

基于 ABAQUS 的 RCS 空间组合节点有限元分析

门进杰, 李 欢, 周婷婷, 熊礼全

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 对 RCS 平面、空间组合节点进行弹塑性有限元对比分析, 表明了, 空间组合节点的承载力比平面节点提高约 17%, 因此, 仅套用现有 RCS 平面组合节点承载力的公式计算空间组合节点是不合适的. 在此基础上, 进一步探讨空间节点各构造措施的受力状态及其对承载力的贡献, 并分析混凝土强度、楼板厚度、楼板宽度和钢梁腹板厚度等参数对 RCS 空间组合节点承载力的影响. 根据受力机理和参数分析的结果对平面组合节点的承载力公式进行改进, 结果表明, 改进公式可有效计算包含楼板、直交钢梁、柱面钢板和扁钢箍等构件或构造措施的 RCS 空间组合节点的抗剪承载力.

关键词: 钢筋混凝土柱-钢梁(RCS); 空间组合节点; ABAQUS; 参数分析; 公式改进

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)03-0360-09

Finite element analysis of three-dimensional composite RCS moment joints based on ABAQUS

MEN Jinjie, LI Huan, ZHOU Tingting, XIONG Lique

(School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Elastic-plastic finite element analysis was carried out on the RCS composite joints in 3D and plane, it is concluded that the bearing capacity of three-dimensional composite RCS joint 17% higher than the plane composite RCS joint. So we can't apply the existing formula for calculating the bearing capacity of the RCS composite joints in plane to calculate the bearing capacity of the three-dimensional composite RCS joint. On the basis of the above research, analyzed the influence of concrete strength, slab thickness, slab width, and steel beam web thickness to the bearing capacity of the three-dimensional composite RCS joint model. According to the parameter analysis results to improve the ASCE suggested formula and compared it with the simulation results, it turned out that the improved calculation formula for the bearing capacity of the three-dimensional composite RCS joint has a high precision.

Key words: reinforced concrete column and steel beam (RCS); 3D composite joints; ABAQUS; parameter analysis; improved formula

钢筋混凝土柱-钢梁组合框架结构(composite frame consisting of reinforced concrete column and steel beam, 简称为 RCS)是由钢筋混凝土柱和钢梁组成的一种新型结构体系^[1]. RCS 结构兼具钢筋混凝土框架和钢框架的优点, 是一种低成本、高效率的结构形式. 在 RCS 组合框架结构中, 有效的节点设计是保证结构构件传力的关键. 目前对 RCS 组合节点受力性能和承载力计算方法的研究大多集中在无楼板和直交梁的平面节点模型, 例如 Alizadeh^[2]、郭子雄^[3]、门进杰^[4]等分别对不同构造措施的 RCS 平面组合节点的受力性能进行了研究. 然而, 实际工程中, 与平面节点共同工作

的楼板和直交梁显然会影响 RCS 组合节点的受力性能和承载力. 因此, 国内外学者又围绕 RCS 空间节点的受力性能展开了研究.

Bugeja 等^[5]、Liang 等^[6]分别对不同构造的 RCS 空间组合节点进行了低周反复加载试验, 结果表明, RCS 节点在层间侧移角达到 2.5% 甚至是 5% 时仍具有良好的耗能能力. Cheng 等^[7]对 3 个足尺的 RCS 空间节点进行了试验研究, 结果表明楼板的存 在使组合节点承载力提高了 27%. 陆坚铁^[8]等完成了 7 个 1/2 缩尺的端板螺栓连接的组合节点试验. 结果表明该类型的 RCS 空间组合节点也具有 较高的耗能能力. 门进杰等^[4]也通过试验研

收稿日期: 2016-06-05

修改稿日期: 2017-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51008244); 陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目(2015JM5173, 2014JQ7245, 2014KJXX-67)

作者简介: 门进杰(1979—), 男, 博士, 教授, 主要从事混凝土结构、组合结构方面的研究. E-mail: men2009@163.com

究探讨了直交梁对节点抗震性能的影响, 结果表明, 直交梁的存在对节点的承载力和变形性能均有影响. 可见, 楼板和直交梁的存在对 RCS 组合节点的受力性能和承载力影响显著, 然而, 如何考虑其对承载力的有利作用, 并在计算公式中体现, 目前的研究还很缺乏. 本文基于有限元建模和参数分析, 探讨 RCS 空间组合节点的传力机理和承载力, 并对 ASCE 建议的承载力公式进行改进, 以适用于空间组合节点的计算.

1 RCS 空间组合节点和平面组合节点有限元分析与对比

1.1 试件设计

以文献[5]中的试件 5 为原型, 建立 RCS 空间组合节点和平面组合节点的有限元模型, 试件的主要构造措施和参数见表 1, 空间组合节点的布置图见图 1. 平面节点模型是在空间节点的基础上去除了直交梁和楼板, 其它构造措施和参数不变.

表 1 两类组合节点构造及其参数
Tab. 1 The details and parameters of the two types of composite joints

节点类型	主要构造措施	楼板尺寸及配筋	直交梁	扁钢箍	面承板	柱面钢板	抗剪栓钉	小型钢柱	柱箍筋
空间节点	楼板、直交梁、扁钢箍、面承板、柱面钢板、抗剪栓钉、小型钢柱	3200×3200×	型号同主梁 W12×22	10 mm 厚	10 mm 厚	10 mm 厚	直径 19 mm 长 76 mm	W10×22	Φ10 mm @100/200 mm
		90 mm、Φ10 mm@51/153 mm							
平面节点	扁钢箍、面承板、柱面钢板、抗剪栓钉、小型钢柱	—	—	10 mm 厚	10 mm 厚	10 mm 厚	直径 19 mm 长 76 mm	W10×22	Φ10 mm @100/200 mm

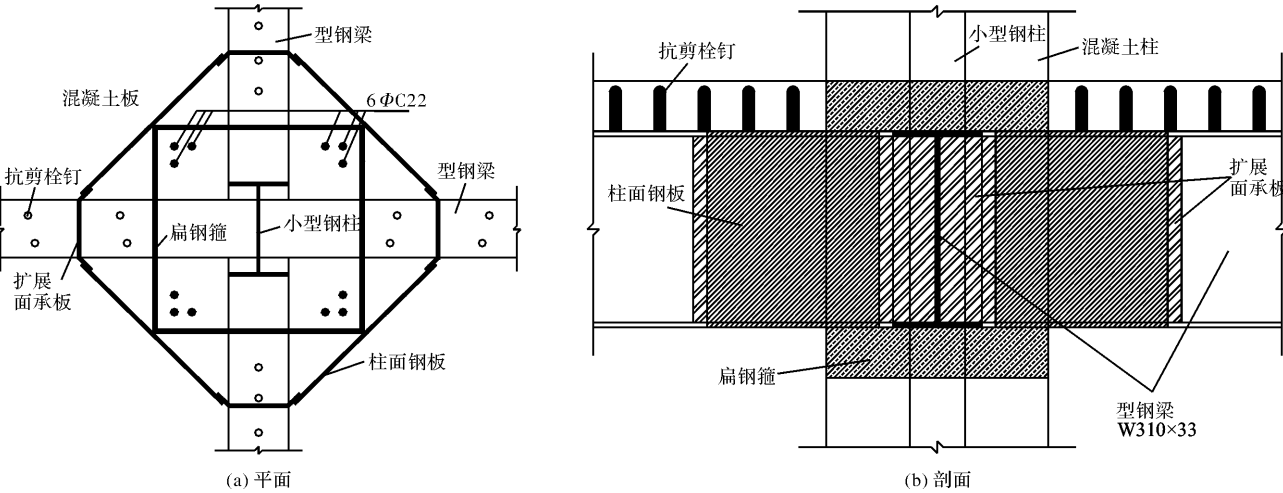


图 1 RCS 空间组合节点构造图
Fig. 1 the configuration of the spatial RCS composite joints

1.2 有限元建模

(1)材料本构模型

混凝土材料采用塑性损伤模型, 混凝土的塑性损伤理论是采用有效应力和硬化变量来表达, 通过刚度退化和损伤来描述混凝土在受拉和受压的特征, 根据混凝土不同的受力环境来确定标量损伤因子^[9]. 用 ABAQUS 中提供的受拉应力-断裂能的关系来模拟混凝土受拉软化的受力性能. 混凝土的弹性模量根据文献[10]得出.

钢筋和钢材用各向同性的弹塑性材料进行模拟, 选用 Von Mises 屈服准则作为屈服条件, 骨架曲线采用 Esmaeilly 和 Xiao^[11] 建议的曲线.

(2)单元类型及网格划分

混凝土柱、混凝土楼板都采用 C3D8R 实体单元, 钢采用 S4R 四节点壳单元. 钢筋和箍筋采用 T3D2 即三维两节点桁架单元. 为兼顾计算精度与计算成本, 网格单元尺寸为 50 mm.

(3)边界条件及荷载

约束混凝土柱底 X 、 Y 、 Z 三个方向上的位移, 顶端为自由端面节点, 通过约束梁两端 X 、 Z 方向上的位移, 使节点在 YZ 平面内受力, 防止试件在平面外失稳, 整个节点边界条件的设置与试验条件一致. 在梁端沿柱轴向施加位移荷载, 位移加载方法及数值大小由和模拟试件的荷载相一致, 详见下文.

(4) 界面接触

钢梁与混凝土之间的化学胶结力和物理摩擦力相比栓钉提供的锚固力, 可以忽略不计. 在混凝土楼板和钢梁之间设置了弹簧连接来模拟栓钉的受力行为^[12]. 钢梁与面承板、扁钢箍、小钢柱和柱面钢板之间的焊缝, 采用绑定约束来模拟.

所建 RCS 空间组合节点模型如图 2 所示.

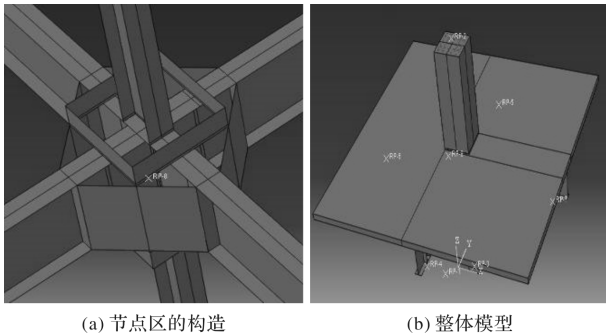


图 2 RCS 空间组合节点的有限元模型

Fig. 2 The finite element model of 3D composite RCS joints

1.3 与试验结果的对比分析

为了验证有限元建模的有效性, 首先对试件施加与文献[5]中相同的加载制度, 即, 先在柱端施加 890 kN 的轴向压力(轴压比为 0.1), 然后采用位移加载, 位移加载分为两个阶段, 一是先在主梁梁端沿柱轴向加载到节点承载力不再增大, 此时梁端位移约为 40 mm; 二是在直交梁梁端加载, 直到节点破坏, 此时梁端位移为 80 mm. 有限元分析得到的试件最终破坏模式及两个加载阶段的骨架曲线及试件在节点区的最终破坏形态分别见图 3 和图 4 所示.

从图 3 可以看出, 有限元模型在加载完成时, 空间节点区域的钢板大部分均达到了屈服强度, 同时梁端的部分区域也进入了屈服状态. 这与文献[4]试验中试件发生节点剪切破坏, 且梁端部分形成塑性铰的最终破坏模式是相一致的.

从图 4 可以看出, 在阶段一, 有限元模拟得到的节点梁端荷载-位移骨架曲线与试验结果吻合良好, 特别是在弹性阶段和弹塑性的初始阶段, 两条曲线基本重合; 只是在弹塑性阶段的后期, 试

验结果偏大一些, 不过误差仍在 10% 以内. 在阶段二, 有限元结果的初始刚度比试验结果略大, 而峰值荷载略低于试验结果; 但从整体上分析, 两个曲线还是比较吻合的.

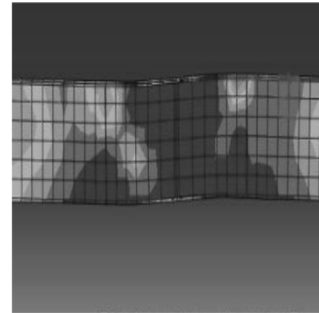
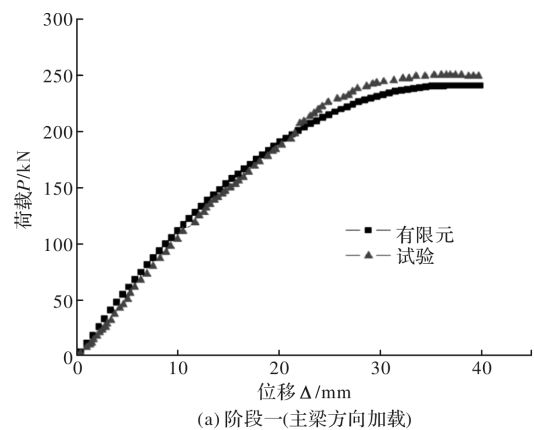
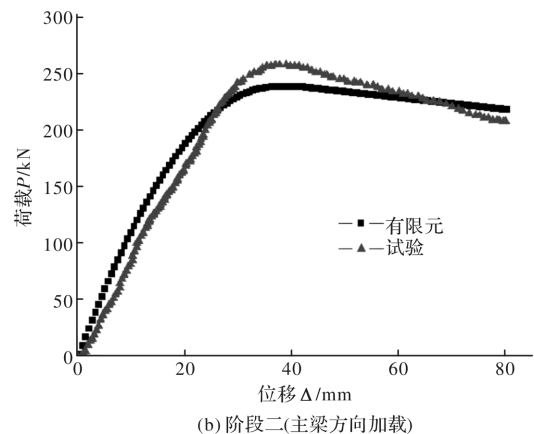


图 3 试件的最终破坏模式(节点区部分)

Fig. 3 The final failure pattern of the specimen (the area of the joint)



(a) 阶段一(主梁方向加载)



(b) 阶段二(主梁方向加载)

图 4 RCS 空间组合节点有限元分析与试验骨架曲线的对比

Fig. 4 The comparison of the load-displacement percussive of 3D composite RCS between the finite element analysis and the test

综上所述, 利用本文的有限元建模方法对 RCS 空间组合节点进行传力机理和承载力分析是可行的.

1.4 与平面组合节点的对比分析

为了探讨 RCS 空间组合节点与平面组合节点受力性能的差异, 对 1.1 节的两类节点重新进行有

限元建模和对比分析. 两类节点采用相同的加载制度, 即只在主梁方向采用位移加载, 直到梁端位移达到 80 mm.

1.4.1 骨架曲线的对比分析

两类节点的梁端荷载-位移骨架曲线如图 5 所示. 从图 5 可以看出, 两类节点均经过了明显的弹性阶段、屈服阶段和破坏阶段. 在弹性阶段, 两类节点的刚度没有显著差别; 进入弹塑性阶段后, 虽然两者的发展趋势类似, 但空间节点的承载力明显要高于平面节点, 其峰值荷载相差约 17%. 说明直交梁和楼板的存在对空间节点承载力的提高作用是不可忽略的. 此外, 两类节点破坏时位移与屈服时位移比均大于 4, 表明虽然两类节点均发生了剪切破坏(后文详述), 但其延性性能还是不错

的. 两类节点在受力过程中特征点的梁端荷载和位移详见表 2.

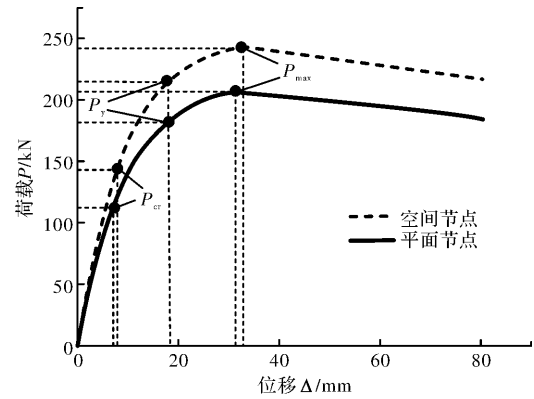


图 5 RCS 空间组合节点与平面组合节点骨架曲线的对比
Fig. 5 The comparison of the load-displacement curves between the RCS composite joints in 3D and 2D

表 2 两类组合节点在不同受力阶段荷载和位移特征值

Tab. 2 The characteristic value of load and displacement of the two types of composite joints under different stages								
节点类型	P_{cr}/kN	Δ_{cr}/mm	P_y/kN	Δ_y/mm	P_{max}/kN	Δ_{max}/mm	P_u/kN	Δ_u/mm
空间节点	144.5	8.1	214.4	18.5	242.0	32.5	217.0	80.0
平面节点	112.7	6.8	181.5	17.9	206.3	31.3	184.5	80.0

1.4.2 受力过程的对比分析

(1)弹性阶段

弹性阶段结束时, 两类节点主要受力部分的应力(应变)状态如图 6 所示. 可以看出, 对于两类节点, 节点区钢梁腹板和与柱面相邻的钢梁下翼缘附近受力较大, 如图 6(a), 空间节点和平面节点核心区钢梁腹板的 Mises 应力最大值分别为 49 MPa和 51 MPa, 两类节点的应力均处于弹性状态, 且相差不大. 从图 6(b)可以看出, 空间节点

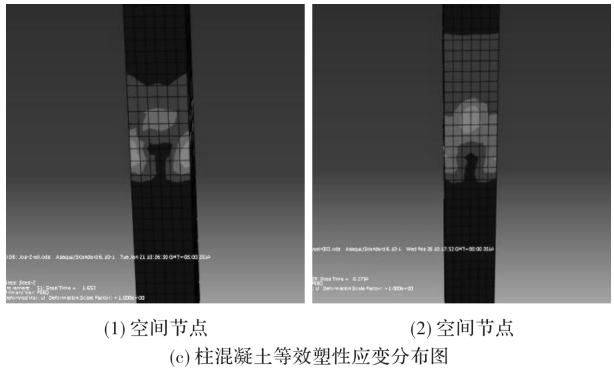
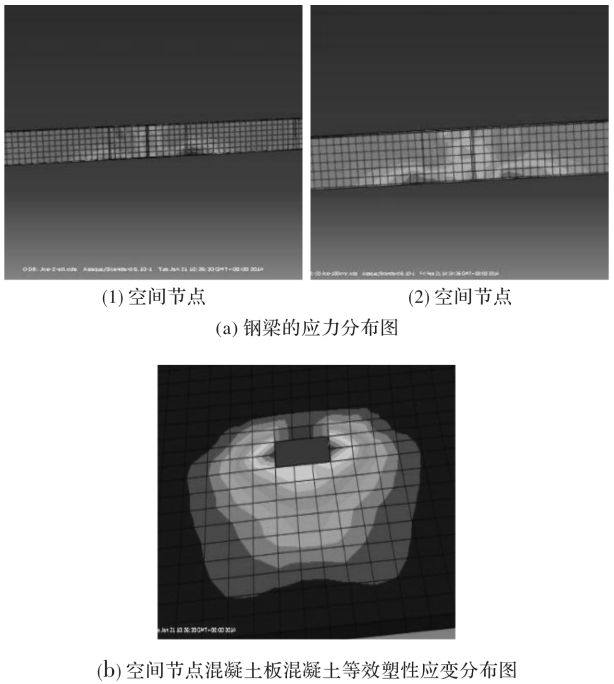


图 6 弹性阶段两类节点主要受力部分的应变(力)图
Fig. 6 The stress(strain) picture of the main parts of the two joints in elastic stage.

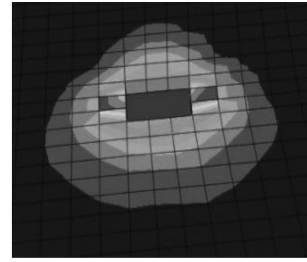
中混凝土板的裂缝(用等效塑性应变表示)分布范围较大且发展较为充分, 应力值可达 8 MPa, 说明在弹性阶段, 空间节点中楼板对与其相连的构件和构造措施产生一定约束, 结合 RCS 组合节点的受力机理可知, 混凝土板的存在间接的提高了空间节点的抗剪承载力. 另外, 从图 6(c)可知, 两类节点核心区混凝土的受力状态相差不大, 最大应力值分别为 12 MPa, 14 MPa. 由于在弹性阶段, 柱面钢板和扁钢箍的受力很小, 故未在图 6 中展示.

(2)屈服阶段

屈服阶段结束时, 两类节点主要部分受力状况如图 7. 从图 7(a)–(c)可以看出, 对于两类节点, 核心区腹板、柱面钢板和扁钢箍均已达到屈



服强度($f_y=365$ MPa). 不过从三种构造措施的屈服范围和程度来看, 空间节点构造措施的受力更为充分, 说明空间节点的构造措施更为有效地约束了节点区的混凝土, 从而可提高节点的承载力. 此外, 从图 7(d)—(e)可以看出, 与弹性阶段相比, 两类节点核心区混凝土以及空间节点楼板的混凝土, 其受力范围和程度进一步发展, 核心区混凝土 Mises 应力最大值分别为 12 MPa 和



(e) 空间节点混凝土板等效塑性应变分布图

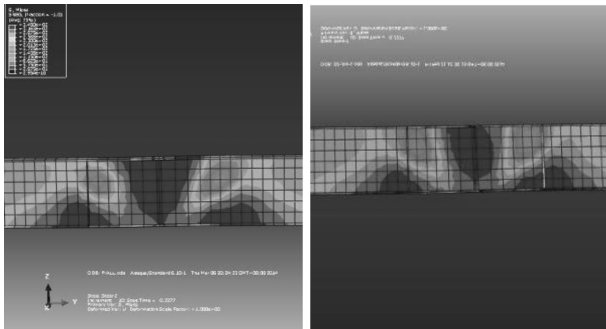
图 7 屈服阶段两类节点主要受力部分的应变(力)图

Fig. 7 The stress(strain) picture of the main parts of the two joints in yield stage.

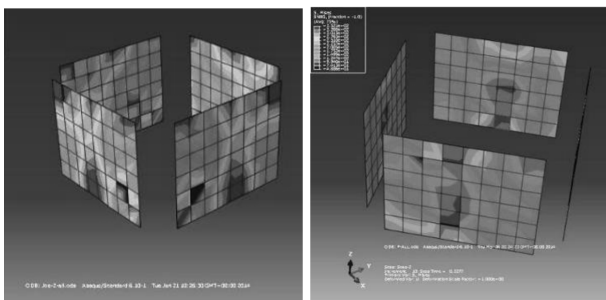
10 MPa, 楼板混凝土 Mises 应力值也从弹性阶段的 8 MPa 提高到 10 MPa, 这也验证了上述两类节点构造措施对混凝土的约束作用, 以及空间节点更好的约束效果.

(3) 破坏阶段

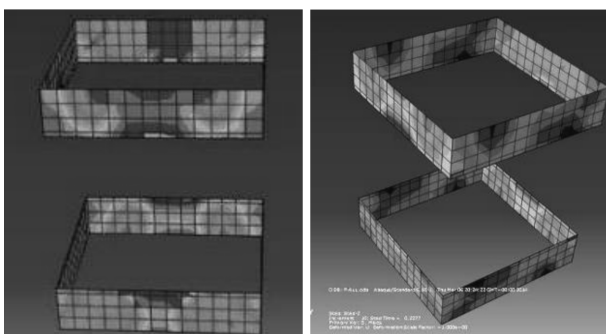
在破坏阶段, 两类节点的核心区腹板、柱面钢板和扁钢箍的屈服范围进一步增大, 如图 8(a)—(c), 空间节点的屈服范围仍然比平面节点的要大, 且空间节点核心区腹板已经全部屈服. 此外, 从图 8(d)—(e)可以看出, 两类节点核心区混凝土以及空间节点楼板的混凝土, 其受力范围和程度也进一步发展, 并且空间节点核心区的部分混凝土已达到极限压应变. 上述两点表明, 空间节点核心区的混凝土和钢腹板均比平面节点发挥了更充分的作用, 同时, 对节点承载力的贡献也就更大.



(1) 空间节点 (2) 空间节点
(a) 钢梁的应力分布图



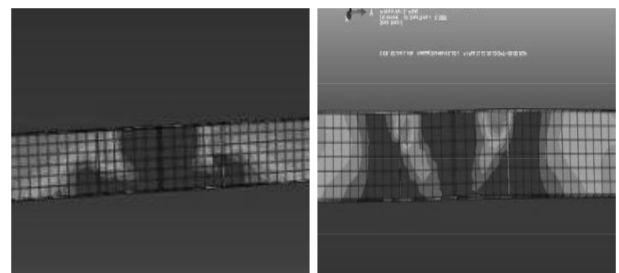
(1) 空间节点 (2) 空间节点
(b) 柱面钢板应力云图



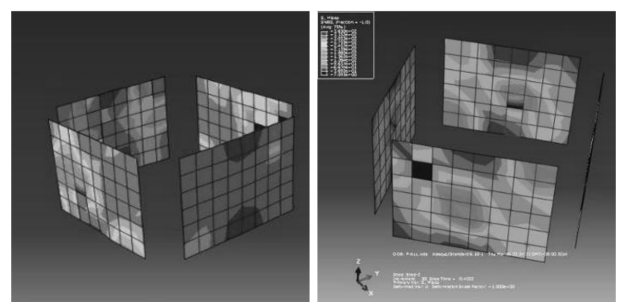
(1) 空间节点 (2) 空间节点
(c) 扁钢箍应力云图



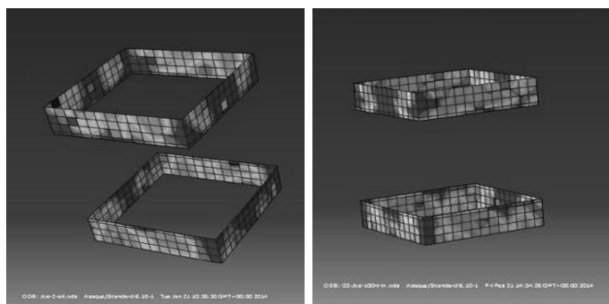
(1) 空间节点 (2) 空间节点
(d) 柱的等效塑性应变分布图



(1) 空间节点 (2) 空间节点
(a) 钢梁的应力分布图



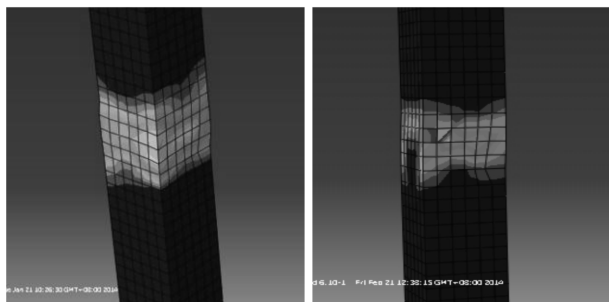
(1) 空间节点 (2) 空间节点
(b) 柱面钢板应力云图



(1) 空间节点

(2) 空间节点

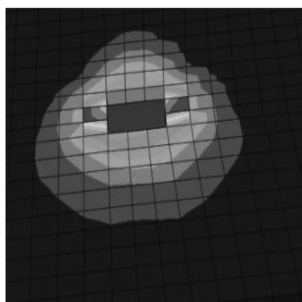
(c) 扁钢箍应力云图



(1) 空间节点

(2) 空间节点

(d) 柱的等效塑性应变分布图



(e) 空间节点混凝土板等效塑性应变分布图

图8 破坏阶段两类节点主要受力部分的应变(力)图

Fig. 8 The stress(strain) picture of the main parts of the two joints in failure stage.

2 RCS 空间组合节点抗剪承载力公式的提出

对 RCS 空间组合节点和平面组合节点的受力全过程分析表明:不管是在弹性阶段还是弹塑性阶段,由于楼板和直交梁的存在,使空间节点各构造措施均能更充分的发挥作用,进而使节点核心区的混凝土和钢腹板均达到了理想的剪切破坏模式.这也是其承载力高于平面节点的主要原因.本文在 ASCE 所给出的平面节点承载力公式的基础上,引入现浇楼板的影响,并通过大量的参数分析,提出 RCS 空间组合节点的承载力公式.

2.1 ASCE 给出的平面节点承载力公式

基于节点的剪切破坏模式,ASCE 给出的 RCS

平面组合节点的承载力计算公式^[1].

$$V_j = 0.6 F_{ysp} t_{sp} j_h + 1.7 \sqrt{f'_c} b_p h + 0.4 \sqrt{f'_c} b_o h + 0.9 A_{sh} F_{ysh} h / s_h \quad (1)$$

式中四项分别代表钢梁腹板、节点核心区内、外混凝土和箍筋提供的抗剪承载力.该公式没有考虑现浇楼板和直交梁对节点承载力的影响.公式中力的量纲是 N.

2.2 改进公式的提出

从上述空间组合节点受力分析可知,楼板的受力范围是在离柱面一定距离内的,由此在改进公式中用两部分来考虑楼板对节点承载力的间接贡献,分别假定一部分节点承载力与楼板宽度成指数函数关系,另一部分节点承载力与楼板厚度成线性关系.改进后的 RCS 空间组合节点承载力公式如下:

$$V_j = \lambda_1 f_y t_w h_w + \lambda_2 f'_c b h_c + \lambda_3 e^{-\omega/\lambda_4} + \lambda_5 h_t \quad (2)$$

式中, V_j 为节点抗剪承载力; f_y 为节点核心区钢梁腹板屈服强度; t_w 、 h_w 分别为钢梁腹板厚度和高度; h_c 为节点核心区混凝土高度; f'_c 为混凝土轴心抗压强度; b 为柱截面宽度; ω 为楼板宽度; h_t 为楼板厚度; λ_1 , λ_2 , λ_3 , λ_4 , λ_5 为待定参数.

式(2)中第一项代表钢梁腹板的抗剪承载力,考虑了直交梁的抗扭承载力对受力方向钢梁腹板抗剪承载力的提高,当无直交梁时参数 λ_1 可适当降低;第二项代表节点核心区全部混凝土的抗剪承载力,考虑了柱面钢板和扁钢箍等构造措施对节点核心区混凝土强度的提高作用,当无柱面钢板或扁钢箍时参数 λ_2 应适当降低;第三项代表楼板对节点承载力的贡献,当没有楼板时参数 λ_3 , λ_4 , λ_5 均取为 0.

3 改进公式中待定参数的确定及公式验证

本节用控制变量法建立不同模型并加载,根据最终梁端极限荷载和变量的回归方程式确定梁端极限荷载和相关变量的关系,再由梁端剪力和节点剪力的关系式(3)最终确定节点抗剪承载力和相关变量的关系.

$$\frac{V_j}{V_b} = \frac{L - h_c}{h_b} - \frac{L}{H} \quad (3)$$

其中: V_j 、 V_b 分别代表节点和梁端剪力, L 、 H 分别代表梁长和柱高, h_c 、 h_b 分别代表柱和梁在受力方向截面高度.

3.1 参数 λ_1 的确定

在其它变量不变的条件下,本文选取 6 mm,

8 mm, 10 mm 和 12 mm 的钢梁腹板厚度 t_w , 比较分析钢梁腹板厚度对 RCS 空间组合节点承载力的影响. 梁端荷载随钢梁腹板厚度的变化及其线性回归表达式如图 10 所示, 由回归方程并结合式(2)和(3)后求得参数 $\lambda_1 = 0.63$.

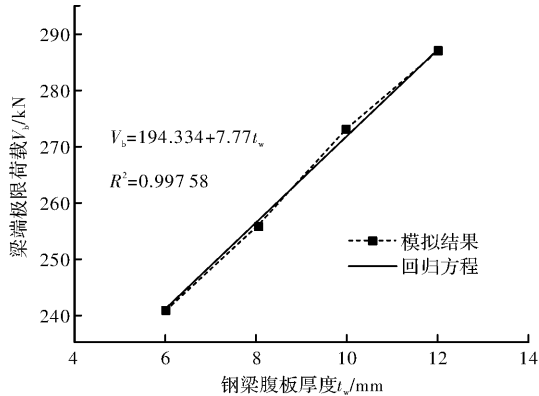


图 9 钢梁腹板厚度对节点承载力的影响

Fig. 9 The influence of steel beam web thickness to the bearing capacity of the 3D composite RCS joints.

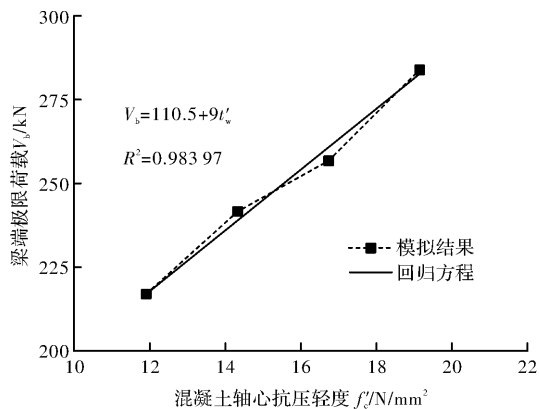


图 10 混凝土轴心抗压强度对节点承载力的影响

Fig. 10 The influence of concrete strength to the bearing capacity of the 3D composite RCS joints.

3.2 参数 λ_2 的确定

ASCE 对 RCS 组合结构中混凝土轴心抗压强度有明确的规定, 为 $f'_c \leq 40$ MPa, 即只在普通混凝土等级范围内适用. 在其它变量不变的条件下, 本文选取强度等级为 C25, C30, C35 和 C40 的混凝土, 比较分析普通混凝土强度对 RCS 空间组合节点承载力的影响. 梁端极限荷载随钢梁腹板厚度的变化轨迹及其线性回归表达式如图 11 所示. 由回归方程表达式并结合式(2)和(3)后求得参数 $\lambda_2 = 0.64$.

3.3 参数 λ_3 和 λ_4 的确定

在其它变量不变的条件下, 本文选取 600 mm, 1 000 mm, 1 600 mm 和 2 000 mm 的楼板宽度 w , 比较分析楼板宽度对 RCS 空间组合节点承载力的

影响. 梁端极限荷载随钢梁腹板厚度的变化及其线性回归表达式如图 12 所示, 由回归方程表达式并结合式(2)和(3)后求得参数 $\lambda_3 = 6.38 \times 10^5$, $\lambda_4 = 3.4 \times 10^2$.

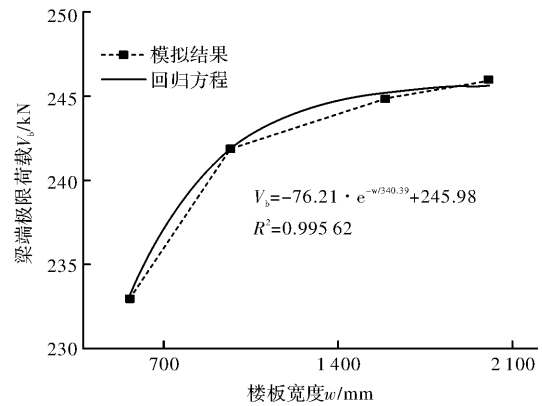


图 11 楼板宽度对节点承载力的影响

Fig. 11 The influence of slab width to the bearing capacity of the 3D composite RCS joints.

3.4 参数 λ_5 的确定

在其它变量不变的条件下, 本文选取变化范围为 50 mm, 70 mm, 90 mm, 110 mm, 130 mm 和 150 mm 的楼板厚度 h_t , 比较分析楼板厚度对 RCS 空间组合节点承载力的影响. 梁端荷载随钢梁腹板厚度的变化及其线性回归表达式如图 13 所示, 由回归方程表达式并结合式(2)和(3)后求得参数 $\lambda_5 = 1.51 \times 10^3$.

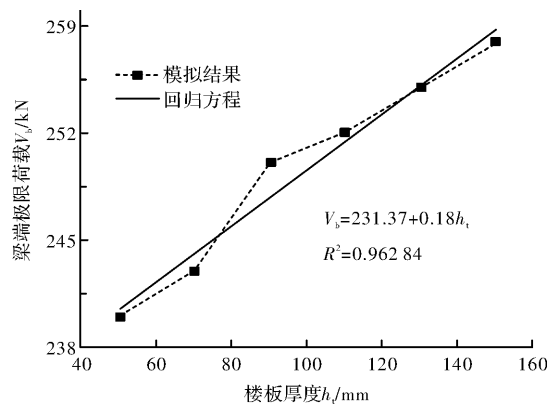


图 12 楼板厚度对节点承载力的影响

Fig. 12 The influence of slab thickness to the bearing capacity of the 3D composite RCS joints.

3.5 改进公式与有限元模拟结果验证

将 3.4 节参数分析得到的系数值带回改进公式(2), 即得 RCS 空间组合节点的承载力公式. 利用改进公式对受力和参数分析用到的 15 个 RCS 空间节点进行承载力计算, 并与有限元模拟结果进行比较, 结果见表 3 所示.

从表 3 可以看出, ASCE 公式和有限元模拟结果相比偏低 17%~37%, 表明 ASCE 平面公式在计算节点承载力时没有充分考虑空间作用下楼板和直交钢梁对 RCS 组合节点承载力的提高作用. 而改进公式和有限元模拟结果相差在 4% 以内, 表明该公式充分考虑了上述因素, 可以较准确地计算 RCS 空间组合节点的承载力, 即包含有楼板和直交钢梁, 同时还有柱面钢板和扁钢箍等构造措施的节点.

表 3 ASCE 平面公式和改进公式计算结果与数值模拟结果对比
Tab. 3 The comparison of results between improved formula and numerical simulation

模型参数	模拟结果/kN	ASCE 公式		改进公式	
		计算结果/kN	计算结果/模拟结果	计算结果/kN	计算结果/模拟结果
基本模型	1 584	1 064	0.67	1 547	0.98
f_c' /MPa	11.9	1 020	0.72	1 365	0.96
	16.7	1 105	0.66	1 729	1.03
	19.1	1 143	0.61	1 911	1.03
	8	1 250	0.75	1 677	1.00
t_w /mm	10	1 437	0.81	1 806	1.01
	12	1 623	0.87	1 936	1.03
w /mm	600	1 064	0.70	1 471	0.97
	1 600	1 064	0.67	1 576	0.99
	2 000	1 064	0.66	1 579	0.99
	50	1 064	0.68	1 516	0.97
h /mm	90	1 064	0.65	1 577	0.96
	110	1 064	0.64	1 607	0.97
	130	1 064	0.64	1 637	0.98
	150	1 064	0.63	1 667	0.99

注: 基本模型指的混凝土强度等级为 C30, 型钢梁腹板厚度为 6 mm, 楼板为 70 mm, 楼板宽度为 1 000 mm 的有限元模型.

4 结论

(1) 分别建立 RCS 平面和空间有限元模型, 计算结果表明空间节点承载力比平面节点高 17%, 说明空间作用对 RCS 节点抗剪承载力的提高需要考虑.

(2) 通过对 RCS 空间节点的受力机理分析, 基于 ASCE 建议公式, 提出 RCS 空间组合节点的承载力计算公式, 并通过参数分析和回归分析确定了改进公式中的相关系数.

(3) 相比于平面节点计算公式, 改进公式与数值模拟结果相符很好, 可以很准确地计算含有楼板、直交钢梁、柱面钢板和扁钢箍等构件或构造措施的 RCS 空间组合节点的承载力. 该公式可供相关科研人员和工程设计人员参考.

参考文献 References

[1] The ASCE task committee on design criteria for composite structures in steel and concrete. Guidelines for

design of joints between steel beams and reinforced concrete columns[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 12(8): 2330-2357.

[2] ALIZADEH S, NADER K A Attari, KAZEMI M T. The seismic performance of new detailing for RCS connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 91: 76-88.

[3] 郭子雄, 朱奇云, 刘阳, 等. 装配式 RCS 框架节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(7): 98-105.

GUO Zixiong, ZHU Qiyun, LIU Yang, et al. Experimental study on seismic behaviors of a new type of pre-fabricated RCS frame connections [J]. Journal of Building Structures, 2012, 33(7): 98-105.

[4] 门进杰, 郭智峰, 史庆轩, 等. 钢筋混凝土柱-腹板贯通型钢梁混合框架中节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(8): 72-79.

MEN Jinjie, GUO Zhifeng, SHI Qingxuan, et al. Experimental study on seismic behavior of a reinforced concrete column-steel beam frame interior joint with

- various details[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 38(5): 72-79.
- [5] MIEHAEL N Bugeja, JOSEPH M Bracci, WALTER P Moore Jr. Seismic behavior of composite RCS frame systems[J]. Journal of Structural Engineering, 2000, 126(4): 429-435.
- [6] LIANG Xuemei, GUSTAVO J, PARRA-Moniesinos. Seismic behavior of reinforced concrete column-steel beam subassemblies and frame systems[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 310-319.
- [7] CHENG Chintung, CHEN Chengchih. Seismic behavior of steel beam and reinforced concrete column connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(4): 587-606.
- [8] 陆铁坚, 贺子瑛, 余志武, 等. 钢-混凝土组合梁与混凝土柱节点的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(1): 71-74.
- LU Tiejian, HE Ziyang, YU Zhiwu, et al. Experimental research on seismic behavior of SC beam to RC column connection[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 29(1): 71-74.
- [9] 张战廷, 刘宇峰. ABAQUS 中的混凝土塑性损伤模型[J]. 建筑结构, 2011, 44(8): 299-311.
- ZHANG Zhanting, LIU Yufeng. The plastic damage model of concrete in ABAQUS[J]. Journal of Structural Engineering, 2011(8), 44: 299-311.
- [10] 腾智明. 钢筋混凝土基本试件[M]. 北京: 清华大学出版, 1987.
- TENG Zhiming. The reinforced concrete specimens [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987.
- [11] Esmaeily A, Xiao Y. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads: analysis[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 736-744.
- [12] 黄远, 聂建国, 陶慕轩, 等. 考虑楼板组合作用的方钢管混凝土组合框架受力性能有限元分析[J]. 建筑科学学报, 2011, 32(3): 109-116.
- HUANG Yuan, NIE Jianguo, TAO Muxuan, et al. Finite element analysis on behavior of rectangular CFST frame considering composite action of floor slab [J]. Journal of Building Structures, 2011(8), 44: 299-311.

(编辑 吴海西)

(上接第 339 页)

贡献很小;但套管厚度对开孔截面抗剪承载能力的提高作用较大;套管的加强作用对有较大开孔率的截面更加显著。

(3)根据分析结果,给出了套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面的抗弯、抗剪及弯剪联合作用的承载力计算公式,具有较高的精度,可供参考。

参考文献 References

- [1] 杨应华, 吴言亮. 套管加强梁腹板开孔梁柱节点滞回性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015, 47(6): 788-792.
- YANG Yinghua, WU Yanliang. Hysteretic behavior of reduced beam section connections with stub tube reinforced web opening [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural science Edition), 2015, 47(6): 788-792.
- [2] 夏志斌, 姚谏. 钢结构-原理与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- XIA Zhibin, YAO Jian. Steel structures-principles and design [M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2012.
- [3] CHUNG K F, LIU TCH, KO ACH. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings[J]. J. Construct. Steel Res., 2001, 57(5): 467-490.
- [4] 青木博文. 结构设计专家入门(钢结构篇)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- HIROFUMI Aoki. Introduction to structure design expert (steel structure)[M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2012.
- [5] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局联合发布. 钢结构设计规范: GB 50017-2003[S]. 2003.
- The Ministry of construction of the People's Republic of China and AQSIQ jointly issued. Code for design of steel structures: GB 50017-2003[S]. 2003.
- [6] 吴言亮. 套管加强梁腹板开孔节点力学性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- WU Yanliang. Mechanical behavior of reduced beam section connections with tube reinforced web opening [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2016.

(编辑 吴海西)