

# 装配式剪力墙结构 竖向齿槽接缝计算与设计

■ 宋国华 著

ZHUANGPEISHI  
JIANLIQIANG JIEGOU  
SHUXIANG CHICAO JIEFENG  
JISUAN YU SHEJI

ZHUANGPEISHI  
JIANLIQIANG JIEGOU  
SHUXIANG CHICAO JIEFENG  
JISUAN YU SHEJI

中国建筑工业出版社

# 装配式剪力墙结构 竖向齿槽接缝计算与设计

宋国华 著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

装配式剪力墙结构竖向齿槽接缝计算与设计/宋国华  
著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 9  
ISBN 978-7-112-18428-6

I. ①装… II. ①宋… III. ①剪力墙结构-研究  
IV. ①TU398

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 208431 号

装配式剪力墙结构竖向齿槽接缝计算与设计

宋国华 著

\*

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

廊坊市海寿印刷有限公司印刷

\*

开本: 850×1168 毫米 1/32 印张: 3 $\frac{3}{4}$  字数: 98 千字

2015 年 8 月第一版 2015 年 8 月第一次印刷

定价: 20.00 元

ISBN 978-7-112-18428-6

(27681)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书基于作者十年的科研成果著写而成。主要讲述了装配式剪力墙结构竖向齿槽接缝计算与设计计算方法，共有6章内容，研究数据充分、论据充足、观点独到。

本书适合广大建筑结构专业的师（生）和相关专业人员阅读使用。

\* \* \*

责任编辑：张伯熙

责任设计：张虹

责任校对：陈晶晶 刘梦然

## 作者简介

宋国华，女，1973年10月生，河南省滑县人，中共党员，工学博士，副教授，硕士生导师。

目前执教于郑州大学，主要研究方向为结构工程、桥梁工程受力分析。主持国家自然科学基金项目1项，河南省教育厅自然科学基金项目1项，发表论文30余篇，其中核心期刊18篇，被EI、ISTP收录4篇，参编规划教材2部。

装配式剪力墙结构双向水平抗震计算与设计

宋国华 著

中国建筑工业出版社，发行（北京西黄城根）

各大学书店、建筑书店均有

北京环北书局公司经销

廊坊市永年印刷有限公司印刷

开本：320×112毫米 1/32 印张：3.24 字数：98千字

2015年3月第一版 2015年3月第一次印刷

定价：38.00元

ISBN 978-7-112-18428-3

(27531)

版权所有 侵权必究

如有印刷质量问题，可寄本社退换

（联系电话：010-63996307）

## 前 言

保护环境、节能减排是我国的基本国策，住宅建设以及工业建设也应执行这个国策。作为符合建筑工业化生产模式的结构形式，预制装配式剪力墙结构具有众多优点，其水平接缝和竖向接缝的存在，是预制装配式剪力墙结构与现浇剪力墙结构的主要区别。接缝处结构刚度发生突变，变形不连续，易产生应力集中，故接缝的连接性能影响预制装配式剪力墙结构的整体性和抗震性能。

作者通过十余年的研究，初步得到装配式剪力墙结构竖向齿槽接缝抗剪承载力的抗震性能分析和设计计算方法，在此整理成书供读者参考。

本书共分6章：第1章绪论，主要介绍了装配式建筑的发展及抗震性能，装配式剪力墙结构的研究现状，以及装配式大板结构存在的若干问题。第2章装配式剪力墙结构接缝受力性能的研究，主要介绍接缝的受力机理和影响因素，以及国内外的有关研究成果及建议。第3章装配式剪力墙结构竖向齿槽接缝试验，介绍了课题的提出、试验的设计及进行，以及试验结果分析。将试验过程按照裂缝开展特点分为四个阶段：初裂阶段、脆裂阶段、通裂阶段和破坏阶段。并将各阶段随接缝宽度及接合筋直径的变化进行分析。第4章受力模型及建议公式的建立，对接缝在脆裂前后的抗剪机理进行分析，并分别针对接合筋和接缝混凝土提出接缝受剪承载力计算公式，进而提出接缝总的抗剪承载力计算公式。另外针对建议公式分析了影响竖向齿槽接缝受剪承载力的影响因素，从建议公式角度研究接合筋直径和接缝宽度对接缝抗剪承载力的影响。最后研究了反复荷载作用下接缝强度和刚度的退

化。第5章竖向齿槽接缝抗剪承载力统计特征研究,对接缝在脆裂前和脆裂后两种情况下的建议公式的统计特征进行研究,包括材料性能不定性、几何参数不定性和计算模式不定性,结果表明脆裂前后的建议公式都是安全可靠的。第6章竖向齿槽接缝抗剪承载力国内外规范比较,对国内外建筑规范及专家学者提出的关于装配式剪力墙结构竖向齿槽接缝的抗剪机理进行分析的基础上,比较其抗剪承载力计算公式,指出各种计算公式的可取与不足。

本书大纲的拟定和全书的统稿均由宋国华负责,各章节的撰写和编排也均由宋国华负责。本书的研究内容得到了国家自然科学基金项目(50178064)的资助,感谢国家基金委对本书研究内容的支持。本书的研究工作得到了合肥工业大学柳炳康教授和郑州大学王东炜教授的悉心指导和帮助,在此致以衷心的感谢!另外本书的编写也得到了课题组研究生的帮助,他们是吴跃辉、车德路、李明辉、刘乾,作者对他们为编写本书所做的贡献表示感谢!

由于作者水平和知识范围有限,书中不当与错误之处,敬请读者批评指正。

2015年8月

于郑州大学土木工程学院

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 装配式建筑的发展及抗震性能 .....	1
1.2 装配式剪力墙结构的研究现状 .....	4
1.3 装配式大板结构存在的若干问题 .....	10
<b>第 2 章 装配式剪力墙结构接缝受力性能的研究</b> .....	17
2.1 极限状态下接缝性能的有关研究 .....	17
2.2 接缝截面混凝土受剪机理的研究 .....	23
2.3 钢筋混凝土裂缝截面剪力传递机理的研究 .....	25
2.4 “剪切—摩擦”抗剪力 .....	28
2.5 齿槽接缝的受剪研究 .....	31
<b>第 3 章 装配式剪力墙结构竖向齿槽接缝试验</b> .....	37
3.1 课题的提出 .....	37
3.2 试验概况 .....	39
3.3 试验结果及其分析 .....	45
3.4 结论 .....	53
<b>第 4 章 受力模型及建议公式的建立</b> .....	55
4.1 脆裂前接缝的抗剪机理 .....	55
4.2 脆裂后接缝抗剪承载力的计算 .....	58
4.3 试验值与理论值的比较 .....	61
4.4 影响竖向齿槽接缝抗剪强度的因素 .....	65
4.5 从建议公式看接合筋及接缝宽度对抗剪承载力的影响 .....	69
4.6 反复荷载作用下接缝强度的退化 .....	72
4.7 反复荷载作用下接缝刚度的退化 .....	76
4.8 总结 .....	77



<b>第 5 章 竖向齿槽接缝抗剪承载力统计特征研究</b> .....	79
5.1 脆裂前建议公式的统计特征 .....	79
5.2 脆裂后建议公式的统计特征 .....	82
<b>第 6 章 竖向齿槽接缝抗剪承载力国内外规范的比较</b> .....	86
6.1 国内外研究结果 .....	86
6.2 国内外研究结果的比较 .....	88
6.3 国内外研究结果的讨论 .....	90
<b>附录 各试件裂缝发展图</b> .....	92

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 装配式建筑的发展及抗震性能

### 1. 装配式建筑的发展和应用

装配式建筑指的是构件在加工厂或施工现场预制，通过机械吊装和一定的连接手段把零散的预制构件连接成为一个整体而建造起来的建筑。

第二次世界大战之后，欧洲一些国家由于战争的破坏、战后劳动力的极度紧张，导致住房极度困难。同时，随着许多国家经济建设的不断发展、城市人口的不断增加和科学技术的不断创新，纷纷要求房屋建筑要迅速地跟上来。在建筑工程量不断增加、技术力量十分缺乏的情况下，为了加速工程进度，减轻劳动强度，发展装配式建筑、走建筑工业化的道路已成为一种必然的趋势。到 20 世纪 60 年代初期，在上述国家中，装配式建筑已成为一种主要的建筑形式，并逐渐形成了自己的建筑体系。目前，在美国、日本和罗马尼亚等国也广泛应用装配式建筑。

我国十分重视建筑工业化的发展。20 世纪的 60 年代即开始进行装配式大板建筑的试点工作，20 世纪 70 年代在全国推广该技术应用。1974 年以后着重研究解决大板体系的抗震性能和经济效益问题，形成了装配整体式的大板体系，建筑层数由 5~6 层发展到 10~18 层，并成片建设，年竣工量逐年提高。1977 年北京市采用装配式方法建筑的房屋占全市房屋建筑总数的 30%，在上海已达到 5%。1991 年我国出台建设行业标准《装配式大板居住建筑设计和施工规程》。经过几十年的发展，我国在设计标准化、构件生产工业化、施工机械化等方面做了许多努力，装配

式建筑的类型也日益增多，并在大型砌块、大型壁板、框架轻板、单层工业厂房、多层工业厂房等装配化方面取得了可贵的经验，初步形成了符合我国国情的装配式建筑形式。我国大板体系主要应用于中、低层建筑，如何在地震区发展高层大板建筑成为面临的主要课题。

保护环境、节能减排是我国的基本国策，当然住宅建设以及工业建设也应执行这个国策，特别是我国近期住房的建设量增长，居民对住房质量的期望增高，从而在住宅建设上更需要执行这个国策，建设节能省地环保型住宅。作为符合建筑工业化生产模式的结构形式，预制混凝土结构具有众多优点：节省人力、缩短工期、产品质量容易控制、施工速度快、能够减少混凝土早期收缩和温度裂缝，以及减轻或排除重体力劳动和安置固定工作地点，有效改善施工现场的环境，结构耐久性好等。因此，适应住宅产业化和建筑工业化发展的需要，预制混凝土结构有着非常广阔的发展前景。由于国情和历史的原因，我国装配式混凝土结构应用水平还较为落后。近年来，装配式混凝土结构在我国得到越来越多的关注和认可，部分省市开始了住宅产业化的试点和推广工作。一些地方标准和激励政策纷纷出台，万科企业股份有限公司、南通建筑工程总承包有限公司、上海瑞安集团、中建八局等企业在部分项目中对预制装配式混凝土结构进行了一定程度的示范和应用。然而，对装配式结构在高烈度区抗震性能的研究滞后于工程建设的快速发展，成为制约我国住宅产业化发展的一个重要因素。采用引进和自主研发相结合的方式，尽快找到适合国情和地方特点的预制装配式混凝土结构形式，并对其存在的问题加以研究和完善，从而形成与标准化、工业化相适应的生产体系，使其能够在我国抗震设防区的多高层住宅建筑中推广应用，是当前急需解决的问题。

## 2. 装配式建筑的抗震性能

众所周知，地震时结构处于重复的塑性变形状态，抗震程度取决于该结构吸收输入能量的能力。因此，结构越具有连续性和

整体性，就会有更多的塑性铰吸收能量以及更多的剪力和轴力的传递路线。而预制装配式钢筋混凝土结构恰恰在这方面存在着薄弱环节和不利因素，高层结构问题尤为突出。因为此类结构主要依赖于接缝的销键作用传递剪力。其连接构造在地震作用下的强度、刚度和延性直接关系到整体结构的可靠性。因此，高层装配式钢筋混凝土结构必须另寻构造连接途径，不应遵循低层结构连接设计思路。

《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)规定：当建筑物遭受高于本地区抗震设防烈度的罕遇地震影响时，不致倒塌或发生危及生命的严重破坏。对任何一种可靠的结构体系来说，应能预计结构的破坏过程和破坏机制，以便加强结构的关键部位和薄弱环节，注意结构的整体性，并能估计和控制塑性铰出现的部位和范围，使结构具有合理的耗能机制，这样才能提高结构的延性。此外，结构抗震设计还应有多道防线，以增强其可靠性。

目前，装配式钢筋混凝土结构虽然在工程中已大量使用并向高层建筑发展，抗震研究工作也进行了多年，但是经受地震考验的实际经验并不多。由于不确定因素太多，现行规范和计算方法都还不足以反映地震对建筑物的作用和影响，这也是目前许多专家学者强调概念设计和构造措施的主要原因。针对装配式钢筋混凝土结构水平和竖向连接的构造做法，至今仍未提出令人信服的设计准则，破坏机制难以人为控制。此外，该体系缺少多道设防抗震机制。连接部位的破坏，有可能导致整体结构丧失承载力。当发生高于基本烈度的罕遇地震时，能否确保这类建筑物不致倒塌或发生危及生命的破坏，已成为人们普遍关心的问题。

在预制混凝土结构中，框架结构和剪力墙结构是最为常用的两种结构形式。其中，前者应用更为广泛，对其所展开的研究也更为深入和常见。然而，合理设计的预制剪力墙结构抗震性能更好，强震下损伤程度更小，且更适用于开间较小、隔墙较多、结构布置较规则的住宅建筑。国内外关于预制混凝土剪力墙结构的研究最早是针对预制大板结构，即全装配式剪力墙结构，这种结

构由预制墙板和楼板通过一系列的水平和竖向拼缝连接而成。与现浇结构相比,大板结构对施工精度要求较高、整体性较差、在拼缝处易产生应力集中,变形也不连续,其抗震性能取决于拼缝连接性能。

装配式剪力墙结构抗震性能的研究是装配式剪力墙结构进入实际应用的重要保证。

## 1.2 装配式剪力墙结构的研究现状

### 1. 装配式剪力墙结构的分类

预制装配式混凝土剪力墙结构较早的形式为预制装配式钢筋混凝土墙板结构(预制装配式大板结构),20世纪60年代该结构体系在欧洲得到迅速发展,随后被中国引进。1972~1974年,我国先后试验和建成了一批装配式大板建筑。1974年以后,着重研究大板体系的抗震性能和效益问题,形成了装配整体的大板体系。它以预制装配的墙板和条板作为外墙围护结构和内墙,已广泛应用于大模板、民用框架、工业厂房和钢结构等建筑中。然而由于预制装配式大板结构体系在地震中表现不佳,其抗震性能有待进一步研究提高<sup>[1-1]</sup>。

20世纪90年代,美国和日本的预制混凝土抗震性能研究项目 PRESSS (Precast Seismic Structural System Research Program) 提出了无粘结后张拉预应力预制混凝土剪力墙结构体系(un-bounded post-tensioned precast concrete wall structure),该结构体系具有自恢复中心能力和较好的抗震能力<sup>[1-2]</sup>。预制叠合剪力墙结构是一种半装配式结构,该结构体系兼备现浇结构和装配式结构的特点<sup>[1-3]</sup>,是现浇结构向全装配式结构发展的必备阶段。其他具有新型结构形式的预制装配式剪力墙结构体系(如预制圆孔板剪力墙结构)同样具有良好的抗震性能<sup>[1-4]</sup>,该类预制装配式剪力墙结构的抗震性能正受到研究人员的关注。

半装配叠合板式剪力墙结构吸收了现浇混凝土剪力墙结构和

预制剪力墙结构的优点，与传统的全装配式剪力墙结构相比，整体性能更好，并可以允许有少量的安装误差，对现场安装精度的要求较低，因此是一种较适合我国目前国情的建筑结构体系，逐渐受到我国学者的重视。合肥工业大学<sup>[1-5,1-6]</sup>对一种由德国引进的半装配式叠合板式剪力墙结构进行了一系列的研究，这种结构是以叠合楼板和叠合墙板为主要受力构件的半装配式钢筋混凝土剪力墙结构。预制构件在现场安装就位后，设置必要的连接钢筋和受力钢筋，在预制楼板的面层、预制墙板的核心部位和剪力墙的边缘构件等部位浇筑混凝土，从而形成叠合式受力结构。

半装配式叠合板式剪力墙结构与预制大板结构都属于传统的“仿现浇”结构的范畴，其设计目的是以受力性能达到现浇结构为目标，与现浇钢筋混凝土结构相同。尽管这类结构具有较好的延性和耗能能力，但强震下往往产生较大的塑性变形和震后残余变形，结构修复困难，给业主带来较大的经济损失。

近年来，在基于性能抗震设计思想的指导下，研究者开始更加关注结构的震后恢复能力，提出了“可恢复功能结构”的概念。可恢复功能结构是指地震后不需修复或稍加修复即可恢复其使用功能的结构，常用的实现方法有：（1）通过可更换的结构构件，震后迅速恢复结构的功能；（2）通过自复位结构，震后自动恢复到正常状态，减少结构的残余变形；（3）通过摇摆墙或摇摆框架减少结构的破坏，使其在震后不需修复或稍加修复即可投入使用。在美日联合项目 PRESSS 中着重研究的通过后张拉穿过预制墙板拼缝的无粘结钢筋或钢绞线而构成的预制混凝土剪力墙结构，即属于上述第（2）种“自复位结构”的范畴。这种结构的预制构件在连接部位采用“延性连接”，即连接部位的抗弯承载力比预制构件本身低，结构在地震作用下产生摇摆（rocking）变形，塑性变形主要集中在水平拼缝处，墙体本身的破坏较小，震后修复较容易。由于预应力筋采用无粘结预应力技术，在产生较大变形时预应力筋仍能保持弹性，因此该种结构恢复能力好，震后残余变形小<sup>[1-3]</sup>。

强震后可恢复功能结构已成为可持续发展工程抗震的重要研究方向之一。采用后张预应力技术的自复位结构可以控制结构在强震下的变形与破坏,实现建筑的功能可恢复,值得我国工程抗震研究人员和技术人员学习与研究。

## 2. 装配式剪力墙结构的研究现状

1986年英国罗耐·波音特公寓大楼连续倒塌后,许多研究论文都提到缺乏结构整体性是造成连续倒塌的主要原因。结构体系如能提供充分的纵向、横向和竖向的周边连系,就能使大板结构具有抵抗连续倒塌的能力。这种体系对结构抗震性能的改善也是极为有利的。

许多国家大量的试验研究和分析工作表明:

(1) 结构的整体性取决于结构的连续特性。

(2) 连接部位不具有充分的强度,墙板的强度就不可能被充分地利用。

(3) 如果结构出现局部破坏,应保证结构具有其他的荷载传递路径,以使结构不会完全破坏。

(4) 如果能为结构提供充分的纵向、横向、竖向和周边的连系,可以使装配式大板结构具有抵抗连续倒塌的能力,并能提高结构的连续性和延性。

(5) 楼板钢筋应能锚固在圈梁内,这种锚固应是可靠的。即使中间支撑墙板丧失承载力,楼板应能悬吊在连接部位,而不应塌落。

(6) 墙板间水平接缝是影响装配式大板结构抗震性能的主要因素。

众所周知,各种结构的整体性都取决于它的连接特性。装配式结构往往由于缺乏结构整体性,从而使地震造成的或异常事故造成的局部破坏引起结构产生连续倒塌。一种结构体系在遭受不可避免的局部破坏时,必须保证结构具有补充的传力途径,以使结构不会完全破坏,这是设计必须遵守的原则。装配式墙板结构层间水平接缝是最关键部位。

图 1-1 表明了水平接缝的受力状态。其中有上层墙板传来的竖向荷载  $P_1$ ，楼板支座竖向反力  $P_2$ ，地震作用产生的水平剪力  $V_1$ ，楼板水平惯性力产生的剪力  $V_2$ ，徐变收缩和温度影响产生的约束力  $T_2$ ，楼板支座弯矩  $M$ 。处于如此复杂的受力状态，如果没有可靠的连接构造是不可想象的。连接部位如果没有充分的强度，墙板的强度就不可能被利用。从这个角度看，也要求连接构造处具有保证整体性的功能外，还应有可靠的强度保证。

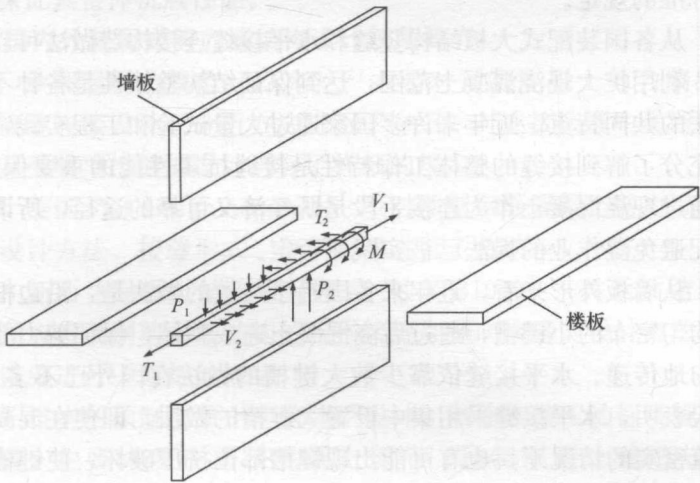


图 1-1 水平接缝受力状态示意图

摩擦抗剪原理认为：在水平接缝中，轴向荷载的抗剪作用与竖向钢筋的配置有关。如果水平接缝内没有足够的竖向配筋，轴向荷载在摩擦抗剪中的作用就没有意义了。根据国外有关试验得出的结论认为：水平接缝在反复荷载作用下，剪力摩擦强度就会降低，竖向钢筋对水平接缝内的混凝土的约束作用就会减小。在大变形状态下，钢筋在反复荷载作用下，抗剪的销栓作用就会消失，随之摩擦力也会降低。显而易见，当水平接缝上下墙板间没有足够的竖向分布筋时，水平接缝传递剪力是难以保证的。

苏联在工程中采用过多种水平接缝连接构造做法，一致的观



点认为，水平接缝构造在很大程度上决定了大板结构的抗震性能，接缝部位增加适量的后浇混凝土，且楼板不应过多地深入墙板占据水平接缝空间，缝就会有较高的抗剪能力和承受竖向荷载的能力。

我国《装配式大板居住建筑设计和施工规程》(JGJ 1—91)规定：装配式大板结构墙板上角应采用钢筋或钢板焊接连接，墙板下角可用伸出的钢筋搭接连接，焊接或搭接长度应符合现行有关标准的规定。

从各国装配式大板结构竖缝和水平接缝连接构造做法可以看出，利用扩大现浇混凝土范围，达到保证结构整体性是各种不同做法的共同特点。近年来许多国家通过大量试验和工程实践，已经充分了解到接缝的整体工作特性是接缝抗震性能的重要保证。而通过现浇混凝土作为连接手段是既经济又可靠的途径，所谓全装配避免湿作业的提法已被实践所否定。

从墙板外形来看，近年来各国趋于一致的做法是，沿边框设置均匀密布的小键槽，通过后浇混凝土连成整体，保证剪力能够均匀地传递。水平接缝依靠少数大键槽的做法在国外已不多见。试验表明，水平接缝采用集中设置大键槽的做法，即使在混凝土浇筑密实的情况下，也有可能出现键槽部位挤压破坏，使键槽的抗剪能力不能充分发挥。

Clough R W 等<sup>[1-7]</sup>、尹之潜等<sup>[1-8]</sup>进行了预制装配式钢筋混凝土墙板结构(大板结构)整体性能的振动台试验研究及数值分析。研究表明：大板结构的破坏机理为墙板之间水平接缝的剪切滑移和墙体的摇摆，竖向接缝主要起耗能作用。大板结构的破坏过程为：①装配板缝逐渐松动，底部水平板缝开裂，墙体发生有限的剪切滑移。②结构在底部裂通的水平缝以上形成一个整体质量块，沿水平通缝做摇摆振动，导致了水平通缝的抬起和闭合。

姜洪斌、陈再现等<sup>[1-9,1-10]</sup>对预制钢筋混凝土剪力墙结构进行了拟静力试验和拟动力子结构试验研究。研究表明：预制构件之间的变形能力较强，在出现可见斜裂缝之前，试验模型的刚度退