第 29 卷　第 1 期　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　Vol. 29　No. 1
2016 年 3 月　JOURNAL OF SHIJIAZHUANG TIEDAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE)　Mar. 2016

钢框架-桁架新型结构体系抗震性能分析

郑　宏，　马江萍，　潘天久，　邱亚波

(西安培华学院 建筑工程学院，陕西 西安　710125)

摘要：为改善钢框架-支撑结构体系中支撑易屈服问题，简化钢框架-钢板剪力墙结构体系中剪力墙的受力，结合钢框架-钢板剪力墙结构体系中钢板剪力墙“拉力带”受力特性和两侧开缝钢板剪力墙简化模型，提出了一种新型结构体系——钢框架-桁架结构体系。对钢框架-桁架新型结构体系进行了介绍，通过 SAP2000 建立了钢框架-桁架结构体系模型，对这一新型结构体系进行了模态分析、反应谱分析和线性时程分析并与钢框架-钢板深梁结构体系和纯钢框架结构体系进行了对比。分析结果表明钢框架-桁架结构体系有较高结构抗侧刚度；在地震作用下，钢框架-桁架结构体系与钢框架-钢板深梁结构体系具有相似的动力特性，在一定条件下利用钢框架-桁架结构体系简化和等效钢框架-钢板深梁结构体系是合理的。

关键词：钢框架-桁架结构体系；模态分析；反应谱分析；线性时程分析

中图分类号：TU392.4　文献标志码：A　文章编号：2095-0373(2016)01-0001-05

0　引言

钢结构建筑具有质量轻、强度高、韧性好能够重复利用等特点[1]，因此发达国家如美国、日本、英国等在高层建筑中普遍应用。钢框架的抗侧刚度较小，地震和风荷载作用下容易产生较大的侧向变形。为了提高钢框架的抗侧刚度，各国研究者提出了钢框架-支撑体系及钢框架-内填墙体系等多种结构形式。对于常见的钢框架-中心支撑结构体系，在地震作用下，支撑斜杆受压屈服后，承载力急剧下降，在罕遇地震下对结构极为不利，因此限制了钢框架-中心支撑结构体系只能用于抗风结构和设防烈度较低的结构抗震[2]。国内外学者对钢板剪力墙进行了大量研究，在水平荷载作用下钢板剪力墙中产生拉力带，Kualk[3]提出了条带模型(Strip Model)和等效层斜撑模型(Equivalent Story Brace Model)。郑宏等[4-7]提出了钢板深梁和钢-混凝土组合深梁的概念，总结了钢板剪力墙的发展规律。缪友武[8]、徐嫚等[9-10]对两边连接钢板剪力墙进行了研究。孙飞飞等[11]建立了开缝钢板剪力墙的等效交叉模型。

本文结合两边连接钢板剪力墙的简化模型和钢框架-支撑结构体系理论提出了钢框架-桁架新型结构体系。这一结构体系由两边连接钢板剪力墙简化演变而来，使结构体系的受力更加明确。文中分析了这一结构体系的动力性能，并与钢框架-钢板深梁结构和纯钢框架结构体系进行了对比分析。

1　钢框架-桁架结构体系特点

钢框架-桁架结构体系是在钢框架中内填平行弦桁架组成，如图 1 所示。平行弦桁架中弦杆和腹杆均为两个

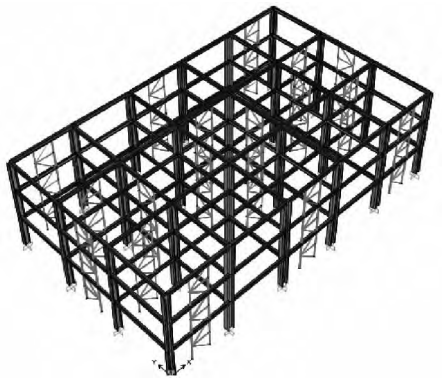


图 1　钢框架-桁架结构体系

收稿日期：2015-01-21　责任编辑：车轩玉　DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.2016.01.01
基金项目：2014 年西安培华学院校级科研课题(PHKT20140719)
作者简介：郑宏(1964-)，男，教授，博士生导师，工学博士。主要从事结构工程的研究。E-mail：cehzheng@chd.edu.com
郑宏，马江萍，潘天久，等. 钢框架-桁架新型结构体系抗震性能分析[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2016，29(1)：1-5.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

等肢角钢相并形成T型截面,腹杆和弦杆通过节点板连接,可视为铰接;弦杆直接焊接于上下层框架梁,可视为两端固结。

钢框架-桁架结构体系中平行弦桁架是在框架结构施工完成之后进行安装,可假定平行弦桁架不受竖向力。在水平荷载作用下,腹杆为轴向受力构件承受轴向压力或拉力,整个桁架作为内填抗侧力构件能有效提高结构体系的横向刚度,减小侧移。桁架节间数目,取决于层高和跨度。为制作方便和受力合理,应使斜腹杆的倾角保持在45°~60°[12]。

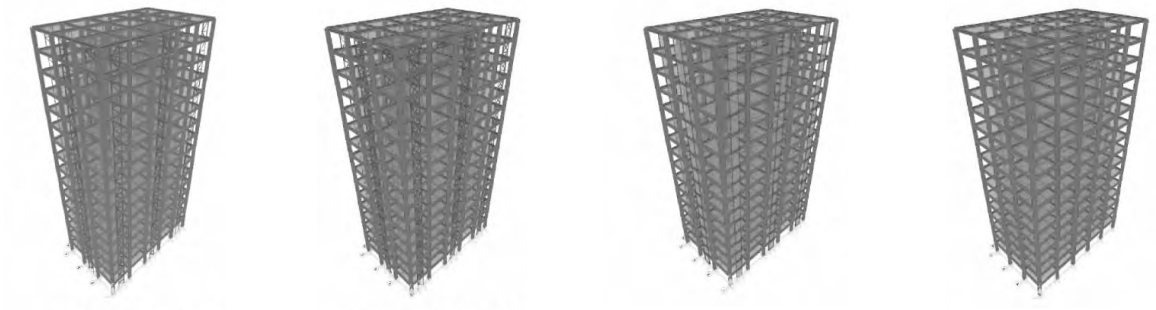
桁架作为抗侧力构件受力更合理,且具有质量轻、安装或更换方便等特点。改变桁架的参数可以大范围调节结构的刚度、承载力和耗能能力,使结构满足不同抗震要求。这一新型结构体系可以广泛应用于有不同抗震性能要求的钢框架结构设计、已建钢框架结构加固和改造。

2 计算模型的建立

为分析钢框架-桁架结构体系的抗震性能,设计了两组钢框架-桁架结构模型,利用SAP2000有限元分析软件进行动力性能的分析。同时建立一组纯钢框架结构模型、钢框架-钢板深梁结构模型作为对比。四组模型均为16层,层高3.6 m,建筑总高度为57.6 m。楼面活荷载取为2.0 kN/m^2,屋面活荷载为0.7 kN/m^2。

梁、柱为Q235焊接H型钢,边柱为H550×500×20×25,1~8层中柱截面H550×500×26×36,9~16层中柱截面H550×500×20×32,梁截面为H400×200×8×13,桁架腹杆为两根∟63×8相并,桁架弦杆为两根∟100×10相并。楼板采用120 mm厚压型钢板组合楼板,压型钢板厚1 mm,混凝土强度等级为C30。模型中外墙采用轻质混凝土砌块,内墙均为轻质隔墙。各组模型的三维立体图如图2所示。其中钢框架-桁架结构体系I为钢框架内填单斜杆桁架,钢框架-桁架结构体系II为钢框架内填X型腹杆桁架;两者仅在腹杆形式上有差异。

四组模型所处场地条件均为8度抗震设防地区,设计地震分组为第一组,II类场地,基本风压为0.45 kN/m^2。本文模型中梁、柱、桁架均为杆单元,钢板深梁和楼板为壳单元。



(a)钢框架-桁架体系I (b)钢框架-桁架体系II (c)钢框架-钢板深梁体系 (d)纯钢框架体系

图2 模型三维立体图

3 动力分析

3.1 模态分析

通过SAP2000对结构进行模态分析,可以求出结构自振周期和频率等性能参数。自振周期反应了结构的刚度情况,四组模型的自振周期对比情况如图3所示。

由图3可知:纯钢框架结构体系自振周期最大,钢框架-桁架结构体系自振周期次之,钢框架-钢板深梁结构体系自振周期最小。因此,通过在纯钢框架结构体系中内填桁架、钢板深梁的方式可以显著提高结构的刚度。其中以钢框架-钢板深梁结构体系在刚度上的提高最为明显。

结构刚度过大,在地震作用下的受力情况也会发生变化,同时会造成材料的浪费,因此需要将结构的刚度控制在一定范围内。钢框架-桁架结构体系的刚度介于纯钢框架结构体系和钢框架-钢板深梁体系之

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

间，可以避免结构“过刚”或“过柔”。同时，可以通过调整桁架在框架结构中的宽度来实现结构体系刚度在一定范围内连续变化。

3.2　反应谱分析

反应谱分析方法输出的结果为结构每一层最大位移以及层间位移角等数据。根据四组模型的烈度、场地条件、设计地震动分组等信息得出各模型设计反应谱地震影响系数如图 4 所示。

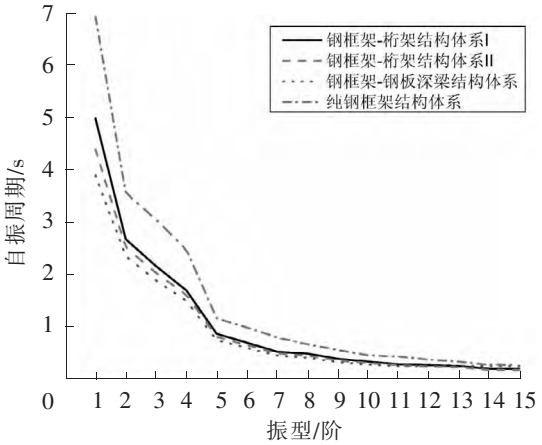


图 3　各模型自振周期对比

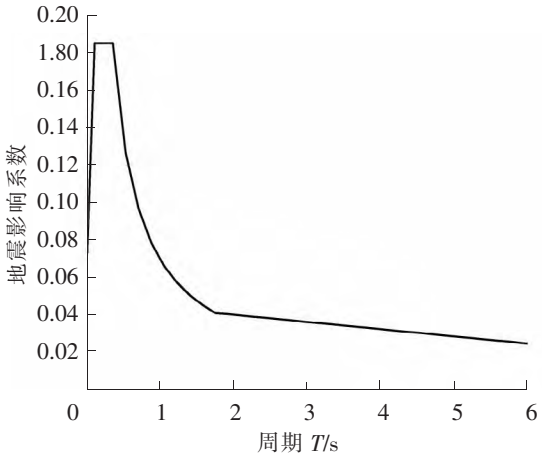
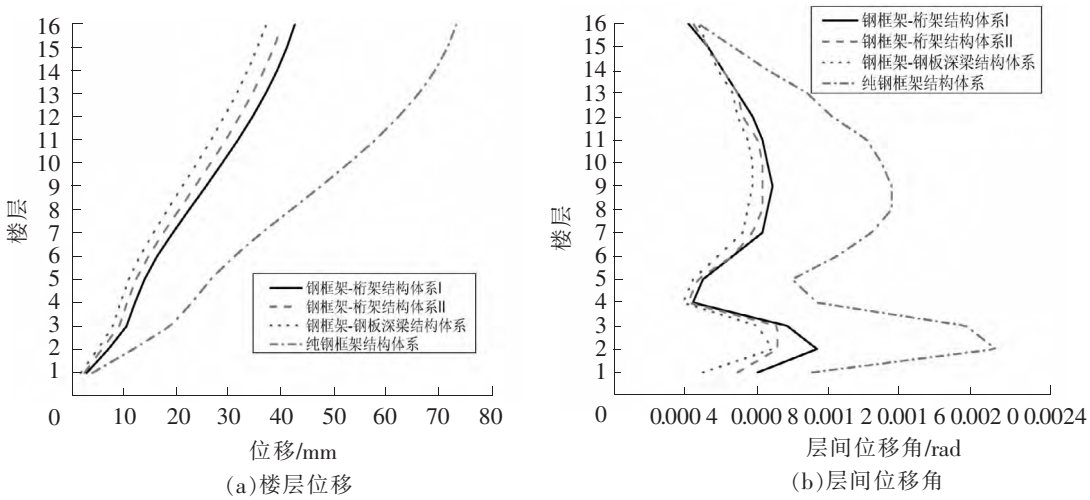


图 4　地震影响系数曲线

本文反应谱分析中，振型组合采用 CQC 法，即完全平方根组合法。分析得到四组模型的楼层位移曲线和层间位移曲线如图 5 所示。



(a)楼层位移　　(b)层间位移角

图 5　各模型侧向位移

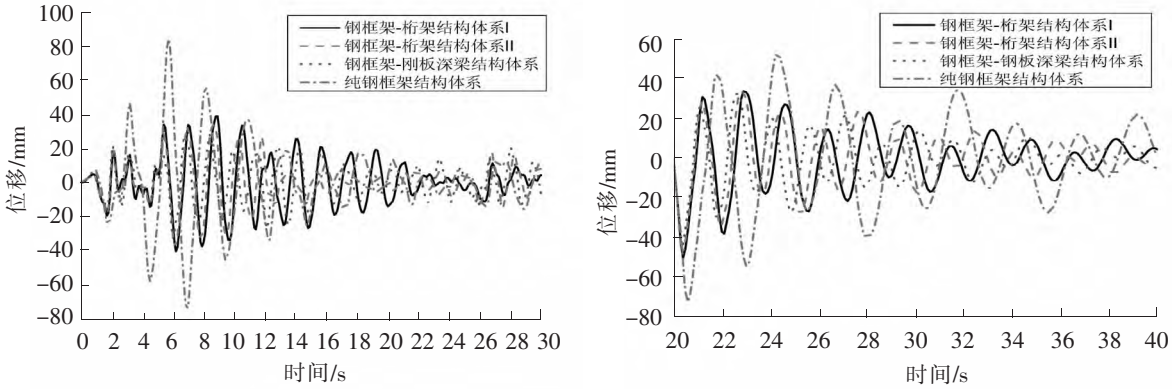
由图 5(a)中各模型楼层位移曲线可知：纯钢框架结构体系的变形曲线呈现剪切型，钢框架-桁架结构体系和钢框架-钢板深梁结构体系变形曲线在形式上与纯框架结构体系类似，也为剪切型。相较于通常情况下剪力墙结构的弯曲型变形特性，钢框架-桁架结构体系表现出“柔性”结构的特点。模型的变形曲线中，在结构中部均出现变形曲线“内缩”现象，结合图 5(b)中层间位移角曲线，“内缩”现象发生在第 5 层处，发生这一现象的原因是由于模型中柱子在第 8 层处发生一次变截面，8 层以上柱子截面减小从而使得结构刚度存在突变。

钢框架-桁架结构体系和钢框架-钢板深梁结构体系的变形曲线形式基本一样，只是钢板深梁的刚度更大，使钢框架-钢板深梁结构体系的变形小于钢框架-桁架结构体系。但是相差很小，钢框架-桁架结构体系中的体系 II 与钢框架-钢板深梁体系相比，两者除在首层处相差 25%以外，其它各楼层的变化均小于 10%。由此可知，在特定条件下可用钢框架-桁架结构体系替换钢板深梁结构体系。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3.3 线性时程分析

选择两条适用于二类场地的地震波:Elcentro波和唐山波(南北向),其中唐山波选用较有研究意义的20～40 s时间段内的波形图。在进行时程分析时,需依据《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)表5.1.2-2中规定的时程分析所用地震加速度时程的最大值对输入地震波的加速度峰值进行调整。其中,Elcentro波调整系数为0.002,唐山波调整系数为0.013。选取模型中57.6 m高度处(即屋面层)4轴和F轴交点21号节点X向水平位移作为研究对象,各组模型在不同地震波作用下的位移时程曲线如图6所示。



(a)Elcentro波作用下各组模型节点位移时程曲线 (b)唐山波作用下各组模型节点位移时程曲线

图6 各模型时程位移曲线

由图6可知,在相同地震波作用下,纯钢框架结构体系在地震作用下的位移时程响应最为激烈。钢框架-桁架结构体系和钢框架-钢板深梁结构体系由于桁架、钢板深梁等内填构件对结构刚度增加的贡献使得这两种体系的节点位移有大幅度减小。输入相同地震波时,四组模型节点位移随时间的变化关系表现出相似的规律;但钢框架-桁架结构体系、钢框架-钢板深梁结构体系波形比纯钢框架结构体系波形更紧密,表明刚度增大,周期变小。

在相同地震波作用下,钢框架-桁架结构体系I、钢框架-桁架结构体系II、钢框架-钢板深梁结构体系的位移时程曲线在前10 s基本重合;在10 s后波形曲线表现出差异,但差异不明显。这说明在地震作用开始一段时间内,钢框架-桁架结构体系和钢框架-钢板深梁结构体系具有基本相同的地震响应;地震作用一段时间后,由于两种结构的耗能能力方面的不同造成地震响应的差异。钢框架-桁架结构体系是由钢框架-钢板深梁结构体系演变简化而来,而在地震作用下两种结构体系具有相近的地震响应,由此说明这种演变和简化是合理的,在一般条件下钢框架-桁架结构体系与钢框架-钢板深梁结构体系具有相当的抗震性能,且抗震性能明显优于纯钢框架结构体系。

4 结论

(1)通过在纯钢框架结构体系中内填桁架、钢板深梁的方式可以显著提高结构的刚度。钢框架-桁架结构体系的刚度介于纯钢框架结构体系和钢框架-钢板深梁体系之间,可以避免结构“过刚”或“过柔”。同时,可以通过调整桁架在框架结构中的宽度来实现结构体系的刚度在一定范围内的连续变化。钢框架-桁架结构体系在地震作用下与钢框架-钢板深梁结构体系具有类似的动力特性和地震响应。

(2)钢框架-桁架结构体系和钢框架-钢板深梁结构体系变形曲线在形式上与纯框架结构体系类似,也为剪切型。相较于通常情况下剪力墙结构的弯曲型变形特性,钢框架-桁架结构体系表现出“柔性”结构的特点。钢框架-桁架结构体系和钢框架-钢板深梁结构体系的变形曲线形式基本一样,在特定条件下可用钢框架-桁架结构体系替换钢板深梁结构体系。

(3)在地震作用开始一段时间内,钢框架-桁架结构体系和钢框架-钢板深梁结构体系具有基本相同的地震响应;地震作用一段时间后,由于两种结构的耗能能力方面的不同造成地震响应的差异。在一般条件下钢框架-桁架结构体系与钢框架-钢板深梁结构体系具有相当的抗震性能,且抗震性能明显优于纯钢框架结构体系。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

参　考　文　献

[1]戴国欣. 钢结构[M]. 3 版. 武汉：武汉理工大学出版社，2007.

[2]黄怡，王元清，石永久. 支撑布置方式对多高层钢结构抗震性能的影响分析[J]. 钢结构，2005，20(5)：41-45.

[3]Thorburn L J，Kualk G L，Montgomery C J. Analysis of Steel Plate Shear Walls[C]//Structural Engineering Rep. No. 107. Alberta，Canada：University of Alberta，1983.

[4]孙娜，郑宏，杜坤. 钢-混凝土组合深梁填充钢框架动力弹塑性分析[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2013，26(2)：13-17.

[5]袁晓洒，郑宏，罗景阳. 不同刚度钢板深梁填充钢框架结构体系抗震性能分析[J]. 世界地震工程，2013，29(4)：114-118.

[6]郑宏，潘天久，卫磊. 深梁填充钢框架的发展与研究进展[J]. 建筑科学与工程学报，2013，30(4)：32-40.

[7]袁晓洒，郑宏，于旭光. 基于双折线恢复力模型的钢框架内填钢板深梁滞回耗能分析[J]. 石家庄铁道大学学报：自然科学版，2013，26(3)：18-22.

[8]缪友武. 两侧开缝钢板剪力墙结构性能研究[D]. 北京：清华大学土木水利学院，2004.

[9]徐嫚，王玉银，张素梅. 两边连接钢板剪力墙抗剪静力性能研究[J]. 工业建筑，2009，39(3)：107-111.

[10]徐嫚，王玉银，张素梅. 两边连接钢板剪力墙与组合剪力墙抗剪性能[J]. 哈尔滨工业大学学报，2010，42(8)：1216-1220.

[11]孙飞飞，贺旻斐，李国强，等. 开缝钢板墙等效交叉支撑模型[J]. 同济大学学报：自然科学版，2011，39(5)：625-630.

[12]周绪红，莫涛，蔡益燕，等. 新型交错桁架结构体系的应用[J]. 钢结构，2000，15(2)：16-18.

Seismic Performance of New Steel Frame Infilled by Truss Structure System

Zheng Hong，　Ma Jiangping，　Pan Tianjiu，　Qiu Yabo

(Architectural and Civil Engineering Institute，Xi'an Peihua University，Xi'an 710125，China)

Abstract：A new steel frame infilled by truss structure system is presented in this paper to solve the yield of brace and simplify stress of steel plate shear wall. The new structure is presented according to tension field behavior of steel plate shear wall in steel frame-steel plate shear wall structure system and simplified modal for steel plate shear wall slotted at edge. The new steel frame infilled by truss structure system is introduced and its modal is set up through SAP2000. The modal analysis，response spectrum analysis and liner time history analysis of the new structure system are carried out，and the analysis results are compared with steel frame-steel plate deep beam structure system and steel frame structure. The analysis results indicate that：steel frame infilled by truss structure gets a greater lateral stiffness and similar dynamic characteristics to steel frame-steel plate deep beam structure. It's reasonable to simplify and equivalent steel frame-steel plate deep beam with steel frame infilled by truss structure system under certain conditions.

Key words：steel frame infilled by truss structure system；modal analysis；response spectrum analysis；liner time history analysis

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net