

既有超限建筑加固改造及抗震性能研究*

Research on Reinforcement and Seismic Performance of Existing Over Limit Buildings

王金泽^{1,3}, 李尚飞^{1,3}, 崔少华^{1,3}, 付素娟^{2,3}, 刘莉娜⁴

(1. 河北建研建筑设计有限公司建筑更新(鹿泉)分公司, 河北 石家庄 050227;

2. 河北省建筑科学研究院有限公司, 河北 石家庄 050227;

3. 河北省既有建筑综合改造技术创新中心, 河北 石家庄 050227;

4. 天津大学建筑设计规划研究总院有限公司, 天津 300110)

摘要: 既有结构为规则性超限的超限高层建筑。针对超限情况, 通过新增剪力墙将原框架结构改为了框架剪力墙结构、新增连廊措施后, 将原结构变为了高度和规则性均不超限高层建筑。并对加固改造后的结构进行了弹性分析、设防地震和罕遇地震下弹塑性时程分析。结果表明: 原框架结构改为框架剪力墙结构后, 提高了结构抗震性能, 结构抗侧刚度提高约60%, 承载力水平提高约40%, 降低框架柱受力和抗震等级, 减少框架柱加固工程量约80%。结构各项指标均满足规范要求, 达到了“小震不坏, 中震可修, 大震不倒”的抗震设防要求。工程所采的加固改造技术措施合理有效, 安全可靠, 加固改造经济成本降低, 综合效益显著, 可为以后类似工程提供参考。

关键词: 城市更新; 加固改造; 超限高层建筑; 改变结构体系; 弹塑性分析

中图分类号: TU352.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2024) 06-0101-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.06.019

WANG Jinze^{1,3}, LI Shangfei^{1,3}, CUI Shaohua^{1,3}, FU Sujuan^{2,3}, LIU Lina⁴

(1. Architectural Renewal (Luquan) Branch, Hebei Jianyan Architectural Design Co., Ltd.,

Shijiazhuang 050227, China; 2. Hebei Academy of Building Research Co., Ltd.,

Shijiazhuang 050227, China; 3. Hebei Province Existing Building Comprehensive Transformation

Technology Innovation Center, Shijiazhuang 050227, China; 4. Tianjin University Research Institute

of Architectural Design and Urban Planning Co., Ltd., Tianjin 300110, China)

Abstract: Existing high-rise buildings with regular exceeding limits. In response to the situation of exceeding the limit, the original frame structure was changed to a frame shear wall structure by adding shear walls, and after adding corridor measures, the original structure was transformed into a high-rise building with height and regularity not exceeding the limit. The elastoplastic time-history analysis of the reinforced structure, fortification against earthquakes and rare earthquakes are also carried out. The results indicate that after the original frame structure was changed to a frame shear wall structure, the lateral stiffness of the structure is increased by about 60%, the bearing capacity level is increased by about 40%, the stress and

* 基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目 (236Z4506G); 河北省建设科技计划项目 (2024-2135)。

作者简介: 王金泽 (1994—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 既有建筑改造加固。

收稿日期: 2024-02-18

建筑结构

seismic grade of the frame column are reduced, and the reinforcement work of the frame column is reduced by about 80%. All the indicators of the structure meet the requirements of the code, and achieve the seismic fortification requirements of "small earthquake is not bad, medium earthquake can be repaired, and large earthquake cannot be prevented". The technical measures adopted in this project are reasonable, effective, safe and reliable, the economic cost of reinforcement and transformation is reduced, and the comprehensive benefits are remarkable, it can provide reference for similar projects in the future.

Keywords: urban regeneration; reinforcement and reconstruction; super high-rise building; change the structure system; elastoplastic analysis

0 引言

近年来,国家及地方政府陆续出台了大量城市更新政策,国家“十四五”规划也首次提出“实施城市更新行动”,为推进新型城镇化建设指明了前进方向^[1-2]。党的二十大报告中更是明确提出实施城市更新行动,把城市更新上升到党领导国家建设的国家意志与顶层设计层面^[3]。城市更新,是指在我国城镇化发展接近成熟期时,通过维护、整建、拆除、完善公共资源等合理的新陈代谢方式,对城市空间资源重新调整配置,使之更好地满足人们的期望需求,更好地适应经济社会发展实际。2021年,住房和城乡建设部要求:城市更新要顺应城市发展规律,尊重人民群众意愿,以内涵集约、绿色低碳发展为路径,转变城市开发建设方式,坚持“留改拆”并举、以保留利用提升为主,严管大拆大建,加强修缮改造,注重提升功能,增强城市活力^[4]。所以城市更新是时代的发展,是人们的期望,势在必行。

在当下建筑行业中,由于各方综合原因导致项目烂尾的工程比比皆是,对于烂尾楼,推倒浪费资源,不仅影响城市形象,一定程度也制约城市的发展^[5]。随着城市更新的进行,这些烂尾楼成为资源盘活的重点对象。创新性、经济性、协调性、生态性成为烂尾楼整体改造的重要原则,而由于建筑结构本身存在的不同特性,对建筑进行改造加固也有不同的方式^[6-8]。对于超限结构,其抗震性能也受到特别关注,彭茹^[9]通过分析深圳市罗湖区兆鑫汇金广场在不同地震工况下的弹性分析和弹塑性分析,验证了结构性能设计的可靠性。申广宇^[10]通过采用小震弹性分析、中震弹性分析、大震弹塑性时程分析等方法对某大底盘高层商住楼整体结构进行了分析。

以石家庄某超限商业综合体为例,把握结构特点,避免了结构超限,进行了弹性分析、设防地震

和罕遇地震下弹塑性时程分析,实现了建筑设防目标,为以后超限改造加固项目提供参考和借鉴。

1 工程概况

该工程位于河北省石家庄市,为大型商业综合体,集餐饮、商业、车库于一体。主体结构已完成,此次为续建工程。

该建筑结构安全等级为一级($\gamma_0 = 1.1$),为重点设防类(乙类),后续工作年限为40年。抗震设防烈度为7度,基本地震加速度0.10g,多遇地震水平地震影响系数最大值为0.08,设计地震分组为第二组,场地类别为II类,基本风压取50年一遇为0.35 kN/m²,地面粗糙度类别为C类^[11]。

该建筑为地上5层、地下5层,总建筑高度约为25m,地下室联通且周边无土体约束,因此结构实为地上十层,结构总高度约为45m,原结构为钢筋混凝土框架结构体系,基础为天然地基。

结构整体呈弧形,中间为镂空,1~5层为整体连接,6~10层为三座塔楼,通过混凝土梁板式连接体、单跨钢连廊连接,连接体与塔楼存在错层,整个屋顶为钢桁架+张弦梁结构。如图1所示。

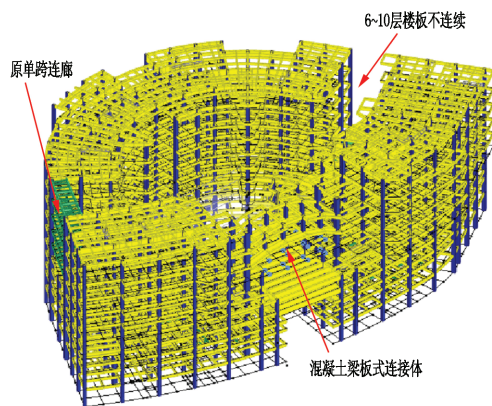


图1 原结构模型

Fig.1 Original structural model

2 原结构性能评价

2.1 原结构主要整体指标

按照建筑现状建立了整体模型，对原结构进行核算，结构在多遇地震作用下的周期见表 1，原结构最大层间位移角为 1/863 基本满足要求，但结构最大扭转位移比 2.14、最大偏心率 0.081、楼层刚度比 0.46 及层间受剪承载力比 0.55 均不满足《高层建筑混凝土结构技术规程》（以下简称“高规”）要求^[12]。

表 1 多遇地震下原结构周期

Table 1 The original structural period under frequent earthquakes

阵型号	T/s	扭转系数
1	2.11	0.87
2	2.07	0.13
3	2.05	0.00

2.2 原结构超限判定

结构超限情况对方案实现、施工难度和造价均有显著影响，超限建筑的抗震专项审查对设计和工程进度均起控制作用。该工程为加固改造工程，实际情况复杂，需对原结构超限情况进行准确判断，作为后续所有技术工作的基本前提^[13]。

按照《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》^[14]相关要求对原结构进行超限判定，结构高度 45 m 小于 50 m，高度不超限。从表 2、表 3 可以看出，原结构存在扭转刚度弱、竖向刚度和承载力不规则、楼板不连续及尺寸突变等结构不规则项，为超限的高层建筑，原结构的抗震性能较差，需通过采取适当的结构措施，在提升原结构抗震性能的基础上使结构避免超限，以达到大量减少加固工作的目的。

表 2 规则性判断

Table 2 Rule based judgment

序号	不规则类型	结构概况	结论
1a	扭转不规则	最大扭转位移比 2.14	不规则
1b	偏心布置	偏心率最大为 0.081	
2a	凹凸不规则	平面凹进 35%	不规则
2b	组合平面	非组合平面	
3	楼板不连续	混凝土连接体局部错层	不规则
4a	刚度突变	1 层和 2 层比为 0.46	不规则
4b	尺寸突变	不涉及	
5	构件间断	不涉及	规则
6	承载力突变	1 层和 2 层比为 0.55	不规则

表 3 两项不规则超限判定

Table 3 Two irregular exceeding limit judgments

序号	不规则类型	结构情况	是否超限
1	扭转偏大	X 向最大扭转位移比 2.14	是
2	扭转刚度弱	$T_1/T_2 = 1.03$	是
3	层刚度偏小	层刚度比最小值为 0.46	是
4	塔楼偏置	不涉及	否

3 超限项的处理措施

3.1 扭转、刚度和承载力突变等不规则项消除措施

在框架结构体系的基础上，结合改造后的建筑平面增加设置剪力墙，形成框架—剪力墙结构体系，通过调整新增剪力墙布置，合理匹配结构刚度，消除结构不规则项，具体如下：

（1）消除扭转不规则。降低了结构扭转效应，调整结构扭转位移比值不超过 1.20，调整结构楼面偏心率值不超过 15%。

（2）消除刚度突变不规则项。地下五层和地下四层与地下三层相比层高相差较大，引起楼层刚度突变。通过匹配相邻楼层剪力墙布置，控制楼层刚度比满足要求。

（3）消除承载力突变不规则项。地下五层和地下四层与地下三层相比层高相差较大，引起楼层承载力突变。通过增大底部两层轴压比不足的柱截面、匹配相邻楼层剪力墙布置，控制楼层承载力比满足要求。

3.2 凹凸不规则项消除措施

原结构存在凹凸不规则，为避免结构超限，在凹凸部位新增连廊，新增了楼板，可以起到增强结构楼板整体连接，提升结构抗震性能的作用。如图 2 所示。

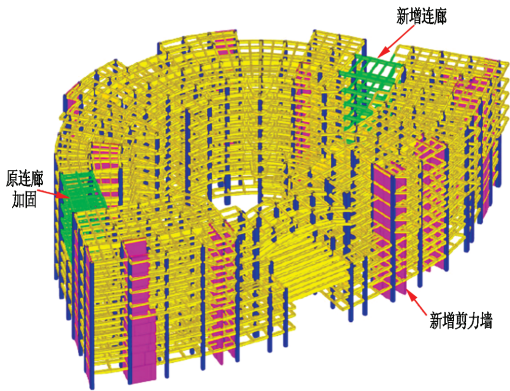


图 2 加固后的整体计算模型

Fig. 2 Reinforced overall calculation model

建筑结构

3.3 采取措施后结构超限判断

采取前述技术措施后，按照《超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点》相关要求对结构进行超限判定，结构只剩中间镂空部分的楼板不连续的不规则项，为高度和规则性均不超限高层建筑工程。

该结构利用技术手段避免结构超限，可避免进行结构性能化设计和超限专项审查，从而大量减少原结构构件加固工作量，在节约造价的同时又可节约工期，工程综合效益显著。

4 加固后结构抗震性能分析

4.1 加固后结构整体弹性分析

该结构的计算分析软件采用 YJK 空间分析程序，整体空间结构模型，几何模型为杆（梁、柱）、墙、板单元，以构件为单元形成各自刚度矩阵，考虑材料弹性模量、剪切模量、泊松比、质量密度等参数^[15]。

4.1.1 周期及振型

结构分析时，考虑前 20 阶振型，根据统计，此时两个方向的质量参与系数均达到 90% 以上。结构前三阶周期信息见表 4，其中前三阶振型分别为 X 向平动、Y 向平动和扭转。结构的第一扭转周期与第一平动（X 向）周期之比为 0.88，满足高规中关于周期比的要求。

表 4 结构周期 Table 4 Structural period		
振型	周期/s	分量（X + Y + Z）
1	1.18	0.02 + 0.98 + 0
2	1.15	0.96 + 0.02 + 0.02
3	1.04	0 + 0 + 0.98

4.1.2 结构位移

由表 5、表 6 计算数据可知，X 向、Y 向层间位移角较大的位置均发生在结构中上部区段。X 向最大层间位移角为 1/156 4，Y 向最大层间位移角为 1/144 2，均小于 1/800，满足规范要求。结构在考虑偶然偏心的地震作用下，楼层扭转位移比均不大于 1.2，满足规范要求。

表 5 地震荷载下位移指标 Table 5 Displacement index under seismic load			
方向	顶点最大位移/mm	层间最大位移角	最大位移角所在楼层
X 向	19.8	1/156 4	8 层
Y 向	20.6	1/144 2	8 层

表 6 扭转位移比指标 Table 6 Torsion displacement ratio index			
方向	最大层位移扭转位移比	最大层间位移扭转位移比	最大位移比所在楼层
X 向	1.03	1.08	8 层
Y 向	1.05	1.10	8 层

4.1.3 地震剪力与倾覆力矩

结构在多遇地震作用下，底部剪力及倾覆弯矩见表 7。各楼层剪重比均大于 1.6%，满足规范最小剪重比的要求。

表 7 底部剪力与倾覆力矩 Table 7 Bttom shear force and overturning moment				
方向	底部剪力/kN	剪重比/%	底部倾覆力矩/（kN·m）	底层框架柱倾覆力矩比/%
X 向	32 760	3.03	994 993	34.7
Y 向	32 111	2.97	968 093	31.8

4.1.4 楼层承载力分布

结构楼层抗剪承载力计算结果见表 8，相邻下层与上层的抗剪承载力比值 X 向最小值为 0.81、Y 向最小值为 0.81，均大于 0.8，满足规范要求，结构未出现薄弱层。

表 8 楼层抗剪承载力比 Table 8 Floor shear bearing capacity ratio		
楼层	X 向	Y 向
10	1.00	1.00
9	1.52	1.48
8	1.18	1.17
7	1.29	1.25
6	1.11	1.12
5	1.52	1.51
4	1.14	1.14
3	1.68	1.67
2	0.81	0.81
1	0.91	0.91

结合结构特点，采取改变结构体系与布置合理确定计算参数等技术措施后，建筑结构体系整体性能及抗震性能提高，为一般不规则的高层建筑结构。通过 YJK 计算分析软件对结构体系进行小震反应谱计算分析，结构周期、位移及剪重比等抗震指标均符合规范要求。

4.2 设防地震下弹性时程分析

4.2.1 地震波的选取及评价

表 9 为地震波采用 2 组天然波和 1 组人工波。

时程分析均采用三向输入（1.00：0.85：0.65），地震波的峰值加速度值取主方向100 cm/s²，次方向85 cm/s²，竖向65 cm/s² [16]。

表9 选用的地震波

地震波编号	特征周期/s	有效持续时间/s	备注
TDT159040	0.40	35	天然波
TDT210040	0.40	25	天然波
TDR100040	0.40	25	人工波

由图3可知，时程分析时选用的每条地震波所得基底剪力均大于反应谱法所得基底剪力的65%，小于反应谱法的135%；平均值大于反应谱法的80%且小于反应谱法的120%，符合规范要求，即选用地震波满足工程需要。

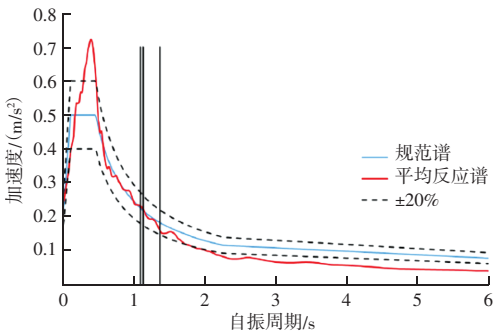


图3 地震波反应谱及对比

Fig. 3 Seismic wave response spectrum and comparison

4.2.2 楼层计算结果

结构基底剪力约为小震弹性反应谱法基底剪力的2.38~3.15倍不等。设防地震作用下的层间位移角如图4所示，结构设防地震作用及各个地震波作用下上部结构的层间位移角最大值为X向1/407，Y向1/410，均未超过1/400，表明结构在设防地震作用下基本处于弹性状态。

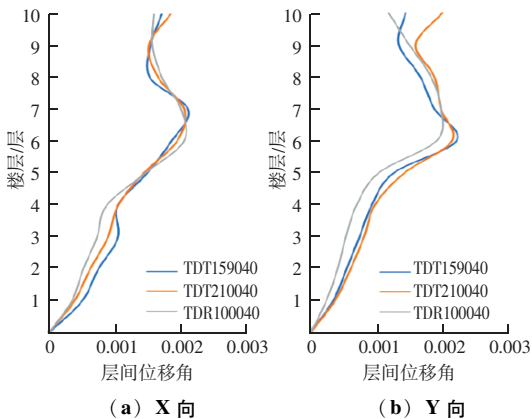


图4 设防地震作用下结构层间位移角

Fig. 4 Structural inter story displacement angle under seismic fortification

4.2.3 结构损伤状态

图5为设防地震作用下X、Y向为主向时结构损伤状态评价，可见部分框架梁和连梁出现轻微损坏，大部分剪力墙、框架柱均未出现损伤，部分框架柱和墙出现轻微损伤，结构整体损伤程度较轻。结构在设防地震作用下，大部分框架梁和连梁屈服程度较轻，剪力墙、框架柱未屈服，表明结构在设防地震作用下属于轻微损伤，结构基本完好。

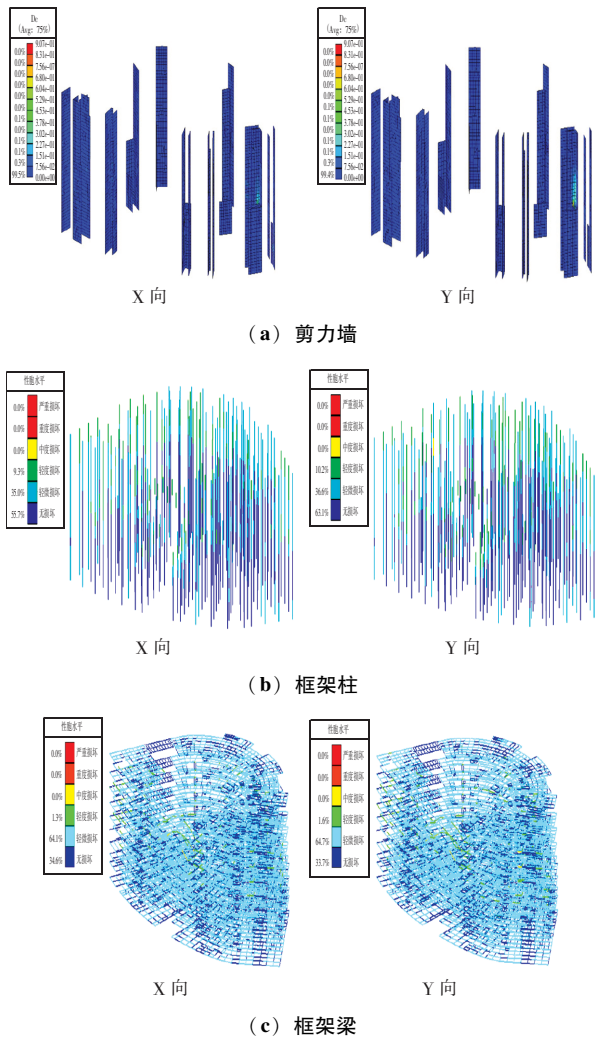


图5 设防地震作用下各构件损伤

Fig. 5 Damage to various components under seismic fortification

4.3 罕遇地震下弹塑性时程分析

4.3.1 地震波的选取及评价

表10为地震波采用2组天然波和1组人工波。时程分析均采用三向输入（1.00：0.85：0.65），地震波的峰值加速度值取主方向220 cm/s²，次方向187 cm/s²，竖向143 cm/s² [16]。

建筑结构

表 10 选用的地震波
Table 10 Selected seismic waves

地震波编号	特征周期/s	有效持续时间/s	备注
TDT210045	0.45	40	天然波
TDT180045	0.45	25	天然波
TDR220045	0.45	25	人工波

由图 6 可知，时程分析时选用的每条地震波所得基底剪力均大于反应谱法所得基底剪力的 65%，小于反应谱法的 135%；平均值大于反应谱法的 80% 且小于反应谱法的 120%，符合规定，即选用地震波满足工程需要。

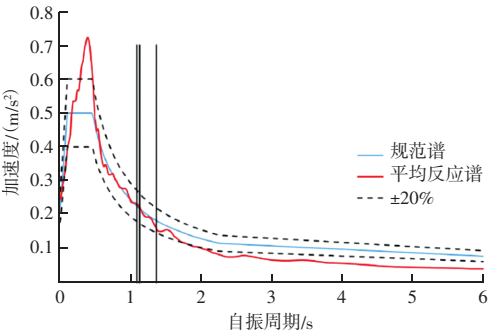


图 6 地震波反应谱及对比

Fig. 6 Seismic wave response spectrum and comparison

4.3.2 楼层计算结果

在所选地震波下，结构基底剪力约为小震弹性反应谱法基底剪力的 4.40~5.02 倍不等。罕遇地震作用下的层间位移角如图 7 所示，结构罕遇地震作用下各个地震波作用下上部结构的层间位移角最大值为 X 向 1/198，Y 向 1/186，结构最大层间位移角均满足《抗规》罕遇地震弹塑性层间位移角不大于 1/100 的要求。

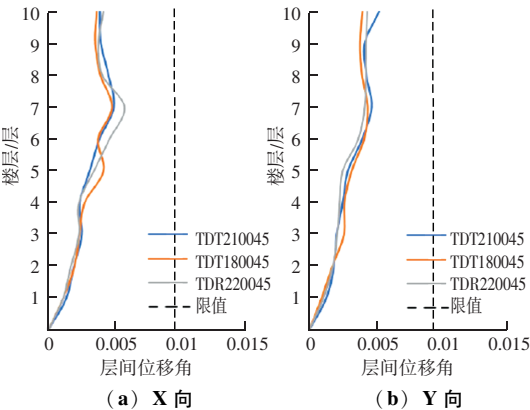


图 7 罕遇作用下结构层间位移角

Fig. 7 Structural inter story displacement angle under rare events

4.3.3 结构损伤状态

图 8 为罕遇地震作用下结构的损伤状态。从结构损伤状态可知，框架梁和连梁作为耗能构件首先屈

服耗能，耗散了地震能量，起到了很好的耗能作用，保护了主体结构的作用。大部分墙体损伤程度较轻，属轻~中度损伤。框架柱和框架梁为轻~中度损坏。综合判定，结构属于轻~中度损坏。连廊基本没有损伤，处于弹性工作状态，周边柱经加固后在罕遇地震作用下基本处于轻微~轻度损伤。

上述分析可见，在罕遇地震下结构具有良好的抗震性能，结构整体可以满足“大震不倒”的抗震设防目标。

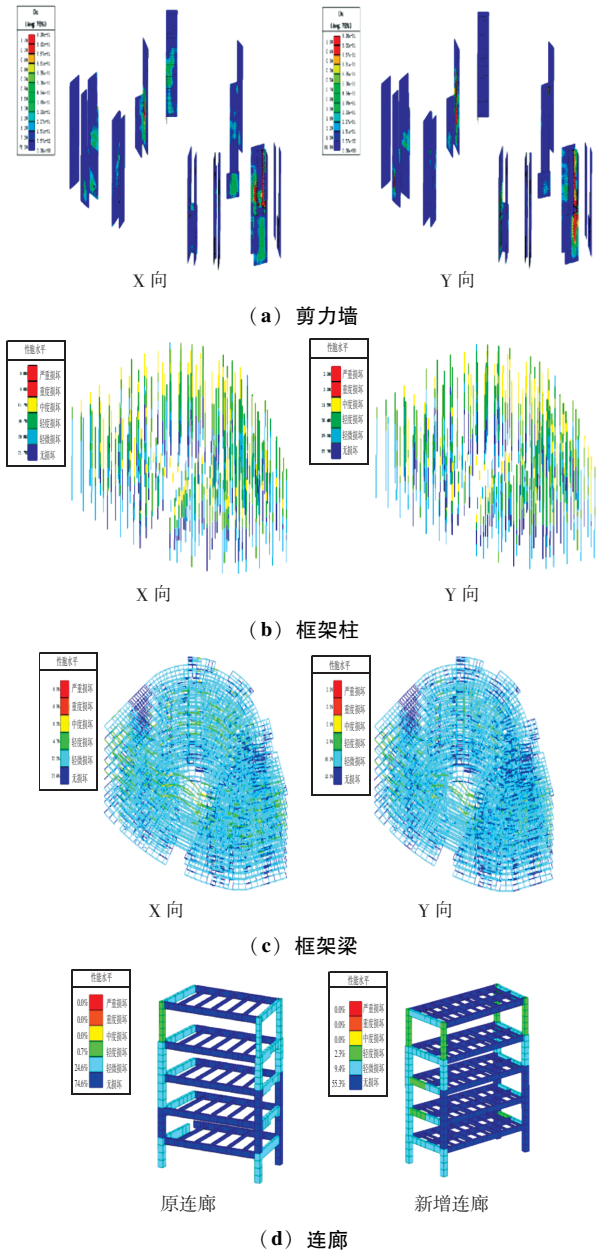


图 8 罕遇地震作用下各构件损伤

Fig. 8 Damage to various components under rare earthquake action

5 结论

(1) 结合原结构的特点,按照新的建筑布置,通过新增剪力墙构件并调整局部结构布置,消除结构扭转、凹凸不规则、竖向刚度突变及承载力突变等结构不规则项,避免了结构超限。

(2) 改变结构体系后,提高了结构的抗震性能,结构抗侧刚度提高约 60%,承载力水平提高约 40%。降低框架柱受力和抗震等级,减少框架柱加固工程量约 80%。

(3) 通过设防地震、罕遇地震下的弹塑性分析结果表明采取上述加固改造技术措施后,结构抗震性能良好,达到了“小震不坏,中震可修,大震不倒”的抗震设防要求;该结构所采的加固改造技术措施合理有效,安全可靠,加固改造经济成本降低,综合效益显著,可为类似工程提供参考。

参 考 文 献

- [1] 王启人. 上海某既有超高层加固改造项目结构设计 [J]. 建筑结构, 2023, 53 (增刊 1): 1982-1988.
- [2] 王蒙徽. 实施城市更新行动 [J]. 城市开发, 2021 (17): 1.
- [3] 孟梓帆, 殷明凯, 张惟宁. 城市更新视野下既有建筑改造加固研究: 以江苏园博园改造工程为例 [J]. 城市建筑, 2024, 21 (2): 4-6.
- [4] 侯庆达, 王静, 许宝辉, 等. 烂尾楼更新改造方法分析: 以医

- 院改造项目为例 [J]. 安徽建筑, 2024, 31 (9): 20-21, 71.
- [5] 韩晗, 李玉婧, 余珮珩. 基于城市更新的工业遗产公园生态系统文化服务研究: 以中山岐江公园与北京首钢公园为例 [J]. 上海国土资源, 2024, 45 (1): 21-26.
- [6] 齐琼. 钢筋混凝土建筑结构的加固技术分析 [J]. 水泥与混凝土生产, 2021 (7): 59-60.
- [7] 李章彦, 陆一航, 孙楷. 南通市某项目结构加固案例分析 [J]. 技术与市场, 2021 (11): 69-71.
- [8] 王辉, 王静, 孙锡强, 等. 双探背景下烂尾楼更新加固分析: 以阜阳某产业园项目为例 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024 (7): 100-102.
- [9] 彭茹. 超限高层建筑结构抗震性能设计及受力分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2021, 35 (3): 8-12, 71.
- [10] 申广宇. 深圳某超限高层结构抗震设计 [J]. 广东土木与建筑, 2019, 26 (9): 13-17, 51.
- [11] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [12] 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [13] 许宁. 超限高层建筑基于性能的抗震设计方法 [J]. 产业创新研究, 2024 (2): 118-120.
- [14] 超限高层建筑工程抗震设防专项审查技术要点: 建质 (2015) 67 号 [A]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015.
- [15] 何叶, 杨锦, 郝茸, 等. 牌坊的结构抗震设计与分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (3): 12-17.
- [16] 伍云天, 姜凯旋, 杨永斌, 等. 中美超限高层建筑性能化抗震设计方法对比分析 [J]. 建筑结构学报, 2015, 36 (2): 19-26.

<http://www.fmhzhly.com/>