

卢一麟,尹凤霞,郭献洲.超限高层建筑结构抗震设计加强措施和建议——以某超限高层建筑为例[J].地震工程学报,2018,40(6):1252-1258. doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1252

LU Yilin, YIN Fengxia, GUO Xianzhou. Strengthening Measures and Suggestions for Seismic Design of Out-of-code High-rise Buildings: A Case Study[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2018, 40(6): 1252-1258. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1252

超限高层建筑结构抗震设计加强措施和建议 ——以某超限高层建筑为例

卢一麟¹, 尹凤霞¹, 郭献洲²

(1. 四川长江职业学院, 四川 成都 610000; 2. 河北工业大学, 天津 300401)

摘要: 为加强超限高层建筑结构的抗震性能,最大程度减小地震损失,以某一超限高层建筑为对象,对其结构抗震设计的加强措施和建议进行详细分析。在小震作用下运用 pkpm 软件 MIDAS/Building 对建筑结构进行弹性计算对比分析,证明弹性计算的可靠性;借用 SATWE 对结构在中震或大震作用下不同构件的承载力和截面进行验算;采用 midasbuilding 软件对该超限高层建筑进行罕遇地震作用下的静力弹塑性分析。根据不同震级下建筑结构线弹性分析结果,对建筑主体结构、结构抗震和地基基础进行加强设计,从中归纳出整体结构的抗震加强措施和建议,说明该超限结构能满足规范的设防要求,是安全可靠的。

关键词: 超限高层; 性能设计; 性能目标; 抗震设防

中图分类号: TU97; TU352

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2018)06-1252-07

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2018.06.1252

Strengthening Measures and Suggestions for Seismic Design of Out-of-code High-rise Buildings: A Case Study

LU Yilin¹, YIN Fengxia¹, GUO Xianzhou²

(1. Sichuan Changjiang Vocational College, Chengdu 610000, Sichuan, China;

2. Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: To improve the seismic performance of out-of-code high-rise buildings and minimize earthquake loss, in this work, we propose detailed measures and suggestions for strengthening the seismic design of a certain out-of-code high-rise building structure. Under the action of a small earthquake, we used the pkpm software MIDAS/Building to calculate the elastic properties of the building structure. We used the CAD program SATWE to check the bearing capacity and sections of different members during a moderate or strong earthquake, and midasbuilding software to conduct a static elastoplastic analysis of the high-rise building during rare earthquakes. Based on the results of our linear elastic analyses of the structure during earthquakes of different magnitude,

收稿日期: 2018-08-20

基金项目: 国家自然科学基金(11171087); 2017年四川省教育厅科研项目(18SA0249)

第一作者简介: 卢一麟(1988-), 男, 吉林人, 本科, 讲师, 工程师, 研究方向: 结构工程, 土木工程, BIM技术。

E-mail: littlelyl@163.com。

we strengthened the design of the main structure, the seismic structure, and the foundation of the building. We present a summary of the proposed seismic strengthening measures and make suggestions for the whole structure, by which the structure can meet the seismic fortification code requirements and be safe and reliable.

Keywords: out-of-code high-rise building; performance-based seismic design; performance objective; seismic fortification

0 引言

20 世纪末,美国、日本等地相继发生地震,当地的建筑物倒塌情况虽不太严重,人民的生命安全也没有受到过大的创伤,却对当地政府与人民造成了巨大的经济损失。为有效减少地震灾害对人民生命造成损失的同时也能有效减轻对政府经济、人民财产造成的损失,政府和学者们开始意识到性能设计对于建筑结构方面是十分必要的。美、日等国纷纷开展了广泛的结构性能研究,目的是通过建筑的抗震性能设计使建筑物不仅能保证人们的生命安全,还要限制结构在地震作用下的损坏限度,将地震后造成的损失限制在人们可预期的范围内^[1-2]。当前国际上的专家们对基于性能的抗震设计的关注程度越来越高,并且取得了较好的成果。

文献[3]对抗震设防烈度为Ⅷ度的高烈度地区、房屋高度接近 100 m、结构高宽比在 6~8 间的高层建筑结构进行了分析,为达到抗震性能设计要求,给出了具体的抗震构造加强措施,但该方法存在分析角度单一的问题;文献[4]针对高层建筑的薄弱抗震部位进行分析,采取了相应的加强措施,并提供相应建议以供参考,但该方法未对不同震级进行分析,无法很好地验证加强措施的可靠性;文献[5]提出对超限高层建筑抗震设计的重点应放在结构性能分析上,这样可以有效地规避地震造成的安全隐患,增加建筑抗震设计性能的可靠性,但研究过程中并未对建筑结构的动力学进行分析,导致设计结果不理想。

针对上述存在的问题,本文以某超限高层建筑为例,对建筑结构抗震设计进行深入分析,给出具体的结构抗震措施和建议。

1 超限高层建筑结构线弹性分析

1.1 工程结构

工程基地呈不规则的 L 型,地势平缓,地块区域南北尺寸为 295 m,东西尺寸为 83 m。该工程是一处集住宅、商业、办公为一体的商务中心。塔楼为 1 栋 149 m 高住宅,地面以上 47 层,地下 2 层。

以上述工程结构为基础,分别对多遇地震、设防烈度地震以及罕遇地震作用下的超限高层建筑结构力学性能进行分析。

1.2 多遇地震静力分析

按照高规的规定,本超限高层结构运用两种结构分析程序分别对模型进行计算,并对比论证计算结果。弹性阶段计算采用国内通用的设计软件 PK-PM 中的 SATWE(V2.2)作为结构设计计算的主要依据^[6],并采用北京迈达斯技术有限公司的 MIDAS/Building (2014R1)进行对比较核分析。

SATWE 程序计算的结果如表 1 所列。

(1) 弹性计算分析结果表明,本工程的控制工况为地震作用组合。

(2) 采用 SATWE 对结构进行多遇地震作用下静力弹性计算,并和 MIDAS/Building 计算结果进行对比。结果表明:二者在结构周期、位移、层剪力、刚度比等方面均较为接近,说明结构是合理有效的,弹性分析可靠;在小震作用下,超限高层结构基本都保持弹性,且配筋以及应力比结果都较为合理;构件的承载力、各项水平位移限值和舒适度均满足规范有关规定,且结构的位移、周期、刚度、剪力等参数均符合有关要求。在多遇地震作用下结构没有受到地震的破坏,可以继续使用,即结构在小震作用下能满足预期的性能目标。

(3) 根据规范要求,结构布置要尽量避免出现扭转,在考虑偶然偏心时,结构竖向构件的最大层水平位移(或最大层间位移)与相对应的平均值之比不宜大于 1.2,B 级高层不应大于 1.4。计算结果表明,本工程满足要求。

(4) 高规规定 B 级高度建筑周期比(扭转周期/第一平动周期)不得超过 0.85,本工程约为 0.6,符合高规相应规定。

(5) 规范要求抗震设计的剪力墙高层建筑结构抗侧刚度之比(本层/上层)不宜小于 0.9。程序结果显示本工程无结构薄弱层,均符合高规规定。

(6) 规范要求高层层间(本层/下层)抗侧力构

件抗剪承载力不小于 75%，结果表明，本工程的该项指标最小值为 0.99，符合规范的有关规定。

(7) 本结构计算的各工况中，结构最大弹性层

间位移角不大于(1/1 000)，符合高规的有关条文。

(8) 本结构刚重比满足规范关于结构整体稳定计算的规定，但要考虑 $P-\delta$ 效应。

表 1 SATWE 和 Madis/Building 弹性计算结果简表

Table 1 SATWE and Madis/Building elastic calculation results

计算内容		SATWE	MIDAS/Building	规范限值
周期/s	T_1	3.97(X)	3.68(Y)	
	T_2	3.52(Y)	3.24(X)	
	T_3	2.37	2.03	
	T_i/T_1	0.573	0.574	≤ 0.85
结构总质量/t		28 878	28 747	
地震作用下基底剪力	X	2 283	2 132	
	Y	2 310	2 250	
剪重比	X 向地震	1.44%	1.29%	SATEW 计算时,将地震放大,达到规范要求的 1.2%
	Y 向地震	1.55%	1.39%	
楼层最大层间位移角 (所在楼层)	X 向地震	1/1 111(27)	1/1 358(36)	1/600 根据《高规》3.7.3-2 款,高度在 150~250 m 的建筑按第 1 款和第 2 款线性插值
	Y 向地震	1/1 291(28)	1/1 667(30)	
	X 向风	1/1 813(33)	1/2 053(33)	
	Y 向风	1/1 816(33)	1/2 177(33)	
最大位移/层平均位移	X 向地震	1.23(1)	1.247(1)	宜 ≤ 1.2 ,应 ≤ 1.4 结果满足规范要求
	Y 向地震	1.14(1)	1.226(1)	
最大层间位移/平均层间位移	X 向地震	1.23(1)	1.247(1)	
	Y 向地震	1.14(1)	1.226(1)	
本层塔侧移刚度与上一层相应塔侧移刚度 90%、110% 或者 150% 的最小值	X 向	1.14	1.07	> 1 , 满足要求
	Y 向	1.14	1.02	
整体稳定验算(刚重比)	X 向	3.06	3.73	> 1.4 整体稳定; > 2.7 可不考虑重力二阶效应
	Y 向	3.73	1.68	
本层与上层抗剪承载力比值	X 向	0.99(13)	1.0(8)	不应 $< 75\%$ 的最小值
	Y 向	0.99(13)	1.0(8)	
结构抗倾覆(抗倾覆弯矩 M_r /倾覆弯矩 M_{ov})	X 向风荷载	29.67	30.42	> 1 表示无零应力区即全截面受压,计算结果
	Y 向风荷载	18.20	19.32	
	X 向地震	7.47	8.37	
	Y 向地震	5.30	5.80	
结构定点加速度 ($m \cdot s^{-2}$)	X 向顺风向	0.040	0.038	≤ 0.25 满足《高规》3.7.6 条规定
	X 向横风向	0.120	0.126 0	
	Y 向顺风向	0.044	0.048	
	Y 向横风向	0.120	0.160	

1.3 设防烈度地震(中震)作用下的等效弹性计算

针对本工程特点以及性能目标进行了设防烈度地震(中震)弹性设计和不屈服设计,具体的参数要求如表 2 所列。底层竖向构件布置及标准层结构布置如图 1 所示。

根据图 1 可知:在设防烈度地震(中震)作用下,底部加强区内的剪力墙和普通剪力墙正截面满足要求;其正截面受剪部分连梁和框架梁进入屈服阶段,但其受剪承载力满足规定,属于局部延性损坏,经一般修理可继续使用。结构在设防烈度地震(中震)作用下能达到预期的性能目标。中震等效弹性分析表明:关键构件和普通竖向构件及配筋相对合理,正截面满足中震不屈服,斜截面验算满足高规中震弹性

的规定;耗能构件(包括抗剪梁和连梁)抗剪承载力除个别构件外其他均满足高规中震不屈服的要求。底层剪力墙未发现偏心受拉,均受压。结构经中震等效弹性的方法分析所得最大层间位移角为:X 向为 1/338,Y 向为 1/374,层间位移变形值均不大于 3 倍弹性位移限值,符合规范规定。中震等效弹性计算方法结果表明结构能够达到性能目标 D 中水准 4 的要求,能达到“中震可修”的要求。

1.4 罕遇地震(大震)作用下的静力弹塑性结果分析

运用 MIDAS/Building 软件对结构进行静力弹塑性分析,考虑重力二阶效应^[7-8],依据安评报告结果大震 α_{max} 取为 0.378, $T_g = 0.55$ s,大震下性能点在 16 步。X 向和 Y 向 pushover 曲线如图 2 所示。

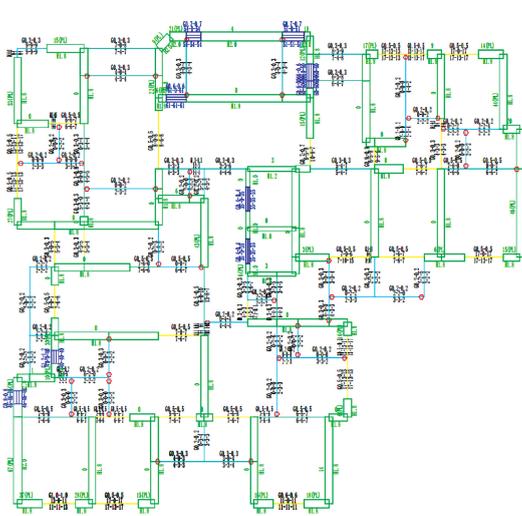
表 2 中震等效弹性设计要求

Table 2 Requirements for the equivalent elastic design under medium earthquakes

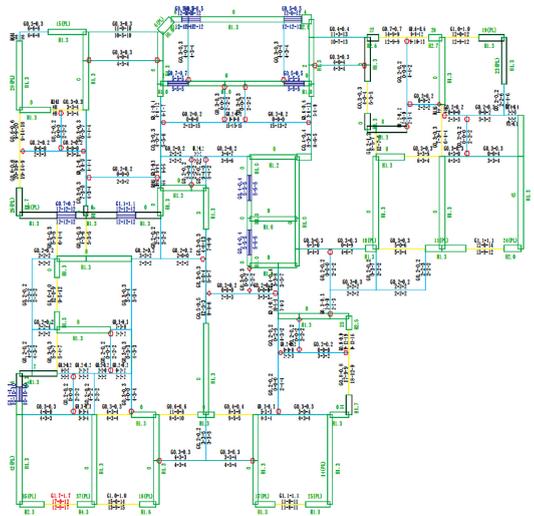
设计参数	中震弹性	中震不屈服
水平地震影响系数最大值	0.215	
场地特征值 T_g/s	0.45	0.45
阻尼比	0.06	0.05
连梁刚度折减系数	0.4	0.4
抗震等级相关调整系数	1.0	1.0
荷载分项系数	和多遇地震弹性分析相同	
地震内力调整系数	不调整	不调整
抗震承载力调整系数	同规范	1.0
材料强度	采用设计值	采用标准值
周期折减系数	1.0	1.0
风荷载计算	不计算	不计算
双向地震作用	不考虑	不考虑
偶然偏心	考虑	考虑
计算方法	等效弹性	等效弹性

结构构件预期目标

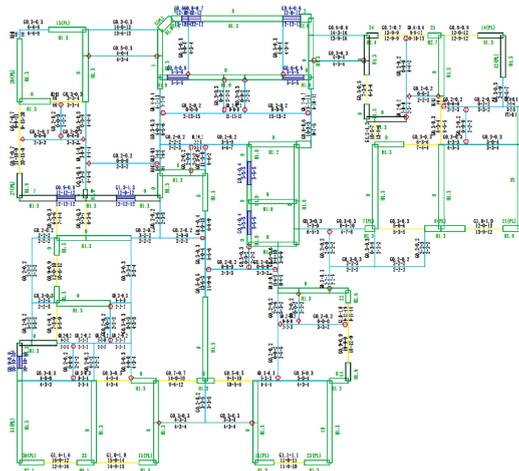
底部加强区剪力墙正截面承载力满足不屈服,框架梁、连梁等耗能构件受剪不屈服



(a) 下一层



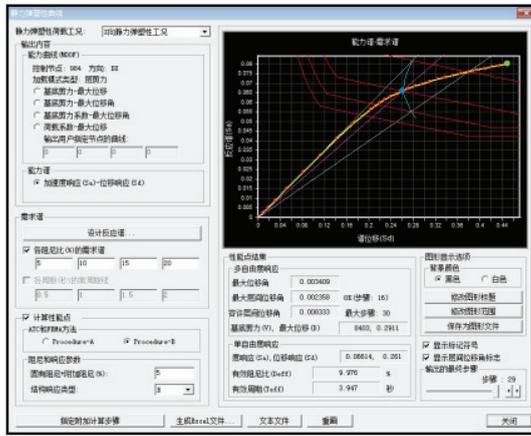
(b) 下二层



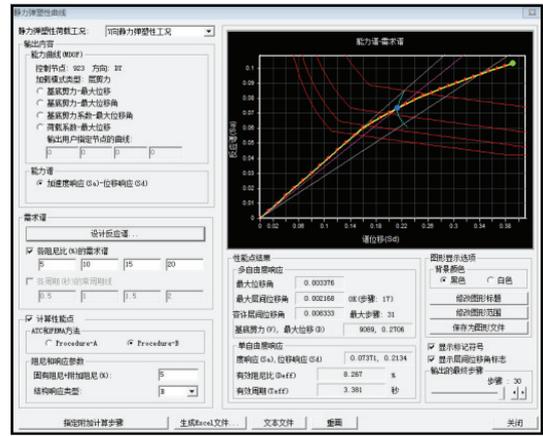
(c) 下三层

图 1 中震不屈服计算结果图

Fig.1 Unyielding calculation results under medium earthquakes



(a) X向



(b) Y向

图2 大震下的静力弹塑性曲线

Fig.2 Static elastoplastic curves under large earthquakes

由性能曲线可以看出, X 向层地震剪力工况下, 中震或大震中, 结构的能力谱与需求谱均存在交点, 即结构在 X 向层地震剪力工况存在性能点, 初步说明结构满足该工况的性能要求。由结构楼层剪力曲线可以看出, 曲线变化平滑, 不存在突变情况, 说明结构在 X 向层地震剪力推覆作用下无楼层发生大量构件屈服而形成剪力集中的情况。根据楼层层间位移角曲线可以看出, 本工程 X 向层地震剪力退覆作用下, 楼层层间位移角均小于设防地震层间位移角限值, 结果满足规范要求。Y 向层地震剪力工况下, 中震或大震中, 结构的能力谱与需求谱均存在交点, 即结构在 Y 向层地震剪力工况均存在性能点, 说明结构整体抗震能力满足该工况的能力需求。由结构楼层剪力曲线可以看出, 曲线变化平滑, 不存在突变情况, 说明结构在 Y 向层地震剪力推覆作用下无楼层发生大量构件屈服而形成剪力集中的情况。根据楼层层间位移角曲线可以看出, 本工程 Y 向层地震剪力下, 楼层层间位移角曲线均小于设防地震层间位移角限值。

X 向和 Y 向大震作用下框架梁和墙铰见图 2。框架铰: X 向层地震剪力推覆工况作用下, 性能点处各楼层框架梁塑性铰处于 B~IO 范围, 根据前述塑性损伤评价描述耗能构件处于基本完好状态, 与预估的设防地震作用下大震弹性相对应, 计算结果表明结构框架梁符合水准 4 的规定; Y 向层地震剪力推覆工况作用下, 性能点处各楼层框架梁塑性铰基本处于 B~IO 范围, 上部少数梁丧失承载力, 根据前述塑性损伤评价描述耗能构件处于基本完好状态, 与预估的设防地震作用下大震弹性相对应, 计算结果表明结构框架梁符合规定。墙铰: X 向层地震剪力推覆工况作用下, 性能点处各楼层大部分强连梁均出现塑性铰, 底

部、中部楼层墙体进入屈服状态, 关键构件处于弹性状态, 计算结果表明结构剪力墙均符合规定; Y 向层地震剪力推覆工况作用下, 性能点处剪力墙均未出现塑性铰, 即在设防地震作用下剪力墙完好无损, 计算结果表明结构剪力墙符合规定。

2 整体结构的抗震加强措施和建议

根据以上不同等级地震作用下的超限高层建筑结构力学性能分析结果, 对整体结构的抗震性能主要从以下几个方面进行加强设计。

2.1 主体结构设计

本项目地上 47 层(含避难层), 塔楼地上及地下楼面部分均采用双向布置的现浇钢筋混凝土梁板体系。楼板厚度 ≥ 100 mm, 屋面板 ≥ 120 mm, 外围框架梁截面高度取为 570 mm。本塔楼抗侧力体系采用剪力墙结构体系, 墙厚为 400~200 mm, 从下向上逐渐减小。均采用 HRB400 级热轧钢筋。混凝土等级如表 3 所列。混凝土耐久性分类: 地下室底板、外墙、有覆土的地下室顶板、其他和土壤直接接

表 3 楼层混凝土等级

Table 3 Concrete grade of different floor

部位	剪力墙混凝土强度等级	楼(屋)面梁、板混凝土强度等级
地下室基础~23.370	C60	
标高: 23.370~38.370	C55	
标高: 38.370~53.370	C50	
标高: 53.370~68.370	C45	
标高: 68.370~83.370	C40	
标高: 83.370~98.370	C35	
标高: 98.370 以上	C30	均为 C30

注: 侧墙宽度范围内的主楼剪力墙混凝土强度等级同侧墙, 但必须单独验算剪力墙的局部承压。

触的构件、水池、集水坑,处于 II 类环境的部分;其余部分处于 I 类环境。

2.2 结构抗震设计

本工程位于救灾道路边,设防类别应提高为乙类,设防烈度为 VI 度,按 VII 度确定抗震等级,地震动参数须根据小区划确定,塔楼结构安全等级为二级,抗震设防类别为乙类,地基基础设计等级为甲级,剪力墙为一级,框架梁为一级。

表 4 本工程楼面荷载

Table 4 Floor load of this project

楼面活荷载	活荷载/(kN·m ⁻²)	备注
客厅楼面	2.0	
卧室、书房	2.0	
阳台(厨房)	2.5(2.0)	
卫生间(下沉 400,无浴缸)	2.5	
卫生间(下沉 400,有浴缸)	4	
中庭走廊、楼梯、前室	3.5	
发电机房、热力站等设备用房、库房	10.0	
消防车道	20.0	
其他上人屋面	2.0	建筑做法、设备荷载另计
其他不上人屋面	0.5	建筑做法、设备荷载另计
避难层	3.5	

注:水箱及其他重大设备按实际荷载计算。

2.3 地基基础设计

依据某地勘工程提供的《某项目岩土工程勘察报告书》(详细勘察),本项目场地地质情况如下:拟建场地原为民宅及学校,勘查前大部已完成了拆除和整平工作,地面标高为 21.49~23.14 m,地势平坦,区域地貌属长江 I 级阶地^[12-13]。本场地在勘探深度范围内所分布的地层上部为杂填土(Q_{m1})及淤泥(Q₁),其下分别为第四系全新统冲积成因的黏性土和砂土(Q_{4¹})及冲洪积成因的砂夹卵砾石(Q_{4¹+pl})。下伏基岩为志留系中统坟头组(S_{2f})砂岩、砂质泥岩。

剪切波速 $v_s=167.5\sim 190.4$ m/s。根据《抗规》判断,本工程项目场地土为中软土。场地层厚度为 43.7~62.1 m,故场地类别为 II 类~III 类界限处,拟建场地按 III 类建筑场地采用。结合场地地基土成因及分布条件等判断,本场地为一般场地。根据地面脉动测试结果,场地附近卓越周期平均值为 0.32 s,依据标准贯入锤击试验结果判定本场地在 VII 度地震作用下不会产生液化。

抗压灌注桩采用 $\Phi 800$ 直径。地下室抗浮设计:场地地下水压力较大,本项目地下室拟使用 $\Phi 800$ 的灌注桩作为抗浮措施,单桩抗浮由桩身强度控制,根据桩身强度及(因底板位于层压水以下)0.3

基本风压值:0.35 kN/m²;计算承载力时风压取值:0.385 kN/m²(按基本风压的 1.1 倍采用);地面粗糙度为 D 类,因房屋密集,塔楼风荷载考虑建筑物直接的干扰,体型系数增大 1.1;舒适度验算时采用 10 年重新期的风压 0.25 kN/m²;按照《建筑结构荷载规范》考虑顺向和横向风振动的影响^[9-11];基本雪压值: $s_0=0.5$ kN/m²,坡屋面、高低屋面按规范考虑积雪分布系数。本工程楼面荷载列于表 4。

mm 裂缝宽度计算,单桩抗浮承载力特征值取为 550~1 800 kN。本项目基础设计等级为甲级,在桩基础工程桩开始施工前,要求静载荷试验和抗拔实验。本项目超高层建筑基础的设计等级为甲级,必须进行沉降计算。高层基础埋深:本工程地下室范围较大,塔楼的嵌固端设为地下室顶板。设计地下室的基础埋深时考虑其上高层建筑对基础埋深的要求。埋深计算(H 建筑高度,按室外-0.150 计算):桩基 $147/18=8.2$ m,塔楼埋深 13.9 m,满足要求。

综上所述,本文超限高层建筑结构抗震设计加强的具体措施和建议可归纳为:

(1) 用两个完全不同的结构设计和计算程序(PKPM 和 MIDAS/building)进行小震弹性分析,二者得出的结构整体参数基本一致,但局部有不同。设计人员进行具体的施工设计时应综合考虑不同软件的计算结果,按两种软件得到的最不利情况进行最终设计。

(2) 本工程底部剪力墙经过罕遇地震弹塑性分析容易出现抗弯屈服,是抗震薄弱环节,应采取加强措施。拟将底层剪力墙抗震构造措施按一级考虑,应提高剪力墙底部加强区墙体分布筋及约束边缘构件配筋率,且分布筋配筋率不小于 0.4%。

(3) 由于本工程高宽比较大,经过中震及大震

的分析表明沿结构周边墙体受力较为不利。对于此类剪力墙在底部加强区采用特一级构造,在非底部加强区采用一级构造。提高其配筋率和配箍率,按照中震弹性进行构件截面设计,保证其中震下处于弹性状态。

(4) 结构在中震作用下仅有部分连梁出现抗弯屈服,其他构件都处于弹性状态,能够实现规范“中震可修”的设防目标。特别是个别跨高比较小的连梁,可以设置暗撑或斜钢筋增加延性,以保证连梁不发生抗剪破坏。

(5) 由于本结构安评报告中提供的地震动参数等数据均高于规范的最低要求,故本工程初步设计根据地震安全性评价报告中所提供的地震参数进行,施工图设计阶段构件配筋也将根据安评提供的参数,偏于安全进行构件配筋设计。

(6) 由于大震下结构部分构件底部将出现偏拉,桩基及承台按大震受拉进行复核。

3 结论

鉴于经济的快速发展和建设需求,越来越多的超限高层建筑相继出现,对这些建筑的抗震性能进行增强具有重要意义。本文对超限高层建筑结构抗震设计加强措施和建议进行了具体分析,研究不同震级条件下的超限高层建筑结构的力学性能,以此为依据对建筑主体结构、结构抗震和地基基础进行了加强设计,总结得出结构抗震设计的加强措施和建议。

参考文献(References)

- [1] 黄跃斌.成都高新区超高层结构弹塑性分析及施工措施[J].低温建筑技术,2018,40(3):102-106.
HUANG Yuebin.Construction Measures and Pushover Analysis of Super High-rise Structure of Chengdu Hi-tech Zone[J].Low Temperature Architecture Technology,2018,40(3):102-106.
- [2] 朱贝贝.性能化抗震设计在镇江南徐超高层办公楼结构设计中的应用[J].结构工程师,2014,30(5):1-6.
ZHU Beibao.Application of Performance-based Seismic Design in Structural Design of an Ultra-high Office Building in Nanxu Zhengjiang[J].Structural Engineers,2014,30(5):1-6.
- [3] 薛美艳.某高宽比超限高层建筑的抗震设计[J].甘肃冶金,2016,38(5):123-125.

- XUE Fuyan.The Research About Seismic Design of High-rise Building Which Aspect Ratio Overlimit[J].Gansu Metallurgy,2016,38(5):123-125.
- [4] 王新妮,吴海波.钢筋混凝土建筑在连续震动下的壁板结构破坏程度分析[J].地震工程学报,2017,39(6):1018-1023.
WANG Xinni,WU Haibo.Damage Analysis of Panel Structures in Reinforced Concrete Buildings Subjected to Continuous Vibration[J].China Earthquake Engineering Journal,2017,39(6):1018-1023.
- [5] 张毅鹏.超限高层建筑结构基于性能抗震设计的研究[J].四川建材,2017,43(11):91-92.
ZHANG Yipeng.Study on Performance-based Seismic Design of High-rise Building Structures Beyond Limit[J].Sichuan Building Materials,2017,43(11):91-92.
- [6] WEI Yong,YUAN Yongbo,ZHANG Mingyuan,et al.The Elastic Analysis of a Super High-rise Building[J].Boletin Tecnico/Technical Bulletin,2017,55(4):619-631.
- [7] JIANG Huanjun,FU Bo,LIU Laoer.Seismic Performance Evaluation of a Steel-concrete Hybrid Frame-tube High-rise Building Structure [J]. Applied Mechanics and Materials,2012,137:149-153.
- [8] HUANG Yuan,SONG Xingyu,XU Fengbo.Dynamic Elastoplastic Time-history Analysis on a Super High-rise Building Structure of Anhui[J].Advanced Materials Research,2011,163:1955-1964.
- [9] DING J M,WU H L.Current Situation and Research of Structural Design for Super High-rise Buildings in China[J].IES Journal Part A:Civil and Structural Engineering,2014,7(2):114-120.
- [10] TAN Qian,LI Yingmin,WEI Junbiao,et al.Influence of Seismic Ground Motions with Different Frequency on Super High-rise Building Structural Seismic Response[J].Journal of Information and Computational Science,2015,12(5):1831-1843.
- [11] LU X,LU X,GUAN H,et al.Comparison and Selection of Ground Motion Intensity Measures for Seismic Design of Super High-Rise Buildings[J].Advances in Structural Engineering,2013,16(7):1249-1262.
- [12] YANG F F.Study on Seismic Design of Complex High-rise Building[J].Applied Mechanics & Materials,2014,584-586:1841-1844.
- [13] 许立强.混凝土高层建筑结构地震破坏抗毁能力评估[J].地震工程学报,2018,40(1):14-19,47.
XU Liqiang.Evaluation of Earthquake Damage and Anti-destruction Ability of Concrete High-rise Building Structures [J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(1):14-19,47.