

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2024.051

某新型半导体显示产业钢厂房备料区抗震性能分析

张兴清¹, 吴明青¹, 祝小凯¹, 樊鹏², 杨溥²

(1. 中机中联工程有限公司, 重庆 400039; 2. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:以某新型半导体显示产业钢结构厂房备料区为工程背景,建立了厂房钢框架-支撑结构的非线性有限元模型,分别对多遇地震和罕遇地震下的结构抗震性能进行了分析。结果表明,结构整体指标均满足设计规范要求,第3层和第6层的层间位移角较大;罕遇地震下构件损伤主要集中在支撑,而结构底层角柱和中部楼层的边跨梁有轻微损伤;钢支撑能够有效提高结构刚度,减小梁柱的损伤。

关键词:钢框架-支撑结构;抗震性能;动力时程分析;结构损伤

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)04-094-10

Seismic performance analysis of a preparation area with steel structure in the new semiconductor display industry

ZHANG Xingqing¹, WU Mingqing¹, ZHU Xiaokai¹, FAN Peng², YANG Pu²

(1. CMCU Engineering Co., Ltd., Chongqing 400039, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: A nonlinear finite element analysis (FEA) model was proposed to simulate a semiconductor display industrial building equipped with a steel frame brace as a practical engineering case study. The seismic performance of the structure under frequent and rare earthquakes was analyzed. The results show that the overall indexes of the structure meet the requirements of the design codes. However, the inter-story displacement angles of the 3rd and the 6th floors are relatively large. Under rare earthquakes, damage to the members is mainly concentrated in the steel braces. Slight damage occurred in the corner columns at the bottom floor and side beams at middle floors of the structure. The steel braces are shown to effectively improve the structural stiffness and reduce damage to the beams and columns.

Keywords: steel frame-braced structure; seismic performance; dynamic time analysis; structural damage

由于钢结构优越的受力性能,钢结构建筑和工业厂房在实际工程中被广泛应用^[1]。丁剑平等^[2]对一栋单层排架钢结构厂房采用 ANSYS 模拟分析了结构在小震水准下的响应规律,发现结构在不同方向的地震响应

收稿日期: 2023-03-10 网络出版日期: 2024-01-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278481)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52278481).

作者简介: 张兴清(1967—),男,教授级高级工程师,主要从事结构抗震设计,(E-mail) zxq@cmcu.cn。

通信作者: 杨溥,男,教授,博士生导师,(E-mail) yangpu@cqu.edu.cn。

存在差异,得到多遇地震对设计不起控制作用的结论。Azghandi等^[3]对质量和刚度竖向分布不均匀的高层钢结构算例进行了倒塌机制和损伤状态分析,发现,竖向不规则性对钢结构的受力性能和抗倒塌能力有不利影响。Jia等^[4]对一栋高层钢-混组合结构办公楼进行了不同水准地震响应分析和结构方案对比,其抗震性能均满足规范要求。乐慈^[5]通过ETABS有限元分析软件对中国水利博物馆工程进行了概念设计和有限元分析,对于层层错柱内收的高层型钢混凝土核心筒-钢框架结构,提出了关于抗震概念设计和结构体系合理选取的建议。李刚等^[6]基于ABAQUS建立了6层人字形中心支撑钢框架结构数值模型,发现长耗能梁-偏心支撑机制改变了结构的失效模式,抑制了薄弱层的产生与发展,对结构抗震性能具有显著影响。Nassani等^[7]对比分析了高层建筑钢框架采用不同型式的钢支撑时的结构反应,发现钢支撑型式对其侧移影响显著。McCrum等^[8]通过建立三维非线性模型,分析了质量分布不均匀的多层中心支撑钢框架的扭转响应。

Mohammad等^[9]为减小偏心约束防屈曲支撑多层钢框架结构的残余位移,建议并联设置后张预应力框架,并提出了这种组合系统的设计方法。通过模拟分析发现,选取合适的自复位比和预应力拉索面积,体系的最大位移和残余位移均能达到预期的性能目标。Akbar等^[10]研发了一种新型自复位Y形支撑钢框架系统,并通过2榀缩尺的单跨单层钢框架低周往复荷载试验,考察了自复位单元长度等参数对结构承载力和变形的影响规律。段红霞等^[11]采用塑性损伤模型对一栋9层钢框架-支撑建筑结构进行模拟分析,发现垂直于支撑的上部楼层梁端更易出现损伤且随着地震进程损伤不断增强。Ahiwale等^[12]通过SAP2000对比分析了一栋10层钢筋混凝土结构配置了不同类型支撑的抗震性能,发现框架结构增加支撑可显著提高结构的抗震性能,同时减小结构的层间位移角和整体损伤指数。

综上所述,关于钢支撑结构的现有研究成果主要针对高层建筑或多层厂房,对高层钢框架-支撑厂房的抗震性能研究较少,文中研究对象新型半导体显示钢结构厂房的特点在于使用功能和生产工艺的复杂要求,本结构钢支撑并非沿高度贯通,而是在各层平面位置略有错动,同时各层层高差别较大、存在错层,局部楼层楼板大面积开洞、设备自重和荷载较大,导致结构存在严重的平面和竖向不规则性,文中建立非线性有限元模型,进行了多遇地震和罕遇地震下结构性能分析,对有无支撑的结构方案和抗震性能进行对比分析,发现结构受力薄弱部位和减轻关键构件的损伤,为该类厂房的抗震设计提供建议。

1 工程概况及结构布置方案

某新型半导体显示产业聚集地基础设施工程厂房备料区包括筒仓区和物料区,其中筒仓区用于各类材料的储存,建筑高度为50.4 m,共7层;物料区用于材料和产品的储存,建筑高度为54.9 m,共8层。结构体系为高层钢框架-支撑结构,其中框架柱采用箱型钢柱,框架梁为H型钢,斜撑为方钢管。

筒仓区仅在第1层、第6层及屋面层有完整的混凝土楼板,其余楼层开洞面积为741 m²(占楼层面积的18.86%)。开洞位置和方式如图1(b)(c)所示。筒仓区(轴①~轴③)从第3层到第5层存在穿层柱,筒仓区在第4层与物料区间错层高度3 m。筒仓底座(见图1(d)实线框)局部大样如图2所示,筒仓区筒仓传导至每根底座梁跨中的集中荷载达到了1 300 kN,底座梁与主梁铰接。

结构楼层平面布置如图2所示。结构第4层到第6层布置了吊车设备,产生的竖向集中荷载范围在11~87 kN。另外,由于存在大量工业设施以及满足物料的储存和运输导致楼面活荷载很大,楼板活载及吊车分布如图3所示。

结构主要构件的尺寸及材料如表1所示。

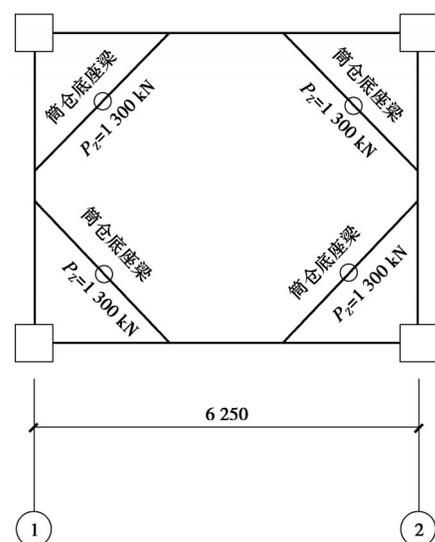


图1 筒仓底座梁

Fig. 1 Silo base beam

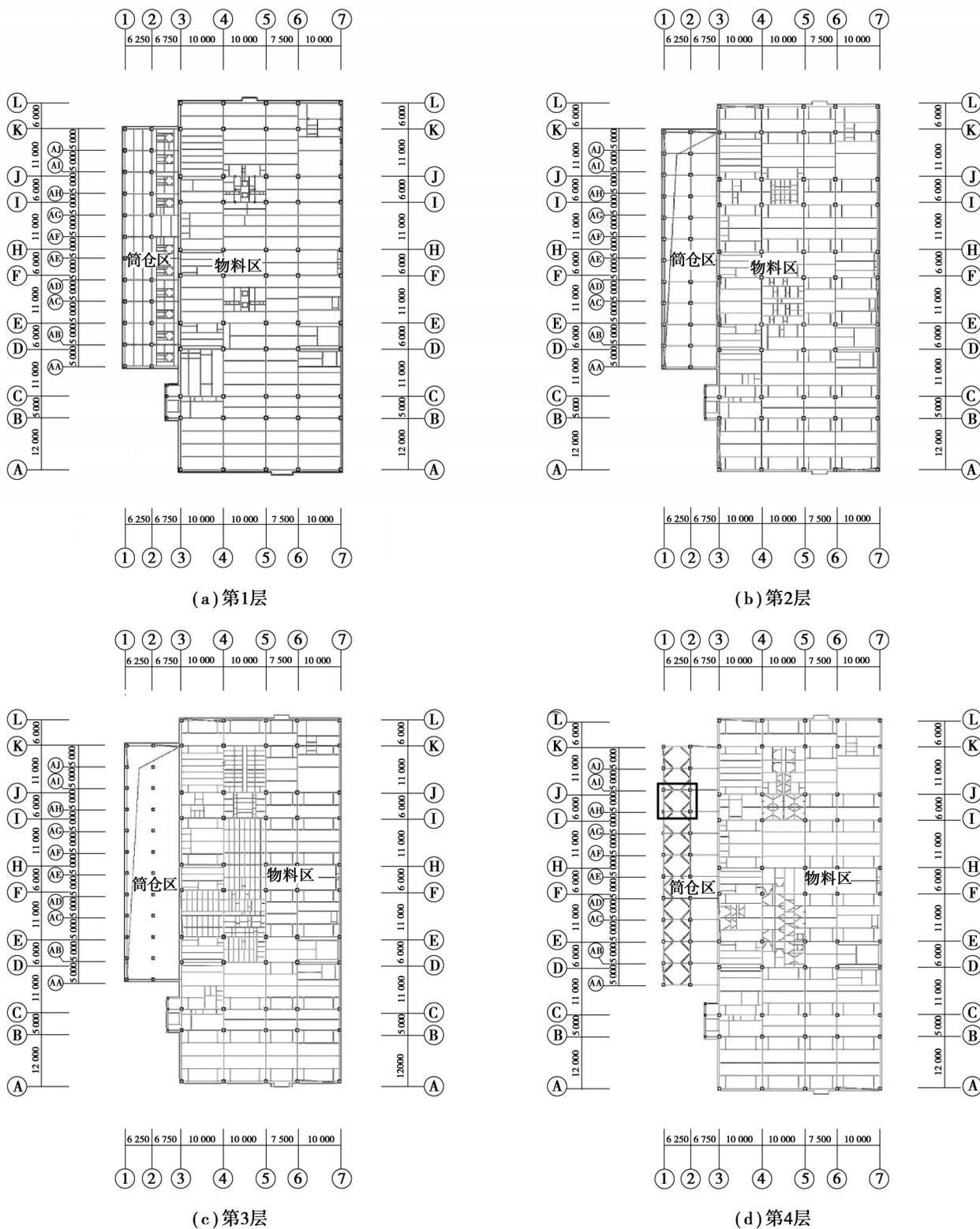


图2 结构平面布置图

Fig. 2 Floor layout of structure

由于结构存在楼板开洞和错层,同时第4层含有11个自重达520 t筒仓,导致其在竖向有明显的刚度不均匀和质量不均匀,各楼层侧移刚度分布及质量分布情况如表2所示。由此可见,结构在第3层均存在明显的刚度突变,第4层质量发生突变。

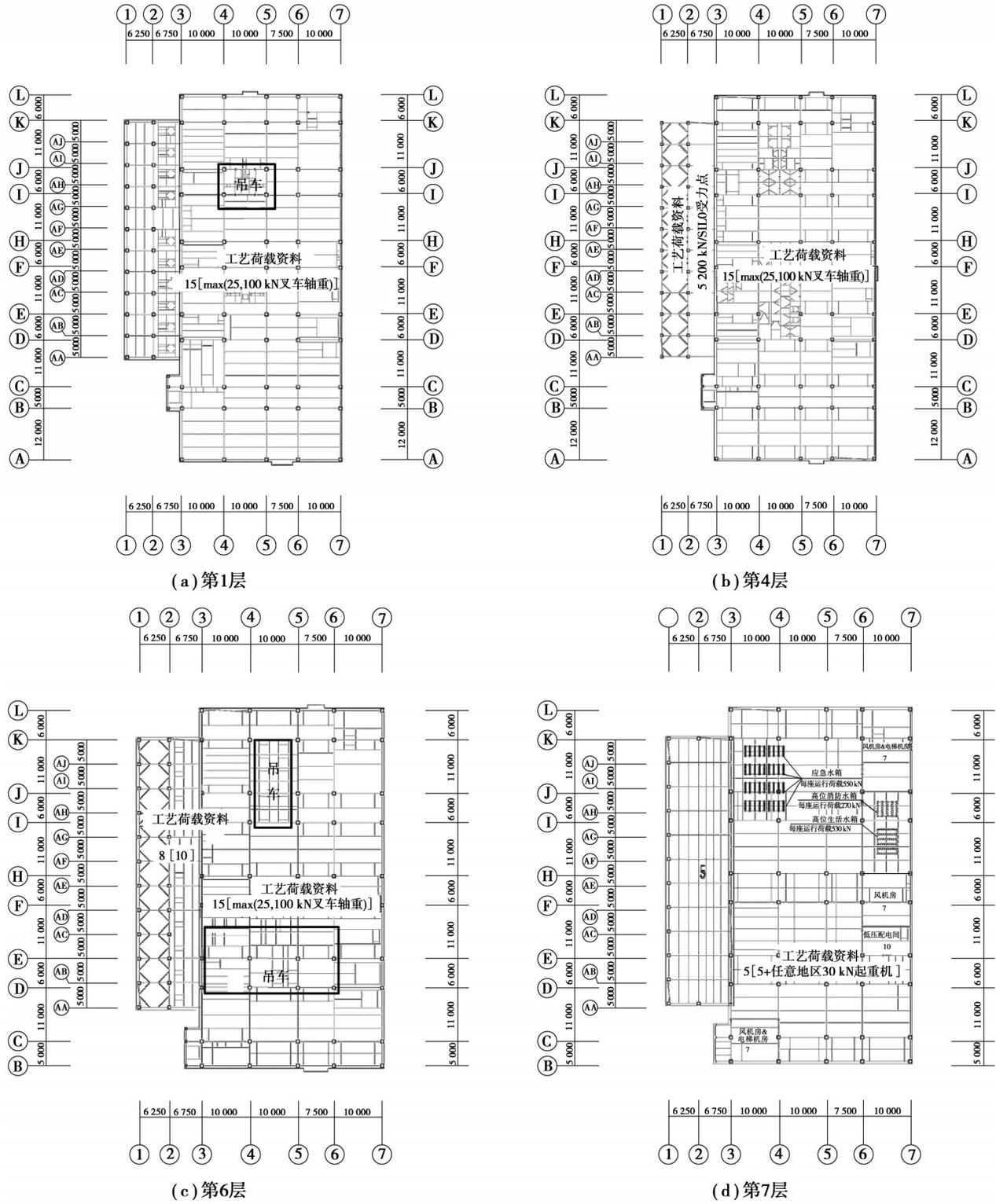


图 3 楼板荷载平面分布图
 Fig.3 Floor load plane distribution

表1 结构主要构件尺寸及材料

Table 1 Dimensions and materials of main components of structure

构件	截面尺寸	材料
柱(箱型)	箱 750×750×38×38; 箱 700×700×35×35; (1~2层)	Q345b
	箱 650×650×30×30; 箱 600×600×30×30; (3~7层)	
	箱 400×400×18×18(8层)	
梁(H型)	H650×300×12×25; H800×300×14×25; H900×400×16×30; H1000×300×20×35; H1200×400×20×30; HN400×200×8×13	Q345b
楼板	厚度 200 mm, 分布钢筋 8@150	C35

表2 各楼层侧移刚度及质量

Table 2 Stiffness and quality of each floor

层号	层高/m	刚度/(×10 ⁶ kN/m)	质量/t
8	4.5	0.10	702.8
7	7.0	0.43	6 367.8
6	7.6	0.49	6 718.7
5	6.0	0.90	6 768.9
4	7.0	0.92	13 207.3
3	4.0	1.96	6 701.9
2	8.8	1.18	7 140.8
1	10.5	1.59	8 779.9

2 结构抗震设计

2.1 设计基本参数

建筑结构设计合理使用年限为 50 a, 结构安全等级为二级, 抗震设防类别为标准设防, 抗震设防烈度为 7 度(0.15g), 场地类别为 II 类, 设计地震分组为第一组, 场地特征周期 T_g 为 0.25 s。基本风压按 50 a 一遇取为 0.40 kN/m², 地面粗糙系数为 B 类, 风荷载体型系数取值为 1.3。

2.2 反应谱分析

采用 SATWE 对结构进行整体分析, 同时考虑了双向地震以及偶然偏心的作用。计算结果如表 3 所示。

表3 结构整体计算结果

Table 3 Calculation results of the structure

结构参数	自振周期			最小剪重比/%		楼层抗剪强度比/%	
	T_1	T_2	T_3	X向	Y向	X向	Y向
计算结果	2.469(X)	2.045(Y)	1.655(T)	2.40	2.45	0.83	0.82

由表 3 可知, 在多遇地震的作用下, 结构 X 向和 Y 向层间位移角分别为 1/536 和 1/724, 均满足《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ 99—2015)^[13]规定的限值 1/250。X 向及 Y 向的最大层间位移比分别为 1.25 和 1.24 (考虑偶然偏心), 均大于 1.2, 属于扭转不规则, 但均小于规范最大限值 1.5 的要求。结构的最小剪重比、刚度比、抗剪强度比等指标均能满足相关规范^[13-14]的限值要求。

3 结构抗震性能分析

采用 SAUSAGE 有限元软件建立了结构的非线性分析模型, 如图 4 所示。其中, 梁、柱及支撑均采用梁单

元进行模拟,而楼板采用壳单元模拟。钢材的非线性材料模型采用双线性随动硬化模型,在循环过程中,无刚度退化,考虑了包辛格效应。钢材的强屈比设定为 1.2,极限应力所对应的极限塑性应变为 0.025。

根据规范要求采用“双频段”选波方法^[16]选取 5 组天然地震波和 2 组人造波,地震波参数如表 4 所示。所选 7 组地震波均满足“多组时程曲线的平均地震影响系数曲线应与振型分解反应谱法所采用的地震影响系数曲线在统计意义上相符”的规范要求^[14],如图 5 所示。根据规范对地震峰值加速度进行调幅后按照 1:0.85 的比例输入双向地震动进行时程分析。

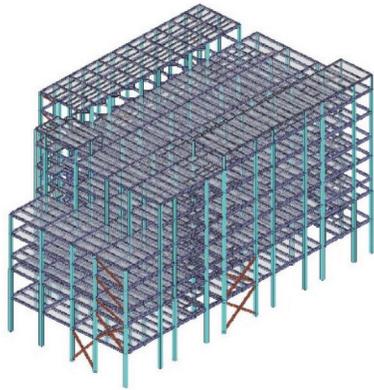


图 4 结构计算模型

Fig. 4 Analytical model of structure

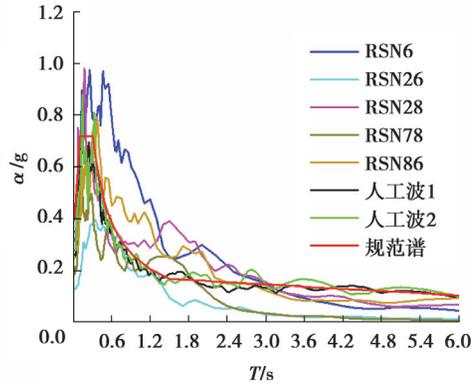


图 5 地震加速度反应谱

Fig. 5 Acceleration response spectrum of selected ground motions

表 4 所选地震波参数

Table 4 Selected seismic wave information

编号	地震时间	地震名称	震级	测站	步长/s
RSN6	1961	Imperial Valley-02	6.95	El Centro Array	0.010
RSN26	1940	Hollister-01	5.60	Hollister City Hall	0.005
RSN28	1966	Parkfield	6.19	Cholame - Shandon Array	0.010
RSN78	1971	San Fernando	6.61	Pasadena - CIT Athenaeum	0.010
RSN86	1971	San Fernando	6.61	Santa Anita Dam	0.005
人工波 1	—	—	—	—	0.020
人工波 2	—	—	—	—	0.020

3.1 多遇地震下弹性动力时程分析

对应多遇地震水准(地震波加速度时程的最大值取 55 cm/s^2),结构各楼层最大楼层位移及层间位移角,如图 6 所示。

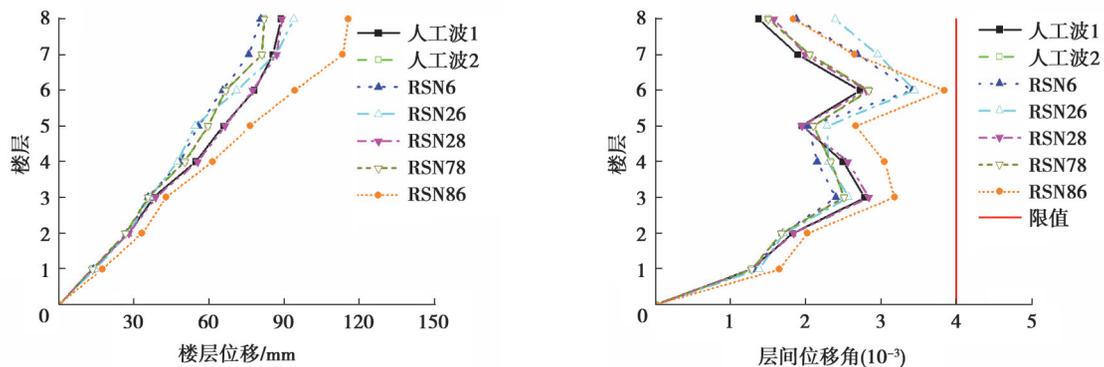


图 6 多遇地震下各楼层响应分布曲线

Fig. 6 Response distribution curve of each floor under frequent earthquakes

由图可见,楼层位移基本呈线性分布。由于第3层层高(4 m)远小于其他楼层高,导致该楼层的层间位移角较大。由表1可知,由于结构楼层抗侧刚度在第6层减小了44.5%,导致该层的层间位移角最大,但未超出1/250的限值。由此可见在多遇地震下,结构能够满足“小震不坏”的设计要求。

3.2 罕遇地震下非线性动力时程分析

对应罕遇地震水准(地震波加速度时程的最大值取 310 cm/s^2),结构各楼层的结构响应规律如图7所示。由于楼板开洞和结构错层等导致第3层和第6层的层间位移角最大,但满足罕遇地震“大震不倒”的变形要求。

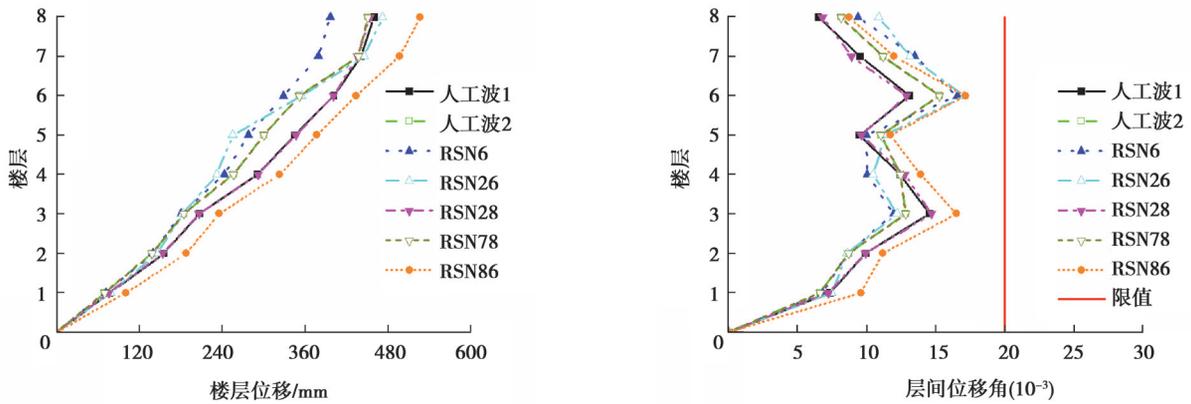


图7 罕遇地震下各楼层响应分布曲线

Fig. 7 Response distribution curve of each floor under rare earthquakes

结构在罕遇地震作用下损伤情况和应力比分布分别如图8和图9所示。由图可知,1)结构构件的损伤均出现在第7层以下;2)损伤主要集中于在轴③~轴⑦配料区的钢支撑,支撑因其轴向应力超过材料屈服强度而出现损伤,而筒仓区(轴①~轴③)的钢支撑未屈服;3)1~6层的部分框架梁出现了轻微损伤,对于框架柱,在第1层角柱、第4层及第6层少数柱有轻微损伤,尤其是与钢支撑相连的柱,其应力较大。

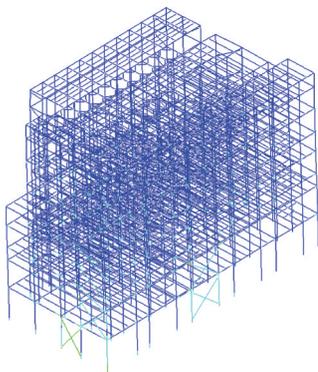
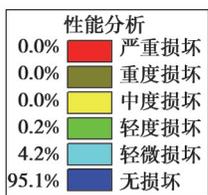


图8 罕遇地震作用下结构损伤分布情况

Fig. 8 Distribution of structural damage under rare earthquakes

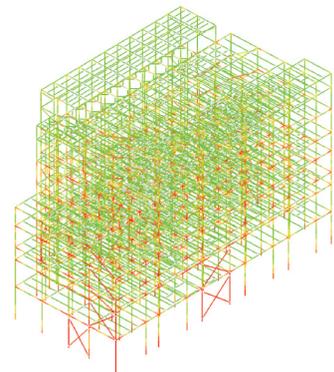
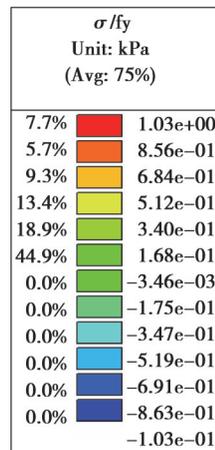


图9 罕遇地震作用下结构应力比分布

Fig. 9 Distribution of structural stress ratio under rare earthquakes

罕遇地震作用下构件的响应统计,如表5所示。由表可知,备料区损伤主要在轴线①~⑤区域的支撑,且主要是Y向的支撑受损,同时边跨X方向上的梁柱以及配备有工业设备等荷载复杂的区域更易受损。

表 5 备料区罕遇地震下构件响应统计
Table 5 Response statistics of components under rare earthquakes in Batch area

类别	楼层	最大应力比所在 的轴线位置	应力比最大值	应力比平均值	损伤构件应力比 平均值	损伤 占比/%
支撑	1	A/5~6	1.022 9	0.887 0	1.011 0	62.4
	2	A/6~7	1.011 2	0.817 3	1.000 5	42.3
	3	A/6~7	1.008 8	0.753 9	1.001 6	20.3
	4	A/6~7	1.014 4	0.967 7	1.007 3	69.0
	5	A/6~7	1.001 9	0.638 0	1.001 6	19.2
	6	L/3~4	0.934 7	0.706 8	—	0
	7	L/3~4	0.559 3	0.317 7	—	0
柱	1	F/7	1.027 9	0.474 0	1.006 3	11.6
	2	A/7	1.011 7	0.389 6	1.003 7	1.6
	3	A/7	1.001 7	0.475 0	1.000 8	2.1
	4	E/3	1.007 5	0.624 5	1.002 3	13.4
	5	A/5	1.002 9	0.475 0	1.001 0	1.1
	6	C/6	1.004 0	0.492 7	1.001 6	7.8
	7	C/6	0.935 7	0.312 3	—	0
	8	H/7	0.672 8	0.352 0	—	0
梁	1	A/5~6	1.024 7	0.266 5	1.004 1	4.0
	2	7/E~F	1.027 9	0.287 8	1.004 7	5.0
	3	A/5~6	1.023 4	0.286 6	1.003 5	6.0
	4	A/5~6	1.022 3	0.277 7	1.003 0	3.9
	5	A/5~6	1.006 6	0.263 9	1.003 8	3.2
	6	C/3~4	1.007 2	0.231 8	1.003 1	2.2
	7	L/4~5	0.970 3	0.149 8	—	0
	8	E/6~7	0.595 3	0.125 3	—	0

注:应力比平均值为对应楼层所有构件的应力比值取平均;损伤占比为对应楼层损伤构件数量与该楼层构件总数之比。

3.3 支撑对结构的影响分析

在多遇地震时,有无支撑下结构各楼层层间位移角对比曲线如图 10 所示。由图可知,支撑能够提供必要的抗侧刚度,明显减小了 1~6 层层间位移角。

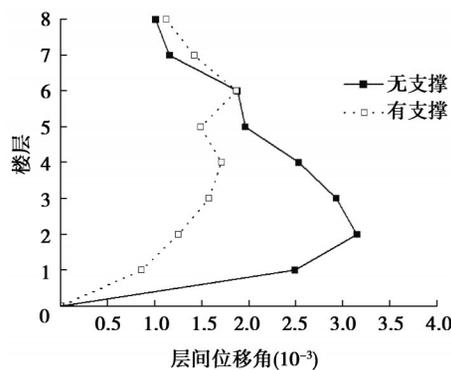


图 10 有无支撑下结构各楼层层间位移角对比

Fig. 10 Comparison of the response of each floor of the structure under different supports

钢支撑对结构在罕遇地震下构件的应力比影响规律如表6所示。设置支撑增大了结构抗侧刚度,其自振周期变小,使得结构地震作用及效应加大,有支撑结构各层构件的应力较无支撑结构更大。中心支撑虽然未明显减小结构损伤,却使得结构的应力在各楼层的分布更加均匀,减小了结构的层间位移。

表6 结构构件应力比

Table 6 Stress ratio of structure under different supports

类别	楼层	应力比	
		无支撑	有支撑
柱	1	1.001 5	1.027 9
	2	0.999 9	1.011 7
	3	0.878 6	1.001 7
	4	1.001 3	1.007 5
	5	0.886 4	1.002 9
	6	0.764 7	1.004 0
	7	0.649 3	0.935 7
	8	0.412 9	0.672 8
梁	1	1.020 5	1.024 7
	2	1.010 4	1.027 9
	3	1.003 5	1.023 4
	4	1.004 4	1.022 3
	5	1.000 7	1.006 6
	6	0.982 1	1.007 2
	7	0.794 8	0.970 3
	8	0.400 1	0.595 3

4 结束语

通过对某新型半导体显示产业钢厂房备料区结构在多遇和罕遇地震下的动力时程分析,得到了结构的响应及损伤分布规律,主要结论如下。

1)虽然结构存在平面不规则性以及竖向质量和刚度分布不均匀,但抗震分析结果表明,结构能满足规范抗震性能要求。

2)在多遇地震下结构中间层(3~6层)层间位移角较大。在罕遇地震下结构区第3层和第6层的层间位移角最大,在设计时应当按照薄弱层进行设计,结构损伤主要集中于钢支撑,在设计时需要重点关注,梁柱损伤均较小。

3)中心支撑增强结构的抗侧刚度,使得结构刚度分布和应力分布更加均匀,减轻了结构关键构件的损伤。

参考文献

- [1] Fang C, Wang W, Qiu C X, et al. Seismic resilient steel structures: a review of research, practice, challenges and opportunities [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 191: 107172.
- [2] 丁剑平, 蹇开林, 林顺洪. 大型复杂钢结构厂房的抗震性能的有限元分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(1): 105-109.
Ding J P, Jian K L, Lin S H. Seismic analysis and performance assessment of 3-D FEM of a factory building[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006, 29(1): 105-109.(in Chinese)

- [3] Ramezani Azghandi R, Shakib H, Zakersalehi M. Numerical simulation of seismic collapse mechanisms of vertically irregular steel high-rise buildings[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 166: 105914.
- [4] Jia H J, Song Y S, Chen X, et al. Seismic performance evaluation of a high-rise building with structural irregularities[J]. *Buildings*, 2022, 12(9): 1484.
- [5] 乐慈. 中国水利博物馆竖向不规则高层钢结构的研究[J]. *建筑结构*, 2006, 36(S1): 361-365.
Le C. Study on vertical irregular high-rise steel structure of China water conservancy museum[J]. *Building Structure*, 2006, 36(S1): 361-365.(in Chinese)
- [6] 李钢, 张天昊, 董志骞. 长耗能梁-偏心支撑机制对中心支撑钢框架结构抗震性能的影响[J]. *建筑科学与工程学报*, 2020, 37(3): 10-17.
Li G, Zhang T H, Dong Z Q. Effect of long-link EBF mechanism on seismic performance of steel CBF[J]. *Journal of Architecture and Civil Engineering*, 2020, 37(3): 10-17.(in Chinese)
- [7] Nassani D E, Hussein A K, Mohammed A H. Comparative response assessment of steel frames with different bracing systems under seismic effect[J]. *Structures*, 2017, 11: 229-242.
- [8] McCrum D P, Broderick B M. Seismic assessment of a steel braced plan mass symmetric/asymmetric building structure[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2014, 101: 133-142.
- [9] Gholami M, Zare E, Gorji Azandariani M, et al. Seismic behavior of dual buckling-restrained steel braced frame with eccentric configuration and post-tensioned frame system[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2021, 151: 106977.
- [10] Shahiditabar A, Moharrami H. Development and experimental verification of self-centered y-shaped braced frame[J]. *Structures*, 2021, 34: 1312-1325.
- [11] 段红霞, 李守巨, 刘迎曦. 地震作用下钢结构损伤过程数值模拟[J]. *工程力学*, 2011, 28(2): 198-204.
Duan H X, Li S J, Liu Y X. Numerical simulation of damage process of steel frames under earthquake excitation[J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(2): 198-204.(in Chinese)
- [12] Ahiwale D D, Kontoni D P N, Darekar P L. Seismic performance assessment of reinforced concrete frames with different bracing systems[J]. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2023, 8(3): 102.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层民用建筑钢结构技术规程: JGJ 99—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for steel structure of tall building: JGJ 99—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Code for seismic design of buildings: GB 50011-2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010. (in Chinese)
- [15] 杨溥, 李英民, 赖明. 结构时程分析法输入地震波的选择控制指标[J]. *土木工程学报*, 2000, 33(6): 33-37.
Yang P, Li Y M, Lai M. A new method for selecting inputting waves for time-history analysis[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2000, 33(6): 33-37.(in Chinese)

(编辑 陈移峰)