

大型工业厂房钢筋混凝土柱半装配化 工艺研发及应用研究

王建刚¹, 张 清¹, 李智军¹, 张心玥², 刘媛莹², 梅 源²

(1. 陕西建工第五建设集团有限公司, 陕西 西安 710032; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为解决大型工业厂房中高大截面现浇钢筋混凝土柱的模板支设难度大且施工质量不易保证等问题, 提出一种现浇钢筋混凝土柱半装配化工艺, 其利用柱模板钢托架使柱模板与柱钢筋笼组装为一起, 整体吊装直插入预留柱基础后再进行混凝土现场浇筑。本文对半装配化现浇混凝土柱的施工过程和工艺设计进行了研究, 并进行了必要的力学分析。数值分析及工程实际应用结果表明: 此工艺满足安全性要求且安装简单快捷, 缩短了施工工期, 具有良好的经济效益和社会效益。

关键词: 半装配化; 现浇柱; 工艺研发; 数值分析

中图分类号: TU745

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)01-0033-07

Research and application of semi assembly technology of reinforced concrete column in large industrial plant

WANG Jiangang¹, ZHANG Qing¹, LI Zhijun¹, ZHANG Xinyue², LIU Yuanying², MEI Yuan²

(1. Scegc No. 5 Construction Engineering Group Co., Ltd, Xi'an 710032, China;

2. College of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to solve the problems of formwork support and construction quality of cast-in-place reinforced concrete column with high cross-section in large-scale industrial plant, a semi-assembly technology of cast-in-place reinforced concrete column is proposed, in which the column template is assembled with the column reinforcement cage by using the column template steel bracket, and the overall hoisting is directly inserted into the reserved column foundation, and then the concrete is poured on site. In this paper, the construction process and process design of semi-assembled cast-in-place concrete column are studied, and the necessary mechanical analysis is carried out. Results of numerical analysis and engineering application show that the technology meets the safety requirements, and the installation is simple and fast, which shortens the construction period and has good economic and social benefits.

Key words: semi assembly; cast-in-place column; process development; numerical analysis

目前, 我国正大力推广绿色施工理念^[1], 推进建筑工业化, 装配式结构的应用愈加广泛^[2]。但装配式建筑施工中存在的安全风险较大, 对施工过程中的质量及安全控制具有较高的要求, 目前, 对于装配式结构施工的标准规范尚不完善, 施工工艺也有待进一步开发及普及。

近年来已有部分学者对装配式结构施工中的新工艺进行了研究^[3]。Jose 等^[4]提出一种在柱端连接钢筋的梁柱节点, 在循环荷载作用下进行试验, 将预制柱连接结果与现浇混凝土结构连接结果进行比较后发现, 两种构件的受力性能基本相同, 可以采用预制柱-梁连接方式。Saeed 等^[5]研究了两种新型

的预制梁和预制混凝土柱之间的抗弯连接件, 一种为倒置 E 型截面螺栓连接, 另一种为箱形截面焊接连接, 并验证了两种预制连接的性能与相应的整体连接的性能相近。Yang 等^[6]进行了预制 H 型钢混合梁的极限抗弯承载力试验, 分别采用了两端铰支和固支的边界条件, 试验结果表明该构件具有较高的极限承载力和较好的延性, 可作为刚性节点。张艳霞等^[7]提出了一种整体芯筒式全螺栓连接方式, 并对螺栓拉力、柱脚应变等力学性能进行了现场监测, 证实了其设计方法的可行性。刘付均等^[8]提出了一种免模装配一体化钢筋混凝土结构体系用于解决装配式结构中存在的连接整体性及安全性等

问题。张晋元等^[9]对装配式混凝土柱节点进行了设计,其预制柱拼接处的锁具-锁和齿槽状构造改善了纵筋应力的传递,有效提高了柱的受剪承载力。张爱林等^[10]提出了一种装配式梁柱-柱法兰连接节点,从而对梁端的塑性铰位置进行控制,来保证梁柱等构件保持在弹性的阶段。哈芬公司推出了装配式结构中预埋在预制混凝土柱内的新型柱脚螺栓连接装置^[11]。但随着装配式结构应用的展开,如节点连接质量不佳、造价较高、施工安全隐患较大等问题也逐渐显露。

在大型工业厂房中,高大截面独立柱的施工是影响工程整体施工的关键。若对高大截面独立柱进行现场预制再进行现场装配,由于其自重大致使运输及吊装困难,且装配各个环节极易叠加风险导致事故发生^[12];若进行现场浇筑施工,柱模板的支设难度较大^[13],且使用过程中模板也易发生弯曲变形,影响钢筋混凝土柱的垂直度,施工质量难以保障。为解决上述问题,本文提出了一种现浇钢筋混凝土柱半装配化工艺。

1 工程概况

如图 1 所示,该重型高科技精密电子厂房工程占地面积 10 6553 m²,建筑面积 295 122 m²,建筑高度 23.9 m,建筑层数 3 层。电子厂房结构形式为 SRC 复合结构(见图 2),核心区总跨度 96 m,由三排 1.4 m×1.4 m 箱型钢管混凝土柱支撑两跨屋面桁架结构,钢管混凝土柱之间为现浇混凝土柱及预制混凝土梁、柱,支持区竖向构件为型钢混凝土柱(SRC 柱),水平构件为钢梁与钢筋桁架楼承板,楼面为现浇混凝土面层,其中现浇混凝土柱采用了半装配化工艺。



图 1 SRC 复合结构工业厂房示意图

Fig. 1 Schematic diagram of Samsung SRC composite structure industrial plant

2 现浇钢筋混凝土柱半装配化工艺设

2.1 工艺流程设计

现浇钢筋混凝土柱半装配化工艺通过对传统现

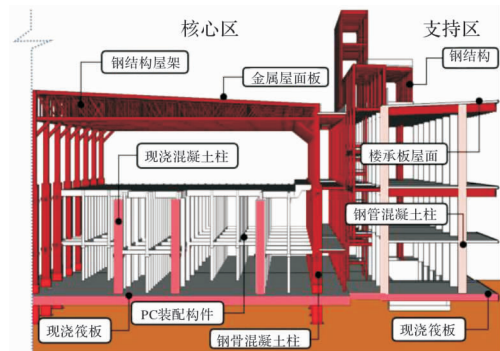


图 2 厂房结构标准段剖面图

Fig. 2 Section of standard section of plant structure

浇混凝土柱工艺的创新,优化设计基础钢筋排布,利用柱模板钢托架使柱模板与柱钢筋笼组装为一体,整体吊装直插入预留柱基础并进行加固校正,再进行混凝土现场浇筑,其工艺流程图见图 3。

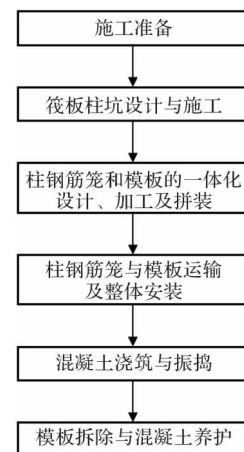


图 3 半装配化工艺流程

Fig. 3 Semi assembly process

2.2 关键工序施工控制方法

2.2.1 筏板柱坑设计与施工

在基础垫层上依据轴线定位框架柱位置及预留相应框架柱位置边界线预埋精轧螺纹钢定位线,并进行标识。随后按照框架柱标识线安装预留柱下沉基础的筏板钢筋定位支架,使用 M12 膨胀螺栓固定。再将基础筏板钢筋安放于定位支架上的定位卡槽内,进行基础筏板钢筋绑扎。然后采用快易收口网、60 mm×80 mm 菱形钢板网以及 Φ16@250 的钢筋绑扎在筏板钢筋定位支架外侧,进行基础筏板混凝土拦截,并在柱下沉基础四角预埋 8 根精轧螺纹钢,与基础筏板钢筋焊接固定。

基础筏板施工时,进行模板定位底座设计(见图 6),预埋固定模板底座预埋件(见图 7),预埋件采用 1.3 m 的 Φ32 的精轧螺纹钢,预埋深度为入筏板内 80 cm,漏出筏板面 50 cm,用于固定模板底座。模板底座依据位置安放后采用 2 根[16 # 槽钢背面对焊用

吊放于第一块模板上并固定后吊装第二块 L 型模板, 与第一块模板进行拼装(见图 11)。柱钢筋笼与钢模板连接顶部采用定制钢托架, 钢托架与模板螺栓连接固定, 柱钢筋笼主筋顶部套丝 45.5 mm, 加工与柱主筋同规格、同型号钢筋丝杆, 丝杆采用 300 mm 长 $\Phi 36$ 的钢筋两头套丝, 一头套丝 150 mm, 另一头套丝 45.5 mm, 柱主筋与丝杆采用 $\Phi 36$ 套筒连接固定, 丝杆另一头采用套筒加垫片卡在钢托架上, 使柱子钢筋笼与钢模整体固定, 拼装形成整体。在钢筋笼一角位置安装混凝土浇筑串筒, 混凝土浇筑串筒选用 9 m 长 $\Phi 200$ 钢管制作, 每间隔 50 cm 三面依次向上留设 150 mm \times 150 mm 孔洞。



图 11 钢筋笼与模板拼装

Fig. 11 Assembly of reinforcement cage and formwork

2.2.3 柱钢筋笼与模板运输及整体安装

利用平板车将拼装好的钢筋笼和模板运至现场, 柱钢筋笼与模板的整体安装设计如图 12 所示, 钢筋笼与模板整体吊装选用 130 t 履带吊与 75 t 汽车吊配合使用(见图 13)。汽车吊的起吊点位于柱模板底部吊耳位置, 履带吊吊点位于模板顶部吊耳位置, 履带吊与汽车吊配合同时平稳起吊, 待模板水平吊离地面高度约 2 m 后, 起吊模板底部的汽车吊停止起吊并向起吊模板顶部履带吊旋转靠近, 起吊模板顶部履带吊继续起吊使模板与钢筋笼整体竖立, 后对中预留柱位置进行安装。吊装完成后安装模板斜向支撑及拉设揽风绳, 借助模板斜向支撑、揽风绳及模板底座再次校正模板的垂直度及柱顶部标高, 复核无误后固定。

2.2.4 混凝土浇筑与振捣

提前一天浇筑现浇柱底部筏板预留口位置混凝土, 浇筑时由现浇柱筏板预留口对角同时进行浇筑, 浇筑高度同筏板顶面齐平, 并振捣密实, 收面成型。第二天待底部混凝土凝固后, 拆除柱钢筋笼与模板顶部固定托架, 安装操作平台, 操作平台与柱模板采用螺栓连接, 采用曲臂车配合汽车吊进行安装。安装完毕后进行柱混凝土浇筑。如图 14 所示, 柱混凝土浇筑选用 37 m 臂架泵车进行, 由于

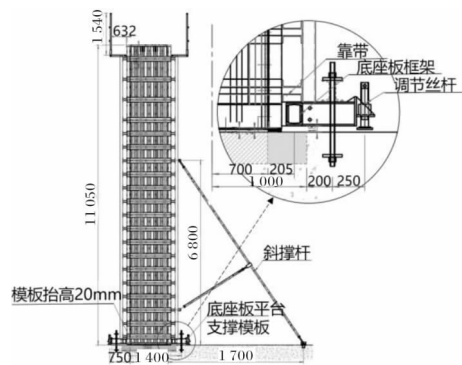


图 12 柱钢筋笼与模板整体安装设计

Fig. 12 Integral installation design of column reinforcement cage and formwork



图 13 柱钢筋笼与模板整体吊装施工

Fig. 13 Integral hoisting construction of column reinforcement cage and formwork

框柱高度较高混凝土浇筑时落差较大, 在混凝土浇筑时借用预先埋入的串筒进行放料, 每根柱浇筑混凝土配备 2 条长 12 m 的振捣棒进行振捣, 每次浇筑高度约 80 cm 时停止放料进行振捣, 由柱角对角进行下棒振捣, 每次振捣时长约 20 s, 浇筑混凝土后串筒埋入柱内。



图 14 柱混凝土浇筑

Fig. 14 Pouring construction of column concrete

2.2.5 模板拆除与养护

柱混凝土浇筑完成后, 待柱混凝土强度达到要求且能保证柱表面及棱角不因拆模而受损坏后再进行柱模板拆除^[14], 柱模板拆除的顺序和方法遵循自上而下的原则, 先拆除混凝土操作架与柱加固件, 再拆除柱两个角的模板连接件, 柱模板脱离柱混凝土面后利用汽车吊吊拆, 即模板拆除中也作为两张整模, 拆除中利用吊车进行单张整模吊拆。柱混凝土养护采用覆盖保湿的养护方法, 采用双层 PE 薄膜将柱缠绕保湿养护(见图 15)。



图 15 柱混凝土保湿养护

Fig. 15 Curing of column concrete

3 基于数值分析的半装配化施工质量与安全控制

该半装配化现浇混凝土柱为高大截面柱, 在场外进行加工和拼装, 并运输至现场进行安装和混凝土浇筑, 为防止现场施工过程中柱的变形过大, 建立了有限元模型进行数值分析, 保障施工时的质量和安全. 首先对采用半装配化工艺的现浇柱进行模板侧压力计算. 采用插入式振动器且浇筑速度不大于 10 m/h, 混凝土塌落度不大于 180 mm 时, 新浇筑混凝土对模板的侧压力的标准值, 可按照下列公式分别计算^[15], 并应取其中较小值.

$$F = 0.28\gamma_c t_0 \beta_1 \beta_2 \sqrt{v} \quad (1)$$

$$F = \gamma_c H \quad (2)$$

其中: F 为新浇筑混凝土对模板的最大侧压力 (kN/m^2); γ_c 为混凝土的重力密度 (kN/m^3); V 为混凝土的浇筑速度 (m/h); t_0 为新浇混凝土的初凝时间 (h); β_1 为外加剂影响修正系数; β_2 为混凝土坍落度影响修正系数; H 为混凝土侧压力计算位置处至新浇混凝土顶面的总高度 (m).

由公式(1)得

$$F = 0.28 \times 25 \text{ kN/m}^3 \times 6.6 \text{ h} \times 1 \times \sqrt{2} \text{ m/h} \\ = 65.4 \text{ kN/m}^2$$

由公式(2)得:

$$F = 25 \text{ kN/m}^3 \times 10 \text{ m} \\ = 250 \text{ kN/m}^2$$

取其中较小值, 即取 $F = 65.4 \text{ kN/m}^2$

由振捣产生的荷载 F 按 6.5 kN/m^2 计算, 倾倒混凝土时产生的水平荷载值 F 按 4 kN/m^2 计算, 施工人员荷载 2.5 kN/m^2 , 荷载分项系数按表 2 取值.

表 2 荷载分项系数取值表

Tab. 2 Value table of partial load factor

荷载类别	分项系数
新浇筑混凝土对模板侧面的压力	1.2
振捣混凝土时产生的荷载	1.4
倾倒混凝土时产生的荷载	1.4
施工人员及施工设备荷载	1.4

则总荷载为

$$F_{\text{总}} = 65.4 \times 1.2 + 6.5 \times 1.4 + 4 \times 1.4 + 2.5 \\ \times 1.4 \\ = 96.68 \text{ kN/m}^2$$

高大截面柱进行混凝土浇筑时模板的变形是影响安全的重要因素, 因此, 使用了 midas civil 2015 进行混凝土浇筑时柱钢模板的受力性能分析, 建立的有限元模型如图 16 所示, 柱模板所用材料为 Q235 钢, 面板为 8 mm 钢板, 横向使用 [10 # 加强, 背楞采用 [16 #, 法兰采用 12 mm 钢板封侧槽口, 对拉杆件长 30 mm. 模板上部的四个对拉杆件布置间距为 750 mm, 其余对拉杆件布置间距为 500 mm. 模板长度设为 11.05 m, 柱截面尺寸为 $1.4 \text{ m} \times 1.4 \text{ m}$, 模板侧压力使用上述计算值.

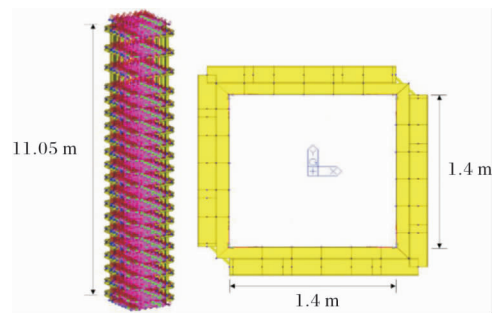


图 16 柱模板有限元模型

Fig. 16 Numerical model of column formwork

柱模板的变形情况如图 17 所示, 在采用半装配化工艺后进行混凝土浇筑, 柱模板四面都有一定程度的变形. 因上部的对拉杆件布置间距较大, 下部的对拉杆件布置间距较小, 模板的上部变形较下部变形相对较大, 但模板的整体变形量最大值仅为 0.4 mm, 满足《建筑施工模板安全技术规范》中对模板变形量容许值的要求.

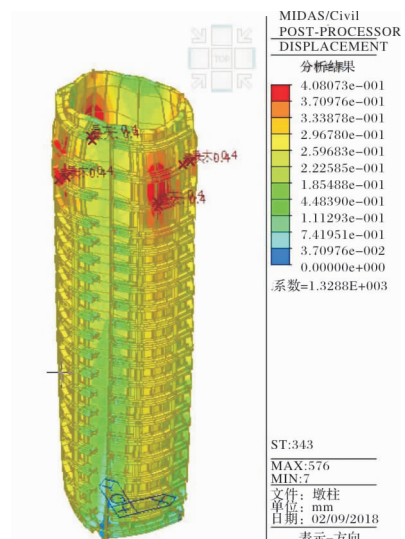


图 17 柱模板整体变形云图

Fig. 17 Integral deformation nephogram of column formwork

对混凝土浇筑后柱模板面板和拉杆的应力进行数值分析后,得到柱模板拉杆受到的最大剪应力为 103 MPa(见图 18),柱模板面板受到的最大应力为 17 MPa(见图 19)。根据《钢结构设计标准》中的规定,在钢材抗拉、抗压和抗弯时,厚度或直径小于 16 mm 的 Q235 钢的强度设计值为 215 MPa^[16],因此,数值模拟值远小于规范的规定值,满足安全性要求。

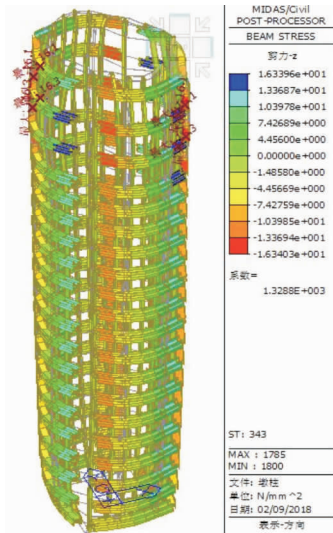


图 18 柱模板对拉杆件应力云图

Fig. 18 Stress nephogram of column formwork tie rod

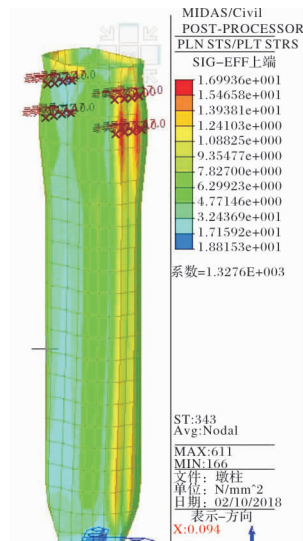


图 19 柱模板面板应力云图

Fig. 19 Stress nephogram of column formwork panel

通过对现浇钢筋混凝土柱半装配化工艺进行数值计算与分析,柱钢模板是安全可靠的,承载力及变形均在规范控制范围内,强度计算满足规范要求,施工时的质量与安全能够得到保证。

4 结论

(1)本文提出了一种现浇钢筋混凝土柱半装配

化工艺,并对其工艺流程进行了详细的阐述,通过数值分析对其合理性进行了验证并成功应用于工程实际;

(2)现浇钢筋混凝土柱半装配化工艺解决了在工业厂房中进行高大截面现浇混凝土柱施工时存在的施工空间小、模板支设难度大、安全风险高等问题,为类似高大截面现浇钢筋混凝土柱的施工提供了工程经验;

(3)现浇钢筋混凝土柱半装配化工艺的应用减少了施工材料的投入与消耗,施工成本略有降低且缩短了施工工期,施工质量有所提升,具有良好的推广前景。

参考文献 References

- [1] 王啸楠,高旭杰. 螺栓钢板接缝连接装配式混凝土剪力墙的受力性能分析[J]. 建筑结构,2019,49(S2): 526-530.
WANG Xiaonan,GAO Xujie. Mechanical behaviors analysis of precast concrete shear wall with bolted steel plate joints[J]. Building Structure,2019,49(S2): 526-530.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部:装配式混凝土结构技术规程:JGJ1-2014,[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.
Ministry of housing and Urban-Rural Development of P R China. Technical specification for precast concrete structures:JGJ1-2014,[S]. Beijing:China Architecture & Building Press,2017.
- [3] 黄小坤,田春雨,万墨林,等. 我国装配式混凝土结构的研究与实践[J]. 建筑科学,2018,34(9):50-55.
HUANG Xiaokun,TIAN Chunyu,WAN Molin,et al. Research and applications of precast concrete structures in China[J]. Building Science,2018,34(9): 50-55.
- [4] JOSÉ F R, CARLOS A B, JOSÉ I R, et al. Seismic performance of precast concrete column-to-column lap-splice connections[J]. Engineering Structures,2018, 172:687-699.
- [5] SAEED B, MORTEZA M, FATEMEH S, et al. Behavior of two new moment resisting precast beam to column connections subjected to lateral loading[J]. Engineering Structures,2017,132:808-821.
- [6] YANG K H, OH M H, KIM M H, et al. Flexural behavior of hybrid precast concrete beams with H-steel beams at both ends[J]. Engineering Structures, 2010,32(9):2940-2949.
- [7] 张艳霞,程梦瑶,张爱林,等. 箱形柱整体芯筒式全螺栓连接受力性能研究[J]. 建筑结构学报,2020,41(5):

- 180-189.
- ZHANG Yanxia, CHENG Mengyao, ZHANG Ailin, et al. Performance of box-shaped column connection achieved with core sleeve and bolts[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(5): 180-189.
- [8] 刘付钧, 李盛勇, 李定乾, 等. 免模装配一体化钢筋混凝土结构体系关键技术开发及研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(4): 8-12.
- LIU Fujun, LI Shengyong, LI Dingqian, et al. Key techniques development and research of formwork-free precast integration system of RC structure[J]. Building Structure, 2020, 50(4): 8-12.
- [9] 张晋元, 王昊, 王金泽, 等. 新型装配式混凝土柱节点理论分析与数值模拟[J]. 工业建筑, 2019, 49(1): 85-90, 114.
- ZHANG Jinyuan, WANG Hao, WANG Jinze, et al. Theoretical analysis and numerical simulation of a novel precast concrete column-column joint[J]. Industrial Construction, 2019, 49(1): 85-90, 114.
- [10] 张爱林, 李超, 姜子钦, 等. 装配式钢结构梁柱-柱法兰连接节点受力机理研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(5): 11-17.
- ZHANG Ailin, Li Chao, JIANG Ziqin, et al. Research on stress mechanism of beam-column flange connections of prefabricated steel structure[J]. Industrial Construction, 2018, 48(5): 11-17.
- [11] CAMNASIO E. Bolted column connection for seismic applications[J]. Betonwerk + Fertigteil-Technik/Concrete Plant + Precast Technology, 2017, 83(8): 36-43.
- [12] 高欣, 陈琳彦, 皮宗婕, 等. 装配式混凝土结构施工风险管控机制[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(11): 1676-1682.
- GAO Xin, CHEN Linyan, PI Zongjie, et al. Construction risk control mechanism for fabricated concrete structure[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(11): 1676-1682.
- [13] 胡长明, 汪杰, 李家涛, 等. 混凝土浇筑过程中高支模力学响应的全程分析[J]. 工业建筑, 2013, 43(2): 88-93, 133.
- HU Changming, WANG Jie, LI Jiatao, et al. The full analysis of high support system for formwork during the construct of the roof[J]. Industrial Construction, 2013, 43(2): 88-93, 133.
- [14] 段联保. 混凝土施工质量控制研究[J]. 工业建筑, 2011, 41(S1): 1122-1125.
- DUAN Lianbao. Research on supervision of concrete construction quality[J]. Industrial Construction, 2011, 41(S1): 1122-1125.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑施工模板安全技术规范: JGJ162-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- Ministry of housing and Urban-Rural Development of P R China. Technical code for safety of construction formwork: JGJ162-2008[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2008.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准[S]. 北京: GB 50017-2017, 中国建筑工业出版社, 2017.
- Ministry of housing and Urban-Rural Development of P R China. Standard for design of steel structures: GB 50017-2017[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.

(编辑 沈 波)