

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2015.S1.013

# 预制钢筋混凝土剪力墙结构抗震性能研究综述

兰天晴, 赵少楠, 薛艺鹏, 罗顺康

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**为加快建筑工业化进程, 预制钢筋混凝土剪力墙结构近年来成为研究重点。对预制混凝土剪力墙结构抗震性能相关内容进行了回顾总结: 1) 预制剪力墙结构震害情况; 2) 国内外预制钢筋混凝土大板结构、无粘结后张拉预应力预制混凝土剪力墙结构、预制叠合剪力墙结构研究成果; 3) 预制钢筋混凝土剪力墙结构的水平接缝、竖向接缝、钢筋连接方式等研究进展。并对预制剪力墙结构国内抗震设计规范进行了简要介绍, 就装配式剪力墙结构今后研究重点与待解决问题给出了建议。

**关键词:** 预制混凝土结构; 剪力墙; 抗震性能; 建筑工业化

**中图分类号:** TU375      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2015)S1-0071-07

## Seismic performance of precast reinforced concrete shear wall: state of the art

Lan Tianqing, Zhao Shaonan, Xue Yipeng, Luo Shunkang

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** To accelerate the process of building industrialization, currently, precast reinforced concrete shear wall structure has been a heated research topic in China. This paper presents a general review of the following aspects of precast reinforced concrete shear walls: 1) performance of precast concrete shear wall structures in previous earthquakes; 2) state of the seismic behavior of precast large panel structures, unbonded post-tensioned precast concrete wall structures, superimposed slab shear wall structures; 3) state of the horizontal connection, vertical connection and reinforcement connection of precast concrete shear walls. A brief introduction is also included about seismic design code of precast shear wall structures. Suggestions and conclusions are also put forward for the further study.

**Key words:** precast concrete structure; shear wall; seismic performance; building industrialization

加快绿色建筑发展是中国当前的重要任务, 而建筑工业化则是推动绿色建筑“提质扩量”的重要途径。建筑工业化是对建筑业生产方式的变革, 指通过现代制造、运输、安装和科学管理的工业生产方式, 部分或全部代替传统建筑业中分散、低效率的手工作业方式, 实现住宅、公共建筑、工业建筑、城市基础设施等建筑物的建造<sup>[1]</sup>。目前中国多层工业与民用建筑仍大量采用现浇混凝土结构体系, 大量的手工劳动不可

避免, 现场仍需要进行支模、钢筋绑扎、连接、混凝土振捣、养护等, 不可能很好地进行工业化生产, 且工程质量难以得到可靠保证, 因此, 发展预制装配式混凝土结构是实现建筑工业化的必然选择。

目前中国的预制装配式住宅中, 预制钢筋混凝土剪力墙结构占有较大的比例, 被认为是适合我国建筑工业化、住宅产业化的一种建筑结构体系。然而与现浇结构相比, 预制混凝土结构整体性较弱, 各

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 重庆市建设科技计划(20140006)

作者简介: 兰天晴(1991-)女, 硕士生, 主要从事混凝土结构抗震研究, (E-mail)20105728@cqu.edu.cn。

构件的连接节点为薄弱部位,设计主要由地震作用控制,因而预制混凝土剪力墙结构抗震性能研究尤其重要。近年来,预制混凝土剪力墙结构抗震性能在我国成为研究热点,在整体抗震性能、剪力墙连接方式、钢筋连接技术等方面有较大进展,及时对近期研究成果加以总结十分必要。另一方面,与国外较为成熟统一的预制结构体系相比,中国的预制剪力墙结构发展还处于初期阶段,其研究少有阶段性整合与总结,更缺少全面介绍的文献专著。本文就预制混凝土剪力墙结构抗震性能相关内容进行总结,回顾了预制剪力墙震害情况,并对国内外最新预制钢筋混凝土大板结构、无粘结后张拉预应力预制混凝土剪力墙结构、预制叠合剪力墙结构及其他剪力墙结构体系的研究成果进行了总结。补充了预制钢筋混凝土剪力墙结构的水平接缝、竖向接缝、钢筋连接方式等重点部位最近研究进展,并对国内预制钢筋混凝土剪力墙抗震设计规范进行了简要概述。就装配式剪力墙结构今后研究重点与待解决问题给出了建议。

## 1 震害回顾

1976 年中国唐山 7.8 级地震中,天津、北京地区的大板建筑震害使人们对装配式大板建筑抗震性能有了首次认识。文献[2]指出若在板材选择、墙板构造、连接构造及施工质量方面加以改进,装配式大板建筑就能有较好的抗震性能。需要注意的是,此次震害中的装配式大板墙板大多为无筋构件,且大板建筑的竖向和水平接缝处出现了裂缝。但总体认为,5 层左右的装配式大板建筑对于抵抗 8 度区大震是有保证的,适宜在地震区采用。1977 年罗马尼亚发生 7.2 级地震,首都布加勒斯特 70 000 余栋预制混凝土建筑经受了地震检验,预制框架及预制大板结构建筑在地震中表现出良好的抗震性能,这些自振周期在 0.6 ~ 0.7 s 的预制结构几乎没有或很少发生破坏<sup>[3]</sup>。1988 年亚美尼亚 6.9 级地震调查对比了预制混凝土大板结构及预制混凝土框架结构在地震中的表现,其中 78 栋预制混凝土大板建筑均未发生倒塌或破坏,而发生倒塌及严重破坏的预制框架结构分别为 72 及 57 栋。震害表明,预制大板结构比预制混凝土框架结构具有更好的抗震性能<sup>[3]</sup>。1994 年 6.8 级北岭地震中暴露最大问题的为预制停车库建筑,由于墙板开口较大,坡道设计复

杂,结构跨度较大等问题使得结构破坏严重,尤其是具有大面积楼屋盖结构<sup>[4]</sup>。1995 年 6.9 级日本神户地震及 2011 年 9.0 级东北地震中,预制剪力墙结构表现良好,仅有少部分接缝处出现了裂缝及混凝土剥落<sup>[5-6]</sup>。2010 年智利 8.8 级地震中,一正在施工修建的后张拉预应力预制混凝土框-剪结构遭遇地震后完好无损<sup>[7]</sup>。从以上各次震害来看,预制钢筋混凝土剪力墙结构在许多地震地区已经得到了检验,若设计合理,并且很好地处理接缝部位的做法,预制剪力墙结构能具有与现浇剪力墙结构相同的抗震性能,可以很好地运用于实际工程中。

## 2 预制混凝土剪力墙结构体系概述

预制钢筋混凝土剪力墙结构可大致分为 3 类,即预制钢筋混凝土大板结构、无粘结后张拉预应力预制混凝土剪力墙结构、预制叠合剪力墙结构<sup>[8]</sup>。预制钢筋混凝土大板结构也常称为预制装配式剪力墙结构,是最早被广泛使用的预制剪力墙结构体系,在西欧应用普遍。大板结构通常由整块的墙板、楼板、楼梯等构件,通过装配接缝连接而成。其构件连接接缝性能对结构整体性能影响较大,整体抗震性能与现浇结构相比较差。无粘结后张拉预应力预制混凝土剪力墙结构(Un-bonded Post-tensioned Precast Concrete Wall Structure,简称 UPT 剪力墙结构),最初由美日合作预制混凝土结构抗震研究项目 PRESSS (Precast Seismic Structural System Research Program)开发,见图 1。该结构在美国广泛使用,而在中国研究应用较少。UPT 剪力墙结构利用后张拉的钢筋或钢绞线穿过预制墙板及上下墙板间的水平接缝,从而保证结构的整体性。UPT 墙体结构在地震作用下墙体可以不断“摇摆”,因而剪力墙底部损伤小,但结构耗能差。无粘结后张拉预应力钢筋在整个无粘结长度上钢筋应变均匀,使其屈服晚于有粘结预应力钢筋,且不会传递给混凝土较大的拉应力。预制叠合剪力墙结构为一种半装配式剪力墙结构体系,其基本构件为钢筋混凝土叠合墙板与楼板,以德国为代表的欧洲应用广泛。叠合剪力墙墙体一部分为预制混凝土,剩余预留空隙部分进行现浇,可分为单侧预制和双侧预制 2 种形式,见图 2。此外,近年来部分学者对其他形式剪力墙结构也进行了研究<sup>[9-11]</sup>。

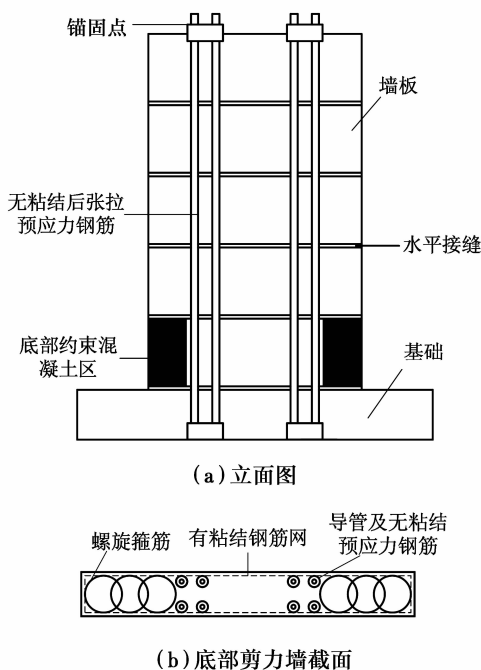


图1 无粘结后张拉预应力预制混凝土剪力墙结构

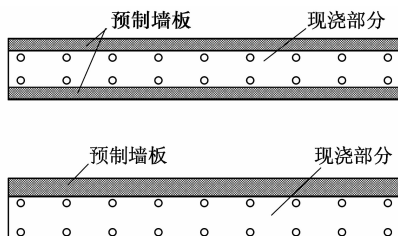


图2 预制叠合剪力墙单侧预制及双侧预制形式

### 3 预制钢筋混凝土大板结构

#### 3.1 结构整体抗震性能

朱幼麟等<sup>[12]</sup>对8层大板结构进行了水平荷载下静力和动力试验分析。该大板结构墙板水平接缝处钢筋焊接,混凝土键槽为深梯形,竖向接缝则采用带有锚环的浅梯形键槽。尹之潜等<sup>[13]</sup>对1个1/5缩尺的10层和1个1/6缩尺的14层装配式大板模型进行了振动台试验,发现主要破坏均发生在预制墙板接缝处。Clough等<sup>[14]</sup>对3个1/3缩尺3层高子结构试件进行了动力试验分析。以上研究表明预制钢筋混凝土大板结构能够满足抗震要求,揭示大板结构的破坏机理为结构发生水平接缝剪切滑移及墙体摇摆,而竖向接缝起到显著耗能作用。大板结构的水平接缝对结构的连续性及其整体性有极大影响,而提高竖向接缝耗能能力可使大板结构整体耗

能能力明显提升。

#### 3.2 水平接缝

Foerster等<sup>[15]</sup>对5种不同形式的水平接缝进行了单调剪切荷载下的试验研究,分别为仅砂浆连接的平整普通接缝、带有普通低碳钢筋的接缝、2种带有不同剪切连接器的接缝、以及齿槽形抗剪键接缝。试验结果表明,不同接缝的开裂荷载均与砂浆开裂荷载和接缝所受轴力有关,且齿槽形抗剪键接缝性能优于砂浆连接的平整普通接缝。Rizkalla等<sup>[16]</sup>对7种不同形式的水平接缝进行了单调剪切荷载下的试验研究。接缝分别为界面平整的接缝、截面为小矩形抗剪键接缝、截面为大齿槽状抗剪键接缝等。试验结果表明带抗剪键的界面接缝性能优于直线形界面接缝,并给出了接缝开裂荷载与极限荷载的计算公式。Soudki等<sup>[17-18]</sup>进行了6个含有上下墙板连接部位的试件在低周反复荷载作用下,并同时受到重力荷载作用时的试验研究。试件的水平连接均为实际工程中水平接缝类型,分别为水平界面接缝,齿槽形抗剪键接缝,带有普通低碳钢筋的接缝,及带有后张拉预应力钢筋的接缝。指出了水平接缝的受力过程为滑移前的弹性状态,接缝破坏前的弹塑性状态以及之后的滑移破坏,滑移后接缝强度的下降超过20%,且不同类型接缝的破坏均为砂浆压碎剥落。万墨林等<sup>[19]</sup>对高层大板结构接缝的强度和刚度进行了试验研究,考察了包括多因素下水平接缝总体抗剪强度和刚度、抗压强度和刚度,纯剪强度和接缝材料的粘结抗剪强度等内容。2015年,赵作周等<sup>[20]</sup>将目前水平缝截面类型总结分类为叠合粗糙面、叠合齿槽面、拼缝粗糙面、拼缝齿槽面、拼缝粗糙齿槽面等,并对预制混凝土剪力墙水平缝界面抗剪机理进行了分析解释。

#### 3.3 竖向接缝

Cholewicki等<sup>[21]</sup>针对大板结构中竖向接缝的2种不同破坏模型,即接缝处发生对角裂缝破坏与非对角裂缝破坏,提出了相应的剪切承载力公式。Pekau等<sup>[22]</sup>采用了有限滑移螺栓连接预制大板结构墙体竖向接缝,利用非线性时程分析证明这种摩擦型机械连接能较好地改善了大板结构的抗震性能。Crisafulli等<sup>[23]</sup>将一种新的竖向耗能焊接连接引入了预制剪力墙结构中。该连接由1个矩形钢板和同心圆孔组成,其作用非常类似于联肢剪力墙中的连梁。因而通过这种弱连接,墙肢被耦合作用在一起,

而能量在带孔钢板连接处得以耗散。宋国华等<sup>[24-25]</sup>对 18 个倒“T”形带有 3 齿的齿槽形接缝试件进行了低周反复加载试验,考察了有不同接合钢筋直径,不同接缝宽度试件的抗震性能。试验结果表明,竖向接缝为试件的薄弱部位,其延性随接合钢筋直径增大而增大,随接缝宽度增大而减小。指出墙板接缝主要有两种抗剪机理,即斜压杆机理与压力摩擦机理,同时对国内外剪力墙竖向齿槽式接缝的抗剪机理与抗剪承载力计算公式进行了评价总结。2012 年,刘继新等<sup>[26]</sup>进行了新型“干式”竖向连接低周反复荷载试验研究。该竖向连接为,在相邻 2 片墙体中分别埋入型钢预埋件,并利用“梳形”型钢板将预埋件焊接以形成型钢抗剪键。试验结果表明,该新型“干式”竖向连接能有效传递截面上的剪力,以保证墙体共同工作。

## 4 无粘结后张拉预应力预制混凝土剪力墙结构

Kurama 等<sup>[27-28]</sup>给出了 UPT 剪力墙结构的设计方法,并发现动力时程分析计算得到的地震作用下 UPT 剪力墙结构的水平位移大于现浇剪力墙结构水平位移。其原因为墙体损伤很小,因而表现出非线性弹性行为。基于这一结果,提出采用阻尼器降低 UPT 剪力墙结构的侧向位移。Perez 等<sup>[29]</sup>对沿竖缝设有延性连接件的 UPT 剪力墙结构抗震设计进行了探究,说明屈服过程为基底压力增加,竖缝处延性连接件屈服,墙体混凝土开裂,及最后预应力钢筋发生屈服。Marriotti 等<sup>[30]</sup>对分别设有低碳钢阻尼器、粘滞阻尼器、混合阻尼器及未设阻尼器的 4 个 UPT 剪力墙试件进行了振动台对比试验。试验结果表明,低碳钢与粘滞阻尼器混合使用比单一采用一种阻尼器对减小结构的侧向位移,增大耗能能力更有效。Erkmen 等<sup>[31]</sup>认为当预应力筋端部锚固良好时,即使最后预应力消失,结构也能够具有自恢复中心能力,并指出预应力筋的位置以及剪力墙所受到的竖向荷载对该能力没有明显影响。蔡小宁等<sup>[32]</sup>考虑到 UPT 剪力墙结构耗能能力较差,因此在剪力墙内同时采用普通钢筋与预应力钢筋连接预制墙片。试验结果表明,配制了普通钢筋的无粘结预应力混合装配式联肢墙的承载能力、耗能能力较原 UPT 剪力墙结构均有提高。2013 年吴浩和吕西林<sup>[33]</sup>总结了 UPT 剪力墙的抗侧力性能特点,并模

拟了 Perez 等人试验中的 UPT 剪力墙试件。利用纤维模型,采用 2 种方法,其一为忽略未贯穿水平接缝的竖向钢筋,并不考虑混凝土受拉以模拟水平接缝的张合;另一种则采用与水平接缝等高的素混凝土柱模拟接缝。2015 年,Rahman 等<sup>[34]</sup>采用直接位移法对 5、7、10 层 UPT 剪力墙结构进行设计,发现低矮结构的层间位移角反而比较高结构的层间位移角更接近规范中的限制。

## 5 预制叠合剪力墙结构

潘陵娣等<sup>[35]</sup>进行了 4 片单侧预制叠合剪力墙在低周反复荷载作用下的试验研究。预制部分内表面进行了不同界面处理,即喷涂表面缓凝剂和拉毛处理。试验中所有构件的暗柱及顶梁箍筋、预制现浇结合部均无异常损坏,不同界面处理的试件受力过程、破坏模式相似,各抗震性能指标试验结果相近。根据《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2002)<sup>[36]</sup>中公式所计算得到的抗剪承载力与试验结果相比偏低。叶献国等<sup>[37-38]</sup>对双侧预制叠合板在低周反复荷载下进行了试验研究及有限元分析。结果表明预制与现浇混凝土之间结合良好,未出现滑移;预制叠合剪力墙与相同试验条件下的现浇剪力墙裂缝、破坏形式及耗能能力相似;含有不同边缘约束构件的预制剪力墙试件试验结果无明显区别。蒋庆等<sup>[39]</sup>推导出了叠合剪力墙弹性刚度计算公式,并提出了正截面开裂荷载、抗弯承载力、斜截面抗剪计算公式及水平接缝受剪承载力计算公式。王滋军等<sup>[40]</sup>对钢筋混凝土水平拼接叠合剪力墙进行了抗震性能试验研究。对比了预制拼接叠合墙、预制整体叠合墙及全现浇剪力墙对比,认为 3 者受力及破坏模式基本相同,均具有较好的抗震性能。2013 年,种迅等<sup>[41]</sup>对工字型预制叠合剪力墙进行了低周反复加载试验,考察了墙体与基础间的水平接缝处受力变形性能以及横纵墙片相交处现浇 T 形边缘构件对试件破坏形式的影响。结果表明,现浇 T 形边缘构件能与墙板很好地共同作用,但由于试件截面翼缘宽度较大且试验时未加轴力,导致与现浇剪力墙相比,叠合剪力墙与基础间的水平剪切滑移变形较大,试件滞回耗能性能较差。2015 年,种迅等<sup>[42]</sup>进行了 2 个水平拼接部位采用强连接的叠合剪力墙试件的拟静力试验。试验结果表明,不同基础插筋面积试件屈服荷载相似,但峰值荷载不同,当

基础插筋面积较大时,叠合剪力墙可实现强连接,且墙体塑性部位从水平接缝处上移至墙体内部。

## 6 钢筋连接研究

姜洪斌等<sup>[43-44]</sup>对 81 个预制混凝土插入式预留孔灌浆锚固拉拔试件进行了连续拉拔试验,试件内部增加了螺旋加强箍筋,使得对混凝土的套箍作用增强,从而提高钢筋的锚固性能。试件未发生锚固破坏,最终均为外部钢筋屈服或被拉断,且试件减少 20% 锚固长度后仍未出现钢筋滑移,从而确定锚固长度可为 0.8 倍规范规定基本锚固长度。之后对内部仍设有螺旋加强箍筋的 108 个插入式预留孔灌浆钢筋搭接试件进行了单向拉伸试验,根据试验结果给出了考虑螺旋箍筋配筋量的纵筋搭接长度设计计算方法。钱稼茹等<sup>[45-46]</sup>研究了竖向钢筋分别采用墙内及地梁预埋的 U 形钢筋绑扎连接、套筒浆锚直接搭接、套筒间接搭接等连接方式,以及考虑约束构件竖向钢筋以及墙板内竖向分布钢筋是否连接等多种方案下的预制剪力墙抗震性能。结果表明 U 形钢筋绑扎连接试件发生平面错动;套筒浆锚连接或间接搭接均能有效传递竖向钢筋应力;墙板内竖向分布钢筋不连接试件承载能力及变形能力均小于分布钢筋进行连接的试件。2013 年,陈云钢等<sup>[47]</sup>考察了竖向钢筋采用浆锚搭接连接的装配式剪力墙内墙、外墙足尺试件,与现浇试件的抗震性能差异。3 个试件位移延性均满足规范延性要求,预制内墙破坏形式与现浇剪力墙相似,而预制外墙则出现墙上部弯剪破坏,下部水平接缝处两端混凝土压碎。

## 7 中国设计规范

由于中国各地预制装配式结构发展程度不同,前期各地有相应的地方规范(表 1)。2014 年中国住房和城乡建设部发布《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ1—2014)<sup>[48]</sup>代替原《装配式大板居住建筑设计和施工规程》(JGJ1—91)。同时为配合新规范,《预制混凝土剪力墙外墙板》等 9 本国家标准设计图集从 2015 年开始实施,以指导全国装配式混凝土剪力墙结构住宅的设计、构件加工及施工安装。目前规范中所设计剪力墙结构形式、接缝做法均较为单一,没有涉及无粘结后张拉预应力预制混凝土剪力墙结构,预制叠合剪力墙结构等设计计算。

表 1 我国预制混凝土剪力墙设计相关地方规程

地方	编号	规程名称
北京	DB11/1003—2013	装配式剪力墙结构设计规程 <sup>[49]</sup>
上海	DG/TJ08—2071—2010	装配整体式混凝土住宅体系设计规程 <sup>[50]</sup>
江苏	DGJ43 TJ125—2010	预制装配整体式剪力墙结构体系技术规程 <sup>[51]</sup>
黑龙江	DB23 T1400—2010	预制装配式房屋混凝土剪力墙结构技术规范 <sup>[52]</sup>
深圳	SJG18—2009	预制装配式钢筋混凝土结构技术规范 <sup>[53]</sup>
安徽	DB34 810—2008	叠合板式混凝土剪力墙结构技术规程 <sup>[54]</sup>

## 8 结 语

从早期主要针对大板结构到目前多样化的预制剪力墙结构研究,近年来中国预制钢筋混凝土剪力墙结构抗震性能研究发展迅速。然而与发达国家相比,中国预制混凝土结构研究仍有较大差距,存在以下问题。

1) 目前虽已颁布国家《装配式混凝土结构技术规程》及图集,但由于中国预制剪力墙结构各地方省发展程度不同,造成前期各地规范要求有所差别,仍有待整合。现行规范中并未涉及到“干连接”的设计方法,所提供的接缝连接方式较为单一,未能很好地吸收国内外现有研究成果,各实际工程中多以形式单一的“湿连接”为主,尚难满足工业化的实际需求。

2) 预制联肢剪力墙、预制开洞剪力墙、预制连梁的研究几乎空白。叠合剪力墙结构的研究大多为单片墙体的试验分析,缺少整体结构的抗震性能研究。

3) 中国的预制钢筋混凝土剪力墙结构抗震性能数值模拟分析研究较少,合理高效的模型仍有待研究。

4) 现浇带边框组合剪力墙结构研究应用已经较为成熟,该结构形式有双重抗震防线,具有良好的整体抗震性能。但针对于预制装配式的带边框剪力墙结构国内外研究较少,因此,可就带边框剪力墙结构的连接接缝、整体抗震性能等加以深入研究。

5) 预制剪力墙结构研究多集中在多高层结构上,很少涉及到超高层建筑,因此需要完善预制剪力墙体系,使其在能够满足中等城市多高层建筑结构

的同时也适用于大城市超高层建筑结构。

#### 参考文献:

- [1] 中国城市科学研究会. 中国城市科学研究系列报告—中国绿色建筑 2014 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [2] 《装配式大型墙板居住建筑设计、施工暂行规程》编制组. 京津地区装配式大型墙板建筑抗震调查[J]. 建筑结构, 1977, 7(1): 12-17.
- [3] Fintel M. Performance of buildings with shear walls in earthquakes of the last thirty years [J]. PCI Journal, 1995, 40(3): 62-80.
- [4] Iverson J K, Hawkins N M. Performance of precast prestressed concrete building structures during Northridge earthquake [J]. PCI Journal, 1994, 39(2): 38-55.
- [5] Ghosh S K. Observations on the performance of structures in the Kobe Earthquake of January 17, 1995 [J]. PCI Journal, 1995, 40(2): 14-22.
- [6] Sause R, Frosch R, Ghosh S K, et al. Preview of PCI's Japan earthquake reconnaissance team report [J]. PCI Journal, 2012, 57(1): 47-51.
- [7] Ghosh S K. Observations from the February 27, 2010, earthquake in Chile [J]. PCI Journal, 2012, 55(1): 52-75.
- [8] 王墩, 吕西林. 预制混凝土剪力墙结构抗震性能研究进展[J]. 结构工程师, 2010(6): 128-135.
- [9] 钱稼茹, 宋晓璐, 冯葆纯, 等. 喷涂混凝土夹心剪力墙抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2013(10): 12-23.
- [10] 朱张峰, 郭正兴. 装配式短肢剪力墙低周反复荷载试验[J]. 工程力学, 2013, 30(5): 125-130.
- [11] 初明进, 刘继良, 崔会趁, 等. 不同构造竖缝的装配式空心模板剪力墙抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014(1): 93-102.
- [12] 朱幼麟, 刘寅生, 陈芮, 等. 装配式大板房在水平荷载作用下的试验研究[J]. 建筑结构学报, 1980(2): 31-46.
- [13] 尹之潜, 朱玉莲, 杨淑文, 等. 高层装配式大板结构模拟地震试验[J]. 土木工程学报, 1996(3): 57-64.
- [14] Clough R W, Malhas F, Oliva M G. Seismic behavior of large panel precast concrete walls; analysis and experiment [J]. PCI Journal, 1989, 34(5): 42-66.
- [15] Foerster H R, Rizkalla S H, Heuvel J S. Behavior and design of shear connection for load bearing wall panel [J]. PCI Journal, 1989, 34(1): 102-119.
- [16] Rizkalla S H, Serrette R L, Heuvel J S, et al. Multiple shear key connections for precast shear wall panels [J]. PCI Journal, 1989, 34(2): 104-120.
- [17] Soudki K A, Rizkalla S H, LeBlanc B, et al. Horizontal connection for precast concrete shear walls subjected to cyclic deformations part 1: mild steel connections [J]. PCI Journal, 1995(4): 78-96.
- [18] Soudki K A, West J S, Rizkalla S H, et al. Horizontal connections for precast concrete shear wall panels under cyclic shear loading [J]. PCI Journal, 1996, 41(3): 64-80.
- [19] 万默林, 曾兵. 大板结构接缝的强度和刚度[J]. 建筑结构学报, 1986(4): 54-69.
- [20] 赵作周, 周剑, 侯建群. 装配式混凝土剪力墙结构水平缝抗剪机理及承载力计算方法综述[J]. 建筑结构, 2015(12): 40-47.
- [21] Cholewicki A. Loadbearing capacity and deformability of vertical joints in structural walls of large panel buildings [J]. Building Science, 1971, 6(7): 163-184.
- [22] Pekau O A, Hum D. Seismic response of friction jointed precast panel shear walls [J]. PCI Journal, 1991, 36(2): 56-71.
- [23] Crisafulli F J, Restrepo J I. Ductile steel connections for seismic resistant precast buildings [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2003, 7(4): 541-553.
- [24] 宋国华, 柳炳康, 王东炜. 反复荷载作用下 PBS 竖向缝抗震性能试验及理论研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(6): 18-24.
- [25] 宋国华, 王东炜, 滕海文, 等. 装配式钢筋混凝土结构竖缝抗剪承载力研究及国内外规范比较 [J]. 世界地震工程, 2005, 21(2): 125-128.
- [26] 刘继新, 李文峰, 王啸霆, 等. 新型装配整体式墙体抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 110-118.
- [27] Kurama Y C, Pessiki S, Sause R, et al. Seismic behavior and design of unbonded post-tensioned precast concrete walls [J]. PCI Journal, 1999, 44(3): 72-89.
- [28] Kurama Y C. Seismic design of unbounded post-tensioned precast concrete walls with supplemental viscous damping [J]. ACI Structural Journal, 2000, 97(4): 648-658.
- [29] Perez F J, Pessiki S, Sause R. Seismic design of unbonded post-tensioned precast concrete walls with vertical joint connectors [J]. PCI Journal, 2004, 49(1): 58-79.
- [30] Marriotti D J, Pampanin S, Palermo A, et al. Shake-table testing of hybrid post-tensioned precast wall

- system with alternative dissipating solution [C]// Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Beijing, China, 2008.
- [31] Erkmene B, Schultze A E. Self-centering behavior of unbonded, post-tensioned precast concrete shear walls [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2009, 13(7): 1047-1064.
- [32] 蔡小宁,孟少平,孙巍巍,等.无粘结预应力混合装配式联肢墙抗震性能分析[J].建筑结构,2010,40(2): 25-27.
- [33] 吴浩,吕西林.无粘结后张拉预制剪力墙抗震性能模拟分析[J].振动与冲击,2013,32(19):176-182.
- [34] Rahman M A, Sritharan S. Seismic response of precast, posttensioned concrete jointed wall systems designed for low- to midrise buildings using the direct displacement-based approach [J]. PCI Journal, 2015, 60(2): 38-56.
- [35] 潘陵娣,鲁亮,梁琳,等.预制叠合墙抗剪承载力试验分析研究[C]//第18届全国结构工程学术会议论文集II,北京:工程力学杂志社,2008.
- [36] GB50011-2002 建筑抗震设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [37] 叶献国,张丽军,王德才,等.叠合板式剪力墙的抗震性能试验分析[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2009,32(8):1219-1223.
- [38] 连星,叶献国,张丽军,等.叠合板式剪力墙的有限元分析[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2009,32(7): 1065-1068.
- [39] 蒋庆,叶献国,种迅.叠合板式剪力墙的力学计算模型[J].土木工程学报,2012(1):8-12.
- [40] 王滋军,刘伟庆,魏威,等.钢筋混凝土水平拼接叠合剪力墙抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2012(7): 147-155.
- [41] 种迅,叶献国,徐勤,等.工字形横截面叠合板式剪力墙低周反复荷载下剪切滑移机理与数值模拟分析[J].土木工程学报,2013(5):111-116.
- [42] 种迅,叶献国,蒋庆,等.水平拼缝部位采用强连接叠合板式剪力墙抗震性能研究[J].建筑结构,2015(10): 43-48.
- [43] 姜洪斌,张海顺,刘文清,等.预制混凝土插入式预留孔灌浆钢筋搭接试验[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(10):18-23.
- [44] 姜洪斌,张海顺,刘文清,等.预制混凝土结构插入式预留孔灌浆钢筋锚固性能[J].哈尔滨工业大学学报,2011,43(4):28-31.
- [45] 钱稼茹,彭媛媛,秦珩.竖向钢筋套筒浆锚连接的预制剪力墙抗震性能试验[J].建筑结构,2011,41(2):7-11.
- [46] 钱稼茹,杨新科,秦珩,等.竖向采用不同连接方法的预制钢筋混凝土剪力墙抗震性能试验[J].建筑结构学报,2011,32(6):51-59.
- [47] 陈云钢,刘家彬,郭正兴,等.装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接抗震性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(6):83-89.
- [48] JGJ1—2014 装配式混凝土结构技术规程[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [49] DB11/1003—2013 装配式剪力墙结构设计规程[S].北京:北京市规划委员会,北京市质量技术监督局.
- [50] DG/TJ08—2071—2010 装配整体式混凝土住宅体系设计规程[S].上海:上海市建筑建材业市场管理总站.
- [51] DGJ43 TJ125—2010 预制装配整体式剪力墙结构体系技术规程[S].江苏:江苏省住房和城乡建设厅.
- [52] DB23 T1400—2010 预制装配式房屋混凝土剪力墙结构技术规范[S].黑龙江:黑龙江省住房质量和城乡建设厅技术监督局.
- [53] SJG18—2009 预制装配式钢筋混凝土结构技术规范[S].深圳:深圳市住房建设局.
- [54] DB34 810—2008 叠合板式混凝土剪力墙结构技术规程[S].安徽:安徽省质量技术监督局.

(编辑 薛婧媛)