

谭佳俊, 谭平, 吴玖荣, 等. 百米级高层隔震结构一体化设计及风振舒适度评估研究[J]. 华南地震, 2022, 42(2): 84-92. [TAN Jiajun, TAN Ping, WU Jiurong, et al. Integrated Isolation Design and Wind Vibration Comfort Evaluation of 100-m-level High-rise Seismically Isolated Structure[J]. South China Journal of seismology, 2022, 42(2): 84-92]

百米级高层隔震结构一体化设计 及风振舒适度评估研究

谭佳俊^{1, 2}, 谭平^{1, 2}, 吴玖荣^{1, 3}, 冯德民⁴

(1. 广州大学 土木工程学院, 广州 510006; 2. 广州大学 工程抗震减震与结构安全教育部重点实验室, 广州 510006;
3. 广州大学 风工程与工程振动研究中心, 广州 510006; 4. 藤田技术研究中心, 厚木 243-0125)

摘要:《建筑隔震设计标准》(后简称《隔标》)是我国第一部专门指导隔震设计的国家级标准。由于目前基于新规范完成隔震设计的实际工程较少, 尤其是百米级高层隔震结构在我国还尚属少见, 为此针对某百米级住宅公寓楼实际工程展开研究, 根据《隔标》完成隔震设计, 并从经济性的角度出发, 对比了一体化直接设计法与传统分部隔震设计法的配筋结果; 最后结合现行规范对高层隔震结构的风振舒适度进行了评估。研究表明: 一体化直接设计方法在显著提升隔震结构安全的同时还具有较好的经济性, 即使隔震结构设防目标由小震提升至中震, 即地震作用提升约3倍的前提下, 该高层隔震结构总用钢量的增加仍控制在15%以内; 百米级高层隔震结构在1年、10年风荷载作用下均出现了舒适度问题, 最大风振加速度响应分别达到了10.3 gal和18.0 gal, 超出规范限值71.7%和20%, 在未来的隔震结构抗风设计中, 高层隔震结构的风振舒适度问题应引起足够重视。

关键词: 高层隔震结构; 隔震设计; 经济性; 数值模拟; 风振舒适度

中图分类号: TU352.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2022)02-0084-09

DOI: 10.13512/j.hndz.2022.02.12

Integrated Isolation Design and Wind Vibration Comfort Evaluation of 100-m-level High-rise Seismically Isolated Structure

TAN Jiajun^{1,2}, TAN Ping^{1,2}, WU Jiurong^{1,3}, FENG Demin⁴

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Key Laboratory of Earthquake Resistance Earthquake Mitigation and Structural Safety of the Ministry of Education, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 3. Research Center for Wind Engineering and Engineering Vibration, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 4. Technology Department Division of Fujita, Atsugi 243-0125, Japan)

收稿日期: 2022-01-10

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFE0112500); 国家自然科学基金项目(51978185); 教育部创新团队发展计划(IRT13057)联合资助。

作者简介: 谭佳俊(1999-), 男, 硕士研究生, 主要从事结构隔震方面研究。

E-mail: 2112016035@e.gzhu.edu.cn

通信作者: 谭平(1973-), 男, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事结构隔震与减震控制研究。

E-mail: ptan@gzhu.edu.cn

Abstract: "Standard for seismic isolation design of buildings" is the first national standard to guide isolation design in China. At present, there are few practical projects to complete the isolation design based on the new code, especially the 100-m-level high-rise seismically isolated structure is rare in China. Therefore, this paper studies the actual project of a 100 m residential apartment building, completes the isolation design according to the "Standard for seismic isolation design of buildings", and compares the reinforcement results of integrated direct design method and traditional divisional design method from the perspective of economy; finally, combined with the current code, the wind-induced vibration comfort of high-rise seismically isolated structure is evaluated. The results show that the integrated direct design method not only significantly improves the safety of the seismically isolated structure, but also has good economy. Even if the fortification target of the seismically isolated structure is raised from small earthquake to medium earthquake, that is, the seismic action is increased by about 3 times, the increase of the total steel consumption of the high-rise isolated structure is still controlled within 15%; the comfort problem of 100-m-level high-rise seismically isolated structure under 1-year and 10-year wind load occurs, and the maximum wind-induced acceleration response reaches 10.3 gal and 18.0 gal respectively, which exceeds the code limit by 71.7% and 20%. In the future wind resistant design of isolated structures, enough attention should be paid to the wind-induced vibration comfort of high-rise seismically isolated structure.

Keywords: High-rise seismically isolated structure; Seismic isolation design; Economy; Numerical simulation; Wind vibration comfort

0 引言

隔震技术^[1]是一种结构减震的被动控制技术,因其具有显著的减震效果,已被我国列入《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010^[2](后文简称《抗规》)中,并成功经受了实际地震(芦山地震等)的考验。近二三十年来,随着我国理论研究和实际经验的不断积累,隔震技术进入了新发展阶段。据不完全统计,我国目前已有超过一万栋的隔震建筑,且这一数量仍在不断增加。新发展阶段对隔震设计方法提出了更高的要求。

《抗规》规定的分部设计法,需要分别计算隔震结构与抗震结构在中震作用下的层剪力和层弯矩,通过最大比值得到减震系数,再对抗震结构进行减震后的小震设计,其本质仍是抗震设计,且设计过程较为繁琐。而在时程分析时,由于选取的地震波较难同时兼顾隔震结构和抗震结构,也会造成设计结果的不准确。此外相关研究发现^[3-8],隔震结构由于隔震层与上部结构耗能特性的差异,属于典型的非比例阻尼结构,采用振型分解反应谱法对其进行强制解耦是不合理的,会造成结果出现较大误差。

为了解决传统分部设计法存在的不足,以便于隔震技术更好地推广应用。许多科研人员开展了相关研究工作:周锡元等^[9]提出了复振型分解法以及CCQC振型组合规则;蔡婷等^[10]研究发现,采用复

模态叠加反应谱的方法求解巨子结构比传统强制解耦的方法更准确。陈华霆、谭平等^[11-13]基于复振型叠加以理论,推导出复振型截断误差的公式,并提出静力修正的方法改进误差。通过推导误差估计公式,得到了确定振型数目的更优方法。同时通过优化复振型叠加法,提出了考虑高阶振型影响的复模态分解反应谱方法。陈华霆、谭平等^[14]还分别采用振型分解反应谱法,复振型分解反应谱法以及时程分析法对Benchmark模型进行求解。结果表明,当隔震层阻尼比超过10%时,采用振型分解反应谱法进行强制解耦无法满足计算精度的要求,且隔震层阻尼比越大,强制解耦的误差也越大。同时,振型分解反应谱法采用强制解耦会高估上部结构的阻尼耗能而造成计算结果偏小,是偏不安全的。上述研究工作有力地推动了隔震设计方法的发展,于2021年9月,我国第一部专门指导隔震设计的国家级标准《建筑隔震设计标准》GB/T 51408-2021^[15](后文简称《隔标》)正式颁布,其中新规范推行的一体化直接设计方法正是以复振型分解方法和CCQC振型组合规则作为核心理论。

由于目前基于新规范完成隔震设计的工程较少,尤其是百米级高层隔震结构在我国还尚属少见,为此本文针对某百米级住宅公寓楼实际工程展开研究。首先简要介绍《隔标》中具有代表性的创新点;根据《隔标》完成百米级高层隔震结构的隔震设计,并从经济性的角度出发,对比一体化直接

设计法与传统分部设计法、传统抗震设计法的配筋结果；最后结合现行规范，对高层隔震结构在不同重现期风荷载作用下的风振舒适度进行评估。上述研究对于未来更好地推广隔震设计标准以及完善高层隔震结构抗风设计有着重要意义。

1 《隔标》主要创新点

《隔标》的主要创新点^[16]可概括为四个方面：

(1)在设防目标上。传统隔震设计采用的分部设计法是基于小震进行设计，满足“小震不坏、中震可修、大震不倒”的三水准设防要求。而为了满足新发展阶段对建筑抗震性能提出的更高要求，《隔标》将设防目标提升为“中震不坏、大震可修、巨震不倒”。

(2)在设计反应谱上。由于隔震结构的周期较长，而抗震设计反应谱在长周期区段的取值偏小，因此《隔标》选择将抗震设计反应谱的第三段“指数下降段”延长至6 s，代替了第四段“直线下降段”。设计反应谱的变化见图1。同时在针对不同隔震结构进行设计时，隔震设计反应谱需要根据隔震层经过迭代后的等效阻尼比进行修正。

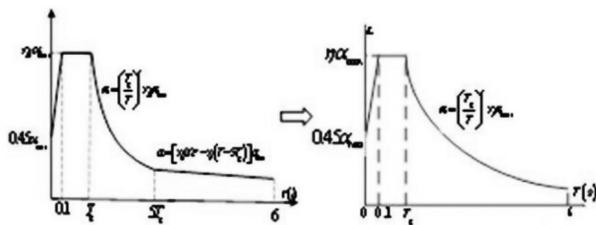


图1 设计反应谱变化

Fig.1 Change of design response spectrum

(3)在设计方法上。《隔标》采用一体化直接设计法对隔震结构直接进行中震设计，避免了传统分部设计法需要多次建模和计算的繁琐过程，使设计流程更简洁。且基于复振型分解反应谱CCQC法能有效考虑隔震结构的非比例阻尼特性，使设计结构更为合理。一体化直接设计法的流程见图2。

(4)在理论依据方面。隔震结构由于隔震层与上部结构耗能特性的差异，属于典型的非比例阻尼结构，因此采用实振型分解反应谱CQC法对其进行强制解耦会造成设计结果的不准确。而《隔标》采用的复振型分解反应谱CCQC法直接对隔震结构进行一体化设计，可以更准确地求解隔震结构这类具有非比例阻尼特性的结构体系，同时由理论推导可知，CQC可由CCQC退化得到，这也就

明了复振型分解反应谱CCQC法的适用范围更广泛。

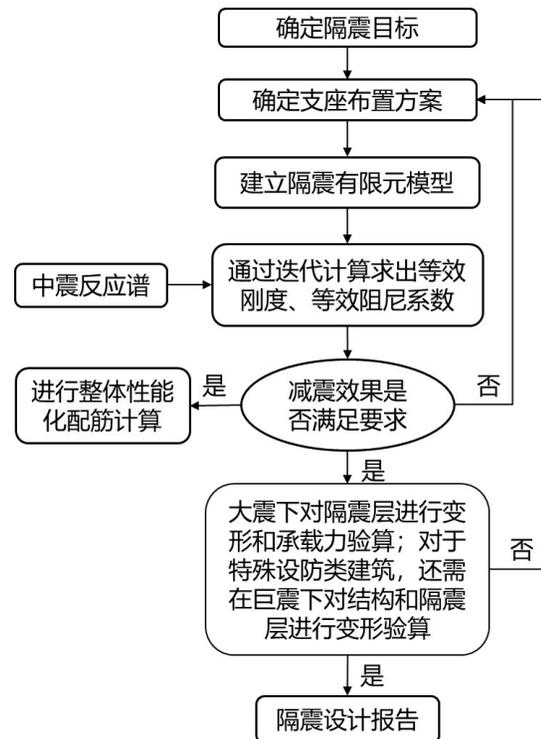


图2 一体化直接设计方法

Fig.2 Integrated direct design method

2 工程实例分析

2.1 工程概况

本工程项目为百米级住宅公寓楼，共28层（包括一层隔震层和一层地下室），结构长 $B = 50.4$ m，宽 $D = 38.0$ m，总高度 $H = 99.5$ m，丙类建筑，8度设防（ $0.20g$ ），II类场地，设计地震分组为第二组，特征周期 $T_g = 0.40$ s。考虑到本工程项目有一层地下室，适宜采用基础隔震的设计方案，因此将隔震层设置在地下室底板以下。图3给出了高层隔震结构的有限元模型。

2.2 隔震设计

为了从经济性的角度对比不同方法的设计结果，本文分别采用一体化直接设计法、传统分部设计法和传统抗震设计法对同一烈度地震作用下的高层结构进行设计。其中传统分部设计法和传统抗震设计法均采用《抗规》规定的抗震设计反应谱，基于8度小震进行设计；一体化直接设计法则采用《隔标》规定的隔震设计反应谱，基于8度中震进行设计。

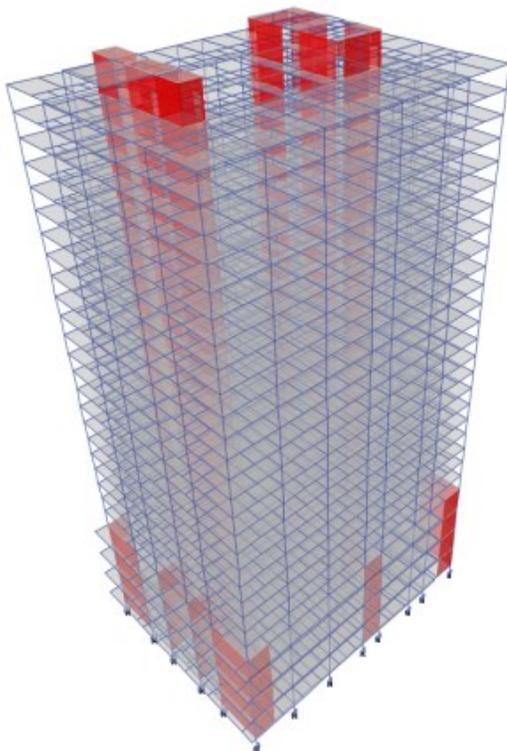


图3 有限元模型
Fig.3 Finite element model

同时为了避免构件截面尺寸过大而导致构造配筋过多,本文分别对不同设计方法下的计算模型进行侧向刚度优化。在采用分部设计法和传统抗震设计时,分别调整隔震结构和抗震结构在小震作用下的最大层间位移角接近《抗规》规定的层间位移角限值1/800。在采用一体化直接设计法时,调整隔震结构在中震作用下的最大层间位移角接近《隔标》规定的层间位移角限值1/500。

一体化直接设计法与传统分部设计法采用相同的隔震层布置,表1给出了隔震支座的力学性能参数,隔震层的平面布置见图4。

表1 隔震支座性能参数

Table 1 Performance parameters of seismic isolator

| 类别 | 单位 | LRB1300 | LRB1500 | LNR1100 |
|------------|-------|---------|---------|---------|
| 使用数量 | 个 | 24 | 8 | 31 |
| 竖向刚度 | kN/mm | 7426.7 | 5222.4 | 5143.0 |
| 100%等效水平刚度 | kN/mm | 3.936 | 4.192 | 1.806 |
| 屈服前刚度 | kN/mm | 21.78 | 25.70 | - |
| 屈服力 | kN | 424.5 | 565.2 | - |

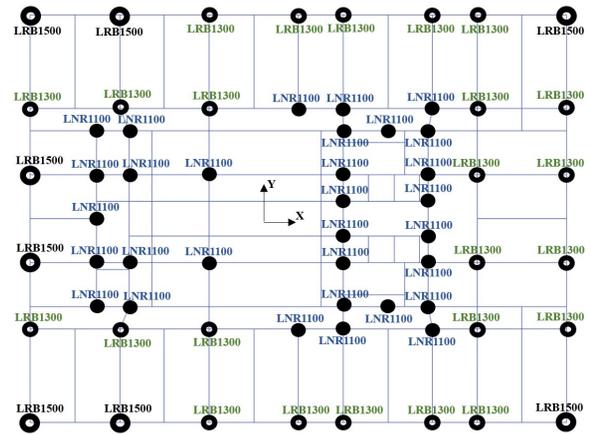


图4 隔震层平面布置图
Fig.4 Layout of seismic isolation

2.3 反应谱修正

《抗规》规定在采用振型分解反应谱法计算减震系数时,直接取隔震支座水平剪切变形100%时的等效参数进行计算,然而这与隔震支座在地震作用下实际所表现的力学性能可能有所偏差。因此为了得到更加精确的设计结果,本文根据《隔标》建议通过迭代求取隔震层的等效刚度和等效阻尼比,并对隔震设计反应谱进行修正。

表2给出了隔震层等效线性化迭代过程。由表2可知,经过迭代后隔震层的等效阻尼比为21.37%,对应铅芯橡胶隔震支座LRB1300的等效刚度为5.062 kN/mm,经过修正后得到隔震设计反应谱见图6。在后续进行时程分析计算时,直接根据不同的设计反应谱进行选波。本文根据规范要求至少选取了两条天然波(RSN880波和RSN6896波)和一条人工波,地震波反应谱与设计反应谱的对比情况见图6。

表2 等效线性化迭代过程

Table 2 Equivalent linearization iterative process

| 迭代次数 | 迭代周期 /s | 隔震层阻尼比 / (%) | 隔震层位移 / (mm) | LRB1300 / (kN·mm ⁻¹) | 阻尼系数 / (kN·s·mm ⁻¹) |
|------|---------|--------------|--------------|----------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 2.8716 | 9.48 | 63.95 | 8.152 | 0.430 |
| 2 | 3.4888 | 15.34 | 71.77 | 7.501 | 0.573 |
| 3 | 3.7802 | 18.96 | 121.05 | 5.334 | 0.654 |
| 4 | 3.8922 | 20.57 | 128.85 | 5.143 | 0.689 |
| 5 | 3.9306 | 21.16 | 131.56 | 5.082 | 0.702 |
| 6 | 3.9432 | 21.37 | 132.47 | 5.062 | 0.707 |

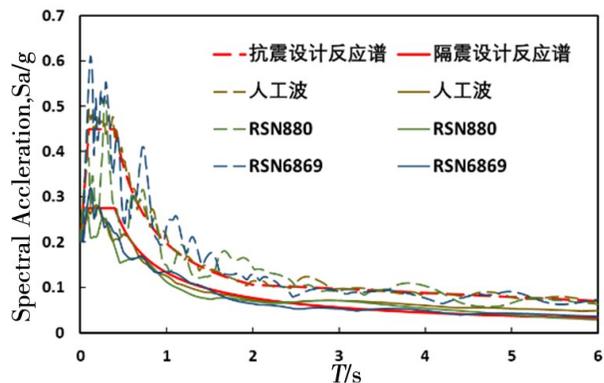


图5 反应谱对比与选波(21.37%)

Fig.5 Response spectrum comparison and wave selection(21.37%)

2.4 设计结果及经济性分析

图6给出了不同设计方法下各计算模型的层间位移角。采用传统抗震设计法时，抗震结构在小震作用下的X、Y向最大层间位移角分别为1/905和1/850；采用传统分部设计法时，隔震结构在小震作用下的X、Y向最大层间位移角分别为1/867和1/845；采用一体化直接设计法时，隔震结构在中震作用下的X、Y向最大层间位移角分别为1/535和1/584，不同方法下的计算模型均满足相应的规范限值要求。

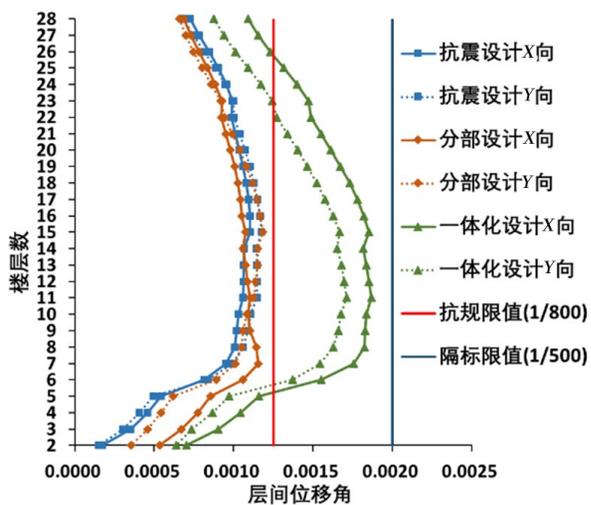


图6 层间位移角

Fig.6 Story drift angle

根据传统分部设计法进行隔震设计时，需要分别计算隔震结构和抗震结构在中震作用下的层剪力和层弯矩。图7给出了隔震结构与抗震结构的层剪力和层弯矩对比情况。由图7可知，高层隔震结构X、Y向的最大层剪力比分别为0.55和0.50；X、Y向的最大层弯矩之比分别为0.56和0.51，得到减震系数 $\beta=0.56$ ，取调整系数 $\psi=0.8$ ，计算得到隔震后

的地震影响系数最大值 $\alpha_{max1}=0.11$ ，最后再对抗震结构在减震后的小震作用下进行设计与分析计算。由此可知，传统分部设计法需要经过多次的建模和计算，其设计过程较为繁琐。

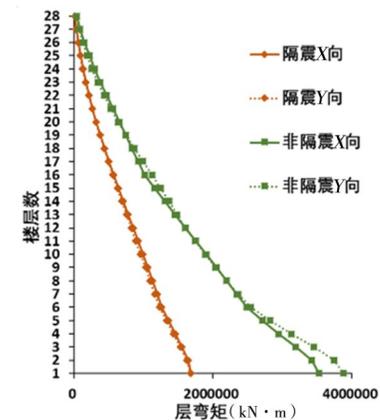
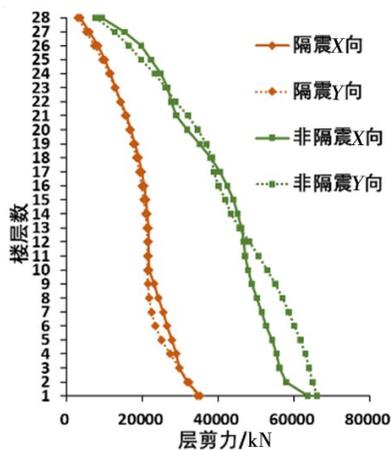


图7 地震反应对比情况(分部设计法)

Fig.7 Comparison of seismic response (divisional design method)

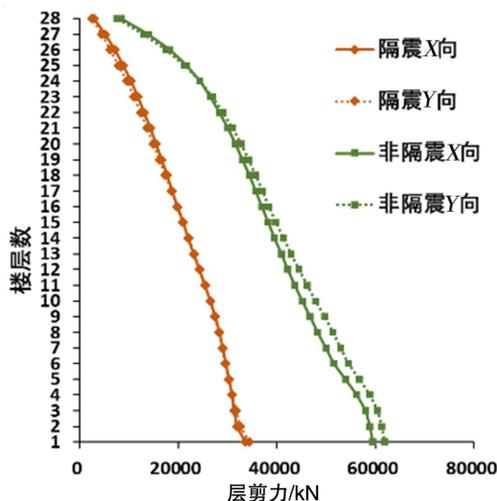
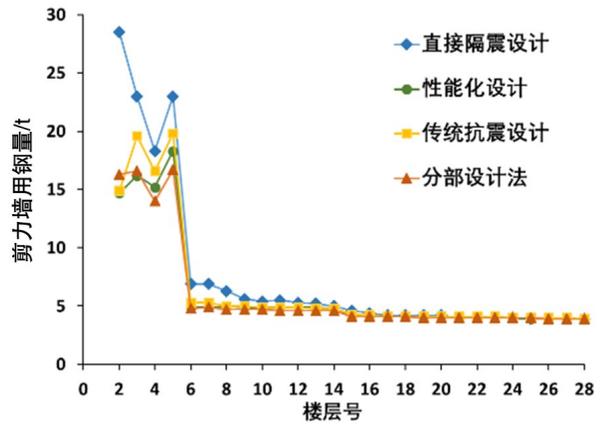


图8 地震反应对比情况(一体化直接设计法)

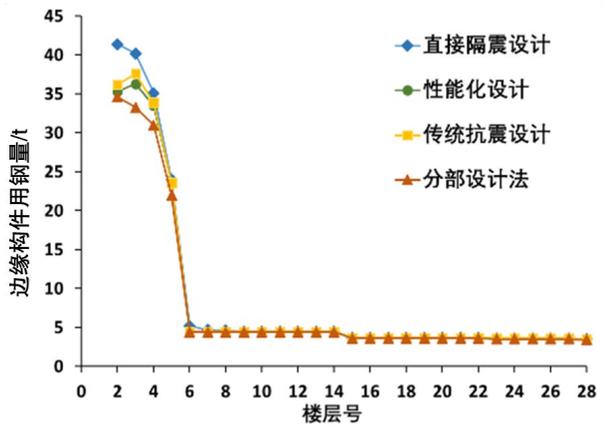
Fig.8 Comparison of seismic response (integrated direct design method)

与传统分部设计法不同,一体化直接设计法直接对隔震结构进行中震设计,避免了多次建模和计算的繁琐过程,并且通过“底部剪力比”确定隔震结构的抗震措施,避免了地震波选取的不确定性对设计结果造成的影响。由图7可知,高层隔震结构X、Y向的底部剪力比分别为0.55和0.54,根据《隔标》第6.1.3可知,上部结构按本地区设防烈度规定采取相应的抗震措施。

最后根据不同设计方法完成高层结构的配筋设计:采用传统抗震设计法时,对高层抗震结构进行8度小震配筋计算;采用传统分部设计法时,对高层抗震结构进行减震后的8度小震配筋计算;采用一体化直接设计法时,直接对高层隔震结构进行8度中震配筋计算,其中一体化直接设计法又分为:①不考虑性能化配筋的直接隔震设计;②按照规范“中震基本完好”的性能目标进行性能化配筋设计。图9给出了不同设计方法下各构件的用钢量,图10给出了不同设计方法下各楼层的单位面积用钢量,不同设计方法下各构件的总用钢量统计情况见表3。



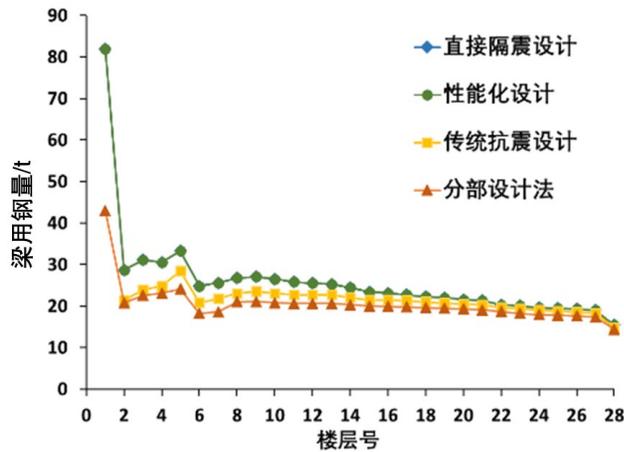
(剪力墙用钢量)



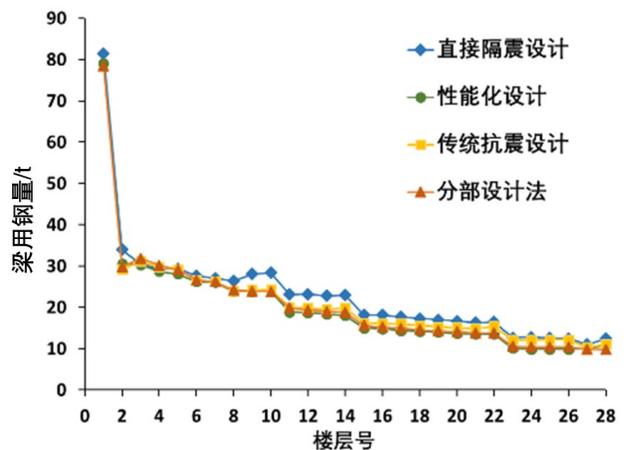
(边缘构件用钢量)

图9 不同设计方法构件用钢量

Fig.9 Steel consumption of components with different design methods



(梁用钢量)



(柱用钢量)

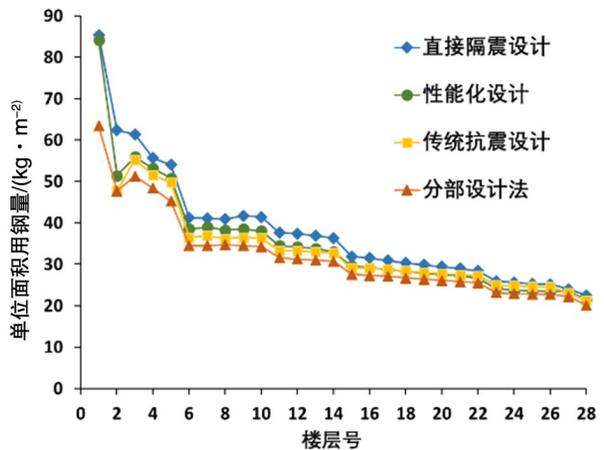


图10 不同设计方法单位面积用钢量

Fig.10 Steel consumption per unit area with different design methods

由表3所示配筋结果可知,一体化直接设计法的总用钢量最多,其中直接隔震设计的总用钢量为1821.4 t,总单位面积用钢量为39.3 kg/m²;性能化设计总用钢量为1692.9 t,总单位面积用钢量为

36.5 kg/m²。以性能化设计的总用钢量为基准进行对比发现,性能化设计相比分部设计法增加10.13%,相比传统抗震设计增加12.61%,但相比直接隔震设计减少7.59%,这是由于直接隔震设计没有考虑不同构件的重要性程度,而直接对结构进行中震设计,导致上部结构用钢量明显增多。其中柱配筋和墙体配筋相比性能化设计分别增加了13.7%和21.9%,存在配筋超限的安全隐患。而采用性能化设计可以根据对隔震结构性能目标的要求,通过定义不同构件的重要性程度实现配筋的合理分配,从而有效避免构件出现抗剪超限现象,使设计结果更具经济性。

表3 不同设计方法的构件总用钢量统计(t)

Table 3 Statistics of total steel consumption of components with different design methods (unit: t)

| 类别 | 直接隔震设计 | 性能化设计 | 传统抗震设计 | 分部设计法 |
|------|--------|--------|--------|--------|
| 梁 | 728.2 | 728.5 | 578.1 | 575.9 |
| 柱 | 647.2 | 569.2 | 519.3 | 579.6 |
| 剪力墙 | 207.9 | 170.6 | 178.7 | 166.8 |
| 边缘构件 | 237.8 | 224.6 | 227.2 | 214.9 |
| 合计 | 1821.4 | 1692.9 | 1503.3 | 1537.2 |
| 对比 | -7.59% | - | 12.61% | 10.13% |

通过对比不同设计方法下各楼层的配筋结果可知,一体化直接设计法与分部设计法和传统抗震设计相比,用钢量主要增加在中下部楼层,而随着高度增加,上部楼层用钢量逐渐减少并与分部设计法和传统抗震设计基本持平。这种用钢量沿楼层分布的趋势与上部各楼层的内力分布趋势相一致,说明一体化直接设计法的配筋分布较为合理。分部设计法虽然对上部结构的地震作用进行了折减,但由于增设了隔震层,因此总用钢量相比传统抗震设计增加了2.25%,而总单位面积用钢量则相差不大。

综上所述,本文对比了不同设计方法下该高层隔震结构的配筋情况。结果表明,在采用一体化直接设计法并结合“中震基本完好”的性能目标进行设计时,由于考虑了不同构件的重要性程度而进行性能化配筋设计,即使隔震结构设防目标由小震提升至中震,即地震作用提升约3倍的前提下,该高层隔震结构总用钢量的增加仍控制在15%以内,说明一体化直接设计方法在显著提升隔

震结构安全的同时还具有较好的经济性。

3 高层隔震结构风振舒适度评估

由《隔标》第4.6.8条可知,新旧规范在针对隔震结构进行抗风设计时的基本理念没有改变,仅通过静力设计的方式对隔震结构的抗风稳定性作出规定:即要求隔震层在50年重现期风荷载作用下不出现屈服,隔震层总屈服力应满足:

$$\gamma_w V_{wk} \leq V_{Rw} \quad (1)$$

式(1)中: $\gamma_w = 1.4$ 为风荷载分项系数; V_{wk} 为隔震层所受水平剪力标准值, V_{Rw} 为隔震层总屈服力。

而随着隔震结构高度的增加,高层隔震结构在脉动风作用下的风振加速度可能会超过规范限值而导致居住者出现不适感,因此在进行隔震结构的抗风设计时还应关注可能出现的舒适度问题。本文依据《高层建筑混凝土结构技术规程》^[17]第3.7.6条以及广东省标准《高层建筑风振舒适度评价标准及控制技术规程》^[18]第4.2.3条对高层隔震结构的风振舒适度进行评估。该高层隔震结构使用功能为住宅公寓,表4给出了不同重现期风荷载作用时的风振加速度限值以及风振计算时结构阻尼比的取值限值。

表4 风振舒适度评估参数

Table 4 Evaluation parameters of wind vibration comfort

| 重现期/年 | 风振加速度限值/gal | 结构阻尼比限值/(%) |
|-------|-------------|-------------|
| 1 | 6.0 | 1.5 |
| 10 | 15.0 | 2.0 |
| 50 | 50.0 | 5.0 |

3.1 脉动风模拟

脉动风根据来流风向和结构振动方向可分为顺风向脉动风和横风向脉动风,其中横风向脉动风对结构的作用较小而通常被忽略(荷载规范规定当结构高度超过150 m或高宽比大于5时考虑横风向风振的影响)。因此本文仅考虑顺风向脉动风对高层隔震结构的作用。

顺风向脉动风速谱的种类有很多,本文选取我国荷载规范建议的Davenport风速谱作为目标功率谱,其特征是假定湍流积分尺度沿高度不变,表达式如下:

$$\frac{nS_u(n)}{\sigma_u^2} = \frac{2x^2}{3(1+x^2)^{4/3}} \quad (2)$$

式(2)中: σ_u 为脉动风速均方根; $x = 1200n/\bar{V}_{10}^2$; n 为脉动风频率; \bar{V}_{10} 为 10 m 高度处的平均风速。

脉动风的本质是均值为 0, 方差为 1 的平稳随机过程, 可以通过数值模拟的方法得到。其中线性滤波器法的自回归模型(Auto-Regressive)因具有计算快、效率高和占用内存少等优点而得到广泛应用。因此本文基于上述 AR 模型, 通过 Matlab 软件编制程序进行脉动风的模拟。模拟时的主要参数为: 采用指数率风剖面, B 类地貌, 当地重现期 1 年、10 年、50 年的风压分别为 0.22 kN/m^2 、 0.5 kN/m^2 、 0.8 kN/m^2 , AR 模型的阶数取 6 阶, 风速时间步长 0.1 s, 总时长 600 s。

图 11 给出了高层隔震结构顶层的模拟脉动风速功率谱和 Davenport 风速谱的对比情况。可以看到, 基于 AR 模型得到的脉动风速功率谱的整体变化趋势与目标 Davenport 风速谱非常吻合, 由此验证了模拟结果的可靠性。

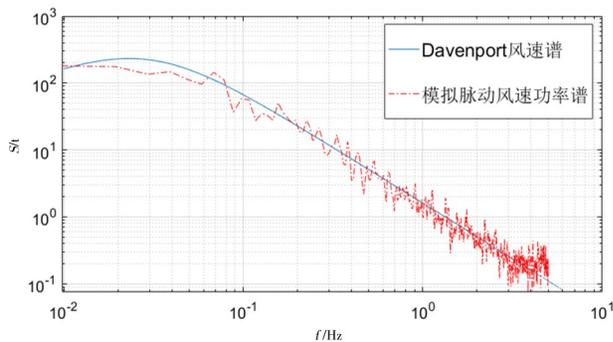


图 11 顶层脉动风速功率谱与 Davenport 谱对比

Fig.11 Comparison of power spectrums of Davenport and fluctuating wind on the top floor

3.2 风振舒适度评估

考虑不同风向角的影响, 本文分别将 1 年、10 年、50 年重现期的风荷载沿高层隔震结构的 X 轴方向、30°方向、60°方向和 Y 轴方向施加。图 12~14 给出了该高层隔震结构在不同重现期风荷载作用下, 各楼层的风振加速度响应峰值。

1 年重现期风振舒适度评估: 风荷载沿高层隔震结构 X 轴方向、30°方向作用时各楼层的风振加速度响应均满足舒适度要求; 沿高层隔震结构 60°方向作用时, 23~28 层的风振加速度响应不满足舒适度要求, 最大为 8.8 gal; 沿高层隔震结构 Y 轴方向作用时, 21~28 层的风振加速度响应不满足舒适度要求, 最大为 10.3 gal, 超出规范限值 71.7%。

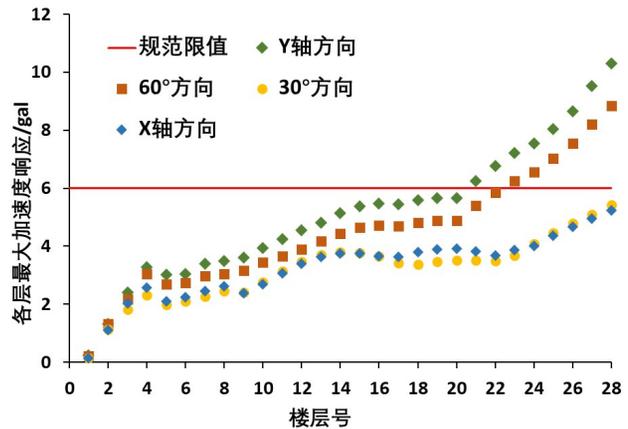


图 12 各层风振加速度响应峰值(1 年一遇)

Fig.12 Peak value of wind-induced acceleration response of each layer (once in 1 year)

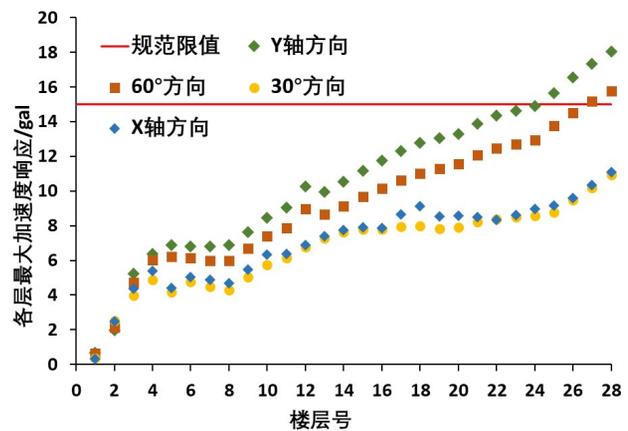


图 13 各层风振加速度响应峰值(10 年一遇)

Fig.13 Peak value of wind-induced acceleration response of each layer (once in 10 year)

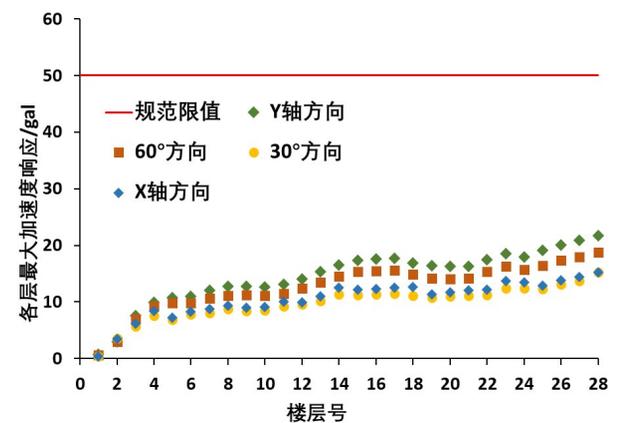


图 14 各层风振加速度响应峰值(50 年一遇)

Fig.14 Peak value of wind-induced acceleration response of each layer (once in 50 year)

10 年重现期风振舒适度评估: 风荷载沿高层隔震结构 X 轴方向、30°方向作用时各楼层的风振

加速度响应均满足舒适度要求；沿高层隔震结构60°方向作用时，27层、28层的风振加速度响应不满足舒适度要求，最大为15.7 gal；沿高层隔震结构Y轴方向作用时，25~28层的风振加速度响应不满足舒适度要求，最大为18.0 gal，超出规范限值20%。

50年重现期风振舒适度评估：风荷载沿高层隔震结构X轴方向、30°方向、60°方向和Y轴方向作用时各楼层的风振加速度响应均满足舒适度要求。

综上所述，该高层隔震结构在1年、10年风荷载作用下顶部的风振加速度响应均超过了相应的规范限值，其中要满足1年风荷载作用下的舒适度更为困难。而在50年风荷载作用下，由于结构的阻尼比较大，一般能满足舒适度的要求。因此在未来的隔震结构抗风设计中，除满足隔震层的抗风稳定性外，高层隔震结构顶部可能出现的风振舒适度问题也应引起足够重视。

4 结论

(1)《隔标》是我国第一部专门指导隔震设计的国家级标准。与传统分部设计法相比，《隔标》采用一体化直接设计法对隔震结构进行中震设计，避免了多次建模的繁琐过程，设计流程更为简洁；且基于复振型分解反应谱CCQC法更能体现隔震结构的非比例阻尼特性，使设计结果更加可靠。

(2)本文对比了不同设计方法下该高层隔震结构的配筋情况。结果表明，采用一体化直接设计法并结合“中震基本完好”的性能目标进行设计时，即使隔震结构设防目标由小震提升至中震，即地震作用提升约3倍的前提下，该高层隔震结构总用钢量的增加仍控制在15%以内，说明一体化直接设计方法在显著提升隔震结构安全的同时还具有较好的经济性。

(3)本文对高层隔震结构在不同重现期风荷载沿不同风向角作用下的风振舒适度进行了评估。结果表明，该高层隔震结构在1年、10年风荷载作用下均出现了舒适度问题，其中最大风振加速度响应分别达到了10.3 gal和18.0 gal，超出规范限值71.7%和20%，要满足在1年风荷载作用下的舒适度要求更为困难。因此在未来的隔震结构抗风设计中，除满足隔震层的抗风稳定性外，高层隔震结构可能出现的风振舒适度问题也应引起足够重视。

参考文献

- [1] 周福霖. 工程结构减振控制[M]. 北京:地震出版社,1997.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50011-2010: 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [3] Hall J F. Problems encountered from the use (or misuse) of Rayleigh damping[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2006, 35(5): 525-545.
- [4] Ryan K L, Polanco J. Problems with Rayleigh damping in base-isolated buildings[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(11): 1780-1784.
- [5] Warburton G B, Soni S R. Errors in response calculations for non-classically damped structures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 5(4): 365-376.
- [6] Deepak, R, Pant, et al. Appropriate viscous damping for nonlinear time-history analysis of base-isolated reinforced concrete buildings[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(15): 2321-2339.
- [7] McKenna, Frank, Chopra, et al. Modeling viscous damping in nonlinear response history analysis of buildings for earthquake excitation[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2016, 45: 193-211.
- [8] Anajafi H, Medina R A, Erin Santini-Bell. Effects of the improper modeling of viscous damping on the first mode and higher-mode dominated responses of base-isolated buildings [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2020, 49(1): 51-73.
- [9] 周锡元, 俞瑞芳. 非比例阻尼线性体系基于规范反应谱的CCQC法[J]. 工程力学, 2006(02): 10-17+9.
- [10] 蔡婷, 张洵安, 连业达, 等. 基于复模态反应谱法的MSCSS控制特性研究[J]. 应用力学学报, 2016, 33(05): 766-771+932.
- [11] 陈华霆, 谭平, 彭凌云, 等. 复振型叠加法截断误差及改进[J]. 振动工程学报, 2017, 30(04): 556-563.
- [12] 陈华霆, 谭平, 和雪峰, 等. 振型叠加法合理振型数目的确定[J]. 应用力学学报, 2017, 34(03): 404-409+603.
- [13] 陈华霆. 非经典阻尼体系动力反应分析方法研究[D]. 广州: 广州大学, 2017.
- [14] 陈华霆, 谭平, 彭凌云, 等. 基于隔震结构Benchmark模型的复振型叠加反应谱方法[J]. 振动与冲击, 2017, 36(23): 157-163.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB/T 51408-2021: 建筑隔震设计标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.
- [16] 谭平, 陈洋洋, 周福霖, 等. 国家标准《建筑隔震设计标准》编制与说明[J]. 工程建设标准化, 2021(05): 22-26.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 3-2010: 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, 2010.
- [18] 广东省住房和城乡建设厅. DBJ/T15-216-2021: 高层建筑风振舒适度评价标准及控制技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.