

混凝土柱—钢梁组合框架结构体系一体化建造的研究与应用

朱文超

中建科技集团华东有限公司 上海 200126

摘要: 近些年, 国内装配式建筑以一个稳定、发展的态势逐渐在建造行业内普及, 预制构件种类由原先的水平构件逐渐向竖向构件发展以满足当地政府对预制率的要求。创新结构体系更是呈现出“百花齐放, 百家争鸣”的局面, 其中快速装配钢筋混凝土柱钢梁组合梁框架结构体系给低、多层建筑提供了“高装配、快建造、少人工”的解决方案。同时, 如何将该新型结构体系与一体化建造方式(及设计、生产、装配一体化^[1])相结合从而能顺利落地为本文探讨的重点, 本文将以工程实例为背景, 阐述一体化建造方式结合新体系时具有的优势与潜力。

关键词: 混凝土柱—钢梁组合框架结构体系; 干式连接; 一体化建造; 装配式施工管理

Research and application of integrated construction of concrete column - steel beam composite frame structure system

Zhu Wenchao

China Construction Science & Technology Group Co., Ltd. East Branch Shanghai 200126

Abstract: In recent years, domestic prefabricated buildings have gradually become popular in the construction industry in a stable and developing trend, and the types of prefabricated components have gradually developed from the original horizontal components to vertical components to meet the requirements of the local government on the prefabricated rate. The innovative structural system is showing a situation of “a hundred flowers blooming, a hundred schools of thought competing”, in which the rapid assembly of reinforced concrete column and steel beam composite beam frame structure system provides a solution of “high assembly, fast construction and less labor” for low and multi-story buildings. At the same time, how to combine the new structural system with the integrated construction method (as well as the integration of design, production and assembly^[1]) so as to achieve smooth implementation is the focus of this paper. This paper will take engineering examples as the background to elaborate the advantages and potential of the integrated construction method combined with the new system.

Key words: concrete column-steel beam composite frame structure system; Dry connection; Integrated construction; Prefabricated construction management

引言

为推广装配式建筑行业发展, 近些年国内部分发达地区政府对新建住宅和公共建筑的预制率要求不断提高, 仅预制水平构件不能满足其要求, 竖向预制构件的使用逐渐增多。在常见的装配整体式框架结构中, 梁柱节点连接多为现浇作业, 节点处梁柱钢筋密集, 木工作业零碎, 施工繁琐, 有机械化程度低、施工进度慢、不经济等缺点^[2]。研发优化连接节点设计能够简化现场施工, 提高装配效率。

国内对不同装配式连接节点的性能研究从未停止, 本世纪初, 赵斌^[3]等人通过低周反复荷载试验对现浇高强混凝土梁柱组合构件、预制混凝土结构高强混凝土后, 浇整体式梁柱组合构件以及高强预制混凝土结构全装配式梁柱组合件进行比较, 实验结果表明预制后浇整体式与现浇具有相同或相

近的抗震能力, 而全装配式半刚性节点的极限承载力要高于上述两种节点形式。

吕西林^[4]等人通过缩尺模型拟动力试验研究了欧洲和中国广泛应用的装配式预制混凝土单层工业厂房, 其梁柱节点为橡胶垫螺栓连接方式, 实验结果表明装配式预制混凝土框架结构具有良好的抗震性能, 且采用橡胶垫螺栓连接的装配式梁柱节点被证明在地震作用下工作安全可靠。

杨红楼^[5]等人在梁柱节点采用外包钢板箍, 并在钢板箍内侧加焊钢筋肋条, 实验表明混凝土柱—钢梁组合结构的耗能能力明显优于钢筋混凝土结构, 与钢结构相当, 并且在钢板箍内焊接短钢筋肋条可防止钢板箍与混凝土的滑移, 使在节点核心区采用钢板箍代替箍筋的方式可行。

本文将从一体化建造方式出发, 即在设计、生产、装配

的各个阶段里,详细阐述何如将混凝土柱-钢梁组合框架结构体系应用到工程实体,并为今后类似体系的应用与推广提供一定参考。

1 工程概况

宜兴·光明小镇H地块项目,建筑类别为低层、多层商业建筑。混凝土柱-钢梁组合框架结构体系应用面积为25084.2 m²。应用预制构件有:预制柱、预制梁(叠合梁/型钢梁)、密拼不出筋叠合板等,内外围护结构采用蒸压轻质混凝土隔墙板(ALC)。预制率均为70%以上。

2 混凝土柱-钢梁组合框架结构体系

2.1 节点选型

根据《约束混凝土柱组合梁框架结构技术规程》(CECS347:2013)^[6],梁柱节点有两种设计形式:一是梁贯通节点(详见图1),二是柱贯通节点(详见图2)。本文研究对象是柱贯通型节点,该形式连接方式为干式连接,主要通过对节点区螺栓群施加预应力实现有效连接。

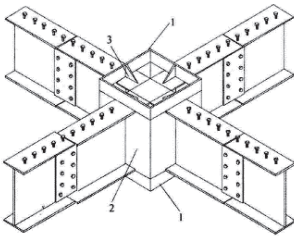


图1 梁贯通型节点

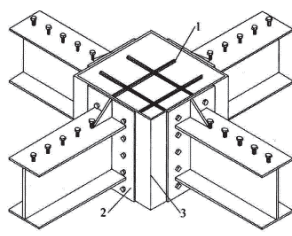


图2 柱贯通型节点

2.2 梁柱节点螺栓群设计

梁柱节点采用高强螺栓-端板连接,主要传递弯矩和剪力作用。梁柱节点应遵循的设计原则:节点处内力传递应简单可靠,形成“强柱弱梁”,同时满足局部受压作用力。

王昆^[7]等人阐述了梁柱节点设计的步骤,根据盈建科YJK(版本3.0.2)模型计算结果,确定最不利内力节点位置,C40混凝土柱截面为500×500,X向钢梁截面HN600×200×12×20,Y向钢梁截面HN600×200×12×20;

选取基本组合为:1.3D+1.5L+0.6W, $M_r = -585\text{kN} \cdot \text{m}$, $M_l = 470\text{kN} \cdot \text{m}$ 。确定节点核心区剪力设计值:

$$V_j = \frac{\eta_{jb} \sum M_b}{Z} \left(1 - \frac{Z}{H_c - h_b} \right)$$

$$\eta_{jb} = 1.20;$$

$$\sum M_b = 115.0\text{kN} \cdot \text{m};$$

Z为梁端上部和下部合力点之间的距离。对于钢梁Z = $h_b - t_f$,其中 h_b 为钢梁截面高度, $h_b = 600\text{mm}$, t_f 为钢梁翼缘厚度, $t_f = 20\text{mm}$ 。Z = 580mm。 H_c 为节点上柱和下柱反弯点之间的距离4517mm,通过计算确定, $V_j = 202\text{kN}$;

节点核心区受剪水平截面验算,满足节点核心区受剪验算要求:

$$V_j \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.35\eta_j \beta_c f_c b_j h_j) = 2089\text{kN}$$

节点抗震受剪水平承载力验算,满足节点抗震受剪验算

要求:

$$V_j \leq \frac{1}{\gamma_{RE}} (0.15\alpha_b h_c f_c + \rho_{sv} f_{yv} b_c h_{b0} + 0.4 \sum A_{s2} f_{y2} + 0.05N)$$

$$= 2063.7\text{kN}$$

端板螺栓节点中,仍需计算单个高强度螺栓的抗拉抗剪承载力设计值,以便确定成排的螺栓群满足抗拉抗剪以及拉剪复合受力要求:

$$N_v^b = \min(A_e f_v^b, d \sum t f_c^b)$$

选取单个M27高强螺栓孔径 $d_0 = 30\text{mm}$,有效截面面积 $A_e = 572\text{mm}^2$,极限抗拉强度 $f_u^b = 1040\text{N} = 1040\text{N/mm}^2$;

$$\text{施加预拉力 } P = 0.7 A_e f_u^b = 416\text{kN};$$

$$\text{抗拉承载力设计值 } N_t^b = 0.8P = 332\text{kN};$$

$$\text{抗剪承载力设计值 } N_v^b = A_e f_v^b = 177\text{kN};$$

最上排螺栓承受拉力满足高强螺栓抗拉要求:

$$N_1^M = \frac{M y_1}{(\sum y_i^2)} = 274.9\text{kN} \leq N_t^b = 416\text{kN}$$

单个螺栓承受剪力,满足高强螺栓抗剪要求:

$$N_v = V / \sum n_i = 26.3\text{kN} \leq N_v^b = 177\text{kN}$$

拉剪复合验算,满足高强螺栓抗剪复合受力要求:

$$\sqrt{\left(\frac{N_v}{N_v^b} \right)^2 + \left(\frac{N_t}{N_t^b} \right)^2} = 0.815 \leq 1.0$$

最终采用10.9s M27高强螺栓,布置方式为六排两列。

2.3 梁柱节点端板设计

梁端与端板之间采用焊缝连接,其中钢梁翼缘与端板采用完全熔透对接焊缝,质量等级二级;钢梁腹板与端板采用角焊缝连接,质量等级三级,焊脚尺寸 $h_f = 10\text{mm}$,焊缝计算厚度 $h_e = 0.7h_f = 7\text{mm}$ 。 $\sigma_t = 235\text{N/mm}^2 \leq f_t^w = 295\text{N/mm}^2$,满足对接焊缝抗拉要求, $\tau_w = \frac{V}{l_w h_e} = 42.9\text{N/mm}^2 \leq f_f^w = 200\text{N/mm}^2$,满足腹板角焊缝抗剪要求。端板厚度t应根据支撑条件确定,项目采用两邻边支撑类区格,分别算出外伸端板区格:

$$t_1 \geq \sqrt{\frac{6e_f e_w N_t}{[e_w b_{cp} + 2e_f(e_f + e_w)]f}} = 26.85\text{mm}, \text{取为 } t_1 = 30\text{mm}。$$

与钢梁翼缘-腹板区格厚度:

$$t_2 \geq \sqrt{\frac{6e_f e_w N_t}{[e_w b_{cp} + 2e_f(e_f + e_w)]f}} = 22.79\text{mm}, \text{取为 } t_2 = 24\text{mm};$$

$$t_3 \geq \sqrt{\frac{6e_f e_w N_t}{[e_w b_{cp} + 2e_f(e_f + e_w)]f}} = 18.90\text{mm}, \text{取为 } t_3 = 24\text{mm}$$

综合得出端板厚度为30mm。

3 一体化建造

3.1 钢结构深化设计、生产与装配

在柱贯通型钢-混结构体系中,钢结构构件主要包括节点钢板箍和两端带端板的型钢梁。当不同尺寸梁截面正交时,螺栓群定位可利用Tekla进行正交方向的避让设计(详见图3)。同时,为保证型钢梁两端端板开孔定位与节点钢板箍预留孔位一致,需对每一个钢板箍和型钢梁进行独立编号并标注出安装方向,上述详细信息也需同时反映在预制柱的

PC深化图纸中。

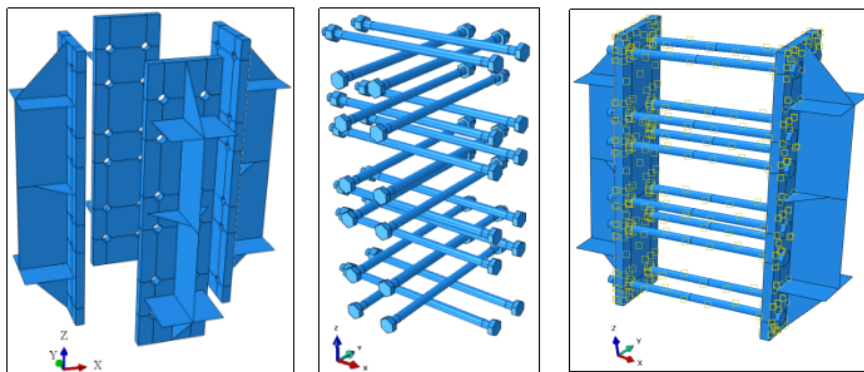


图3 螺栓群避让设计

在节点钢板箍制作时,预留螺杆孔位宜采用激光下料,用折边机将开好孔的钢板折成C型,两个C型钢对拼,将中间竖缝满焊后打磨。钢管宜采购成品钢管,管径应大于螺杆设计直径8~10mm,钢管与留孔钢板之间满焊,可防止预制柱浇筑时漏浆,堵塞预留孔道。

通常情况下,钢梁的加工生产精度要高于PC构件,加上现场可能出现的吊装误差,为保证装配期间钢梁的顺利安装,主梁在深化设计时可考虑适当缩短跨内净间距,宜在16mm左右,钢梁吊装后端板与预制柱间的空隙用自密实、高强灌浆料塞填。

3.2 PC构件深化设计、生产与装配

在柱贯通型混凝土柱-钢梁组合框架结构体系中,主梁均为柱居中布置。考虑到建筑墙体柱边平齐的布置需求,当设计边跨叠合板预制范围时,可将叠合板的预制外边线移至柱边,并在绘制叠合板深化图时根据钢梁的中心线位置和栓钉个数在叠合板相应位置预留栓钉孔,待现场吊装完成后现场焊接栓钉。

在预制柱拆分设计时,应根据现场机械的实际调运能力,和工厂构件的运输能力,综合考虑柱体的预制长度,该体系可以做到“两层一柱”甚至“三层一柱”。该体系下的柱主筋应按照“大直径,少根数,角部布置”的配筋原则布置,以避免钢板箍中预留的井字型螺杆孔。

当现场吊装超过两层高的预制柱时,常规的吊环、预埋螺母等吊装预埋件已不再适用,高处摘钩将导致装配效率降低并增加施工安全风险。自动脱钩工装(详见图4)的使用能提高装配效率,同时也能降低预制柱的综合成本。



图4 自动脱钩工装和应用实景

4 装配式施工管理

4.1 建造工艺流程

无地下室钢-混组合结构施工工序:

杯口基础浇筑→预制柱吊装(斜支撑临时固定)→二层钢梁吊装/节点区对穿螺杆初拧→杯口细石混凝土塞填/端板与柱间隙打胶→土方回填/叠合板吊装→节点区灌浆料塞填/板面钢筋绑扎,边模支设/地坪浇筑→板下独立支撑搭设/节点区对穿螺杆终拧→二层板面浇筑→下一层钢梁吊装。

为保证钢梁吊装过程顺利,预制柱净间距是施工控制要点之一:

(1) 预制柱自身垂直度控制。工厂生产时控制钢模质量,保证拆模前的养护时间并并做好成品摆放;

(2) 加强现场测量放线工作。吊装前,复核轴网,并在预制柱上标志出标高线及中心线;吊装完成后二次校对柱净间距,可通过斜支撑进行适当调节;

(3) 合理安排施工顺序。待上层主梁全部吊装、螺杆初拧完后再对预制柱柱底进行固定或者是对下层梁柱节点区螺杆群进行终拧。

4.2 梁柱核心区灌浆施工

新型钢-混组合结构体系的梁柱节点核心区的灌浆工作是施工的重难点之一。施工前期为验证节点区灌浆的可行性,在工厂模拟进行了梁柱节点区的灌浆试验。

由试验结果和现场施工过程的经验,得出以下几点节点区灌浆工作的控制要点:①需保证灌浆缝隙,可在钢梁端板外侧焊接直径6 mm的短钢筋,以保证灌浆料有缝隙可以流入节点区;②灌浆料选择,应选择流动度高、早强的灌浆材料,以保证节点区灌浆的密实度,缩短终拧前的时间;③合理安排打胶时间。在每日钢梁吊装完成后的晚间进行初拧和打胶工作,第二天白天进行叠合板的吊装工作,晚间进行灌浆塞填工作,第三天对节点区螺杆进行终拧工作。

4.3 标准化管理流程

为保证装配式施工过程中的精细化管理,项目前期成立了装配式小组,并梳理了新结构体系的施工工序及装配式施工要点(详见图5),现场各类人员严格按照表中的工作职

责对现场工作进行管理。

约束混凝土柱组合梁结构体系施工工序			
序号	工序名称	主要材料	备注
1	土方施工	土方开挖、土方回填	
2	模板施工	模板、支撑、加固	
3	钢筋绑扎	钢筋、铁丝	
4	混凝土浇筑	混凝土	
5	模板拆除	模板、支撑、加固	
6	土方回填	土方	
7	土方开挖	土方	
8	土方回填	土方	
9	土方开挖	土方	
10	土方回填	土方	
11	土方开挖	土方	
12	土方回填	土方	
13	土方开挖	土方	
14	土方回填	土方	
15	土方开挖	土方	
16	土方回填	土方	
17	土方开挖	土方	
18	土方回填	土方	
19	土方开挖	土方	
20	土方回填	土方	
21	土方开挖	土方	
22	土方回填	土方	
23	土方开挖	土方	
24	土方回填	土方	
25	土方开挖	土方	
26	土方回填	土方	
27	土方开挖	土方	
28	土方回填	土方	
29	土方开挖	土方	
30	土方回填	土方	
31	土方开挖	土方	
32	土方回填	土方	
33	土方开挖	土方	
34	土方回填	土方	
35	土方开挖	土方	
36	土方回填	土方	
37	土方开挖	土方	
38	土方回填	土方	
39	土方开挖	土方	
40	土方回填	土方	
41	土方开挖	土方	
42	土方回填	土方	
43	土方开挖	土方	
44	土方回填	土方	
45	土方开挖	土方	
46	土方回填	土方	
47	土方开挖	土方	
48	土方回填	土方	
49	土方开挖	土方	
50	土方回填	土方	
51	土方开挖	土方	
52	土方回填	土方	
53	土方开挖	土方	
54	土方回填	土方	
55	土方开挖	土方	
56	土方回填	土方	
57	土方开挖	土方	
58	土方回填	土方	
59	土方开挖	土方	
60	土方回填	土方	
61	土方开挖	土方	
62	土方回填	土方	
63	土方开挖	土方	
64	土方回填	土方	
65	土方开挖	土方	
66	土方回填	土方	
67	土方开挖	土方	
68	土方回填	土方	
69	土方开挖	土方	
70	土方回填	土方	
71	土方开挖	土方	
72	土方回填	土方	
73	土方开挖	土方	
74	土方回填	土方	
75	土方开挖	土方	
76	土方回填	土方	
77	土方开挖	土方	
78	土方回填	土方	
79	土方开挖	土方	
80	土方回填	土方	
81	土方开挖	土方	
82	土方回填	土方	
83	土方开挖	土方	
84	土方回填	土方	
85	土方开挖	土方	
86	土方回填	土方	
87	土方开挖	土方	
88	土方回填	土方	
89	土方开挖	土方	
90	土方回填	土方	
91	土方开挖	土方	
92	土方回填	土方	
93	土方开挖	土方	
94	土方回填	土方	
95	土方开挖	土方	
96	土方回填	土方	
97	土方开挖	土方	
98	土方回填	土方	
99	土方开挖	土方	
100	土方回填	土方	

图5 装配式拼装工序与要点

经合理编排施工工序，完成一栋无地下室多层建筑的一、二结构施工仅需20天（详见图6）。

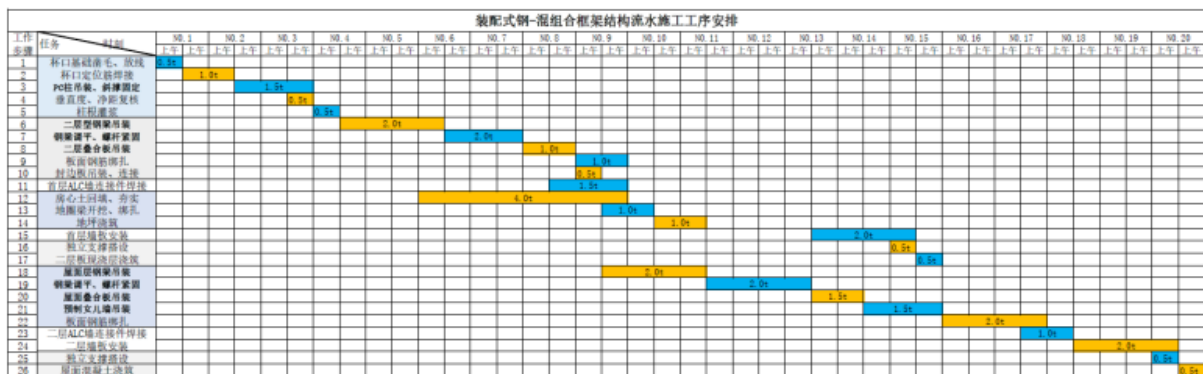


图6 装配式建造流水施工工序安排

5 结束语

当采用一体化建造方式将柱贯通型混凝土柱-钢梁组合框架结构体系应用到工程实体中时，该体系表现出了预制率高、劳动力依赖度低、资源节约、装配高效等优势。由于该体系发挥了钢梁的免模、免撑和叠合板免底模、少支撑的优势，施工过程中的木工作业大量减少，且措施费大幅降低。经工程实例的落地，该体系和一体化建造方式被证实是解决非异形柱框架结构的优选建造方式，也为未来类似新型装配式结构体系的实地应用提供了一些思路与参考。

参考文献

- [1]叶浩文. 装配式建筑一体化建造方式.2017中国建筑产业现代化学术年会[R]. 2017
- [2]崔洪军, 朱嘉峰, 姚胜, 等. 装配式建筑框架节点研

究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(1): 1-12.

[3]赵斌, 吕西林, 刘丽珍. 全装配式预制混凝土结构梁柱组合件抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25 (1) : 81-87.

[4]吕西林, 范力, 赵斌. 装配式预制混凝土框架结构缩尺模型拟动力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2008, 29 (4)

[5]杨红楼, 崔俊强. 新型装配式节点抗震性能与施工关键技术研究[J]. 施工技术, 2018, 47 (21)

[6]CECS 347:2013. 约束混凝土柱组合梁框架结构技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013

[7]王昆, 房晨, 董震. 装配式柱贯通型高强螺栓-端板连接的钢筋混凝土柱-钢梁混合框架结构的设计及工程应用[J]. 住宅与房地产, 2021(35):27-31.