

文章编号: 1000-4750(2014)04-0189-07

# 强震作用下竖向不规则结构的延性折减系数研究

周 靖<sup>1,2</sup>, 补国斌<sup>1,2</sup>, 王慧英<sup>2</sup>

(1. 湘潭大学土木工程系, 湘潭 411105; 2. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510641)

**摘 要:** 通过修正参考竖向规则结构的抗震延性折减系数, 研究竖向不规则结构在速度脉冲强震作用下的延性折减系数。采用集中质量剪切型多自由度模型, 阐述了速度脉冲地震作用下竖向规则结构延性折减系数运用于竖向不规则结构的修正系数研究方法, 分析了该修正系数的影响因素。分析结果表明, 竖向不规则结构的延性折减系数明显小于参考规则结构的延性折减系数。修正系数的主要影响因素是不规则比率和延性系数, 其随着不规则比率减小或延性需求增大而减小。周期和楼层数对该修正系数的影响较小。同时, 通过比较得出, 速度脉冲地震作用下修正系数比相应非速度脉冲地震作用下修正系数值小。最后, 通过对计算结果取平均值, 给出了修正系数的建议值, 并与欧洲抗震规范中修正系数的取值进行了比较。

**关键词:** 延性折减系数; 修正系数; 竖向不规则; 速度脉冲地震作用; 非线性动力分析

**中图分类号:** TU973.31 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.10.0802

## DUCTILITY REDUCTION FACTOR FOR VERTICALLY IRREGULAR STRUCTURES UNDER STRONG EARTHQUAKE ACTIONS

ZHOU Jing<sup>1,2</sup>, BU Guo-bin<sup>1,2</sup>, WANG Hui-ying<sup>2</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** Seismic ductility reduction factor was investigated in this paper for vertically irregular structures subjected to pulse-like ground motions. It was expressed as the production of seismic ductility reduction factors for vertically regular structures and a modification factor. Based on multi-degree-of-freedom (MDOF) lumped mass shear type models, the method to determine the modification factor was introduced, and its influencing factors were investigated. The results show that ductility reduction factors for vertically irregular MDOF systems are clearly smaller than those for vertically regular MDOF systems. The modification factor mainly depends on irregularity ratio and ductility ratio; the smaller the irregularity ratio or the larger the ductility ratio, the smaller the modification factor; while the influence of storey number and fundamental period is small. In addition, the modification factors for structures under velocity pulse-like ground motions are less than those under non-pulse-like ground motions. At last, the average results were suggested as modification factors, which were compared with the values specified in European seismic code.

**Key words:** ductility reduction factor; modification factor; vertical irregularity; pulse-like ground motion; nonlinear dynamic analysis

地震作用强度折减系数(strength reduction factor)取值历来是世界各国抗震研究中最具争议的

问题之一。不同国家和研究者对强度折减系数的称谓不同, 如: 国际建筑规范<sup>[1]</sup>中称反应修正系数

收稿日期: 2012-10-28; 修改日期: 2012-12-20

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(12JJ6047); 亚热带建筑科学国家重点实验室基金项目(2014ZA06); 教育部博士点科研基金项目(20094301120001)

通讯作者: 周 靖(1974—), 男, 湖南沅江人, 副教授, 博士, 从事结构抗震研究(E-mail: jingzhchina@163.com).

作者简介: 补国斌(1986—), 男, 湖南芷江人, 博士生, 从事结构抗震研究(E-mail: guobin.bu@163.com);

王慧英(1980—), 女, 河南商丘人, 博士生, 从事结构抗震研究(E-mail: why4220@126.com).

( $R$ )(response modification factor)、加拿大建筑规范<sup>[2]</sup>称地震力折减系数( $R$ )(force modification factor)、欧洲规范<sup>[3]</sup>称性能系数( $q$ )(behavior factor), 而在中国建筑抗震设计规范<sup>[4]</sup>中称结构影响系数( $C$ )( $C=1/R$ )。尽管称谓和取值不同, 统一的认识是强度折减系数主要包括延性折减系数(ductility reduction factor)和超强折减系数(overstrength reduction factor)两部分<sup>[5]</sup>。在延性折减系数研究方面, 认为主要影响因素是结构的延性水平、材料和类型。只有欧洲规范 EC8 考虑了竖向不规则对延性折减系数的影响, 其规定竖向不规则结构延性折减系数需乘以 0.8 的修正系数, 相当于结构整体强度水平需要提高 25%。同时, 所有规范均未专门区分速度脉冲和非速度脉冲型地震作用下延性折减系数可能不同。竖向不规则(内因)和地震动速度脉冲效应(外因)是结构设计的两种极为不利条件, 综合考虑其对延性折减系数的影响和采取相应修正具有重要的现实意义。

竖向不规则是因结构沿竖向布置(如几何尺寸、楼层质量、刚度、强度或几者的组合)发生突变或极不连续而产生, 引起结构局部产生过大的应力集中或塑性变形集中, 导致结构局部薄弱诱发整体损伤甚至倒塌。国内外有关的研究资料很丰富, Soni<sup>[6]</sup>以及周靖<sup>[7]</sup>对过去 30 多年来针对竖向不规则结构抗震性能的研究进行了详细地综述。近年来的研究主要可归纳为三个方面: 评估抗震设计规范中竖向不规则控制极限参数的有效性<sup>[8]</sup>; 分析结构薄弱楼层的地震响应特性<sup>[9]</sup>; 提出竖向不规则结构抗震性能的研究方法或抗震设计有效控制措施<sup>[10-11]</sup>。随着高层建筑的飞速发展, 结构型式日趋复杂, 竖向不规则结构抗震性能分析与评估也更加引起研究者的重视, 但在竖向不规则不利条件的基础上再考虑速度脉冲地震作用效应的研究极少<sup>[12]</sup>。

20 世纪 70 年代就有学者明确提出建筑抗震设计中需要考虑速度脉冲的影响<sup>[13]</sup>, 此后 30 多年的大量研究表明, 结构在速度脉冲地震作用下的楼层位移和强度需求显著增大<sup>[14]</sup>。目前国内外不少研究成果已体现在建筑设计规范中, 如澳洲规范<sup>[15]</sup>对地震危险性年超越概率小于 1/200 且发震断层 20km 内场地, 考虑近源速度脉冲地震效应。

综上所述, 国内外虽然针对竖向不规则结构抗震性能或速度脉冲效应影响分析单项研究较为丰富, 但综合考虑两种不利条件的研究极少。且以往的研究重点放在结构的“需求”(位移、延性、剪力

需求等)分析方面, 对竖向不规则结构“能力”(如延性折减系数)方面的研究较少。因此, 本文采用集中质量剪切型多自由度(MDOF)体系, 综合考虑竖向不规则和速度脉冲地震作用双重不利影响, 提出竖向不规则结构延性折减系数相对于竖向规则结构延性折减系数的修正系数研究方法, 考察不规则比率、延性系数、基本周期、楼层数和速度脉冲效应对竖向不规则结构延性折减系数的影响, 给出修正系数建议值为工程设计者和研究人员提供参考。

## 1 输入地震动、结构模型及分析方法

### 1.1 输入地震动

选用 6 条速度大脉冲地震动记录(表 1), 以地震加速度峰值( $PGA$ )作为强度参数, 通过缩放到的地震动强度水平使结构达到预设的目标延性。速度脉冲特性采用基于速度和能量标定的脉冲指标( $PI$ )表征<sup>[16]</sup>。 $PI$ 指数定义如式(1), 取值为 0~1,  $0.85 \leq PI \leq 1$  为强脉冲区间,  $0 \leq PI \leq 0.15$  为非脉冲区间。表 1 中所列的地震动记录  $PI$  指数均达到 1, 用以代表速度大脉冲效应。

$$PI = \frac{1}{1 + e^{-23.3 + 14.6(PGV \text{ ratio}) + 20.5(\text{energy ratio})}} \quad (1)$$

为比较研究速度脉冲的影响(见 3.3 节), 文献[15]提出剔除速度脉冲的方法, 提供了与表 1 对应的 6 条非脉冲型地震动记录。剔除脉冲后  $PI$  指数均小于 0.15, 代表非速度脉冲型地震动记录。

### 1.2 结构模型

基于中国现行建筑抗震设计规范设计典型竖向规则布置结构<sup>[17]</sup>, 在此基础上按比例调整楼层强度和刚度得到拟研究的初始竖向不规则结构。竖向规则结构采用集中质量剪切 MDOF 模型, 依次为 4 层、8 层和 16 层, 分别代表低层、中层和高层结构。层高和质量相同, 质点间用连接弹簧单元相连(图 1), 连接弹簧采用修正的 Clough 滞回模型(图 2)。

竖向规则 MDOF 模型中, 假定侧向等效静力分布模式按规范定义的模式施加(倒三角形分布)<sup>[17]</sup>, 连接弹簧单元的侧向屈服强度与楼层剪力成比例, 按式(2)~式(4)确定; 假定弹簧单元的侧向刚度和屈服强度成比例, 如式(5)。据以上假定, 能保证结构侧向强度和刚度沿高度连续均匀变化。分析中不考虑重力二阶效应, 结构前二阶模态阻尼比取 0.05, 结构周期通过调整楼层质量和侧向刚度控制, 变化范围为 0.05n~0.1n。

表 1 分析中采用的速度脉冲型地震动记录

Table 1 List of pulse-like ground motions used in the present study

地震事件	记录台站	矩震级	PGA/(cm/s <sup>2</sup> )	PGV/(cm/s)	PI
Imperial Valley-06	EC Meloland Overpass FF	6.5	263.32	115.0	1.00
Superstition Hills-02	Parachute Test Site	6.5	388.87	106.8	1.00
Loma Prieta	Oakland - Outer Harbor Wharf	6.9	274.12	49.2	1.00
Erzican, Turkey	Erzincan	6.7	476.66	95.4	1.00
Northridge-01	LA Dam	6.7	564.84	77.1	1.00
Northridge-01	Newhall - W Pico Canyon Rd	6.7	417.14	87.8	1.00

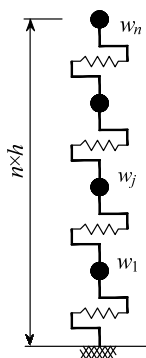


图 1 集中质量 MDOF 体系模型

Fig.1 Lumped mass MDOF system model

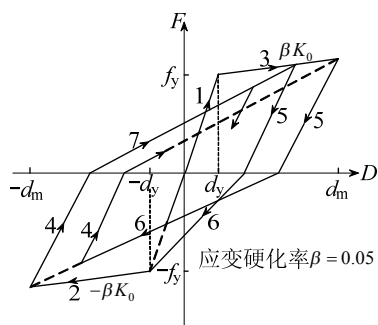


图 2 修正的 Clough 滞回模型

Fig.2 Modified Clough hysteretic model

$$V = \alpha_1 W_{eq} = 0.85\alpha_1 n w \quad (2)$$

$$F_j = \frac{w_j H_j}{\sum_{i=1}^n w_i H_i} V \quad (3)$$

$$v_{yj} = \eta \cdot \sum_{k=j}^n F_k = 0.85\alpha_1 n w \eta \cdot \left( \sum_{k=j}^n k / \sum_{i=1}^n i \right) \quad (4)$$

$$K_{0j} = \Delta \cdot v_{yj} \quad (5)$$

式中： $V$  为基底剪力； $\alpha_1$  为地震影响系数； $W_{eq}$  为等效总重量； $n$  为楼层总数； $w$  为楼层重量 ( $w_i = w$ )； $i$ 、 $j$  和  $k$  为楼层号； $F_j$  和  $F_k$  分别为  $j$ 、 $k$  楼层的水平地震作用； $H_j$  为  $j$  质点的计算高度 ( $H_j = j \cdot h$ )； $h$  为楼层高度； $v_{yj}$  为  $j$  楼层的屈服剪力； $\eta$  为比率系数； $K_{0j}$  为  $j$  楼层连接弹簧的初始侧向弹性刚度； $\Delta$  为层间位移 ( $\Delta_j = \Delta$ )。

竖向不规则结构通过同时按相同比例改变上述竖向规则结构楼层屈服强度和侧向刚度得到。以往的研究常将竖向不规则划分为质量不规则、刚度不规则、强度不规则、强度和刚度组合不规则等类型进行分析。对实际工程结构，底层强度和底层刚度突变常被认为对结构抗震最不利，同时，当楼层刚度变化时，其强度一般也会随之变化。鉴于此实际情况，文中仅考虑首层强度与刚度组合不规则这一最不利且最常见的组合方式。将首层屈服强度和侧向刚度同时修改为第 2 层(相邻层)相应强度和刚度的 90%、80%、70%和 60%，得到初始的竖向不规则结构。这些竖向不规则比率分别记为  $\rho = 0.9$ 、0.8、0.7 和 0.6，其他各层强度和刚度保持不变。将第 2 层组合强度和刚度进行正规化，可得到楼层组合强度和刚度分布模式(如图 3)。以往的研究中，通常假定竖向规则结构各楼层有恒强度和恒刚度，在此基础上按比例改变首层强度和刚度得到竖向不规则结构<sup>[9]</sup>。且以往研究定义的不规则比率指的是不规则与规则结构在相同楼层的组合强度刚度之比，本文的不规则比率指的是某一不规则结构相邻楼层组合强度刚度比，与现行规范中定义的不规则程度直接相关。比较而言，本文选取的强度和刚度沿高度连续均匀变化的模式更接近于实际设计的结构。

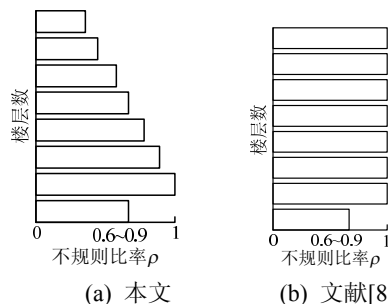


图 3 竖向不规则分布模式

Fig.3 Distribution mode of vertical irregularities

### 1.3 分析方法

采用结构动力分析软件 Canny<sup>[18]</sup>进行非线性动

力时程分析,取6条速度脉冲型地震动记录计算的平均值作为分析结果。通过提高竖向不规则结构的整体强度,控制不规则结构和参考规则结构的延性需求(使两者延性系数相等),得出竖向不规则结构的延性折减系数的修正系数(其值等于目标竖向不规则结构相对于初始不规则结构整体强度提高系数的倒数)。其计算原理和流程如图4所示。图中,目标延性系数通过式(6)确定,修正系数通过式(7)确定,  $V_{ir0}$  和  $V_{ir1}$  分别表示初始和目标竖向不规则结构的基底剪力需求。

$$\mu_t = \max(\mu_{t,1}, \mu_{t,2}, \dots, \mu_{t,i}, \dots, \mu_{t,n}) \quad (6)$$

$$R_{ir} = \frac{V_{ir0}(\mu = \mu_t)}{V_{ir1}(\mu = \mu_t)} = \frac{1}{\text{强度提高系数}} \quad (7)$$

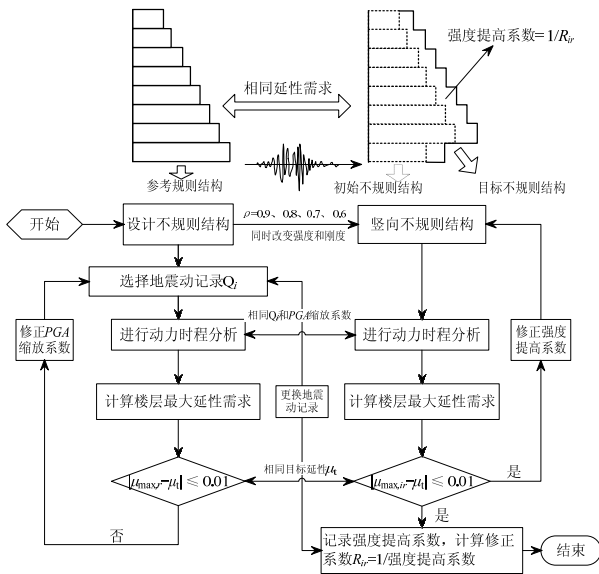


图4 分析方法流程图

Fig.4 Flow chart for  $R_{ir}$  calculation method

依据以下条件共进行2880次动力时程分析:6条速度脉冲型地震动加速度记录,2类模型(竖向规则结构与竖向不规则结构),3种楼层结构(4、8和16),4种基本周期(0.05n~0.1n),4种竖向不规则变化比率(0.8、0.7、0.6和0.5),5种目标延性系数(1、2、4、6和8)。

## 2 数值分析结果与讨论

### 2.1 不规则比率和延性系数的影响

竖向不规则比率和延性系数对修正系数的影响如图5~图7所示。由图可知,随不规则比率减小修正系数减小。不规则比率减小,意味着不规则程度加大,结构变得更薄弱,为达到与参考规则结构

相同的延性需求,强度提高系数需提高,故修正系数(强度提高系数的倒数)减小。需说明的是,各图中第一个x值(横坐标)对应参考规则结构首层和2层组合强度和刚度比,其值并不等于1。对4、8和16层结构该比率分别为1.111、1.029和1.007,意味着规则结构首层强度和刚度大于2层,而非相等。从延性比率的影响看,8层和16层结构随延性比率的减小,修正系数有减小的趋势,4层结构中趋势不明显。当延性为4,不规则比率为0.8时,4、8和16层结构修正系数约为0.77、0.75和0.63,分别相当于29.9%、33.3%和58.7%的整体强度提高。

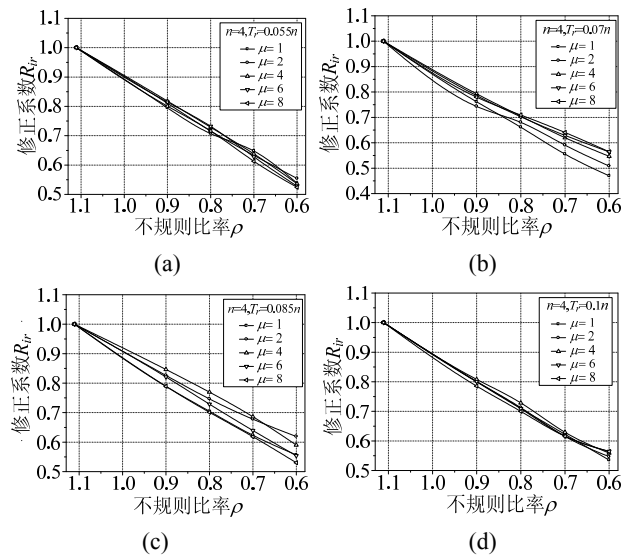


图5 不规则比率和延性系数对4层结构修正系数的影响  
Fig.5 Effects of  $\rho$  and  $\mu$  on  $R_{ir}$  for 4 storey structure

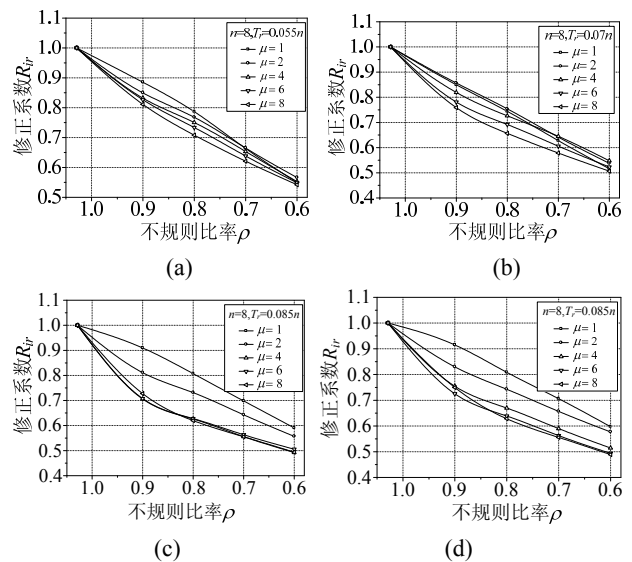


图6 不规则比率和延性系数对8层结构修正系数的影响  
Fig.6 Effects of  $\rho$  and  $\mu$  on  $R_{ir}$  for 8 storey structure

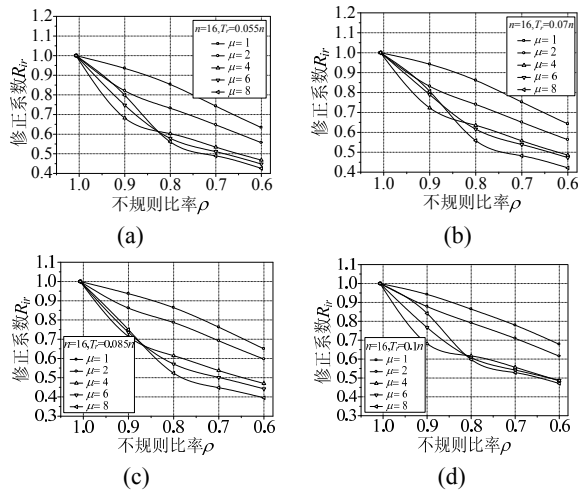


图7 不规则比率和延性系数对16层结构修正系数的影响  
Fig.7 Effects of  $\rho$  and  $\mu$  on  $R_{ir}$  for 16 storey structure

### 2.2 基本周期和楼层数的影响

在一预定的目标延性比率下，周期和楼层数的影响如图8所示。从图可知，周期和楼层数对修正系数的影响较小。在特定的不规则比率下，随周期和楼层数的增大，修正系数取值大致成一条水平线。需注意， $T_{ir}$ 指的是竖向不规则结构的周期，相比参考规则结构而言，由于首层刚度的削减，周期随不规则比率的增大有所增大。对4、8和16层结构，不规则结构与参考规则结构周期比值的最大值分别为1.14、1.03和1.06。这些周期增大的比例较小，也在一定程度上解释了周期对修正系数影响小的原因。

### 2.3 地震速度脉冲效应的影响

为深入了解地震速度脉冲的影响，对速度脉冲型和对应非脉冲型地震记录下修正系数做了对比研究。限于篇幅，仅对目标延性2、4和6，周期为0.085n的情况进行分析。从图9可知，非速度脉冲地震作用下，修正系数随不规则比率减小而减小，与脉冲工况下趋势一致，但减小的比例小(图10)。目标延性为4，脉冲工况下4、8和16层竖向不规则结构的修正系数比非脉冲工况分别约小0.15、0.25和0.25。这意味着脉冲工况下竖向不规则结构更不利，需要提高的强度更大。

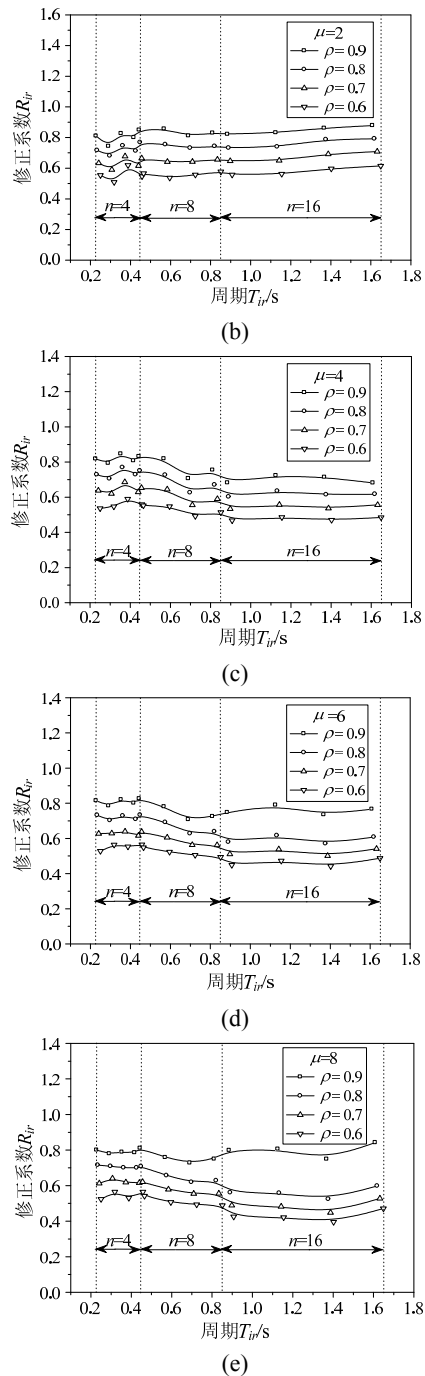
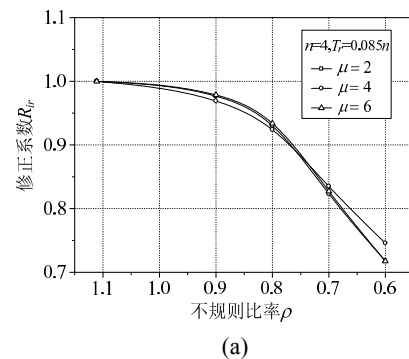
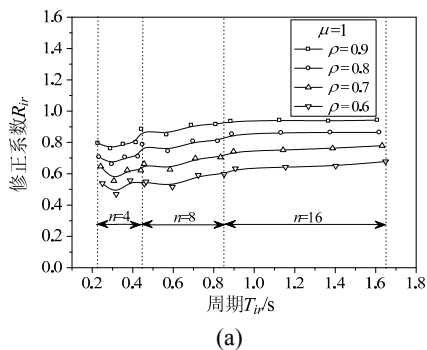


图8 周期和楼层数对修正系数的影响  
Fig.8 Effects of fundamental period and storey number for different ductility levels



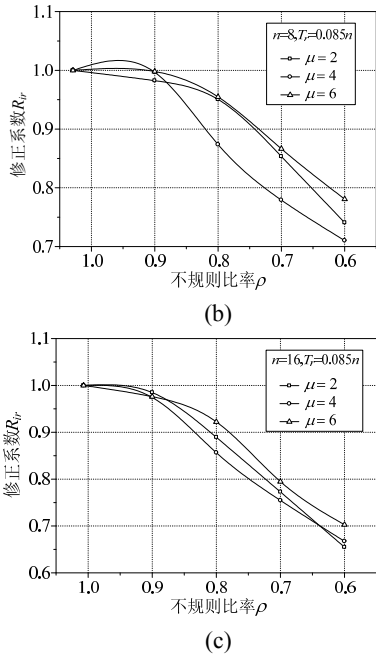


图 9 非速度脉冲地震作用下不规则比率与延性对修正系数的影响

Fig.9 Effects of  $\rho$  and  $\mu$  on  $R_{ir}$  under non-pulse-like cases

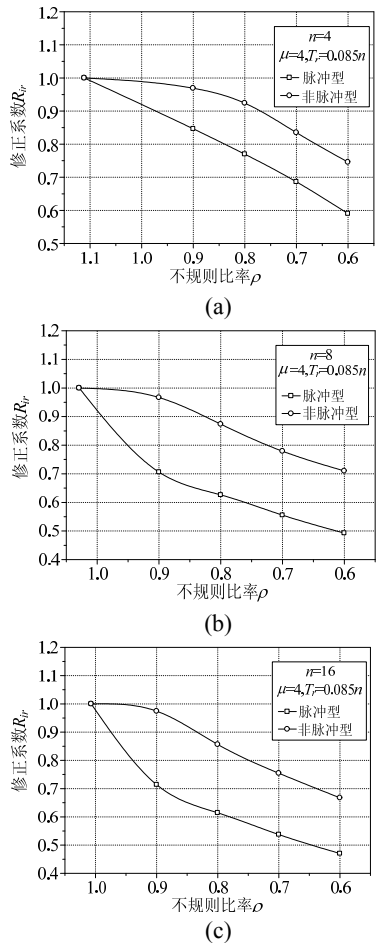


图 10 速度脉冲和非速度脉冲地震作用下不规则比率与延性对修正系数的影响比较

Fig.10 Comparison results of  $R_{ir}$  under pulse-like and non-pulse-like cases

### 3 工程应用建议

对表 1 所列各条地震波条件下分析得到的修正系数取平均值，在保证安全度的前提下，将该计算值做一定程度简化得到方便记忆的建议值以便于工程设计应用(修正系数越小，延性折减系数越小，结构越保守)。得出速度脉冲型和非速度脉冲型地震作用工况下，竖向不规则效应对延性折减系数的修正系数如表 2 所示，中间值可采用线性内插法求得。采用修正系数  $R_{ir}$  和竖向规则 MDOF 体系的延性折减系数  $R_{\mu,m,r}$ ，可以方便求得竖向不规则 MDOF 体系的延性折减系数  $R_{\mu,m,ir}$ ：

$$R_{\mu,m,ir} = R_{\mu,m,r} \cdot R_{ir} \quad (8)$$

相对于欧洲规范 EC8 中对所有竖向不规则结构均选用单一的不规则修正系数  $k_r=0.8$  而言<sup>[3]</sup>，本文建议值考虑了不规则比率、延性和地震类型的影响，更具合理性，且为今后开展更多不规则类型的修正系数研究提供了思路。这里特别说明的是表 2 中的建议值基于集中质量剪切型 MDOF 模型，不规则类型为首层强度和刚度组合不规则，取最常用的设计延性 4，因此其应用主要为同类型和相似条件的结构体系。

表 2 竖向不规则效应对延性折减系数的修正系数建议值  
Table 2 Suggested values of  $R_{ir}$  for pulse-like and non-pulse-like cases

竖向不规则 效应修正系数	地震作用类型	$\rho=0.9$	$\rho=0.8$	$\rho=0.7$	$\rho=0.6$
$R_{ir}$ (计算值)	速度脉冲型地震动	0.76	0.68	0.60	0.52
	非速度脉冲型地震动	0.98	0.91	0.81	0.73
$R_{ir}$ (建议值)	速度脉冲型地震动	0.75	0.65	0.60	0.50
	非速度脉冲型地震动	0.95	0.90	0.80	0.70

### 4 结论

该文以剪切型集中质量竖向不规则 MDOF 体系为分析对象，提出了速度脉冲地震作用下竖向不规则结构延性折减系数的修正方法，分析了修正系数的影响因素，并给出其建议值，可得到以下结论：

(1) 竖向不规则 MDOF 体系控制最大层间位移目标延性的侧向强度需求通常比相应竖向规则 MDOF 体系需要的侧向强度大。当考虑结构竖向不规则时，目前研究所得的 MDOF 体系的延性折减系数需通过乘以修正系数进行合理调整。

(2) 影响修正系数的因素主要是竖向不规则比率，延性系数和速度脉冲效应。在速度脉冲和非速度脉冲型地震作用工况下，修正系数均随着不规

则比率的减小而减小。非脉冲工况下延性比率的影响不明显。在给定的不规则比率 and 设计延性水平下,脉冲工况下修正系数比非脉冲工况下修正系数约小 0.20。同时,周期和楼层数对修正系数的影响较小。

(3) 通过大量数值统计取平均值,本文给出了修正系数的建议值,并与欧洲规范 EC8 中不规则效应修正系数做了比较。运用此修正系数,可从现有的竖向规则 MDOF 体系的延性折减系数得到竖向不规则 MDOF 体系的延性折减系数。

该文分析采用的剪切型集中质量 MDOF 模型不代表所有结构类型,与杆系结构也有一定差别。后续研究将考虑不同结构类型,不同场地类别,更多的地震动记录,更多竖向不规则类型(质量、刚度、强度不规则等),不规则楼层不同位置和数目,以建立该修正系数的多因素影响关系式,为工程设计提供更为完善的数值参考。

#### 参考文献:

- [1] IBC-2006. International building code [S]. Falls Church, VA: International Code Council, 2006.
- [2] NBCC-05. The national building code of Canada [S]. Ottawa: National Research Council, 2005.
- [3] Eurocode 8, Design of structures for earthquake resistance [S]. CEN, Brussels, Belgium: European Committee for Standardizations, 2004.
- [4] TJ11-78, 工业与民用建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979.  
TJ11-78, Code for seismic design of industry and civil buildings [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 1979. (in Chinese)
- [5] 翟长海, 谢礼立. 多自由度体系效应对强度折减系数的影响[J]. 工程力学, 2006, 23(11): 33-37, 69.  
Zhai Changhai, Xie Lili. Estimation of MDOF effects on strength reduction factors [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11): 33-37, 69. (in Chinese)
- [6] Soni D P, Mistry B B. Qualitative review of seismic response of vertically irregular building frames [J]. ISET Journal of Earthquake Technology, 2006, 43(4): 121-132.
- [7] 周靖, 赵卫锋, 刘智林. 竖向不规则结构抗震性能研究现状及其在设计规范中的应用[J]. 力学进展, 2009, 39(1): 51-60.  
Zhou Jing, Zhao Weifeng, Liu Zhiling. Recent advances in research on seismic performance of vertical irregular structures and applications to seismic codes [J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(1): 51-60. (in Chinese)
- [8] Athanassiadou C J. Seismic performance of RC plane frames irregular in elevation [J]. Engineering Structures, 2008, 30(5): 1250-1261.
- [9] Valmundsson E V, Nau J M. Seismic response of building frames with vertical structural irregularities [J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 123(1): 30-41.
- [10] Chintanapakdee C, Chopra A K. Seismic response of vertically irregular frames: response history and modal pushover analyses [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(8): 1177-1185.
- [11] 门进杰, 史庆轩, 周琦. 竖向不规则钢筋混凝土框架结构基于性能的抗震设计方法[J]. 土木工程学报, 2008, 41(9): 67-75.  
Men Jinjie, Shi Qingxuan, Zhou Qi. Method of performance based seismic design for vertically irregular reinforced concrete frame structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(9): 67-75. (in Chinese)
- [12] 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): 220-227.  
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(Suppl 1): 220-227. (in Chinese)
- [13] Bertero V V, Mahin S A, Herrera R A. Aseismic design implication of near-fault San Fernando earthquake records [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1978, 6(1): 31-42.
- [14] Krawinkler H, Medina R, Alavi B. Seismic drift and ductility demands and their dependence on ground motions [J]. Engineering Structures, 2003, 25(5): 637-653.
- [15] AS/NZS 1170.4, Structural design actions-Part 4 earthquake actions, General Design Requirement and Loading on Structures [S]. Australian/New Zealand, 2004.
- [16] 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.
- [17] GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
GB50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [18] Canny. Three-dimensional nonlinear static/dynamic structural analysis computer program [CP]. <http://members.shaw.ca/CannyNAS>, 2012-08-10.