

高层基础隔震结构基于性态的 抗震设防标准研究

刘娟¹ 马玉宏^{2*} 赵桂峰¹ 谭平² 罗佳润¹ 邹勤¹

(广州大学土木工程学院¹, 广州 510006; 广州大学工程抗震研究中心,

广东省地震工程与应用技术重点实验室², 广州 510405)

摘要 随着隔震技术的发展,将该技术应用于高层建筑得到了广泛的关注;其中高层基础隔震结构基于性态抗震设防标准的研究还不十分充分。参考国内外相关通则及规范,以及国内学者对于基础隔震结构基于性态的设计方法的研究,依据基于性态的抗震设计理论,结合高层结构的特点,提出了适合高层基础隔震结构的设防标准。主要从三个方面进行研究,包括高层基础隔震结构的功能分类、性态目标及抗震设计类别;将高层基础隔震结构的性态分为五个水准:充分运行、运行、基本运行、生命安全、接近倒塌;最后将高层基础隔震结构的设防目标进行量化,为高层隔震结构的抗震设计提供了参考。

关键词 高层隔震 性态水准 性态目标 抗震设防

中图法分类号 TU972.11 P315.9; **文献标志码** A

近年来,全球大中城市发生了多次破坏性地震,如1994年美国贝岭地震、1995年的日本阪神地震、我国2008汶川地震及2013年雅安地震等,均造成了严重的人员伤亡和经济损失。在以往的国际抗震设计方法中,发生大地震时,第一要求是确保人身安全,允许建筑结构在一定程度内发生损坏,但应防止倒塌。但震后,虽然保障了人员安全,结构往往损坏程度较大;修复或拆除费用较大,因此业主常希望能达到更高的设防目标^[1]。在20世纪90年代,美国以V. V. Bertero博士和R. Sharpe博士为核心编写的Vision2000中首先提出了基于性态的抗震设计方法^[2],逐步被各国学者所接受。

隔震技术作为一种有效的减震方法在我国被

广泛应用于中低层建筑中。随着隔震技术的发展及隔震设计理论的逐步完善,隔震技术已被应用到高层建筑中。当前,为了解决人口与土地资源的矛盾,高层建筑已成为社会发展的趋势,基础隔震在高层中的应用将有广阔的发展前景。但是,目前高层隔震结构基于性态的抗震设防还处于研究阶段,对于高层隔震结构的性态水准和设防目标还没有明确的划分,缺少描述其性态参数及评价标准的量化指标。本文参考国内外相关通则及规范,以及国内学者对于基础隔震结构基于性态设计方法的研究成果,对高层隔震结构基于性态的抗震设防标准进行了初步研究。

1 高层基础隔震结构的使用功能分类

参考相关规范及标准^[3,4]中对一般建筑的功能分类方法,仅考虑高层隔震建筑的使用功能,不考虑高层隔震结构的经济、政治影响,本文将高层隔震结构按使用功能分为如下三类。

第Ⅰ类:地震发生时或地震后其使用功能不能中断,或存放有毒物品、放射性物品的高层隔震建筑,一旦因地震作用导致这些物品的释放和外逸会给公众造成不可接受的危害。

2013年5月15日收到 十二五国家科技支撑计划项目
(2012BAJ07B02)、国家重点基础研究发展计划973项目

(2012CB723304)资助

第一作者简介:刘娟(1988—),女,汉族,黑龙江省安达人,硕士研究生。研究方向:结构工程防震减灾。E-mail: liujuan_2196@126.com。

*通信作者简介:马玉宏,女,汉族,黑龙江省穆稜人,博士,研究员。研究方向:防震减灾、结构振动控制等。

第Ⅱ类:地震后其使用功能必须在短时间内恢复,或对震后运行起关键作用的高层隔震建筑,或人口密集的高层隔震建筑,如医院、学校、通讯中心等。

第Ⅲ类:除Ⅰ、Ⅱ以外的其他高层隔震建筑。主要指普通商用建筑。也是本文主要研究的类别。

2 高层基础隔震结构性态目标的确定

性态目标是指在一定超越概率的地震发生时,业主希望建筑结构所能达到的性态水准。我国《建筑抗震设计规范(GB 50001—2010)》中规定的抗震设防目标为“小震不坏,中震可修,大震不倒”,但随着经济的发展、人们生活水平的提高,业主对建筑居住的舒适性及安全性的要求也随之提高。具有良好减震效果的隔震结构,能够提高建筑物的抗震安全性。因此,仍然采用抗震规范中规定的设防目标,显然没有体现隔震结构的优越性。本文通过综合考虑隔震层、上部结构及附属机电设备三部分的性态表现,将高层基础隔震结构划分为五个等级的设防水平:充分运行、运行、基本运行、生命安全、接近倒塌。具体的破坏状态及性能描述如下:

(1)充分运行:隔震装置无损伤、正常运行,其力学性能不受影响;上部结构完好,非承重构件及承重构件均无损伤;附属机电设备外观完好,不影响正常使用和防火能力,应急系统正常使用;居住安全无不快感。

(2)运行:隔震层基本功能不受影响,隔震装置受轻微损伤,无需修理仍可继续使用;上部结构完好,承重构件完好,非承重构件出现轻微损伤,室内设施、物品不受损伤;附属机电设备外观轻微损坏,但不影响防火能力,应急系统正常使用;建筑物正常居住,人员安全,但有轻微不快感。

(3)基本运行:隔震层基本功能轻度受扰,少数隔震装置发生破坏,但经一般修理仍可继续使用;上部结构轻微受损,承重构件基本完好,非承重构件允许发生破坏,经过检修可以继续使用,室内设施、物品错位、翻倒等轻微破坏;附属机电设备经一般修理很快恢复使用,耐火时间减少 $1/4$,使用系统检修后运行,应急系统可照常使用;室内人员舒适

度较差,但基本能够行走。

(4)生命安全:隔震层功能严重受到影响,部分隔震装置发生断裂、失稳现象,但隔震层的整体承载力仍然能保证结构安全;上部结构发生中度受损,承重构件允许产生轻微损伤,非承重构件发生破坏,需要修理后才能使用,室内设施、物品发生翻倒、滑落等中度破坏;附属机电设备耐火时间明显减少,使用系统明显损坏,需修理后才能恢复功能,应急系统受损但仍可使用;室内人员无法正常工作,但能够安全疏散。

(5)接近倒塌:隔震层功能基本丧失,隔震层位移超过允许限值,大部分隔震装置被拉断或滚翻而导致整体失稳,上部结构发生严重损伤,承重构件受损严重,基本失去使用功能,室内设施、物品发生严重破坏;附属机电设备使用功能及应急系统均无法正常使用。

《建筑抗震设计规范 GB 50011—2010》中 12.1.3 条规定,建筑采用隔震设计时,结构的高宽比宜小于 4,但随着研究的深入,隔震理论及技术的完善,对于高宽比限值可以适当放宽,因此,参考《高层建筑混凝土结构技术规程 JGJ 3—2010》中关于高层高宽比限值的规定,本文将重点进行研究的第Ⅲ类高层隔震建筑按照高宽比进一步划分成三类:高宽比小于 4 的高层隔震结构,高宽比在 4~6 之间的高层隔震结构,高宽比在 6~8 之间的高层隔震结构。隔震结构具有良好的减震效果,应具备更高的性态目标,综合考虑以上分析,参考国内外相关规范^[5,6]及国内学者对隔震结构性能水准划分的研究成果^[7],本文给出了高层基础隔震结构在不同超越概率的地震作用下所能达到的最低性态目标的建议,见表 1。

表 1 中,水准 1~5 分别对应:充分运行、运行、基本运行、生命安全、接近倒塌。综合分析,可把高层隔震结构的性态目标总结为:“中震不坏,大震可修,超大震保证生命安全”,即:在设防烈度地震作用下,建筑结构不发生损坏,或发生轻微损坏,无需修理仍可继续使用;在罕遇地震作用下,建筑结构发生破坏,但经一般修理仍可继续使用;在超罕遇地震下,建筑结构发生严重破坏,但是能确保人员

安全疏散,保证生命安全。对于高宽比在 6~8 之间的高层隔震结构应慎重对其进行抗拉和抗倾覆验算。

表 1 高层基础隔震结构各级地震动水平下的最低抗震性态目标

设防地震动水平	高层隔震结构的使用功能类别				
	Ⅰ类	Ⅱ类	Ⅲ类		
			$6\leq H/B<8$	$4\leq H/B<6$	$H/B<4$
多遇地震 (TMJ 年超越 概率 63%)	水准 1	水准 1	水准 1	水准 1	水准 1
设防烈度地震 (TMJ 年超越 概率 10%)	水准 1	水准 1 或 水准 2	水准 2	水准 1 或 水准 2	水准 1
罕遇地震 (TMJ 年超越概 率 2%~3%)	水准 2	水准 3	水准 3	水准 3	水准 2
超罕遇地震 (TMJ 年超越 概率 1%)	水准 3 或水准 4	水准 4	水准 4 或水准 5	水准 4	水准 3 或水准 4

表 1 中, TMJ 是根据建筑物的使用功能类别所设定的设计基准期,根据设计基准期和给定的地震超越概率,可以确定建筑物的设计地震动参数。由于隔震结构具有良好的减震效果,且隔震装置的设计工作寿命不应低于上部结构的设计寿命,一般大于 50 年^[8],因此隔震结构的设计基准期可以高于非隔震结构,本文参考相关文献,将不同使用功能的高层隔震结构的设计基准期定为:Ⅰ类高层隔震结构取 $TMJ=100$ 年,Ⅱ类高层隔震结构取 $TMJ=80$ 年,Ⅲ类高层隔震结构取 $TMJ=50$ 年^[9]。

为了方便理解和使用,本文采用如下公式^[10],将隔震结构不同设计基准期的设防地震超越概率转算成 50 年基准期的相当超越概率,见表 2。

$$P'_{50} = 1 - (1 - P)^{\frac{50}{TL}}$$

式中, P'_{50} 为 50 年基准期下的相当超越概率, P 为 TMJ 年内的超越概率, TL 为设计基准期。

由表 2 可见,强度大的地震出现的超越概率低,Ⅲ类建筑则是目前采用的普通建筑的超越概率。

3 高层隔震结构的抗震设计类别

高层隔震结构的抗震设计类别是指:根据设计

地震动参数和高层隔震结构不同的使用功能要求,在设计过程中为了达到预期的性态目标,所需采取的措施和设计方法。依据以上分析,本文参考相关文献及规范将高层隔震结构分为四个抗震设计类别^[3,8,11,12],并给出了重点研究的第Ⅲ类高层隔震结构的抗震设计类别分档建议,见表 3。

表 2 设计基准期不同的三类建筑不同地震动水准的相当超越概率

设计地震动水平	TMJ 年内的超越 概率 P	相当于 50 年内的超越概率 P''		
		Ⅰ类 ($TMJ=100$ 年)	Ⅱ类 ($TMJ=80$ 年)	Ⅲ类 ($TMJ=50$ 年)
多遇地震	63%	39.2%	46.3%	63%
设防地震	10%	5.1%	6.4%	10%
罕遇地震	2%~3%	1%~1.5%	1.25%~1.9%	2%~3%
超罕遇地震	1%	0.5%	0.63%	1%

抗震设计类别 A 类:隔震支座的压应力控制在 12~15 MPa,各别隔震支座产生拉应力,拉应力控制在 1.2 N/mm² 以下,隔震层在两个主轴方向的偏心率控制在 2%~3%,上部结构的抗震措施按非隔震结构的抗震措施来设计;上部结构采用简化模型,进行弹性分析;抗风按与非隔震结构相同进行设计。

表 3 高层隔震结构抗震设计类别分档建议

设防烈度下 设计地震动加速 度值 A(g) 及相应烈度	高层隔震 使用功能分类		Ⅲ类		
	Ⅰ类	Ⅱ类			
			$6\leq H/B<8$	$4\leq H/B<6$	$H/B<4$
$A\leq 0.15$ [6 度以下]	A	A	A	A	A
$0.05 < A\leq 0.15$ [6~7 度]	B	B	B	B	B
$0.15 < A\leq 0.30$ [7~8 度]	C	C	C	C	C
$0.30 < A\leq 0.40$ [8~9 度]	D	D	D	D	C

抗震设计类别 B 类:隔震支座的压应力控制在 10~12 MPa,各别隔震支座产生拉应力,拉应力控制在 1.0 N/mm² 以下,隔震层在两个主轴方向的偏心率控制在 1.5%~2%,上部结构的抗震措施:当减震系数小于 0.4 时按比非隔震结构降半度的抗震措施来设计,当减震系数大于 0.4 时,按非隔震结构的抗震措施来设计;上部结构采用简化模型,进行弹性分析;抗风按与非隔震结构相同进行设计。

表 4 高层基础隔震结构的性态指标建议值

破坏等级	充分运行	运行	基本运行	生命安全	接近倒塌
破坏指标					
层间位移角	$\leq 1/600$	$1/600 \sim 1/350$	$1/350 \sim 1/200$	$1/200 \sim 1/100$	$\geq 1/100$
最大楼层加速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-2})$	≤ 10	$10 \sim 200$	$200 \sim 1\,000$	$1\,000 \sim 5\,000$	$> 5\,000$

抗震设计类别 C 类:隔震支座的压应力控制在 8~10 MPa,不允许隔震支座产生拉应力,隔震层在两个主轴方向的偏心率控制在 1.5% 以下,上部结构的抗震措施:当减震系数小于 0.4 时按比非隔震结构降一度的抗震措施来设计,当减震系数大于 0.4 时,按比非隔震结构降半度的抗震措施来设计;上部结构采用简化模型,进行弹性分析;需要对隔震房屋进行抗倾覆验算;隔震结构宜建在中硬土或硬土地地上;抗风按与非隔震结构相同进行设计,同时考虑扭转风振的影响。

抗震设计类别 D 类:隔震支座的压应力控制在 8~10 MPa,不允许隔震支座产生拉应力,隔震层在两个主轴方向的偏心率控制在 1.5% 以下,上部结构抗震措施按非隔震结构抗震措施来设计;上部结构采用简化模型,进行弹塑性分析;需要对隔震房屋进行抗倾覆验算;隔震结构宜建在硬土地地上;抗风按与非隔震结构相同进行设计,同时考虑扭转风振的影响。

当结构遭遇超烈度地震时,其抗震设计类别不应低于 D 类,并同时可以根据实际情况适当提高其结构的抗震措施。

4 高层隔震结构性态水准的量化指标

第 3 节对高层隔震结构的性态水准及目标进行了定性的划分及描述,但对于实际工程来讲,量化指标更方便设计人员参考使用。层间位移角考虑了层高的影响,能够反映建筑结构层间构件的变形,且能较好地反映结构的破坏程度,因此对于高层隔震结构本文采用层间位移角作为量化指标,具体取值参见表 4。考虑到人体对居住舒适度的要求,本文在以层间位移角作为量化指标的基础上,同时采用了最大楼层加速度来作为高层隔震结构的量化指标^[12],具体参见表 4。

5 结论

随着隔震技术理论的推广及完善,隔震技术不仅在中低层中有较好的应用,也逐步被应用到高层结构中,本文对高层隔震结构的性态水准及目标进行研究,分析成果如下。

(1)提出了适合高层隔震结构的性态水平,并将其分成五类:充分运行、运行、基本运行、生命安全、接近倒塌,并对每类性态水平的破坏状态进行了详细描述。

(2)基于不同的性态水平,给出了对于高层隔震结构在各级地震动水平下的最低抗震性态目标。

(3)将所有高层隔震结构按照使用功能划分成三类,并将其中的第Ⅲ类高层隔震结构根据高宽比进行了细分,同时给出了高层隔震结构抗震设计类别的建议分档。

(4)给出了高层隔震结构在不同性态水准下的量化指标建议值。

从性态的角度对高层隔震结构进行分析,有助于业主了解高层隔震结构的不同性态水准,使其能够更好地选择其性态目标,同时对于高层隔震结构的应用具有一定的推广作用。

参 考 文 献

1 日本地震工学会. 基于性能的抗震设计(现状与课题). 王雪婷译. 北京:中国建筑工业出版社,2012

2 Structure Engineers Association of California; Vision 2000, Performance based seismic engineering of buildings, 2000

3 中国建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程(JGJ 3—2010). 北京:中国建筑工业出版社,2010

4 中国建设部. 建筑工程抗震设防分类标准(GB 50223—2008). 北京:中国建筑工业出版社,2008

5 中国建设部. 建筑抗震设计规范(GB 50011—2010). 北京:中国建筑工业出版社,2010

6 ATC—40. Seismic evaluation and retrofit of concrete building. Applied Technology Council. Red Wood City, California,1996

7 刘鹏飞,刘伟庆. 基础隔震结构的性能水准与设防目标. 工程震
动与加固改造,2008;12:55—59

10 马玉宏. 基于性态的三环节抗震设防方法研究. 博士后研究工
作报告. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2003

8 广州大学,中国建筑科学研究院. 叠层橡胶支座隔震技术规程.
北京:2001

11 李宏男. 橡胶垫隔震支座结构高宽比限值研究. 建筑结构学报,
2003;24(2):14—19

9 谢礼立, 马玉宏. 基于抗震性态的设防标准研究. 地震学报,
2002; 24(2):200—209

12 陈瑞海. 隔震结构体系全寿命总费用评估模型研究. 广州:广
州大学,2011

Research on Performance-based Seismic Design for
High-rise Base-isolated Structure

LIU Juan¹, MA Yu-hong^{2*}, ZHAO Gui-feng¹, TAN Ping², LUO Jia-run¹, ZOU Qin¹
(School of Civil Engineering,Guangzhou University¹,Guangzhou 510006,P. R. China;
Earthquake Engineering Research & Test Center,Guangzhou University²,Guangzhou 510405,P. R. China)

[Abstract] With the development of the base-isolated structure, high-rise base-isolated structure has been widely concerned. Research about performance-based seismic design of high-rise base-isolated structure is not enough. Some relevant rules or regulations home and abroad and research about performance-based seismic design of base-isolated structure are referenced, considering the characteristic of high-rise structure, on the basis of performance-based seismic design theory, come up with the rational seismic design criteria of high-rise base-isolated structure. The main content is compose of three components, namely functional category of high-rise base-isolated structure, the performance objective and classification of seismic design for high-rise base-isolated structure. The performance of high-rise base-isolated structure is classified as three levels: fully run, run, basic run, safety of life and close to collapse. Finally, the fortification objects of high-rise base-isolated structure are quantified as well, and some meaningful references are provided for seismic design of high-rise base-isolated structure.

[Key words] high-rise base-isolation performance levels performance objective seismic design