

文章编号: 1000-0887(2001) 11-1129-06

# 多层剪切型均匀偏心结构的弹塑性 地震反应规律的研究

蔡贤辉, 邬瑞锋, 许士斌

(大连理工大学 工程力学系, 大连 116023)

(本刊编委邬瑞锋来稿)

**摘要:** 对多层剪切型的均匀偏心结构进行弹性地震反应分析, 研究了基本平动周期、平扭频率比、偏心率、地震动强度、非偏心向地震动等对结构的弹塑性位移和构件延性反应的影响。研究表明: 上述因素对结构的位移和延性反应有较大的影响, 非偏心向的地震动对结构反应的影响受偏心向单元进入弹塑性程度的影响。

**关键词:** 偏心结构; 地震反应; 延性; 弹塑性

**中图分类号:** TU311.3      **文献标识码:** A

## 引 言

在弹性运动阶段, 均匀偏心结构有着与单层偏心结构相一致的运动规律, 单层偏心结构是有代表性的。但对单层偏心结构的弹塑性地震反应的研究表明, 结构的弹塑性运动规律与弹性时的规律有较大的差别<sup>[1~3]</sup>, 多层偏心结构的弹塑性运动规律与单层结构的运动规律也有差别, 单层偏心结构就不再具有代表性<sup>[4,5]</sup>。目前, 对多层偏心结构的弹塑性地震反应规律的研究并不多见, 要进一步研究回答的问题不少。因此, 有必要对多层偏心结构的弹塑性运动规律进行细致深入的研究。

多层偏心结构的偏心形式可以是多种多样的, 有刚度偏心和质量偏心, 均匀偏心和局部偏心等。不同的偏心方式有不同的运动规律, 对它们的研究较为复杂。本文针对比较常见的刚度偏心的均匀偏心结构, 即各层的质量中心与几何中心一致、各层的刚度中心与几何中心有着相同距离的偏心结构, 研究影响其弹塑性运动的几个结构参数和外在因素, 试图对这种偏心结构的弹塑性运动规律有更进一步的了解, 以指导工程设计。

## 1 分析模型

结构简化为沿两个正交方向布置的一系列剪切型抗侧力杆件, 这些抗侧力杆件代表不考虑竖向变形的框架等剪切型抗侧构件, 它们之间通过刚性楼板连接; 结构质量在每层楼板的抗侧力单元位置处凝聚, 并忽略其转动惯量。由于该模型分离化处理了各抗侧力单元, 各单元有自己的屈服特性, 避免了以往分析模型的层平均。故该模型适合于偏心结构的弹塑性分析<sup>[6]</sup>。

收稿日期: 2000\_06\_20; 修订日期: 2001\_03\_20

作者简介: 蔡贤辉(1973), 男, 浙江, 鄞县人, 副教授, 博士。

## 2 数值分析与结果

以按中国建筑抗震设计规范(GBJ11\_89)进行7度抗震设计的理想的五层剪切型偏心结构为例,其平面图如图1所示,各层质量、刚度分布一致,各抗侧杆件的骨架线如图2所示,滞回模型为退化的三线型模型,结构的阻尼比取0.05 考虑地震动的离散性,选取八条、类场地土上的地震记录作为输入地震动,结构构件的反应取这八条输入波的平均反应量

影响均匀偏心结构弹塑性运动的因素很多,下面将分析其中几个主要因素的影响

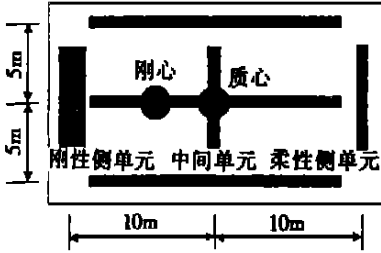


图1 模型平面图(层高  $H = 3\text{m}$ )

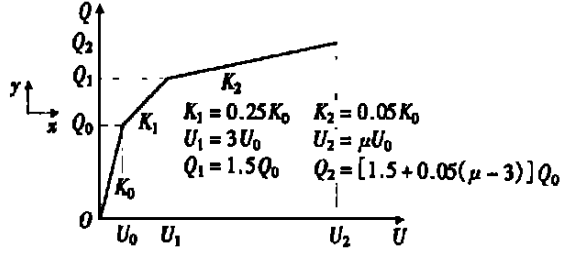
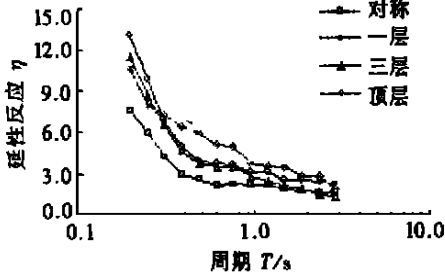


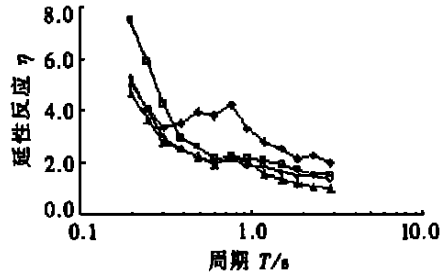
图2 模型单元的骨架线图

### 1) 基本平动周期

保持结构的构件刚度分布比不变,通过调整结构层刚度的总量来改变结构的基本平动周期 单 ( $\gamma$ ) 向地震动输入,加速度峰值  $a_y = 220 \text{ gal}$

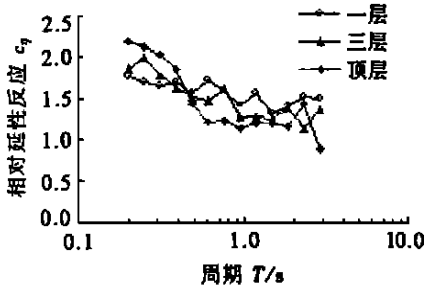


(a) 刚性侧单元

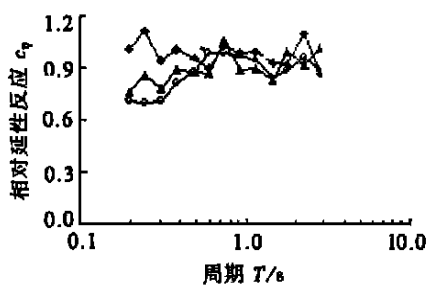


(b) 柔性侧单元

图3 结构基本周期对单元延性反应的影响 ( $\mu = 0.866, e = 0.20$ )



(a) 刚性侧单元

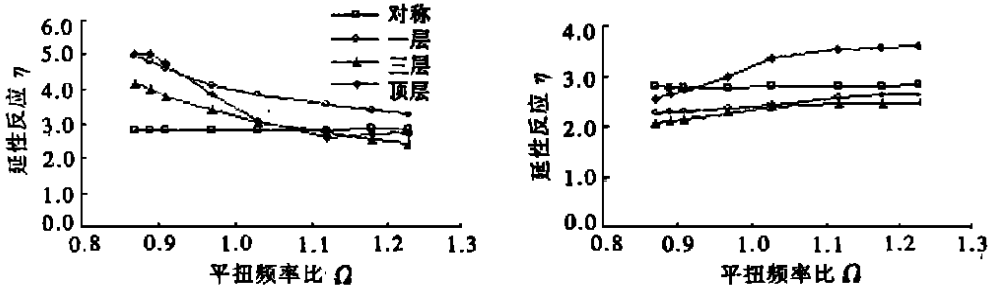


(b) 柔性侧单元

图4 结构基本周期对单元相对延性反应的影响 ( $\mu = 0.866, e = 0.20$ )

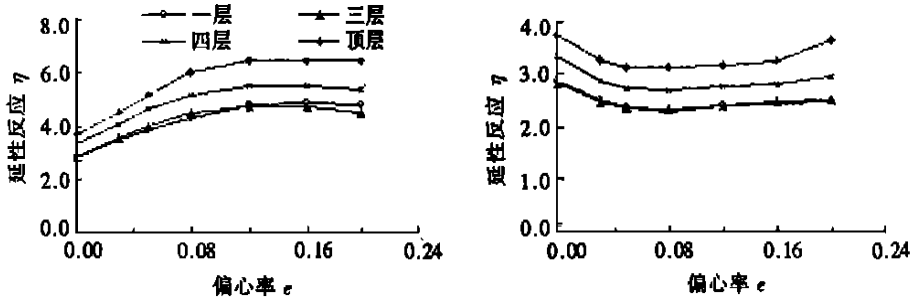
对结构弹塑性位移反应的分析表明: 1) 结构单元的位移随结构基本平移周期的增长而加大; 2) 与弹性时的规律相反,相对于平移的扭转运动随结构周期的增长而加大,周期较短时相对扭转减小,较长时相对扭转较大

分析结构构件的平均延性反应 ( $\bar{\eta} = \overline{u_{\max}/U_1}$ , 为对应地震动下的构件最大延性反应,  $u_{\max} = u_{\max}/U_1$ ,  $u_{\max}$  为地震动时程内的最大层间变形,  $U_1$  为抗侧单元的屈服变形), 由图 3 可见: 1) 单元的延性反应基本上随着结构周期的增长而呈减小趋势; 2) 短周期结构的底层单元有较大的延性反应, 长周期结构的顶层单元有较大的延性反应



(a) 刚性侧单元 (b) 柔性侧单元  
图 5 平扭频率比对单元延性反应的影响 ( $f_y = 2.5\text{Hz}$ ,  $e = 0.20$ )

与对称结构的对应位置单元的延性反应相比(图 4): 1) 刚性侧单元的平均相对延性反应  $c$  ( $c = \bar{\eta} / \eta_{\text{ref}}$ ,  $\bar{\eta}$ 、 $\eta_{\text{ref}}$  分别为偏心结构的抗侧构件和对应的对称结构构件在某一地震动下的最大延性反应, 基本上大于 1), 短周期时可达 2, 说明刚性侧单元的延性反应相对增大; 而柔性侧单元的相对延性反应基本上小于 1, 说明柔性侧单元的延性反应相对减小 2) 周期越短, 偏心结构刚性侧单元的相对延性反应增大越多, 即相对延性反应随结构基本周期的增长而减小(图 4(a)); 柔性侧单元的相对延性系数随结构基本周期的增长而略有增大(图 4(b)) 3) 较短周期情况下, 顶层单元的相对延性反应大于其它层, 即比较其它层来说顶层单元的延性反应与对称结构相比增加较多



(a) 刚性侧单元 (b) 柔性侧单元  
图 6 偏心率对单元延性反应的影响 ( $f_y = 2.5\text{Hz}$ ,  $\Omega = 0.886$ )

2) 平扭频率比

保持偏心距不变, 通过调整结构  $y$  向抗侧力单元的刚度分布比例来调整结构的平扭频率比  $\Omega = f_y/f_x$  弹塑性时程分析( $y$  向地震动输入,  $a_y = 220\text{gal}$ ) 的结果表明, 结构的柔性侧单元的弹塑性位移随平扭频率比的增大而变大, 刚性侧单元的弹塑性位移随平扭频率比的增大而变小, 结构的扭转运动随平扭频率比的增大而加大

平扭频率比的变化对单元的平均延性反应有较大的影响(图 5); 刚性侧单元影响稍大, 延性反应随平扭频率比的增大而下降; 柔性侧单元影响稍小, 延性反应随平扭频率比的增大而增大; 对顶层单元的影响最明显

3) 偏心距

通过调整抗侧单元的刚度分布比例来调整结构的偏心距, 结构的基本周期和基本平扭频率比保持不变。弹塑性分析 ( $a_y = 220 \text{ gal}$ ) 表明, 结构的刚性侧单元的弹塑性位移随偏心距的增大而变小, 柔性侧单元的弹塑性位移随偏心距的增大而变大, 表明结构的扭转运动随偏心距的增大而加大。

分析构件单元的延性反应, 由图 6 可见: 1) 刚性侧单元的延性反应基本上随着偏心距的增大而增大, 顶层单元的延性反应增加最多; 2) 柔性侧单元的延性反应在偏心距增大时并不增大, 在偏心距不大的时候反而随偏心距的增大而减小; 3) 单元的延性反应及相对延性反应在偏心距不大时受偏心距的影响明显, 超过某一值后趋于平缓。

4) 偏心向的地震动强度

改变单向输入的地震动加速度幅值  $y$  的大小, 研究地震动强度对结构的弹塑性位移及延性反应的影响。

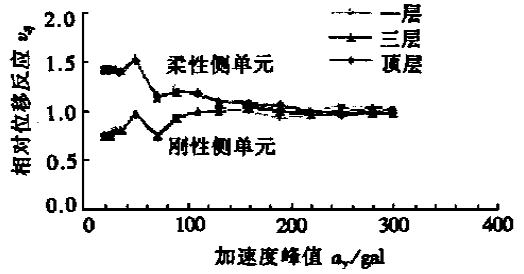
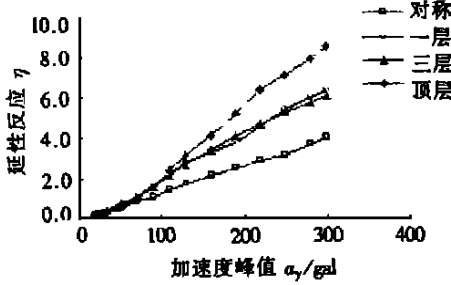
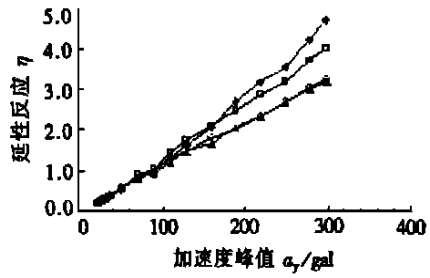


图 7 偏心向的地震动强度对结构相对扭转的影响 ( $f_y = 2.5 \text{ Hz}$ ,  $\gamma = 0.866$ ,  $e = 0.10$ )



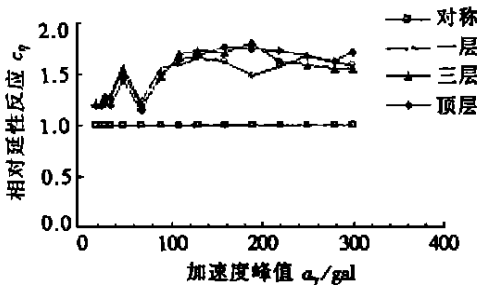
(a) 刚性侧单元



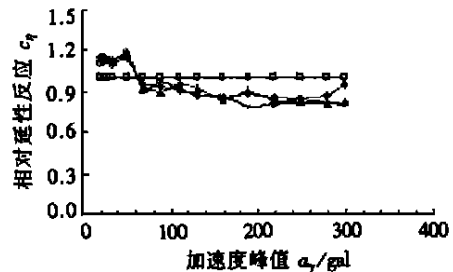
(b) 柔性侧单元

图 8 偏心向的地震动强度对单元延性反应的影响 ( $f_y = 2.5 \text{ Hz}$ ,  $\gamma = 0.866$ ,  $e = 0.10$ )

分析结构两侧边缘单元的位移与对称结构的平移反应的比值, 可以发现: 刚性侧单元和柔性侧单元的比值均随地震动加速度峰值的增大而逐渐趋向于 1, 表明结构相对于平移的扭转量随地震动强度的增大而减小, 结构的运动逐渐趋向于平移运动(图 7)。



(a) 刚性侧单元



(b) 柔性侧单元

图 9 偏心向的地震动强度对单元相对延性反应的影响 ( $f_y = 2.5 \text{ Hz}$ ,  $\gamma = 0.866$ ,  $e = 0.10$ )

图 8 表明: 1) 构件单元的平均延性反应明显随地震动强度的增大而增大, 顶层单元延性反应增加最多; 2) 刚性侧单元的延性反应比柔性侧单元的延性反应增大多; 3) 刚性侧单元的延性反应比对称结构的延性反应明显大。

与对称结构的对应位置单元的延性反应相比(图9):刚性侧单元的平均相对延性反应随地震动强度的增大而增大,柔性侧单元的相对延性反应随地震动强度的增大而减小;上述趋势在地震动强度超过某一值后趋于平缓

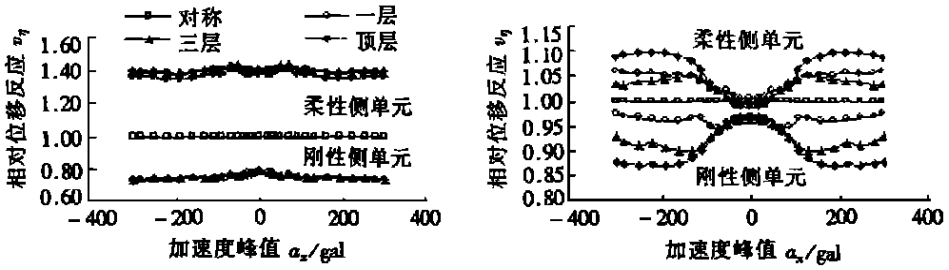


图10 非偏心向地震动强度对单元位移反应的影响 ( $f_y = 2.5\text{Hz}$ ,  $\gamma = 0.886$ ,  $e = 0.10$ )

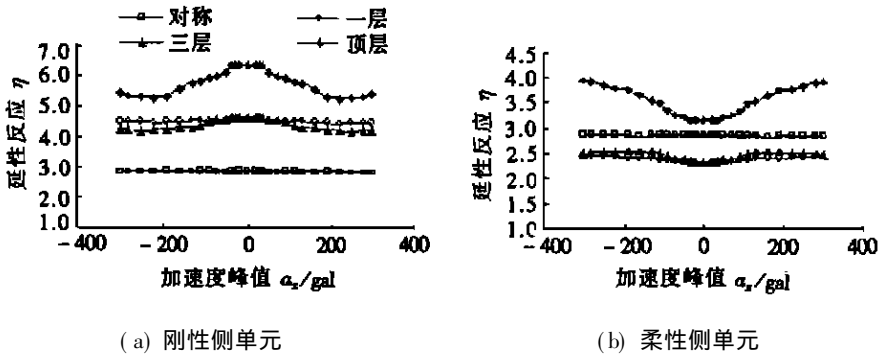


图11 非偏心向地震动强度对单元延性反应的影响( $f_y = 2.5\text{Hz}$ ,  $\gamma = 0.886$ ,  $e = 0.10$ )

### 5) 偏心向和非偏心向双向地震动输入

保持偏心向的地震动加速度幅值  $a_y$  的大小不变, 改变非偏心向地震动的加速度幅值, 研究结构的弹塑性反应受非偏心向地震动的影响。图10所示为偏心向的地震动加速度幅值  $a_y$  分别保持 35gal 和 220gal, 非偏心向的地震动加速度幅值  $a_x$  (负号表示反方向) 发生变化, 结构单元的位移相对于对称结构平移的反应量变化图。由图10(a)可见: 偏心向的加速度峰值不大(35gal)时, 结构单元的相对位移随非偏心向的地震动强度的增大而稍微变小, 但变化幅度不大。它表明在偏心向的加速度峰值不大的情况下, 非偏心向的加速度峰值的变化并不会使结构的扭转运动发生明显的改变。由图10(b)可见: 偏心向的加速度峰值较大(220gal)时, 结构刚性侧单元的相对位移随非偏心向的地震动强度的增大而减小, 而柔性侧单元的相对位移随非偏心向的地震动强度的增大而增大, 这两相对位移在非偏心向的地震动强度达到一定值后变化平缓甚至和原变化规律相反变化。它表明在偏心向的加速度峰值较大的情况下, 由于非偏心向的加速度峰值的增大, 结构的扭转运动有加强的趋势, 但在非偏心向的加速度峰值增大到一定量后, 扭转的加强趋势变缓, 甚至变小。这两图表明, 非偏心向的地震动对偏心结构的扭转影响受偏心单元进入弹塑性的程度大小的制约, 偏心单元进入弹塑性程度较浅时的影响不显著, 较深时的影响明显。

图11所示为偏心向地震动加速度幅值  $a_y$  保持 220gal, 非偏心向地震地强度发生变化时的单元平均延性反应。由该图可见: 1) 结构的刚性侧单元的延性反应随非偏心向地震动强度的增大而减小, 而柔性侧单元的延性反应随非偏心向地震动强度的增大而增大; 非偏心向的地震

动强度超过某一值后该趋势趋于平缓 2) 单元越在上层其延性反应受非偏心向地震动强度的影响越明显, 顶层单元影响最明显, 底层单元影响不大

### 3 结 论

多层剪切型的均匀偏心结构的弹塑性分析表明, 构件单元的位移、延性及相对延性反应与结构的基本平动周期、平扭频率比、静力偏心距、地震动强度以及非偏心向的地震动等明显相关 不同层上的抗侧单元受上述各个因素的影响基本上一致

但应注意, 多层偏心结构的弹塑性地震反应受许多因素的影响, 本文的分析仅是其中的一部分 尤其值得一提的是结构单元的强度分布对其弹塑性反应有着极为重要的影响<sup>[7,8]</sup>, 不同的强度分布甚至会有截然不同的弹塑性反应 本文的工作是基于已被研究<sup>[8]</sup>表明的比较合理的强度布置方法, 即基于中国建筑抗震设计规范(GBJ11\_89)规定的考虑扭转影响的振型分解反应谱法的强度分布, 由此所得出的结论是有局限性的

#### [参 考 文 献]

- [1] Kan C L, Chopra A K. Torsional coupling and earthquake response of single elastic and inelastic systems[J]. J Struct Div ASCE, 1981, **107**(7): 1569-1588.
- [2] Bozorgnia Y, Tso W K. Inelastic earthquake response of asymmetric structures[J]. J Struct Eng ASCE, 1986, **112**(2): 383-400.
- [3] Goel R K, Chopra A K. Inelastic seismic response of one\_story, asymmetric\_plan systems: effects of stiffness and strength distribution[J]. Earthquake Eng Struct Dyn, 1990, **19**(7): 949-979.
- [4] Duan X N, Chanlder A M. Inelastic seismic response of code\_designed multistorey frame buildings with regular asymmetry[J]. Earthquake Eng Struct Dyn, 1993, **22**(5): 431-445.
- [5] De la Llera J C, Chopra A K. Inelastic behavior of asymmetric multistroy buildings[J]. J Struct Eng ASCE, 1996, **122**(6): 597-606.
- [6] 蔡贤辉, 邬瑞锋, 曲乃泗. 偏心结构的弹塑性地震反应时程分析[J]. 工程抗震, 1999, (4): 14-17.
- [7] Chanlder A M, Duan X N. Evaluation of factors influencing the inelastic seismic performance of torsionally asymmetric buildings[J]. Earthquake Eng Struct Dyn, 1991, **20**(1): 87-95.
- [8] 蔡贤辉, 邬瑞锋, 慕宝晖. 地震动强度与偏心结构的弹塑性地震反应[J]. 应用数学和力学, 2000, **21**(5): 451-458.

## Research on the Inelastic Seismic Responses of Shear\_Type Multistorey Buildings With Regular Asymmetry

CAI Xian\_hui, WU Rui\_feng, XU Shi\_bin

(Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116023, P R China)

**Abstract:** The inelastic seismic responses of shear\_type multistorey buildings with regular asymmetry were analyzed. The effects of the fundamental lateral period, the fundamental frequency ratio of translational to torsional, the eccentric ratio, earthquake intensity and orthogonal earthquake excitations on inelastic displacement and ductility were studied respectively. Numerical results show that aforementioned factors influence the seismic responses of the buildings. The effect of the orthogonal-input of ground motion is likely to be restricted to the moving status of eccentric elements.

**Key words:** asymmetric building; seismic response; ductility; inelastic