

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.007

新疆某超高层住宅楼动力弹塑性分析

田晴¹, 赵崇锦², 王忠凯^{2,3}, 潘毅²

(1. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 成都 610041; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 3. 成都基准方中建筑设计有限公司, 成都 610017)

摘要: 为了解新疆某高层住宅在罕遇地震下的弹塑性行为, 研究构件的损伤及屈服情况, 判断结构的薄弱部位及薄弱构件, 并对抗震设计提供建议。通过 Midas-Building 建立三维数值模型, 对结构进行动力弹塑性时程分析。分析结果表明: 结构最大层间位移角满足 1/100 限值的要求, 大部分连梁出现损伤, 主要受力剪力墙塑性损伤较小, 结构无明显的薄弱部位。该工程虽属于高烈度区的超高层建筑, 但通过合理的结构布置和相应的构造措施, 能达到设计规定的抗震设防目标。

关键词: 超限高层; 动力弹塑性分析; Midas-Building; 抗震性能评估

中图分类号: TU311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2016)S2-0030-05

Elastic and plastic dynamic analysis of a super high-rise residential building in Xinjiang

Tian Qing¹, Zhao Chongjing², Wang Zhongkai^{2,3}, Pan Yi²

(1. China South west Architecture Design and Research Institute, Chengdu 610041, P. R. China;
2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;
3. Chengdu JZFY Architectural Design Co, Ltd, Chengdu 610017, P. R. China)

Abstract: Elastic and plastic dynamic time history analysis of a Super high-rise residential buildings in Xinjiang was performed by Midas-Building to study the elastic-plastic behavior under the rare earthquake, to study the damage and yield of the components and to find out the structure of the weak layer of the structure and weak component to provide some suggestions for seismic design. Analyses results show that the maximum story drift ratio is less than 1/100 which fulfills the limitation requirement, most of the beam damage occurs, main shear walls suffer little plastic damage and no obvious weak parts of structure is found. Although the Super high-rise residential locates in the high seismic intensity zone, but the structure can achieve the goal of seismic design requirements through the reasonable structural arrangement and calculation analysis.

Key words: high-rise building; elastic and plastic dynamic analysis; midas-building; seismic performance evaluation

1 工程概况

该住宅位于新疆维吾尔自治区某市, 是集住宅和商业为一体的综合体, 并包含 1 层商业裙房和 1

层地下室(主要作为停车库)。主体结构地上 39 层(其中底部 2 层商业, 商业与住宅相错层数不超两层)为剪力墙结构。主体结构高度为 118.87 m, 标准层平面呈十字形, 底部为 37.25 m×44.2 m, 高宽

收稿日期: 2016-10-18

基金项目: 四川省科技支撑计划(2014SZ0110)

作者简介: 田晴(1974-), 女, 高级工程师, 从事建筑结构抗震设计, (E-mail)405981484@qq.com。

潘毅(通讯作者), 男, 副教授, 博士生导师, (E-mail)panyi@home.swjtu.edu.cn。

比为 3.70,其建筑效果图如图 1 所示。

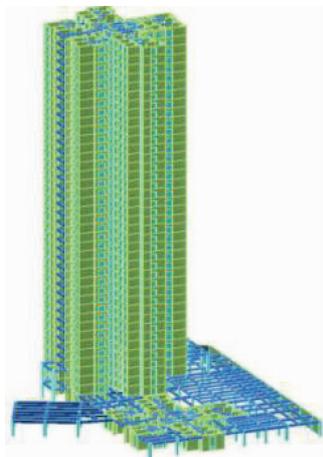


图 1 建筑效果图

该工程结构安全等级为二级,结构重要性系数为 1.0,设计使用年限为 50 年。地基基础设计等级为甲级,主楼部分采用筏板基础,选用圆砾层作为筏板持力层。抗震设防烈度为 8 度(0.20g),地震分组为第二组,建筑结构抗震设防类别为丙类,建筑场地类别为 II 类,地面粗糙度类别为 B 类,基本风压按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[1]取值为 0.45 kN/m²。

主体结构剪力墙的混凝土强度等级为 C30~C60,其中连梁的混凝土强度等级同剪力墙;梁、板混凝土强度等级为 C30。剪力墙厚度为:6 层楼面以下外墙 300 mm、内墙 200 mm,7 层以上外墙 250 mm、内墙 200 mm。连梁宽度同剪力墙厚,外围框架梁高度为 550 mm,砌体墙及飘窗处连梁高度为 1 000~1 200 mm,部分连梁采取设置对角暗撑或交叉斜筋配筋方式。

2 结构的超限情况及应对措施

2.1 结构超限情况及设计中存在的问题

1)高度超限:该工程结构高度为 118.87 m,由于 8 度区剪力墙结构最大适用高度为 100 m(A 级)和 130 m(B 级),所以该工程属 B 级高度超限高层结构。

2)平面尺寸不规则:平面凹凸尺寸在 X 和 Y 方向大于相应投影方向总尺寸的 30%,为凹凸不规则^[2]。

3)楼板开洞:因建筑功能设计要求,结构需在 2 层北侧楼板大开洞,此开洞导致了部分剪力墙在 1~3 层高度范围内平面外无侧向约束。

2.2 针对超限情况采取的结构措施

针对 2.1 中的超限情况及设计中存在的问题,并根据结构的重要性与业主要求,制定了相应的措施,以确保结构的经济、安全。措施如下:

1)结构布置上尽量做到抗侧力构件均匀对称布置,使结构刚心和质心基本一致,并满足刚度要求。保证竖向构件连续,剪力墙混凝土强度等级随房屋高度逐步降低,截面厚度逐步收进且避免和混凝土强度等级变化处于同一楼层,避免刚度突变。加厚周边剪力墙,使平面抗扭转刚度增大。加厚楼、电梯间开洞位置的楼板厚度,且该部分楼板采用双层双向通长配筋,并适当增大配筋率。严格控制剪力墙轴压比,使各层剪力墙轴压比均小于 0.5。

2)针对平面凹凸尺寸大于相应边长 30% 的情况,采取了增加连接部位板厚度、楼板钢筋双层双向通长布置、增大楼板配筋率等措施。

3)提高底部加强区竖向构件的抗震性能设计:中震抗剪不屈服^[3]。

4)对于底部商业与住宅局部错层部位剪力墙及框架柱,除按照中震抗剪不屈服外,抗震等级提高至特一级,控制剪力墙轴压比不超过 0.40。

5)采用动力弹塑性时程方法分析结构在罕遇地震作用下的性能,以了解结构在罕遇地震作用下的响应,找出结构的薄弱部位,进行针对性的加强。

3 模型的建立与地震波的选取

3.1 模型的建立

为分析该住宅在罕遇地震作用下的结构响应,本工程采用 Midas-Building 进行动力弹塑性分析。建立模型时,梁、柱采用塑性铰模型,其中钢筋混凝土构件采用修正武田三折线模型^[4]。剪力墙及其中的连梁采用纤维模型。楼板选用弹性膜,考虑楼板平面内有限刚度。

混凝土本构关系采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)^[5]附录 C 中的单轴受压应力-应变本构模型,如图 2 所示。 $\epsilon/\epsilon_c < 0.7$ 属于弹性状态(第 1 等级), $0.7 < \epsilon/\epsilon_c < 0.8$ 属于开裂状态(第 2 等级), $0.8 < \epsilon/\epsilon_c < 1$ 属于屈服状态(第 3 等级), $1 < \epsilon/\epsilon_c < 1.5$ 属于屈服后状态(第 4 等级), $\epsilon/\epsilon_c > 1.5$ 属于极限状态(第 5 等级)。

钢筋采用双折线模型,屈服前后的刚度不同,屈服后的刚度采用折减后的刚度,屈服后与屈服前的弹性模量比 $E_2/E_1 = 0.01$,无论屈服与否,卸载和重

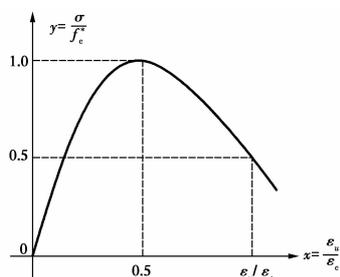


图 2 混凝土的本构模型

新加载时均使用弹性刚度^[6],其本构模型如图 3 所示。

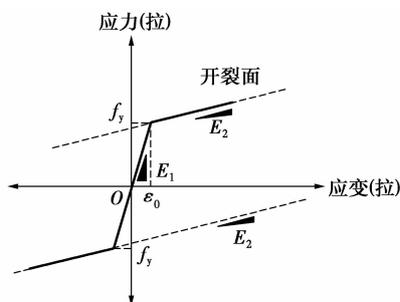


图 3 钢筋的本构模型

墙单元剪切本构关系采用理想弹塑性双折线模型^[7]。屈服前后刚度不同,屈服前卸载和重新加载时使用弹性刚度,屈服后卸载时指向原点,重新加载时使用卸载刚度重新加载,其本构模型如图 4 所示。第 1 等级($\epsilon/\epsilon_0=0.6$)和第 2 等级($\epsilon/\epsilon_0=0.8$)可认为是弹性状态,第 3 等级($\epsilon/\epsilon_0=1$)可认为是屈服状态,第 4 等级($\epsilon/\epsilon_0=2$)可认为是屈服后状态,第 5 等级($\epsilon/\epsilon_0=4$)可认为是极限状态^[8-9]。

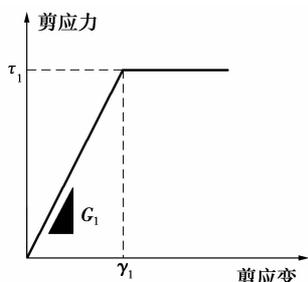


图 4 墙单元剪切的本构模型

3.2 模型的验证

应用有限元软件 Midas-Building 建立主体结构的数值模型,并进行计算分析,其分析结果与 PKPM 计算结果对比见表 1。由该表可知在结构总质量、周期、剪重比等方面误差较小,两模型基本是一致的,可采用 Midas-Building 建立的模型进行罕遇地

震下的弹塑性分析。

表 1 结构主要计算结果对比

计算结果	SATWE	MIDAS	误差/%
结构总质量 /t	47 021	47 485	0.97
第 1 周期 /s	2.680	2.591	3.43
第 2 周期 /s	2.589	2.498	3.64
第 3 周期 /s	1.872	1.793	4.40
X 向剪重比 /%	3.2	2.98	7.38
Y 向剪重比 /%	2.85	3.02	5.62

3.3 地震波的选取及输入

按照《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)^[10](以下简称《抗规》)中有关地震波选取的要求,选择 II 类场地上的 3 条地震波,天然波 TH003TG040、TH058TG040 和人工波 REN,3 条地震波加速度反应谱与规范反应谱的对比,如图 5 所示。由图 5 可知,在结构前 3 个主要周期 2.591 s、2.498 s 和 1.793 s 处,各地震波的加速度反应谱曲线与规范反应谱曲线相差不大于 20%,表明选取此三条地震波对结构进行动力弹塑性时程分析。根据《抗规》的要求,罕遇地震 8 度(0.2 g)时时程分析所用地震加速度时程的最大值 400 cm/s²,将上述地震波进行调整,并考虑双向地震作用 X:Y=1:0.85,输入有限元模型中进行分析。

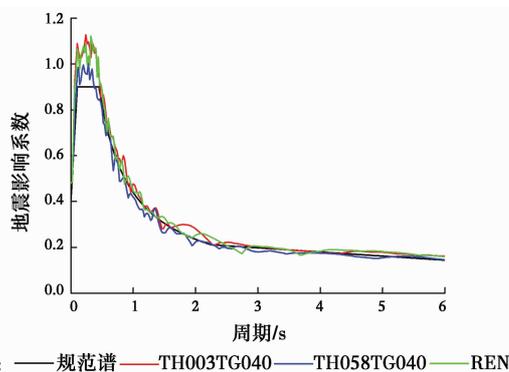


图 5 不同地震波加速度反应谱与标准反应谱的对比

4 动力弹塑性时程分析结果

4.1 塑性层间位移角

经计算分析,结构在罕遇地震下 X 向和 Y 向层间位移角如图 6 所示。由图可知,层间位移角曲线比较平滑,没有在第二层较薄弱处发生突变,说明超限设计的措施起到了一定的作用,避免了薄弱层的

产生。结构在 TH003TG040、TH058TG040 和 REN 作用下, X 方向最大层间位移角分别为 1/139、1/257、1/121, 包络值为 1/121, Y 方向最大层间位移角分别为 1/148、1/209、1/203, 包络值为 1/148, 两方向包络值均小于《抗规》中规定的 1/100, 说明结构满足“大震不倒”的设防目标。

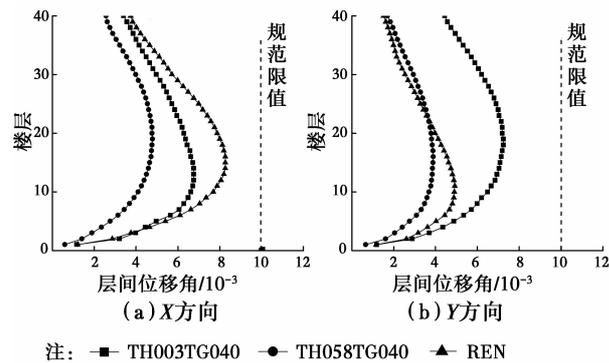


图 6 X 和 Y 方向的层间位移角

4.2 基底剪力

经计算分析, 结构在多遇、罕遇地震作用下基底剪力见表 2, 由表可知, 结构在三条地震动作用下, X、Y 向罕遇与多遇地震基底剪力比最大值为 3.28。在 8 度(0.2g)时, 时程分析所用地震加速度时程的最大值罕遇与多遇之比为 5.71, 比 3.28 大出很多, 表明结构在罕遇地震作用下基底剪力有减小的趋势, 结构塑性发展程度较为显著, 结构刚度下降较多, 地震波输入的能量被进入塑性阶段的构件有效地耗散。

表 2 结构的基底剪力

地震波名称	罕遇地震时		比值
	基底剪力/kN	多遇地震时 基底剪力/kN	
TH003TG040-X	41 520	18 264	2.27
TH003TG040-Y	38 579	15 796	2.44
TH058TG040-X	33 748	10 277	3.28
TH058TG040-Y	32 188	9 796	3.28
REN-X	53 588	19 356	2.77
REN-Y	38 236	16 748	2.28

4.3 楼层剪力

经计算分析, 结构在罕遇地震下楼层层剪力如图 7 所示。由图可以看出, 楼层层剪力曲线比较平滑, 结构无明显的薄弱层。

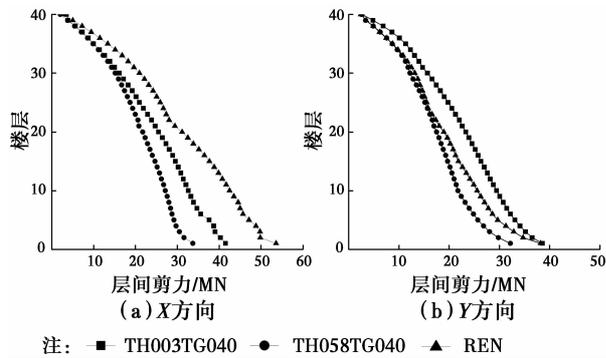


图 7 X 和 Y 方向的层间剪力

4.4 结构损伤情况

在罕遇地震作用下, 所选三条地震波的结构损伤比较类似。限于篇幅, 仅以 REN 波结算结果为例说明, 结构损伤如图 8 所示。由图 8(a)可知, 绝大部分连梁处于屈服状态, 只有小部分连梁处于开裂状态。由图 8(b)可知, 外部剪力墙破坏处于第一等级, 墙体未出现屈服损伤较轻; 结构总体有 12.6% 的剪力墙处于屈服状态, 21.8% 的剪力墙达到极限状态, 屈服或达到极限状态的部位主要集中在内部剪力墙的上部或底部。表明该结构破坏呈“梁铰破坏”机制, 遵守“强柱弱梁”的设计原则, 而且也不会引起局部倒塌和危及结构的整体安全, 满足“大震不倒”的设防要求。

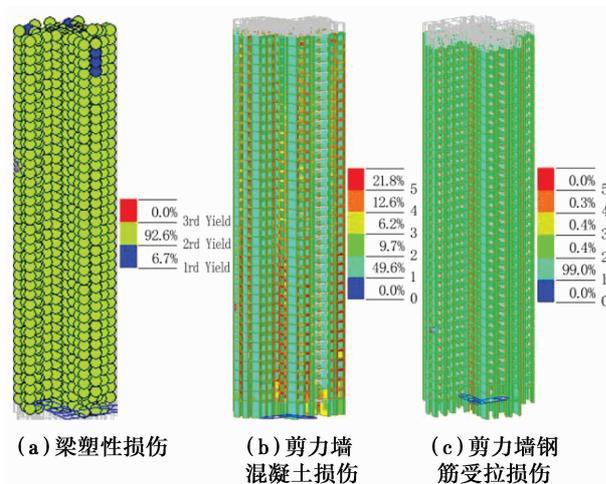


图 8 结构损伤情况

在罕遇地震作用过程中, 结构的失效模式可表现为: 结构首先在连梁薄弱部位出现塑性铰, 其损伤随着地震波输入的时间逐渐增加, 直至连梁达到屈服, 但其破坏程度有限, 且为耗能性较好的弯曲破坏。部分框架梁也会出现塑性铰并进入塑性损伤状态, 从而起到抗震耗能的作用, 但其塑性耗能程度有

限。外部剪力墙在整个过程中均未发生屈服,大部分剪力墙远未达到屈服状态,仍停留在较低的应变状态,说明剪力墙塑性变形均处于较低水平。地震波输入结束时,由于部分墙体在自重作用下轴压比很小,底部加强区少部分剪力墙出现受拉损伤,但未出现全截面进入屈服状态的现象,可以达到大震不屈服的要求。

5 结构的抗震性能评估及设计建议

5.1 抗震性能评估

1)由 Midas-Building 软件计算得出结构第一阶以 X 向为主的平动模态周期为 2.591 s,第三阶以扭转为主的模态周期为 1.793 s,其比值为 0.69,小于高规规定的 0.85,满足要求。

2)在罕遇地震作用下,结构最大层间位移角为 1/121,满足《抗规》规定的 1/100 的要求,结构可以达到“大震不倒”的设防目标。

3)在罕遇地震作用下,塑性铰首先出现在连梁和框架梁上,大部分连梁达到屈服状态,局部少数连梁处于开裂状态。从而表明结构耗能合理,避免或者减轻了下部主要承重结构的破坏。

4)罕遇地震,虽然部分剪力墙达到极限状态,但外部剪力墙钢筋和混凝土均未达到屈服状态,其塑性变形还处于较低水平,保持了良好的延性状态,满足抗规规定的结构在大震下基本运行的要求。

5.2 设计建议

1)增加薄弱部位的抗剪承载力,特别是增加剪力墙的抗剪承载力,推迟剪力墙塑性铰出现的时间,防止塑性变形过早的集中在薄弱层。

2)对于有楼板不连续的楼层,可以增加楼板的刚度,同时提高楼板配筋率;采取增加楼板的厚度或双层双向加强配筋,使每个方向的配筋率不小于 0.25%。

3)由于底部剪力墙损伤程度较大,可在底部加强区高度范围内提高剪力墙的竖向配筋率,降低混凝土剪力墙及框架柱的受拉损伤程度。

4)为减小剪力墙在大震作用下的受拉损伤,可在底部加强部位主要墙体中设置钢骨斜支撑,当大

震作用时墙体承受的水平地震力可由钢骨斜撑承担一部分。

6 结论

1)对于平面不规则的超限高层建筑,采取有效的抗震措施后,其整体抗震性能得到较大的提高,满足规范“大震不倒”的要求。

2)明显薄弱处通过底部加强具有足够的安全储备满足既定的抗震能力。

3)结构总体布置合理,抗震措施恰当,耗能合理符合结构抗震概念设计要求。

参考文献:

- [1] 中国工程建设标准化协会. 建筑结构荷载规范:GB 50009—2012 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [2] 中国建筑工业出版社. 高层建筑混凝土结构技术规程:JGJ3—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [3] 徐培福,戴国莹. 超限高层建筑结构基于性能抗震设计的研究[J]. 土木工程学报,2005,38(1): 1-10.
- [4] 北京迈达斯技术有限公司. 结构大师非线性分析手册 [M]. 北京:北京迈达斯技术有限公司,2010.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [6] 沈银良,王开华,戴雅萍,等. 张家港双子楼酒店式公寓塔楼动力弹塑性分析及施工模拟分析[J]. 建筑结构,2013,43(20):84-88.
- [7] 刘文锋,王金婷,唐剑维,等. 抗震能力曲线弹塑性双折线模型的确定方法[J]. 建筑结构,2015,45(4):14-17.
- [8] 徐志坚,杨超杰,吴继中,等. 中航资本大厦塔楼动力弹塑性分析[J]. 建筑结构,2016,46(1):38-43.
- [9] 潘毅,季晨龙,卢立恒,等. 地震动频谱特性对基础隔震结构双向地震响应的影响[J]. 土木工程学报,2013,46(5):50-55.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010 [S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.

(编辑 罗敏)