

Reinforcement Design and Finite Element Analysis of a Frame Structure with Storey-Adding

Yahui Zhao¹, Yuedong Sun¹, Guangfu Cheng^{1,2}

¹Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Reduction, Shandong University of Science and Technology, Qingdao Shandong

²The Second Construction Co. Ltd. of China Construction Eighth Engineering Division, Jinan Shandong
Email: 574862214@qq.com

Received: Nov. 18th, 2019; accepted: Dec. 16th, 2019; published: Dec. 23rd, 2019

Abstract

The storey-adding of a frame structure resulted in excessive axial compression ratio of some frame columns with 4 storeys. Combined with the actual design of an international financial center building, the reinforcement design of columns in storey-adding structures was introduced. Based on the reinforcement method of external steel-clad, a comprehensive reinforcement scheme using both enlarged section method and external steel-clad method was proposed. Then the mechanical indexes of the two schemes were compared to decide which solution is better. The results show that the mechanical indexes of the two schemes conform to the current standard. However, the comprehensive strengthening method has the advantages of increasing section reinforcement method and external steel-clad method, simultaneously, its effect on clearance area is not significant and it uses less steel which has better economy.

Keywords

Storey-Adding, PKPM, Holistic Analysis, Ductility, External Steel-Clad Method, Comprehensive Strengthening Method

某多层框架结构加层加固设计及有限元分析

赵雅慧¹, 孙跃东¹, 程光福^{1,2}

¹山东科技大学土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛

²中建八局第二建设有限公司, 山东 济南

Email: 574862214@qq.com

收稿日期: 2019年11月18日; 录用日期: 2019年12月16日; 发布日期: 2019年12月23日

摘要

由于某在建国际金融中心建筑加层改造的需要,造成已建4层的部分框架柱轴压比超限。结合其加层改造设计实际,介绍了加层结构框架柱的加固设计措施。在外包型钢加固法的基础上,提出了一种同时运用增大截面法及外包型钢法的综合加固方案。比较外包型钢法及综合法加固后加层结构各项力学指标,选择最优加固方案。结果表明,两种方案加固后加层结构各项力学指标均满足现行规范要求,但综合加固法同时具有增大截面加固法及外包型钢加固法的优点,不显著影响净空面积,且钢材使用量较少,经济性较好,可应用于该类加层加固工程。

关键词

结构加层, PKPM, 整体分析, 延性, 外包型钢加固法, 综合加固法

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前,我国城市化进程正处于加速发展阶段,城市建设用地日益紧缺。为缓解建设用地压力,提高土地利用效率,建筑物的加层改造已被广泛应用。冯廉[1]、S. Kahraman [2]等结合工程实际分析了加层结构模型的动力特性,对不满足规范要求部位提出了加固方案,为类似加层加固工程提供了理论依据;魏常宝[3]等结合某多层框架结构办公楼加层加固工程实际,给出了后续使用50年的框架结构的加固思路和设计方法,为类似加层工程的加固设计提供了参考;杨勇[4]等推导了预应力钢带打包加固钢筋混凝土柱后轴压比的计算公式并成功应用于某加层工程中,为日后实际工程的应用提供了实践参考;肖伟[5]等比较了不同加固方案在某增层工程中的加固效果,为相关试验研究提供了借鉴;赵玲军[6]等论证了框架结构加层改造的三种常见方法,引入了一种混合结构梁柱节点连接方式,为同类工程的加层提供了参考。

针对框架柱的加固计算,目前大多采用增大截面加固法或外包型钢加固法,但增大截面加固法柱截面尺寸的增大可能影响建筑物的使用功能,而外包型钢加固法用钢量较大,加固成本较高。本文首先运用PKPM软件SATWE模块对不加固直接加层结构进行计算分析,结合主体结构检测鉴定结论,提出两种框架柱的加固处理方案,方案一为外包型钢加固法,方案二为同时运用增大截面法及外包型钢法的综合加固法。然后应用PKPM软件JDJG模块分别建立两种方案加固后加层结构整体模型,对加固后加层结构的加固效果进行综合评价与比较,得出最优加固方案。

2. 工程背景

2.1. 工程概况

某国际金融中心建筑,原设计为5层现浇钢筋混凝土框架结构。1、2层层高为4.5 m,3~5层层高为4.2 m,建筑总高度21.6 m。该建筑抗震设防烈度7度(0.1 g),第I组,场地类别为II类,地面粗糙度类别为B类,抗震等级2级。基础采用C30柱下独立基础,主体结构的板、梁、柱均采用C30混凝土。板、梁、柱主筋采用HRB400级钢筋,梁、柱箍筋为HRB335级钢筋。其结构平面布置见图1。

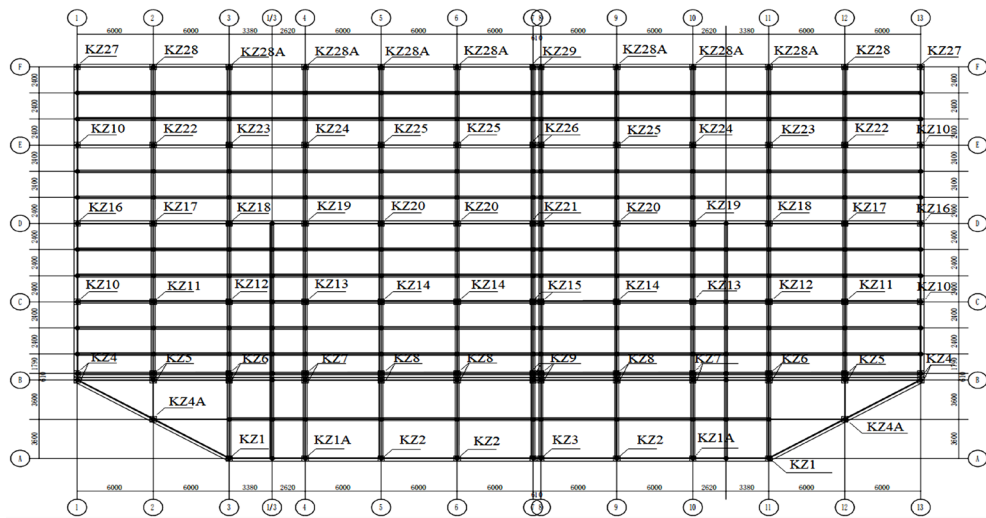


Figure 1. The structural plan of an international financial center
图 1. 某国际金融中心结构平面图

该工程施工至第 4 层时甲方要求在原设计基础上增加 3 层，即加层后为地上 8 层的框架结构。房屋加层引起的荷载变化，必将导致结构受力和变形的增加，因此，为保证建筑物的安全，需对该建筑主体结构进行检测鉴定及计算分析，并根据分析结果进行加固改造。

2.2. 主体结构检测鉴定结论

根据主体结构检测鉴定报告，该建筑主体框架结构(柱、梁和板)的截面尺寸、混凝土强度和配筋均达到设计要求；柱下独立基础也满足规范设计要求。

在不加固的基础上，直接在原结构上增加 3 层，层高均为 4.2 m。加层后为地上 8 层的框架结构，建筑总高度为 34.2 m。

3. 直接加层结构内力分析

3.1. 主体结构检测鉴定结论

根据主体结构检测鉴定报告，该建筑主体框架结构(柱、梁和板)的截面尺寸、混凝土强度和配筋均达到设计要求；柱下独立基础也满足规范设计要求。

在不加固的基础上，直接在原结构上增加 3 层，层高均为 4.2 m。加层后为地上 8 层的框架结构，建筑总高度为 34.2 m。

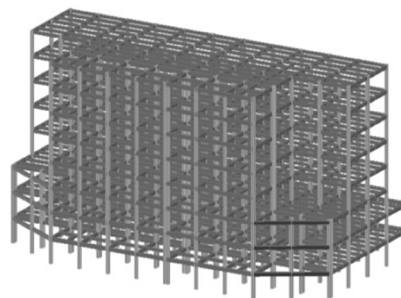


Figure 2. Calculation model of the storey-adding structure
图 2. 直接加层结构计算模型

运用 PKPM 软件 SATWE 模块对不加固直接加层的结构进行建模分析, 所取计算参数如下:

恒载根据图纸按现行荷载规范[7]计算确定; 活荷载: 国际贸易交易大厅、展厅及走廊楼面活荷载取 3.5 KN/m^2 , 会议厅、商务中心、卫生间、楼梯间活荷载取 2.0 KN/m^2 , 上人屋面活荷载取 2.0 KN/m^2 ; 修正后的基本风压取 0.6 KN/m^2 , 场地特征周期 0.35 s , 振型数取 15 个, 结构阻尼比为 0.05; 混凝土容重 26 KN/m^3 ; 钢材容重 78 KN/m^3 。其直接加层模型见图 2。

3.2. 计算结果分析

经抗震承载力及变形验算, 直接加层结构地震作用下 X、Y 向最大层间位移角分别为 $1/1087$ 、 $1/1229$, 满足小于规范限值 $1/550$ [8]的要求; 结构自振周期表现为前两阶振型平动, 第三阶振型扭转振动, 周期比为 0.89, 满足规范中 ≤ 0.90 的限值要求; X 向、Y 向有效质量系数分别为 99.04%、99.17%, 满足规范大于 90%的要求, 结构参与振型足够; 直接加层后, 1~4 层共计 69 个框架柱的轴压比 > 0.75 , 超过规范限值要求, 柱延性不足, 需要进行加固处理。其轴压比计算结果见表 1。

Table 1. Axial compression ratio of 1-4 F columns of storey-adding structure

表 1. 直接加层结构 1~4 F 部分柱轴压比

楼层号	柱编号(KZ)															
	8	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1F	0.76	0.89	0.99	1.07	1.15	0.81	0.87	1.12	1.04	0.96	1.07	0.78	0.97	0.81	0.76	0.78
2F	0.64	0.77	0.87	0.95	1.01	0.69	0.78	1.09	0.92	0.83	0.90	0.65	0.80	0.69	0.63	0.68
3F	0.55	0.66	0.76	0.84	0.88	0.59	0.67	0.97	0.81	0.72	0.80	0.57	0.97	0.81	0.72	0.80
4F	0.46	0.52	0.61	0.69	0.73	0.49	0.55	0.80	0.66	0.59	0.66	0.47	0.53	0.45	0.41	0.45

4. 柱加固设计

根据检测鉴定报告及直接加层结构计算结果, 需对轴压比超限的柱进行加固处理以提高其承载力。

尽管增大截面加固法及外包型钢加固法都能有效提高框架柱的承载力, 但柱截面的增大可能影响该国际贸易中心建筑的使用功能, 为不显著减小净空面积, 拟采用外包型钢加固法及同时运用增大截面法及外包型钢法的综合加固法两种加固方案分别对轴压比超限的柱进行加固设计, 综合比较两种加固方案, 选择最优方案应用于该工程。

选取底层轴压比最大的一根柱 KZ14, 原截面尺寸为 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$, 混凝土强度为 C30, 柱高 4500 mm 。直接加层后柱的内力为: $N = 4095.7 \text{ KN}$, $M_x = 128.6 \text{ KN}\cdot\text{m}$, $M_y = 0.7 \text{ KN}\cdot\text{m}$ 。

4.1. 外包型钢加固设计

采用外包型钢法对 KZ14 进行加固设计, 其加固设计过程如下:

1) 大小偏心判别

根据《混凝土结构设计规范》[9], 对于对称配筋的矩形截面柱, 其相对受压区高度根据式(1)计算, 式中各参数含义见规范。

$$\xi = \frac{N - \xi_b \alpha_1 f_c b h_0}{W} + \xi_b \quad (1)$$

其中,

$$W = \frac{Ne - 0.43\alpha_1 f_c b h_0^2}{(Ne - 0.43\alpha_1 f_c b h_0^2) / [(\beta_1 - \xi_b) \cdot (h_0 - a'_s)] + \alpha_1 f_c b h_0}$$

ξ_b 为界限相对受压区高度，且有：

$$\xi_b = \beta_1 / [(1 + f_y) \cdot (E_s \cdot \varepsilon_{cu})] \tag{2}$$

经计算，该柱属于小偏心受压构件。

2) 外包型钢加固设计

根据《混凝土结构设计规范》[9] 8.3.1 外包型钢加固法的构造规定，选用 L125 × 8 等边角钢对称布置，新增角钢面积 7900 mm²。该型号角钢最小回转半径 $i = 25$ mm，缀板采用 50 × 5，缀板面积 1000 mm²，缀板间距 300 mm。角钢与缀板均采用 Q235 级钢材。其加固截面见图 3。

3) 加固验算

根据《混凝土结构设计规范》[9]，根据式(3)对 KZ14 正截面承载力进行验算，式中各参数含义见规范。

$$N_e \leq \alpha_1 f_{c0} b x (h_0 - x/2) + f_{y0} A_{s0} (h_0 - a'_s) + \sigma_{s0} A_{s0} (a_{s0} - a_a) + \alpha_a f'_a A'_a (h_0 - a'_a) \tag{3}$$

代入上述加固做法中各参数值得： $N_e = 1172.6$ KN·m，右边 = 1271.5 KN·m，上述不等式显然成立。因此，该加固设计满足要求。

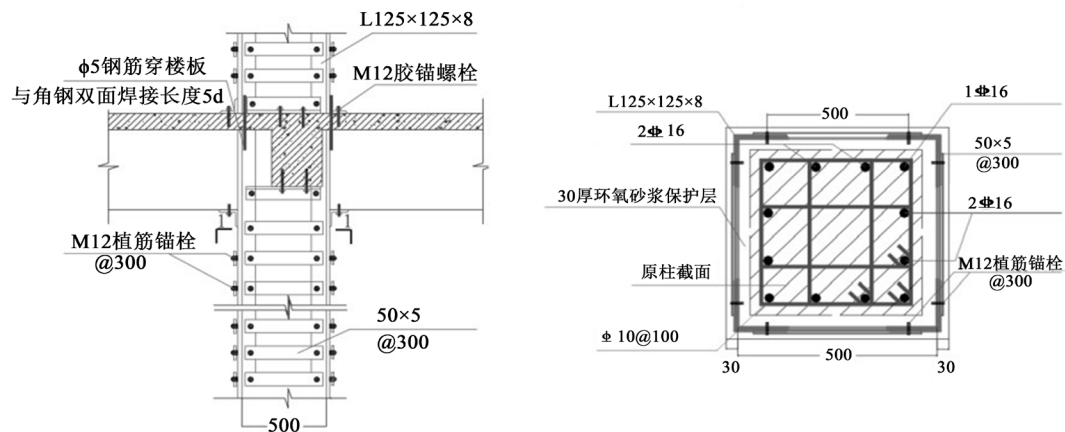


Figure 3. Schematic diagram of external steel-clad of frame column
图 3. 框架柱外包型钢加固示意图

4.2. 综合法加固设计

采用综合法对 KZ14 进行加固设计，其加固设计过程如下：

初步计算按轴心受压承载力进行[10]，原柱截面尺寸为 500 mm × 500 mm，需要提高的承载力为 1712.7 KN。增大截面加固设计采用四面围套加固法，新增混凝土强度等级采用 C35，各边增大截面尺寸为 100 mm (每侧各 50 mm)，新增截面面积 110,000 mm²。新增角筋采用 2C16，中部筋采用 3C16，箍筋采用 B12@100。根据式(4)，增大截面法提高的截面承载力为 1322.6 KN。根据式(5)，所需角钢面积为 1845 mm²。式中各参数含义见规范。

$$\Delta N = 0.9\varphi\alpha_{cs} (f_c A_c + f_y A_s) \tag{4}$$

$$A = \frac{\Delta N}{0.9\varphi\alpha_a f_y} \tag{5}$$

选用 L75×5 等边角钢对称布置, 该型号角钢最小回转半径 $i = 15 \text{ mm}$ 。缀板采用 40×4 , 缀板间距 300 mm。角钢与缀板均采用 Q235 级钢材, 新增角钢面积 2964.8 mm^2 , 缀板面积 640 mm^2 。其加固截面见图 4。

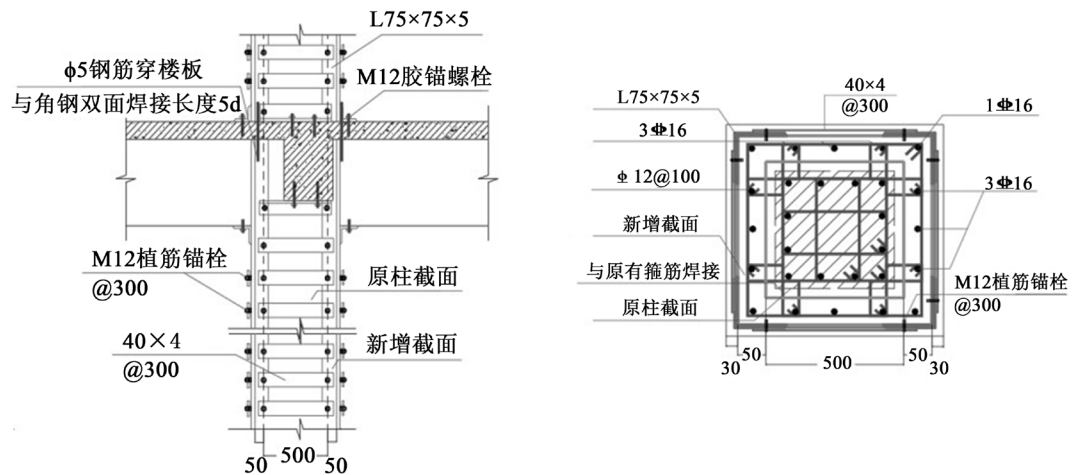


Figure 4. Schematic diagram of the comprehensive strengthening method of frame column
图 4. 框架柱综合法加固示意图

5. 加固后高层结构内力分析

5.1. 综合加固法加固参数输入

运用 PKPM 软件 JDJG 模块, 输入框架柱外包型钢加固做法。由于 PKPM 软件 JDJG 模块中没有综合加固法参数输入选项, 故在增大截面加固法的基础上, 利用型钢等代混凝土理论[11]将型钢截面换算为混凝土截面, 然后按增大截面法输入加固参数。

根据《混凝土结构设计规范》[9], C35 混凝土弹性模量 E_c 为 $3.15 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$; 由《钢结构设计规范》[12], 型钢弹性模量 E_s 为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。由 3.2 节可知, 组合截面型钢面积 A_a 为 3604.8 mm^2 , 根据式(6)等代成混凝土的面积为 $22,890.48 \text{ mm}^2$, 则全截面混凝土面积 $A_A = 600 \times 600 + 22,890.48 = 382,890.48 \text{ mm}^2$ 。此时, 根据式(7)算得的轴压比为 0.64, 满足规范要求。因此, 实际换算面积:

$$A_h = N / (\mu f_c) = 4095.7 \times 10^3 / (16.7 \times 0.64) = 383205 \text{ mm}^2 \text{ 相当于 } 625 \text{ mm} \times 625 \text{ mm 的柱截面。}$$

$$A_{ac} = E_s / E_c \cdot A_a \quad (6)$$

$$\mu = N / (f_c \cdot A_A) \quad (7)$$

5.2. 内力分析

经计算, 外包型钢法加固后高层结构地震作用下 X、Y 向最大层间位移角分别为 1/1096、1/1238, 综合法加固后高层结构地震作用下 X、Y 向最大层间位移角分别为 1/1099、1/1259, 其值较直接高层结构均略有减小, 结构整体侧向刚度有所增加; 两种加固方案结构自振周期均表现为前两阶振型平动, 第三阶振型扭转振动, 前者周期比为 0.88, 后者为 0.87, 与直接高层结构相比均有所降低, 结构动力性能有所改善; 前者 X 向、Y 向有效质量系数分别为 98.81%、98.94%, 后者分别为 98.04%、98.18%, 两种方案均仍满足规范大于 90% 的要求; 两种方案加固后, 原承载力不足的框架柱轴压比均被控制在规范限值 0.75 以内, 且外包型钢法加固柱轴压比降低范围在 26.43%~41.74%, 综合法加固柱轴压比降低范围在 19.56%~55.96%, 柱延性均得到明显提高。两种方案加固后结构轴压比计算结果分别见表 2、表 3。

Table 2. Axial compression ratio of 1-4 F columns after reinforcement with external steel-clad
表 2. 外包型钢法加固后结构 1~4 F 部分柱轴压比

楼层号	柱编号(KZ)															
	8	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1F	0.55	0.65	0.71	0.70	0.67	0.58	0.64	0.71	0.68	0.69	0.72	0.56	0.70	0.59	0.55	0.57
2F	0.64	0.56	0.63	0.69	0.73	0.69	0.56	0.72	0.66	0.60	0.66	0.65	0.58	0.69	0.63	0.68
3F	0.55	0.66	0.55	0.61	0.64	0.59	0.67	0.70	0.58	0.72	0.58	0.57	0.70	0.58	0.72	0.58
4F	0.46	0.52	0.61	0.69	0.73	0.49	0.55	0.58	0.66	0.59	0.66	0.47	0.53	0.45	0.41	0.45

Table 3. Axial compression ratio of 1-4 F columns after reinforcement with comprehensive strengthening method
表 3. 综合法加固后结构 1~4 F 部分柱轴压比

楼层号	柱编号(KZ)															
	8	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1F	0.53	0.55	0.62	0.62	0.64	0.50	0.54	0.62	0.65	0.59	0.69	0.48	0.61	0.49	0.46	0.48
2F	0.64	0.48	0.55	0.61	0.64	0.67	0.56	0.48	0.74	0.57	0.59	0.64	0.50	0.66	0.62	0.67
3F	0.55	0.66	0.48	0.53	0.56	0.57	0.67	0.66	0.50	0.71	0.52	0.56	0.66	0.50	0.71	0.52
4F	0.45	0.51	0.61	0.69	0.73	0.47	0.54	0.55	0.66	0.59	0.59	0.47	0.53	0.44	0.40	0.44

对两种方案各项力学指标对比后可知,在不显著减小建筑净空面积的前提下,本工程采用外包型钢加固法及综合加固法均能满足现行规范要求。但综合法加固柱同时具有增大截面加固法及外包型钢加固法的优点,既能有效提高柱的延性,增加结构侧向刚度,又能有效降低钢材使用量,节约成本,因此本工程采用综合法进行加固改造。

6. 结论

本文在已有的框架柱外包型钢加固方法基础上,提出一种综合加固方案,通过两种方案加固效果对比,主要得出以下结论:

1) 外包型钢法及综合法加固柱,均能将超限的轴压比控制在规范限值之内,能够有效增加柱的延性,提高柱的承载力;二者在地震作用下最大层间位移角较直接加层结构均有所减小,能够提高结构的整体侧向刚度。

2) 与外包型钢加固法相比,综合加固法同时具有增大截面加固法及外包型钢加固法的优点,且钢材使用量较少,经济性更好,可以应用于该类加层加固工程。

参考文献

- [1] 冯廉, 常征. 某办公楼抗震加固、加层结构设计[J]. 建筑科学, 2002, 18(3): 22-25.
- [2] Kahraman, S., Saatci, A. and Misir, S. (2006) Effects of Adding Illegal Storys to Structural Systems. *Sadhana*, 31, 515-526. <https://doi.org/10.1007/BF02715910>
- [3] 魏常宝, 郑建军, 钱铭. 某多层框架结构办公楼加层加固设计[J]. 工程抗震与加固改造, 2018, 40(1): 109-115.
- [4] 杨勇, 陈大为, 张波. 预应力钢带加固技术在某商场增层工程中的应用[J]. 工业建筑, 2015, 45(3): 44-47.
- [5] 肖伟, 孟钢, 周晓夫. 钢筋混凝土框架食堂的加层改造及抗震加固设计与分析[J]. 建筑科学, 2001, 17(3): 20-24.
- [6] 赵玲军, 刘莹莹, 赵立中. 框架结构加层改建设计实例[J]. 建筑结构, 2016(46): 900-903.
- [7] GB50009-2012 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

- [8] JGJ3-2010 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [9] GB50010-2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [10] 严林. 采用外粘钢加固法对偏心受压柱进行加固设计的探讨[J]. 福建建筑, 2018, 122(8): 44-45.
- [11] 张磊, 漆松. 对外粘型钢加固柱轴压比计算方法的探讨[J]. 四川建筑科学研究, 2014, 40(4): 121-124.
- [12] GB50017-2017 钢结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.