

文章编号:1671-6833(2009)03-0001-04

含偏心支撑高层钢结构的抗震性能分析

熊俊, 王元清, 石永久, 王斌斌

(清华大学土木工程系 教育部振动与结构重点实验室, 北京 100084)

摘要:以某高层框架-偏心支撑钢结构住宅为工程背景,采用有限元软件 SAP2000 建模,计算了罕遇地震下结构刚度、内力分布、振动模态及荷载-位移曲线等,并采用多条地震波分别对中心支撑和偏心支撑结构体系进行弹性时程及弹塑性时程的对比分析,比较了两种结构体系的动力特性及抗震性能。分析表明:高层框架-偏心支撑钢结构体系抗侧刚度能够满足结构抗侧移要求;反复地震作用下,偏心支撑结构体系耗能作用明显,结构动力响应小于中心支撑体系;罕遇地震作用下,偏心支撑结构进入塑性阶段后刚度衰减较小,仍能保持较高侧向刚度和承载力,表现出明显优于中心支撑体系的延性特征,抗震性能优于中心支撑体系。

关键词:偏心支撑结构;高层建筑;有限元;抗震性能

中图分类号: TU 393.3 **文献标识码:** A

0 引言

随着钢结构在民用建筑中的广泛应用,我国12层以上的高层建筑开始大量采用钢框架结构。已经进行的研究和工程实践表明,高层钢结构应满足:在正常使用状态下和小震作用下,结构应具有较强的刚度;在罕遇地震时,需要结构延性好,耗能能力强^[1]。偏心支撑体系兼顾了中心支撑框架的强度、刚度和纯钢框架非弹性性能及能量耗散能力的优点^[2]。我国《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)规定,8度以上宜采用偏心支撑^[3]。

偏心支撑钢框架体系是一种理想的钢结构抗侧力体系,广泛应用于12层以上高层结构,但其在罕遇地震下的抗震性能尚有待深入研究。

笔者以山东省淄博市某公寓为工程背景,以规范为依据,采用通用有限元计算软件 SAP2000,分别建立中心支撑框架及偏心支撑框架结构模型,计算罕遇地震下结构刚度、内力分布、振动模态及荷载-位移曲线等,并采用多条地震波分别对中心支撑和偏心支撑结构体系进行了弹性时程及弹塑性时程的对比分析,比较了两种结构体系的动力特性及抗震性能。

1 工程背景

本工程为高层公寓住宅楼,地下1层,地上18层,高62.3 m,平面尺寸82.25 m×25.5 m,基础采用梁板式筏形基础。基本柱网9 m×8 m,地下室部分为钢骨混凝土柱的剪力墙结构;地上1~18层为钢框架-钢支撑结构,1~8层采用箱型柱,9~18层采用工字型柱,主梁及支撑为工字型截面。钢材选用 Q345。大楼结构的标准平面图、剖面图见图1和图2所示^[4-5]。偏心支撑采用人字型,为了保证耗能梁的耗能能力,耗能梁按剪切屈服型考虑。按《高层民用建筑钢结构技术规程》^[6]中6.5.4条规定, $e < 1.6 M_p/V_p = 662$ mm时,耗能梁段长度取600 mm,满足耗能梁为剪切屈服型的要求。

2 结构计算及分析

2.1 结构建模

笔者建立了两种建筑尺寸、结构布置及梁、柱、支撑等构件截面参数、材料相同,分别采用中心支撑框架结构体系和偏心支撑框架体系的结构模型,进行构件内力和结构侧向位移的分析。在有

收稿日期:2009-01-11;修订日期:2009-04-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90815004)

作者简介:熊俊(1983-),男,四川乐至人,清华大学博士研究生,从事结构工程研究, xiongj02@mails.tsinghua.edu.cn;通讯作者:王元清(1963-),男,安徽霍山人,清华大学教授,博士,从事结构工程研究, wang-yq@mail.tsinghua.edu.cn

限元模型中,梁柱单元采用梁单元,各节点均为刚结.支撑单元采用杆单元,两端铰接.按照建筑抗震设计规范(GB5001-2001)^[3]规定的组合系数确定建筑的重力荷载代表值,楼面屋面荷载均布到所有梁柱上.

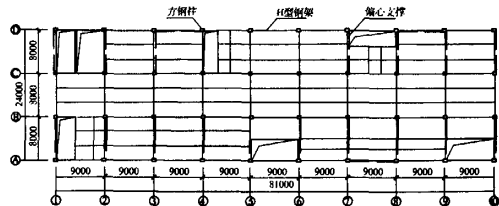


图1 高层住宅结构平面图
Fig.1 The plan of standard storey

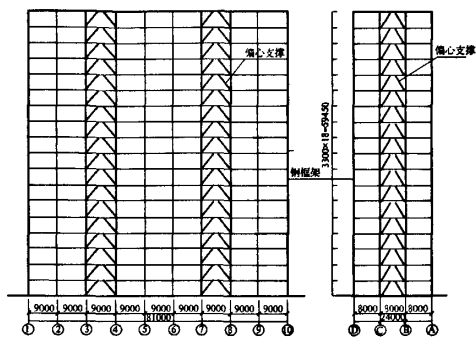


图2 高层住宅结构立面图
Fig.2 The elevation of the structure

2.2 模态分析

结构的低阶振型起控制作用,对位移和内力贡献较大,因此提取前10阶振型分析.其中起控制作用的前5阶振型及与其他方法所得结果的比较见表1.

表1 偏心支撑中心支撑钢结构自振周期
Tab.1 The natural vibration periods

振型	EBF	CBF	经验公式	欧洲规范	振型描述
1	2.933 1	2.729 9	1.8~2.7	0.26	x向平动
2	1.821 2	1.642 0	—	—	y向平动
3	1.668 6	1.482 8	—	—	扭转
4	1.211 7	1.042 5	—	—	x向平动
5	0.721 9	0.650 8	—	—	x向平动

注:EBF、CBF分别指偏心支撑框架和中心支撑框架.

按照国内经验公式^[7],

$$T = (0.1 \sim 0.15)n \quad (1)$$

式中: n 为结构总层数.

按照欧洲规范^[8],40 m以上的结构,可以采用简化计算公式,

$$T = C_1 H^{3/4} \quad (2)$$

式中: T 为结构自振周期; H 为结构高度;框支钢结构 C_1 为0.05.

从自振周期来看,偏心支撑比中心支撑略大,说明偏心支撑耗能梁的存在使结构的整体刚度略有下降.

2.3 反应谱分析

按照《建筑抗震设计规范》^[3]取值,采用SRSS叠加方法计算前十阶振型,得到偏心 and 中心支撑结构侧移曲线如图3所示.

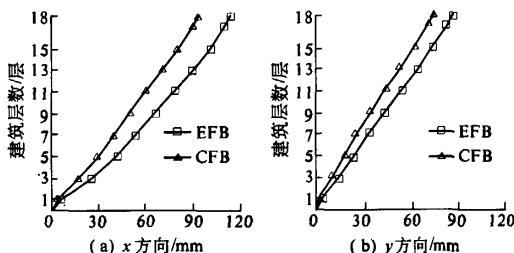


图3 偏心 and 中心支撑结构侧向位移曲线
Fig.3 The lateral drift curves of the eccentrically and centrally braced frames

中心支撑钢结构框架的位移及位移角均小于偏心支撑框架,x方向的顶层最大位移相差21.5%,底层最大位移角相差31.8%.很明显,在结构的弹性阶段,中心支撑结构比偏心支撑结构刚度更大.对结构内力进行分析可知,中心支撑框架把很大一部分水平力都转移到了支撑上.其框架柱的轴力比偏心支撑大11%~18%,支撑轴力比偏心支撑框架支撑轴力大16%~24%.

根据支撑角度,把支撑轴压力换算成水平力和垂直力,计算整体层剪力,框架总剪力比例和支撑水平力比例如表2所示.除顶层外,中心支撑结构要承担更大的水平力.通过反应谱分析,可以得到由柱子和支撑承受的底部剪力的比例.

表2 偏心 and 中心支撑结构中构件分担剪力

Tab.2 The shear force in the eccentrically and centrally braced frame members

方向	框架	支撑水平荷载	柱水平荷载	总水平荷载
x	EBF	4 281	43%	5 675
	CBF	6 947	52%	6 412
y	EBF	5 378	55%	4 400
	CBF	7 172	68%	3 375

从表2可以看出,支撑的存在可以很大程度上减小柱子需要承受的剪应力,但支撑也会对柱子的轴力产生很大的影响.取支撑与水平夹角30°~50°

计算支撑引起的柱附加轴力如表3所示。

由计算可以看出中心支撑比偏心支撑引起的柱子的附加轴力大30%左右,在中心支撑框架中柱子更容易提前屈服,需要引起足够的重视。

表3 支撑引起的柱附加轴力

Tab.3 The extra axial force in columns

力类型	框架类型	caused by braces	
		x 方向	y 方向
支撑轴力	EBF	379	423
	CBF	523	678
柱附加轴力	EBF	190 ~ 290	212 ~ 324
	CBF	261 ~ 401	339 ~ 519

2.4 弹性时程分析

根据《建筑抗震设计规范》的规定,笔者按建筑场地类别和设计地震分组选用具有代表性的El-centro波及Karakypoint两组天然波和一组人工波(兰州波)进行弹性时程分析。考虑8度多遇地震,采用地震加速度时程曲线的主方向最大值为 70 cm/s^2 。结构的阻尼比取0.02。可得以下结论:

(1)弹性时程分析和反应谱分析计算得到的结构侧移(图4)变化差别并不大。无论是时程分析还是反应谱分析,结构整体都呈现出剪切变形

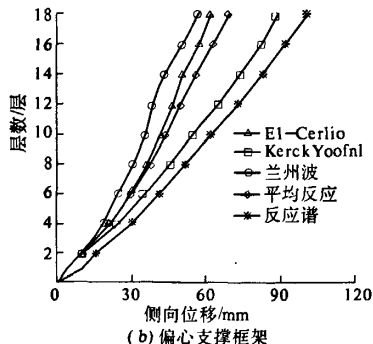
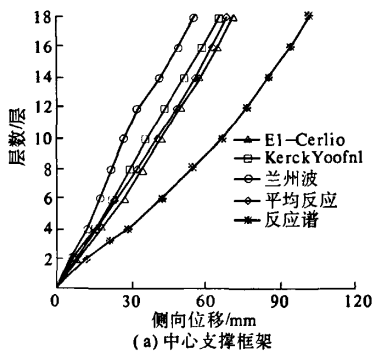


图4 两种框架弹性时程分析侧移图

Fig.4 The lateral drift curves of centrally and eccentrically braced frames by elastic time history analysis

模式,偏心支撑的位移值均小于中心支撑,总体的变化趋势与反应谱基本一致。

(2)在相同的地震波作用下,偏心支撑体系刚度小,结构柔,但耗能梁变形消耗了部分地震水平力。层剪力的减小使总体位移值小于中心支撑(图5)。

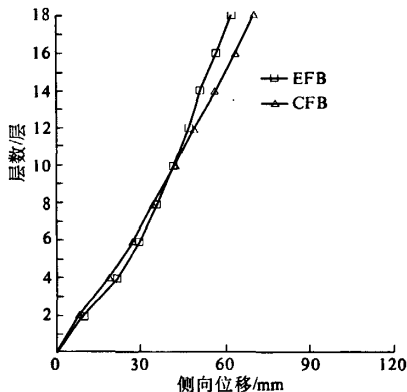


图5 两种结构El-centro波位移曲线

Fig.5 The storey drift curves of centrally and eccentrically braced frames under El-centro wave

2.5 弹塑性时程分析

笔者对结构进行了8度罕遇地震的时程分析。按抗震规范,取时程曲线的最大值 400 cm/s^2 。结构阻尼比取0.05。分析所得结构侧移曲线如图6所示。可得以下结论:

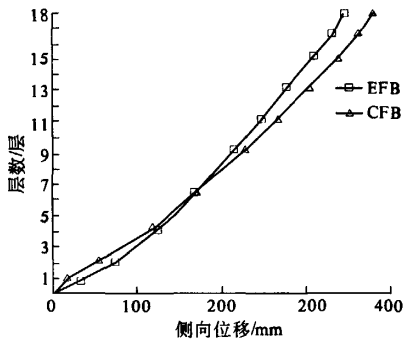


图6 弹塑性分析两种结构x方向侧移曲线

Fig.6 Lateral drift curves of centrally and eccentrically braced frames by elasto-plastic time history analysis

(1)偏心支撑在6层以上的层间位移和位移角比中心支撑的小,最大层间位移相差22%(图6),主要原因可能是结构下面6层发生弹塑性变形的耗能梁段,充分耗散地震能量而使得上部结构地震作用减小,而且上部结构处于弹性状态,刚度比中心支撑大,故顶部节点位移小于中心支撑;4层以上层间刚度变化较小,层间位移趋于稳定,

这种变化趋势对于结构的杆件受力是非常有利的。即在高层建筑中,偏心支撑的存在对于位移、层间刚度起到了很好的调节作用。

(2)由两种结构顶点弹塑性时程曲线(图7)分析,在13.8 s的时候,中心支撑位移达到最大值为325 mm,而偏心支撑最大侧移为269 mm,位移减小21%。中心支撑框架地震响应明显大于偏心支撑框架,主要是由于中心支撑框架刚度大导致的地震响应更大,进入塑性阶段后部分支撑由于失稳退出工作造成刚度的急剧下降。

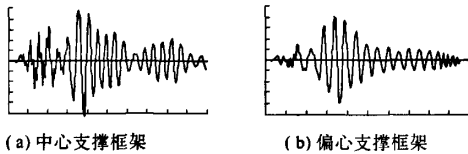


图7 两种框架结构顶点弹塑性时程曲线

Fig.7 The time history curves of the top storey of the centrally and eccentrically braced frames

3 结论

(1)中心支撑框架侧向刚度大于偏心支撑框架,但在地震作用下,地震反应力相应增大,支撑和框架柱所承受的轴力都因此而增加,在大震作用下可能出现支撑屈曲而导致承载力丧失。

(2)偏心支撑框架侧向刚度能够满足规范要求,地震响应小于中心支撑框架结构。在大震作用下,结构下层部分出现屈服,由于耗能梁段的屈服耗能作用,减小了结构地震响应。

(3)偏心支撑框架结构在大震下进入屈服阶段后,结构承载能力不会突降,在后续振动峰值下,结构保持一定的弹塑性刚度,极限承载力基本保持不变,避免了结构的脆性破坏,抗震性能优于中心支撑框架结构。

参考文献:

- [1] 赵宝成,顾强. 偏心支撑钢框架在循环荷载作用下非线性有限元分析[J]. 土木工程学报, 2005, 2(38): 27-31.
- [2] 李志刚,王浩,郝际平,等. 偏心支撑框架的设计计算方法[J]. 钢结构, 2004, 3(19): 4-7.
- [3] GB50011-2001《建筑抗震设计规范》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] 王元清,王斌斌,石永久,等. 偏心支撑体系在多层钢结构框架中的应用研究[J]. 华中科技大学学报:城市科学版, 2007, 2(24): 1-4.
- [5] 王彬彬. 多高层钢框架偏心支撑体系研究与应用[D]. 北京:清华大学土木工程系, 2007.
- [6] JGJ99-98《高层民用建筑钢结构技术规程》[S]. 北京: 中国建筑计划出版社, 2003.
- [7] 王新玲,张海东. 多层住宅新型复合结构在竖向荷载作用下的地震分析[J]. 郑州大学学报:工学版, 2005, 4(26): 5-8.
- [8] European Committee for Standardization. prEN 1998-1. Eurocode8: Design of structures for earthquake resistance. Draft No. 6, 2003.

Seismic Analysis of Eccentrically Braced High-rise Steel Frames

XIONG Jun, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu, WANG Bin-bin

(Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The eccentrically braced steel frame is a good moment-resisting system, widely used in high-rise structures, but its seismic performance in severe earthquake needs some in-depth study. This paper, based on an eccentrically braced high-rise apartment, with software SAP2000, has calculated the stiffness and stress distributions, the vibration modes and load-displacement curves etc. in severe earthquake, and it compared the dynamic/seismic characteristics of eccentrically and centrally braced frames by elastic and elastoplastic time history analyses. The analyses reveal that, the lateral stiffness of eccentrically braced high-rise frames satisfies the requirements of lateral resistance; the eccentrically braced frames behaves better than centrally braced frames as the higher lateral stiffness and resistance in plastic stage in severe earthquake.

Key words: eccentrically braced structure; high-rise building; finite element; seismic performance