

内摇摆柱-钢框架结构新体系受力性能分析

刘少文, 郝际平

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要:提出一种新型的钢框架结构体系,即内摇摆柱-钢框架结构体系.为了研究这种新体系的受力性能,并与普通钢框架体系性能相比较,本文建立了六层的新型结构体系和传统普通钢框架体系的三维非线性有限元模型,分析了在不同类型的侧向荷载作用下结构的变形特征、承载力以及塑性铰分布等受力性能,结果显示本文提出的内摇摆柱-钢框架结构体系具有良好的受力性能,并且新型结构体系构造简单施工方便,采用该体系建筑结构可以获得较好的经济效益.

关键词:钢结构;框架结构;摇摆柱;铰接梁;承载力

中图分类号:TU359;TU393

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2012)01-0050-05

钢框架结构由于施工速度快、基础造价低、绿色环保等诸多优点在低层、多层及小高层建筑中得到广泛应用.钢框架结构体系一般分为三种:钢柱-支撑体系、钢框架-支撑体系和纯钢框架体系^[1],其中前两种结构体系刚度大、用钢量少经济效益较好,但存在支撑,平面布置不灵活等缺点,这限制了这两种结构体系的应用范围.纯钢框架体系由于没有支撑系统,使用空间较大,空间布置灵活,但它需依靠刚接梁柱节点的抗弯来提供结构抗侧移刚度,故其节点构造较复杂,施工难度大,用工量和用钢量较多,造价较高.造价高是制约钢结构建筑发展的主要障碍,如何能在保证结构可靠度的同时降低其建筑和建造成本是设计、施工和建设单位所关心的首要问题.

框架的梁柱连接节点设计是框架设计中的重要组成部分,目前我国现行规范提供的梁柱连接方式主要有两种^[2]:刚接连接和铰接连接,纯框架结构的所有梁柱节点都采用刚接节点,这种节点构造复杂施工难度大,其综合造价较高.理论上在采用框架体系时,只要结构的侧向刚度够大,并不一定要把所有的梁都和柱设为刚性连接,可以只利用一部分柱参与抗侧力工作,这样就可以将部分梁柱节点设为铰接节点,就像多跨门式钢框架的中柱做成摇摆柱一样^[3],体现材料集中使用的集约化原则并使构造简化,施工难度降低,从而节约钢材、简化施工,势必将会取得巨大的经济和社会效益. Nader、丁洁民等学者^[4-9]用试验和理论的方法研究了柔性节点和半刚性节点连接的钢框架的受力性能,得出即使柔性和半刚性节点连接的框架仍然具有较好的受力性能的结论.基于上述文献结果,本文提出一种新型钢框架结构体系即内摇摆柱-钢框架结构体系(MFCLC),在这种框架结构体系中内部部分柱为摇摆柱,与摇摆柱相连接的梁均为两端铰接的简支梁(图1-图3),由于结构体系中摇摆柱和铰接梁不能提供结构抗侧移刚度,结构上的横向作用(风荷载、地震作用等)需由外围和部分内部刚接框架来承担,所以这种体系中刚接框架部分的梁柱构件截面要比纯钢框架结构(MF)的大,用钢量多,但更易满足抗震规范对这部分结构构件的特殊要求;并且,这种新体系中摇摆柱和铰接梁的截面又比纯钢框架结构的该部分柱的截面和相应的梁的截面小,用钢量减少少,这些摇摆柱和铰接梁不提供抗侧移刚度无需满足抗震规范对此部分结构构件的特殊要求,因此,总体上结构的梁柱构件部分总用钢量在满足结构抗侧移刚度的前提下经过精心设计完全可以做到并不比纯钢框架体系用钢量多.

此外,内摇摆柱-钢框架结构体系中存在大量的铰接梁柱节点,而铰接节点构造简单、用钢量少,施工方便、工程量少、施工速度快,可较大的缩短工期,从而降低了结构梁柱节点部分的工程造价和总体结

收稿日期:2010-05-10 修改稿日期:2011-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50878181)

作者简介:刘少文(1977-),男,山东莒南县人,博士生,主要从事钢结构理论及应用研究.

构工程造价.若铰接节点采用螺栓连接更可以进一步提高节点施工速度,并且螺栓连接现场施工受环境影响小,节点可靠度高.总体上这种结构体系的造价比纯钢框架体系低,因此具有良好的经济效益,如果能得到很好的研究和推广应用将会进一步促进钢结构建筑在我国的应用和发展,从而产生较大的社会效益.

1 分析模型

为了研究内摇摆柱-钢框架结构体系受力性能和用钢量情况,并使之与纯钢框架体系相比较,本文建立了两个六层建筑结构模型,分别为本文提出的内摇摆柱-钢框架结构体系和纯钢框架体系.纯钢框架结构模型所有框架均为刚接,内摇摆柱-钢框架结构模型中外围周边纵横向框架和中部横向 4 轴框架为刚接框架,非钢框架上的梁均为铰接简支梁,非钢框架上的柱全部为摇摆柱(图 1,图 2,粗线表示刚接框架,其他为摇摆梁柱体系).结构纵横向框架跨度均为 5.1 m,底层层高 4.5 m,其他层层高均为 3.3 m.结构平面轴网尺寸和构件编号见图 1,立面层高及构件编号见图 2,结构整体模型示意图见图 3.

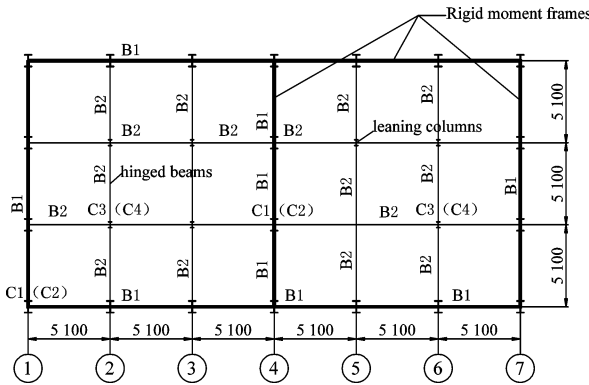


图 1 结构平面图和构件编号 /mm
Fig. 1 The typical floor framing plan and member symbols /mm

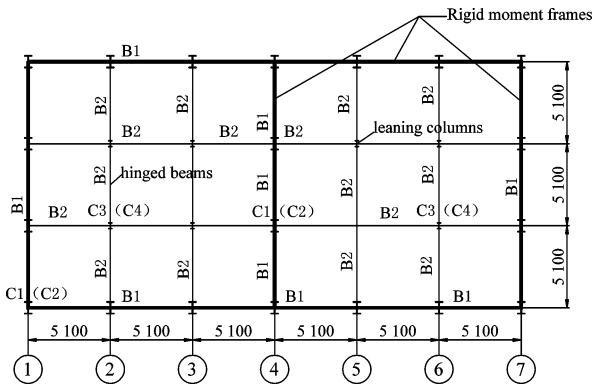


图 2 结构立面图和构件编号 /mm
Fig. 2 The elevation and member symbols /mm

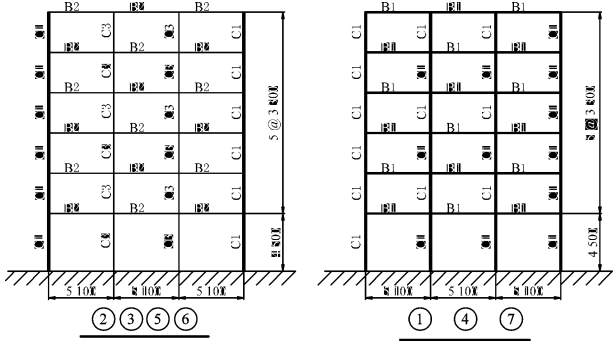


图 3 结构整体模型示意
Fig. 3 The space frame shape

图 1、2 中,C1~C4 代表柱,其中 C1、C3 用于下三层,C2、C4 用于上三层,B1、B2 代表梁.各框架详细尺寸见于表 1、2.

表 1 钢框架梁柱构件尺寸	
Tab. 1 Members of the MF system	
BEAMS	COLUMNS
/mm×mm×mm×mm	/mm×mm×mm×mm
B1 H280×180×10×15	C1 H380×380×12×18
	C2 H320×320×10×15
B2 H300×180×10×15	C3 H380×380×12×18
	C4 H320×320×10×15

表 2 内摇摆柱-钢框架梁柱构件尺寸	
Tab. 2 Members of the MFCLC system	
BEAMS	COLUMNS
/mm×mm×mm×mm	/mm×mm×mm×mm
B1 H400×180×10×14	C1 H500×450×12×20
	C2 H420×400×10×18
B2 H250×180×6×14	C3 H250×250×8×14
	C4 H200×200×6×14

模型采用 PKPM 和 ETABS 等软件进行设计,构件钢材采用 Q235,楼面恒载 4.0 kN/m²,活载 2.0 kN/m²,内摇摆柱-钢框架结构体系和纯钢框架结构体系的梁柱构件部分总用钢量(不含节点构造部分用钢量)分别为 160 t 和 157 t.

2 受力性能有限元分析

本文采用三维非线性有限元方法对两个模型进行受力性能分析.

2.1 计算假定

有限元分析基于以下设定^[9-10]:(1)材料模型具有弹塑性性能;(2)模拟梁柱的单元具有大变形、大转动、小应变效应;(3)结构的塑性效应采用塑性铰模拟;(4)楼板平面内刚性假定;(5)考虑结构的 $P-\Delta$ 和 $P-\delta$ 效应.

2.2 模型上的作用

两种结构体系同样的受以下三种类型的外力作用,类型1:结构1轴上所有梁柱节点受相同大小的外力,方向沿结构的纵向,即水平荷载平面上对称分布,立面上均匀分布;类型2:结构1轴上所有梁柱节点承受大小沿高度增加的三角形分布外力,方向沿结构的纵向,即水平荷载平面上对称分布,立面上三角形线性比例分布;类型3:结构1轴上部分梁柱节点承受大小相等外力,方向沿结构的纵向,即水平荷载平面上非对称分布,立面上均匀分布,详见图4.

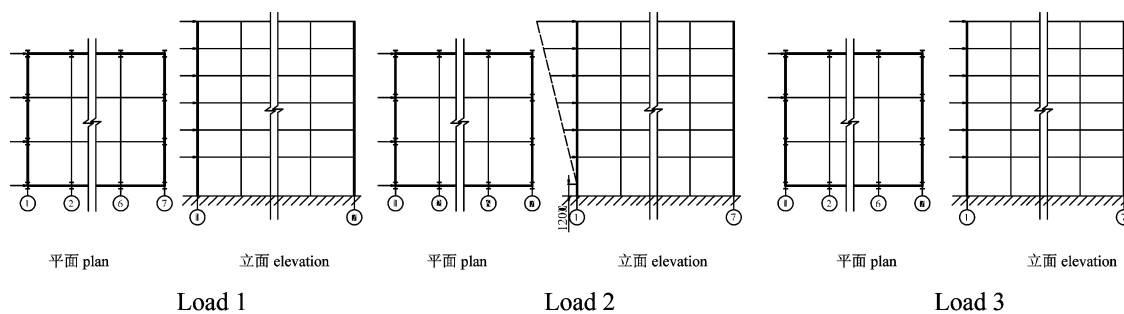


图4 模型上的荷载类型和方向

Fig. 4 The three types of load patterns

2.3 分析结果

经三维非线性有限元法静力分析,得到了以上两种结构体系承受三种形式的外力作用的受力性能.

2.3.1 结构受力变形模式分析

两种结构在类型1形式的外力作用下的各层柱顶侧移变形与高度的关系见于图5,图示横轴表示各楼层梁柱节点处的位移,纵轴表示各楼层梁柱节点高度.可以看出内摇摆柱-钢框架结构体系和钢框架结构体系结构受水平力变形模式基本相同,可见内摇摆柱-钢框架结构体系与框架结构体系一样也具有典型的剪切型变形特征^[11].

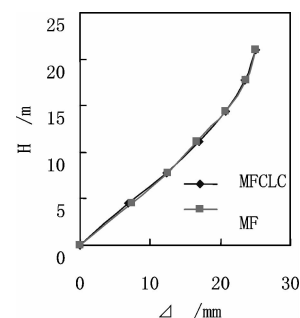


图5 结构变形特征

Fig. 5 The drift deflection mode

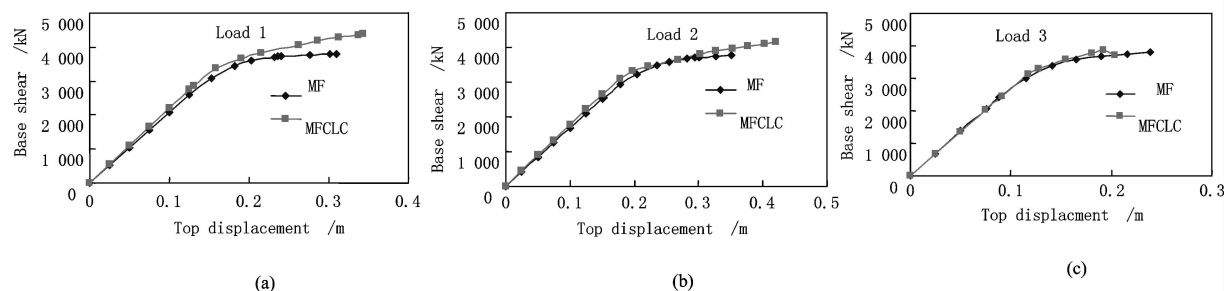


图6 三种形式荷载作用下结构顶点位移与基底剪力关系

Fig. 6 The base shear-top drift curve under three types of loads respectively

2.3.2 结构极限承载力分析

为了分析内摇摆柱-钢框架结构体系的在水平荷载作用下的极限承载力性能,并与纯钢框架结构体系相比较,对两个模型进行了 pushover 分析,结构在三种类型的荷载作用下的顶点位移与基底剪力关系见于图 6 所示,分析计算可见,两个结构模型,内摇摆柱-钢框架结构体系在受平面对称荷载作用下(荷载类型 1 和荷载类型 2)的承载能力要稍大于框架结构体系,结构的初始抗侧移刚度两种体系基本相同,但结构在受平面非对称荷载(荷载类型 3)作用下,内摇摆柱-钢框架结构体系的结构延性稍不如框架结构好,这可能是因为这种体系的抗扭转性能稍差,这一点还需要进一步的分析研究。

2.3.3 塑性铰分布

图 7 所示为两种结构体系在平面对称分布、竖向三角形分布的水平荷载(荷载类型 2)作用下结构达到接近承载力时纵向外围框架上的塑性铰分布情况,从中可见纯框架结构的塑性铰多集中在底层分布,这对结构是不利的,易使结构底层出现倒塌;而内摇摆柱-钢框架结构塑性铰分布比较分散,这使内摇摆柱-钢框架结构中的刚框架部分可能较多的耗散地震能量。

3 结 论

新型钢框架结构体系,即内摇摆柱-钢框架结构体系,与纯钢框架结构体系对比分析得出了以下结论:

(1) 内摇摆柱-钢框架结构体系中的铰节点构造简单、施工方便、节点部分用钢量少,因此可以较大的节省用工量和建设工期,因此比纯钢框架体系经济效益好;

(2) 在侧向荷载作用下内摇摆柱-钢框架结构体系与钢框架结构体系一样具有典型的剪切型变形特征;

(3) 在总用钢量不增加的情况下,内摇摆柱-钢框架结构体系侧向承载力可不低于普通的钢框架体系;

(4) 在平面非对称侧向荷载作用下,内摇摆柱-钢框架结构体系的抗扭转性能可能不如钢框架结构体系,这需要进行进一步的研究;

(5) 内摇摆柱-钢框架结构体系的塑性铰分布较分散,可能对耗散地震能量有利。

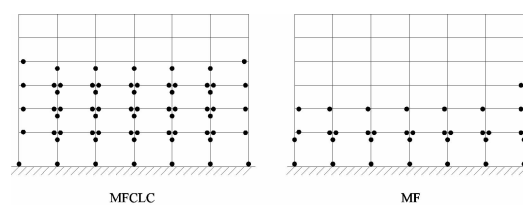


图 7 结构上塑性铰分布

Fig. 7 Distribution of plastic hinges of exterior frames of MFCLC and MF system

参考文献 References

- [1] 柴 昶,宋曼华. 钢结构设计与计算[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2006.
CHAI Chang, SONG Man-hua. Design and caculation of steel structures[M]. 2nd ed. Beijing: China machine press, 2006.
- [2] 中国建筑技术研究院. JGJ99-98 高层民用建筑钢结构技术规程[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
China academy of building research. JGJ99-98 Technical specification for steel structure of tall buildings[S]. Beijing: China Architecture and building press, 2008.
- [3] 陈绍蕃. 门式钢框架轻型化的技术措施[J]. 建筑结构, 1998(2):23-26.
CHEN Shao-fan. Technical measures for reducing the weight of steel portal frame[J]. Building structrue, 1998(2): 23-26.
- [4] NADER M N, ASTANEH A. Dynamic Behaviour of Flexible, Semirigid and Rigid Steel Frames[J]. Journal of Constructural Steel Research, 1991(18),3:179-192.
- [5] NADER M N, ASTANEH A. Shaking table Tests of Rigid, Semirigid and Flexible Steel Frames[J]. Journal of Structural Engineering, 1996,6:589-596.
- [6] Astaneh-Asl A. Demand of Supply of Ductility in Steel Shear Connections. Journal of Constructural Steel Research, 1989(14):1-19.
- [7] ELNASHAI A S, ELGHAZOU LI A Y. Response of semirigid steel frames to cyclic and earthquake loads[J]. Journal of Structural Engineering, 1998(8):857-867.

- [8] KIM S E, LEE D H. Shaking table tests of a two-story unbraced steel frame[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007(63):412-421.
- [9] 沈祖炎,丁洁民. 柔性节点钢框架的二阶弹塑性极限承载力研究[J]. 建筑结构学报, 1992,13(1):34-42.
SHEN Zu-yan, DING Jie-min. Ultimate strength of multistory steel frames with semi-rigid beam-to-column connections[J]. Journal of Building structures, 1992,13(1):34-42.
- [10] 丁洁民,沈祖炎. 空间钢框架结构的非线性分析[J]. 土木工程学报, 1993,26(6):37-45.
DING Jie-min, SHEN Zu-yan. Non-linear analysis of space steel frames[J]. China Civil Engineering Journal, 1993,26(6):37-45.
- [11] 包世华. 新编高层建筑结构(第二版)[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
BAO Shi-hua. Newly edited Structures of tall buildings(2nd ed)[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.
- [12] 王连坤,王孟鸿,郝际平. 考虑剪切和翘曲变形影响的空间钢框架塑性铰模型[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010,42(4):514-520.
WANG Lian-kun, WANG Meng-hong, HAO Ji-ping. Plastic-hinge model of space steel frames considering shear and warping deformations[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010,42(4):514-520.

The behavior of steel moment frame with interior leaning columns and hinged beams under lateral load

LIU Shao-wen, HAO Ji-ping

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China)

Abstract: A new structure system that i. e. a multi-storey steel moment frame combined with interior leaning columns and hinged beams (MFCLC) is put forward in this paper. To research the behavior of this structure system under lateral loads, two analytical six-storey steel buildings are designed, an un-braced steel moment frame(MF), and an MFCLC. Three-dimension finite element method is used to analyze the two structural models. Ultimate bearing capacities of the two models subjected to three different distribution types' lateral loads are studied and compared. The results showed that the new structural system has similar or even better performance than the pure steel moment frames in the case where the volume of the steel is not increased. In addition, as a result of reducing a large number of steel beam-column rigid connections, the MFCLC can reduce the configuration volume of the steel in total beam-column connections. Steel frames with more flexible beam-to-column connections also have many economical and construction advantages over rigid frames.

Key words: steel moment frame; leaning column; hinged beam; ultimate bearing capacity