

文章编号: 1000-0887(2000) 05-0451-08

偏心结构的弹塑性平扭耦合反应 与地震动强度*

蔡贤辉, 邬瑞锋, 綦宝晖

(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: 从五层剪切模型出发, 研究不同地震动强度下的多层偏心结构所对应的平扭耦合弹塑性地震响应。结果表明: 平扭耦合强度与构件的强度分布有关; 按考虑扭转影响的振型分解反应谱法强度设计的结构, 其平扭耦合运动程度在结构进入非弹性运动后就随着地震动强度的增大而减弱; 而按比例刚度法强度设计的结构, 其平扭耦合运动程度在结构进入非弹性运动后先随着地震动强度的增大而增强, 超过一定值后随地震动强度的增大而减弱, 但其影响不容忽视。

关键词: 弹塑性; 扭转; 耦合反应; 地震; 偏心结构

中图分类号: TU311.3 **文献标识码:** A

引 言

偏心结构在弹塑性状态下的平扭耦合地震反应一直为人们所关心。文献[1]通过一个抗侧单元模拟单层偏心结构进行的研究表明: 偏心结构的弹塑性响应受平扭耦合的影响比弹性时为小, 其平扭耦合运动随着地震动强度的增大而逐渐趋向于单自由度结构的弹塑性运动, 即偏心结构的扭转运动随着地震强度的增大而减弱, 结构的运动将以平移运动为主。但是, 用单个抗侧单元模拟单层偏心结构显然是有问题的, 因为实际结构在进行非弹性运动时, 其内各结构构件由于强度不同进入非弹性运动的时刻不同, 而且导致的非弹性运动的深度也不同, 所以用单个抗侧构件难以表达整个结构的非弹性特性, 得出的结论是不完全的和值得怀疑的。文献[2]通过对三个抗侧单元模拟单层偏心结构进行的研究, 得出了与此并不一致的结论。它的研究表明: 结构进入较深的非弹性阶段时的运动并不是以平移运动为主的, 偏心结构在达到其最大反应的瞬时存在着明显的扭转运动。文献[3]也有一致的结论。文献[4]肯定了用三个抗侧单元模拟单层偏心结构的可行性。但他们只是针对某一强度分布的结构来进行分析, 由此得出的结论只能说是对该强度分布成立, 是有局限性的。

对多层偏心结构的研究目前还较少。文献[5]的研究表明多层偏心结构有着与单层偏心结构不同的规律。关于多层偏心结构相对扭转的规律更是未被广泛认识。本文将选用五层剪切模型研究底层偏心结构和均匀偏心结构在不同的强度设计准则下的随地震动强度变化的运

* 收稿日期: 1999_01_12; 修订日期: 2000_01_16
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59678033)
作者简介: 蔡贤辉(1973~), 男, 博士后。

动规律, 试图对多层偏心结构的弹塑性反应有一个更全面的了解。

1 结构模型与地震波简介

选取五层剪切型结构模型, 平面图如图 1 所示。各层质量分布一致, 转动半径均为 $0.866 B$; 各抗侧力构件只在其平面内有刚度和强度, 平面外忽略不计; 结构对 x 轴对称, 对 y 轴偏心; y 向刚度分布为: 非偏心层 $0.4:0.2:0.4$, 偏心层 $0.52:0.16:0.32$ (偏心率 $e = 0.1$); x 向刚度分布为 $0.4:0.4:0.4$ 。结构各层的抗侧刚度和对静刚度中心的抗扭刚度一致。结构的阻尼比取 0.05 。

在结构的强度设计时, 考虑两种强度设计方法: 比例刚度法和振型分解反应谱法。比例刚度法是指将对应的非偏心结构的侧向地震作用直接按抗侧刚度比例分配给偏心结构的各抗侧单元, 即不考虑扭转的强度设计方法; 振型分解反应谱法, 在这里是指考虑了扭转影响的强度设计方法, 结构的振型中包含扭转分量。各抗侧单元的骨架线和滞回曲线如图 3、4 所示, 为三线性模型。

众所周知, 输入地震波对结构反应的影响是非常显著的。为减小这种影响, 选取了八条比较接近的 II、III 类场地上的记录地震波作为输入波, 结构的反应取这些反应的平均值。图 2 为这八条波的加速度平均反应谱(阻尼比取 0.05), 该平均反应谱和规范的标准反应谱的形状是比较接近的。

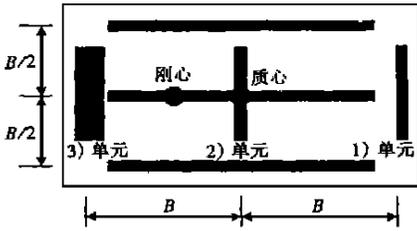


图 1 模型平面图 ($B = 10\text{m}$, 层高 $H = 3\text{m}$)

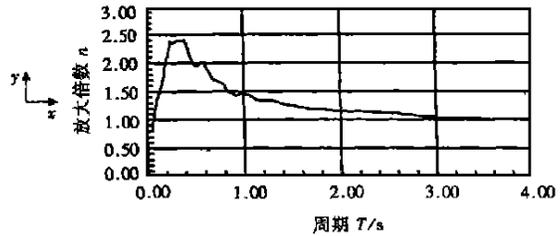


图 2 选用地震波的平均反应谱

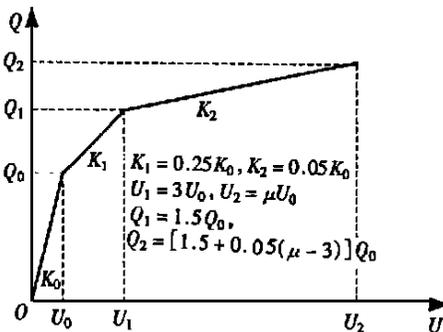


图 3 骨架线图

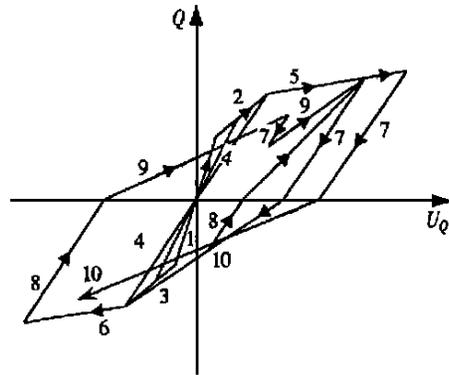


图 4 滞回曲线图

2 地震动强度对结构弹塑性反应的影响

一般情况下,结构的位移响应随着地震动强度的增大而增大,偏心结构也遵循此规律。引入位移系数的概念:

结构的 i 层 j 抗侧单元的位移系数 η_{ij} :

$$\eta_{ij} = u_{ej} / u_{0i}$$

上式中, u_{ej} 为偏心结构 i 层 j 抗侧单元的最大层间位移反应; u_{0i} 为偏心结构所对应的非偏心结构的 i 层的最大层间位移反应。如果柔性侧单元(远离刚度中心的边缘单元)的位移系数是随着地震动强度的增大而增大、刚性侧单元(接近刚度中心的边缘单元)的位移系数是随着地震动强度的增大而减小,可以说结构的弹塑性扭转响应相对其平移来说是随着地震动强度的增大而增大;反之,如果柔性侧单元的位移系数是随着地震动强度的增大而减小、刚性侧单元的位移系数是随着地震动强度的增大而增大,可以说结构的弹塑性扭转响应相对其平移来说是随着地震动强度的增大而减小。如果结构的弹塑性扭转响应相对其平移来说随着地震动强度的增大而变化不大,那么结构的各抗侧单元的位移系数应随地震动强度的变化也变化不大。这样,应用该位移系数可以较好地分析结构在不同地震动强度下的平扭耦合程度。

分析均匀偏心结构和底层偏心结构的弹塑性反应受到地震动强度的影响情况。以地震动加速度的峰值 a^* 来表征地震动的强度,取峰值加速度为 35gal, 60gal, 100gal, 150gal, 200gal, 250gal, 300gal, 350gal 和 400gal。

2.1 底层偏心结构

文献[6]的研究表明,对于仅某层偏心的结构来说偏心对偏心层本身的影响远大于对其它层的影响,因此仅对底层偏心结构的首层抗侧单元的位移系数进行分析。图5所示的是底层偏心结构的首层 1) 和 3) 单元的位移系数随地震动强度的变化曲线。

从图5可以看到,对于振型分解反应谱法强度布置的底层偏心结构来说:底层单元的位移系数随着地震动强度的增大而逐渐趋向于1,说明结构的相对扭转是随着地震动强度的增大而减弱,逐渐趋向于平移运动,与文献[1]的结论一致。但对于比例刚度法分布的底层偏心结构来说:底层结构的位移系数随着地震动强度的增大先逐渐远离1;当地震动强度达到一定值以后,才逐渐向1趋近,但趋势较缓与1的距离始终较大。这说明结构的相对扭转在地震动强度不是很大,结构进入非弹性运动状态不深时,随着地震动强度的增大而增大,即结构的平扭耦合运动加剧;当地震动强度超过一定值,结构进入非弹性运动状态较深,结构的各抗侧单元全部进入弹塑性运动,随着地震动强度的增大其相对扭转逐渐减弱,但仍保留不容忽视的扭转运动,与文献[2]的结论一致。可见[1]和[2]的结论都只是在某种条件下才成立,并不是偏心结构的普遍规律。

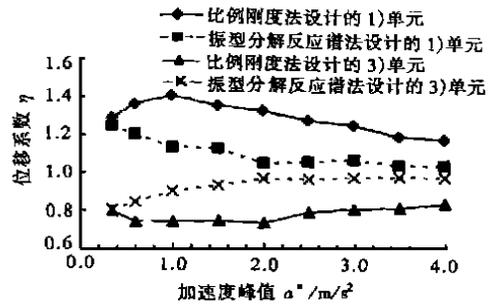
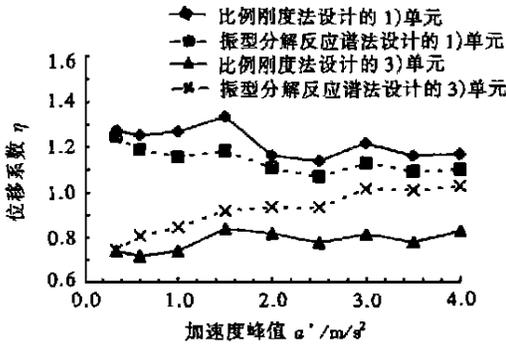


图5 底层偏心结构($T = 2.0s$)的首层抗侧单元的位移系数

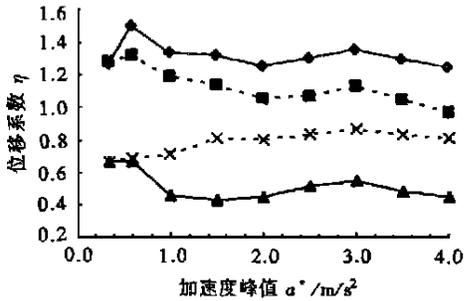
2.2 均匀偏心结构

图 6 所示的是均匀偏心结构的底层和顶层的 1) 和 3) 单元的位移系数随地震动强度的变化曲线

从图 6 可以看到,对于振型分解反应谱法强度布置的均匀偏心结构来说:不管是底层单元还是顶层单元,其位移系数是随着地震动强度的增大而逐渐趋向于 1 的,说明结构的相对扭转是随着地震动强度的增大而逐渐减弱。但对于比例刚度法分布的均匀偏心结构来说:结构的单元位移系数随着地震动强度的增大先逐渐远离 1,然后才逐渐缓慢向 1 趋近或保持某一相对量,与 1 的距离始终较大。这说明结构的相对扭转在地震动强度不大时,随着地震动强度的增大而增大,即结构的平扭耦合运动加剧;当地震动强度继续增大时,其相对扭转可能会逐渐减弱,但不管对结构的底层或顶层来说一般仍有较大的扭转运动。



(a) 底层单元



(b) 顶层单元

图 6 均匀偏心结构 ($T = 2.0s$) 的位移系数

3 地震强度对其它不同特性结构的影响规律

3.1 不同偏心距的结构

选取振型分解反应谱法强度布置的基本平动周期为 2 秒的底层偏心结构进行分析,结构的偏心率 e 分 0.05, 0.10 和 0.20 三种情况,结构的其它参数与前面一致。图 7 所示的是底层偏心结构的首层抗侧单元的 1) 和 3) 单元的位移系数 η 随地震动强度的变化曲线。

从该图中我们可以看到,文献[6]得出的“偏心越大,结构的平扭耦合响应越大”结论并没有因地震动强度的变化而变化。

3.2 不同周期的结构

选取振型分解反应谱法强度布置的偏心率 e 为 0.10 的抗扭刚度较强的结构,基本平动周期 T 分别为 2s 和 0.4s,结构的其它参数与前面一致,比较不同频率的结构随地震动强度变化的规律。

图 8 为底层偏心结构的单元位移系数随地震动强度的变化曲线。

分析表明,偏心结构地震动强度的运动规律并没有因结构基本周期的不同而改变。但不同周期的结构,其平扭耦合运动程度随地震动强度的增大而减弱的速度不一致:结构的周期越

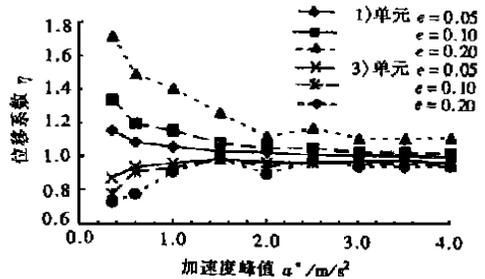


图 7 不同偏心率的底层偏心结构的首层单元的位移系数

短,其减弱的速度越快。各偏心结构都有类似的规律。

3.3 不同抗扭刚度的结构

选取振型分解反应谱法强度布置的偏心率 e 为 0.10、基本平动周期为 2s 的结构,比较不同抗扭刚度的结构随地震动强度变化的规律。图 9 为底层偏心结构的单元位移系数随地震动强度的变化曲线图。由该图可见,结构的抗扭能力越强,其位移系数越迅速向 1 靠近。各偏心结构都有类似的规律。

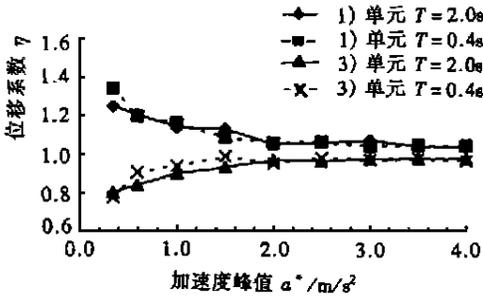


图 8 不同周期的底层偏心结构的首层单元位移系数

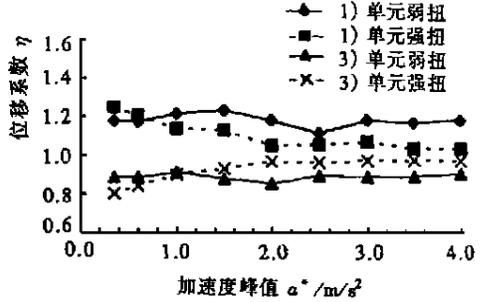


图 9 不同抗扭刚度的底层偏心结构的首层单元位移系数

4 规律的试解释

下面从 EL_Centro 地震波作用下的底层偏心结构的反应出发,对该规律进行解析。

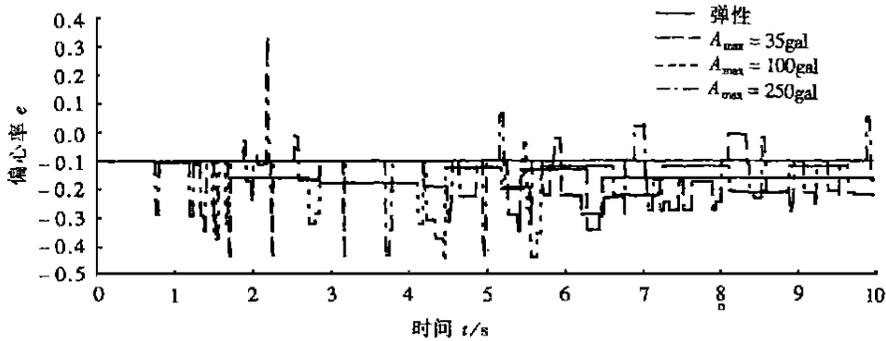
首先,看一下地震加速度峰值为 35gal 时的结构底层单元的运动状态(表 1)。从表中可见,对于比例刚度法强度设计的底层偏心结构来说,结构底层的柔性侧单元首先进入开裂状态;而对于振型分解反应谱法强度设计来说,结构底层的刚性侧单元首先进入开裂状态。观察结构在其它加速度峰值($> 35gal$)下的底层单元的开裂顺序,发现与 35gal 时的先后顺序相一致,即按比例刚度法强度设计结构的柔性侧单元首先进入开裂状态,而按振型分解反应谱法强度设计的结构是刚性侧单元首先进入开裂状态。不同的强度布置而导致的开裂顺序的不同,明显引起结构完全不同的瞬时静偏心距值。图 10 所示的是结构底层静偏心距随时间的变化曲线。由图 10(a)可见,在比例刚度法强度布置下,底层静偏心距在首次发生变化时总是变大,在以后的变化中虽然也有变小的时候但在大多数变化中总是变大的,长周期时尤为明显些;而图 10(b)表明在振型分解反应谱法强度布置下,底层静偏心距在首次发生变化时总是变小的,甚至产生与原偏心距相反的偏心,在以后的多次变化中产生变小甚至相反偏心距的变化占绝大多数。

表 1 35gal 时的底层偏心结构底层单元的运动状态

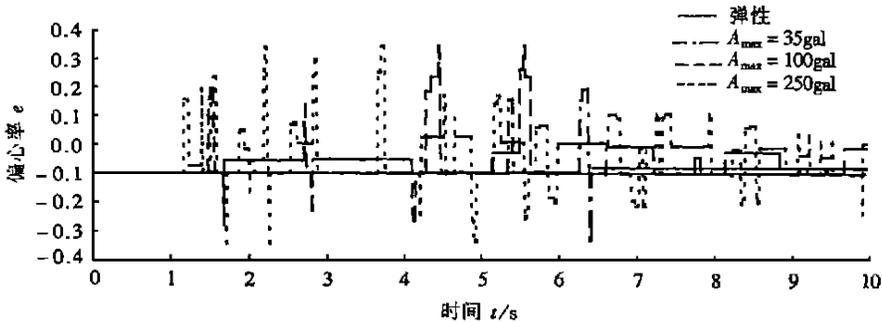
结 构		刚性侧 3) 单元	中间 2) 单元	柔性侧 1) 单元
比例刚度法	$T = 2.0s$	弹性	弹性	开裂 ★
	$T = 0.5s$	弹性	弹性	开裂 ★
振型分解反应谱法	$T = 2.0s$	刚进入开裂 ★	刚进入开裂	刚进入开裂
	$T = 0.5s$	弹性	弹性	弹性

注:带★号者为最早进入开裂的单元。

结构进入非弹性运动所引起的抗扭刚度和瞬时静偏心距随时间的变化,必然对结构的扭转产生影响。比例刚度法强度设计结构的柔性侧单元首先进入开裂运动状态后,引起结构抗扭刚度的减小和偏心距的增大,结构的扭转运动较弹性状态时明显加剧;而振型分解反应谱法强度设计的结构,由于刚性侧单元首先开裂,使结构的偏心距减小甚至符号相反,从静力学的角度来看相当于在变化的那一段时间内给结构施加了一反向的扭矩作用,尽管结构的抗扭刚度也变小了,但综合的结果是结构的扭转运动变小了。图 11 所示的就是不同强度分布下,峰值加速度为 100gal 时的底层偏心结构的首层扭转随时间的变化曲线。从图中可见,按不同方法设计的结构的首层扭转在同一加速度峰值下的扭转反应是有差别的:按振型分解反应谱法强度设计的结构的扭转运动,小于按比例刚度法强度设计时的扭转运动,也小于结构的弹性扭转。而按比例刚度法布置的结构的扭转大于结构的弹性扭转反应,在短周期时尤其明显。



(a) 比例刚度法强度分布

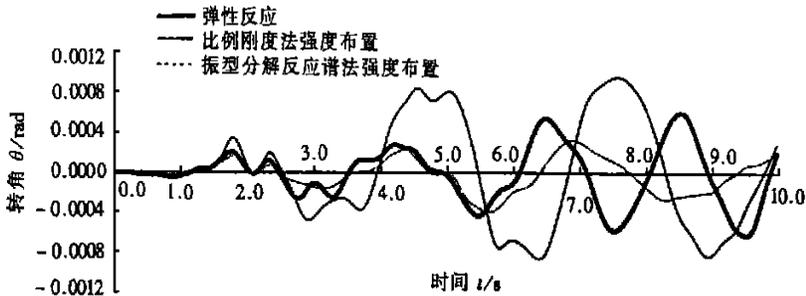
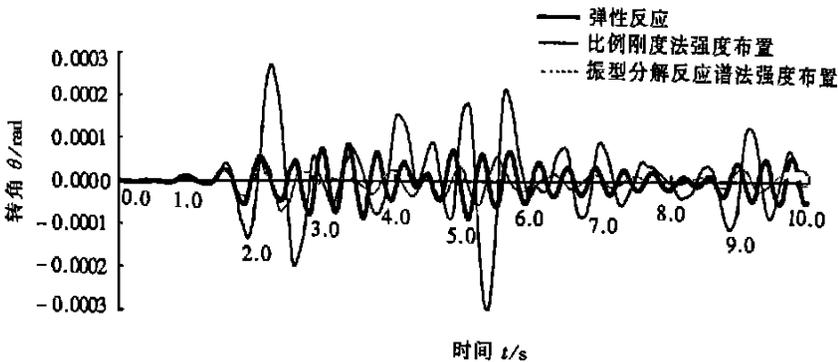


(b) 振型分解反应谱法强度分布

图 10 底层偏心结构的首层静偏心距随时间变化曲线

一般情况下,结构的平移反应在结构周期大于某一值后是随着周期的增大而减小的,结构的扭转反应也有此特性。对于进入非弹性运动状态的结构来说,由于结构刚度的削减其周期是变长的。地震动强度越大,结构的非弹性运动越深,刚度变化量也就越大,结构的周期就会越长,结构的扭转反应就会越弱。这样,用振型分解反应谱法强度设计的结构就会由于前述的瞬时偏心距减小和周期延长这两因素的共同作用,使得结构的相对扭转随着地震动强度的增大而减小,逐渐趋向于平移运动。而对比例刚度法强度设计的结构来说,在地震动强度不大时,一般情况下柔性侧单元进入非弹性运动状态,而刚性侧单元处于弹性运动状态或刚进入非

弹性运动状态。由于结构的刚度大部分集中在结构的刚性侧,非弹性运动单元引起的刚度变化并不会引起结构基本周期的显著变化,这样,因周期变长引起的扭转运动减弱并不能对前述瞬时偏心距增大而导致的扭转运动加剧产生显著影响。在地震动强度不大、刚性侧单元开裂前,结构的瞬时静偏心距是随着地震动强度的增大而增大的,因而结构的相对扭转随地震动强度的增大而加剧,表现为各单元的位移系数从弹性值开始逐渐远离1。当地震动强度继续增大,结构的刚性侧单元也进入非弹性运动时,静偏心距的增长停止,结构刚度变化较大,导致结构周期的变化也增大,由周期变长引起的扭转运动减弱逐渐变得明显起来,甚至足以抵消前述的扭转加剧部分。这样,结构的相对扭转在经历一定的加剧运动后,随着地震动强度的增大而相对减弱。但由于静偏心距始终保持着较大的值,因此结构的扭转仍将保持相当的不容忽略的量,单元位移系数与1保持相当大的距离。

(a) 长周期结构 ($T = 2.0\text{s}$)(b) 短周期结构 ($T = 0.4\text{s}$)图 11 底层偏心结构的首层扭转随时间的变化曲线 ($A_{\max} = 100\text{gal}$)

5 结 论

由前面的分析可知,结构的平扭耦合程度与结构强度设计方法的关系较大。一般情况下,振型分解反应谱法设计的结构其抗震能力明显较比例刚度法设计的结构为好。采用比例刚度法强度设计的结构,在地震动强度增大时结构的平扭耦合程度有一个先升后降的过程,而振型分解反应谱法强度设计的结构却无上升段,结构进入非弹性运动后,其平扭耦合程度可以明显下降,地震动强度越大,平扭耦合运动程度越小。

不同偏心率的结构其随地震动强度变化的规律变化不大。结构的周期越短、抗扭能力越强,其非弹性平扭耦合程度随地震动强度增大而减弱的速度越快。

[参 考 文 献]

- [1] Kan C L, Chopra A K. Torsional Coupling and earthquake response of simple elastic and inelastic systems[J]. J Struct Div ASCE, 1981, **107**(7): 1569~ 1588.
- [2] Tso W K, Sadek A W. Inelastic seismic response of simple eccentric structures[J]. Earthquake Eng Struct Dyn, 1985, **13**(2): 255~ 269.
- [3] Bozorgnia Y, Tso W K. Inelastic earthquake response of asymmetric structures[J]. J Struct Eng ASCE, 1986, **112**(2): 383~ 399.
- [4] Goel R K, Chopra A K. Inelastic seismic response of one_storey, asymmetric_plan systems: effects of stiffness and strength distribution[J]. Earthquake Eng Struct Dyn, 1990, **19**(7): 949~ 970.
- [5] 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.
- [6] 邬瑞锋,蔡贤辉,曲乃泗. 多层及高层房屋扭转耦连弹塑性地震反应的研究[J]. 大连理工大学学报, 1999, **39**(4): 471~ 477.

Inelastic Coupled Response of Eccentric Buildings With Respect to Different Earthquake Intensity

Cai Xianhui, Wu Ruifeng, Qi Baohui

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

Abstract: Using five_story shear models, the inelastic torsional coupled response of eccentric buildings to different earthquake intensity was studied. Results show that the torsional couple degree is closely related to the strength distribution of the resisting elements. Generally, the building designed by spectral modal analysis method has a tendency to move translationally as the earthquake intensity increases. The building designed by proportion rigidity method will rotate heavily to moderate earthquake, but when it is intensively excited into the inelastic phase, the coupling would decrease slightly, but could not be neglected.

Key words: inelastic; torsion; coupled response; earthquake; eccentric building