

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20201228006

# 基于增量动力分析的近场框架结构楼层加速度 响应研究\*

王健泽<sup>1</sup>, 钱雨凡<sup>2</sup>, 戴靠山<sup>1</sup>, 徐军<sup>1</sup>

(1. 四川大学土木工程系, 四川 成都 610065; 2. 张家港市建筑安全监督站, 江苏 苏州 215600)

**摘要:** 地震作用一般可分解为两个水平分量和一个竖向分量。近场地震的竖向分量较大, 但水平与竖向地震动共同作用下楼层组合加速度响应的研究鲜有研究。以三个不同高度的规则钢框架结构作为研究对象, 选择与竖向目标谱匹配的竖向地震动及对应的水平向地震动共同作为地震输入, 定义楼层水平和竖向绝对加速度的SRSS值为楼层组合加速度, 研究结构最大水平加速度与组合加速度的比值沿着楼层高度的变化趋势。随后开展增量动力分析, 经KS检验, 发展了最大水平加速度与组合加速度比值的超越概率模型, 分析水平加速度占比与地震强度的关系。最后, 提出水平加速度占比沿结构高度分布的经验拟合公式。结果表明, 随着结构楼层相对位置高度的增加和地震强度的增大, 水平加速度占比逐渐减小, 且近场非脉冲地震动下的水平加速度占比大于脉冲地震动。提出的拟合公式能够较好地反映水平加速度占比的变化趋势。

**关键词:** 钢框架结构; 近断层地震动; 楼层加速度; 增量动力分析; 竖向地震作用

**中图分类号:** TU352.11   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-2132(2022)04-0835-09

## Floor Acceleration Response on Near-fault Frame Structures based on Incremental Dynamic Analysis Method

WANG Jianze<sup>1</sup>, QIAN Yufan<sup>2</sup>, DAI Kaoshan<sup>1</sup>, XU Jun<sup>1</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Building Safety Supervision Station of Zhangjiagang, Suzhou 215600, China)

**Abstract:** Earthquake effect is usually simplified as two horizontal components and one vertical component. The vertical component of near-fault earthquake together with horizontal components is influential to floor responses of building structures, but such influence has been rarely studied. Three special steel moment-resisting frames with different heights are focused. Vertical ground motions and corresponding horizontal ground motions matching the vertical design spectrum are selected as the seismic inputs. The obtained SRSS value of horizontal and vertical floor accelerations is defined as the combined floor acceleration. The variation of the  $A_{hmax}/A_{max}$  ratio (i.e. the maximum horizontal acceleration

\* 收稿日期:2020-12-28;修回日期:2021-04-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51878426,U1710111)、成都市科技项目(2019-GH02-00081-HZ)、四川省自然科学基金项目(2022NSFSC1159,2022NSFSC0988)资助

作者简介:王健泽(1990—),男,助理研究员。主要从事土木工程防灾减灾方面的研究。E-mail:jzwang@scu.edu.cn

通讯作者:戴靠山(1977—),男,教授,博导。主要从事土木工程防灾减灾方面的研究。E-mail:kdai@scu.edu.cn

to the combined acceleration) along the height is studied. In addition, incremental dynamic analysis is carried out on the considered three buildings. The probability model which is used to describe the relationship between the  $A_{hmax}/A_{max}$  ratio and earthquake intensity is developed and verified by KS test. Finally, the empirical fitting formula of the  $A_{hmax}/A_{max}$  ratio along the structure height is proposed. The results presented in this study show that with the increase of relative height and earthquake intensity, the  $A_{hmax}/A_{max}$  ratio decreases gradually. Under the action of near-fault non-pulse ground motions, the  $A_{hmax}/A_{max}$  ratio is larger than that under pulse ground motions. The developed empirical formula can perfectly predict the distribution of the  $A_{hmax}/A_{max}$  ratios.

**Keywords:** steel moment-resisting frames; near-fault ground motions; floor acceleration; incremental dynamic analysis; vertical seismic effect

## 引 言

随着社会经济的发展,建筑物内的非结构构件、精密技术仪器等设备的价值可能会超过建筑结构本身的建造成本,由地震作用导致的非结构构件的经济损失逐渐引起人们关注<sup>[1-2]</sup>。例如,1987年发生的 Whittier Narrows 地震造成了将近3亿6千万美金经济损失,大部分是非结构构件部分破坏损伤及修复费用<sup>[3]</sup>。《建筑抗震韧性评价标准》<sup>[4]</sup>与 FEMA P58<sup>[5]</sup>中均采用楼层绝对加速度峰值(PFA)判别加速度敏感型非结构构件(如吊顶、管道、电梯等)在地震作用下的损伤状态。值得注意的是,上述规范仅基于楼层水平加速度响应结果进行损伤评估,其充分性有待研究。

国外学者 Y. Bozorgnia 等<sup>[6-7]</sup>的研究表明,随着震中距的减小,地震动竖向和水平向加速度峰值的比值( $PGA_v/PGA_h$ )不断的增大,即近断层地震动的竖向分量较大,在北岭地震中甚至出现了地面竖向加速度峰值超过地面水平加速度峰值的情况。强竖向地震分量对非结构构件造成的损伤值得关注,S. Furukawa 等<sup>[8]</sup>对包含医疗设备的四层钢筋混凝土隔震结构进行了足尺振动台实验,经单独水平输入与水平加竖向同时输入工况的试验结果对比发现,尽管基底隔震技术有效减小了楼层水平加速度响应,但无法控制竖向加速度响应,部分非结构构件与医疗设备在竖向地震作用下发生损坏。E. Lim 等<sup>[9]</sup>将非结构构件和主体结构进行整体建模,分析三向地震作用下非结构构件的地震响应,结果表明竖向地震作用对楼板跨中位置处非结构构件

的影响不可忽略。L. Moschen 等<sup>[10-11]</sup>研究分析了不同高度结构在不同位置处的楼层竖向绝对加速度放大效应,并与楼层水平绝对加速度放大效应对比分析,发现竖向加速度放大效应明显大于水平加速度。然而,对于近断层非脉冲和脉冲地震动,其竖向地震作用对楼层加速度响应的影响,还未有系统性的讨论研究。

本文为了综合考虑近断层场地建筑物受水平和竖向地震共同作用下的楼层加速度响应,提出了楼层组合加速度概念和水平加速度占比的概率模型,通过对钢框架结构进行增量动力分析得到了相应的水平加速度占比超越概率易损性曲线。此外,取楼层水平加速度占比的对数概率分布中位值为样本点进行经验公式拟合,借助该拟合公式可通过结构高度和楼层水平加速度等信息计算出楼层组合加速度用于非结构构件的损失评估,对工程实践具有借鉴意义。

## 1 楼层组合加速度及最大水平加速度占比定义

在双向地震输入下,结构楼面某一时刻同时受到水平加速度和竖向加速度的作用,对于加速度敏感型非结构构件,水平加速度会使其摆动或滑动,竖向加速度会使其上下弹跳或竖向连接破坏<sup>[8-9]</sup>。在水平和竖向加速度的共同作用下非结构构件会产生更为复杂的地震响应。

如图1所示,假定在 $t$ 时刻楼层水平加速度为 $PFA_h(t)$ ,楼层竖向加速度为 $PFA_v(t)$ ,以两者的平方和开平方根作为该时刻的楼层组合加速度

$PFA_t(t) = \sqrt{PFA_h(t)^2 + PFA_v(t)^2}$ 。值得注意的是,欧洲设计规范<sup>[12]</sup>规定了水平与竖向地震效应组合时可采用SRSS方法。基于上述楼层组合加速度将竖向加速度占比定义为楼层组合加速度最大时刻对应的楼层竖向加速度占该最大组合加速度的比值,即  $R_p(A_v/A_{max}) = PFA_{v,t}/PFA_{max,t}$ 。由于非结构构件损失评估中将楼层最大水平加速度作为损伤指标,为了对比最大水平加速度与最大组合加速度,同样采用二者的比值  $R_p(A_{h,max}/A_{max}) = PFA_{h,max}/PFA_{max}$  进行分析,需要注意的是两个加速度峰值不一定在同一时刻出现。

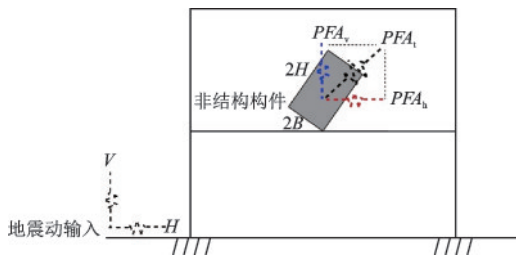


图1 浮放式设备受楼层加速度作用示意

Fig.1 A scheme of free-standing equipment excited by floor acceleration

假定某浮放式设备质量为  $m$ , 长为  $2B$ , 高为  $2H$ , 底部水平反力为  $f_x$ , 垂直反力为  $f_y$ , 在地震作用下设备保持静止时, 满足下列平衡方程:

$$f_y = mg + m \cdot PFA_v \quad (1)$$

$$f_x = \mu f_y = m \cdot PFA_h \quad (2)$$

式中,  $\mu$  为设备所在接触面的摩擦系数。

当设备的倾覆力矩大于恢复力矩时会产生摇晃, 此时满足以下条件:

$$|f_x H| > |f_y B| \quad (3)$$

由式(1)~式(3)可得物体产生摇晃的条件为:

$$\left[ \frac{PFA_h}{PFA_v + g} > B/H \text{ 且 } \mu > B/H \right] \quad (4)$$

因此, 竖向的楼层竖向加速度会导致设备更易产生晃动甚至倾覆。此外, 竖向地震力还可能导致设备竖向连接破坏和管道竖向拔出破坏<sup>[13]</sup>, 不再详述。下文就不同地震强度下楼层竖向与水平加速度的占比与相应超越概率曲线进行研究, 探讨楼层水平、竖向与组合加速度的变化规律。

## 2 结构设计信息与数值建模

本文研究采用4层、8层和20层钢框架结构作为研究对象, 按照 ASCE/SEI 7-16<sup>[14]</sup>、AISC 341-16<sup>[15]</sup>、AISC 360-16<sup>[16]</sup> 规范设计, 抗侧力体系按照 AISC 358-16<sup>[17]</sup> 中提供的考虑了翼缘削弱型梁铰截面 (reduced-beam-section RBS) 的特殊抗弯框架体系 (special moment frames SMF) 的相关要求进行设计, 抗侧力抗弯框架布置于结构边跨。其他结构部分按抗竖向力体系进行设计, 三个结构的抗竖向力体系的柱和梁截面均采用 W14×90 和 W24×55, 内部抗竖向力框架的连接采用常规单剪板梁柱连接, 4层结构布置信息如图2所示, 8层和20层结构的布置信息和4层结构相似, 仅层数不同。在抗震设计中, 假定结构所在位置位于北美洲地震活跃地区, 场地条件类型为D类(硬土地), 对应的设计地震加速度反应谱平台段对应值  $S_{Ds} = 0.96g$ 。结构功能重要性分类为II类, 重要性系数取为1.0。

本文基于 OpenSees 开源有限元软件<sup>[18]</sup> 建立结构数值模型, 梁和柱的模拟采用弹性梁/柱单元, 梁柱均采用H型钢截面。梁柱构件端部塑性铰采用弹簧单元模拟, 弹性刚性杆用于模拟节点刚域, 塑性铰骨架曲线参数按 D.G. Lignos 等<sup>[19]</sup> 的建议取值。模型建立抗重力简化摇摆柱以考虑抗竖向力体系在重力作用下的  $P-\Delta$  效应。抗重力简化摇摆柱的柱顶节点与同一标高处的框架节点采用刚性隔板命令使各节点在水平向平动和绕竖轴转动的运动一致。钢的弹性模量取值为  $E = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ , 材料的屈服强度为 345 MPa, 阻尼采用瑞利阻尼, 瑞利阻尼参数按第一周期与第三周期阻尼比为 0.02 计算。为了考察楼层竖向加速度响应, 每根梁构件划分为4段并将楼层质量按实际荷载布置分配柱端节点和梁构件划分节点。以4层结构为例, 模型振型信息见表1, 具体计算模型如图2所示。

表1 结构振型信息

Table 1 Modal information

单位: s

周期	4层结构	8层结构	20层结构
水平一阶模态	1.56	2.06	3.52
竖向一阶模态	0.182	0.218	0.305

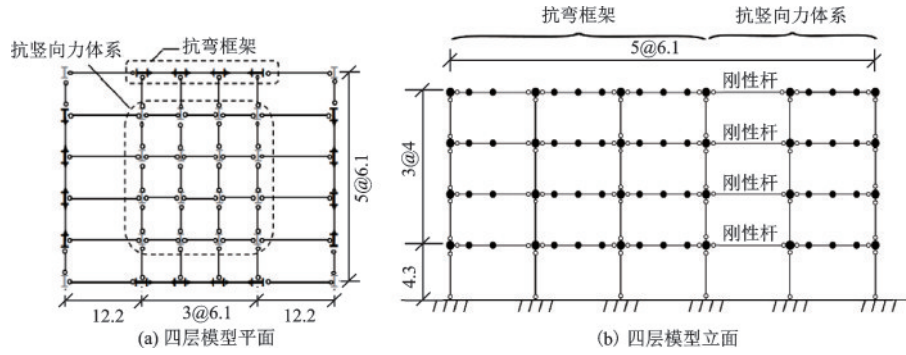


图2 4层结构模型平立面图<sup>[20]</sup> 单位: m

Fig.2 Plane and elevation view of a4-story structure<sup>[20]</sup>

### 3 近断层地震动选择

#### 3.1 竖向目标谱的定义

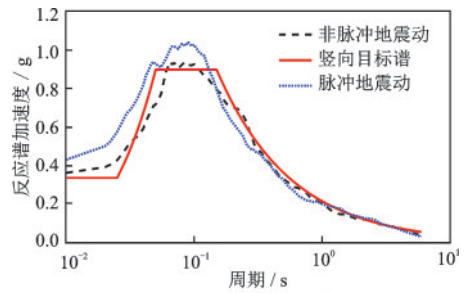
由于本文主要关注竖向地震动对楼层加速度的贡献作用,因此以竖向地震设计反应谱作为目标谱在PEER<sup>[21]</sup>地震动数据库中选取和竖向目标谱匹配的地震动,以ASCE 7-16<sup>[14]</sup>和NEHRP<sup>[22]</sup>抗震设计规程文件中提出的由水平反应谱转换为竖向反应谱的流程,定义为下列公式(5):

$$S_{a,v} = \begin{cases} 0.3C_v S_{DS}, & T_v \leq 0.025 \text{ s} \\ 20C_v S_{DS} (T_v - 0.025) + 0.3C_v S_{DS}, & 0.025 \text{ s} < T_v \leq 0.05 \text{ s} \\ 0.8C_v S_{DS}, & 0.05 \text{ s} < T_v \leq 0.15 \text{ s} \\ 0.8C_v S_{DS} (0.15/T_v)^{0.75}, & T_v > 0.15 \text{ s} \end{cases} \quad (5)$$

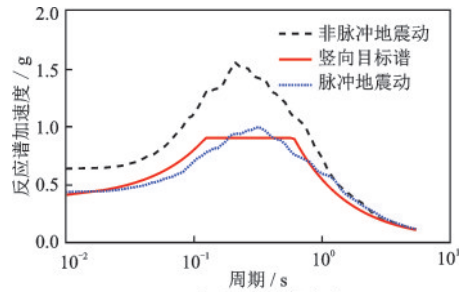
式中, $S_{a,v}$ 表示竖向加速度反应谱对应短周期平台段的值; $T_v$ 表示竖向振动周期; $S_{DS}$ 表示水平反应谱在周期 $T=0.2 \text{ s}$ 处对应的谱加速度值,为竖向调整系数,根据规范线性插值后取为1.39。

#### 3.2 选取的竖向地震动及对应的水平地震动

本文在PEER地震动数据库所选地震动满足以下特征:矩震级 $M_w$ 大于6.5级;场地类别为D类,30 m剪切波速 $180 \text{ m/s} \leq V_{30} \leq 360 \text{ m/s}$ ;震源距 $0 \text{ km} \leq R_b \leq 30 \text{ km}$ 。调幅每条地震动的竖向加速度分量,挑选在 $0.1 \text{ s}$ , $0.2T_v$ 和 $2T_v$ 三个周期点上均方差最小的脉冲地震动和非脉冲地震动各40条,控制40条地震动反应谱的均值和竖向目标谱相匹配。水平向地震分量缩比系数与竖向地震分量匹配目标谱的缩比系数一致,竖向与水平地震动反应谱均值及相应目标谱如图3所示。



(a) 竖向反应谱加速度



(b) 水平反应谱加速度

图3 选取的竖向地震动及对应水平地震动

Fig.3 Vertical and corresponding horizontal ground motions

从图4中可以看出,近场脉冲地震动水平和竖向峰值加速度的比值( $PGA_v/PGA_h$ )相比非脉冲地震动更大,其均值分别为1.18和0.64,我国规范中对竖向与水平加速度峰值的比值的定义为0.65。本文选取与图3中竖向目标谱匹配的竖向地震动,相应水平输入地震动的调幅系数与所选竖向地震动保持一致,因此脉冲天然地震动对应的水平反应谱低于目标谱,而非脉冲天然地震动对应的水平反应谱明显高于设计目标谱。

在地震动选择时,选择竖向目标谱还是水平目标谱进行匹配会影响结构楼层水平与竖向加速度响应分量。当以竖向设计谱为目标谱进行地震动匹配时,因近断层脉冲地震动 $PGA_v/PGA_h$ 比值较大,其相应的水平分量低于非脉冲地震动,从而会低估水平地震响应。而当以水平设计谱作为目标

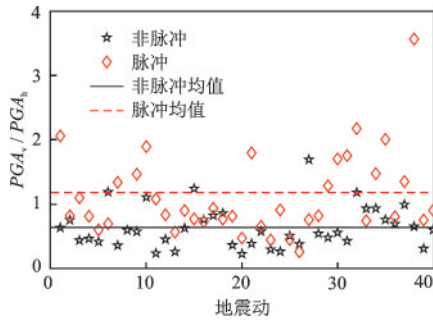


图4 地震动  $PGA_v/PGA_h$  值

Fig.4 The  $PGA_v/PGA_h$  ratios of near-fault pulse-like and non-pulse-like ground motions

谱选取地震动时,脉冲地震动的竖向加速度分量会明显大于非脉冲地震动。在建筑物地震损失风险评估工作中需要考虑近断层脉冲地震动强竖向分量的特性。

### 3.3 增量动力分析工况设定

在脉冲地震组与非脉冲地震组各40条地震动作用下,对各结构开展增量动力分析。本文将和目标谱匹配的设计地震强度作为基准,调整输入地震动的缩比系数,以10%为增量步长,考虑30%~100%。设计地震强度共8个不同地震强度工况。应用增量动力分析方法计算结构的地震响应,分析不同地震强度下结构楼层竖向和水平加速度的变化情况。

## 4 结构响应分析

如本文第1节所述,竖向加速度占比表示组合加速度最大时刻的竖向加速度占该最大组合加速度的比值,如果以最大组合加速度作为评估非结构构件地震响应的指标,则竖向加速度占比越大,说明加速度响应由竖向加速度主导。下文将对设计地震强度下结构水平与竖向加速度占比以及增量动力分析计算结果进行分析讨论。

### 4.1 设计地震下楼层水平与竖向加速度占比

从图5及图6中可以看出,对于同一结构,不同楼层的水平与竖向加速度占比呈现正相关。随着楼层相对高度(首层为相对高度0)的增加,竖向加速度占比逐渐增大。在顶层处竖向加速度占比趋近于1,即顶层处的竖向加速度远大于水平加速度,组合加速度由竖向加速度控制。脉冲地震作用

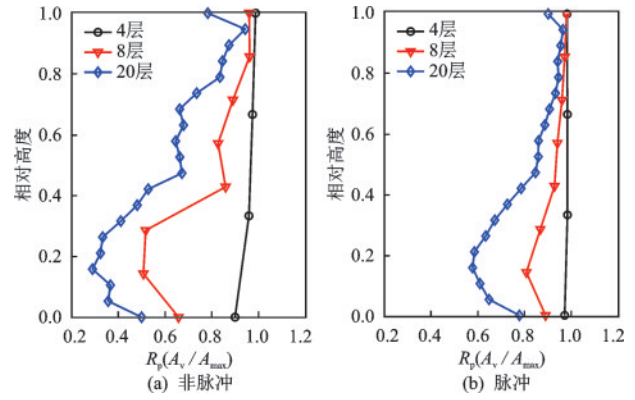


图5 不同结构竖向加速度占比  
Fig.5 Vertical acceleration ratio of different structures

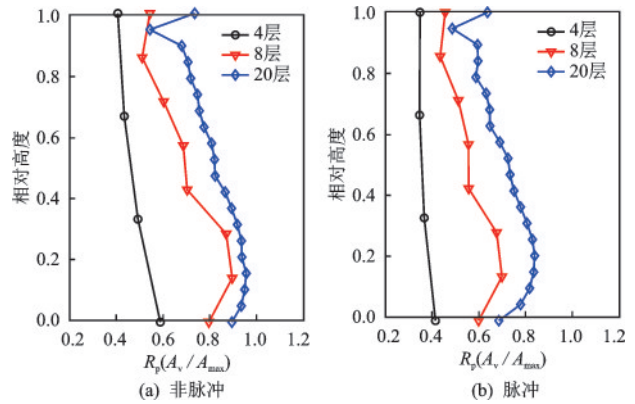


图6 不同结构最大水平加速度占比

Fig.6 Maximum horizontal acceleration ratio of different structures

下的竖向加速度占比大于非脉冲地震动,最大水平加速度占比小于非脉冲地震动,这主要是由于近断层脉冲地震动  $PGA_v/PGA_h$  的比值更大导致的。同一地震输入下,4层结构的竖向加速度占比最大,其相应的最大水平加速度占比最小,即低矮建筑因振动周期较小导致其更易受到竖向地震作用的影响,建筑内部非结构构件需考虑楼层竖向加速度的影响。

### 4.2 增量动力计算结果分析

三个不同层高结构在不同强度地震动作用下,40条地震动对应的顶层位置处最大水平加速度占比及16%、50%和84%分位值如图7所示。随着地震强度逐渐增大,水平加速度占比值逐渐减小,4层结构水平加速度占比中位值从0.62逐渐减小至0.41;8层结构从0.75逐渐减小至0.53;20层结构从0.92逐渐减小至0.74。即随着地震强度的增大,楼层竖向加速度的放大效应大于楼层水平加速度。

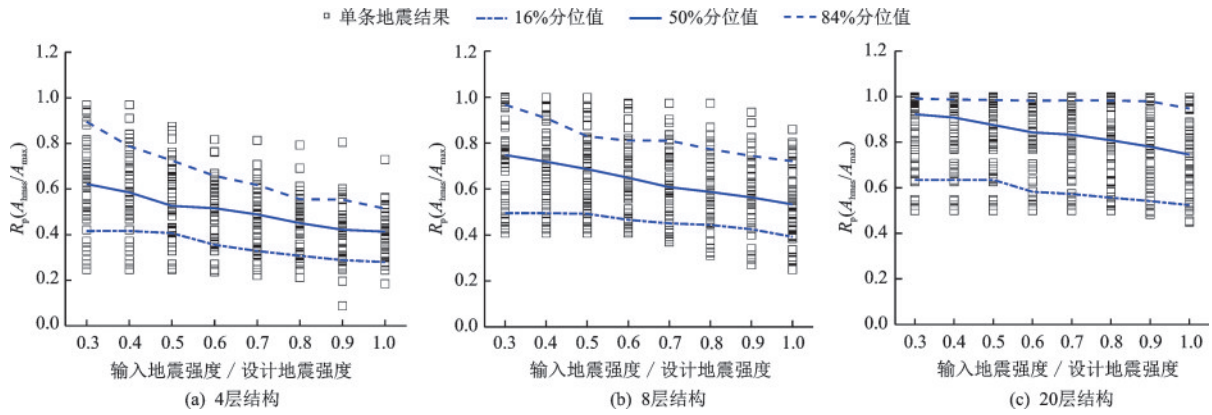


图7 不同地震强度下最大水平加速度占比

Fig.7 Maximum horizontal acceleration ratio under different intensities

图中16分位值与84分位值之间的差距可量化水平加速度占比结果的离散性,随着地震强度增大,4层和8层结构水平加速度占比的离散性逐渐减小,而20层结构结果的离散性随地震强度的变化差别不大。

在40条地震动作用下结构各层的最大水平加速度占比经K-S testing检验后均符合对数正态分布<sup>[23]</sup>,因此对水平加速度占比结果进行对数正态分布拟合,得到三个结构在不同地震动作用下水平加速度占比的超越概率曲线,如图8所示。当水平加速度占比一定时,结构高度越高,其相应的超越概率越大,即结构高度越低其最大水平加速度占组合加速度的比值较低的概率越大。此时非结构构件受到的组合加速度远大于水平加速度,这种情况下单以楼层水平加速度作为设备损伤状态的判别标准不够合理。40条地震动中,满足 $R_p(A_{hmax}/A_{max}) < 0.6$ 的地震动数量占比如图9所示。结构总高度越高, $R_p(A_{hmax}/A_{max})$ 低于0.6的占比越小,即楼层水平加速度占比越大。随着地震强度的增大,非脉冲地震作用下,4层结构占比从0.45上升至0.97,8层结构

从0.275上升至0.7,20层结构从0.125上升至0.25。换句话说,随着地震强度增加楼层竖向加速度响应的增长幅度远大于水平加速度响应的增长。脉冲

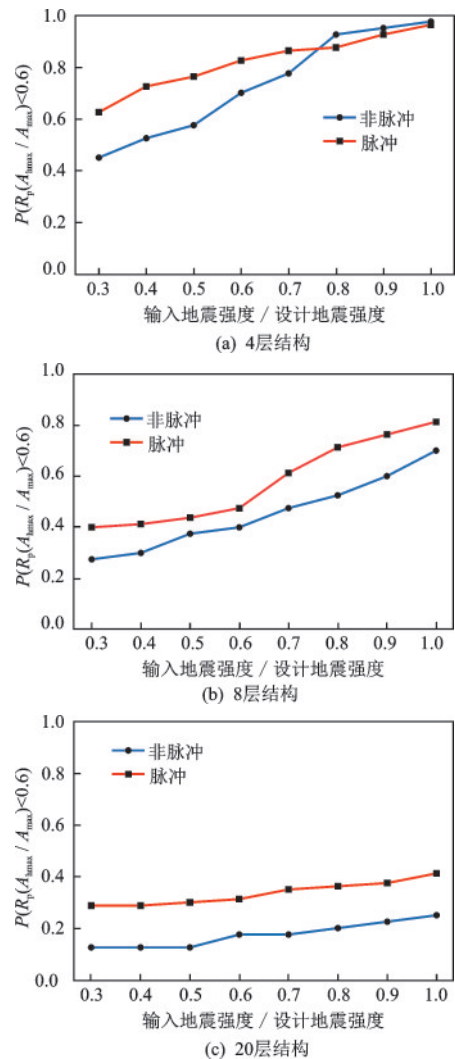


图9 水平加速度占比分布

Fig.9 Horizontal acceleration ratio distribution

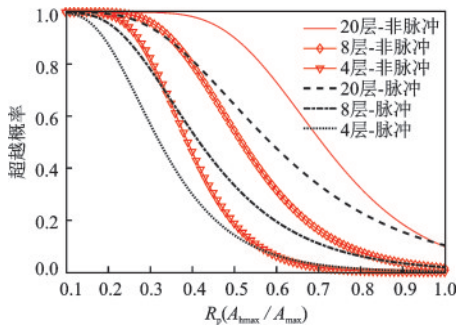


图8 不同结构顶层超越概率曲线

Fig.8 Top floor exceedance probability curve of different structures

地震作用下的变化趋势和非脉冲一致,且结果大于非脉冲地震动,表明脉冲地震动作用下的楼层水平加速度响应小于非脉冲地震动,这与水平目标谱的匹配结果一致。

图9的发现也可由图10进行佐证。由图10可以看出,当地震强度从100%减小至30%时,4层结构非脉冲地震下50%超越概率对应的最大水平加速度占比值从0.39增大为0.59;8层结构从0.52增大至0.70;20层结构从0.71增大至0.81。4层结构最大水平加速度占比的超越概率曲线受地震强度变化的影响明显大于20层结构。即结构高度越高,其楼层水平加速度占比受地震强度变化的影响越小。在超越概率一定时,非脉冲地震作用下的水平加速度占比值大于脉冲地震作用下结果。

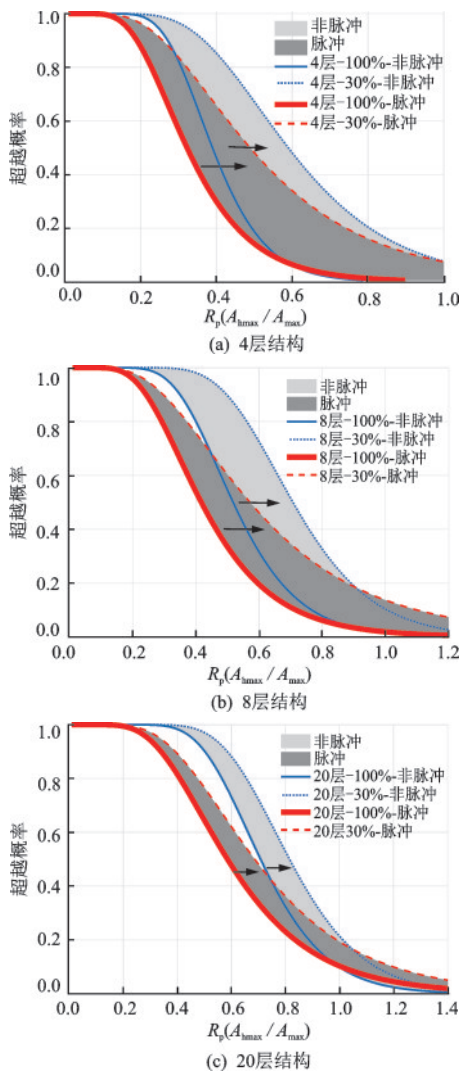


图10 不同地震强度下超越概率曲线

Fig.10 Exceeding probability curve under different earthquake intensities

## 5 基于概率模型的经验估计

工程中一般采用水平加速度作为评估非结构构件地震响应的指标,文献[24]提出反应谱方法预测楼层水平加速度响应沿高度的变化趋势,ASCE 7-16规范<sup>[14]</sup>中定义楼层水平加速度沿着楼层高度的放大系数为 $A_h=1+2z/h$ ,式中 $z$ 和 $h$ 分别为楼层对应高度及建筑总高度,但目前各国还没有统一的楼层水平加速度预测公式。在实际应用中,工程师可以通过简单的水平地震输入,求得楼层的水平加速度,但是求解楼层竖向加速度及组合加速度用于非结构构件损失评估需要补充输入竖向地震动进行结构双向或三向时程计算,工作量相对繁多和复杂。为了简化流程,本文以4、8和20层结构各层在超越概率为50%时对应的最大水平加速度占比值为样本点进行经验公式拟合,例如对于8层结构顶层,即采用图8中超越概率为0.5时所对应的 $R_0$ 为样本点。通过该拟合公式,工程师可在楼层水平加速度分析结果的基础上估计组合加速度,也可直接用经验预测公式得到首层的水平加速度占比从而得到组合加速度的分布。具体拟合公式见式(6)和(7)。

$$R_0 = -0.0026n^2 + 0.08n + 0.28 \quad (6)$$

式中, $R_0$ 表示结构首层的水平加速度占比; $n$ 表示结构的总层数,如4、8、20。

$$R = R_0(1.3e^{ax} - 0.3e^{bx}) \quad (7)$$

式中, $x$ 表示楼层相对于首层的高度,按 $x=(f-1)/(n-1)$ 确定, $f$ 表示楼层位置, $n$ 表示结构总层数,当 $n=1$ 时, $R=R_0$ ; $a$ 和 $b$ 为形状系数,对于不同层高结构可采用表2中取值。

根据上述拟合公式计算得出的曲线与原样本点的拟合情况如图11和图12所示,拟合曲线能够较好的拟合计算结果,且对于不同地震强度,对4、8、20层结构分别乘125%、115%和103%的调整系数后能够包络不同地震强度的结果。

表2 形状系数取值

Table 2 Value of shape coefficient

层数	$a$	$b$
4	-0.15	0.3
8	-0.65	-10
20	-0.60	-12

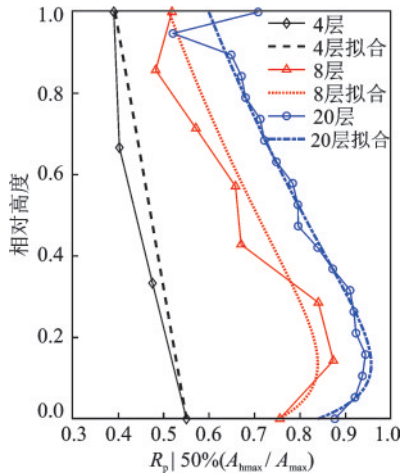


图 11 非脉冲地震下水平加速度占比拟合曲线

Fig.11 Fitting curve of horizontal acceleration ratio under non-pulse ground motions

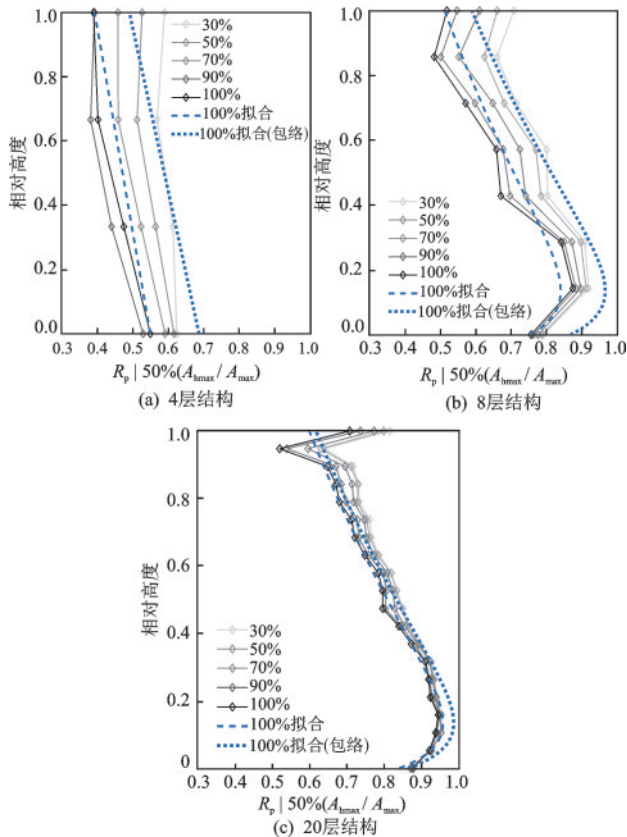


图 12 非脉冲地震下不同地震强度水平加速度占比拟合曲线  
Fig.12 Fitting curve of horizontal acceleration ratio under different non-pulse ground motion intensities

需要指出的是,不同类型结构及各国不同规范规定的楼层水平加速度变化趋势有所不同<sup>[25]</sup>,本节的拟合公式基于特定钢框架结构,对于不同结构体系类型建筑的适用性有待进一步的研究。

## 6 结 论

本文以钢框架结构为研究对象,选取近断层地震对结构进行增量动力分析,开展基于楼层加速度响应的参数化分析,并提出了水平加速度相对组合加速度的占比超越概率模型与经验拟合公式,得到以下结论:

(1) 楼层水平加速度占比与楼层所处位置、地震强度、楼层总高度等因素有关;4层结构水平加速度占比最小可低于0.4,20层结构水平加速度占比在顶层位置仅为0.6左右。低矮结构内部非结构构件应考虑楼层竖向加速度的影响,对于所有结构,较高楼层位置(如靠近顶层)的非结构构件设计需考虑楼层竖向加速度的影响。

(2) 近断层脉冲型与非脉冲型地震的竖向与水平分量  $PGA_v/PGA_h$  比值不同,且与规范<sup>[4-5]</sup>规定出入较大,当按水平或竖向目标谱进行匹配时,需保持天然地震动初始  $PGA_v/PGA_h$  比例。不建议按规范<sup>[4-5]</sup>确定竖向与水平地震动输入强度比例。

(3) 随着输入地震强度增加,竖向加速度响应的增加幅度大于水平加速度响应的增加幅度,楼层水平加速度占比减小,此时更应考虑楼层竖向加速度的影响。

(4) 文中提出的水平加速度占比经验公式能够较好的拟合与包络计算结果,具有一定参考意义。实际应用性值得进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 张令心,张明远,陈永盛,等.基于性能的非结构构件抗震设计初探[J].世界地震工程,2016,32(4):293-302. Zhang L X, Zhang M Y, Chen Y S, et al.Preliminary study on performance-based seismic design of nonstructural components [J]. World Earthquake Engineering, 2016, 32(4):293-302.(in chinese)
- [2] 孙得璋,黄勇,杨振宇,等.九寨沟7.0级地震中典型非结构构件震害特征[J].地震工程与工程振动,2019,39(1):27-34. Sun D Z, Huang Y, Yang Z Y, et al.Seismic damages of typical nonstructural components in the  $M_s$ 7.0 Jiuzhaigou earthquake[J].Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2019, 39(1):27-34.(in chinese)
- [3] Topozada T, Branum D.California earthquake history [J]. Annals of Geophysics, 2004,47(2/3):509-522.
- [4] 建筑抗震韧性评价标准:GB/T 38591—2020[S].北

- 京:国家标准化管理委员会,2020.
- [5] FEMA, Seismic performance assessment of buildings Volume 1-Methodology: FEMA P-58-1 [S]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2012.
- [6] Bozorgnia Y, Niazi M, W C K.Characteristics of free-field vertical ground motion during the Northridge earthquake[J]. Earthquake Spectra, 1995, 4(11):515-525.
- [7] Bozorgnia Y, Niazi M.Distance scaling of vertical and horizontal response spectra of the Loma Prieta earthquake[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1993, 22(8):695-707.
- [8] Furukawa S, Sato E, Shi Y, et al.Full-scale shaking table test of a base-isolated medical facility subjected to vertical motions [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2013, 42(13):1931-1949.
- [9] Lim E, Jiang L, Chou N. Dynamic response of a non-structural component with three supports in multi-directional earthquakes [J]. Engineering Structures, 2017, 150(1):143-152.
- [10] Moschen L, Medina R A, Adam C. Vertical acceleration demands on column lines of steel moment-resisting frames [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2016, 45(12):2039-2060.
- [11] Gremer N, Adam C, Medina R A, et al. Vertical peak floor accelerations of elastic moment-resisting steel frames [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2019, 17(6):3233-3254.
- [12] Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance part II: Design of structures for earthquake resistance. EN 1998-2 [S]. Brussels, Belgium: European Committee for Standardization, 2013.
- [13] 卢嘉茗,解琳琳,李爱群,等.建筑隔震金属柔性管道抗震性能试验研究[J].工程力学,2020,37(5):217-225.  
Lu J M, Xie L L, Li A Q, et al. Experiments on seismic performance of metal flexible pipes for seismically isolated buildings [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(5):217-225.(in Chinese)
- [14] ASCE7-16.Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures[S].Reston, VA: The American Society of Civil Engineers, 2016.
- [15] AISC.(2016b). Seismic provisions for structural steel buildings [S]. ANSI/AISC 341-16. Chicago: [s.n.], 2016.
- [16] AISC.(2016c). Specification for structural steel buildings[S]. ANSI/AISC 360-16. Chicago:[s.n.], 2016.
- [17] AISC.(2016a). Prequalified connections for special and intermediate steel moment frames for seismic applications [R]. ANSI/AISC 358-16. Chicago: [s.n.], 2016.
- [18] Mazzoni S, McKenna F, Scott M H, et al. OpenSees Command Language Manual [EB/OL]. [https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees\\_User](https://opensees.berkeley.edu/wiki/index.php/OpenSees_User), 2019-11-08/2022-07-08.
- [19] Lignos D G, Krawinkler H. Deterioration modeling of steel components in support of collapse prediction of steel moment frames under earthquake loading[J].Journal of Structural Engineering, 2011, 137(11):1291-1302.
- [20] Elkady A. Collapse risk assessment of steel moment resisting frames designed with deep wide-flange columns in seismic regions [D]. Canada: McGill University, 2016.
- [21] Chiou B, Darragh R, Gregor N, et al. NGA project strong-motion database[J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1):23-44.
- [22] FEMA. NEHRP recommended seismic provisions for new buildings and other structures [R]. Washington DC: Federal Emergency Management Agency, 2009.
- [23] Massey F J. The kolmogorov-smirnov test for goodness of fit[J]. Publications of the American Statistical Association, 1951, 46(253):68-78.
- [24] Miranda E, Taghavi S. A comprehensive study of floor acceleration demands in multi-story building [C]// ATC & SEI 2009 Conference on Improving the Seismic Performance of Existing Buildings and Other Structures. San Francisco: Applied Technology Council and Structural Engineering Institute of ASCE, 2009: 9-11.
- [25] 尚庆学,郑迦译,李吉超,等.各国规范对于楼面峰值加速度规定的对比研究[J].工程力学,2020,37(增):91-96.  
Shang Q X, Zheng J Y, Li J C, et al. Comparative study of relevant specifications on peak floor acceleration in current codes of different countries[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(Sup):91-96.(in Chinese)

(本文责编:苏泽云)