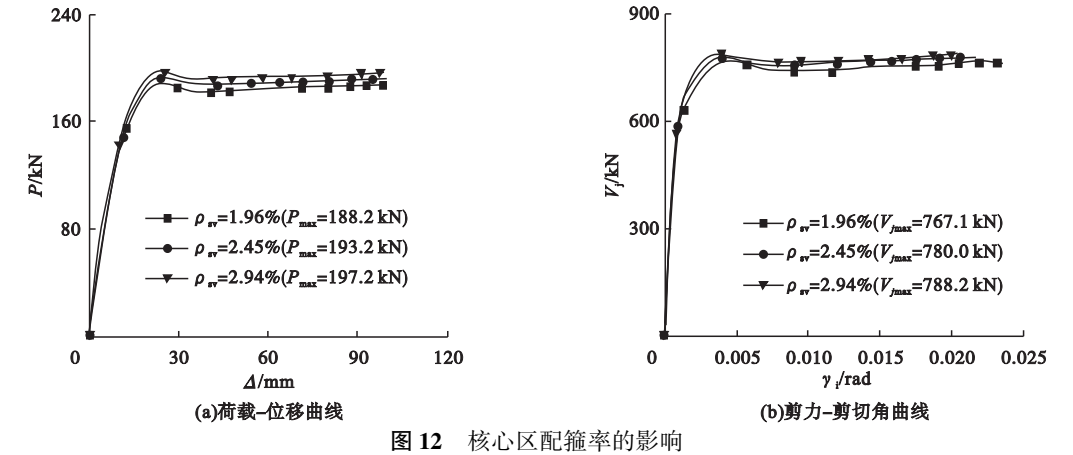


图 12 核心区配箍率的影响

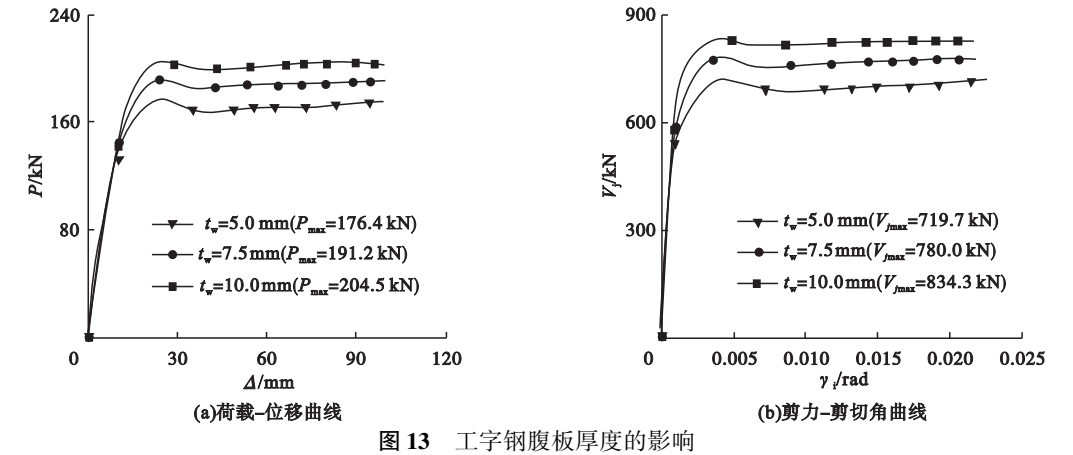


图 13 工字钢腹板厚度的影响

Fig. 13 Influence of thickness of I-shaped steel

从图 9 可以看出,随着预应力度增加,水平荷载和节点核心区抗剪承载力均随着预应力度增加而增大。从图 10 可以看出,随着轴压比的增大,节点试件的柱端水平荷载和核心区剪力随之增大,但当轴压比超过 0.5 时,轴压比的增大对提高节点核心区的受剪承载力影响较小,且轴压比越大,曲线的下降段刚度也会随之增加,表明节点试件的

延性在不断降低。从图 11 可知,随着角钢配钢率 ρ_a 的提高,角钢的销栓作用增强,节点的抗剪承载力得到相应的提高。从图 12 和图 13 可以看出,随着核心区配箍率 ρ_{sv} 以及型钢腹板厚度 t_w 的增加,节点试件的柱顶水平荷载增大,节点核心区受剪承载力也得到了提高;其中型钢腹板厚度的增加可显著提高节点的受剪承载力。

3.3 节点受剪承载力计算

根据前述受力分析,结合各参数对核心区剪力-剪切变形曲线可以看出,节点核心区的受剪承载力主要由型钢腹板、钢板箍、预应力筋和混凝土四个部分提供,这里暂不考虑型钢翼缘与型钢锚脚的抗剪作用。

通过前述有限元分析可知,角钢骨架范围内的型钢腹板均达到了屈服强度,因此型钢腹板提供的抗剪承载力 V_{ss} 可按式(4)计算:

$$V_{ss}=0.58f_{ss}A_{ss}.$$
 (4)

式中: f_{ss} 为型钢屈服强度; A_{ss} 为角钢骨架范围内的型钢腹板截面面积。

钢板箍在试验及有限元分析中均达到了屈服,则钢板箍提供的抗剪承载力 V_{sv} 可由(5)确定:

$$V_{sv}=\frac{f_{yv}A_{sv}(h_{b0}-a_s')}{s}.$$
 (5)

式中: f_{yv} 为钢板箍屈服强度; A_{sv} 为钢板箍截面面积; h_{b0} 为节点核心区截面有效高度; a_s' 为受压角钢至受压混凝土边缘的距离。

经参数分析可知,预应力筋提供的抗剪承载力 V_p 可按下式计算:

$$V_p=0.314N_p+1\,543\rho_a-49.95.$$
 (6)

为偏于安全,对预应力筋提供的抗剪承载力取参数分析结果的下限,则 V_p 可按下式计算:

$$V_p=0.2N_p.$$
 (7)

经拟合可得混凝土提供的抗剪承载力 V_c :

$$V_c=(0.23+0.8\rho_a+0.02n_0)f_cb_jh_j.$$
 (8)

式中: b_j 和 h_j 分别为节点核心区截面宽度和截面高度。

经过上述分析,可得到节点核心区受剪

承载力 V_u 的计算公式:

$$V_u=V_c+V_{ss}+V_s+V_p=(0.23+0.8\rho_a+0.02n_0)f_cb_jh_j+0.58f_{ss}A_{ss}+\frac{f_{yv}A_{sv}(h_{b0}-a_s')}{s}+0.2N_p.$$
 (9)

4 个节点试件(包含非预应力试件)的抗剪承载力试验值 V_u^t 和按式(9)计算得到的抗剪承载力 V_u^c 结果见表 1。从表中可以看出, V_u^t 和 V_u^c 相差较小,两者比值的均值为 1.01,标准差为 0.045,分别小于 1.05 和 0.05。表明此式(9)可用于此类节点抗剪承载力的设计计算。

表 1 抗剪承载力比较

Table 1 Comparison of tested and calculated shear forces			
试件 编号	抗剪承载力 试验值 V_u^t /kN	抗剪承载力式(9) 计算值 V_u^c /kN	V_u^t/V_u^c
SJ-1	1 592.5	1 487.7	1.07
SJ-2	1 449.5	1 500.0	0.97
SJ-3	1 511.6	1 474.5	1.02
SJ-4	1 405.2	1 427.7	0.98

4 结 论

(1)通过合理地选择材料本构关系和单元类型,建立的有限元数值模型可对试件开展全过程分析,计算结果与试验结果吻合较好。

(2)提高预应力度、角钢配钢率和型钢腹板厚度以及配箍率均可一定程度提高节点核心区的受剪承载力,其中腹板的厚度对抗剪承载力影响最明显;随着轴压比的增加,节点的抗剪承载力增加并不显著,但水平峰值荷载对应的位移在减小,下降段延性在降低。

(3)建立了节点核心区的抗剪承载力计算公式,并与试验结果进行了对比,两者吻合较好,可为工程设计提供参考。

参考文献

[1] XIONG Xueyu, YAO Gangfeng, SU Xiaozu. Experimental and numerical studies on seismic

- behavior of bonded and unbonded prestressed steel reinforced concrete frame beam [J]. Engineering structures, 2018, 167: 567–581.
- [2] XIONG Xueyu, YAO Gangfeng. Studies on the static behaviors of unbonded prestressed steel reinforced low strength concrete rectangular frame beams [J]. Engineering structures, 2018, 171: 982–991.
- [3] 傅传国, 李玉莹, 孙晓波, 等. 预应力及非预应力型钢混凝土框架受力及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(8): 15–21. (FU Chuanguo, LI Yuying, SUN Xiaobo, et al. Experimental study on simply supported prestressed steel reinforced concrete beams [J]. Journal of building structures, 2007, 28(3): 62–73.)
- [4] 高峰, 熊学玉, 苑辉, 等. 大跨后张有粘结预应力型钢混凝土框架梁结构设计[J]. 建筑结构, 2018, 48(8): 16–20. (GAO Feng, XIONG Xueyu, YUAN Hui, et al. Structural design of bonded post-tensioned prestressed steel reinforced concrete frame beams with large span [J]. Building structure, 2018, 48(8): 16–20.)
- [5] 贾金青, 姚大立, 余芳. 预应力型钢超高强混凝土梁受剪承载力试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(8): 126–133. (JIA Jinqing, YAO Dali, YU Fang. Experimental study on shear capacity of prestressed I-steel ultrahigh reinforced concrete beams [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(8): 126–133.)
- [6] ZHENG Wenzhong, JI Jing. Dynamic performance of angle-steel concrete columns under cyclic loading-I: experimental study [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2008(1): 67–75.
- [7] 张延年, 王柳, 刘新, 等. 粘贴角钢加固 T 型钢混凝土梁受弯性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2014, 30(4): 609–617. (ZHANG Yannian, WANG Liu, LIU Xin, et al. Experimental study on flexural behavior of T-shaped concrete beam strengthened with angle steel [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2014, 30(4): 609–617.)
- [8] 张文福, 计静, 鲁华伟, 等. 角钢约束混凝土轴压短柱力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(4): 121–127. (ZHANG Wenfu, JI Jing, LU Huawei, et al. Study on the mechanical properties of angle steel confined concrete short columns under axial compression [J]. Journal of building structures, 2012, 33(4): 121–127.)
- [9] 郑文忠, 王琨. 型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(3): 49–60. (ZHENG Wenzhong, WANG Kun. Study of seismic performance of frame structures of steel reinforced concrete beams and angle-steel concrete columns [J]. China civil engineering journal, 2011, 44(3): 49–60.)
- [10] 郑文忠, 王英, 刘思嘉. 哈尔滨南岗会堂增层改造设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(6): 45–50. (ZHENG Wenzhong, WANG Ying, LIU Sijia. Structure design for adding storeys of Harbin nangang hall [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2012, 44(6): 45–50.)
- [11] 计静, 陈晓坤, 张文福, 等. 两跨非规则预应力型钢高强混凝土框架静力性能分析与设计[J]. 建筑科学与工程学报. 2017, 34(3): 39–46. (JI Jing, CHEN Xiaokun, ZHANG Wenfu, et al. Static performance analysis and design of two-span Irregular prestressed steel reinforced high-strength concrete frames [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2017, 34(2): 39–46.)
- [12] 王琨, 袁沈峰, 曹大富, 等. 型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架恢复力模型特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(10): 1012–1023. (WANG Kun, YUAN Shenfeng, CAO Dafu, et al. Research on hysteretic model of frame structures of steel reinforced concrete beams and angle-steel concrete columns [J]. Transactions of Beijing institute of technology, 2014, 34(10): 1012–1023.)
- [13] 王琨, 袁沈峰, 郑文忠. 型钢混凝土梁-角钢混凝土柱节点抗剪力性能非线性分析[J]. 结构工程师, 2012, 28(5): 31–37. (WANG Kun, YUAN Shenfeng, ZHENG Wenzhong. Nonlinear analysis of shear performance of joints of steel reinforced concrete beam and angle-steel concrete column [J]. Structural engineers, 2012, 28(5): 31–37.)
- [14] 陈晓飞, 王琨, 罗辉辉, 等. 预应力型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架节点滞回性能试验研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(4): 101–108. (CHEN Xiaofei, WANG Kun, LUO Huihui, et al. Experimental study on hysteretic behavior of prestressed steel reinforced concrete beam-angle steel concrete column frame joints [J]. Building structure, 2021, 51(4): 101–108.)
- [15] AN Yufeng, HAN Linhai. Performance of concrete-encased CFST stub columns under axial compression [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 93(1): 62–76.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for concrete structure design: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.)
- [17] 张昊宇, 郑文忠. 1860 级低松弛钢绞线高温下力学性能[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(6): 861–865. (ZHANG Haoyu, ZHENG Wenzhong. Mechanical property of steel strand at high temperature [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2007, 39(6): 861–865.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)