

某不规则超限高层混凝土仓库结构设计

廖辉煌

奥意建筑工程设计有限公司 深圳 518003

摘要：重庆某高层仓库项目其2~4楼层连续开大洞，开洞面积达52%，造成结构平面及竖向均不规则，跃层柱高达23.6m；以往可借鉴的工程案例少；本文通过采用抗震性能化设计，考察结构在小震，中震以及大震下的受力情况，通过针对性的结构加强措施来满足承载力及使用要求，可为以后相类似项目提供设计参考。

关键词：高层仓库；超限结构；性能化设计

1 工程概况

某仓库项目位于重庆市大渡口区，为高层工业仓库，建筑面积36536.13m²，地上6层，地下1层；建筑高度38.4m，其中1层层高6.3m，2~3层层高5.7m，4层层高

6.2m，5层层高7.5m，6层层高5.5m。结构体系为混凝土框架结构；其中2~4层楼板开大洞，开洞平面及剖面图如下图1所示：

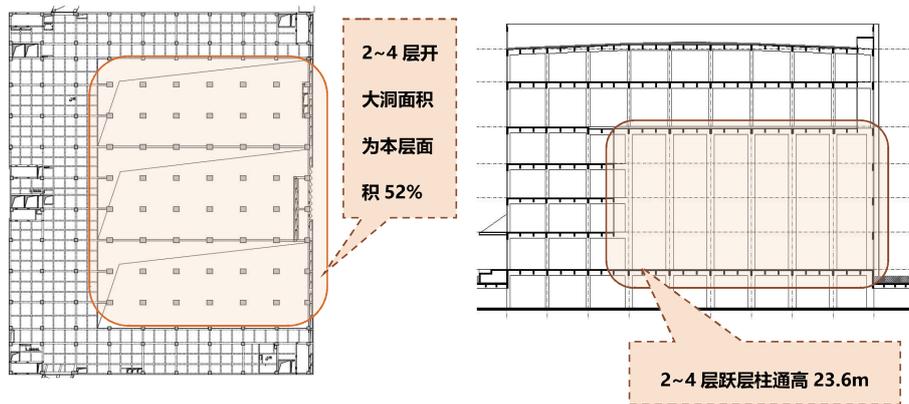


图1 仓库开洞平面图及剖面图

2 结构超限情况及性能目标

项目存在如下不规则项：1) 整体结构Y向最大位移比1.24，属于扭转不规则超限；2) 2~4层开洞面积52%，属于楼板局部不连续超限；3) 第4层侧向刚度与第5层侧向刚度之比为0.56，相邻层刚度变化大于70%，属于侧向刚度不规则超限；4) 第4层楼层受剪承载力与第5层之比为0.75，相邻层受剪承载力变化大于80%，属

于承载力不规则超限；以及由于开洞形成的跃层柱局部不规则超限。

根据《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），本仓库属于规则性超限的高层建筑；综合各种因素后确定总的抗震性能目标为D类。抗震性能目标如下表1所示：

3 结构计算分析：

表1 结构抗震性能目标

地震烈度		多遇地震	设防地震	罕遇地震		
性能水准		1	4	5		
允许层间位移角限值		1/550	—	1/50		
构件抗震设计性能目标	关键构件	楼梯间框架柱、角柱、跃层柱	抗剪	弹性	不屈服	不屈服
			抗弯	弹性	不屈服	不屈服
	普通竖向构件	其他框架柱	抗剪	弹性	满足抗剪截面控制条件	满足抗剪截面控制条件
			抗弯	弹性	部分屈服	允许较多屈服
	耗能构件	框架梁	抗剪	弹性	满足抗剪截面控制条件	部分屈服
			抗弯	弹性	允许较多屈服	允许较多屈服

3.1 小震及风荷载作用下的弹性分析

续表:

采用YJK, Midas Building对结构进行小震及风荷载作用下的弹性分析, 主要计算结果见表2; 可以看出两种软件主要计算结果基本一致, 最小剪重比0.01, 满足规范大于0.008要求; 最大层间位移角满足不大于规范限值1/550要求。采用YJK软件对结构进行弹性时程补充分析, 屋面及出屋面层时程结果大于CQC结果, 放大系数为1.0~1.004。

计算程序		YJK	Midas Building
最大层间位移角	X向风	1/6654	1/5022
	X向地震	1/1727	1/1697
	Y向风	1/6301	1/4815
	Y向地震	1/1800	1/1690

3.2 设防地震作用下结构承载力复核

表3 中震主要计算结果

设防地震作用下的地震计算参数按规范取值, 主要计算结果如表3所示: 中震下基底剪力约为小震基底剪力的2.6倍, 符合要求。

整体指标		2#仓库	
底层地震剪力	X向	32474.3 (小震的2.60倍)	
	Y向	30645.9 (小震的2.61倍)	
地震力倾覆力矩	X向	861586.4 (小震的2.59倍)	
	Y向	807982.9 (小震的2.59倍)	
最大层间位移角	X向	1/699(5层)	
	Y向	1/694(3层)	

表2 YJK与Midas Building主要计算指标对比表

计算程序		YJK	Midas Building
总重量 (t)		109367	108762
T1 (Y向平动) /s		1.90	1.96
T2 (X向平动) /s		1.76	1.86
T3(扭转) /s		1.67	1.70
底层地震力	X向	12469	11826
	Y向	11761	11175
地震力倾覆力矩	X向	333292	331045
	Y向	311702	309075

3.2.1 主要构件验算

此处仅针对混凝土框架柱进行中震作用下的验算, 并按小震弹性工况的结果进行截面配筋, 同时校核判断是否满足中震工况时的配筋要求, 如不满足, 按中震工况的结果配筋。(此文篇幅原因针对混凝土梁的中震作用下验算未示出)

1) 关键框架柱抗剪承载力验算

验算表格如表4 (仅截取二层局部柱), 可知框架柱承载力满足中震下抗剪不屈服性能目标的要求。

表4 关键构件框架柱抗剪验算表

柱号	柱截面	抗剪承载力 V _{yx}	抗剪承载力 V _{yy}	最大剪力 V _x	最大剪力 V _y	V _{yx} /V _x	V _{yy} /V _y	验算结果
KZ1	900x900	3299	3299	663	510	5.0	6.5	满足
KZ3	800x800	2443	2443	860	435	2.8	5.6	满足
KZ5	1600x1300	7653	6972	347	430	22.1	16.2	满足

2) 关键框架柱抗弯承载力验算

截取有代表性的跃层柱KZ5的M-N曲线如下图2所示 (其余柱因篇幅未示出)

经验算, 关键框架柱能满足中震抗弯不屈服性能目标, 其他框架柱能满足中震下多数抗弯不屈服性能目标。

3) 主要的框架柱偏拉验算

根据软件计算结果复核, 全楼框架柱未出现偏拉情况。

通过对中震下框架梁与框架柱应力分析与验算, 结构能达到设防地震下的抗震性能目标。

3.3 罕遇地震作用下的动力弹塑性时程分析

根据高规及抗规要求, 钢筋混凝土框架结构在大震下的弹塑性位移角限值为1/50, 本文采用SAUSAGE软件进行结构的动力弹塑性分析, 主要计算结果如下: 其中弹塑性层间位移角曲线见图3;

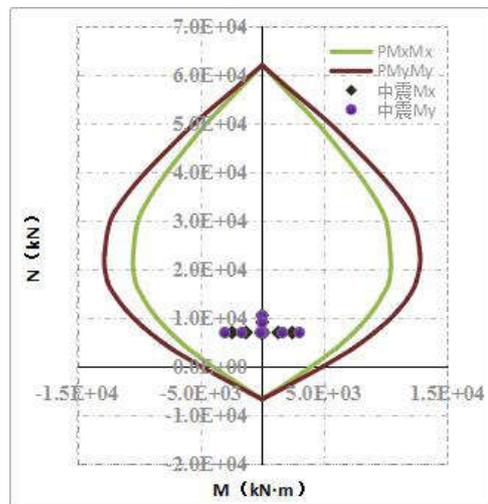


图2 KZ5 M-N曲线

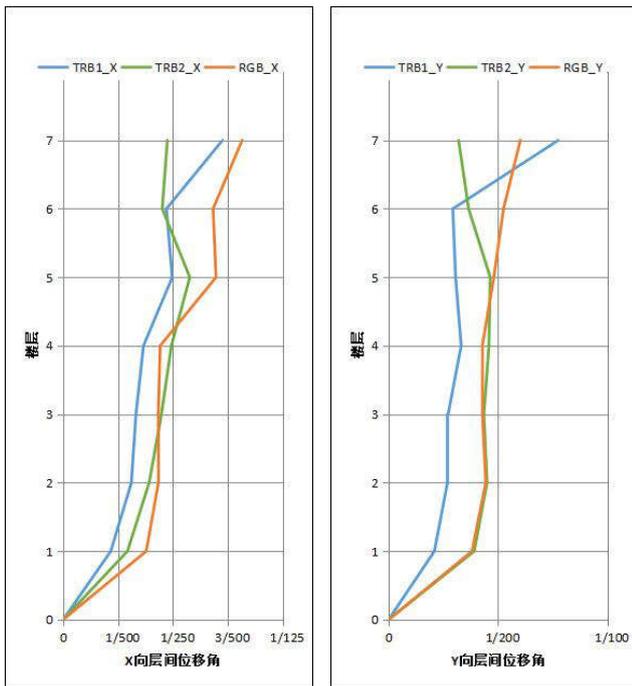


图3 层间位移角曲线

从图3可知，结构在X、Y方向的层间位移角最大值为1/181和1/190，均出现在6层。结构在X、Y方向层间位移角均满足抗震性能目标1/50的限值要求。说明结构整体刚度较大，符合预期性能目标，能够满足“大震不倒”的要求。每组地震波作用下结构基底剪力最大值见下表5；

表5 每组地震波对应的最大基底剪力与相应的比值

主方向	地震波组	大震弹塑性基底剪力 (MN)	小震弹性基底剪力 (MN)	与小震弹性比值	最大值 (MN)
X	TRB1	40.4	12.5	3.2	65.8
	TRB2	52.4	12.5	4.2	
	RGB1	65.8	12.5	5.3	
Y	TRB1	38.7	11.8	3.3	65.5
	TRB2	56.0	11.8	4.7	
	RGB1	65.5	11.8	5.6	

由表5可以看出，3组地震波作用下结构在X、Y主方向基底剪力最大值分别为65.8MN和65.5MN，为小震弹性对应数值的5.3倍和5.6倍，处于合理区间范围，满足弹塑性分析评价标准。

对混凝土框架柱，梁损伤情况进行分析与统计，见图4-5。可知大部分框架柱均处轻度损坏及以下情况，屋面构架柱处于中度损坏，总体塑性发展程度不大，钢筋混凝土框架梁作为主要的耗能构件，各层梁有不同程度的损伤。从图5可以看出绝大多数框架梁表现为轻微损伤和轻度损伤，少数框架梁梁端出现中度损伤，能够满足抗震承载力要求。

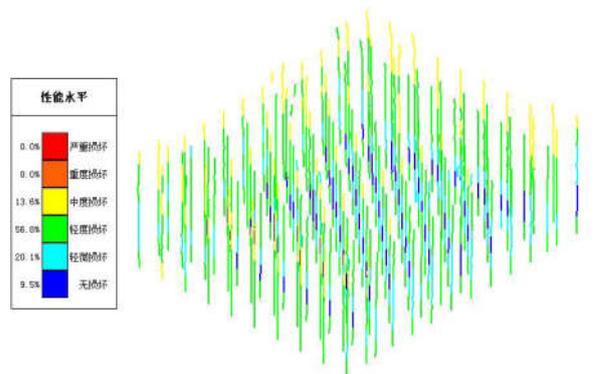


图4 混凝土框架柱损伤情况

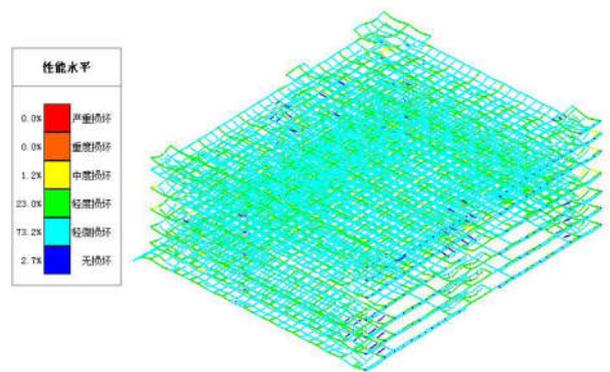


图5 混凝土框架梁损伤情况

为复核开大洞后楼板能否有效传递地震力，采用YJK按大震等效弹性方法对2~4层楼板大震下的楼板应力进行了计算分析，主要计算结果见图6：

在罕遇地震下，楼板平面内存在着剪力，为使开大洞楼层楼板能够有效的传递水平力，需要满足抗剪不屈服要求，参考《混凝土结构设计规范》第11.3.3条规定 ($V_b \leq (0.15\beta_c f_{ck} b h_0) / \gamma_{RE}$)， $\gamma_{RE} = 1.0$ 。即楼板名义平面内剪应力不应大于 $0.15f_{ck} = 3.015\text{MPa}$ 。由楼板剪应力云图可知，楼板大部分区域的剪应力较小，楼梯洞口周边及角部剪应力集中位置未超过3.0Mpa，满足大震抗剪不屈服的要求。以上分析表明，楼板在罕遇地震作用下满足抗震性能目标，能够有效传递水平地震力。

阻尼耗能越多，结构的塑性发展越充分。罕遇地震下人工波RGB作用下的结构耗能其中约80%为阻尼耗能，耗能占比较为合理。

为进一步评估结构在大震下的性能状况，对关键构件的受剪承载力、受剪截面进行验算。验算结果表明各层关键构件框架柱受剪承载力和受剪截面均满足要求，能满足大震不屈服的性能目标。其他框架柱剪压比均满足限值要求，满足抗剪截面控制要求。

3.4 楼板温度应力分析

仓库平面尺寸为98m×81m，采用YJK软件对楼板温

度荷载作用下的楼板应力进行分析；结果表明各楼层楼板在温差作用下，除二层、四层、五层角落以及少部分洞口边角外，大部分楼板的应力最大值小于C30混凝土抗

拉强度标准值2.01Mpa；二层、四层、五层部分洞口边角应力较大，楼板配筋应予以加强。

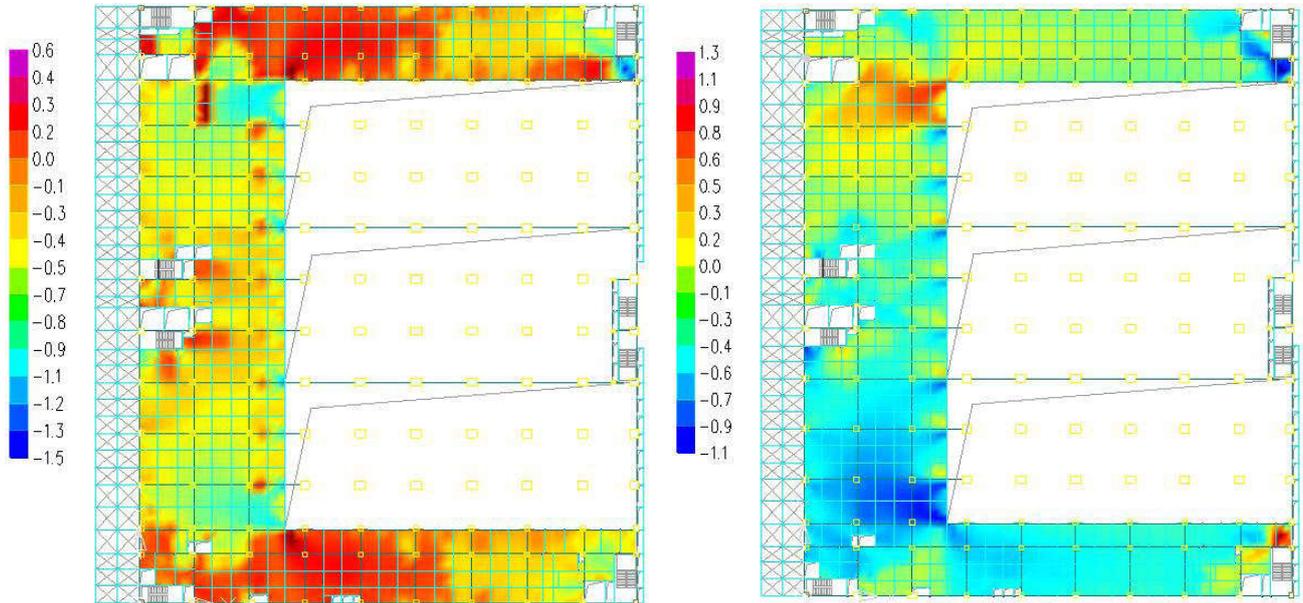


图6 二层大震等效弹性方法下楼板应力（左X向、右Y向）

4 抗震加强措施

通过对高层仓库结构进行小震，中震及大震下的分析，根据其分析结果从计算与构造两个方面进行结构加强处理，如下所示：

计算部分

- (1) 屋面层与出屋面层地震力Y向放大1.01倍；
- (2) 增加结构刚度并控制5F上下层刚度比；
- (3) 嵌固端位于地下室顶板模型与嵌固端位于基础顶模型进行包络配筋；
- (4) 考虑温度应力，复核梁柱配筋。

构造措施

- (1) 角柱全长加密；
- (2) 二~四层开大洞楼层楼板加厚、配筋加强且双层双向通长；
- (3) 跃层柱纵筋按照屈曲计算与模型计算包络配筋，按照地震剪力放大2倍进行柱抗剪设计；
- (4) 二~四层大开洞周边梁纵筋及抗扭钢筋加强；
- (5) 五层板厚加强、双层双向配筋；一~四

层非跃层柱最小体积配箍率提高。

5 结语

本工程通过对结构采取较为合理的结构布置，并针对薄弱部位采取相应的加强措施，使得结构具有良好的抗震性能，各项指标满足规范要求，实现了预期的抗震性能目标。

参考文献

- [1]建筑抗震设计规范：GB 50011-2010[S].2016年版.北京：中国建筑工业出版社，2016.
- [2]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.
- [3]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.