

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.03.003

新型装配式村镇住宅混凝土结构体系综述

叶林滨

(陕西建工集团有限公司, 陕西 西安 710003)

摘要: 为提高村镇建筑设计及居住质量水平,实现建筑节能、普及绿色建筑、提高能源使用效率、保护环境及可持续发展的方针政策,积极推广预制装配式混凝土结构是我国村镇住宅发展的必由之路。行业标准《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ 1—2014)的发布为村镇住宅中装配式混凝土结构的推广应用提供了工程设计、施工及验收等方面的技术支撑。结合我国近几年来村镇住宅建筑特点及装配式混凝土结构的发展,就目前应用比较广泛、具有代表性的几种新型装配式村镇住宅混凝土结构体系进行结构构造、受力特点分析,重点就各结构体系在构造、受力特点、计算模型的选择与简化、适用范围等方面进行了简要介绍,并指出各体系在实际工程应用中存在的优点与不足,为村镇住宅建筑体系的发展提供依据。

关键词: 装配式结构;村镇住宅;装配式剪力墙;预制凹槽板结构

中图分类号: TU37

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)03—0014—06

Review of New Precast Concrete Structural System in Rural Residence

YE Linbin

(Shaanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710003, China)

Abstract: In order to enhance the rural house design and the residential quality achieve building energy efficiency, increase the publicity of green building concepts, increase energy efficiency, protect environment and realize sustainable development, positively promotes the precast concrete structure is the inevitable choice for China to developing rural residence. The release of the industry standard 《Technical specification for precast concrete structure》(JGJ1 - 2014) offers the technology basis for the promotion and application of the precast concrete structure in the rural residence. Combined with the characteristics of rural residence and the development of precast concrete structure, the structure and stress characteristics of several widely used and representative precast rural residence concrete structures currently are analyzed. The structural system in structure, stress characteristics, selection of calculation model and their simplifications, scope of application and other aspects of a brief presentation has been introduced in detail. The advantages and disadvantages in the process of the applying of these structural systems of at present are proposed. It's good for laying the foundation for the future development of new type precast concrete structural system in the rural residence.

Keywords: precast structure; rural residence; precast shear wall; precast concave slab structure

村镇住宅产业化是关系到我国广大农民安居乐业和社会稳定的重要因素,也是全面建设小康社会的关键因素。为促进村镇住宅建筑产业化发展,提高村镇建筑设计及居住质量水平,保障群众居住安全和生活质量,实现建筑节能、普及绿色建筑、提高能源使用效率、保护环境及可持续发展的方针政策,国内外学者对可用于村镇住宅建设的工业化建

筑体系进行了多方位研究:其中以冷弯薄壁轻钢结构为主的轻钢薄板钢骨结构技术体系为主^[1],该体系采用0.8 mm~1.6 mm热浸镀锌钢板、“C”型钢与“U”型钢作为基本结构件,组合成房屋主体结构的梁、柱、屋架等;承重构件重量较轻,整体性很强,外墙板材可因地制宜。该结构体系缺点是造价较高且对施工人员的专业化有一定要求。钢结构镶嵌 ASA

板结构体系^[2]的主体结构为普通钢结构或者轻钢结构,围护结构采用镶嵌双层 ASA 板。外围护板不仅具有良好的保温隔热功能,且其内层板镶嵌于钢框架中,相当于钢支撑,与钢框架共同工作形成整体结构,可大幅降低结构的用钢量,但该体系造价较高且房屋体较轻,墙板较薄,居民舒适度较低。无比钢建筑体系^[3]是 100% 采用冷弯薄壁型钢建造的技术。该结构受力主体由冷弯轻型薄壁型钢和 V 型连接件构成,减少了突发外来荷载对建筑物的破坏。无比钢结构可与新型墙体材料、太阳能系统有机组合形成住宅建筑体系。该体系施工较复杂,对施工技术要求较高。冷弯薄壁型钢-轻质砂浆结构体系^[4]是由冷弯薄壁型钢作为主要的承重骨架,在骨架内部填充轻质砂浆,外侧采用防护面层复合而成的新型结构体系。该体系不仅具有传统冷弯薄壁型钢结构体系自重轻、抗震性能好、低碳环保等优点,且在一定程度上改善了冷弯薄壁型钢结构的保温、隔声及防火等建筑物理性能,提高了房屋的整体性和力学性能。体系中使用的轻质砂浆作为一种新型建筑材料,主要由建筑石膏、水泥、砂等混合料、聚苯乙烯颗粒和矿物基础黏合剂组成,该砂浆通过喷涂等方式施工,初凝速度快,经过一定时间的养护,具有一定强度,并兼有良好保温、隔音及防火等性能。综上所述:以上结构体系均以轻钢结构为主,具有施工复杂,技术要求高,房屋体较轻及造价高等缺点。故课题组结合我国目前几种装配式混凝土结构研究与发展,研发了一种适合我国村镇住宅建筑的新型装配式承重复合墙混凝土结构体系,该结构是一种耗能减震、生态环保、节能保温、快速建造、经济实用的装配式建筑结构新体系。本文针对目前几种应用范围广泛、具有代表性的新型装配式村镇住宅混凝土结构体系作简要的分析。

1 现有装配式混凝土墙体结构

1.1 装配式剪力墙(板式)结构

装配式剪力墙结构^[5-6](见图 1)是指主要受力构件由剪力墙、梁、板部分或全部由预制混凝土构件(预制墙板、叠合梁、叠合板)通过使用可靠连接形成的装配整体式结构。其中可靠连接分为墙板连接及梁、板连接;上下墙板的竖向分布钢筋连接采用套筒灌浆连接,并在此基础上辅以后浇混凝土实现水平拼缝的连接;预制梁及预制板通过后浇混凝土实现

整体式结构。

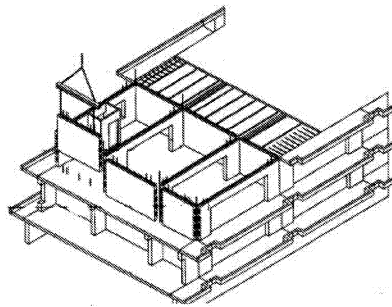


图 1 装配式剪力墙板式结构示意图

在装配整体式剪力墙结构中,墙体之间的节点及接缝数量多且构造复杂,如何保证节点及接缝的构造措施及施工质量将直接决定结构的整体抗震性能。当装配整体式剪力墙结构中仅有部分剪力墙时,在水平地震作用下,现浇墙肢的弯矩及剪力应进行修改,即在一定程度上放大,这是由于装配式拼缝的存在对预制墙肢抗侧刚度的削减效应导致;当整个结构以预制剪力墙为主时,只有预制构件之间采用适当的连接方式,装配整体式剪力墙结构的结构设计计算方法可认为与现浇结构相当。

在计算分析软件中,墙可采用专用的墙元或者壳元模拟。预制墙板之间如果为整体式接缝(接缝后浇混凝土,接缝两侧钢筋直接连接或者锚固在接缝混凝土中),可将接缝两侧作为同一墙肢建模计算;预制墙板之间的接缝如果不连接,则作为两个独立的墙肢建模计算。

装配板式结构类似于装配整体式剪力墙结构,主要采用预制墙板及现浇圈梁、边缘构件、预制叠合楼盖组成的装配整体式结构体系。与装配式剪力墙结构区别:预制墙板的拼缝连接比高层装配整体式剪力墙结构简化,该体系施工简便,利于推广。装配板式结构房屋适用于 9 层及 9 层以下的住宅建筑结构或者房屋高度不大于 24 m 的其他民用建筑结构。

装配式剪力墙结构研究与应用虽取得很大进步,但仍存在以下科学问题:(1) 仍需对预制装配式剪力墙的整体抗震性能进行深入研究;(2) 预制装配式剪力墙结构包含诸多的拼缝(其中包括水平及竖向)、边界节点等连接问题,而在连接方式上,“干式连接”的节点抗震性能研究少于以套筒灌浆连接为代表的“湿式连接”;(3) 对带边框装配式混凝土剪力墙结构研究较为缺乏,对其节点及拼缝的连接问题、整体受力性及抗震性能还需进一步探索。

1.2 外挂墙板结构

外挂墙板作为一种新型建筑外墙材料,具有快

速施工,工业化程度高等特点,并在美、日等国有着广泛的应用。其中包括许多种类型:梁式外挂板、柱式外挂板和墙式外挂板,其区别主要在于挂板在建筑中所处的位置不同,从而导致设计计算和连接节点的不同。鉴于我国对外挂墙板研究和工程实践都比较少^[7],目前仅限于墙式外挂墙板,即非承重的、作为围护结构使用的仅跨越一个层高和一个开间的外挂墙板。

在外挂墙板结构中,应重视连接件及预埋件的设计,其中包括主体结构支承构件中的预埋件,以及在外挂墙板中的预埋件设计,对有抗震设防要求的地区,应对外挂墙板和连接节点进行抗震设计;同时,还应注重外挂墙板与主体结构之间的相互关系,采用合理的连接节点,以保证荷载传递路径简捷,符合结构的计算假定。外挂墙板与主体结构的连接节点宜选用柔性连接的点支承,也可采用刚性连接的线支承。点支承的外挂墙板分为平移式外挂墙板和旋转式外挂墙板两种形式。它们与主体结构的连接节点又可分为承重节点和非承重节点两类;当采用柔性连接的点支承时,主体结构分析时可不计入外挂墙板的刚度。鉴于我国有关刚性连接的线支承的科研成果较少,因此目前我国外挂板的连接节点主要采用柔性的点支承做法。

目前外墙挂板结构在实际工程中具有良好应用的,并取得一定的经济效益,但仍存在以下科学问题:(1)我国对外墙挂板的研究还仅限于非承重的、作为围护结构使用的墙式外墙挂板,而对梁式、柱式外墙挂板研究较少;(2)对外墙挂板与主体连接之间的刚性连接的线支撑研究较少;(3)国外外墙挂板预埋件较多采用带有锚头的锚筋,并有大量的相关研究资料,而我国对此项技术的研究还较少;(4)外墙挂板板缝防水技术还有待进一步的研究与完善。

2 新型装配式村镇住宅混凝土结构体系

2.1 装配式全干接抗震墙结构体系

装配式全干接抗震墙结构体系是一种将墙板构件通过干式连接形成的新型全装配式混凝土结构体系。在预制墙板一侧端部预埋直锚螺栓,直锚螺栓一侧锚固于墙板内,一侧伸出墙板;在墙板另一侧端部预留 PVC 预埋管和连接手孔。待墙体对正后,将直锚螺栓插入预埋管内,通过连接手孔,使螺帽与螺杆连接(见图 2、图 3)。

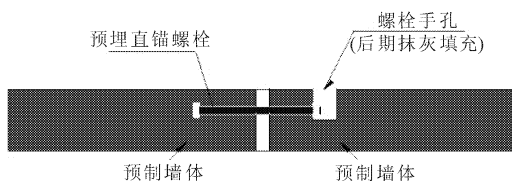


图 2 墙板水平连接示意图

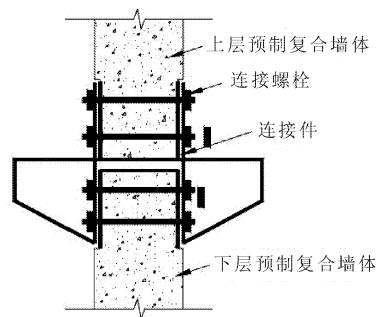


图 3 墙板竖向连接示意图

该结构体系的优势:(1)墙体全预制,现场全装配,突破“等同现浇”的设计理念,可加快施工速度,减轻环境污染及材料浪费等问题,充分发挥装配式结构的优势;(2)外墙采用保温夹芯墙板,实现保温结构一体化,保温及防水性能好;(3)所有连接均为干式,避免了现场焊接、后浇等复杂、繁琐作业,安装方法简单易懂,容易推广;(4)安装孔采用较低强度砂浆填充,连接装置可实现震后可拆卸、可更换的目的,降低成本。

2.2 预制凹槽板结构体系

预制凹槽板体系^[8]是由清华大学建筑设计研究院自主研发。承重凹槽板结构是以轻混凝土预制的带凹槽墙板作为主要承重构件,并通过设置现浇圈梁和构造柱,将墙板、楼板、屋面板等构件连接为整体而形成的一种新型装配式结构。该结构主要由预制双向凹槽墙板及凹槽内后浇混凝土,并辅以现浇边缘构件组成^[8]。作为预制双向孔空心墙的永久性模板,墙体内存在竖向及水平凹槽,有效改善现场支模和钢筋连接的工作效率。因此,墙体的竖向及水平分布钢筋分别布置于竖向凹槽和水平凹槽。在连接的问题上,预制凹槽面上下采用预留插筋连接——下层墙体预留插筋,当上层凹槽板吊装时,下层预留插筋伸入对应的凹槽内;吊装固定后,向预留凹槽内浇筑混凝土,实现墙体的竖向连接,该连接方法相比传统装配式剪力墙的连接更为便捷。

预制凹槽板的独特之处在于:一是其胶凝材料采用“硅铝基绿色水泥”,成本低、性能高且绿色环保;二是顶部凹槽兼做墙顶连梁的模板,在凹槽中安

放连梁钢筋笼架并与边缘构件一起浇筑混凝土后,形成填充构件与结构构件一体化的高性能、绿色、环保的复合墙体。

该结构体系的优势:工地现场减少绑钢筋、支模板和浇注混凝土的工作量、节省人工、据项目需求可进行装配式、模块化、智慧化作业等。

2.3 叠合板式剪力墙结构体系

叠合板式混凝土剪力墙结构主要采用叠合式墙板及楼板,在加上传统的梁、柱等边缘构件装配整浇而成结构体系^[9]。其中叠合式墙板是由两块规格相同且对称等距设置的预制混凝土的单墙板叠合而成,在两块所述单墙板之间设撑板钢筋支撑,叠合墙板的端头节点连接加强钢筋,待墙板吊装定位后,混凝土浇灌与叠合板中并与预制墙板形成一个整体,共同分担竖向荷载与水平力作用。而叠合式楼板由两块规格相同且对称等距设置的预制混凝土的单楼板叠合而成。两块叠合单板作为模板,并在其中配置连接、构造及受力钢筋,通过在叠合层内后浇混凝土将叠合及现浇板形成一个整体,从而共同受力。

叠合墙板及楼板中的叠合钢筋有两个重要作用:(1)作为拉接筋将两层预制混凝土部分与二次浇注夹心混凝土形成有效连接;(2)当作叠合构件的抗剪键,可有效提高结构的抗剪及整体性能。

该结构体系优势:叠合墙板及楼板的两块规格相同且对称的预制部分具有平整美观的优点;双侧预制构件的存在能有效减少了施工中大量的模板支设及钢筋作业;与此同时叠合板也不需要粉刷找平层,减少人工及装修成本;有效解决由于湿作业的砂浆找平层过厚导致墙面的空鼓以及开裂等难题。

2.4 CS 板式结构

钢丝网架聚苯乙烯芯板源自是 TID 板,是在其基础上,探索研发的一种新型轻质保温节能复合部品构件,即 CS 板。该结构体系的预制部分为 CS 承重墙板、楼板及屋面板,现浇部分为构造柱、圈梁及混凝土基础,通过装配整浇形成适合村镇建筑的住宅体系^[10]。

结构的主要受力构件为 CS 墙板。该墙板的钢筋骨架为三维空间钢丝网架,骨架中配置保温隔音材料,在保温材料的模板作用下内外浇筑细石混凝土形成 CS 板(见图 4)。三维空间钢丝网架是由其中的斜插筋将平行的两片的钢丝网构成空间骨架,钢丝的直径及间距根据构造措施来保证;聚苯乙烯泡沫板作为 CS 板的保温隔音材料;35 mm~50 mm 厚的混凝土浇注于 CS 板的内、外两侧,构成 CS 构件整体。

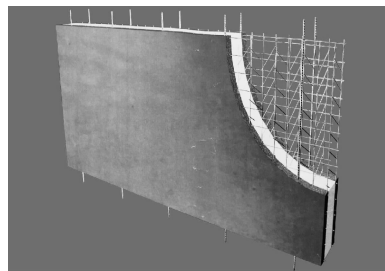


图 4 CS 板构造示意图

结合两种材料的优点,即冷拔丝的受拉性能及混凝土受压性能,在进行结构设计时,要将荷载施加到三维空间钢丝网架上。可根据冷拔钢丝直径或间距的调整、分布钢筋的添加、现浇混凝土层厚度等构造方式的处理保证承载力不足的情况。构造柱、圈梁作为 CS 结构的现浇边缘构件,能与预制的 CS 板形成整体,共同受力工作。在 PKPM 建模时,可将 CS 板等效为采用平面抗侧力结构空间协同工作模型的现浇混凝土剪力墙。

CS 板式结构体系拥有以下优点:工业化程度高,构件制作精度高、施工速度快、质量有保证。具有良好的隔声、耐火、保温性能;建筑体系住宅可根据用户的不同需求进行任意分割,提高住宅的使用效率。

2.5 EPS 模块混凝土剪力墙结构

EPS 模块混凝土剪力墙体系^[11]是将工厂标准化生产的 EPS 空腔模块经积木式错缝插接拼装成保温一体化墙体。拼接时,在模块空腔内布置受力钢筋及浇筑混凝土形成整体。其中模块内外表面具有独特的构造措施——“燕尾槽”构造,内外“燕尾槽”分别于后浇混凝土及 20 mm 后抹灰面形成强有力的机械咬合^[12]。

其中 EPS 模块是采用全自动生产线模具化生产工艺制造;模块采用高温真空成型,在模腔内完成收缩变形;模块密度高、导热等热工性能具有较大优势;矩形插接企口存在与模块的四周,装配式时,插接企口不仅能有效保证拼接严密,还能减少热桥;其次, EPS 模块特有的“燕尾槽”构造措施可与厚抹面层和混凝土形成有机咬合,杜绝外饰面层与保温层之间的开裂。

EPS 模块混凝土剪力墙体系的优势:(1)摒弃了传统的房屋建造组砌工艺, EPS 模块与剪力墙结构的组合,提高了房屋的抗震节能标准;(2)能满足标准化、工厂化、装配化、精细化的建造方式;(3)“燕尾槽”构造措施的布置能有效提高了模块墙体的

耐火、耐久及抗冲击性,实现 EPS 模块墙体保温与建筑主体同寿命的要求。

2.6 装配式承重复合墙结构体系

装配式承重复合墙结构体系(见图 5)是一种耗能减震、生态环保、节能保温、快速建造、经济实用的装配式建筑结构新体系^[13]。该结构主要由多种类型部品构件通过可靠连接技术装配整合而成。预制承重复合墙体是由预制复合墙板与现浇边缘连接构件组成的墙肢或墙段。其中,生态复合墙板中布置有可取代传统黏土砖的内填生态材料,该材料的来源要符合因地制宜、减少材料消耗、充分利用建筑废弃物等要求^[14]。根据结构构造及受力特点,装配式承重复合墙结构体系能满足多种抗力及多道抗震设计防线的思想。其理想的破坏模式为:“填充体-框格-边缘连接构件”三阶段破坏模式。在小震作用下,其结构受力特点等同于现浇混凝土剪力墙;在大震作用下,填充砌块逐渐破坏退出工作,这时结构受力等同于刚架-斜压杆计算模型,因此装配式承重复合墙体能够分阶段释放地震能量^[15]。

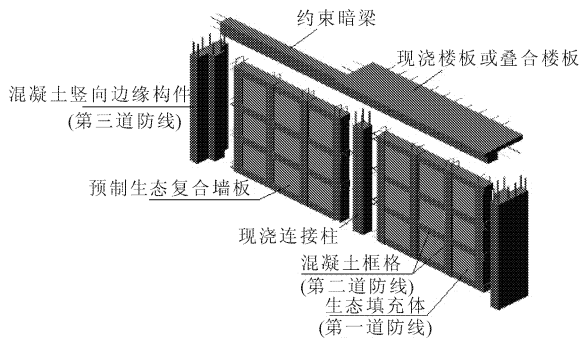


图 5 装配式承重复合墙结构体系

装配式承重复合墙结构两阶段的等效计算模型(见图 6):

当结构在弹性阶段时,该结构体系采用刚架-复合弹性板模型,在受力的弹性阶段,外框架选用混凝土杆单元、复合弹性板使用复合材料壳元进行简化处理。刚架-复合弹性板模型作为装配式复合墙结构在小震下的机构计算模型,进行结构的内力及变形计算。

当结构在弹塑性阶段时,该结构体系根据破坏特点可采用两种计算模型:(1) 可将结构等效为带塑性铰的刚架-等效斜压杆模型^[16],其中弹塑性阶段的框架依旧使用混凝土杆单元、填充材料使用斜压杆单元进行处理;(2) 将预制的生态复合墙板看作整体斜撑,外框架依旧使用混凝土单元,此时墙体模型为刚架-整体斜撑模型^[17]。刚架-等效斜压

杆模型及刚架-整体斜撑模型主要被用来分析装配式承重复合墙结构的弹塑性变形验算、时程分析等抗震性能的评价问题。

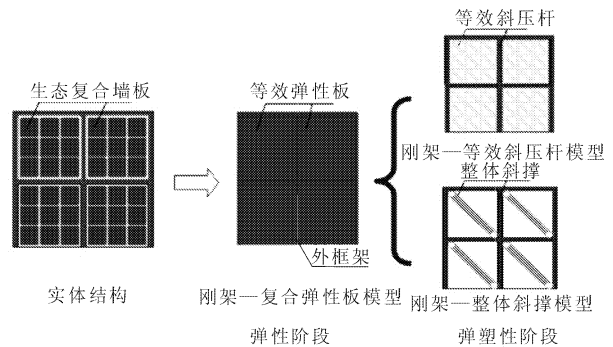


图 6 装配式承重复合墙结构弹性及弹塑性阶段的计算模型

装配式承重复合墙结构体系具有以下特点:

(1) 装配式承重复合墙结构体系的结构自重较轻,抗震性能优越。由于多道抗震防线的存在,使得结构具有良好的抗震性能,介于传统的框架与剪力墙结构之间;装配式承重复合墙体还可与叠合楼盖装配成整体结构。

(2) 装配式承重复合墙结构节能效果佳,环境效益明显。由于承重复合墙板的夹芯保温处理,使结构具有优良的保温与隔声性能;同时,结构中的填充材料的使用体现了变废为宝,节能减排的思想,该材料采用炉渣、粉煤灰等工业废料制作而成。

(3) 装配式承重复合墙结构体系建造速度快,便于建筑工业化。结构中复合墙板的设计标准化,便于工厂化预制,大大降低了现场劳动强度,转变农民工为产业化工人,加快了施工进度。

3 结 语

村镇住宅产业化发展关系到中国农民的福祉,对于改善民生与提高农民就业具有双重功效。然而当前村镇住宅建设仍属于粗放型的建造模式,在工业化和标准化方面非常薄弱。装配式村镇住宅混凝土结构体系的研究与发展一方面在源头将现代设计理念、农房风貌、房屋质量融入各个建筑部件,可以集中解决农房缺少设计、缺乏质量管控和技术落后等问题;另一方面村镇房屋的室内空间布置、采光通风、保温隔热、抗震防灾等方面性能要明显优于传统工艺建造的房屋,可满足农户对现代居住生活的需求,同时有助于农房选用节能环保的绿色建材和设备,提高农房节能环保标准,有效实现建筑节

能、节水、节地、节材和环境友好。然而,新型装配式村镇住宅混凝土结构体系的计算模型的简化与等效、整体抗震性能分析、预制装配构件的节点连接问题、施工中吊装定位技术及设计软件的开发和规范、标准及图集的编制等还需要进一步补充及改善。因此,装配式村镇住宅混凝土结构将成为新型城镇化建设过程中的关键点,也是今后推进新型城镇化建设,全面建设社会主义新农村的一种合理有效的途径,顺应可持续发展的时代潮流。

参考文献:

- [1] 刘宏,白润山.轻型钢结构住宅研究与展望[J].河北建筑工程学院学报,2016,34(3):79-81.
- [2] 吴函恒,周天华,陈军武,等.装配式钢框架-预制混凝土抗侧力墙结构受剪承载力分析[J].工程力学,2016,33(6):107-113.
- [3] 张柁.冷弯薄壁轻型钢结构房屋在陕甘山区的适宜性技术研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012:1-10.
- [4] 刘斌,郝际平,钟伟辉,等.喷涂保温材料冷弯薄壁型钢组合墙体抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2014,35(1):85-92.
- [5] 李爱群,王维,贾洪,等.预制钢筋混凝土剪力墙结构抗震性能研究进展(II):结构性能研究[J].防灾减灾学报,2013,33(6):736-742.
- [6] 陈建伟,苏幼坡.预制装配式剪力墙结构及其连接技术[J].世界地震工程,2013,29(1):38-48.
- [7] 装配式混凝土结构技术规程:JGJ 1—2014[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.

- [8] 刘继良,初明进,王刚,等.预制混凝土空心模剪力墙受弯性能试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(7):26-34.
- [9] 李志飏,陈力,金星.《叠合板式混凝土剪力墙结构技术规程(DB33/T 1120-2016)》编制说明[J].浙江建筑,2018,35(1):4-7.
- [10] 纪京喆.CS板式高层住宅结构研究[D].天津:天津大学,2013:1-8.
- [11] 曹万林,马恒,张建伟,等.不同构造EPS模块再生混凝土剪力墙抗剪性能试验研究[J].地震工程与工程振动,2015,35(4):78-84.
- [12] 苏云辉,陈宁.聚苯乙烯模块墙体空腔简易模块化装配式建筑应用[J].施工技术,2017,46(16):40-43.
- [13] 侯丽娜,黄炜,卢俊龙,等.不同内填材料生态复合墙体肋格单元试验研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4):86-90.
- [14] 黄炜,张敏,宋林,等.中高层装配式复合墙体抗震性能试验研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2016,44(1):56-63.
- [15] 黄炜,张程华,张巍,等.基于可拓识别法的生态复合墙体破坏模式判别[J].华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(1):50-56.
- [16] 张程华,邱继生,侯丕吉,等.中高层生态复合墙体正截面压弯承载力分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(2):144-150.
- [17] 黄炜,张振中,赵冬,等.几种新型工业化住宅结构体系综述[J].工业建筑,2012,42(8):121-127.

(上接第13页)

- [9] Fujikake K, Li B. Dynamic shear resistance of RC beams [C]//Proceedings of the 9th International Conference on Shock and Impact Loads on Structures, 2011:313-322.
- [10] Joško O, Akanshu S. Numerical simulation of reinforced concrete beams with different shear reinforcements under dynamic impact loads[J]. International Journal of Impact Engineering, 2011,38(12):940-950.
- [11] Adhikary S, Li B, Fujikake K. Strength and behavior in shear of reinforced concrete deep beams under dynamic loading conditions[J]. Nuclear Engineering and Design, 2013,259(6):14-28.
- [12] Fujikake K, Somraj A. Dynamic shear resistance of RC beams based on modified compression field theory[J]. Key Engineering Materials, 2016,711:799-805.
- [13] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [14] Munoz-Garcia E, Davison B, Tyas A. Structural integrity of steel connections subjected to rapid rates of loading

- [C]//Proceeding of the 2005 Structures Congress and the 2005 Forensic Engineering Symposium. New York, 2005.
- [15] Wakabayashi M, Nakamura T, Yoshida N, et al. Dynamic loading effects on the structural performance of concrete and steel materials and beams[C]//Proc., 7th World Conf. on Earthquake Engineering. Turkish National Committee on Earthquake Engineering, 1980:271-278.
- [16] Dilger W H, Koch R, Kowalczyk R. Ductility of plain and confined concrete under different strain rates[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1984,81(1):73-81.
- [17] Fib Bulletins 55 and 56. Model code 2010: first complete draft[M]. Lausanne: Switzerland, 2010.
- [18] 刘巍,徐明,陈忠范.ABAQUS混凝土损伤塑性模型参数标定及验证[J].工业建筑,2014,44(S1):167-171.
- [19] Lubliner J, Oliver J, Oller S, et al. A plastic-damage model for concrete[J]. International Journal of Solids & Structures, 1989,25(3):299-326.