

浙江印刷集团有限公司工业厂房项目结构设计

陈海啸¹, 朱俞江^{2*}, 冯永伟¹, 苏项庭¹

¹浙江省建筑设计研究院, 浙江 杭州

²浙江筑外建筑设计有限公司, 浙江 杭州

收稿日期: 2022年3月30日; 录用日期: 2022年4月19日; 发布日期: 2022年4月29日

摘要

浙江印刷集团有限公司工业厂房项目为一幢22层高层建筑, 分东、西两个塔楼, 中间在7~22层用钢结构连廊进行连接。结构设计难点在于连体桁架的设置、竖向构件不连续的处理、竖向荷载的传递分析等。设计结构时, 采用SATWE、MIDAS等多个软件对结构的整体计算及主要构件进行分析, 根据相关性能目前针对性地对目标构件采取相应的抗震加强措施。分析结果满足国家和地方相关规范的要求以及预设的性能目标要求。

关键词

转换桁架, 连体结构, 弹塑性时程分析

Structural Design of Industrial Plant Project of Zhejiang Printing Group Co., Ltd.

Haixiao Chen¹, Yujiang Zhu^{2*}, Yongwei Feng¹, Xiangting Su¹

¹Zhejiang Province Institute of Architectural Design and Research, Hangzhou Zhejiang

²Zhejiang Beyond Architecture Design Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang

Received: Mar. 30th, 2022; accepted: Apr. 19th, 2022; published: Apr. 29th, 2022

Abstract

The industrial plant project of Zhejiang Printing Group Co. Ltd., a 22-floor tall building, contains west and east towers that are connected with a steel-structured bridge. Structural design emphasized setting truss linked to connective structure, handling discontinuously vertical members, and analyzing the vertical loading path. This project adopted SATWE, MIDAS and other software to run structure calculations, and to take seismic reinforcement measures for target members. Overall analysis results met national and local codes and specification, and preset performance-based objectives.

*通讯作者。

Keywords

Transfer Truss, Connected Structure, Elastoplastic Dynamic Analysis

Copyright © 2022 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

浙江印刷集团有限公司工业厂房项目位于杭州市市中心。本项目地上由一幢 22 层高层建筑，一幢 2 层(局部 3 层)建筑组成。其中高层建筑为一幢带有多处转换的框架剪力墙结构，转换结构采用平面桁架，结构总高度为 94.2 m，底部两层层高为 5.1 m，其余层高为 4.2 m。多层建筑采用框架结构。高层与多层建筑之间通过设置结构缝脱开。建筑效果如图 1 所示。

地下室为 3 层，地下 1 层层高为 6.0 m (局部为 3 m 层高的自行车车库夹层)，地下 2、3 层层高为 3.4 m，主要功能为地下车库以及地块内必须的相关设备用房。人防区设置在地下三层，为甲类防空地下室，按核六级常六级设防。

本项目工程设计使用年限为 50 年，结构安全等级为二级，抗震设防类别为标准设防类，抗震设防烈度为 6 度(0.5 g)，设计地震分组为第一组，场地类别为 III 类，特征周期为 0.45 s，大震作用下特征周期为 0.50 s；小震、中震、大震作用下地震影响系数 α_{max} 分别为 0.04, 0.12, 0.28；小震时周期折减系数



Figure 1. Perspectiv of the Project

图 1. 建筑效果图

为 0.85，中震与大震时不折减；小震、中震、大震作用计算时结构阻尼比分别为 5%，6%，7% [1] [2] [3]。本项目按照 50 年一遇的风荷载进行承载力极限状态验算和正常使用极限状态验算，按照 10 年一遇的风荷载进行舒适度分析；且在承载力设计时应按 50 年一遇的基本风压的 1.1 倍采用。基本雪压根据 50 年一遇标准值取值[4] [5]。

2. 结构体系

2.1. 上部结构

地上整个结构呈近三角形平面，东西向约 108 m，南北向约 63 m，分东、西两个塔楼，因建筑功能需

求，塔楼中间区域 7 层以下不能设柱，且连体中心需设置中庭，南侧因立面要求高位缩进，因此连体分为南北两个，即南侧 7~16 层、北侧 7~22 层通过连廊与东西塔楼进行连接。连廊与东西塔楼采用刚性连接。

塔楼采用钢筋混凝土框剪结构，连廊采用平面桁架及钢结构框架，与东、西塔楼连接处塔楼框架柱采用钢骨柱，同时桁架上下弦楼层向内延伸一跨设置钢骨梁。墙柱混凝土等级从下至上 C55 渐变至 C30，主要钢构件钢材等级均采用 Q345B。

因东西两塔 X 向高宽比均小于 4，无需利用连接体增加其东西两塔的协同抗侧作用，因此连体主要解决承受连廊竖向荷载的问题。南侧连体层数较少，底部采用一榀桁架承受上部楼层荷载，北侧连体层数较多，因此在 12 层位置断开，分别设置桁架承受相应楼层的荷载。典型连体平面如图 2 所示，各桁架如图 3 所示。

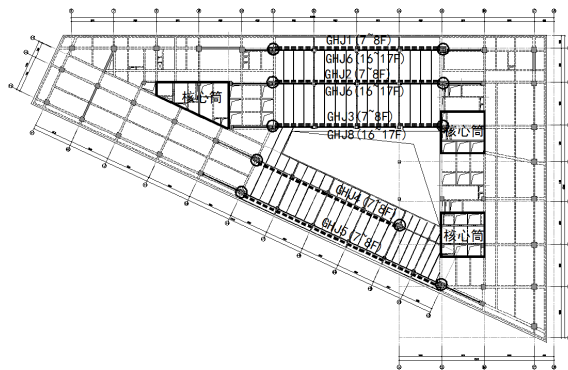
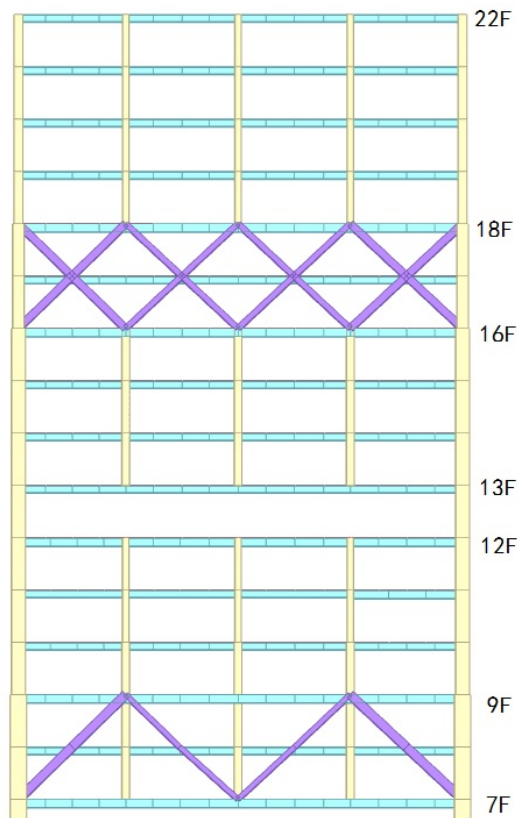


Figure 2. Typical plan diagram
图 2. 典型平面示意图



(a)

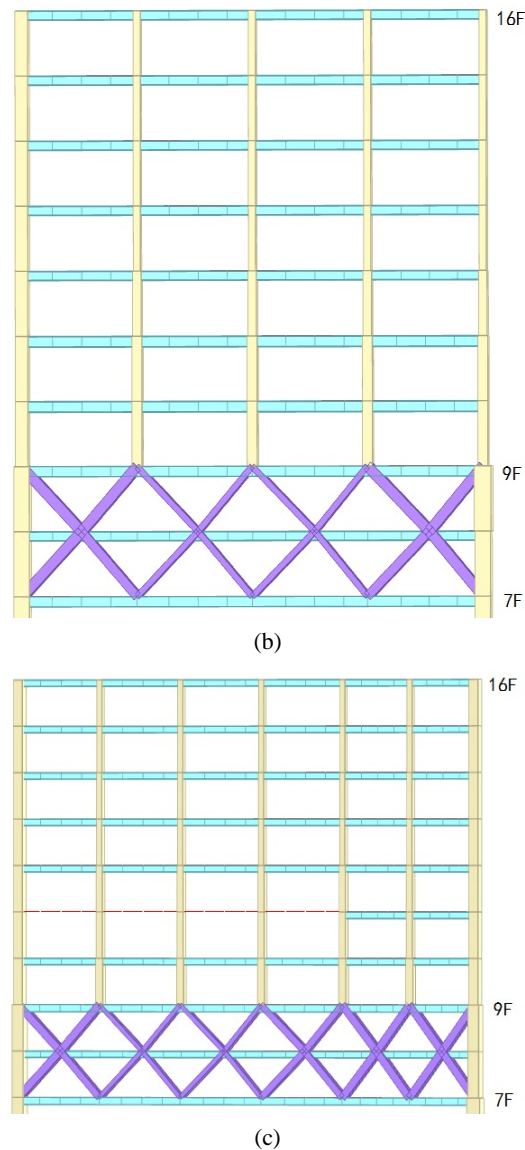


Figure 3. Elevation diagrams of truss HJ1~HJ8: (a) Norton connected truss HJ1~HJ3 (down) and HJ6~HJ8 (up); (b) Southern connected truss HJ4; (c) Southern connected truss HJ5

图 3. 桁架 HJ1~HJ8 立面示意图; (a) 北侧连体桁架 HJ1~HJ3 (下)、HJ6~HJ8 (上); (b) 南侧连体桁架 HJ4; (c) 南侧连体桁架 HJ5

2.2. 地基基础

鉴于主楼荷载较大, 结合岩土工程勘察报告, 拟采钻孔灌注桩基础, 桩端持力层选择以 10-3 层中风化安山玢岩及 11-3 层中风化凝灰质粉砂岩。桩端进入持力层 1.5 米。基础底板厚度取为 1.1 m, 底板混凝土强度等级取为 C35。连廊两侧框柱竖向压力大, 因此柱下设置 6~9 根大直径灌注桩, 以抵抗此竖向荷载, 同时解决不均匀沉降问题。沉降值变化规律符合预期, 主楼核心筒沉降最大, 最大值为 35 mm, 沉降计算结果均能满足规范要求[6] [7]。

3. 结构分析

根据文献[8]附件 1 表 1~2, 本项目存在多项超限, 需进行超限审查[9], 超限情况如表 1 所示。

Table 1. Judgment of structure overrun
表 1. 结构超限判断

序号	不规则类型	简要涵义	判别结论
1	扭转不规则	考虑偶然偏心的扭转位移比大于 1.2	考虑偶然偏心的扭转位移比大于 1.2
2	凹凸不规则	平面凹凸尺寸大于相应边长 30%等	多层平面均存在凹凸不规则情况
3	楼板不连续	有效宽度小于 50%，开洞面积大于 30%，错层大于梁高	中庭开洞处有效楼板宽度与楼面宽度之比均小于规范 50%
4	尺寸突变	竖向构件收进位置高于结构高度 20%且收进大于 25%，或外挑大于 10%和 4 m，多塔	中庭局部悬挑大于 4 米
5	构件间断	上下墙、柱、支撑不连续，含加强层、连体类	本工程存在多个连体
6	承载力突变	相邻层受剪承载力变化大于 80%	7 层(连接体起至部位)楼层抗剪承载力与 8 层比值小于 80%

本项目塔楼的抗震性能目标等级采用 C。根据规范[2]确定各构件的性能要求，并对关键构件进行概念性提高。各构件的性能目标与等级如表 2 所示。

针对表 1 中的超限情况，结合表 2 的构件性能目标，采取下列主要抗震措施：

- 1) 转换桁架和转换柱作为关键构件，按中震弹性，大震不屈服要求设计。
- 2) 转换桁架、转换柱和剪力墙底部加强部位抗震等级提高至二级。转换桁架和转换柱的水平地震作用计算内力乘以放大系数 1.3。
- 3) 剪力墙底部加强部位取嵌固端至第一处转换桁架顶层，其余连接体所在楼层及上下层剪力墙设置约束边缘构件。适当提高剪力墙底部加强部位截面和配筋率，确保底部加强部位墙肢正截面承载力满足中震不屈服，斜截面承载力满足中震弹性，大震不屈服要求。
- 4) 连接体楼板板厚和配筋加强。对重点区域楼板进行楼板应力详细分析，并按高规第 10.2.24 条进行受剪截面和承载力验算。
- 5) 对于个别抬柱转换的转换梁采取性能设计，满足中震弹性要求，箍筋全长加密。对于个别穿层柱，复核其长细比，箍筋全长加密。
- 6) 连接体桁架上下弦杆内伸一跨，相应框架柱设置型钢，确保可靠连接。
- 7) 采用多个结构软件(PKPM-SATWE、MIDAS 等)对计算结果进行分析比对；补充静力弹塑性推覆分析，复核结构弹塑性层间位移，判断结构的薄弱部位、出铰机制和出铰顺序及屈服程度，对关键部位和关键构件进行有针对性地加强，确保大震下安全。

Table 2. Performance objectives
表 2. 性能目标

地震烈度水准	小震	中震	大震	
性能水平定性描述	不损坏	可修复损害	无倒塌	
关键构件	剪力墙墙肢	弹性	底部加强区剪力墙抗弯抗剪弹性；其余部位抗弯不屈服，抗剪弹性。	截面受剪承载力满足“0.15f _{ck} bh ₀ ”的要求。正截面允许进入塑性，控制塑性变形
	桁架	弹性	弹性	不屈服
	桁架相连框架柱	弹性	弹性	不屈服
耗能构件	连梁	弹性	允许进入塑性	允许进入塑性
普通构件	框架柱	弹性	允许进入塑性	允许进入塑性
	框架梁	弹性	允许进入塑性	允许进入塑性

采用 PKPM-SATWE 和 MIDAS Building 两个软件对塔楼进行多遇地震下的抗震计算校核, 地震作用计算采用考虑扭转耦联的振型分解法, 并根据规范[1]要求考虑双向地震、斜交抗侧力构件、偶然偏心与二阶效应。整体计算模型如图 4 所示。

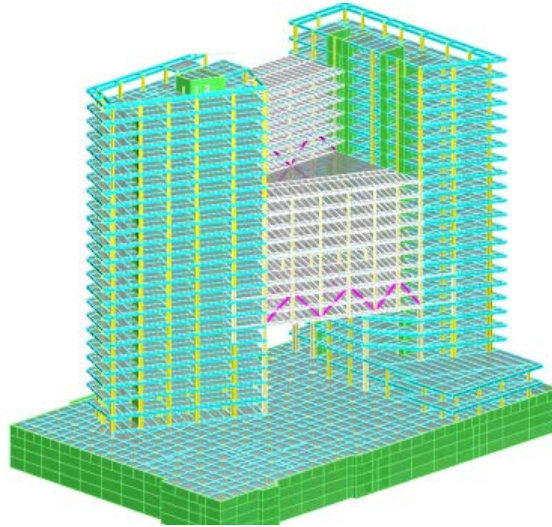


Figure 4. Overall calculation model of structure
图 4. 结构整体计算模型

两个软件计算主要结果如表 3 所示。

Table 3. Verification of elastic calculation of frequent earthquakes
表 3. 多遇地震弹性计算结果校核

		SATWE	MIDAS	SATWE/MIDAS	
结构总重量(t)		194239.516	194274.6	1.00	
主要周期	T1	2.697(Y)	2.533(Y)	1.06	
	T2	2.282(T)	2.216(T)	1.03	
	T3	1.977(X)	1.885(X)	1.05	
刚重比	X	5.16	5.93	0.87	
	Y	2.92	3.61	0.81	
位移比	X	1.23	1.16	1.06	
	Y	1.33	1.32	1.01	
层间位移角	风	X	1/4483	1/3875	0.86
		Y	1/1876	1/2185	1.16
	地震	X	1/3497	1/2741	0.78
		Y	1/2572	1/2467	0.96
基底总剪力(kN)	风	X	6694	6360	1.05
		Y	10945	10272	1.07
	地震	X	13560	13498	1.00
		Y	10410	10193	1.02

Continued

基底弯矩(kN·m)	风	X	405405	383498	1.06
		Y	699183	624370	1.12
	地震	X	699576	847265	0.83
		Y	525512	642413	0.82

如上表所示,通过对结构的主要技术指标进行计算与复核,结构多遇地震反应谱作用下整体抗震性能较好。

4. 重难点分析问题

4.1. 转换桁架及转换柱分析

作为关键构件,各转换层桁架及两端作为桁架支座的框架柱在基本组合工况下的负荷不宜过大。图 5 为承载能力极限状态下典型转换桁架的应力比及其两端框架柱的轴压比。由图可见,转换桁架轴压比均不大于 0.85,其两端框架柱的轴压比均不大于 0.70。

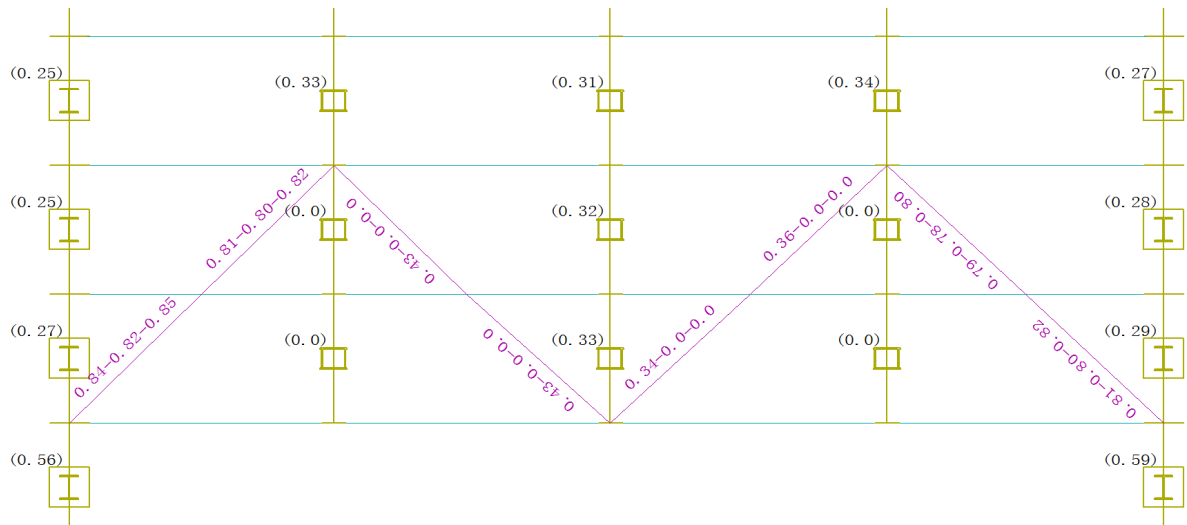


Figure 5. Internal force diagram of truss support

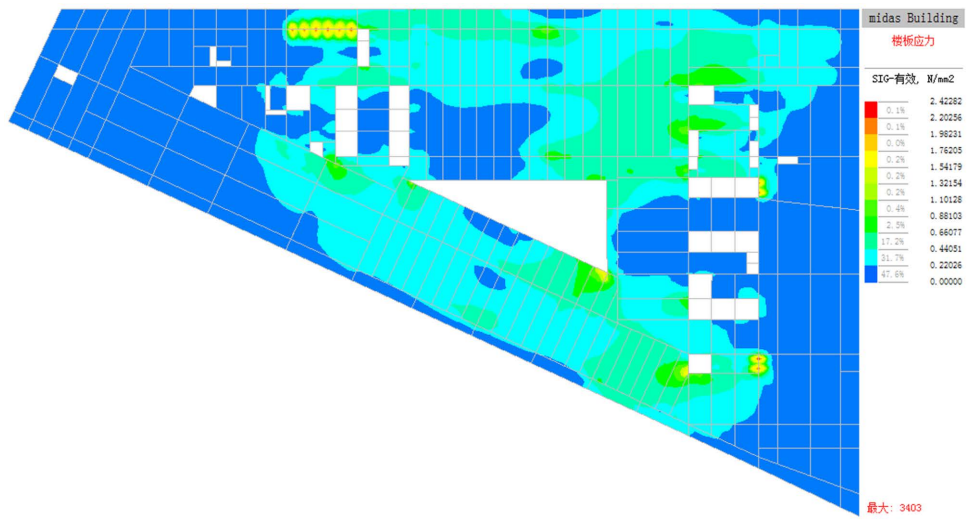
图 5. 桁架支撑内力图

4.2. 转换层楼板及大跨处楼板分析

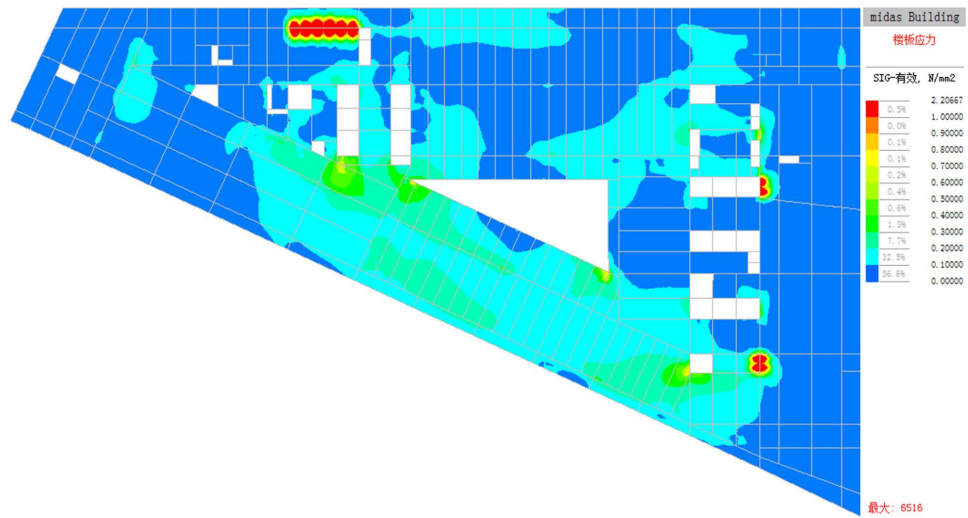
第一转换层(8~9层)在多遇地震下楼板应力结果如图 6(a)~(d)所示,风荷载作用下楼板应力结果如图 7(a)~(d)所示,可见楼板主拉应力不大于混凝土抗拉强度设计值,故小震下楼板不会开裂。对其上转换层楼板进行同样分析,在多遇地震和风荷载作用下,楼板应力均不大于混凝土抗拉强度设计值。

4.3. 中震验算

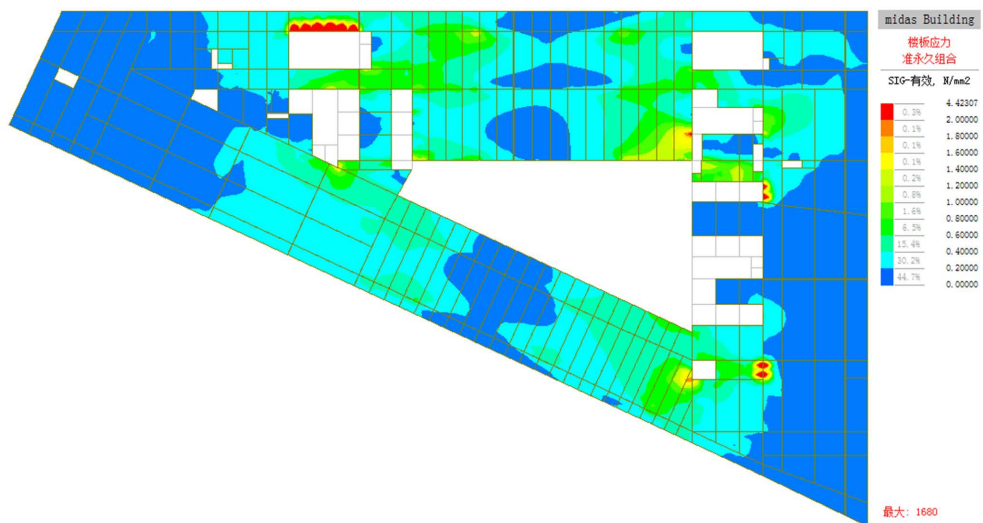
基于性能设计的要求,对主楼剪力墙墙肢、桁架及两端框架柱承载力进行中震弹性验算,确保结构在中震作用下,结构承载力满足设计要求。地上首层和第一转换层处剪力墙的轴压比大多小于 0.45,仅有一墙肢轴压比大于 0.45,为 0.59,规范轴压比限值为 0.60,满足规范要求;地上首层和第一转换层处剪力墙的剪压比均小于 0.100,规范剪压比限值为 0.176,满足规范要求。中震工况下,各转换桁架的应



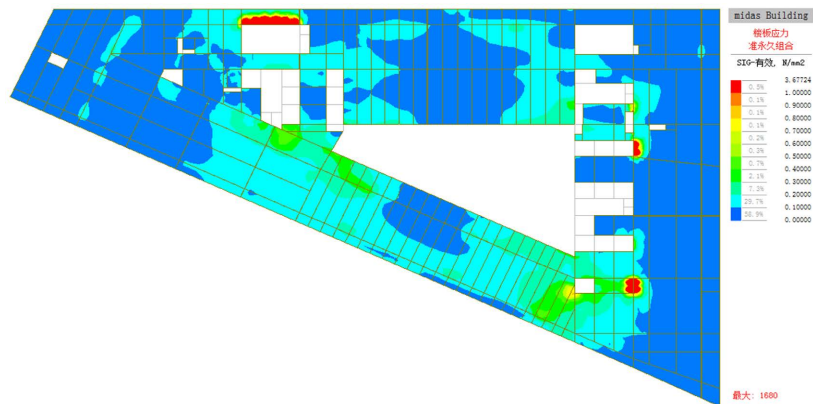
(a)



(b)



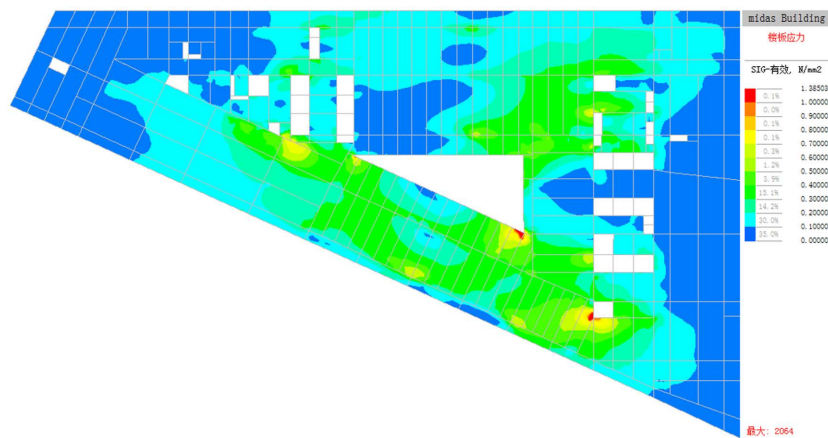
(c)



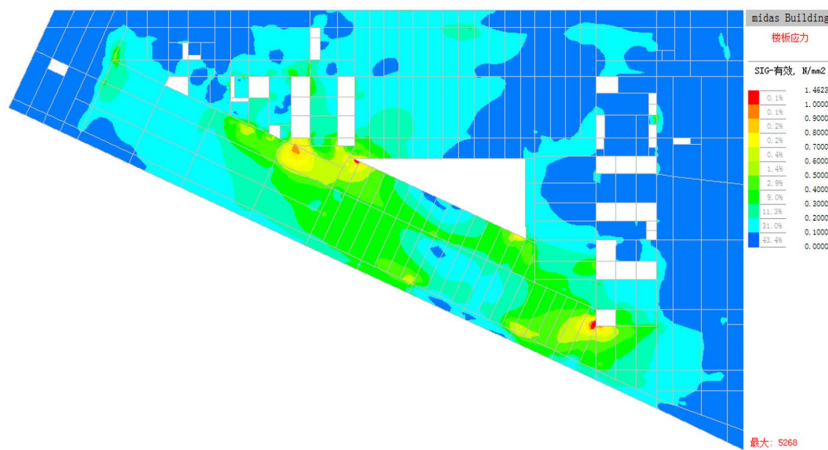
(d)

Figure 6. Stress diagram of lower floor slab under frequent Earthquake; (a) Effective stress distribution of floor slab under X-direction earthquake on the ground floor of the first transfer floor; (b) Effective stress distribution of floor slab under Y-direction earthquake on the ground floor of the first transfer floor; (c) Effective stress distribution of floor slab under X-direction earthquake on the upper floor of the first transfer floor; (d) Effective stress distribution of floor slab under Y-direction earthquake on the upper floor of the first transfer floor

图 6. 多遇地震下楼板应力图; (a) 第一转换层底层 X 向地震作用楼板有效应力分布图; (b) 第一转换层底层 Y 向地震作用楼板有效应力分布图; (c) 第一转换层顶层 X 向地震作用楼板有效应力分布图; (d) 第一转换层顶层 Y 向地震作用楼板有效应力分布图



(a)



(b)

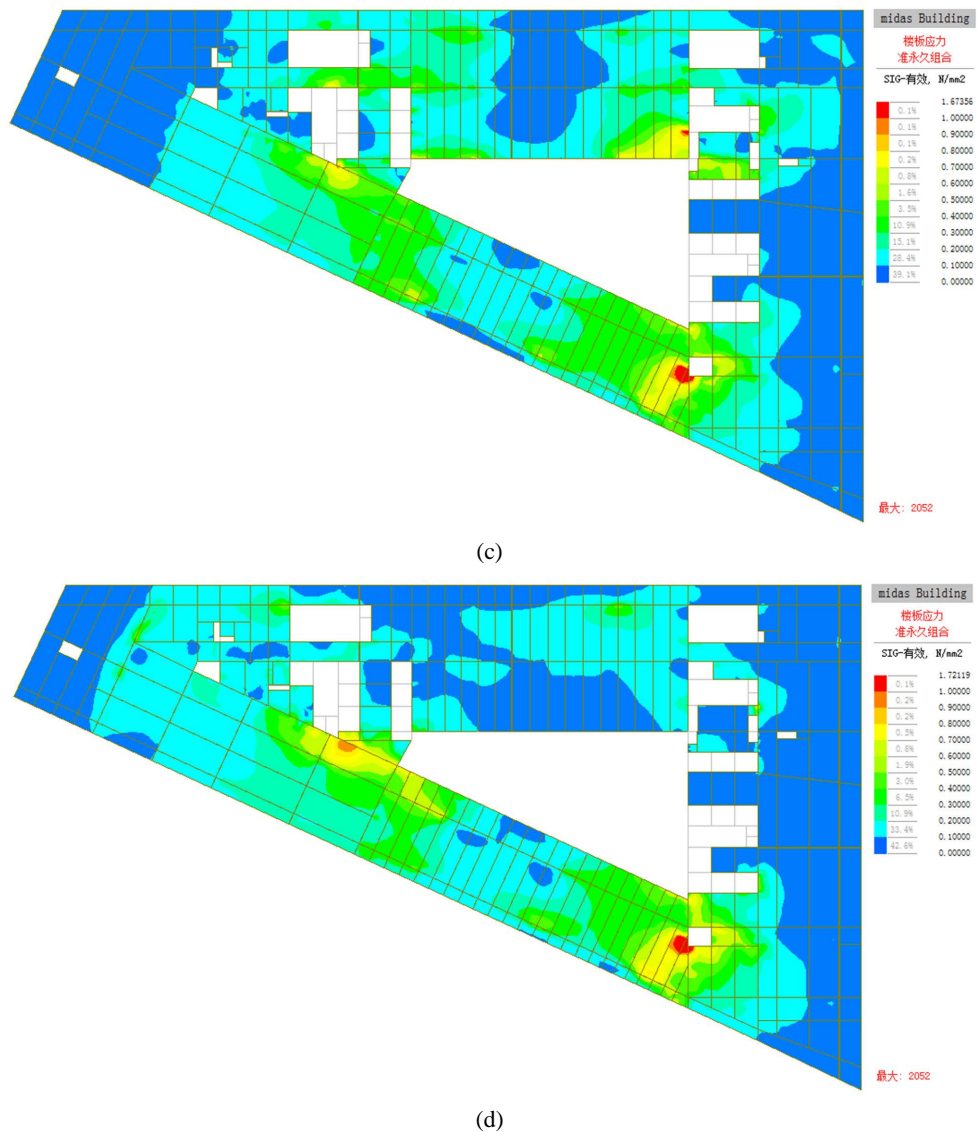


Figure 7. Stress diagram of floor slab under wind load; (a) Effective stress distribution of floor slab under X-direction wind load on the ground floor of the first transfer floor; (b) Effective stress distribution of floor slab under Y-direction wind load on the ground floor of the first transfer floor; (c) Effective stress distribution of floor slab under X-direction wind load on the upper floor of the first transfer floor; (d) Effective stress distribution of floor slab under Y-direction wind load on the upper floor of the first transfer floor

图 7. 风荷载下楼板应力图; (a) 第一转换层底层 X 向风荷载工况楼板有效应力分布图; (b) 第一转换层底层 Y 向风荷载工况楼板有效应力分布图; (c) 第一转换层顶层 X 向风荷载工况楼板有效应力分布图; (d) 第一转换层顶层 Y 向风荷载工况楼板有效应力分布图

力比均小于 1, 两端框架柱的最大轴压比为 0.68, 规范轴压比为 0.7, 满足规范要求。因此, 结构可以达到中震弹性的性能设计要求。

4.4. 大震验算

基于性能设计的要求, 对主楼剪力墙墙肢斜截面、桁架及两端框架柱承载力进行大震不屈服验算, 确保结构在大震作用下, 结构承载力满足设计要求。在大震工况下, 剪力墙剪压比稍有增加, 最大处剪压比为 0.106, 规范剪压比限值为 0.176, 满足规范要求。大震工况下, 各转换桁架的应力比均小于 1,

两端框架柱的最大轴压比为 0.64, 规范轴压比为 0.7, 满足规范要求。因此, 结构可以达到大震不屈服的性能设计要求。

5. 结语

浙江印刷集团有限公司工业厂房项目采用多处连体, 平面功能变化大, 结构体系不规则, 超限项较多。为实现建筑方案效果, 设计中针对性地采取了一系列结构措施减少结构不规则对整体抗震性能的影响。其中连接体楼板加强措施, 桁架和框架柱的连接处理, 转换桁架、转换柱、转换梁等关键构件采取性能化设计等在类似的工程设计中都可以相应采用。同时通过多软件复核, 性能化设计, 大震弹塑性计算等分析方法验算结构在 earthquake 灾害条件下的响应, 确保了预设抗震性能目标的实现。

参考文献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范(2016年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [2] 中国建筑工业出版社. 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, 2011.
- [3] 中国建筑工业出版社. GB 50223-2008, 建筑工程抗震设防分类标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [4] 中国工程建设标准化协会. GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [5] 高文安. GB 50010-2010, 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50007-2011, 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [7] 黄强, 刘金砺, 高文生, 刘金波, 等. JGJ 94-2008, 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [8] 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[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2015.
- [9] 冯永伟, 朱俞江, 陈海啸, 苏项庭. 浙江印刷集团有限公司工业厂房项目超限高层建筑设计可行性研究报告[R]. 杭州: 浙江省建筑设计研究院, 2015.