

文章编号:1006-7329(2001)06-0114-07

影响偏心结构非弹性地震反应的主要因素分析^{*}

王耀伟, 黄宗明

(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:国外对偏心结构受地震动影响的研究一直非常活跃,而我国在这方面的研究则相对较少。由于影响偏心结构体系在地震作用下的非弹性反应的因素众多,目前对不同结构参数对结构扭转反应的影响规律仍缺乏较一致的认识,本文对该领域的研究现状进行简要的评述。

关键词:偏心结构;非弹性地震反应;结构参数

中图分类号:TU318

文献标识码:A

大量的震害表明由于结构的平面布置不规则所产生的扭转效应而导致的结构破坏是相当严重的,因此,不规则结构的地震反应分析研究一直是结构抗震领域的重要研究内容。但是,影响偏心结构地震反应的因素要比平动体系的情况复杂很多,尤其是结构处于非弹性反应阶段,影响其动力反应的因素更多,而且诸多因素是相互关联的。结构处于弹性状态时,偏心体系地震反应的自身影响因素主要是静力偏心距、扭转-侧移频率比和阻尼等,它们对结构反应的影响可以通过动力方程的解析过程表现出来。但是当结构进入非弹性阶段后,由于结构刚度随时间的变化而使上述三因素也具有时变性,它们对结构反应的影响变得复杂起来,研究者们又提出了其它一些结构参数作为补充。下面对影响偏心结构非线性地震反应的主要因素的研究现状进行分析和评述。

1 偏心结构体系的分类

当前将偏心结构体系分为两大类——刚度偏心体系(SES)和质量偏心体系(MES)。刚度偏心体系是指楼层平面上质量对称分布而抗侧力构件的刚度分布不对称的结构体系;反之,若抗侧力构件的刚度在楼层平面内对称分布,而质量分布不对称的体系则称为质量偏心体系。由于某些结构参数对结构反应的影响随偏心体系的不同而表现出不同的规律性,因此,当前的研究成果基本上都是在区分这两种模型的基础上给出的,如文献[1][9][20][22][34]等。

这样划分偏心体系的优点是简单明了,研究结论具有针对性。但是在实际结构设计中,设计者并不能事先知道设计结构的偏心类型,因而无法采用相应的设计依据,增加了设计过程的复杂性。Gherzi 等人先分别研究了结构参数对质量偏心体系 and 刚度偏心体系的地震反应影响规律,然后再将两种影响结果进行统一分析,给出具有统计意义的统一参数影响规律^[5]。这种处理方法在应用上比较方便,但是这样做削弱了偏心体系类型的影响,对于偏心程度较大的结构体系,其统计结果可能会与实际情况相差较远。Tso 和 Zhu 则提出了扭转平衡(torsionally balanced—TB)参考模型,该模型将楼层的刚度中心和质量中心重合在一起,因而在地震作用下结构只发生侧向平动。根据不同偏心程度结构模型边缘抗侧力构件的强度设计结果和反应延性值与 TB 模型相应结果的对比分析,来研究偏心结构在地震作用下的反应规律,并以此作为结构设计的参考,从而在一定程度上回

* 收稿日期:2001-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目资助(59978055)

作者简介:王耀伟(1973-),男,河北威县人,博士研究生,主要从事建结构抗震研究。

避了偏心体系类型对结构设计的影响^{[3][4]}。

尽管如此,从众多的研究文献中可以发现,不同的偏心体系类型受结构参数影响的差异仍然是存在的,不论是采用哪种处理方法都不能完全消除这种差异性。如何解决偏心体系类型与实际设计中存在的矛盾问题是值得进一步探讨的问题。

2 影响偏心结构地震反应的主要因素

2.1 静力偏心距

静力偏心距(e_s)是楼层质量中心与抗侧力构件的刚度中心间的距离,它主要反映的是结构楼层质量和抗侧力构件的刚度分布的总体相对位置,其中刚度中心是同层结构抗侧力构件的刚度的一阶矩为零的点,质量中心是楼层质量一阶矩为零的点。

对于单层弹性偏心结构而言,刚度中心具有两个特点:它是结构的剪切中心,当楼层剪力合力过该点时,楼层只产生平动而无转动效应;它同时又是结构的扭转中心,当楼层仅承受扭矩作用时该点保持不动。当结构楼层受到的外力作用与抗侧力构件的合力产生偏心时结构楼层就要发生扭转变形,扭转变形(或扭矩)的大小随着偏心距离的增大而加大,因此,在地震作用下楼层扭转反应的大小主要取决于质心与刚度中心的距离,即静力偏心距。对于结构整体侧移受静力偏心距的影响规律,文献[6][7]根据振型分解反应谱法的分析结果表明,由于扭转耦联作用使偏心体系的最大基底剪力与相应无扭转的平动体系相比有所降低,也就是说扭转耦联对最大基底剪力具有卸载作用,从而使楼层质心处侧向最大位移相应也有所降低;而对于结构边缘构件,尤其是刚度较小一侧,由于扭转的原因,变形明显加大。在实际结构的动力反应中,扭转耦联存在着动力放大效应,即结构的动力扭转影响要明显大于静力扭转影响。在文献[25]中也研究了静力偏心距对结构扭转振动效应的影响规律,并由此提出了偏心结构的设计建议。由于静力偏心距并不能完全代表结构的动力扭转影响特性,文献[8]提出动力偏心距——在动荷载作用下偏心体系的最大楼层扭矩与相应平动体系最大楼层剪力之比——来反映结构的动力特征,并通过在静力偏心距的基础上乘以大于1的系数的方法表示动力偏心距,将其引用到结构的设计过程中。在Tso和Bozorgnia的研究中也考虑了结构扭转反应的动态效应,并考虑了非弹性反应的影响,提出了“有效偏心距”的概念^[12],并给出了相应的设计方法。

随着结构抗侧力构件在地震作用下发生屈服乃至部分破坏,结构的抗侧刚度发生变化使刚度中心改变,这种改变在以后的地震过程中表现出时变性,相应的静力偏心距也随时间不断变化,结构反应受初始静力偏心距的影响规律表现不再明显^[7]。因此,静力偏心距是描述弹性偏心结构地震反应影响的有效参数,利用它来描述结构的非弹性反应特征就不太有效了。但在当前偏心体系的非弹性反应的研究中,静力偏心距仍然被视为一项基本参数,主要原因是当前的结构设计仍然处于弹性设计阶段,而静力偏心距又是影响弹性反应的主要参数,在设计过程中没有提出影响设计结构的非弹性反应规律的参数。因此从工程应用的角度考虑,许多研究者仍以静力偏心距作为主要参数建立结构弹性反应与非弹性反应之间的联系,从而可以在弹性设计过程中通过调整静力偏心距的方法,来控制结构的非弹性反应。采用这种思路建立起来的影响规律是建立在大量的试验与计算的基础上的,具有一定的统计意义。文献[9]利用实际地震记录对结构计算结果的统计分析表明,短周期结构的弹性与非弹性反应中的楼层扭转角和抗侧力构件的最大侧移峰值受静力偏心距的影响最为显著—— e_s 越大,结构侧向反应值也越大;而对中等周期的结构(1.0—2.0s)侧向变形受 e_s 影响较为明显,随着 e_s 的增大,侧向变形有所增加;长周期结构反应受静力偏心距变化的影响不明显。

2.2 扭转—侧移频率比

扭转—侧移频率比(简称频率比 Ω)是指偏心体系的扭转频率与侧移频率之比。据统计,实际结构的频率比基本上位于1.0—1.9之间^[33]。频率比主要反映偏心结构扭转刚度相对平动刚度的强

弱程度,当 Ω 较小(小于1)时,结构的扭转刚度相对较小,控制结构反应的第一周期可能会是扭转周期;而对于较大频率比(大于1)的结构则表现出较强的扭转刚度,使结构的反应以平动为主。对于 Ω 在1.0附近的情况,即结构的扭转频率与侧向频率相接近时,许多文献都指出,此时结构的扭转反应峰值最大,相应动力偏心距也较大^{[6][11][17]}。但上述结论是根据振型分解反应谱法推出的结果,文献[7][13]通过对结构模型输入地震波的时程分析结果表明,对于受实际地震作用的结构,扭转反应随频率比的变化规律并不显著。这主要是由于在实际地震激励下结构自身高阶振型的参与,加上实际地震波中不同频率成分分布较为分散,从而降低了频率比的影响程度^[6]。这样一来就产生了结构设计依据与实际地震反应结果之间的矛盾。

随着结构构件的开裂和屈服,抗侧力构件的刚度要发生变化,结构的振动频率也不再保持恒定,从而使频率比也不再是常量。因此,与静力偏心距一样,扭转-侧移频率比对于非弹性阶段反应规律的影响也存在着很大的随机性^[7]。尽管如此,在不少文献的研究结果中仍然把频率比作为影响结构非弹性反应的一个重要因素^{[9][14]},而在更多的涉及频率比的非弹性反应的研究中基本上都是针对 $\Omega=1.0$ 的情况进行的^{[15][16][17]},这主要是受振型分解反应谱法的研究结论的影响^[6]。

2.3 强度偏心距

强度偏心距(e_p)是楼层的质量中心与强度中心的距离,用来反映结构抗侧力构件强度分布的总体情况,它对结构反应的影响主要体现在非弹性阶段,强度本身对结构弹性反应没有影响。其中强度中心就是使楼层中各抗侧力构件的屈服强度的一阶矩为零的点。

Sadek 和 Tso^[19]采用单层偏心结构模型对强度偏心距影响结构的地震反应规律进行了初步研究,并通过与静力偏心距的对比分析指出,在结构的非弹性反应阶段,强度偏心距作为一项主要的影响参数对高频结构扭转变形(楼层扭转角峰值)及边缘构件延性要求的影响是显著的,对楼层质心处的位移峰值影响不明显。Goel 和 Chopra 在研究偏心结构的反应规律时对强度偏心距进行了深入讨论^[1],他们同样指出强度偏心距的变化将会影响结构反应的屈服特性。对于短周期范围内的结构,强度偏心距将对反应结果构成明显影响;对于边缘构件,在强度偏心距较小的情况下刚度偏心体系(SES)的刚性边构件(SSE)的变形反应较大,相应的延性要求也较高,而当强度偏心距较大时大变形与高延性要求往往发生在柔性边构件(FSE)上。这就启示我们,可以通过调整结构的强度偏心距来减小扭转反应。

随后,Stefano 等人^[20]也对强度偏心距在偏心体系非弹性反应中的影响进行了深入的研究,结果表明,当其它结构参数一定时,合理调整强度偏心距的大小可以调整结构柔性边构件的延性要求,使之与刚性边构件的延性要求较为接近,从而使所有抗侧力构件的破坏程度较为均匀并趋于最小。Stefano 给出的合理强度偏心距的大小大致为静力偏心距的一半($e_s/2$),即设计强度中心位于刚度中心与质量中心连线的中点处。而 Gomez 等^[21]对单层质量偏心体系(MES)非弹性动力分析结果表明,当强度偏心距与静力偏心距较为接近,即强度中心靠近刚度中心一侧时,体系边缘构件的延性要求较小。在墨西哥抗震规范(MFDC-87)中就是采用这一研究结论控制结构抗侧力构件的延性要求的。

由于目前的结构抗震设计是以加速度反应谱为基础的设计方法(基于力的设计方法),结构抗侧力构件的强度作为主要设计目标之一出现在设计后期,加之强度分布对结构反应的影响规律随不同偏心体系而变化,因此也有些研究指出强度偏心距并不适宜作为一项基本的体系参数^{[22][3]}。在采用振型分解反应谱法进行结构抗震设计时,强度偏心距是在设计后期反映出来的,它不是一个独立的参数,其数值大小受静力偏心距和频率等参数的影响,当这些参数值一定时,强度偏心距的大小也就确定了。但静力偏心距和频率等参数在结构的非弹性反应阶段已经失去了意义,结构反应明显受设计强度的影响。适当增加结构的设计强度可以提高整体结构抵抗非弹性变形的能力,降低扭转反应的影响^[12];合理调整各抗侧力构件的强度分配又可以使结构边缘抗侧力构件的非弹性反应较为接近,减小结构构件非弹性阶段受扭转反应影响的程度。从这一点上看,强度偏心距可以作

为研究结构非弹性反应的基本参数,通过其来控制楼层抗侧力构件的强度分配形式,从而降低偏心结构的非弹性扭转反应。

需要指出的是,在实际钢筋混凝土结构的设计中,构件抗侧刚度是采用毛截面尺寸来计算的,并没有考虑纵向配筋率对抗侧刚度的影响。但实际上抗侧力构件的刚度与强度的变化是相互耦联的,在采用纵向配筋率改变抗侧力构件的强度的同时抗侧刚度也相应地被改变了,由此而引起的静力偏心距和结构周期的变化对结构的动力反应将会产生不同程度的影响。文献[23]对这一问题进行了讨论,并给出了相应的量化描述。但是在目前对偏心体系参数影响的研究中,还很少有人考虑强度与刚度耦联的问题,在讨论强度偏心距的影响规律时较为合理的做法是以静力偏心距为参考,考虑强度偏心距的相对变化值对结构反应的影响。

值得注意的是,基于位移的抗震设计方法(Displacement-Based Design 简称 DBD 法)从其被提出以来^[23]一直引起众多研究者的关注,尽管目前 DBD 法用于实际设计还存在许多不够完善的地方,但是从理论上讲这种方法对控制结构的非弹性变形反应具有明显的优越性^{[23][24]},将 DBD 法用于偏心体系的抗扭设计的研究还很少有人涉及^[35],但从该方法的设计过程来看,该方法采用结构发生最大位移时的割线刚度作为主要设计参数,而不是初始刚度,这样就避免了对静力偏心与强度偏心以及两者相关性的讨论。由于基于位移的设计方法已经超出本文的讨论范围,此处不再赘述。

2.4 地震作用折减系数

在基于性能的抗震设计(Performance-Based Design 简称 PBD 法)思路中,可以根据业主需要,使不同的结构在不同的地震动水准下表现出不同的抗震性能。地震作用折减系数(R)是用来反映结构的设计地震作用取值从设防烈度水准降低的比例参数, R 值越大表明设计地震作用取值越小,从而对结构延性要求也越高。中国的抗震规范是根据与设防烈度所对应的小震作用对结构进行弹性设计的,而在欧共体与新西兰抗震规范中是采用结构性能系数(q)来体现这种设计要求的。

在地震作用下,偏心结构受 R 的影响主要表现在短周期结构范围内^{[9][14]},当 R 值较大(即结构的设计强度相对较低)时,将会发生明显的非弹性反应,结构边缘构件的侧向变形较大,延性要求较高。文献[9][22]对偏心体系的非弹性动力分析结果表明,当偏心结构完全屈服后,扭转反应减小,体系的反应更接近无扭转耦联体系的平动反应。中长周期的结构则受 R 的影响相对较小,这主要是由于在该区段内结构的反应受地面运动加速度的影响较小的缘故。可以通过减小地震动折减系数的做法相应提高结构的设计强度,从而降低结构的非弹性变形反应。文献[26]的非弹性动力分析指出,采用较小的地震作用折减系数来增加结构的总体设计强度,不仅可以降低整体结构的非弹性反应,而且可以明显降低刚性边构件(SSE)由于扭转变形而产生的附加延性要求。

另外,在有些研究文献中还考虑了超强系数(O_s)的影响,即当采用“等效静力法”(所谓等效静力法就是上文中提到的对静力偏心距乘以大于 1 的系数对结构强度进行静力设计的方法)对偏心体系进行结构设计时,结构整体设计强度提高的比例,一般情况下设计强度将会有 10% 左右的提高。实际上超强系数对结构反应规律的影响有着与地震作用折减系数影响情况相同的效果,因为考虑超强系数的影响就相当于适当降低了 R 值。

2.5 结构主周期

在当前大多数情况都是针对某个指定周期的结构进行非线性地震反应扭转问题的研究,文献[27][28]研究平动周期为 1.0 s 的偏心体系,文献[3]为 0.5 s。但实际上与平动体系的反应相似,偏心结构主周期对反应的影响也主要表现在短周期范围内^{[9][14][19]},此外文献[2][9][21][29]等采用时程分析法对结构边缘抗侧力构件受结构周期的影响规律进行了一定的研究,结果表明结构刚性边构件受周期的影响要比柔性边构件明显。

实际上,当结构进入非弹性阶段后,受结构刚度变化的影响,结构周期也要发生变化,随着非弹性程度的加深而使周期增长,如何考虑周期的影响也有待进一步的研究。文献[22][31]在对偏心结构动力分析的研究中,将结构参数(设计偏心距和刚度回转半径)随周期的变化趋势采用平均化

的方法进行处理,给出平均意义上的参数变化规律,并在此基础上提出相应的设计方法。

除了以上所讨论的结构的静力偏心距、扭转-侧移频率比、强度偏心距、地震作用折减系数、结构周期等因素外,在有些文献中还对偏心结构的刚度回转半径、强度回转半径和结构阻尼等对结构地震反应的影响进行了讨论,这些参数对结构反应也存在着不同程度的影响^{[1][27][39]}。

3 结语

以上对影响偏心结构动力反应的若干影响因素的研究概况进行了简要评述,其中结构静力偏心距、频率比和结构周期对结构弹性反应的影响规律的研究已经比较成熟,各研究者得出的相关结论基本上是一致的。但这些参数是否对非弹性反应具有一定的影响以及影响程度和规律怎样,目前还没有得出统一的结论。这主要是结构反应进入非弹性阶段后,结构抗侧力构件的刚度随时间不断变化,相应的结构偏心距和周期等都具有时变性,结构反应规律的离散性很大。另外,强度偏心距和地震作用折减系数作为影响结构非弹性反应的参数已经被大多数研究者所接受,但它们对非弹性扭转耦联反应的影响规律的研究也没有形成统一的结论。因此,如何有效研究结构的非弹性扭转耦联反应规律是当前研究面临的难点之一。结构的非弹性扭转耦联反应除了受上述因素影响之外,还与结构的计算模型和地震动类型有关。当前对结构反应影响因素还没有形成统一的结论很大程度上是由于结构模型选取不够统一和没有注意区分地震动类型所致,因此,选则合适的结构分析模型并注意区分地面运动类型,是在今后研究中应该注意的问题。

需要指出的是,上述各因素对结构的影响规律都是以单层偏心结构模型为研究对象得出的,多层偏心结构受各因素的影响规律将会更为复杂,从当前的一些研究文献来看^{[22][33][34][36][37]},对多层偏心结构的研究基本上是局限在特殊的多层偏心类型上(结构各层刚度中心和质量中心分别在同一条直线上),如何将现有的研究成果应用到多层结构的设计中去是需要亟待解决的问题。

参考文献:

- [1] R. K. Goel and A. K. Chopra. Inelastic seismic response of one-story, asymmetric-plan system: effects of stiffness and strength distribution[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1990, 19: 949-970.
- [2] J. L. Humar, P. Kumar. Effects of Orthogonal Inplane Structural Elements on Inelastic Torsional Response [J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999, 28: 1 071-1 097.
- [3] W. K. Tso and T. J. Zhu. Design of torsionally unbalanced structural systems based on code provisions I: ductility demand[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21: 609-627
- [4] W. K. Tso and T. J. Zhu. Design of torsionally unbalanced structural systems based on code provisions II: strength distribution[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1992, 21: 629-644.
- [5] A. Ghersi and P. P. Rossi. Formulation of design eccentricity to reduce ductility demand in asymmetric buildings [J]. *Engineering Structures*, 2000, 22: 857-871.
- [6] Christopher L. Kan and K. Chopra. Effects of torsional coupling on earthquake forces in buildings [J]. *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 1977, 103(4): 805-809.
- [7] C. L. Kan and K. Chopra. Torsional coupling and earthquake response of simple elastic and inelastic systems[J]. *ASCE*, 1981, 107(8): 1 569-1 588.
- [8] W. K. Tso and K. M. Dempsey. Seismic torsional provisions for dynamic eccentricity[J]. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 1980, (8): 275-289.
- [9] R. K. Goel and A. K. Chopra. Inelastic seismic response of one-story, asymmetric-plan systems: effects of system parameters and yielding[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1991, 20: 201-222.
- [10] Correnza, J. C., Hutchinson, G. L. and Chandler, A. M. A review of reference models for assessing inelastic

- seismic torsional effects in buildings[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engng.*, 1992, 11(11): 465-484.
- [11] W. K. Tso and K. M. Dempsey. Seismic torsional provisions for dynamic eccentricity[J]. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 1980, 8: 275-289.
- [12] W. K. Tso and Y. bozorgnia. Effective eccentricity for inelastic seismic response of buildings[J]. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 1986, 14: 413-427.
- [13] W. K. Tso and A. W. Sadek. Inelastic seismic response of simple eccentric structures[J]. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 1985, 13: 255-269.
- [14] Y. Bozorgnia and W. K. Tso. Inelastic earthquake response of asymmetric structures[J]. *J. Struct. Engng.*, ASCE, 1986, 112(2): 383-399.
- [15] A. M. Chandler and X. N. Duan. Evaluation of factors influencing the inelastic seismic performance of torsionally asymmetric buildings[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1991, 20: 87-95.
- [16] A. K. Chopra, R. K. Goel. Evaluation of torsional provisions in seismic codes[J]. *J. Struct. Engng.*, ASCE, 1991, 117(12): 3762-3782.
- [17] R. K. Goel and A. K. Chopra. Dual-level approach for seismic design of asymmetric-plan buildings[J]. *ASCE*, 1994, 120(1).
- [18] J. C. De la Llera, A. K. Chopra. Understanding the inelastic seismic behavior of asymmetric-plan buildings[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1995, 24(4): 499-572.
- [19] A. W. Sadek and W. K. Tso. Strength eccentricity concept for inelastic analysis of asymmetrical structures[J]. *Eng. struct.*, 1990, 11: 189-194.
- [20] M. De Stephano, G. Faella, R. Ramasco. Inelastic response and design criteria of plan-wise asymmetric buildings[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993, 22: 245-259.
- [21] W. K. Tso, Hongshan Ying. Additional seismic inelastic deformation caused by structural asymmetry[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1990, 19: 243-258.
- [22] A. M. Chandler, X. N. Duan. Performance of asymmetric code-designed buildings for serviceability and ultimate limit states[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1997, 26: 717-735.
- [23] M. J. Nigel Priestley. Myths and fallacies in earthquake engineering-conflicts between design and reality[J]. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 1993, 26(3): 329-341.
- [24] M. S. Medhekar and D. J. L. Kennedy. Displacement-based seismic design of buildings-theory[J]. *Engineering Structures*, 2000, 22: 352-363.
- [25] 徐培福, 黄吉锋, 等. 高层建筑结构在地震作用下的扭转震效效应[J]. *建筑科学*, 2000, 16(1): 1-6.
- [26] A. M. Chandler and X. N. Duan. A modified static procedure for the design of torsionally unbalanced multistory frame[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993, 22: 447-462.
- [27] M. De Stephano, G. Faella, R. Ramasco. Inelastic response and design criteria of plan-wise asymmetric buildings[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993, 22: 245-259.
- [28] A. K. Mittal, Ashok K. Jain. Effective strength eccentricity concept for elastic analysis of asymmetric structures[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1995, 24: 69-84.
- [29] M. D. Stefano, G. Faella and R. Ramasco. Inelastic response and design criteria of plan-wise asymmetric systems[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993, 22: 245-259.
- [30] J. L. Humar, P. Kumar. Effects of Orthogonal Inplane Structural Elements on Inelastic Torsional Response[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1999, 28: 1071-1097.
- [31] X. N. Duan, A. M. Chandler. An optimized procedure for seismic design of torsionally unbalanced structures[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1997, 26: 737-757.
- [32] J. C. Correnza, G. L. Hutchinson and A. M. Chandler. Effect of transverse load-resisting elements on inelastic earthquake response of eccentric-plan buildings[J]. *Earthquake engineering and structural dynamics*, 1994, 23: 75-89.
- [33] 李宏男, 尹之潜. 偏心结构在多维地震作用下扭转耦联反应分析[J]. *地震工程与工程振动*, 1988, 8(4): 45-53.

- [34] 蔡贤辉, 邹瑞锋, 曲乃泗. 一类多层偏心结构的地震反应研究[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(4): 55-60.
- [35] M. S. Medhekar and D. J. L. Kennedy. Displacement-based seismic design of buildings-application[J]. Engineering Structures, 2000, 22: 210-221.
- [36] 吴晓云, 陈森, 魏链. 论地震作用下多层平扭耦连建筑的刚心[J]. 地震工程与工程振动, 1988, 8(4).
- [37] A. M. Chandler and X. N. Duan. A modified static procedure for the design of torsionally unbalanced multistory frame[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1993, 22: 447-462.
- [38] 杜宏彪, 房营光, 沈聚敏. 空间钢筋混凝土框架结构的非线性地震反应[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(2): 81-86.
- [39] 黄宗明, 孙勇. 决定单自由度体系弹塑性地震反应的结构参数分析[J]. 重庆建筑大学学报, 1996, 18(3): 42-48.

Analysis of Main Factors Influencing Asymmetric Structure's Inelastic Seismic Response

WANG Yao-wei, HUANG Zong-ming

(Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: The research of asymmetric structures' seismic response is quite active in foreign countries, but there are few research works in China. There are many structure's factors that influence the asymmetric structure's inelastic seismic response, so it is difficult to form consistent points for each factor which influences the structure's torsional response. In this paper, the status of research in this field is reviewed.

Keywords: asymmetric structure; inelastic seismic response; structure's factors