

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2023.01.001

脉冲型地震下竖向不规则重力柱-核心筒结构的 弹塑性地震响应

补国斌¹, 熊浩然¹, 徐 冲¹, 齐超文¹, 王 颖¹, 罗高杰²

(1. 湖南工业大学 土木工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 长沙中泛置业有限公司, 湖南 长沙 410007)

摘 要: 研究了速度脉冲型地震作用和结构竖向不规则双重不利条件对结构弹塑性地震反应的影响。设计了 20 层和 30 层的新型重力柱-核心筒典型结构, 通过改变底层刚度得到一系列竖向不规则结构。分别选取 10 条速度脉冲和 10 条非速度脉冲地震记录, 采用 CANNY 软件对竖向不规则重力柱-核心筒结构进行弹塑性动力时程分析, 研究速度脉冲效应和竖向不规则对结构弹塑性地震响应的影响规律。结果表明, 速度脉冲地震下结构层间剪力、层间位移和倾覆力矩均明显高于非速度脉冲地震下的对应值; 竖向不规则对结构弹塑性抗震需求影响显著, 层间位移角随着竖向不规则比率的减小而增大, 层间剪力和倾覆力矩则呈略微减小的变化趋势。建议在新型重力柱-核心筒结构设计中应考虑速度脉冲地震和结构竖向不规则的耦合影响。

关键词: 速度脉冲地震; 重力柱-核心筒结构; 竖向不规则; 弹塑性; 有限元分析

中图分类号: TU352; TU973.2⁺12 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9833(2023)01-0001-07

引文格式: 补国斌, 熊浩然, 徐 冲, 等. 脉冲型地震下竖向不规则重力柱-核心筒结构的弹塑性地震响应 [J]. 湖南工业大学学报, 2023, 37(1): 1-7.

Research on the Elastic-Plastic Seismic Response of Vertical Irregular Gravity Column-Core Tube Structure Under Pulse-Like Ground Motions

BU Guobin¹, XIONG Haoran¹, XU Chong¹, QI Chaowen¹, WANG Yin¹, LUO Gaojie²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. Changsha Zhongfan Real Estate Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: A research has been conducted on the influence of velocity pulse type seismic actions on the elastic-plastic structural seismic response, taking into consideration the dual adverse conditions of pulse-ground motions with a vertical irregularity. Based on the design of a new type of 20- and 30-story typical gravity column core tube structure, a series of vertical irregular structures can be obtained by changing the stiffness of the bottom story. With 10 velocity pulse and 10 non-velocity pulse seismic records selected respectively, an elastic-plastic dynamic time history analysis is conducted on the vertical irregular gravity column core tube structure by using CANNY software, with a further study on the influence of velocity pulse effect and vertical irregularity on the elastic-plastic seismic response of the

收稿日期: 2021-08-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51708205); 湖南省自然科学基金资助项目 (2020JJ4268); 湖南省教育厅科研基金资助项目 (21C0397); 国家级大学生创新训练基金资助项目 (202211535020)

作者简介: 补国斌 (1986-), 男, 湖南芷江人, 湖南工业大学副教授, 博士, 主要研究方向为建筑结构抗震,
E-mail: guobinbu@hut.edu.cn

通信作者: 罗高杰 (1984-), 男, 湖北咸宁人, 长沙中泛置业有限公司结构设计高级经理, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为高层及超高层建筑结构设计, E-mail: 393151160@qq.com

structure. The results show that the inter-story shear force, inter-story displacement and overturning moment of the structure under velocity pulse-like ground motions are significantly higher than those under non-velocity pulse-like ground motions. The vertical irregularity has a significant impact on the structural elastic-plastic seismic demand. The inter-story displacement angle increases with a decreasing vertical irregularity ratio, while the inter-story shear force and overturning moment show a slightly decreasing trend. It is suggested that the coupling effects of velocity pulse-like motions and the vertical irregularity should be considered in the design of new gravity column core tube structures.

Keywords: pulse-like ground motion; gravity column-core tube structure; vertical irregularity; elasticity; finite element analysis

1 研究背景

近断层速度脉冲型地震动,通常是指由方向性效应和滑冲效应引起的脉冲型地面运动。与非脉冲型地震动相比,脉冲型地震动会对结构产生更大的速度和位移冲击。近年来,国内外学者针对速度脉冲型地震与结构竖向不规则双重不利因素对结构抗震性能的影响展开了大量研究^[1-2]。如 P. Sarkar 等^[3]针对立面几何不规则框架,提出了一种考虑结构动力特性的竖向不规则定量方法。周靖等^[4]对于结构底层刚度、强度以及两者组合的竖向不规则剪切型结构,在速度脉冲地震作用下进行了抗震位移延性需求分析。罗高杰^[5]对于竖向不规则的钢筋混凝土框架结构,在速度脉冲强震下进行了抗震位移需求研究。程浩等^[6]选取了近断层脉冲型地震动进行动力分析,其基于结构层间位移角、楼层加速度、结构塑性耗能等指标,对近断层脉冲型地震动对带屈曲约束支撑(buckling restrained braces, BRB)的减震高层建筑结构抗震性能的影响进行了评估。大部分学者的已有研究是速度脉冲地震和竖向不规则对于传统结构的影响,较少考虑其对于新型复杂建筑的影响。

在地震动作用下,建筑物一般会在薄弱部位出现损伤破坏,导致结构整体失稳或倒塌,可能的原因是建筑结构缺陷或者结构不规则,而速度脉冲型地震相对于非速度型地震会对长周期结构产生更大的破坏。贾俊峰等^[7]的研究结果表明,近断层速度脉冲地震增加了结构的基底剪力、层间变形和延性需求,并且指出,在近断层速度脉冲地震下,对于竖向不规则结构的抗震性能研究相对较少。周靖等^[8]提出了一种新型的重力柱-混凝土核心筒高层体系,并且进行了不同地震烈度下的振动台试验,但是尚未考虑竖向不规则和速度脉冲地震作用的双重不利因素对于结构抗震响应的影响。

综上所述,由于近断层速度脉冲型地震和结构的

竖向不规则布置都会对结构的地震反应产生较大影响,因此,本文拟基于文献[8]的研究成果,在考虑速度脉冲地震与结构竖向不规则耦合效应下,对新型的钢管混凝土重力柱-混凝土核心筒高层结构体系的弹塑性地震响应变化规律进行分析。即在速度脉冲地震效应和竖向不规则双重不利条件下对该结构的顶点位移、层间位移角、层间剪力和倾覆力矩等进行定量分析,系统地研究双重不利对结构弹塑性地震响应的影响规律,以期近断层区竖向不规则新型重力柱-核心筒结构的抗震设计提供有益参考。

2 竖向不规则重力柱-核心筒结构模型

2.1 重力柱-核心筒结构振动台试验及其模拟

文献[8]以广西金融大厦为工程背景,设计的振动台试验模型最外层为钢管混凝土柱,中间为剪力墙组成的核心筒结构,钢梁与钢管混凝土柱或核心筒均采用螺栓铰接节点,铰接节点容许更大的转角变形,节点的受剪承载力并不会会有较大降低。结构的整体抗侧刚度减小,基本振动周期增加,可减小地震作用。水平荷载作用完全由混凝土核心筒承担,结构各部件受力明确,不用考虑外框架部分地震剪力分摊率的调整,简化结构设计,提高结构设计的灵活性。其建立的1:40缩尺试验结构模型见图1a,试验模型的详细情况参见文献[8]。

文献[9-10]采用非线性分析软件CANNY^[11],对图1所示37层试验结构模型按相似比转换得到的原型结构,进行了数值建模和有限元分析,建立的CANNY模型见图1b。两文献中,研究人员将位移时程计算结果与通过相似比转化得到的7度小、中和大震原型结构位移时程曲线进行了比较,得到的不同烈度下的位移时程比较结果见图2,由图可得知该模拟结果和试验结果的吻合度相对较高,从而得出所建模型和CANNY软件参数设置均较为合理的结论^[11]。

因此,本文亦拟基于该振动台模型,并采用同样的参数设置,进行系列的数值扩展参数化分析。

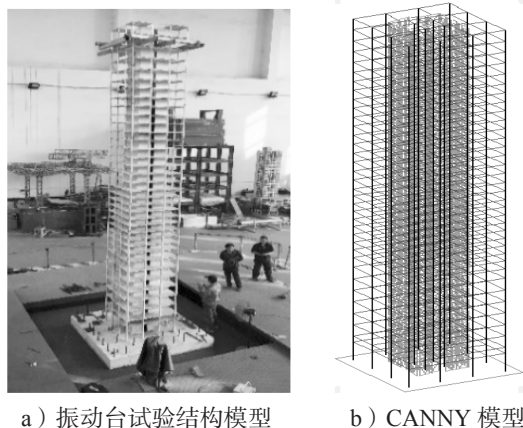
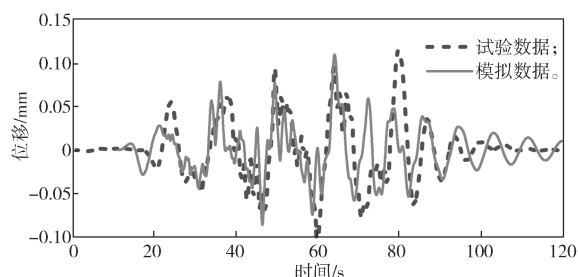
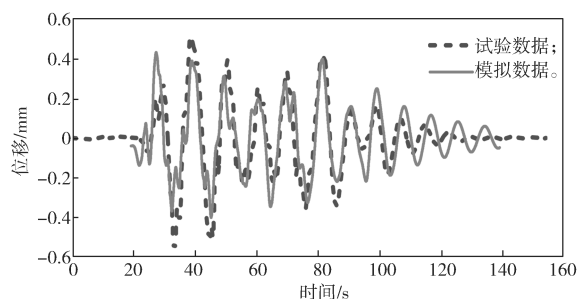


图1 振动台试验结构模型和 CANNY 模型

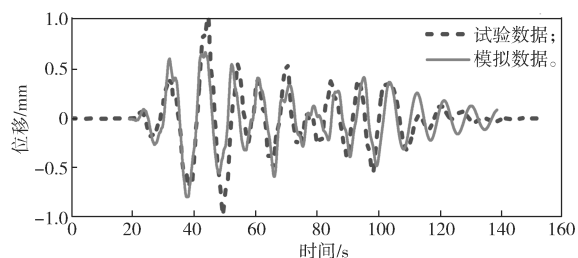
Fig. 1 Structural model and CANNY model for shaking table tests



a) 7度小震



b) 7度中震



c) 7度大震

图2 不同烈度下位移时程比较结果图

Fig. 2 Displacement time history comparison results under different seismic intensities

2.2 竖向不规则重力柱-核心筒结构建模

通过 YJK 软件设计典型的竖向规则 20 层和 30 层结构 YJK 模型,见图 3。图 3 所示结构中,混凝土

强度等级为 C60,纵筋和箍筋等级均为 HRB400,标准层楼面恒载为 5.0 kN/m^2 ,活载为 2.0 kN/m^2 。梁、柱和剪力墙截面的尺寸如表 1 所示,有限元建模和参数设置同 2.1 节。经过 YJK 和 CANNY 软件计算得到的 20 层结构基本自振周期分别为 0.876 s 和 0.903 s ,相对误差为 3.06% ; 30 层结构自振周期分别为 1.369 s 和 1.398 s ,相对误差为 2.10% ,这一结果说明结构模型设计较为合理。

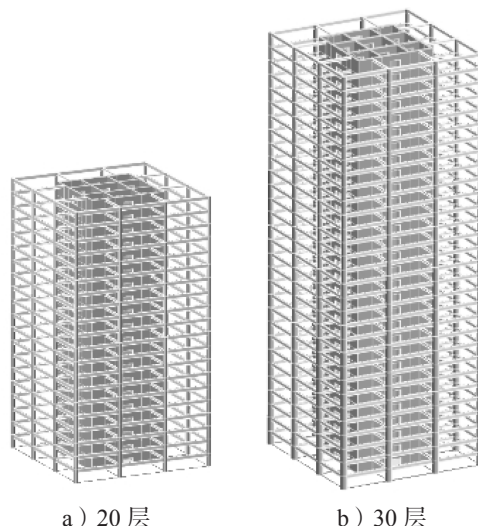


图3 20层和30层竖向规则 YJK 模型

Fig. 3 20- and 30-story vertical regular model using YJK

表1 梁、柱和剪力墙截面尺寸

Table 1 Sectional dimensions of beams, columns and shear walls

模型	楼层	重力柱的钢管 外内径 / (mm × mm)	梁截面尺寸 / (mm × mm)		墙厚 /mm	
			内梁	外梁	内墙	外墙
20 层	1~5	1 200 × 1 140	300 × 650	300 × 1 100	400	400
	6~10	1 200 × 1 140	300 × 650	300 × 1 100	400	350
	11~15	1 000 × 940	300 × 650	300 × 1 100	250	300
	16~20	900 × 850	300 × 650	300 × 1 100	250	300
30 层	1~5	1 800 × 1 710	300 × 750	300 × 1 100	850	500
	6~10	1 800 × 1 710	300 × 750	300 × 1 100	750	500
	11~15	1 600 × 1 520	300 × 650	300 × 1 100	550	400
	16~20	1 400 × 1 330	300 × 650	300 × 1 100	450	400
	20~25	1 200 × 1 140	300 × 650	300 × 1 100	400	400
	26~30	1 200 × 1 140	300 × 650	300 × 1 100	400	350

《高层建筑混凝土结构技术规程》^[12] 第 3.5.2 条规定高层建筑结构侧向刚度比的计算公式如下:

$$\gamma = \frac{V_i \Delta_{i+1} \cdot h_i}{V_{i+1} \Delta_i \cdot h_{i+1}} \quad (1)$$

式中: V_i 、 V_{i+1} 分别为第 i 层和第 $i+1$ 层的地震剪力标准值; Δ_i 、 Δ_{i+1} 分别为第 i 层和第 $i+1$ 层在地震作用标准值作用下的层间位移; h_i 、 h_{i+1} 分别为第 i 层和第 $i+1$ 层的层高。

规范中规定对于结构底部的嵌固层,该比值不宜小于 1.5,因小于 1.5 时为竖向不规则结构。

在 YJK 软件中,通过改变图 4 模型的底层剪力墙和钢管混凝土柱截面尺寸实现竖向不规则,采用式(1)计算,依次将底层刚度与相邻上层刚度的比值(以下简称竖向不规则比率 γ)调整到 1.7, 1.5, 1.3, 1.1, 0.9, 如图 4 所示。完成模型设计后,采用 CANNY 软件建立相应的竖向不规则有限元分析模型。

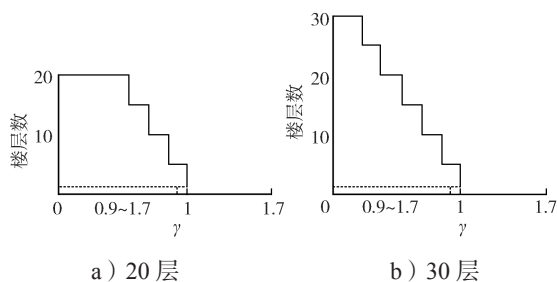


图 4 20 层和 30 层结构刚度分布示意图

Fig. 4 Structural stiffness distribution diagram for 20-and 30-story structures

3 地震动输入与分析方法

3.1 地震动输入

震害调查表明,近断层速度脉冲地震动对结构有显著破坏性。随机选取 10 条近断层速度脉冲地震动记录(见表 2),编号为 P1~P10。

表 2 选取的 10 条速度脉冲型地震动记录

Table 2 Ten selected pulse-like ground motion records

名称	地震事件	记录台站	PI
P1	Imperial Valley-06	EC Meloland Overpass FF	1.00
P2	Imperial Valley-06	El Centro Array #11	0.92
P3	Imperial Valley-06	El Centro Array #3	1.00
P4	Landers	Lucerne	1.00
P5	Landers	Yermo Fire Station	1.00
P6	Chi-Chi, Taiwan	TCU031	1.00
P7	Chi-Chi, Taiwan	TCU068	1.00
P8	Chi-Chi, Taiwan	TCU087	1.00
P9	Chi-Chi, Taiwan	TCU098	0.97
P10	Chi-Chi, Taiwan-06	CHY101	1.00

脉冲特性采用 Baker 定义的 PI 进行表征^[13],其中, $0.85 \leq PI \leq 1.00$ 为强速度脉冲地震效应区间, $0 \leq PI \leq 0.15$ 为非速度脉冲地震效应区间。再选取 10 条非脉冲地震记录,编号为 N1~N10,详细的地震记录数据参见文献[13],此处不再列出。为强调地震作用的随机性和不确定性,表中所列均采用原始加速度记录。以下各图中“P”和“N”分别表示速度脉冲地震和非速度脉冲地震工况(分别简称脉冲工况和非脉冲工况)。

3.2 地震动分析方法

选取 3.1 节的脉冲型和非脉冲型地震记录结果作为地震动输入,采用 CANNY 软件对 2.2 节的竖向不规则新型体系进行非线性动力时程分析。分析中考虑了 5 种竖向不规则比率,分别为 1.7, 1.5, 1.3, 1.1, 0.9; 20 条地震记录(10 条速度脉冲型地震记录和与其对应的 10 条非速度脉冲型地震记录)。其中地震作用输入方向为 y 向,峰值地面加速度考虑为 $0.5g$,以使结构进入充分的弹性反应阶段。数值分析方法采用 Newmark-Beta 法,采用瑞雷阻尼,对应第一、二阶阻尼比均设置为 0.05。

4 弹塑性地震响应分析

因分析中发现脉冲和非脉冲工况下各条地震波作用下,20 和 30 层竖向不规则结构的地震响应规律类似,故以下通过取脉冲和非脉冲工况下 10 条波的平均值深入分析 20 层和 30 层结构的地震响应。

4.1 竖向不规则和速度脉冲对层间位移角的影响

图 5 给出了脉冲工况和非脉冲工况下不同 γ 值的 20 层和 30 层结构层间位移角 θ 的变化规律。由图 5a、b、d 可以得知,20 层结构和 30 层结构的层间位移角 θ 均随着 γ 值的减小而增大(曲线外扩),但是图 5e 表现出不同的曲线内收现象。为了进一步探究其定量影响结果,取两种工况下各曲线的最大值(即最大层间位移角 $\theta_{\max}$)进行分析,得到图 5c 和 f。由图 5c 和 f 可知,脉冲工况下的 $\theta_{\max}$ 要远大于非脉冲工况下的对应值。当 γ 取 0.9 时,20 层结构和 30 层结构的脉冲和非脉冲工况下的 $\theta_{\max}$ 比值分别达 1.80 和 1.90。同时, $\theta_{\max}$ 随着 γ 的减小有增大的趋势。例如,脉冲工况下 20 层和 30 层结构随着 γ 由 1.7 减小到 0.9, $\theta_{\max}$ 分别增大了 58.33% 和 19.81%。这表明底层刚度的减小将会使得结构产生更大的位移需求。但是,30 层结构的非脉冲工况下的 $\theta_{\max}$ 值随着 γ 值的减小反而略有减小。为探究其原因,在图 5f 中同时给出其底层层间位移角 θ_1 ,发现 θ_1 随着 γ 的减小而增大,这表明底层刚度减小会导致底层变形增大,符合理论分析结果。从能量平衡的观点分析,因为地震输入总能量不变,底层变形增大可能会导致底层的耗能增加,进一步会使得其它层的耗能减小,故有可能间接导致最大层间位移反而减小。总体上来说,竖向不规则比率将使结构产生更大的位移需求,鉴于地震的复杂性,也可能使最大变形反而减小。且速度脉冲工况的影响更显著,在结构抗震设计中应该充分重视两种因素导致的变形放大效应。

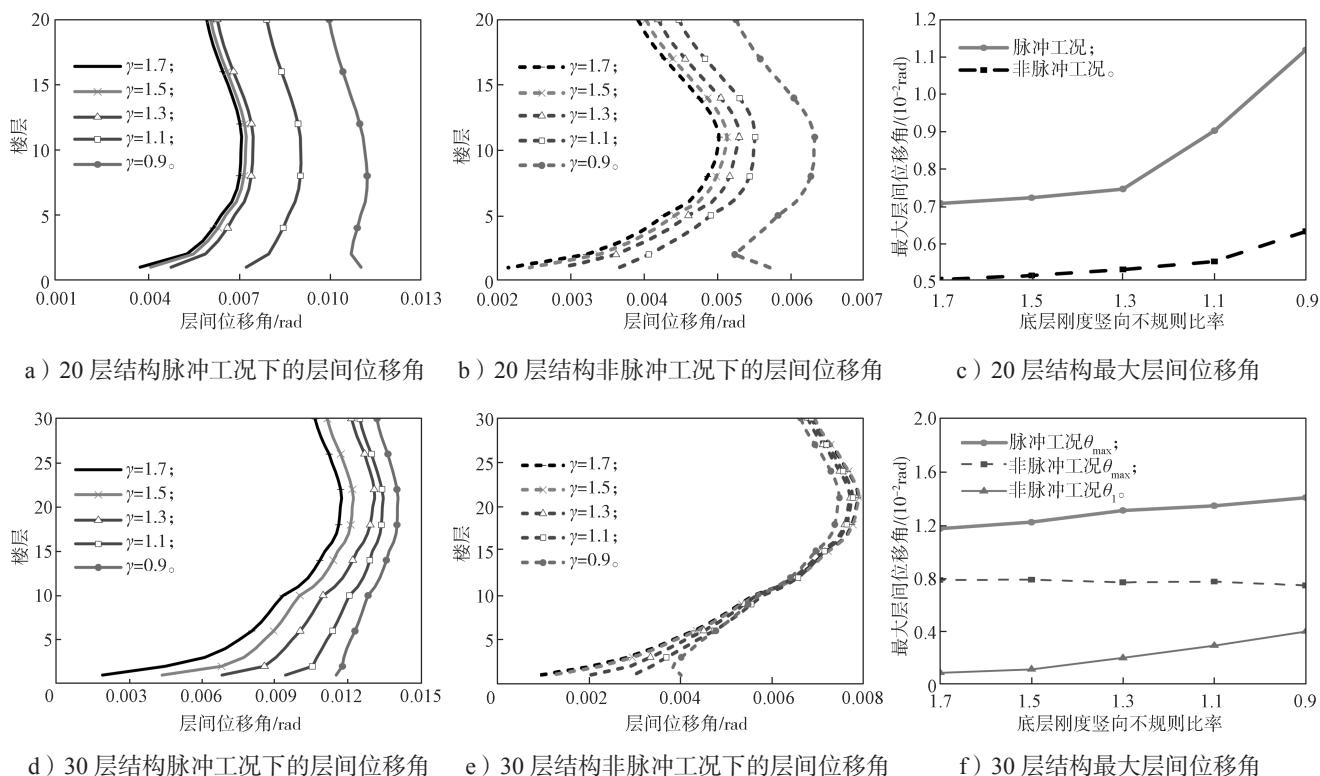


图5 竖向不规则比率对20和30层结构层间位移角的影响

Fig. 5 Effect of vertical irregularity ratio on inter-story displacement angles of 20- and 30-story structures

4.2 竖向不规则和速度脉冲对层间剪力的影响

不规则比率 γ 的20层结构和30层结构的层间剪力 V 的变化规律。

图6给出了脉冲工况和非脉冲工况下,不同竖向

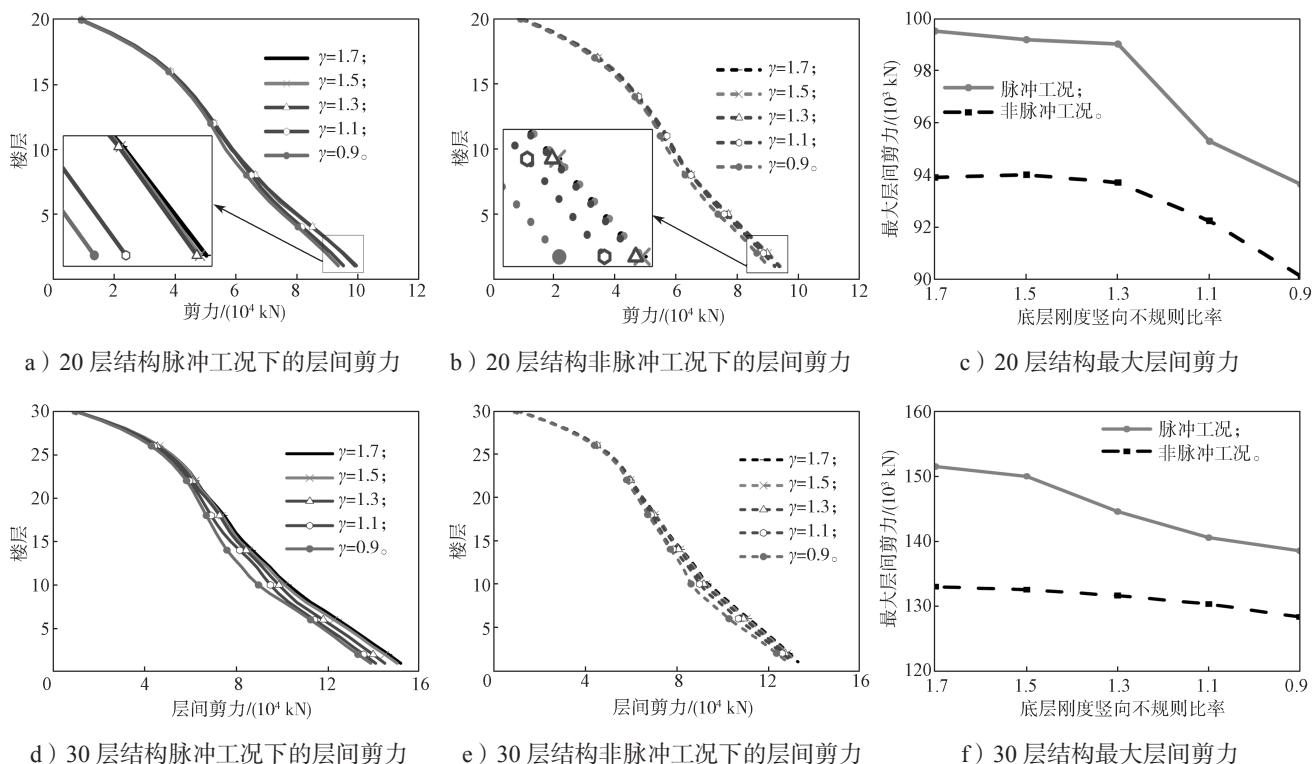


图6 竖向不规则比率对20和30层结构层间剪力的影响

Fig. 6 Effect of vertical irregularity ratio on inter-story shear force of 20- and 30-story structures

由图 6a、b、d、e 可以得知, 20 层和 30 层结构的层间剪力 V 均随着 γ 值减小而减小 (曲线内收)。为了进一步探究其定量影响, 取两种工况下各曲线的最大值 (即最大层间剪力 $V_{\max}$) 进行分析, 得到图 6c 和 f。由图 6c 和 f 可知, 脉冲工况下的 $V_{\max}$ 略微大于非脉冲工况下的对应值。当 γ 取 1.3 时, 20 层结构和 30 层结构的脉冲和非脉冲工况下的 $V_{\max}$ 比值达到 1.06 和 1.10。同时, $V_{\max}$ 随着 γ 值的减小有略微减小的趋势。

例如, 脉冲工况下 20 层结构和 30 层结构随着 γ 值由 1.7 减小到 0.9, $V_{\max}$ 分别减小了 5.89% 和 8.57%, 而非脉冲工况下分别减小了 4.03% 和 3.50%。这表明底层刚度减小虽然对位移有显著影响, 但是对剪力的影响不大。

4.3 竖向不规则和速度脉冲对层间倾覆力矩的影响

图 7 给出了脉冲和非脉冲工况下不同 γ 值的 20 层和 30 层结构层间倾覆力矩 M 的变化规律。

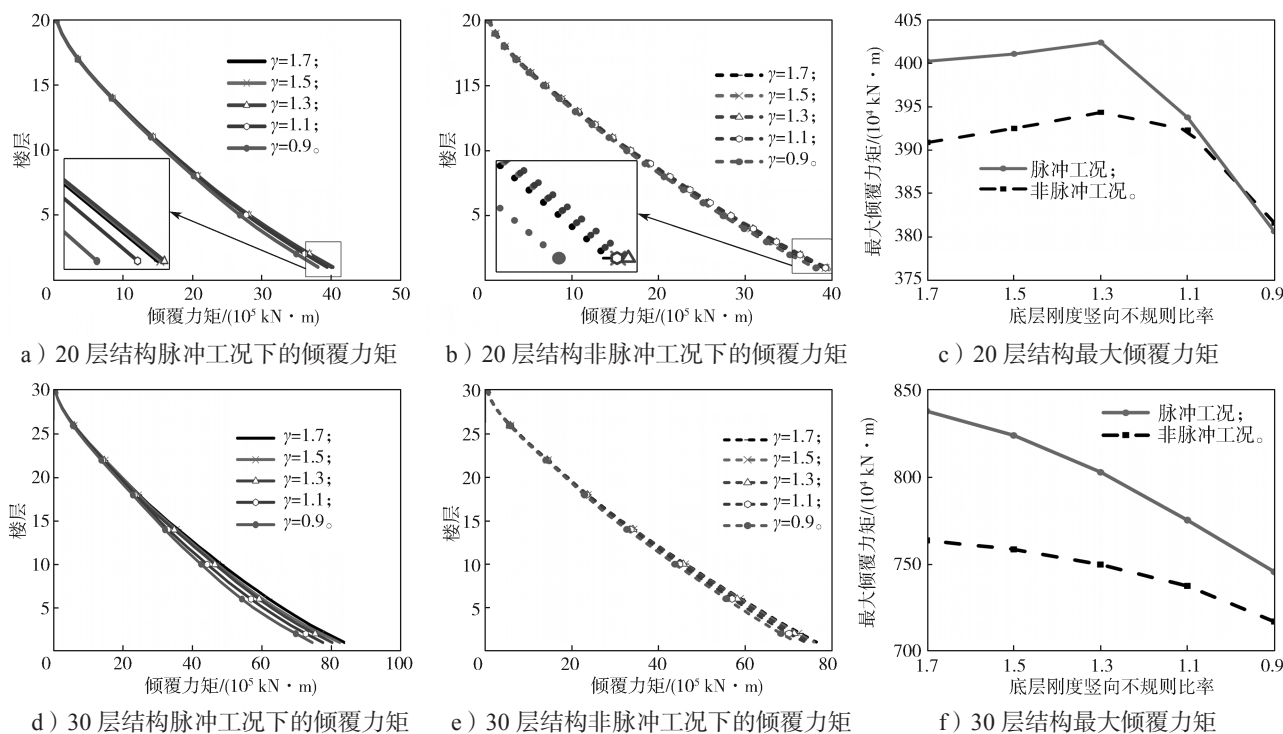


图 7 竖向不规则比率对于 20 和 30 层结构层间倾覆力矩的影响

Fig. 7 Effect of vertical irregularity ratio on the inter-story overturning moment of 20- and 30-story structures

由图 7a、b、d、e 可知, 20 层和 30 层结构的层间倾覆力矩 M 均随 γ 的减小而略减小, 与层间剪力变化规律类似。取最大层间倾覆力矩 $M_{\max}$ 进行分析, 得到图 7c 和 f。由图可知, 脉冲工况下的 $M_{\max}$ 要略大于非脉冲工况下的对应值。当 γ 取 1.3 时, 20 层和 30 层结构脉冲和非脉冲工况下 $M_{\max}$ 的比值达到 1.02 和 1.07。同时, $M_{\max}$ 随着 γ 的减小有减小的趋势。例如, 脉冲工况下 20 层和 30 层结构随着 γ 由 1.7 减小到 0.9, $M_{\max}$ 减小了 5.41% 和 11.02%, 而非脉冲工况下分别减小了 3.24% 和 6.10%。

5 结论

本文研究了速度脉冲型地震和竖向不规则耦合条件对新型重力柱-核心筒结构弹塑性地震响应的影响规律, 主要结论如下:

1) 各楼层层间位移角随竖向不规则比率的减小

而增大, 而层间剪力则表现出相反的变化趋势。例如, 脉冲工况下 20 层和 30 层结构随着 γ 由 1.7 减小到 0.9, $\theta_{\max}$ 增大了 58.33% 和 19.81%, 而 $V_{\max}$ 减小了 5.89% 和 8.57%。脉冲工况下的 $\theta_{\max}$ 要远大于非脉冲工况下的对应值。当 γ 取 0.9 时, 20 层和 30 层结构脉冲和非脉冲工况下 $\theta_{\max}$ 的比值达 1.80 和 1.90, 而当 γ 取 1.3 时, 20 层和 30 层结构脉冲和非脉冲工况下 $V_{\max}$ 的比值为 1.06 和 1.10。

2) 各楼层层间倾覆力矩随竖向不规则比率的减小而减小, 脉冲工况下 20 层和 30 层结构随着 γ 由 1.7 减小到 0.9, $M_{\max}$ 减小了 5.41% 和 11.02%, 而非脉冲工况下分别减小了 3.24% 和 6.10%。当 γ 取 1.3 时, 20 层和 30 层结构脉冲和非脉冲工况下 $M_{\max}$ 的比值达 1.02 和 1.07, 脉冲工况下的 $M_{\max}$ 要略大于非脉冲工况下的对应值。

3) 20 层和 30 层重力柱-核心筒结构算例表明,

竖向不规则比率一定时,脉冲工况下层间位移角、层间剪力和层间倾覆力矩均高于非脉冲工况下的对应值。同时,层间位移角随竖向不规则比率的减小而急剧增大,而层间剪力和倾覆力矩则表现出略微减小的变化趋势。这说明底层竖向不规则布置有明显的变形放大效应,结构设计时应重点关注。

参考文献:

- [1] 补国斌. 速度脉冲强震作用下竖向不规则结构抗震强度需求研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2012.
BU Guobin. Seismic Strength Demand of Vertically Irregular Structures Subjected to Pulse-Like Ground Motions[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2012.
- [2] 周靖, 罗高杰, 赵炼恒. 速度脉冲地震作用下竖向不规则RC结构抗震位移需求分析[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2010, 32(3): 55-61.
ZHOU Jing, LUO Gaojie, ZHAO Lianheng. Seismic Displacement of RC Structure with Vertically Irregular Structures Subjected to Pulse-Like Ground Motions[J]. Natural Science Journal of Xiangtan University, 2010, 32(3): 55-61.
- [3] SARKAR P, PRASAD A M, MENON D. Vertical Geometric Irregularity in Stepped Building Frames[J]. Engineering Structures, 2010, 32(8): 2175-2182.
- [4] 周靖, 补国斌, 方小丹. 速度脉冲地震作用下竖向不规则结构位移延性需求分析[J]. 土木工程学报, 2010, 43(增刊1): 148-155.
ZHOU Jing, BU Guobin, FANG Xiaodan. Seismic Displacement Ductility Demand of Vertically Irregular Structures Subjected to Velocity Pulse-Like Ground Motions[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(S1): 148-155.
- [5] 罗高杰. 速度脉冲强震作用下竖向不规则RC框架结构易损性研究[D]. 湘潭:湘潭大学,2011.
LUO Gaojie. Fragility Analysis for Vertical Irregular Reinforced Concrete Frame Structures Subjected to Pulse-Like Ground Motions[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2011.
- [6] 程浩, 赵杨. 近断层脉冲型地震作用下BRB减震高层建筑结构抗震性能分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊1): 868-874.
CHENG Hao, ZHAO Yang. Seismic Reduction Analysis of High-Rise Building with Buckling Restrained Braces Under Near-Fault Pulse-Like Ground Motions[J]. Building Structure, 2021, 51(S1): 868-874.
- [7] 贾俊峰, 杜修力, 韩强. 近断层地震动特征及其对工程结构影响的研究进展[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 1-12.
JIA Junfeng, DU Xiuli, HAN Qiang. A State-of-the-Art Review of Near-Fault Earthquake Ground Motion Characteristics and Effects on Engineering Structures[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 1-12.
- [8] 周靖, 方小丹, 曾繁良. 超高层钢管混凝土重力柱-混凝土核心筒结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(1): 1-14.
ZHOU Jing, FANG Xiaodan, ZENG Fanliang. Shaking Table Test of Super-High-Rise Concrete-Filled Steel Tube Gravity Column-Concrete Core Tube Structure[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 1-14.
- [9] 补国斌, 马晓宇, 沈华, 等. 速度脉冲强震下偏心重力柱-核心筒体系的抗震性能研究[J]. 工程力学, 2022. doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.02.0153.
BU Guobin, MA Xiaoyu, SHEN Hua, et al. Seismic Behavior of Eccentric Gravity Column-Core Wall System Subjected to Pulse-Like Ground Motions[J]. Engineering Mechanics, 2022. doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2022.02.0153.
- [10] 马晓宇, 补国斌, 熊浩然, 等. 速度脉冲地震下偏心重力柱-核心筒结构的弹塑性地震响应分析[J]. 湖南工业大学学报, 2022, 36(2): 8-14, 33.
MA Xiaoyu, BU Guobin, XIONG Haoran, et al. An Elastoplastic Seismic Response Analysis of Eccentric Gravity Column-Core Tube Structure Under Velocity Pulse Earthquake[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2022, 36(2): 8-14, 33.
- [11] 李康宁, 洪亮. 结构三维弹塑性分析方法及计算机程序CANNY[J]. 四川建筑科学研究, 2001, 27(4): 1-6.
LI Kangning, HONG Liang. CANNY Software for Elastic & Plastic Analysis of 3-Dimensional Structure[J]. Building Science Research of Sichuan, 2001, 27(4): 1-6.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 高层建筑混凝土结构技术规程: JGJ 3—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011: 15.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building: JGJ 3—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011: 15.
- [13] BAKER J W. Quantitative Classification of Near-Fault Ground Motions Using Wavelet Analysis[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2007, 97(5): 1486-1501.

(责任编辑: 廖友媛)