

基于静力推覆分析算法的高层建筑混凝土 核心筒抗震性能模拟

雷 鸣, 尹思阳, 王德玲, 张继承, 路世伟

(长江大学 城市建设学院, 湖北 荆州 434023)

摘 要:为减少因震动导致的高层建筑混凝土核心筒损伤,提出了基于静力推覆分析算法的高层建筑混凝土核心筒抗震性能模拟方法。选择某应用屈曲约束支撑的高层建筑混凝土核心筒为研究对象,结合 PKPM 软件模拟了基于静力推覆分析算法的高层建筑混凝土核心筒抗震性能。实验结果表明:静力推覆侧力分布形式对高层建筑混凝土核心筒的顶点位移角和基底剪力计算结果影响较大;屈曲约束支撑的高层建筑混凝土核心筒在 X 向的基底剪力曲线呈指数型增长;强震动作用下高层建筑混凝土核心筒的刚度降低、柱剪力的占比不断增大;延性系数恒定时,高层建筑混凝土核心筒能量谱比值与刚度折减系数呈正相关关系;高层建筑混凝土核心筒的损伤情况随强震持时的提升而提升;随着刚度特征值的不断增大,剪力墙耗能占总滞回耗能比中的占比下降,而框架梁柱耗能的占比则有所上升且分布形式大致呈线性。

关键词:静力推覆分析;高层建筑;混凝土核心筒;抗震性能模拟;顶点位移角;基底剪力

中图分类号:TU971 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2023)09-2573-08

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221082

Seismic performance simulation of high-rise concrete core tube based on static nappe analysis algorithm

LEI Ming, YIN Si-yang, WANG De-ling, ZHANG Ji-cheng, LU Shi-wei

(School of Urban Construction, Yangtze University, Jingzhou 434023, China)

Abstract: In order to reduce the damage of concrete core tube of high-rise buildings caused by vibration, the seismic performance simulation method of concrete core tube of high-rise buildings based on static pushover analysis algorithm was studied. A high-rise building concrete core tube with buckling constraint bracing was selected as the research object, and the seismic performance of high-rise building concrete core tube based on static nappe analysis algorithm was simulated with software PKPM. The test results show that the distribution of the lateral force of the static nappe has great influence on the calculation results of the apex displacement angle and the base shear force of the concrete core tube in high-rise buildings. In the X-direction, the base shear curve of concrete core tube supported by buckling constraint increases exponentially. The stiffness of concrete core tube decreases and the proportion of column shear increases under strong vibration. When ductility coefficient is constant, the ratio of energy spectrum of high-rise

收稿日期:2022-08-26.

作者简介:雷鸣(1974-),男,副教授,博士.研究方向:工程管理.E-mail:88456455@qq.com

通信作者:张继承(1976-),男,教授,博士.研究方向:钢管混凝土结构.E-mail:100995@yangtzeu.edu.cn

concrete core tube is positively correlated with stiffness reduction coefficient. The damage of concrete core tube in high-rise building caused by longer strong earthquake duration increases with the increase of strong earthquake duration. With the increasing of the characteristic stiffness value, the proportion of the energy consumption of shear wall in the total hysteretic energy consumption ratio decreases, while the proportion of the energy consumption of frame beam and column increases and the distribution pattern is roughly linear.

Key words: static nappe analysis; high-rise buildings; concrete core tube; seismic performance simulation; vertex displacement angle; base shear

0 引言

在高层建筑混凝土核心筒结构中,框架梁、柱均采用钢材料,核心筒结构为钢筋混凝土,其自重较轻、构件截面尺寸较小^[1],使建筑具有符合要求的抗侧移刚度,同时能够极大程度地节省造价。当前,对于混凝土核心筒性能的研究只着眼于构件方面,关于整体方面的研究内容较少,核心筒结构在强烈震动下的状态发生弹塑性变化^[2,3],此时需要对其进行抗震规划,令其能够适用于强震情况。为此,卢啸^[4]研究了混凝土核心筒在地震中的韧性,能较好地反映结构在不同地震水准下的使用功能损失,具有较好的地震韧性。寇俊敏等^[5]通过对水平荷载、侧向位移以及水平加载模式进行分析,估算出弹性强度与屈服强度间的关系,获得延性系数,进而确定建筑结构的目标位移;将参数优化问题转化为非线性最小二乘问题,从而获得目标函数并计算其最优解,优化后的弹塑性参数性能更好,能有效减少地震下建筑的损失。但以上两种方法过于理想化,忽略了地震作用的真实影响,导致结构顶点位移与实际测试结果相差较大、最大层间加速度响应值较大、抗震性能较差。

静力推覆分析是一种非线性分析技术,主要根据核心筒的推覆分析结果判断其弹塑性抗震性能,常通过在核心筒上作用单向的水平荷载,令其到达极限破坏形态实现。在此过程中,顶点发生位移变化被推至一定位置,并得出目标位移。获取目标位移的方法是:首先,令核心筒结构等同于对应单自由度体系,静力推覆获取描述其恢复力的骨架曲线^[6-8];然后,采用动力时程分析法对其对应的单自由度体系进行分析得出最大位移响应,即目标位移。选择侧力、顶点位移为抗震指标,在能够获取差异震动的情况下,分析结构进入弹塑性变形直至破坏的全历程。静力推覆分析的

前提条件主要包括:①核心筒结构的震动效果只考虑关于对应单自由度体系的反应(控制振型常选择第一振型);②震动时核心筒随高度方向的振型向量不发生变化^[9,10]。

针对传统方法的不足,本文提出了基于静力推覆分析算法的高层建筑混凝土核心筒抗震性能模拟方法,实验结果表明,本文方法可以减少自重、提高承载和耗能性能,减少因地震导致的各种损失。

1 高层建筑混凝土核心筒抗震性能模拟

1.1 结构模型构建

研究对象为某高层建筑,其高度约为 88 m、层数为 22 层、结构形式为混凝土核心筒,建筑应用屈曲约束支撑,高层建筑的整体结构如图 1 所示。高层建筑各构件截面尺寸如表 1 所示,构建其三维模型如图 2 所示。



图 1 高层建筑的整体结构

Fig. 1 Overall structure of high-rise building

结合 PKPM 软件模拟基于静力推覆分析算法的高层建筑混凝土核心筒抗震性能,核心筒内设置楼梯间和同种作用房间,外墙较厚,为主抗侧力结构;内墙厚度稍薄,主要负责分隔。建筑外围

表 1 构件截面尺寸

Table 1 Sectional dimensions of components

构件	尺寸/mm
外框柱	柱 2000×2000~1000×1000, 含钢率为 7.5%
	钢梁 H1000×500×30×40~H1000×200×25×58
外墙	1500~500
核心筒	内墙 500~300
	连梁 1000
环带	弦杆 H1000×500×50×50
桁架	腹杆 1000×500×50×50
楼面梁	H500×500×15×30
楼板	筒外 150, 筒内 160, 加强层及相邻层 160

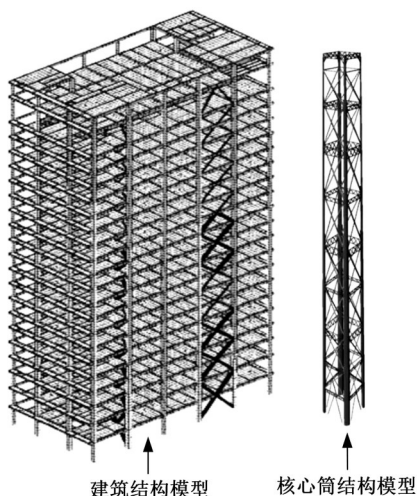


图 2 高层建筑-核心筒结构模型

Fig. 2 High rise building core tube structure model

设置钢管混凝土柱, 钢梁为其与核心筒外墙连接的桥梁。核心筒高度约为 90 m、宽度约为 10 m、剪力墙厚度最大值约为 0.16 m、抗震设防烈度约为 7 度, 主体为地上 20 层, 而 21、22 层分别为出屋面的电、楼梯间。为简化研究难度, 忽略地下层面。

1.2 静力推覆分析算法的实施步骤

1.2.1 静力推覆分析及单自由度体系

研究高层建筑混凝土核心筒的抗震性能需要令核心筒结构等同于对应单自由度体系^[11], 核心筒的地震响应情况受基本振型控制, 该振型向量在受震动影响过程中不发生变化, 所以静力推覆分析作用的单向水平荷载等效于核心筒受地震影响的作用力^[12-14]。令水平荷载的列向量 P 为:

$$P = pM\phi \quad (1)$$

式中: p 为水平力大小控制量; M 、 ϕ 分别为质量矩阵、振型向量。

多自由度体系结构振动方程为:

$$M\phi\ddot{q} + C\phi\dot{q} + F = -M1\ddot{X}_g \quad (2)$$

式中: C 为阻尼矩阵; \ddot{X}_g 为输入地震波; F 为多自由度体系的弹性恢复力; \dot{q} 为振型坐标对时间的一阶导数; \ddot{q} 为振型坐标对时间的二阶导数; 1 为每个元素都为 1 的 N 阶向量。

式(2)可转换为单自由度体系表示形式:

$$m^*\ddot{u} + c^*\dot{u} + F^* = -m^*\ddot{X}_g \quad (3)$$

式中: $u = q/\gamma$, q 为振型坐标, 即位移向量经振型展开的相应振型的系数, γ 为刚度系数; m^* 、 c^* 、 F^* 分别为单自由度体系的质量、阻尼和恢复力。

单自由度体系的周期 T_{eq} 为:

$$T_{eq} = 2\pi \sqrt{\frac{u_y m^*}{F_y^*}} \quad (4)$$

式中: u_y 为等效单自由度体系的屈服位移; F_y^* 为等效单自由度体系的屈服力。

单自由度体系的弹性地震响应 F_{ela} 为:

$$F_{ela} = S_{ae}(T_{eq})m^* \quad (5)$$

式中: $S_{ae}(T_{eq})$ 为周期是 T_{eq} 的弹性谱加速度。

弹性谱位移 S_{de} 为:

$$S_{de} = \frac{T^2}{4\pi^2} S_{ae} \quad (6)$$

单自由度体系的屈服强度系数 R_y 为:

$$R_y = \frac{S_{ae}(T_{eq})m^*}{F_y^*} \quad (7)$$

通过 R_y 可利用弹塑性反应谱获取核心筒的目标位移。

1.2.2 静力推覆分析算法的实施步骤

(1) 判断侧力分布模态。

(2) 不断提升侧力, 使构件刚度出现显著变化直至达到屈服承载力, 调整屈服构件刚度^[15], 随后持续提升侧力, 分布模态不再发生变化。

(3) 加载至混凝土核心筒性能至临界状态或层间位移大于规定位移。

(4) 评价混凝土核心筒的抗震性能, 绘制由荷载-位移曲线转换所得的承载能力谱线、由加速度反应谱转换所得的弹塑性位移谱, 基于混凝土核心筒的弹塑性折减弹塑性位移谱, 将两条谱线置于同一图内, 以其交点为目标位移。

2 试验分析

采用本文方法对 1.1 节选择的高层建筑混凝土核心筒的抗震性能进行研究, 以验证本文方法

的有效性。分别计算高层建筑混凝土核心筒抗震性能处于“正常使用”、“暂时使用”、“生命安全”以及“接近倒塌”4种状态,静力推覆侧力分布形式分别为均布、倒三角、第一振型侧立形式及三者平

均时的顶点位移角和基底剪力,结果如表2所示。均布、倒三角、第一振型侧立形式的静力推覆曲线对比情况如图3所示,此处取顶点位移角为极值。

表2 不同静力推覆侧力分布的顶点位移角和基底剪力

Table 2 Peak displacement angle and base shear force of different static nappe lateral force distributions

参 数	侧力分布形式			
	均布	倒三角	第一振型	三者平均
正常使用时基底剪力/kN	1381.6	1074.6	1206.8	1230.5
正常使用时顶点位移角/rad	1/1500	1/1300	1/1200	1/1300
暂时使用时基底剪力/kN	3118.5	2623.6	2461.8	2734.6
暂时使用时顶点位移角/rad	1/500	1/400	1/390	1/430
生命安全时基底剪力/kN	6717.8	5231.8	4712.5	5554.9
生命安全时顶点位移角/rad	1/140	1/130	1/170	1/150
接近倒塌时基底剪力/kN	5474.8	4953.7	4331.5	5326.7
接近倒塌时顶点位移角/rad	1/60	1/78	1/80	1/75

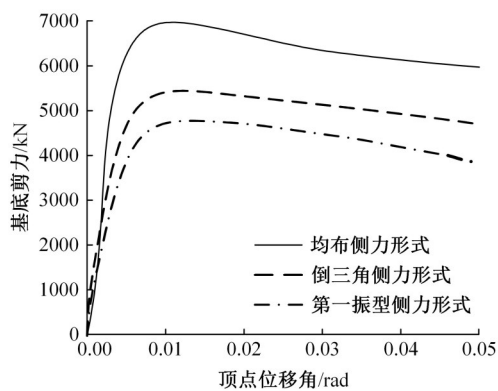


图3 静力推覆曲线

Fig. 3 Static nappe curve

结合表2和图3可以看出:静力推覆的侧力分布形式主要受作用力影响,存在放大核心筒抗侧力性能的问题,单一静力推覆分析无法全面展现地震震动的影响,导致其分析结果不够贴合实际。因此,静力推覆侧力分布形式对高层建筑混凝土核心筒的顶点位移角和基底剪力计算结果影响较大,其中,基底剪力最大、最小的分布形式分别为均布和第一振型侧力分布。

已知本文方法应用屈曲约束支撑,将本文方法与应用普通支撑的方法在X向的静力推覆分析结果进行对比,如图4所示。

由图4可以看出:高层建筑混凝土核心筒的支撑为普通支撑时,其在X向的基底剪力曲线存在弯折情况,原因是推覆分析混凝土核心筒时大量构件在相同时间达到屈服形态;而本文方法应用的是屈曲约束支撑,高层建筑混凝土核心筒在

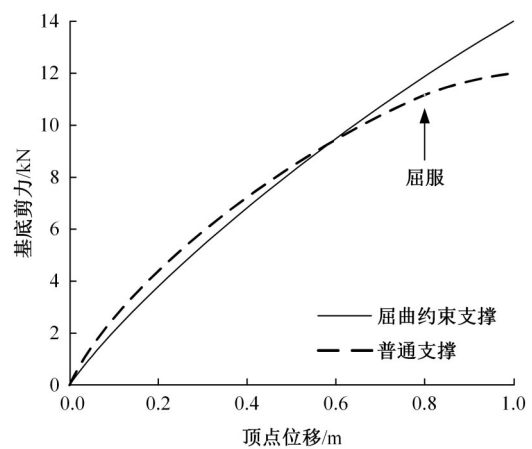


图4 混凝土核心筒在X向的静力推覆分析结果

Fig. 4 Static pushover analysis results of concrete core tube in X direction

X向的基底剪力曲线呈指数增长,无大量构件同时屈服致使曲线出现弯折的情况。

分析在强震动作用下,高层建筑混凝土核心筒在X向分担的剪力,结果如表3所示。由表3可以看出:在强震动作用下,高层建筑混凝土核心筒的刚度降低,柱剪力的占比不断增大,所承担总基底剪力达到7.34%;随着楼层的升高,柱承担的基底剪力占比越来越大,表明高层建筑混凝土核心筒的框架能够有效实现二次防护的功能,分担因为混凝土核心筒刚度降低引发的内力重分布而增加的框架内力。

弱震动条件下高层建筑混凝土核心筒所有楼层框架所受基底剪力与强震动条件下总基底剪力的比值如图5所示。

表 3 X向柱、墙分担的剪力

Table 3 Shear force shared by X-direction column and wall

层数	柱剪力/kN	墙剪力/kN	柱剪力百分比/%
1	3 246.530	41 432.318	7.34
4	3 652.285	38 946.537	8.51
7	3 784.695	36 118.425	9.45
10	5 192.660	30 456.563	14.37
13	5 473.860	24 603.495	17.93
16	4 662.325	18 521.790	19.91
19	4 834.815	9 927.015	32.47
22	2 247.750	3 006.399	55.86

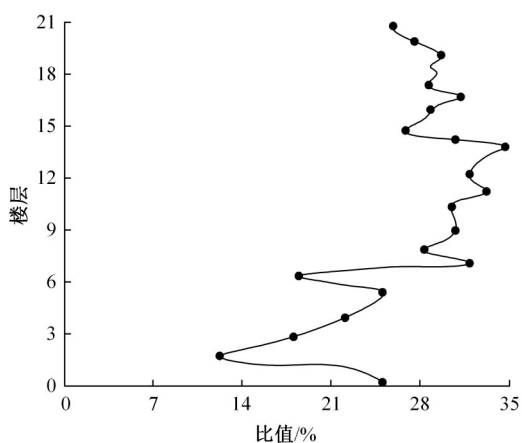


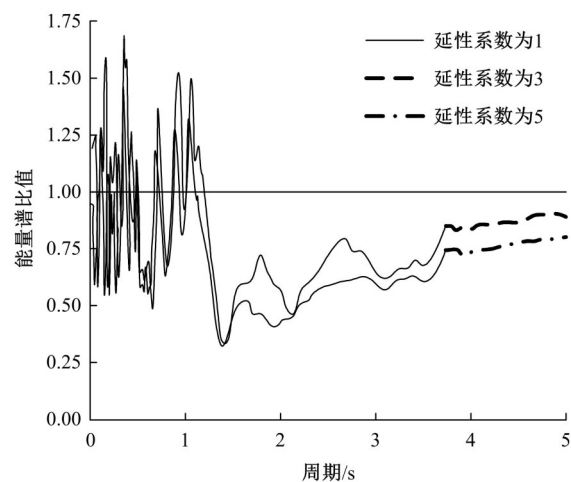
图 5 弱震动柱剪力与强震动总基底剪力的比值

Fig. 5 Ratio of shear force of weak earthquake column to total base shear force of strong earthquake

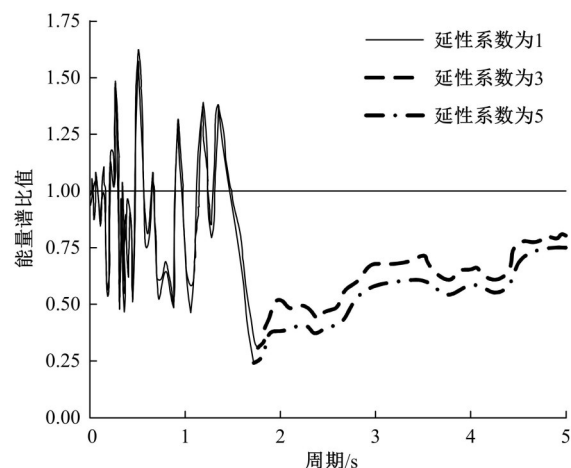
由图 5 可知,高层建筑混凝土核心筒框架所承担的基底剪力提升较大,其中,框架中间部分的剪力提升幅度最高,约为 30%。说明应用本文方法的高层建筑混凝土核心筒层间位移符合抗震性能设计需要,具有较好的抗震性能、延性以及耗能性能,可依据本文方法的计算结果适时调整混凝土核心筒的结构。

图 6 为不同刚度折减系数对能量谱比值的影响。由图 6 可以看出,在刚度折减系数相同的情况下,高层建筑混凝土核心筒在周期为 2 s 内,延性系数变换基本不会对能量谱比值产生影响,周期在 2 s 之后,延性系数的提升会减小高层建筑混凝土核心筒的能量谱比值,但跟随周期的延长该影响不断降低。

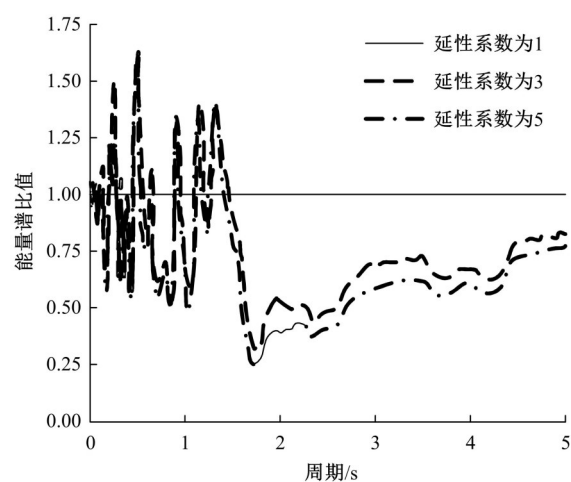
当延性系数固定取值的情况下,高层建筑混凝土核心筒的刚度折减系数与能量谱比值关系如图 7 所示。由图 7 可以看出:当延性系数恒定的情况下,高层建筑混凝土核心筒能量谱比值与刚度折减系数呈正相关关系,刚度折减系数对高层建



(a)刚度折减系数为0.0



(b)刚度折减系数为0.1



(c)刚度折减系数为0.2

图 6 不同刚度折减系数对能量谱比值的影响

Fig. 6 Effect of different stiffness reduction factors on energy spectrum ratio

筑混凝土核心筒能量谱比值的影响较为显著地呈现于 2 s 周期之后。

在强震持时不同的情况下,高层建筑混凝土

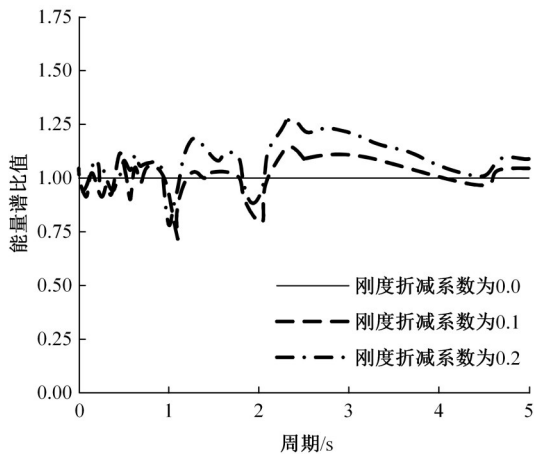


图 7 刚度折减系数与能量谱比值关系

Fig. 7 Relationship between stiffness reduction coefficient and energy spectrum ratio

核心筒的滞回耗能比变化如图 8 所示。由图 8 可以看出:在强震持时小于 12 s 时,滞回耗能比均匀分布,表示较短的强震持时震动对滞回耗能比的影响较小;在强震持时大于 12 s 时,强震持时与滞回耗能比呈正比,表示较长的强震持时震动对高层建筑混凝土核心筒的损伤情况随强震持时的提高而提升。

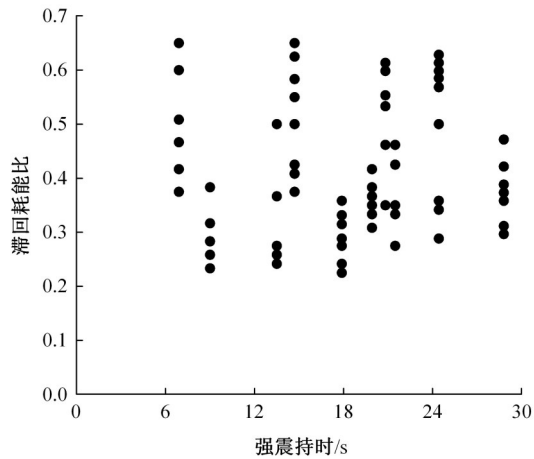


图 8 强震持时与滞回耗能比的关系

Fig. 8 Relationship between strong earthquake duration and hysteretic energy consumption ratio

分析高层建筑混凝土核心筒在震动情况下,其构件耗能随刚度特征值的变化如图 9 所示。由图 9 可以看出:连梁耗能受刚度特征值的影响较小,剪力墙和框架梁柱的耗能受刚度特征值的影响较大,随着刚度特征值的不断增大,剪力墙耗能占总滞回耗能比的比例减小,而框架梁柱耗能的占比则有所上升,且分布形式大致呈线性。表示当剪力承担情况满足设计需要的情况下,适当提

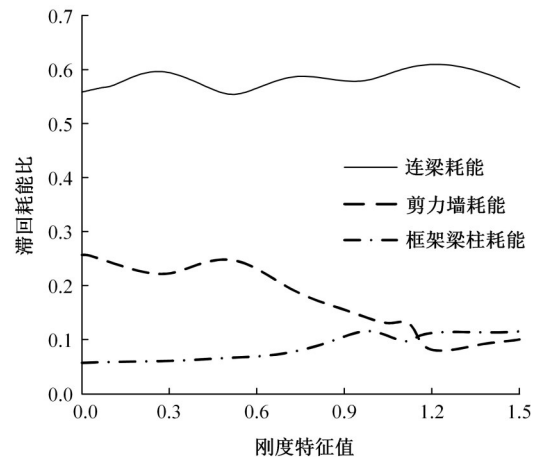


图 9 刚度特征值与各构件滞回耗能比关系

Fig. 9 Relationship between characteristic value of stiffness and hysteretic energy consumption ratio of each member

升高层建筑外框架刚度能够有效减少内部混凝土核心筒的损伤。

为了验证本文方法的有效性,采用本文方法、文献[4]方法和文献[5]方法对高层建筑最大层间加速率响应进行对比分析,结果如图 10 所示。其中,加速率响应值越低,抗震性能越好。

由图 10 可以看出:本文方法、文献[4]方法、文献[5]方法的高层建筑最大层间加速率响应最高值分别为 0.1、0.3、0.38 m/s^2 ,表明本文方法的高层建筑最大层间加速率响应值最低,抗震性能更优,鲁棒性更强。

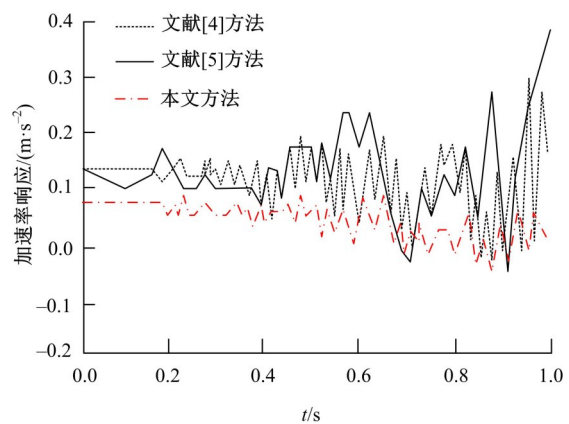


图 10 高层建筑最大层间加速率响应结果

Fig. 10 Response results of maximum inter story acceleration rate of high-rise buildings

为了进一步验证本文方法的有效性,对本文方法、文献[4]方法和文献[5]方法的结构顶点位移进行测试,结果如图 11 所示。由图 11 可以看出:本文方法的结构顶点位移计算结果与实际测

试结果基本吻合,而文献[4]方法和文献[5]方法的结构顶点位移计算结果与实际测试结果相差较大,说明本文方法的抗震性能最好。

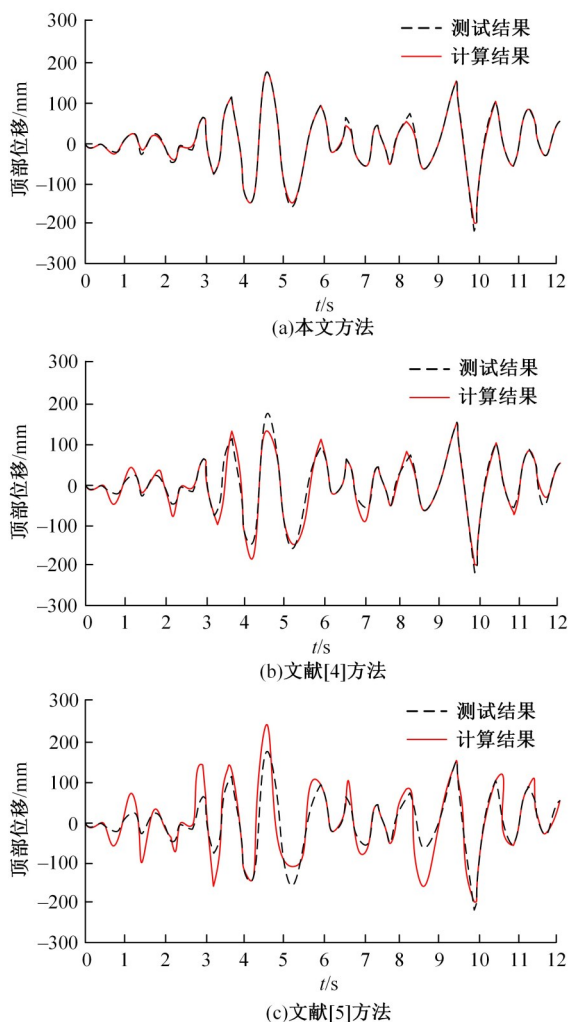


图 11 三种方法的结构顶点位移测试结果

Fig. 11 Structural vertex displacement test results of three methods

3 结束语

提出了基于静力推覆分析算法的高层建筑混凝土核心筒抗震性能模拟方法,通过计算单自由度体系的屈服强度系数,判断侧力分布模式,调整屈服构件刚度,评价混凝土核心筒的抗震性能。研究表明,静力推覆侧力分布形式对高层建筑混凝土核心筒的顶点位移角和基底剪力计算结果影响较大,本文方法具有较好的抗震性能、延性以及耗能性能。可依据本文方法的计算结果适时调整混凝土核心筒的结构,当剪力承担情况满足设计需要的情况下,适当提升高层建筑外框架刚度能够有效减少内部混凝土核心筒的损伤。

参考文献:

- [1] 郭天祥. 基于大震动力弹塑性分析的某超高层混合结构抗震设计[J]. 建筑结构, 2020, 50(16): 64-70.
Guo Tian-xiang. Seismic design of a super high-rise hybrid structure based on dynamic elastoplastic analysis under rare earthquake[J]. Building Structure, 2020, 50(16): 64-70.
- [2] 李永梅, 王浩, 彭凌云, 等. 填充墙钢筋混凝土框架结构基于位移的改进抗震设计方法[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(6): 125-132.
Li Yong-mei, Wang Hao, Peng Ling-yun, et al. Advanced displacement-based seismic design method of reinforced concrete frame structures with infill wall[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(6): 125-132.
- [3] 倪茜, 张斌, 李锦锦. 基于静力弹塑法方法的碳纤维加固框架结构抗震性能分析[J]. 工业建筑, 2020, 50(2): 104-108, 112.
Ni Qian, Zhang Bin, Li Jin-jin. Seismic performance analysis of carbon fiber reinforced frame structures based on static elastic-plastic method[J]. Industrial Construction, 2020, 50(2): 104-108, 112.
- [4] 卢啸. 钢筋混凝土框架核心筒结构地震韧性评价[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(5): 55-63.
Lu Xiao. Seismic resilience evaluation of reinforced concrete frame core tube structure[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(5): 55-63.
- [5] 寇俊敏, 苍雁飞. 建筑框架-核心筒结构静力弹塑性参数优化[J]. 计算机仿真, 2020, 37(9): 189-193.
Kou Jun-min, Cang Yan-fei. Optimization of static elastoplastic parameters of frame core tube structure[J]. Computer Simulation, 2020, 37(9): 189-193.
- [6] 贺星新, 朱金坤, 刘斌, 等. 吴江某超高层塔楼结构抗震设计与分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 1): 676-682.
He Xing-xin, Zhu Jin-kun, Liu Bin, et al. Seismic design and analysis of a super tall tower in Wujiang[J]. Building Structure, 2021, 51(Sup. 1): 676-682.
- [7] 肖从真, 李建辉, 陆宜倩, 等. C100 高强混凝土框架-核心筒高层建筑结构抗震性能研究[J]. 建筑科学, 2021, 37(3): 1-7.
Xiao Cong-zhen, Li Jian-hui, Lu Yi-qian, et al. Research on seismic performance of frame-core tube high-rise building structure with C100 high-strength concrete[J]. Building Science, 2021, 37(3): 1-7.
- [8] 曲扬, 罗永峰, 黄青隆, 等. 格构拱结构动力响应评估的改进模态推覆分析法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2019, 47(1): 1-8.

- Qu Yang, Luo Yong-feng, Huang Qing-long, et al. An improved modal pushover analysis procedure for estimating seismic responses of latticed arch[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2019, 47(1): 1-8.
- [9] 郝润霞, 王谋庭, 贾硕, 等. 基于拟力法的框架结构静力推覆分析[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(5): 1028-1035.
- Hao Run-xia, Wang Mou-ting, Jia Shuo, et al. Static pushover analysis of frame structure based on force analogy method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(5): 1028-1035.
- [10] 陈安英, 朱光超, 完海鹰, 等. 斜交网格钢框架-混凝土核心筒结构施工变形控制数值模拟[J]. 工业建筑, 2021, 51(2): 76-82.
- Chen An-ying, Zhu Guang-chao, Wan Hai-ying, et al. Numerical simulation of deformation control for a hybrid structure combined with diagrid structure and concrete core tube[J]. Industrial Construction, 2021, 51(2): 76-82.
- [11] 吴轶, 林柱帆, 杨春, 等. 带高强混凝土钢板剪力墙的超高层框架-核心筒结构抗震性能研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(8): 9-15.
- Wu Yi, Lin Zhu-fan, Yang Chun, et al. Study on seismic performances of super high-rise frame-core-wall structure with high strength concrete composite steel plate shear walls[J]. Building Structure, 2019, 49(8): 9-15.
- [12] 李英民, 姜宝龙, 张梦玲, 等. 重庆高科太阳座大厦模型结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2019, 40(3): 142-151.
- Li Ying-min, Jiang Bao-long, Zhang Meng-ling, et al. Shaking table test on model structure of Chongqing Gaoke sun constellation mansion[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(3): 142-151.
- [13] 唐建余, 潘文, 董卫青, 等. 某超高层框架-钢筋混凝土核心筒结构减震案例分析[J]. 工业安全与环保, 2021, 47(7): 55-59.
- Tang Jian-yu, Pan Wen, Dong Wei-qing, et al. Case study on seismic response of one super high rise frame reinforced concrete core tube structure[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2021, 47(7): 55-59.
- [14] 曾繁良, 黄炎生, 周靖. 钢管混凝土柱排架-核心筒结构抗震性能研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(12): 190-197.
- Zeng Fan-liang, Huang Yan-sheng, Zhou Jing. A study on the seismic performance of concrete-filled steel tube column-steel shelf-concrete core tube structures[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(12): 190-197.
- [15] 吴轶, 杨春, 王俊然, 等. 新型带耗能支撑-分散核心筒结构的抗震性能研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2020, 42(5): 133-140, 147.
- Wu Yi, Yang Chun, Wang Jun-ran, et al. Study on seismic performances of a new decentralized core tubes structure with energy dissipating braces[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2020, 42(5): 133-140, 147.