

# 某框架结构的抗震性能检测分析

骆瑞萍<sup>1,2</sup>, 贺洁星<sup>2\*</sup>, 徐胜超<sup>1</sup>, 王程鹏<sup>2</sup>

<sup>1</sup>湖北省建筑科学研究设计院股份有限公司, 湖北 武汉

<sup>2</sup>中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉

Email: bobhust@126.com, \*1641992485@qq.com

收稿日期: 2021年5月21日; 录用日期: 2021年6月14日; 发布日期: 2021年6月21日

## 摘要

介绍了某框架结构进行抗震性能检测分析。针对该框架结构的抗震性能分析, 主要进行三方面工作。通过进行房屋现状调查来了解结构的使用及破损情况, 通过抗震构造调查来了解结构的抗震体系及构造措施, 通过PKPM系列软件对该建筑进行抗震承载能力验算。结果表明: 1) 设计不合理, 结构体系不利于抗震, 构件设计承载力不满足抗震要求, 是导致结构不满足抗震要求的主要原因; 2) 施工质量不达标, 导致预制板拼接处出现裂缝, 构件尺寸与设计不符, 箍筋间距不满足要求, 是结构不满足抗震要求的次要原因; 3) 建议优化结构体系, 改变结构受力方式, 同时对主要受力构件进行加固, 修补结构裂缝。

## 关键词

框架结构, 抗震性能, 检测分析, 处理措施

# Seismic Performance Test and Analysis of a Frame Structure

Ruiping Luo<sup>1,2</sup>, Jiexing He<sup>2\*</sup>, Shengchao Xu<sup>1</sup>, Chengpeng Wang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Hubei Provincial Academy of Building Research and Design Co., Ltd., Wuhan Hubei

<sup>2</sup>Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei

Email: bobhust@126.com, \*1641992485@qq.com

Received: May 21<sup>st</sup>, 2021; accepted: Jun. 14<sup>th</sup>, 2021; published: Jun. 21<sup>st</sup>, 2021

## Abstract

The seismic performance of a frame structure is analyzed. According to the analysis of the seismic

\*通讯作者。

capacity of the frame structure, three aspects are mainly carried out. Through the investigation of the current situation of the building, the use and damage of the structure are understood. The seismic system and structural measures of the structure are understood through the seismic structure investigation. The seismic bearing capacity of the building is checked and calculated by PKPM series software. The results show that: 1) due to unreasonable design, the structural system is not conducive to earthquake resistance, and the design bearing capacity of components does not meet the seismic requirements, which are the main reasons for the structure not meeting the seismic requirements; 2) the construction quality is not up to the standard, which leads to cracks at the joints of precast slabs, the size of components does not conform to the design, and the stirrup spacing does not meet the requirements, which are the secondary reasons for the structure not meeting the seismic requirements; 3) it is suggested that the structural system should be optimized, the stress mode of the structure should be changed, and the main stress components should be strengthened to repair the structural cracks.

## Keywords

Frame Structure, Seismic Performance, Detection and Analysis, Treatment Measures

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

汶川大地震的发生, 暴露出我国建筑设计在结构抗震方面存在漏洞[1] [2] [3]。对已有抗震设计及鉴定规范的修改[4] [5] [6], 有效解决和弥补了我国建筑在抗震方面的不足。但对于已有建筑的抗震性能, 仍存在认识不足, 需对其进行抗震性能检测。

诸多学者致力于建筑结构的抗震性能分析, 并取得了宝贵经验。文献[7]通过研究相同场地条件下的震害案例, 结合国外关于结构抗地震倒塌计算方法及其相关研究, 分析了影响结构抗倒塌能力的主要影响因素和评价指标。文献[8]基于某超限高层建筑, 通过采用 YJK 和 MIDAS 程序分别进行静力弹性分析, 采用 SAUSAGE 程序进行动力弹塑性分析, 对结构薄弱部分进行重点分析并提出了对应的加强措施。文献[9]论述了不同单跨框架结构的抗震加固方法的优缺点, 提出了加固技术要点。文献[10]研究了预制装配式框架结构的抗震性能, 提出了提高预制装配式框架结构抗震性能的合理措施。文献[11]研究了地震作用下剪力墙与基础之间的应力集中现象, 并进行了大规模的参数化有限元分析, 提出了合理的剪力墙 - 基础形式。文献[12]对软弱柱型多层钢框架在双向地震动作用下进行了一系列的响应分析, 评价了柱劣化对钢框架倒塌性能和极限抗震性能的影响。

本文以荆门市某框架结构抗震性能检测分析为背景, 根据《建筑抗震鉴定标准》(以下简称《标准》), 对框架结构进行房屋现状调查及抗震构造调查, 并使用 PKPM 系列软件对该建筑的抗震承载能力进行验算, 为此类结构抗震性能鉴定提供经验。

## 2. 工程概况

本工程位于湖北省荆门市, 于 1986 年建成, 后续使用年限 40 年。该建筑为八层钢筋混凝土框架结构, 梁柱承重体系。梁柱构件为现浇构件, 楼面板、屋面板为混凝土预制空心板, 基础类型为条形基础。屋顶设廊亭, 无地下室。建筑为东西朝向, 房屋平面为“矩形”布置, 现状长度为 37.6 m, 宽度为 18.3 m,

占地面积为 706.47 m<sup>2</sup>，一~八层层高均为 4.5 m。建筑框架抗震构造措施的设防烈度为 7 度，抗震等级为二级。建筑平面布置图见图 1。

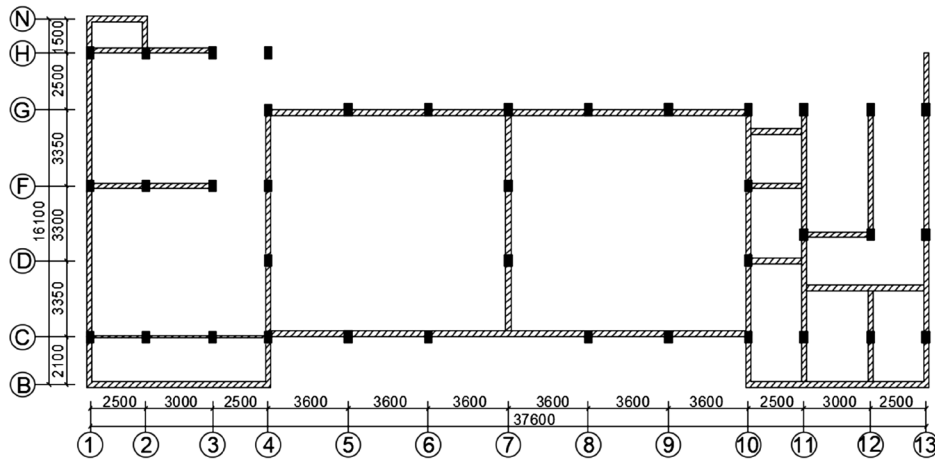


Figure 1. Building layout plan  
图 1. 建筑平面布置图

### 3. 房屋现状调查

#### 3.1. 房屋外观现状调查

现场对建筑主体结构进行部分外观质量检查。所检测梁柱构件外形较为完整，表面均未见明显裂缝、未见破损及露筋现象。检测的预制楼板中 8 层 4-7/C-G 轴预制板对接部位有明显裂缝，缝长约 10 米，缝宽约 2 mm，见图 2，其余部位未见裂缝。检测的墙体为红砖砌体结构，其中 8 层 4/C-G 轴墙体装饰层存在裂缝，长度约 2.5 米，缝宽约 1 mm，4-7/G 轴墙体装饰层裂缝长度约 1.4 米，缝宽约 1 mm，见图 3。8 层 13/G-H 轴墙体渗水严重，8 层 4-10/H 轴走廊顶板渗水严重，每层走廊顶部可见预制板拼缝通长开裂，见图 4。所检建筑屋面 4-10/H 轴护栏立柱多处开裂，护栏钢筋外露锈蚀，见图 5。

结构裂缝均是出现在预制板拼接处，拼接处施工处理不到位，导致该处混凝土强度低，在结构使用荷载作用下开裂，出现渗水状况，影响结构使用；同时由于是装配式楼板，其整体性相比现浇式楼板较弱，在地震作用下更容易出现垮塌，对抗震不利。

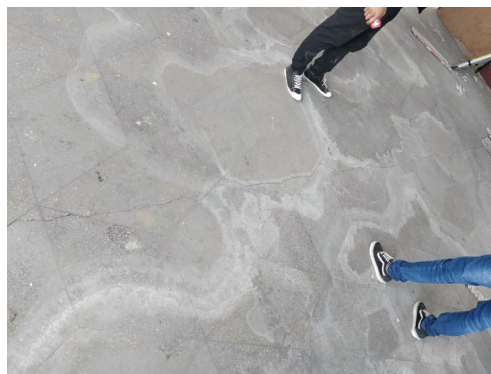


Figure 2. Cracked butt joint of prefabricated slab in 8th floor 4-7/C-G axis  
图 2. 8 层 4-7/C-G 轴预制板对接裂缝



**Figure 3.** Cracks in the decorative layer of the wall of the 8th floor 4-5/G axis

**图 3.** 8 层 4-5/G 轴墙体装饰层裂缝



**Figure 4.** Water seepage in the roof of the 8th floor corridor

**图 4.** 8 层走廊顶板渗水



**Figure 5.** Top floor railing column broken, exposed tendons

**图 5.** 顶层栏杆立柱破损、露筋

### 3.2. 梁柱构件截面尺寸复核

根据设计图纸，对建筑主要梁、柱构件进行截面尺寸测量，并对柱构件相对位置尺寸进行测量，检测结果见表 1 和表 2。由表 1 可知，所抽检 19 根梁、柱构件除 1 层 8-9/G 轴、7-8/G 轴、7/F-G 轴梁构件

尺寸与设计不一致, 6层 6/C-G 轴梁构件高度未测全, 其余梁、柱构件尺寸实测结果与设计值基本一致。由表 2 可知现场抽检 10 根柱构件实测间距均符合设计要求。

梁、柱构件的尺寸对其构件承载力有较大影响, 同时若构件位置不合理, 将会影响结构局部范围内应力的变化, 导致结构在使用荷载下出现应力集中现象, 而这种应力集中现象在地震作用下将会放大, 影响结构安全。

**Table 1.** Measured dimensions of beam and column members

**表 1.** 梁、柱构件实测尺寸

序号	层号	轴线	类型	设计值(mm)	实测值(mm)
1	1F	8/F-G	花篮梁	300 × 850	305 × 804
2	1F	8-9/G	梁	240 × 400	300 × 1030
3	1F	7-8/G	梁	240 × 400	252 × 460
4	1F	7/F-G	花篮梁	300 × 350	320 × 302
5	1F	7/D	柱	350 × 500	355 × 504
6	1F	7/G	柱	350 × 500	352 × 502
7	2F	7/D	柱	350 × 500	366 × 522
8	2F	12/G	柱	350 × 500	354 × 554
9	3F	12/G	柱	350 × 500	353 × 502
10	3F	12/E	柱	350 × 500	355 × 505
11	5F	3-4/C	梁	240 × 400	251 × 416
12	5F	3/B-C	梁	250 × 500	244 × 502
13	5F	3/C	柱	350 × 500	360 × 499
14	5F	11-12/G	梁	240 × 400	243 × 405
15	6F	7/F	柱	350 × 500	? × 505
16	6F	6/C-G	梁	300 × 850	303 × 802(部分)
17	6F	6/G	柱	350 × 500	352 × ?
18	8F	4/F	柱	350 × 500	? × 506
19	8F	5/C-G	花篮梁	300 × 850	301 × 852

注：“?”表示现场条件限制未实测, 802(部分)表示花篮梁顶部受限制未测。

**Table 2.** Measured dimensions of concrete column member spacing

**表 2.** 混凝土柱构件间距实测尺寸

序号	层号	轴线	类型	设计值(mm)	实测值(mm)
1	1F	4/D-F	轴心距	3300	3295
2	1F	4-7/G	轴心距	10,800	10,790
3	2F	12-13/G	轴心距	2500	2502
4	2F	11-12/G	轴心距	3000	2998
5	5F	7/D-F	轴心距	3300	3295
6	5F	8-9/G	轴心距	3600	3596
7	6F	1-4/F	轴心距	8000	7992
8	6F	4/G-H	轴心距	2500	2495
9	8F	4/G-F	轴心距	3350	3345
10	8F	4-7/C	轴心距	10,800	10,795

### 3.3. 梁、柱构件配筋情况检测

框架结构梁、柱构件为主要受力构件，梁、柱构件的安全直接影响到结构的安全。梁、柱构件的承载能力主要与其配筋情况有关，因此，对梁、柱构件配筋情况进行检测能够有效预估结构承载能力。

采用一体式钢筋扫描仪测量梁、柱构件内箍筋间距及保护层。检测结果表明，梁构件箍筋保护层厚度为 27~92 mm，箍筋间距为 94~246 mm，柱构件箍筋保护层厚度为 27~50 mm，箍筋间距为 68~240 mm，梁、柱构件未发现明显的箍筋加密区。

所抽检 5 根梁构件中，1 层 7/F-G 轴和 8/F-G 轴两根梁底面主筋 2 根，主筋保护层 29~52 mm，钢筋间距 92~186 mm；5 层 3/B-C 轴梁底面主筋 3 根，主筋保护层为 24 mm、26 mm 和 37 mm，钢筋间距为 54 mm 和 74 mm；8 层 5/C-G 轴梁底面主筋 3 根，主筋保护层为 29 mm、26 mm 和 28 mm，钢筋间距为 69 mm 和 78 mm；6 层 6/C-G 轴梁底面主筋 4 根，主筋保护层为 30~39 mm，钢筋间距为 62~97 mm。

所抽检 4 根柱构件中，每根混凝土柱中有 6 根主筋，其中长侧面有 2 根主(纵)筋，主筋保护层厚度 18~35 mm，钢筋间距 279~304 mm。宽侧面有 4 根主(纵)筋，主筋保护层厚度 29~45 mm，钢筋间距 62~108 mm。

## 4. 抗震构造调查

### 4.1. 结构体系

结构框架：该建筑框架结构为单向框架，且有单跨框架，导致建筑抗侧刚度小，在承受荷载时耗能弱，在遭遇地震作用时易出现连续倒塌。《标准》规定，框架结构不宜为单跨框架，该建筑不满足要求。

梁构件：根据抽检结果梁最小截面宽度为 200 mm，高宽比不大于 4，限制高宽比能够保证框架梁对框架节点的约束作用，以及减小框架梁塑性铰区段在反复受力下侧屈的风险；梁净跨与截面高度之比不小于 4，限制跨高比则能够使梁构件主免出现承受剪力大于弯矩的情况，适应较大塑性变形的能力较强。

柱构件：所抽检柱轴压比限值范围为 0.81~1.43，大于《标准》规定值 0.8，限制轴压比主要是为了控制结构的延性。轴压比越高，柱的延性就越差，在地震作用下柱的毁坏呈脆性。检测部分结果见表 3。

Table 3. Column axial pressure ratio limit statistics table

表 3. 柱轴压比限值统计表

部位	规范规定柱轴压比限值	计算柱轴压比限值	是否满足	
一层	1/C	0.8	1.14	否
	7/D	0.8	0.81	否
	11/E	0.8	1.16	否
	10/F	0.8	1.05	否
	9/G	0.8	1.43	否
	2/H	0.8	0.98	否
二层	1/C	0.8	0.96	否
	10/C	0.8	0.98	否
	5/G	0.8	1.1	否
	12/G	0.8	0.91	否
	13/G	0.8	0.89	否
1/H	0.8	0.89	否	
三层	5/C	0.8	0.81	否
	10/C	0.8	0.84	否
	12/E	0.8	0.85	否

Continued

三层	1/F	0.8	0.87	否
	5/G	0.8	0.93	否
	11/G	0.8	0.81	否
四层	6/G	0.8	0.85	否
	8/G	0.8	0.87	否
	9/G	0.8	0.88	否

## 4.2. 材料强度

建筑实测梁、柱混凝土强度等级为 C24.5，由于建筑从建成到使用已接近 40 年，其混凝土碳化深度已达到 6 mm，满足《标准》规定值 C20 要求。

## 4.3. 框架梁、柱的配筋与构造

所检测梁端纵向受拉钢筋的最大配筋率 2.9%，大于《标准》规定值 2.5%；框架梁加密区箍筋最小直径为 6 mm，实测梁加密区箍筋最大间距为 212 mm。

所检测框架角柱纵向钢筋总配筋率最小为 1.7%，框架边柱、中柱纵向钢筋总配筋率最小为 1.7%；框架柱箍筋最小直径为 8 mm，实测柱加密区箍筋最大间距为 240 mm。

对梁、柱构件有最大配筋率要求，能够有效防止结构在地震作用下出现脆性破坏，在地震作用下结构能够表现出明显变形特征，对地震时人员求生有重大作用。

## 4.4. 框架填充墙构造

根据现场实测，绝大部分砌体填充墙与框架柱之间未设置拉结筋，导致受到地震作用时砌体填充墙易倒塌，造成人员伤亡。

现场查勘发现，绝大部分楼层预制板拼缝处存在通长裂缝，屋顶廊檐损坏严重，部分填充墙存在开裂现象。

## 5. 抗震承载力验算

根据抽样检测的结果，结合相应的国家规范，采用中国建筑科学研究院 PKPM 系列软件对该建筑的抗震承载能力进行验算，对其抗震承载能力进行评估。

### 5.1. 结构计算参数取值

根据原建筑、结构设计施工图、相关规范规定及现场检测结果，该建筑抗震鉴定时抗震承载力验算参数取值见表 4。

Table 4. Table of values of structural calculation parameters

表 4. 结构计算参数取值表

总体信息	上部结构类型	框架结构	基础形式	条形基础
	抗震等级	二级	建筑物重要性类别	乙类
	地震设防烈度	6 度	设计地震分组	第一组
	基本风压	0.3 kN/m <sup>2</sup>	地面粗糙度	C 类
	设计特征周期	0.3 S	场地土类别	II 类

Continued

	恒载	活动室: 3.5 kN/m <sup>2</sup> ; 卫生间: 4.8 kN/m <sup>2</sup> ; 走廊(大理石) 4.0 kN/m <sup>2</sup> ; 走廊(地砖): 3.6 kN/m <sup>2</sup> ; 楼梯: 7.5 kN/m <sup>2</sup> ; 电梯机房: 4.6 kN/m <sup>2</sup> ; 屋面板: 4.2 kN/m <sup>2</sup>								
荷载	活载	部位	活动室	电梯机房	走廊	卫生间	楼梯间	上人屋面	不上人屋面	
	荷载		3.0 kN/m <sup>2</sup>	4.6 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>	2.5 kN/m <sup>2</sup>	3.5 kN/m <sup>2</sup>	2.0 kN/m <sup>2</sup>	0.5 kN/m <sup>2</sup>	
	墙体荷载	240 实砌砖墙							22.4 kN/m	
		240 空斗墙							16.0 kN/m	
轻钢龙骨石膏板隔墙								2.0 kN/m		
		栏板荷载							3.0 kN/m	
混凝土强度取值	柱	C24.5			梁	C24.5				
构件尺寸取值	按实测值取。									
钢筋强度取值	A (一级钢): 240 N/mm <sup>2</sup> ; B (二级钢): 340 N/mm <sup>2</sup>									

### 5.2. 框架柱抗震承载力验算

根据计算分析并对框架柱的配筋进行复核, 部分框架柱承载力的验算结果见表 5。结果表明, 对于各层柱的 b 边方向配筋, 层数越低, 所受荷载越大, 该方向配筋需求则越大。而结构设计中不同楼层同一轴位柱配筋均相同, 导致出现低层柱出现配筋不足高层柱配筋过多的情况, 不仅造成材料浪费且结构安全得不到保障。

对于各层柱的 h 边方向配筋, 计算结果表明 h 边方向配筋普遍不足。其主要是由于该结构框架为单向框架, 配筋主要集中在 b 边, 而在地震作用下两个方向都可能出现较大作用力, 结果表现为 h 边方向配筋不足。建筑框架柱的抗震承载力绝大部分不满足要求。

**Table 5.** Part of the frame column reinforcement review table  
**表 5.** 部分框架柱配筋复核表

部位	b 边			h 边			是否满足
	实配钢筋面积	计算钢筋面积	该方向配筋是否满足	实配钢筋面积	计算钢筋面积	该方向配筋是否满足	
一层	1/C	1963	3755	否	982	1992	否
	3/C	1963	3229	否	982	1504	否
	4/G	1521	2459	否	760	1207	否
	6/C	2463	4493	否	1232	1928	否
	11/G	3079	3760	否	1232	2090	否
	13/G	3079	3129	否	1232	1763	否
二层	2/F	1963	1406	是	982	1222	否
	5/G	2463	3128	否	1232	2296	否
	8/G	2463	3471	否	1232	2707	否
	9/C	2463	2533	否	1232	1308	否
	10/D	1521	916	是	760	1026	否
	12/E	3079	1622	是	1232	1509	否



Continued

	5/G	2463	2186	是	1232	1673	否	否
	6/G	2463	2409	是	1232	1818	否	否
三层	7/G	1521	1423	是	760	1141	否	否
	8/G	2463	2493	否	1232	1968	否	否
	9/G	2463	2555	否	1232	1986	否	否
四层	8/G	2463	1639	是	1232	1274	否	否
	9/G	2463	1760	是	1232	1291	否	否

### 5.3. 框架梁抗震承载力验算

根据计算分析并对框架梁的配筋进行复核，部分框架梁实际配筋的验算结果见表 6。结果表明：二层梁约 67%的梁配筋不满足要求，三、四层梁约 63%的梁配筋不满足要求，五~八层梁约 60%的梁配筋不满足要求，九层梁约 43%的梁配筋不满足要求。可以看到梁的配筋计算结果和柱的 b 方向配筋结果相同，出现了低层梁配筋不足高层梁配筋过多的情况。建筑框架梁的抗震承载力大部分不满足要求。

Table 6. Part of the frame beam reinforcement review table

表 6. 部分框架梁配筋复核表

	部位	底部钢筋实配面积	底部钢筋计算配筋	上部钢筋左端实配面积	上部钢筋左端计算面积	上部钢筋右端实配面积	上部钢筋右端计算面积	是否满足
二层梁	1/B-C	226	375	2945	313	2945	1642	否
	5/C-G	2214	1435	2503	1389	2503	1580	是
	L-1	314	192	314	192	314	192	是
三、四层梁	1/B-C	226	375	1963	313	1963	1500	否
	1/C-F	982	961	3232	2218	1742	1826	否
	1/F-H	982	868	2281	1547	2281	1522	是
	2/B-C	226	375	1963	679	3100	2062	否
	2/C-F	1257	496	3100	1775	2149	1120	是
	L-6	452	200	452	192	452	192	是
五~八层梁	1/B-C	226	375	1963	313	1963	1508	否
	1/C-F	982	961	3232	1910	1742	1543	是
	5/C-G	2214	1435	2503	1389	2503	1580	是
	6/G-H	226	405	2030	1854	1521	596	否
	7/F-G	1018	531	1018	1706	1018	911	否
	7/G-H	745	309	2030	1703	1521	529	是
	9/G-H	226	405	2030	1847	1521	225	否
	10/B-C	226	375	1963	313	2472	1623	否
	10/G-H	1521	337	2030	1333	1521	188	是
	11/B-C	226	375	1963	788	2472	2673	否
	LL-5	314	205	314	192	314	192	是
L-3	452	288	452	574	452	240	否	
九层梁	1/B-C	226	375	1257	313	1766	623	否
	LL-12	804	818	628	405	628	544	否
	L-8	1963	1085	226	192	226	192	是

## 6. 检测结果与原因分析

根据检测数据,得出以下几点检测结果:1) 预制板构件拼接处出现结构裂缝;2) 部分梁、柱构件尺寸不符合设计要求;3) 梁、柱构件主筋符合设计要求,部分构件箍筋间距不满足要求;4) 建筑结构体系不满足《标准》要求;5) 梁构件高宽比、净跨比满足要求,柱构件轴压比不满足规范要求;6) 构件混凝土强度满足《标准》要求;7) 梁端纵向受拉钢筋的最大配筋率为 2.9%,大于规定值 2.5%,柱配筋率满足要求;8) 砌体填充墙与框架柱之间未设拉结筋,不满足要求;9) 大部分梁、柱构件抗震承载力不满足要求。

根据检测结果,该建筑抗震性能不满足要求的主要原因有以下几点。

1) 施工原因。施工不规范导致预制板拼接处混凝土强度低,部分框架梁、柱构件尺寸与设计不符,箍筋间距不满足要求,导致结构抗震性能不满足要求。

2) 设计原因。该建筑的结构体系为单向框架结构,其抗震能力较弱;框架梁、柱构件设计不合理,其配筋率不足导致构件的承载力不足;砌体填充墙与框架柱未设拉结筋,结构整体性不强,导致结构抗震性能不满足要求。

## 7. 结论与建议

1) 在现行《建筑抗震鉴定标准》下,该建筑抗震构造措施不满足要求,主要受力构件的抗震承载能力不满足要求。

2) 建筑结构体系设计不合理,受力构件承载力不足,导致结构设计承载力不足以抵抗地震作用,是建筑抗震性能不满足要求的主要原因。

3) 建筑施工不规范,预制板拼接处混凝土强度低,构件尺寸与配筋与设计不符,导致结构实际承载力小于设计承载力,是建筑抗震性能不满足要求的次要原因。

4) 建议采取的处理措施有:a) 增加抗震墙,改变结构体系,优化地震荷载下的结构受力机理;b) 对承载力不足的梁柱构件进行加固处理,达到强柱弱梁;c) 在砌体填充墙与框架柱之间增设拉结筋;d) 修补结构裂缝。

## 基金项目

国家自然科学基金(41602319)。

## 参考文献

- [1] 清华大学土木工程结构专家组,西南交通大学土木工程结构专家组,北京交通大学土木工程结构专家组,叶列平,陆新征.汶川地震建筑震害分析[J].建筑结构学报,2008(4): 1-9.
- [2] 叶列平,曲哲,马千里,林旭川,陆新征,潘鹏.从汶川地震框架结构震害谈“强柱弱梁”屈服机制的实现[J].建筑结构,2008(11): 52-59+67.
- [3] 李宏男,肖诗云,霍林生.汶川地震震害调查与启示[J].建筑结构学报,2008(4): 10-19.
- [4] 王亚勇,戴国莹.《建筑抗震设计规范》的发展沿革和最新修订[J].建筑结构学报,2010,31(6): 7-16.
- [5] GB 50011-2010,建筑抗震设计规范[S].中华人民共和国国家标准,2010: 499p: A4.
- [6] GB 50023-2009,建筑抗震鉴定标准[S].中华人民共和国国家标准,2009: 217p: A4.
- [7] 叶列平,陆新征,赵世春,李易.框架结构抗地震倒塌能力的研究——汶川地震极震区几个框架结构震害案例分析[J].建筑结构学报,2009,30(6): 67-76.
- [8] 李智明,曹源,胡慧莹.某临江超限高层建筑结构抗震分析设计[J].建筑结构,2020,50(S2): 239-245.
- [9] 陈钧.对单跨框架结构房屋进行抗震加固的探讨[J].福建建设科技,2020(6): 12-15.

- [10] 戴春娇, 王颖. 预制装配式框架结构抗震性能分析[J]. 江西建材, 2020(10): 6-7.
- [11] Dasgupta, K. and Murty, C.V.R. (2013) Improved Geometric Design of Earthquake-Resistant Rc Slender Structural Walls. I: Parametric Study. *Journal of Engineering Mechanics*, **140**, 04014006.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0000725](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0000725)
- [12] Yamada, S., Ishida, T. and Shimada, Y. (2013) Collapse Behavior and Ultimate Earthquake Resistance of Weak Column Type Multi Story Steel Frame with Rhs Columns. *Journal of Structural & Construction Engineering*, **76**, 837-844.  
<https://doi.org/10.3130/aajs.76.837>