

文章编号:1673-2049(2013)03-0001-06

# 钢框架-预制混凝土抗侧力墙装配式结构体系

周天华<sup>1</sup>, 吴函恒<sup>1</sup>, 白亮<sup>1</sup>, 蒋路<sup>2</sup>, 陈军武<sup>3</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 宝钢建筑系统集成有限公司, 上海 200050;  
3. 西安有色冶金设计研究院, 陕西 西安 710001)

**摘要:**介绍了新型装配式钢结构住宅结构体系的基本构成、连接方式和构造关系;同时归纳和评述了该结构体系的特点,包括预制装配化程度高、墙体可更换、墙体轴力小、布置灵活、抗侧力体系与维护一体化等;阐述了该结构体系的设计理念、设计步骤,并对6层和18层该结构体系房屋进行设计实例分析;最后讨论了该结构体系在应用过程中存在的主要问题和相应对策。研究表明:这种新型结构体系符合建筑产业化的进程,具有广阔的应用前景。

**关键词:**钢框架;预制混凝土抗侧力墙;装配式结构;高层建筑;抗侧力体系

**中图分类号:**TU392.4 **文献标志码:**A

## Fabricated Structural System of Steel Frame-prefabricated Concrete Lateral Resistance Wall

ZHOU Tian-hua<sup>1</sup>, WU Han-heng<sup>1</sup>, BAI Liang<sup>1</sup>, JIANG Lu<sup>2</sup>, CHEN Jun-wu<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China; 2. Baosteel Construction System Integration Co., Ltd, Shanghai 200050, China; 3. Xi'an Research Institute of Nonferrous Metallurgy, Xi'an 710001, Shaanxi, China)

**Abstract:** Basic elements, connection methods and structure relations of the new type steel frame-prefabricated lateral resistance wall system were introduced. A series of characteristics, such as high fabrication degree, replaceable wall, smaller axial force of wall, convenient and flexible arrangement and integration of lateral resistance system and maintenance system, etc. were generalized and discussed. Design concepts and procedures of the fabricated structural system were elaborated along with tentative design of six and eighteen-storied buildings. Finally, the main problems and corresponding countermeasures in the application of this structural system were discussed. The research results show that the new type structural system suits the process of construction industrialization, so it has broad application prospect.

**Key words:** steel frame; prefabricated concrete lateral resistance wall; fabricated structure; high-rise building; lateral resistance system

## 0 引言

预制装配式钢结构住宅结构体系的工业化程度高、施工周期短、不受季节限制、现场湿作业少、材料

利用率高、绿色环保、建筑节能性能好,是中国推进住宅现代化的理想住宅建筑体系。在钢结构诸多类型中,钢框架结构具有建筑空间大、布置灵活、易于标准化、定型化等优点,目前在多、高层建筑中应用

收稿日期:2013-05-09

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012TD012);国家自然科学基金项目(51208058)

作者简介:周天华(1963-),男,陕西西乡人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:zhouth163@163.com。

最为广泛,但钢框架结构的抗侧刚度小,需要与其他抗侧力体系结合才能满足工程应用的要求,常见的结构体系有钢框架-支撑、钢框架-钢筋混凝土核心筒、钢框架-钢板剪力墙等。上述抗侧体系均能增加结构抗侧刚度,但存在构造复杂、装配化施工不便、维护成本高等缺点。

宝钢 Living Steel 项目组、同济大学等对钢框架-带缝钢板剪力墙结构体系在钢结构住宅中的应用开展了专题研究<sup>[1-4]</sup>,并较大规模地应用在四川都江堰灾后重建重点项目“兴堰·逸苑”全钢结构安居房中<sup>[5]</sup>,然而材料本身造价较高,加工工艺复杂,同时存在防火、防腐、外围护、后期装修等一系列问题。

研发构造简单、成本低、综合性能好的“完全装配式钢结构多、高层住宅结构体系”,是目前中国时代发展需要。在此背景之下,本文中笔者提出一种新型装配式钢框架-预制混凝土抗侧力墙结构体系 (SPW 体系),拟对这种新型装配式结构体系做全面介绍。

## 1 SPW 体系简介

### 1.1 基本构成

SPW 体系基本构成为:钢框架、预制混凝土抗侧力墙、预制混凝土组合楼盖 3 个部分(图 1,2),主要构件在工厂制作,现场安装,大幅度减少现场湿作业,节省人力,提高效率。

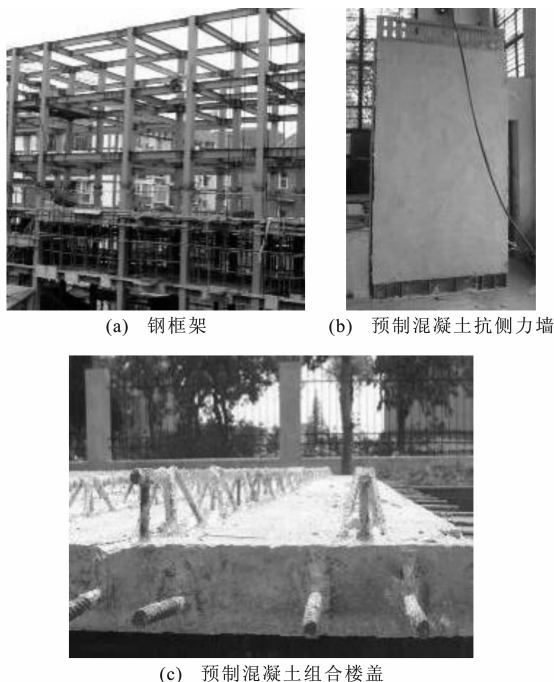


图 1 SPW 体系的基本构成

Fig. 1 Basic Elements of SPW System

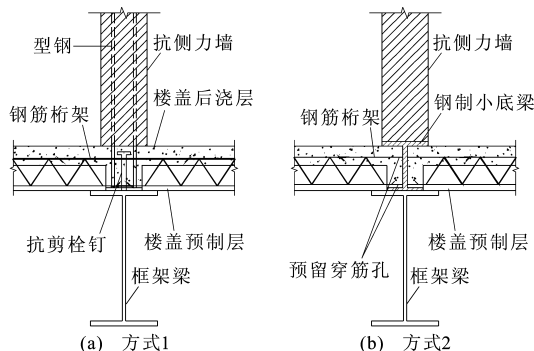


图 2 SPW 体系的构造关系

Fig. 2 Structure Relations of SPW System

预制混凝土抗侧力墙可采用型钢混凝土墙体、钢筋混凝土墙体以及 PVA 纤维混凝土墙体等多种类型,通过合理的构造形式可实现抗侧力体系与钢框架同步安装;同时预制装配式混凝土墙体可以较好解决钢结构房屋维护体系的防火、防腐问题,实现抗侧力体系与维护体系制作、施工一体化。

预制混凝土组合楼盖可采用钢筋桁架叠合楼盖<sup>[6]</sup>,钢筋桁架与底层混凝土板在工厂预制,现场安装后可作为施工阶段的模板,承担面层混凝土以及施工荷载,同时钢筋桁架作为混凝土楼板的配筋承担使用荷载。钢筋桁架叠合楼盖具有经济适用、施工便捷、质量可靠等优点,作为 SPW 体系的楼盖系统可实现设计标准化和制造工业化。

### 1.2 连接构造

抗侧力墙体仅与钢框架梁连接而不与框架柱连接,此种连接方式一方面可以根据结构整体刚度的需求,灵活地调整墙体宽度;另一方面可根据门窗洞口的布置,灵活地调整墙体的位置,实现建筑和结构的统一。墙体顶部、底部具体连接方式有以下几个方面。

#### 1.2.1 墙体顶部

设置在墙体顶部的预埋钢板与框架梁下翼缘采用高强螺栓连接,栓孔采用长圆孔构造,实际施工安装过程中,先初拧高强螺栓,待主体结构施工完毕,框架梁由于楼(屋)面恒荷载产生挠曲变形后,再终拧高强螺栓。以期预制装配式抗侧力墙体仅承担使用阶段的竖向活荷载,同时长圆孔也可调整安装误差,如图 3 所示,其中, $\delta$ 为变形量。

#### 1.2.2 墙体底部

形式 1[针对型钢混凝土抗侧力墙,如图 4(a)所示]:预埋型钢与框架梁焊接,框架梁上设置抗剪栓钉,混凝土墙体底部与框架梁预留 150 mm 的后浇缝(方便楼板钢筋穿过),待预制楼板安装完毕后,后

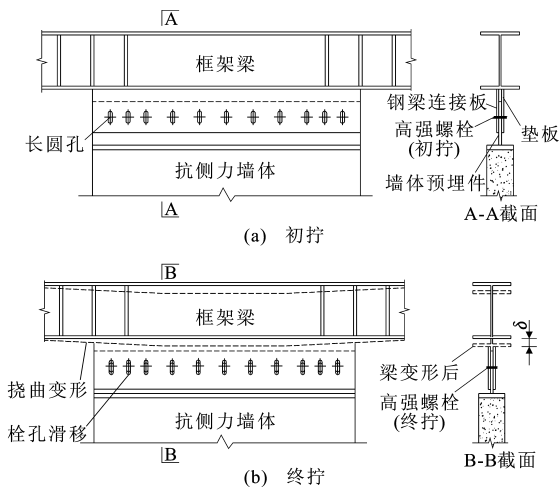


图 3 墙体顶部连接构造

Fig. 3 Connection Structures at Top of Walls

浇缝与楼板面层混凝土一次浇筑。

形式 2[针对钢筋(PVA 纤维)混凝土抗侧力墙,如图 4(b)所示]:墙体底部设置预埋钢板,现场安装时与框架梁焊接,框架梁上设置抗剪栓钉,混凝土墙体底部与框架梁预留 150 mm 的后浇缝(方便楼板钢筋穿过),待预制楼板安装完毕后,后浇缝与楼板面层混凝土一次浇筑。

形式 3[针对钢筋(PVA 纤维)混凝土抗侧力墙,如图 4(c)所示]:墙体底部设置小底梁,小底梁上翼缘设置抗剪栓钉、锚固钢筋,与混凝土墙体同时浇筑,小底梁下翼缘与框架梁上翼缘通过高强螺栓连接,小底梁腹板预留孔洞,方便楼板钢筋穿过。

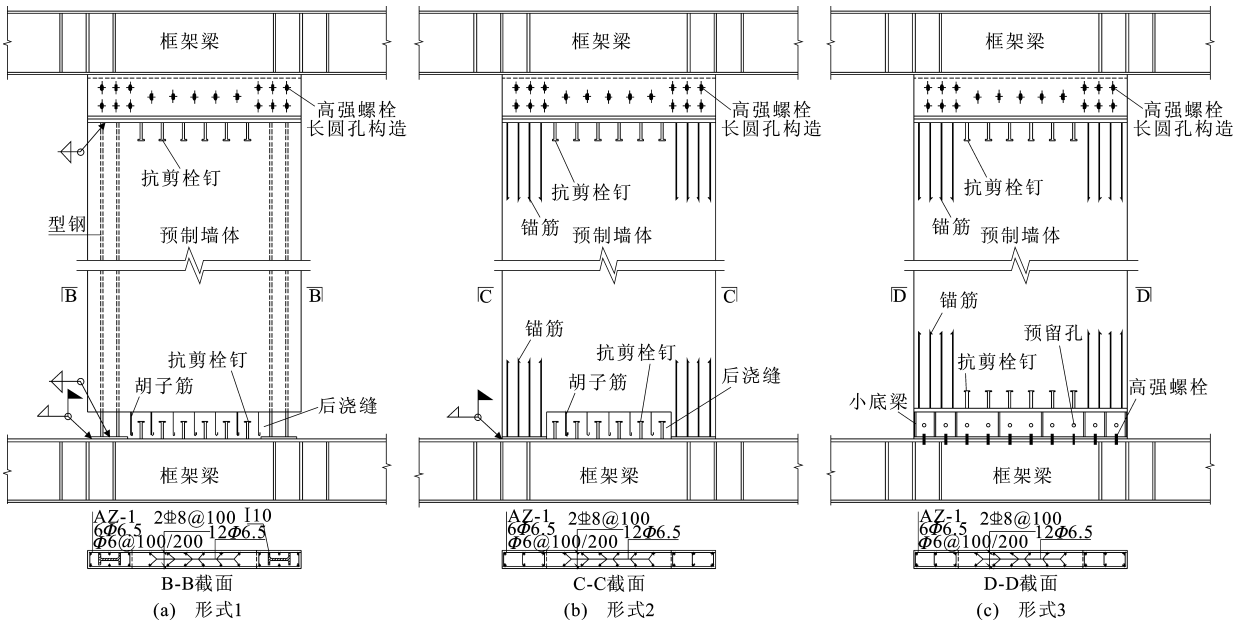


图 4 墙体底部连接构造

Fig. 4 Connection Structures at Bottom of Walls

## 2 SPW 体系的特点

### 2.1 预制装配化

SPW 体系的三大组成单元——钢框架、预制混凝土抗侧力墙、预制混凝土组合楼盖均可进行工业化生产、现场安装,具有施工周期短、不受季节限制、现场湿作业少等优点,有利于实现设计标准化、制造工业化、安装机械化,从而能够促进建筑行业的产业化。

### 2.2 抗侧力墙体可更换化

SPW 体系是一种双重抗侧力结构体系,在风荷载及多遇地震作用下,钢框架和抗侧力墙体提供结构处于弹性阶段的承载力和刚度的需求;在罕遇地震作用下,抗侧力墙体作为第 1 道防线,通过自身的开裂实现能量耗散,对钢框架提供保护,其退出工作后,钢框架仍具有一定的承载能力,且结构体系延性好,可实现两道设防,避免在罕遇地震作用下结构发生严重破坏甚至倒塌,同时采用预制墙体并加以合理的构造措施,可以实现抗侧力墙体的灾后维修和更换。

### 2.3 抗侧力墙体施工阶段零轴力化

预制混凝土抗侧力墙体顶部螺栓孔采用长圆孔构造形式,并通过螺栓初拧→主体结构施工完毕→螺栓终拧的方式,使预制装配式抗侧力墙体在施工阶段不承担轴力,而仅在使用阶段承担少量的竖向活荷载,从而极大地减小了墙体的轴力,提高墙体变

形能力,使之与钢框架在变形能力方面能够较好地匹配。

## 2.4 抗侧力墙体布置灵活化

抗侧力墙体仅与钢框架梁连接,此种连接方式一方面可以通过调整墙体宽度和数量来满足结构不同的抗侧刚度需求;另一方面可根据门窗洞口的布置,灵活地调整墙体位置,实现建筑和结构的统一,如图 5 所示。

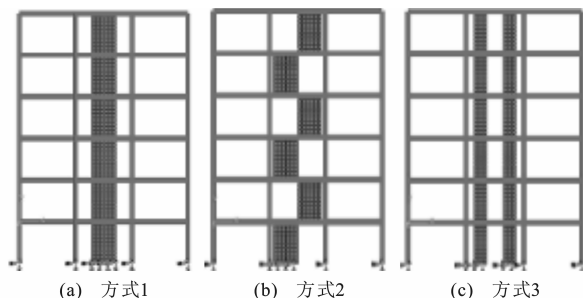


图 5 抗侧力墙体布置方式

Fig. 5 Distribution Methods of Lateral Resistance Wall

## 3 SPW 体系的设计方法

### 3.1 两道设防的理念

SPW 体系是一种双重抗侧力结构体系,设计时可按照多道设防的设计方法,由于抗侧力墙体刚度较大,可作为结构的第 1 道防线,在设防地震、罕遇地震下先于钢框架破坏,并实现能量耗散,对钢框架提供保护,其退出工作后,钢框架作为第 2 道防线。由于塑性内力重分布,钢框架部分按侧向刚度分配的剪力比多遇地震时大,基于上述原因,可参照中国现行《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)<sup>[7]</sup>。对于其他双重抗侧力体系的类似方法,通过放大钢框架部分地震力(按刚度分配得到)的方法加以考虑,具体放大数值待后续研究确定。

### 3.2 设计步骤

步骤 1:按照竖向荷载设计钢框架,并综合抗震构造要求、楼层荷载、楼层数和跨度等因素初步确定框架柱、梁的尺寸。

步骤 2:对步骤 1 中确定的钢框架进行结构计算,并由层间位移角以及每层总刚度确定抗侧力墙体需要提供的刚度。

步骤 3:依据抗侧力墙体刚度(后续研究确定)设计每层所用墙体的尺寸及数量,并综合建筑布置及结构布置等因素确定抗侧力墙体的位置。

步骤 4:对钢框架-抗侧力墙体系进行结构计算,并进行必要的调整,以保证结构计算结果能够满

足各项要求。

步骤 5:放大钢框架部分地震力,以确保两道设防的要求,并对其进行二次设计。

## 4 SPW 体系试设计

以文献[5]中的钢结构住宅为工程背景,参考其结构平面布置(图 6)。

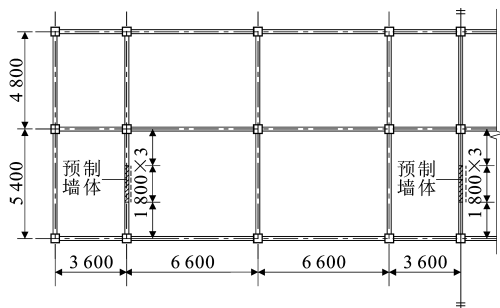


图 6 结构平面布置(单位:mm)

Fig. 6 Structural Plane Layout (Unit:mm)

利用有限元软件 ABAQUS 分别建立 6 层和 18 层的 SPW 体系模型,模型层高为 3 m,楼板厚为 100 mm。拟定柱截面采用箱型截面,截面尺寸为 350 mm×350 mm×20 mm×20 mm,梁型号为 HN400×200×8×13,材质为 Q235B 级钢;预制的钢筋混凝土抗侧力墙体墙宽 1 800 mm,厚 100 mm,混凝土强度等级为 C30,采用梁单元建立框架梁、柱,通过分层壳单元<sup>[8]</sup>建立带钢筋层的抗侧力墙体和楼板。SPW 体系有限元模型如图 7 所示。

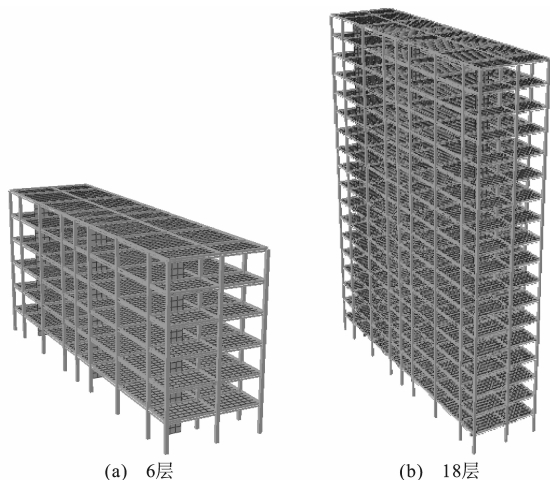


图 7 SPW 体系有限元模型

Fig. 7 Finite Element Models of SPW System

### 4.1 结构的自振周期

采用 Lanczos 法分别提取 6 层和 18 层结构的前 3 阶振型和对应的周期  $T_1, T_2, T_3$ ,如表 1 所示,其中扭转周期与第 1 阶平动周期之比为 0.82,满足

表 1 结构自振周期

Tab. 1 Structural Natural Periods s

层数	$T_1$	$T_2$	$T_3$
6	0.577( $x$ 方向平动)	0.491( $z$ 方向平动)	0.437(扭转)
18	1.848( $x$ 方向平动)	1.730( $z$ 方向平动)	1.515(扭转)

《建筑抗震设计规范》的要求。

4.2 反应谱分析

对 SPW 体系 6 层和 18 层模型进行弹性反应谱分析,结果见表 2。从表 2 可以看出,水平地震作用下,结构体系剪重比、最大层间位移角均满足《建筑抗震设计规范》的要求。

表 2 地震反应谱分析结果

Tab. 2 Analysis Results of Seismic Response Spectrum

层数		6	18
基底剪力/kN	$x$ 方向	2 256	2 485
	$z$ 方向	2 555	2 632
剪重比	$x$ 方向	0.264	0.097
	$z$ 方向	0.299	0.100
最大层间位移角	$x$ 方向	1/377	1/296
	$z$ 方向	1/472	1/350

4.3 弹塑性时程分析

采用 El Centro 波、Taft 波和上海人工波分别对 6 层和 18 层 SPW 体系进行罕遇地震下时程分析,并按文献[7]对加速度时程最大值进行比例调幅,结构弹塑性层间位移角如图 8 所示,满足《建筑抗震设计规范》对多、高层钢结构弹塑性层间位移角 $\theta_p \leq 1/50$ 的要求。

5 SPW 体系在实际应用中存在的问题及对策

5.1 连接构造的可靠性

抗侧力墙体与框架梁连接处是保证钢框架与抗侧力墙体协同工作、共同承担荷载的关键部位<sup>[9-11]</sup>,应保证连接破坏不先于墙体破坏,针对本文第 1.2 节中提出的 3 种连接方式,后续可设计模型试件,并开展水平低周反复加载试验研究,测试其连接的可靠性,并结合试验研究结论给出合理化的改进措施。

5.2 抗侧力墙体的变形能力

SPW 体系属于钢与混凝土混合结构,由于钢材变形能力优于混凝土材料,因此,应提高墙体变形能力,使之与钢框架能够较好匹配,可通过以下措施:①降低墙体的轴压比,如采用第 1.2 节中所述长圆孔的构造形式,可大幅度减小墙体的轴压比;②在墙体边缘约束区设置型钢或采取分段约束箍筋等措

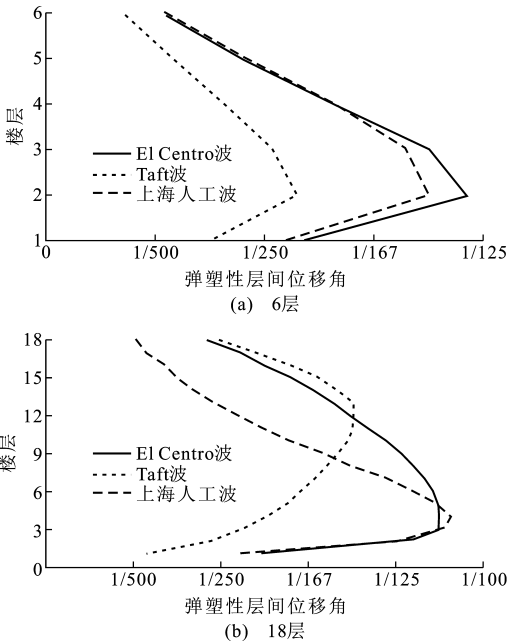


图 8 结构弹塑性层间位移角

Fig. 8 Elasto-plastic Story Drift Angles of Structure

施,可提高墙体变形能力;③采用变形性能较好的新型混凝土材料,如 PVA 纤维混凝土等。

5.3 抗侧力墙体刚度与承载力计算方法

本文中提出的抗侧力墙体刚度、承载力的计算方法是 SPW 体系结构内力分析和构件设计的前提,抗侧力墙体仅与框架梁相连接,框架梁为墙体传递荷载并作为其支撑边界,使墙体的受力特点异于普通的混凝土剪力墙。后续研究可结合墙体变形特性建立考虑框架梁约束效应作用的刚度计算公式;同时基于墙体不同破坏模式(后续试验研究确定),提出考虑墙体尺寸、材性、轴压比、配筋率和连接强度的承载力分析模型,并建立承载力计算公式。

5.4 钢框架与抗侧力墙体的刚度匹配

对于 SPW 体系,若墙体的刚度较小,无法起到提高结构整体刚度作用;若墙体的刚度较大,则可能造成钢框架先行破坏,因此二者适宜的刚度匹配对于实现结构延性破坏机制尤为重要。后续研究同时通过改变墙体厚度及高宽比调整墙体的抗侧刚度,实现墙体与钢框架刚度相适应,使整体结构反应满足预设的性能目标。

5.5 弹(塑)性层间位移角限值的确定

目前世界各国抗震规范所采用主流方法是基于变形的抗震设计方法,弹性、弹塑性层间位移角限值是关键参数。可参照其他相似结构的限值,结合后续试验研究结论,并在借鉴国外已有的研究和经验的基础上,给出合理的取值。

鉴于上述原因,本项目将对 SPW 体系的抗震性能、连接构造可靠性等方面开展系列试验研究,并结合中国规范的相关规定,提出切实可行的分析、设计和计算建议,具体内容将另文专题介绍。

## 6 结 语

本文中提出一种新型装配式钢框架-预制混凝土抗侧力墙结构体系(SPW 体系),从基本构成、连接构造、体系特点、设计方法和应用研究等方面进行全面的介绍,并对 6 层和 18 层 SPW 体系房屋进行设计实例分析,验证了该结构体系的可行性。SPW 体系是一种构造简单、成本低、综合性能较好的装配式钢结构多、高层住宅结构体系,符合装配式结构体系的发展和建筑产业化的进程。

### 参考文献:

### References:

- [1] 蒋 路,陈以一,汪文辉,等.足尺带缝钢板剪力墙低周往复加载试验研究 I [J].建筑结构学报,2009,30(5):57-64.  
JIANG Lu, CHEN Yi-yi, WANG Wen-hui, et al. Experimental Study on Full Scale Steel Plate Shear Wall with Slits Under Low-frequency Cyclic Loads; Part I [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 57-64.
- [2] 蒋 路,陈以一,卞宗舒.足尺带缝钢板剪力墙低周往复加载试验研究 II [J].建筑结构学报,2009,30(5):65-71.  
JIANG Lu, CHEN Yi-yi, BIAN Zong-shu. Experimental Study on Full Scale Steel Plate Shear Wall with Slits Under Low-frequency Cyclic Loads; Part II [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(5): 65-71.
- [3] 陈以一,蒋 路.带缝钢板剪力墙的承载力和开缝参数研究[J].建筑科学与工程学报,2010,27(3):109-114.  
CHEN Yi-yi, JIANG Lu. Research on Bearing Capacity and Slit Parameters of Steel Plate Shear Wall with Slits[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3): 109-114.
- [4] 蒋 路,陈以一,王伟栋.带缝钢板剪力墙弹性抗侧刚度及简化模型研究[J].建筑科学与工程学报,2010,27(3):115-120.  
JIANG Lu, CHEN Yi-yi, WANG Wei-dong. Research on Elastic Lateral Stiffness and Simplified Model of Steel Plate Shear Wall with Slits[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(3): 115-120.
- [5] 蒋 路.带缝钢板剪力墙应用技术分析[J].建筑科学与工程学报,2012,29(2):118-122.  
JIANG Lu. Analysis of Application Techniques of Steel Plate Shear Wall with Slits[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(2): 118-122.
- [6] 同济大学,宝钢建筑系统集成有限公司.钢筋桁架叠合楼板试验研究[R].上海:同济大学,2013.  
Tongji University, Baosteel Construction System Integration Co., Ltd. Experiment Research on Steel Bar Truss Composite Slab[R]. Shanghai: Tongji University, 2013.
- [7] GB 50011—2010,建筑抗震设计规范[S].  
GB 50011—2010, Code for Seismic Design of Buildings[S].
- [8] ABAQUS Inc. ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.10[M].Warick: ABAQUS Inc, 2009.
- [9] 郭彦林,周 明.钢板剪力墙的分类及性能[J].建筑科学与工程学报,2009,26(3):1-13.  
GUO Yan-lin, ZHOU Ming. Categorization and Performance of Steel Plate Shear Wall[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(3): 1-13.
- [10] 石雄伟,袁卓亚,马毓泉,等.钢板-混凝土组合加固预应力混凝土箱梁[J].长安大学学报:自然科学版,2012,32(3):58-62,90.  
SHI Xiong-wei, YUAN Zhuo-ya, MA Yu-quan, et al. Prestressed Concrete Box Girder Strengthened with Composition of Steel Plate and Concrete[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2012, 32(3): 58-62, 90.
- [11] 黄 琪.波形钢腹板设计方法[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(3):73-76.  
HUANG Qi. Design Study on the Corrugated Steel Webs[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(3): 73-76.