

文章编号: 1000-4750(2015)02-0131-08

速度脉冲地震作用下偏心结构的弹塑性抗震研究

补国斌¹, 蔡 健^{1,2}, 周 靖¹, 李康宁³

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

3. 无锡宁震科技有限公司, 江苏, 无锡 214000)

摘 要: 研究速度脉冲地震下, 刚度偏心、强度偏心和两者组合偏心体系的弹塑性抗震需求。基于新开发的变轴力-双向弯曲模型, 选取 8 条速度脉冲地震记录, 进行了强速度脉冲地震效应和偏心布置双重不利条件下单层 RC 框架结构的弹塑性动力时程分析, 讨论了结构的延性、位移、扭矩和扭转角变化规律。结果表明, 偏心结构在速度脉冲工况下比在非速度脉冲工况下有更大的弹塑性抗震需求; 刚度偏心对结构弹塑性抗震需求不敏感, 强度偏心对弹塑性抗震需求的影响最为显著, 组合偏心的影响介于两者之间。随强度偏心率增大, 弱侧延性需求呈非线性急剧增大, 最大达到对称结构延性需求的 3.09 倍, 位移、扭矩和扭转角也迅速增大, 偏心率为 0.2 时扭转角为偏心率为 0.05 时的 6.4 倍; 建议偏心结构弹塑性分析时宜增加强度偏心作为基本参数, 并考虑速度脉冲地震效应。

关键词: 偏心结构; 速度脉冲地震; 延性需求; 变轴力-双向弯曲相互作用; 非线性动力分析

中图分类号: TU375.4; TU352.1+1 文献标志码: A doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2013.08.0763

ELASTOPLASTIC ASEISMIC RESEARCH ON ECCENTRIC STRUCTURES SUBJECTED TO VELOCITY PULSE-LIKE GROUND MOTION

BU Guo-bin¹, CAI Jian^{1,2}, ZHOU Jing¹, LI Kang-ning³

(1. Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China;

2. State Key Laboratory of Subtropical Architecture Science, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China;

3. Canny Seismic-Control Technology, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

Abstract: The elastoplastic seismic demand of structural systems, with stiffness, strength and combined eccentricity, subjected to pulse-like ground motions is investigated. Based on the newly-developed varying axial load-biaxial bending model, nonlinear time history analysis is conducted to study a single-storey RC frame subjected to eight ground motions, considering the pulse effect and eccentricity. The results of ductility, drift, torsion and rotation are discussed. The results show that eccentric system experiences higher elastoplastic demand under pulse-like cases compared with non-pulse-like cases. The stiffness eccentricity is insensitive to elastoplastic response, while the strength eccentricity has the most influences. The ductility in the weak side increases greatly with increasing strength eccentricity, and the maximum ductility is 3.09 times higher than that of symmetric structure. At the same time, the drift, torsion and rotation increase rapidly, and the rotation with eccentricity ratio of 0.2 is 6.4 times higher than that of 0.05. It is suggested that the strength eccentricity should be considered as a parameter in elastoplastic analysis of eccentric systems, and the velocity pulse-like effect should also be

收稿日期: 2013-08-20; 修改日期: 2014-01-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878087); 亚热带建筑科学国家重点实验室自主课题项目(2014ZA06, 2015ZB26)

通讯作者: 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).

作者简介: 蔡 健(1959—), 男, 广东潮州人, 教授, 博士, 博导, 从事组合结构研究和高层建筑抗震研究(E-mail: cvjcai@scut.edu.cn);

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);

李康宁(1955—), 男, 福建莆田人, 研究员, 博士, 从事建筑结构非线性分析软件开发工作和结构抗震与隔减震研究

(E-mail: cannyNAS@189.cn).

considered.

Key words: eccentric structure; pulse-like ground motion; ductility demand; varying axial load-biaxial bending interaction; nonlinear dynamic analysis

随着建筑功能和审美要求不断提高,平面不规则和偏心布置的建筑物日益增多,偏心结构的抗震理论研究和工程应用在近三十年得到很快发展。De Stefano 等^[1]和王墩等^[2]对偏心结构抗震研究进行了详细的综述。在国外,20世纪30年代末 Ayre^[3]首次研究偏心结构的平扭耦联反应,60年代后研究者开始关注单层结构的非弹性扭转效应,80年代后该领域的研究备受关注^[4-7],Sadek 等^[5]首次提出强度偏心距的概念,Bugeja^[6]指出强度偏心距对结构非弹性扭转的影响远大于刚度偏心距影响,近年来有大量对偏心结构抗震研究的报道^[8-10]。国内对偏心结构的抗震研究起步稍晚,但近年来也做了不少工作,如王耀伟^[11]研究平面不规则结构的弹塑性地震反应,刘畅^[12]研究偏心结构在地震作用下的扭转反应。目前关于强度偏心和刚度偏心对结构抗震需求的影响未取得统一认识,如强度偏心是否视为独立变量,这两种偏心形式的影响程度等^[2,6]。另外,大部分研究均采用简化的单轴恢复力模型^[4-12],并未考虑各个力分量耦合的细化模型;且未见专门针对速度脉冲地震下偏心结构抗震性能的相关报道。

相对于非速度脉冲型地震动,强速度脉冲型地震动效应对结构产生极大的速度冲击,更易导致结构倒塌和破坏。20世纪70年代 Bertero^[13]就指出结构抗震设计中需考虑速度脉冲的影响。国内外大量研究表明,结构在速度脉冲地震作用下楼层位移和强度等需求显著增大^[14-17]。研究成果已体现在相关建筑设计规范中,如澳洲规范^[18]规定发震断层20km内场地需考虑近场速度脉冲地震效应;中国抗震规范^[19]规定对发震断裂两侧5km内或5km~10km间的结构,地震动参数应乘以相应增大系数以计入近场影响。

综上所述,国内外尚未见专门针对速度脉冲地震下偏心结构抗震性能的研究。因此,本文中考虑强速度脉冲地震作用(外因)和结构偏心布置(内因)双重不利条件组合影响,研究结构的弹塑性抗震需求变化规律。偏心形式考虑刚度偏心、强度偏心和两者组合偏心,弹塑性抗震需求方面主要考察结构柔(弱)侧和刚(强)侧的延性、位移、层间扭矩和扭转角等,选用的地震记录为基于速度和能量标定的速

度脉冲型地震波^[15],采用作者新开发的考虑变轴力与双向弯曲相互作用的模型以更全面地考虑结构的实际力学行为。本文的工作可为偏心结构的弹塑性分析提供量化参考。

1 结构模型与基本假定

1.1 对称结构模型

基于 SATWE 程序按我国现行抗震规范^[19]设计用于做对比的对称单层 RC 框架结构,如图1(其中 $\delta=A=0$)。采用结构非线性分析程序 CANNY^[20]建立弹塑性模型。混凝土和钢筋本构模型分别为程序内置的 CS4 模型(考虑受拉和核心混凝土约束效应)和 SR4 模型(考虑强化段塑性变形)。柱抗轴向拉压采用 AS2 模型,梁抗弯、梁柱抗剪为 CA7 模型,可全面考虑刚度退化、强度劣化和捏缩效应,各滞回模型加卸载准则参见文献[20]。采用新开发的变轴力-双向弯曲模型($N-M$ 模型,原理如图2)表征柱单元中双向弯曲的耦合及变轴力影响。该模型在建筑结构中的应用已通过日本构造系统公司的验证,并引入 SNAP^[21]和 CANNY^[20],关于该模型更详细的信息可参考文献[21]。 $N-M$ 模型与传统单轴滞回模型或双轴弯曲屈服面模型相比,能考虑变轴力影响;与精细化纤维模型相比,计算效率和收敛性极大提高,且不需通过近似方法求屈服点,直接得出单元延性需求。对 SATWE 和 CANNY 计算的前三阶周期进行比较(表1),两者基本一致。

表1 周期比较

Table 1 Period comparison

计算程序	第一阶周期/s	第二阶周期/s	第三阶周期/s
SATWE	0.1225(x向)	0.1225(y向)	0.1061(扭转)
CANNY	0.1223(x向)	0.1223(y向)	0.1054(扭转)

1.2 偏心结构模型

在对称结构($\delta=A=0$)的基础上,通过调整 δ 和 A ,得到刚度偏心、强度偏心和组合偏心三种偏心结构体系(如图1)。分析中仅考虑沿 x 轴单向偏心(因结构对称,沿 y 轴单向偏心情况相同),左侧各柱 y 向刚度(强度)减小称为柔(弱)侧,右侧各柱 y 向刚度(强度)增大称为刚(强)侧,左右侧各柱 x 向、中部各柱 x 向和 y 向的刚度和强度均保持不变;调整后结构

沿 x 向和 y 向总刚度和总强度保持不变。刚度偏心距和强度偏心距的计算公式分别为^[5]:

$$e_R = \frac{\sum k_{yi} x_i}{\sum k_{yi}} \quad (1)$$

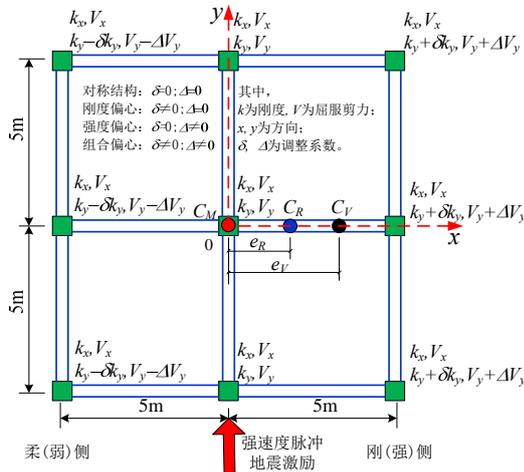
$$e_V = \frac{\sum V_{yi} x_i}{\sum V_{yi}} \quad (2)$$

式中, x_i 和 y_i 为第 i 根柱相对于质心 C_M 的坐标, 其余各项见图 1 说明。本文分析的偏心率参数为偏心距与结构长度 L 的比值, 如表 2, 组合偏心仅考虑刚度和强度偏心相等的情况。

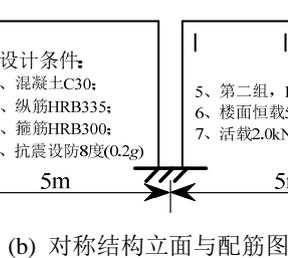
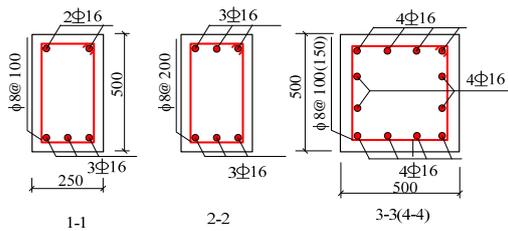
表 2 偏心率参数

Table 2 Parameters of eccentricity

刚度偏心率 e_R/L	强度偏心率 e_V/L	组合偏心率 e_{RV}/L
0.05, 0.1, 0.15, 0.2	0.05, 0.1, 0.15, 0.2	0.05, 0.1, 0.15, 0.2



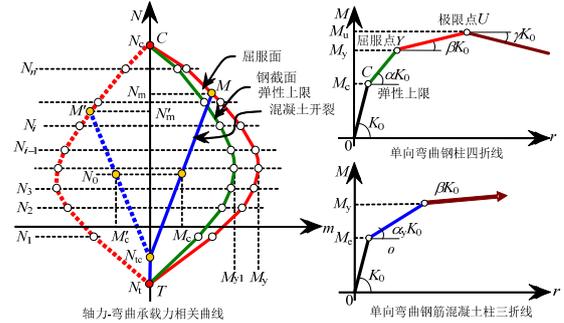
(a) 对称结构与偏心结构平面示意图



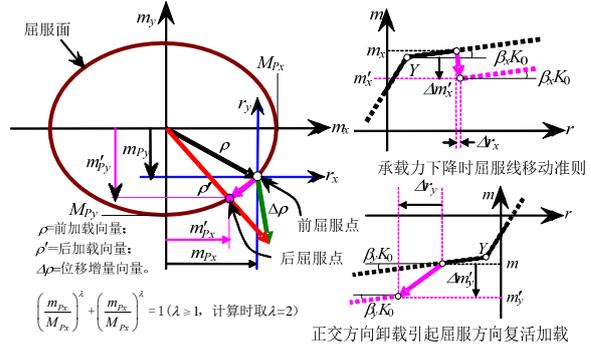
(b) 对称结构立面与配筋图

图 1 拟研究结构体系示意图与基本信息

Fig.1 Schematic drawing and basic information of the structural systems in the present study



(a) 轴力-弯矩相互作用准则



(b) 双轴弯曲相互作用准则

图 2 变轴力-双向弯曲相互作用模型(N-M 模型)

Fig.2 Varying axial load-biaxial bending moment interaction model (N-M model)

2 输入地震动与分析方法

2.1 输入地震动

选用表 3 所列 8 条强速度脉冲地震动记录。速度脉冲特性采用如式(3)定义的基于速度和能量标定的脉冲指标(PI)表征^[15], $0.85 \leq PI \leq 1$ 为强速度脉冲区间, $0 \leq PI \leq 0.15$ 为非速度脉冲区间。

$$PI = \frac{1}{1 + e^{-23.3 + 14.6(PGV \text{ ratio}) + 20.5(\text{energy ratio})}} \quad (3)$$

式中, $PGA \text{ ratio}$ 和 energy ratio 分别为滤除脉冲后残余地震记录和原始记录的加速度峰值比和能量比^[15]。

2.2 分析方法

采用 CANNY 程序进行非线性动力时程分析, 分析流程如图 3, 图中对称结构的目标延性系数 μ 按下式确定:

$$\mu = \mu_{\max, ci}^{\text{ref}} = \max(\mu_{c1}^{\text{ref}}, \mu_{c2}^{\text{ref}}, \dots, \mu_{ci}^{\text{ref}}, \dots, \mu_{c9}^{\text{ref}}) \quad (4)$$

式中, μ_{ci}^{ref} 为对称结构第 i 根柱的延性需求。分析表明, 单向地震作用下对称结构各柱单元与整体结构的延性需求大致相等(最大误差不超过 2%), 因而用各柱单元中最大延性来控制结构整体目标延性是合理的。抗震需求 D 包括结构延性、扭矩、位移

和转角。

据以下条件进行弹塑性动力时程分析：2 类模型(偏心与对称结构)，8 条地震波，3 种偏心形式(刚度、强度和组合偏心)，4 种偏心率(0.05、0.1、0.15 和 0.2)，3 种目标延性(2、4 和 6，分别代表低、中、高延性需求)。

表 3 分析中采用的速度脉冲型地震动记录
Table 3 List of pulse-like ground motions used in the present study

地震事件	记录台站	矩震级	断层距/ km	PGA/ (cm/s ²)	PGV/(cm/s)	PI
Chi-Chi, Taiwan	CHY101	7.6	10.0	442.6	85.42	1.00
Landers	Barstow	7.3	34.9	696.26	30.4	1.00
San Fernando	Pacoima Dam (upper left abut)	6.6	1.8	1407.74	116.5	0.97
Imperial Valley-06	El Centro Array #7	6.5	0.6	453.22	108.8	1.00
Imperial Valley-06	EC County Center FF	6.5	7.3	167.73	54.5	1.00
Imperial Valley-06	EC Meloland Overpass FF	6.5	0.1	263.32	115.0	1.00
Northridge-01	Pacoima Dam (upper left)	6.7	7.0	1349.7	107.1	1.00
Northridge-01	Newhall - W Pico Canyon Rd	6.7	5.5	417.14	87.8	1.00

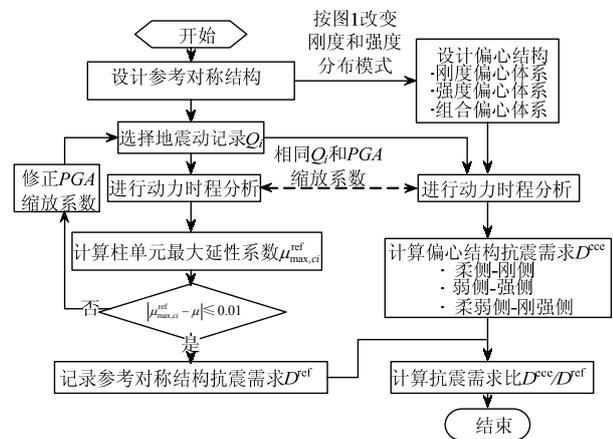


图 3 分析流程图

Fig.3 Analysis flow chart

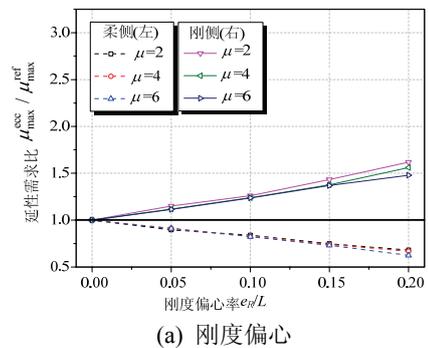
3 数值分析结果与讨论

分别对偏心结构的柔/弱(左)侧和刚/强(右)侧与对称结构对应侧的弹塑性抗震需求(延性 μ 、扭矩 T 、位移 Δ 和转角 θ)进行比较。分析表明，同侧各柱的抗震需求差别不超过 3%，故以每侧 3 根柱中最大

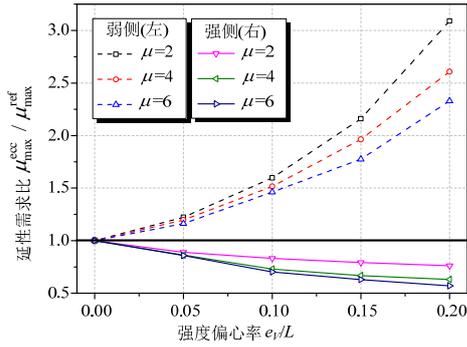
需求来表征各侧抗震需求。因偏心对中间侧影响较小，故对其不作讨论。分析表明，表 3 所列 8 条地震波分析得到的规律基本一致，故取平均值作为分析结果进行讨论。以下各图中“ref”和“ecc”分别代表对称和偏心结构。

3.1 不同偏心形式对延性需求的影响

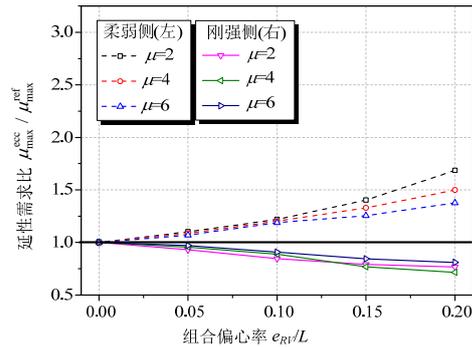
三种偏心形式对结构两侧延性需求的影响如图 4。1) 随刚度偏心率增大，右(刚)侧延性需求增大，最大增大到对称结构延性需求的 1.62 倍；而左(柔)侧延性需求减小，最大减小到 62%。偏心率一定，右(刚)侧延性需求随目标延性增大而减小，但不同目标延性间，曲线变化比例均不大。2) 强度偏心对延性需求的影响最为明显。随强度偏心率增大，左(弱)侧延性需求呈非线性趋势急剧增大，最大增大到 3.09 倍；右(强)侧延性需求减小，最大减小到 57%。这与刚度偏心影响规律相反，以双线型模型为例说明原因。强度偏心使左侧屈服点下降，很快屈服，塑性变形大，延性增大，右侧则相反；而刚度偏心虽然使得左侧刚度削弱，极限位移增大，但因屈服强度不变，屈服位移(强度和刚度的比值)也增大，其增大比例可能超过极限位移的增大比例，导致延性(极限位移和屈服位移的比值)反而减小，右侧则相反。另外，强度偏心率一定，随目标延性的增大，左(弱)侧延性需求减小，说明强度偏心对低延性结构延性的影响大于高延性结构。3) 组合偏心对延性需求的影响与强度偏心类似，但变化比例相对较小。原因是刚度偏心使左侧延性需求减小，而强度偏心使左侧延性需求增大且增大比例远大于刚度偏心对其减小的比例(右侧可作类似分析)。4) 结构进入弹塑性阶段后，强度偏心对延性需求的影响最显著，与 Bugeja^[6]的研究结果一致；组合偏心的影响次之，刚度偏心的影响最小，且刚度偏心体系延性需求随目标延性变化趋势不明显。



(a) 刚度偏心



(b) 强度偏心



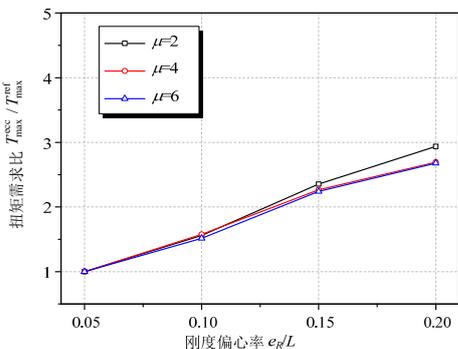
(c) 组合偏心

图4 不同偏心形式对延性需求的影响

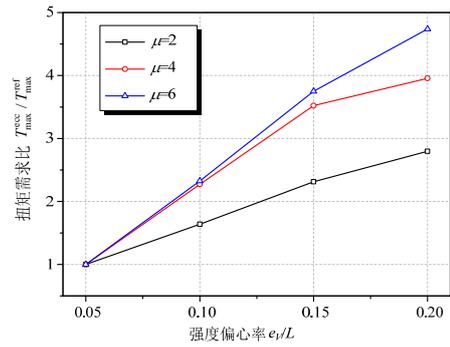
Fig.4 Effects of different eccentricity type on ductility demand

3.2 不同偏心形式对扭矩的影响

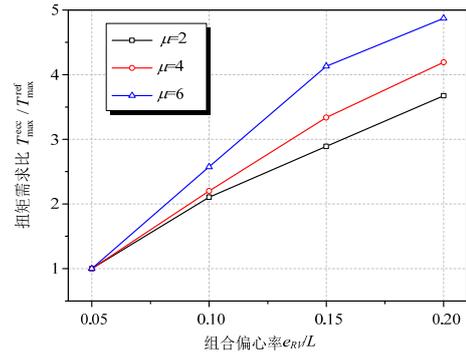
图5给出了三种偏心形式对结构扭矩的增大效应。对称结构在单向地震作用下只有平动，故取偏心率为0.05时对应扭矩作为比较基准。由图可知，组合偏心对扭矩的增大作用最明显，强度偏心影响略小，刚度偏心影响最小。刚度偏心体系的目标延性为4和6时，两曲线基本重合，说明达到中等延性水平后结构受刚度偏心的影响基本不变。而在强度偏心体系或组合偏心体系中，当偏心率一定时，随目标延性的提高，偏心结构扭矩增大，说明偏心结构塑性发展越充分，则扭矩的增大效应越明显，最大增大到偏心率为0.05时对应扭矩的4.8倍。



(a) 刚度偏心



(b) 强度偏心



(c) 组合偏心

图5 不同偏心形式对扭矩的影响

Fig.5 Effects of different eccentricity type on torsion moment

3.3 不同偏心形式对位移与转角需求的影响

图6给出了不同偏心形式对层间位移比(即偏心结构与对称结构的质心位移比)与最大柱单元位移比的放大效应。1) 刚度偏心体系中，当偏心率一定时，偏心引起层间位移比和最大单元位移比的增大比率均随目标延性增大而减小，最大单元位移比的增大比率略大。2) 强度偏心体系中，偏心率对最大单元位移比的放大效应尤为显著，最大达到1.62倍；层间位移比的放大效应小于单元位移比，最大放大比率为1.23倍。偏心率一定时，强度偏心对层间和单元位移比的放大效应均随目标延性的增大而减小，表明强度偏心对低延性结构的位移需求影响更大。3) 组合偏心体系的基本变化规律与强度偏心类似，但程度相对较小。4) 强度偏心对位移需求的影响最为显著，组合偏心的影响次之，刚度偏心的影响最小。各种偏心形式(特别是强度偏心)对最大单元位移的放大效应要大于对层间位移的放大效应。5) 高强度偏心对低延性结构层间(质心)位移有较大程度的影响，当偏心率为0.02时，最大约放大20%。

图7给出了不同偏心形式对扭转角的放大效应。取偏心率为0.05时对应扭转角作为比较基准。刚度偏心对扭转角的放大效应在低延性结构中更

为明显,当延性为4或6时,曲线基本重合,与刚度偏心对扭矩的影响规律类似。强度偏心对扭转角的放大比率随目标延性需求增大而增大,最大增大到偏心率为0.05时对应扭转角的6.4倍,表明结构塑性发展越充分,扭转角越大。组合偏心情况类似强度偏心,其对扭转角的放大效应更大。

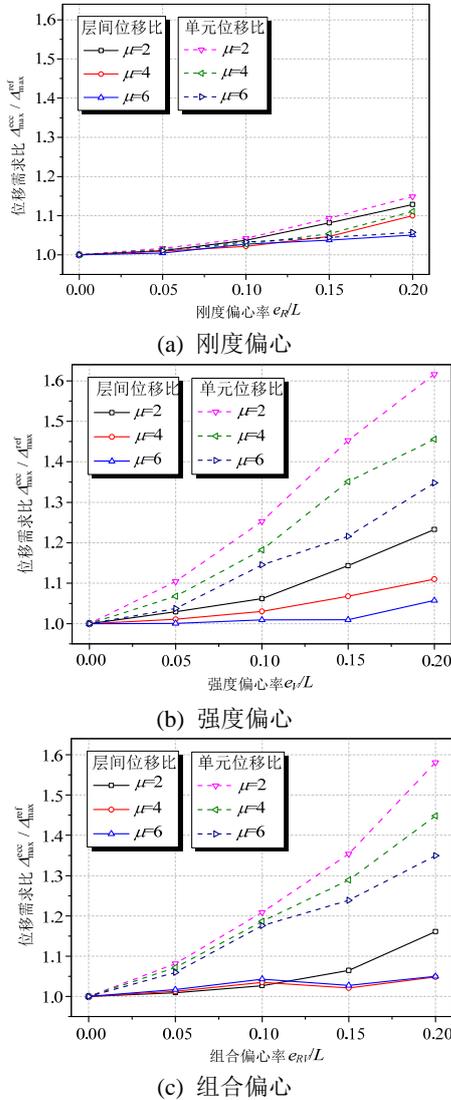
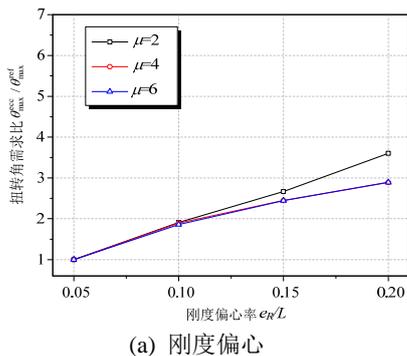
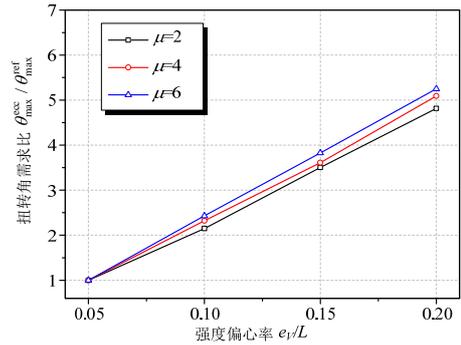


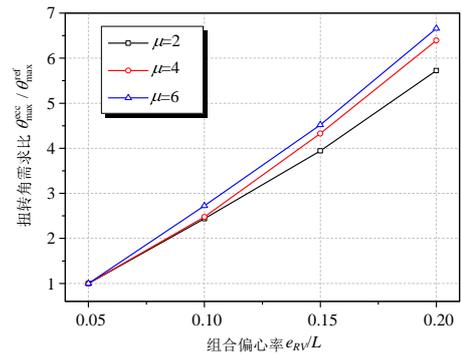
图6 不同偏心形式对位移需求的影响
Fig.6 Effects of different eccentricity type on displacement demand



(a) 刚度偏心



(b) 强度偏心



(c) 组合偏心

图7 不同偏心形式对扭转角的影响

Fig.7 Effects of different eccentricity type on rotation

3.4 速度脉冲效应对偏心结构抗震需求的影响

采用文献[15]提出的方法,对表3所列第1条强速度脉冲波滤除速度脉冲,得到与其对应的非速度脉冲型地震记录(PI 指数小于0.15,为非脉冲区间)。对影响最为显著的强度偏心体系下强速度脉冲和非速度脉冲工况进行比较。通过缩放强速度脉冲型地震记录的 PGA ,使对称结构($e_{R/L}=0$)达到建筑结构最常用的目标延性4;然后缩放非速度脉冲地震记录 PGA 使其与缩放后的强速度脉冲地震记录 PGA 相等,以保证讨论基于相同地震动强度水平下进行。

图8为强速度脉冲和非速度脉冲地震下强度偏心结构弹塑性抗震需求的比较。由图8(a)可知,相对于非速度脉冲工况,结构在强速度脉冲工况下有更大的延性需求。随偏心率增大,延性需求增大趋势更明显。图8(b)说明强速度脉冲工况下偏心结构有更大的扭矩需求,但随偏心率变化时增大比例不明显。图8(c)说明强速度脉冲地震相对于非速度脉冲地震,对偏心结构扭转角产生明显的放大效应,且随偏心率增大,放大效应更显著。因而,在速度脉冲地震效应和结构偏心的双重不利影响下,结构有更大的弹塑性抗震需求。

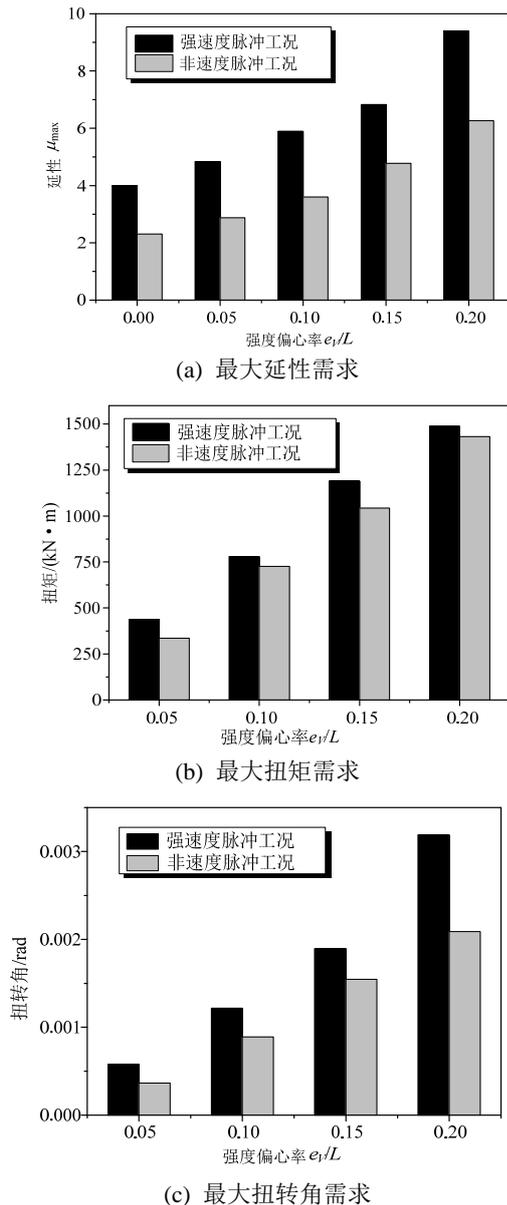


图8 强速度脉冲和非速度脉冲地震工况下强度偏心结构弹塑性抗震需求比较

Fig.8 Elasto-plastic seismic response comparison for pulse-like and non-pulse-like cases

4 结论

通过对单层 RC 框架结构在速度脉冲地震效应和不同偏心形式双重不利条件下的弹塑性抗震需求分析, 得到以下结论:

(1) 偏心结构在强速度脉冲地震作用下, 比非速度脉冲地震作用下有更大的弹塑性抗震需求, 建议对偏心结构进行弹塑性动力时程分析时应区分强速度脉冲地震和非速度脉冲地震。

(2) 刚度偏心对结构弹塑性需求影响不敏感; 随刚度偏心率的增大, 刚侧延性需求增大, 柔侧延

性需求减小; 对层间位移、最大单元位移、扭矩均有一定的放大效应。偏心率一定时, 放大效应对延性不敏感。

(3) 强度偏心对结构弹塑性需求影响最为显著。随偏心率增大, 弱侧延性需求显著增大, 最大达到对称结构延性需求的 3.09 倍, 强侧延性需求减小; 扭矩和转角显著增大, 偏心率为 0.2 时扭转角增大到偏心率为 0.05 时的 6.40 倍。建议在弹塑性分析中宜增加强度偏心指标作为偏心或平面不规则结构的分析参数。

(4) 组合偏心对结构弹塑性需求的影响规律与强度偏心类似, 对延性、位移需求的影响程度小于强度偏心, 对扭矩和转角的影响略大于强度偏心。

本文的分析仍局限于基于作者新开发的考虑变轴力-双向弯曲模型($N-M$ 模型)的单层 RC 框架, 且仅针对单向偏心情况。后续的研究将扩展到多层偏心框架、剪力墙或框剪结构体系, 同时考虑复杂的双向偏心和多维地震动耦合影响。

参考文献:

- [1] De Stefano M, Pintucchi B. A review of research on seismic behaviour of irregular building structures since 2002 [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2008, 6(2): 285-308.
- [2] 王墩, 吕西林. 平面不规则结构非弹性扭转地震反应研究进展[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(2): 51-58.
Wang Dun, Lü Xilin. Progress in study on inelastic torsional seismic response of asymmetric buildings [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2010, 30(2): 51-58. (in Chinese)
- [3] Ayre R S. Interconnection of translational and torsional vibrations in buildings [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1938, 28(2): 89-130.
- [4] Kan C L, Chopra A K. Torsional coupling and earthquake response of simple elastic and inelastic systems [J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(8): 1569-1588.
- [5] Sadek A W, Tso W K. Strength eccentricity concept for inelastic analysis of asymmetrical structures [J]. Engineering Structures, 1989, 11(3): 189-194.
- [6] Bugeja M N, Thambiratnam D P, Brameld G H. The influence of stiffness and strength eccentricities on the inelastic earthquake response of asymmetric structures [J]. Engineering Structures, 1999, 21(9): 856-863.
- [7] Dutta S C, Das P K, Roy R. Seismic behavior of code-designed bi-directionally eccentric systems [J]. Journal of Structural Engineering, 2005, 131(10): 1497-1514.

- [8] Dutta S C, Roy R. Seismic demand of low-rise multistory systems with general asymmetry [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2012, 138(1): 1—11.
- [9] Roy R, Chakroborty S. Seismic demand of plan-asymmetric structures: a revisit [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2013, 12(1): 99—117.
- [10] Bosco M, Marino E M, Rossi P P. An analytical method for the evaluation of the in-plan irregularity of non-regularly asymmetric buildings [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2013, 11(5): 1423—1445.
- [11] 王耀伟. 平面不规则结构非弹性地震反应规律研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003: 1—196.
Wang Yaowei. A study on the inelastic earthquake response of the asymmetric-plan structure [D]. Chongqing: Chongqing university, 2003: 1—196. (in Chinese)
- [12] 刘畅. 地震作用下偏心结构扭转反应研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007: 1—162.
Liu Chang. Study on torsional response of eccentric structures under seismic action [D]. Changsha: Hunan university, 2007: 1—162. (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] 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.
- [16] 赵凤新, 韦韬, 张郁山. 近断层速度脉冲对钢筋混凝土框架结构地震反应的影响[J]. *工程力学*, 2008, 25(10): 180—186.
Zhao Fengxin, Wei Tao, Zhang Yushan. Influence of near-fault velocity pulse on the seismic response of reinforced concrete frame [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(10): 180—186. (in Chinese)
- [17] 周靖, 陈凯亮, 方小丹. 基于剪切型结构的速度脉冲地震地面运动强度表征参数评估[J]. *工程力学*, 2011, 28(6): 149—155.
Zhou Jing, Chen Kailiang, Fang Xiaodan. Evaluation of intensity measures for velocity pulse-like earthquake ground motions based on shear type MDOF systems [J]. *Engineering Mechanics*, 2011, 28(6): 149—155. (in Chinese)
- [18] AS/NZS 1170.4. Structural design actions-Part 4 earthquake actions, general design requirement and loading on structures [S]. Australian: New Zealand, 2004.
- [19] GB 50011-2010, 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
GB 50011-2010, Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2010. (in Chinese)
- [20] Li K N. CANNY program for three-dimensional nonlinear static and dynamic structural analysis [CP]. <http://members.shaw.ca/CannyNAS/>, 2012.8.10.
- [21] Kozo system. Structural nonlinear analysis program [CP]. <http://www.kozo.co.jp/program/kozo/snap/index.html>, 2012.8.10.