



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书
材料研究与应用著作

配筋混凝土砌块砌体结构 抗震性能研究及应用

SEISMIC PERFORMANCE
RESEARCH AND APPLICATION
OF REINFORCED
MASONRY STRUCTURES

于德湖 祝英杰 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目
“十三五”国家重点图书
材料研究与应用著作

配筋混凝土砌块砌体结构 抗震性能研究及应用

SEISMIC PERFORMANCE
RESEARCH AND APPLICATION
OF REINFORCED
MASONRY STRUCTURES

于德湖 祝英杰 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

由于配筋混凝土砌块砌体结构具有节土、节能等优点,近年来越来越广泛地应用于我国的工程建设中,并逐渐向高层、复杂形体发展。与此相应,要求我们深入研究其抗震特性并给出实用的抗震设计方法。作者多年来针对该种结构类型进行了从构件、子结构到整体结构的试验与分析工作,并自主开发了平扭耦联的配筋混凝土砌块砌体结构弹塑性地震反应分析实用计算程序 EDAPCSC。在多年研究的基础上,撰写了这部配筋混凝土砌块砌体结构方面的著作。本书可供广大工程设计人员、科研工作者和院校师生参考。

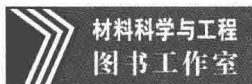
图书在版编目(CIP)数据

配筋混凝土砌块砌体结构抗震性能研究及应用/于德湖,祝英杰著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.5

ISBN 978—7—5603—6070—6

I. ①配… II. ①于… ②祝… III. ①钢筋混凝土结构—配筋砌体结构—抗震性能—研究 IV. ①TU375.04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 131133 号



材料科学与工程
图书工作室

策划编辑 许雅莹 张秀华

责任编辑 张 瑞 李长波

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451—86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司

开 本 660mm×980mm 1/16 印张 16.5 字数 260 千字

版 次 2017 年 5 月第 1 版 2017 年 5 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978—7—5603—6070—6

定 价 98.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

《材料研究与应用著作》

编写委员会

(按姓氏音序排列)

毕见强	曹传宝	程伟东	傅恒志
胡巧玲	黄龙男	贾宏葛	姜越
兰天宇	李保强	刘爱国	刘仲武
钱春香	强亮生	单丽岩	苏彦庆
谭忆秋	王铀	王超会	王雅珍
王振廷	王忠金	徐亦冬	杨玉林
叶枫	于德湖	藏雨	湛永钟
张东兴	张金升	赵九蓬	郑文忠
周玉	朱晶	祝英杰	

前 言

中国是砌体大国,同时也是一个多地震的国家。我国最早的关于地震灾害的文字记录载于《竹书纪年》:“夏帝发七年泰山震”(公元前 1831 年)。史料整理表明,我国有文字记载的地震达 8 000 余次,其中成灾者超千起。仅近几年来,我国就遭受到惨烈的汶川 8.0 级、玉树 7.1 级、芦山 7.0 级等多次破坏性地震。作为砌体结构的发展方向 and 趋势,配筋混凝土砌块砌体结构的抗震性能较传统无筋砌体结构有了长足的进步,与钢筋混凝土结构相比造价低廉,适合于中高层建筑的建造。开展对配筋混凝土砌块砌体结构的各种力学行为研究和应用,对我国新型建筑结构体系的发展具有重要意义。

本书的内容多为作者近年来发表的一些研究、学习心得,以及指导研究生的成果,并吸收了国内外同行的研究成果。本书可作为工程技术人员及高校学生的参考书。本书内容分为 4 个部分:

(1)第 1 部分:第 1 章介绍配筋混凝土砌块砌体结构的发展历程和国内外研究现状,便于读者理解该结构体系的发展和特点。

(2)第 2 部分:第 2~4 章在构件和子结构层面上介绍配筋混凝土砌块砌体结构的受力特点。第 2 章介绍了高强混凝土小型空心砌块砌体的抗压和抗剪性能试验研究,考虑了不同砂浆、不同填芯率及不同填芯混凝土强度等级的影响。第 3 章和第 4 章介绍了高强混凝土芯柱—构造柱砌块砌体墙的抗震性能试验,重点考察了墙片的高宽比、垂直压应力、纵向钢筋配筋率、芯柱和构造柱的影响。

(3)第 3 部分:第 5 章、第 6 章主要介绍作者开发的实用计算程序 EDAPCSC 以及多高层配筋砌体偏心结构弹塑性地震反应的主要影响参数。第 5 章介绍了针对配筋砌块砌体剪力墙结构,

自主开发了平扭耦联的配筋混凝土砌块砌体结构弹塑性地震反应分析实用计算程序 EDAPCSC。第 6 章主要介绍利用该程序从结构参数、地震动特性及刚度在楼层中的分配形式 3 个方面,初步讨论了其对结构弹塑性地震反应特性的影响。

(4)第 4 部分:第 7~9 章主要介绍配筋混凝土砌块砌体结构的实用抗震设计方法,并进行了振动台试验验证。第 7 章介绍了由底部剪力法结果确定偏心配筋砌块砌体剪力墙结构的各楼层设计剪力及扭矩的简化计算公式,并讨论了应用于双向偏心情况的可行性。第 8 章基于“为结构设计合理的破坏部位”的思想,给出了配筋砌块砌体剪力墙结构抗震设计的多道设防方法,并给出了具体的设计步骤、设计实例。第 9 章介绍平面不规则配筋砌体结构的地震模拟振动台试验,验证了考虑主余震的多道设防设计方法的可靠性,考察了平面不规则配筋砌体结构及其构件的地震反应特性和破坏机制。

配筋混凝土砌块砌体结构是砌体结构的发展方向,作者多年来针对该种结构类型进行了从构件、子结构到整体结构的试验与分析工作,试图深入考察其抗震性能,并提出实用的多道设防设计方法。希望本书的出版能为工程界应用该种结构体系贡献一分力量!

行文至此,作者希望将真挚的感谢之情献给那些为本书内容做出直接或间接贡献的人们(师长、同事、学生和实验室工作人员)。感谢历年来在哈尔滨工业大学土木工程系工作的老一辈教授们,他们严谨的治学精神和认真的工作态度丰富了我的学识,也为我做出了榜样。特别感谢谢礼立院士和王焕定先生对本书工作的指导和支持。感谢宋佳博士在本书振动台试验中付出的辛勤工作,感谢许卫晓博士为本书全文提供的校对工作。书中有部分内容参考了有关单位或个人的研究成果,均已在参考文献中列出,在此一并致谢。

由于作者的水平所限,如本书有说明、论证与计算等疏漏及不足之处,恳请各位读者批评指正!

于德湖 祝英杰
2016 年 9 月于青岛

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 砌体结构发展历程回顾	1
1.2 配筋砌块砌体结构国内外的研究现状	3
1.3 抗震设计中平面不规则结构及余震震害研究	9
第 2 章 高强混凝土小型空心砌块砌体基本力学性能研究	13
2.1 试件的设计及参数选择	13
2.2 抗压性能试验研究	15
2.3 抗剪强度试验研究	32
第 3 章 高强混凝土芯柱—构造柱砌块砌体墙抗震性能研究	35
3.1 试验研究	35
3.2 墙体动力特性有限元分析	63
第 4 章 高强混凝土芯柱—构造柱砌块砌体墙抗剪性能试验研究	76
4.1 墙体试件参数选择	76
4.2 墙体的破坏过程及破坏形态	78
4.3 试件之间不同参数的对比及分析	86
第 5 章 配筋砌体结构平扭耦联弹塑性地震反应时程分析方法及软件 开发	94
5.1 基本假定	94
5.2 平扭耦联运动方程	95
5.3 时程分析法简介	98
5.4 配筋砌体结构易损性的评定方法	99
5.5 计算程序开发	101

第 6 章 多高层配筋砌体偏心结构弹塑性地震反应影响参数的初步分析	111
6.1 分析结构简介	112
6.2 结构参数影响的初步分析	113
6.3 地震动影响的初步分析	116
6.4 不同刚度分配的比较	119
6.5 余震影响分析	124
第 7 章 配筋砌体均匀偏心结构地震作用计算简化方法	137
7.1 概述	137
7.2 试验设计	139
7.3 底部回归分析	146
7.4 上部各楼层处理	150
7.5 双向偏心的情况	153
第 8 章 配筋砌体结构抗震设计中的多道设防	155
8.1 概述	155
8.2 基本思想	156
8.3 设计步骤	157
8.4 设计实例与对比分析	158
8.5 与结构性态设计的关系	162
8.6 设计方法的补充说明	162
8.7 关于平面不对称及余震的考虑	165
第 9 章 平面不规则配筋砌体结构振动台试验研究	184
9.1 试验目的	184
9.2 模型设计	184
9.3 试验实施	196
9.4 模型试验结果与分析	206
参考文献	241
名词索引	250

第 1 章 绪 论

1.1 砌体结构发展历程回顾

砌体结构是由砌块和砂浆砌筑而成的墙、柱作为建筑物主要受力构件的结构形式。它包括砖结构、石结构和其他材料的砌块结构,可分为无筋砌体结构和配筋砌体结构^[1]。砌体结构历史悠久,天然石是最原始的建筑材料之一,古代大量具有纪念性的建筑物均用砖、石建造,如我国的赵州桥、大雁塔、都江堰,埃及的金字塔,君士坦丁堡的圣索菲亚大教堂,罗马斗兽场等,其中我国的赵州桥是世界上最早的敞肩式拱桥,并被美国土木工程学会选为世界第 12 个土木工程里程碑^[2]。

受砌体块料和砂浆的力学性能及砌筑工艺等影响,采用砌体结构的高层建筑物数量较少。1891 年美国芝加哥建造了一幢 17 层的砖房,底层承重墙厚度达 1.8 m。1957 年瑞士苏黎世采用强度为 58.8 MPa、空心率为 28% 的空心砖建成一幢 19 层的塔式住宅,墙厚仅 380 mm,引起了业界的高度关注。水泥的发明使砂浆强度大大提高,促进了砌体结构的发展,一些国家 20 世纪 70 年代砌块产量就接近砖的产量。国外采用砌体作为承重墙的高层房屋越来越多,1970 年在英国诺丁汉市建成一幢 14 层的房屋(内墙厚 230 mm,外墙厚 270 mm),与钢筋混凝土框架相比上部结构造价降低 7.7%。新西兰允许在地震区用配筋砌体建造 7~12 层的房屋,因为与钢筋混凝土框架填充墙相比,它们在一定范围内具有较好的适用性和经济价值^[3]。美国加州帕萨迪纳市的希尔顿饭店为 13 层混凝土砌块结构,经受圣佛南多大地震后完好无损,而毗邻的一幢 10 层钢筋混凝土结构的房屋却遭受严重破坏^[4]。近年来,国外采用高黏度黏合性高强砂浆或有机化合物树脂砂浆甚至可以对缝砌筑。

在设计理论方面,苏联是世界上最早建立砌体结构理论和设计方法的国家。20世纪40年代之后进行了较系统的试验研究,20世纪50年代苏联提出了砌体结构按极限状态设计的方法^[5]。同时欧美各国加强了对砌体结构材料的研究和生产,在砌体结构的理论研究和设计方法上取得了许多成果,推动了砌体结构的发展。20世纪60年代以来,欧美许多国家逐渐改变长期沿用的按弹性理论的容许应力设计法,英国标准协会于1978年编制了《砌体结构实施规范》,意大利砖瓦工业联合会于1980年编制了《承重砖砌体结构设计计算的建议》,均采用极限状态设计方法^[2]。

自1949年新中国成立后,我国砌体结构得到很大的发展和应用,住宅建筑、多层民用建筑大量采用砖墙承重,中小型单层工业建筑和多层轻工业建筑也常采用砖墙承重,中国传统的空斗砖墙,经过改进用作2~4层建筑的承重墙。20世纪50年代末开始,采用振动砖墙板建造的5层住宅,承重墙厚度仅为120 mm。在地震区,采取在承重砖墙转角和内外纵横墙交接处设置钢筋混凝土抗震柱(也称构造柱)及在空心砖或空心砌块孔内配置纵向钢筋和浇灌混凝土等措施,提高砌体结构的抗震性能。新中国成立以来我国砖的产量逐年增长,据统计1980年的全国年产量为1600亿块,1996年增至6200亿块,为世界其他各国砖每年产量的总和^[3]。重庆市1980~1983年新建住宅建筑面积为503万 m^2 ,其中采用砖承重的建筑占98%,7层和7层以上的建筑占50%^[6]。从20世纪90年代初期,在总结国内外配筋混凝土砌块试验研究经验的基础上,我国在配筋砌块砌体结构的配套材料、配套应用技术的研究上获得了突破性进展,中高层配筋砌块建筑具有明显的社会效益^[7]。近10年来,采用混凝土、轻骨料混凝土或加气混凝土,以及利用河砂、各种工业废料、粉煤灰等制成无热料水泥煤渣混凝土砌块或蒸压灰砂砖、粉煤灰硅酸盐砖、砌块等在我国有较大的发展^[3]。为了保护耕地,转变浪费土地资源的传统烧制方式,国务院早在1992年就下发了《关于加快墙体材料革新和推广节能建筑意见的通知》,并对全国170个大中城市提出了“禁止使用实心黏土砖时间表”,2005年又下发了《国务院办公厅关于进一步推进墙体材料革新和推广节能建筑的通知》,决定到2010年底,所有城市不再使用实心黏土砖,作为黏土砖的主要

替代材料和某些功能优于黏土砖的新型砌块的发展前景被逐渐看好。

作为砌体结构的发展方向和趋势,近年可用于建设高层建筑的配筋砌块砌体剪力墙结构体系逐渐成为砌体结构领域研究和应用的热点,该体系有很多优点,如不需要支设模板、节省人工、节省钢筋等,与传统砌体结构相比,在墙体的承载力和延性方面得到了很大提高,该体系实施多年来,已经成为一套较为成熟的结构体系。

我国是砌体大国,也是一个多地震的国家,地震区域非常广,砌体结构房屋震害通常分为3种:房屋整体式倒塌、局部倒塌以及墙体的开裂。砌体房屋整体倒塌又可分为3种类型:底层先倒,上层随之倒塌;中、上层先倒,砸塌底层;上、下层同时散碎倒塌。通常来讲,刚性楼盖房屋,上层破坏轻,下层破坏重;柔性楼盖房屋,上层破坏重,下层破坏轻。砌体结构局部倒塌通常发生在以下部位:房屋墙角部位、纵横墙连接处、房屋平面凹凸变化处等在地震时产生较大的应力集中的部位。砌体结构极易产生水平裂缝、斜裂缝及X形裂缝^[8]。

我国又是人口大国,城市用地非常紧张,不少城市迫切需要建造中高层及高层建筑,以缓解建设中用地紧张的现象。因此,发展抗震性能良好、施工方便、造价低廉、节能环保的高层和中高层配筋砌块砌体结构体系,开展对配筋砌块砌体结构的各种力学行为的研究和应用,对我国新型建筑结构体系的发展具有重要意义。

1.2 配筋砌块砌体结构国内外的研究现状

1.2.1 理论研究现状

1. 小型砌块结构中砌块墙体与钢筋混凝土之间的协同作用分析

小型砌块结构中通常会增加现浇混凝土暗梁、芯柱、构造柱,以增强结构的整体性,提高结构整体抗震能力,在进行配筋砌块砌体墙体分析时,砌块与混凝土两种不同材料之间的相互作用应该切实地在模型建立的过程

中给予考虑,这两种不同材料组成的墙体在弹性阶段和弹塑性阶段协同工作的情况将影响结构的抗震能力。由于砌体的抗剪能力较差,在砌块结构中加入配筋混凝土构件后,混凝土部分将吸收、耗散大部分地震能量,可以大大改善砌块砌体结构的抗震性能^[9]。

2. 边缘约束构件对配筋砌块砌体剪力墙的影响研究

由于配筋砌块砌体剪力墙通常带有边缘构件,在研究配筋混凝土砌块墙体时,需要考虑边缘约束构件对配筋砌块砌体剪力墙的影响,同济大学结构工程与防灾研究所的何明春和程才渊就用 ANSYS 有限元软件对带有边缘构件的配筋砌块砌体剪力墙体进行多参数分析,其中包括边缘构件截面、配筋率及墙片轴压比、高宽比等。模拟中通过对不同参数的影响研究设置多组墙体,模拟证明:边缘构件的约束效果明显,能够有效提高墙体的抗弯承载力。当墙体受到水平荷载时,边缘构件的横截面增大对墙体的刚度和抗弯承载力影响明显。同时边缘构件的配筋率对墙体的抗剪承载力影响较大,但对刚度几乎没有太大的影响,而在水平荷载作用下,墙片的高宽比和轴压比对其抗弯承载力的提高贡献较小^[10]。

3. 抗震设计中对配筋砌块砌体结构抗延性的影响因素的研究

延性是建筑抗震设计中的重要指标,北京腾远设计事务所的王墨耕等人推导出了曲率延性与轴压比的关系。经过例题演算后得到配筋砌块砌体墙体的延性特性的量化公式,量化的精度还需要更多的试验数据来修正^[11]。

4. 配筋混凝土砌块墙体受剪性能的有限元分析

在进行有限元分析时,有限元软件中所要设置的剪力传递系数、打开关闭压碎以及迭代方法都将影响模拟结果。湖南大学的刘桂秋和高文双发现当模型的剪力传递系数为 $0.1 \sim 0.5$ 时结果差别不大,而压碎选项关闭时对模拟结果偏差影响较大,所以一般均选择打开压碎选项。迭代方法中用弧长法得到的结果比 NR 法得到的结果略低^[12]。

5. 框架—配筋砌块砌体混合结构有限元分析

西安交通大学的马建勋等人对框架—配筋砌块砌体混合结构的模态和地震作用下的结构响应情况进行分析,通过模拟计算出结构墙体的固有

频率并得到墙体的前 6 阶振型。除一、四阶频率两者相近外,纯框架结构的固有频率相对要比在相同条件下框架—配筋砌块砌体混合结构的固有频率小,且混合结构的变形形式分为上、下两种,上部的配筋砌块墙体主要以弯曲变形为主,而下部的框架结构则以剪切变形为主,所以这种组合结构能够有效地控制结构上部位移,使整体刚度增加较大。从对模型施加地震作用后所得到的数据中可以看出,混合结构的水平位移要明显小于框架结构,有效地减小了顶层位移,有利于抗震^[13]。

6. 配筋砌块砌体与框架组合结构抗震性能研究

西南交通大学的孙庆洁应用有限元分析软件 MIDAS/Gen 对一实际工程进行分析,分析模型分为 3 种:原纯框架结构、用配筋砌块砌体替代框架结构填充墙结构以及在弱轴方向加设配筋砌体剪力墙—框架结构。分析 3 种结构模型在地震作用下的弹塑性,探究配筋砌块与框架结构两种结构体系组合时共同作用的抗震性能。

地震作用下,配筋砌块—框架组合结构的顶点位移以及层间位移都比纯框架结构的位移小,说明两者共同工作的抗震性能良好。如果可以合理布置配筋砌块墙体的空间位置,不仅能够增加结构的整体刚度,而且能使柱的轴压比减小,从而减小柱的截面面积,既可以增加空间的使用面积,又可以减少造价成本。由于在模态加载和常速度加载情况下,结构表现出的性能有较大不同,因此只用一种水平荷载加载不能完全反映地震作用。用配筋砌块代替框架填充墙能提高其抗震能力,但由于加大了其刚度而使柔性明显减小,对于抵抗某一范围内波长的地震作用不利。这种混合结构在罕遇地震下所表现的薄弱部位与框架结构相似,应该在结构底部加强其抗剪能力^[14]。

7. 配筋砌块砌体剪力墙结构弹塑性地震反应研究

哈尔滨工业大学的周平采用 EDAPCSC 原程序分析配筋砌块砌体剪力墙结构弹塑性地震反应研究,给出了在不同烈度下满足抗震设防要求的对称结构的最大限制高度,而对于均匀偏心结构,偏心率主要影响结构底部 3 层的抗震性能,所以 8 层以上的配筋砌块剪力墙结构要对底部 3 层采取加固措施,防止因偏心作用造成底部先破坏。偏心作用还可造成结构边

缘构件发生扭转破坏,成为结构的薄弱部位,且截面较大的边缘构件较易发生破坏,所以尽量避免在边缘处设置抗侧力构件,以防边缘构件发生破坏导致其结构承载力大大降低^[15]。

8. 混凝土小型空心砌块砌体的非线性动力分析

在进行有限元分析时,结构模型、材料的本构关系以及破坏准则的选取都对模拟的结果有很大影响。祝英杰和刘之洋教授就对此进行了理论研究,混凝土小型空心砌块砌体的应力—应变关系,与其相近尺寸的实心砖砌体相似,所以可以由砖砌体的本构关系推出砌块砌体的本构关系。在受到动力荷载作用时,可视其为各向异性材料模型,并由“等效单向应力—应变”曲线得到本构关系矩阵。而砌块砌体在不同压力下的特征体现不同,在双向受压或单向受压时,砌体结构表现出明显的非线性,而在其受双向拉—压或单向拉伸时,其并无非线性特性,所以可以视为各向同性材料;砌块砌体的灰缝黏结破坏是主要破坏类型,破坏准则主要是双向破坏准则,且剪应力主要是沿灰缝方向,这与砖砌块墙体的破坏形式很相似。文献[16]为验证其理论正确性,通过建立墙体进行有限元分析,得到混凝土小型空心砌块墙体应力—应变曲线并与相关试验曲线进行对比,验证理论的正确性。

1.2.2 试验研究现状

1. 国内试验研究方面

(1) 配筋混凝土砌块砌体开洞墙体试验研究。

长沙交通大学的杨伟军教授在砌块剪力墙方面做了大量试验工作。通过试验结果分别绘制出开裂前和开裂后的墙体滞回曲线,得到墙体的初裂荷载一般为其极限荷载的60%,初裂缝首先发生在连梁45°方向上,在水平荷载作用下,裂缝变宽扩展明显,若此时进行反向加载则以上裂缝逐渐闭合,然后在其裂缝的垂直方向上开展新的裂缝,破坏形式主要以弯曲破坏和剪切破坏为主。从试验结果可以看出,灌芯混凝土改善砌体变形性能,展现出了很好的延性。灌芯配筋混凝土砌块的性质综合了钢筋混凝土和砌块混凝土的优良性质,是具有经济性和实用性的墙体结构模式^[17]。

(2) 配筋混凝土砌块墙体抗剪拟合试验研究。

缪升教授在研究配筋砌块砌体方面也做了很多努力,包括温度裂缝影响、抗剪拟合研究等^[18]。其中在抗剪拟合试验中进行了墙体的伪静力试验,伪静力加载方式是在竖向加载的基础上,水平加载分为两个阶段:第一阶段为开裂前进行力控制加载,第二阶段为开裂后进行位移控制加载;并在此加载方式基础上设计加载步骤。通过试验得出墙体的开裂荷载与开裂位移值、极限荷载与极限位移值、破坏荷载与破坏位移值。本书根据缪升教授的试验与同济大学、哈尔滨工业大学以及湖南大学等学校试验墙体结果进行了斜截面受剪承载力拟合,并给出了拟合后的修正公式^[19,20]。

(3) 配筋混凝土砌块砌体框支剪力墙房屋的抗震性能试验研究。

施楚贤教授等人将美国 Seible 的 5 层房屋试验模型按 1/4 缩尺比例缩小,研究配筋砌块墙体在伪静力荷载作用下的弹塑性性能以及破坏机理。试验表明,该砌体结构首先在连梁处发生墙体开裂,钢筋与部分砌体的摩擦力阻碍其发生破坏,当此摩擦力不足时,即达到极限荷载,此结构具有较好的抗变形能力。而底层框架属于薄弱层,在地震发生时主要以剪切形式发生破坏,其所受的竖向压力对墙体变形也有重要影响^[21,22]。

(4) 底层框架形式配筋砌块砌体剪力墙抗震性能研究。

哈尔滨工业大学的王凤来教授长年致力于配筋砌块砌体结构的研究,进行了大量理论、试验研究和推广应用工作。他将配筋砌块砌体剪力墙体与底层框架结构相结合进行了试验研究,模型分为 3 层,第一层为框架结构,第二、三层为配筋砌块砌体剪力墙结构,研究竖向荷载作用下框架结构的变形情况、拟动力试验以及转换层托梁破坏试验,试验得出的滞回曲线为线性,说明模型在震动时仍处于弹性状态。同时对于全结构模拟试验还提出了精确模拟试验子结构界面弯矩方法,完成了三自由度的弹性拟动力试验^[23]。

2. 国外试验研究方面

国外的钢筋混凝土砌块砌体的研究比国内要早得多。早在 20 世纪 50 年代,在工程应用之前,学者们就对钢筋混凝土砌块砌体结构进行了相应的试验研究。由于砌块砌体结构的抗剪性能与砖砌体类似,较易发生剪切

破坏,所以在抗剪试验研究方面,各国学者都做了很多努力。1973年 Meli、1976年 Mayes、1977年 Priestley、1978年 Chen、1978年 Hidalgo、1986年 Tomazevic、1989年 Shing 等人都做了很多关于此方面的研究,为当时钢筋混凝土砌块砌体结构体系的研究提供了很多参考数据资料。

剪力墙墙体的高宽比直接影响配筋砌块砌体的破坏形式,Rober R. Schneider 指出:当墙体高宽比较大时,弯曲破坏是墙体所呈现的主要破坏形式,为提高其抗弯承载力,可以采取通过在墙端部增加垂直钢筋的数量等处理方式。

20世纪80年代,P. B. Shing 等人对配筋砌块砌体结构的抗震性能进行研究,其中墙体剪切破坏并没有固定的承载力公式,主要是因为影响剪切承载力的因素有很多且过于复杂。砌体在受到剪力作用下主要是纵向钢筋在受力,而水平钢筋在产生裂缝之前并不能起到受拉作用,拉力主要是砌体自身来承受,所以开裂荷载主要取决于约束条件以及砌体抗拉能力;当产生裂缝后,水平钢筋与砌块、混凝土等骨料之间的咬合将承受大部分剪力作用。与水平钢筋相比,竖直钢筋的数量则直接影响墙体的开裂强度。水平钢筋的影响虽然具有离散型,但是其对开裂后的滞回曲线影响较大。结果还表明:水平钢筋在一定程度上可以改变墙体的破坏形态^[24]。文献[25]得出以下结论:在墙体开裂前,水平钢筋不起受拉作用;而开裂后,水平钢筋与墙体的黏结作用阻碍墙体开裂,在一定程度上可以提高墙体的变形能力,使其承载力有所加强,但是墙体承载力的提高程度与水平钢筋并没有直接明确的关系,水平配筋率越高,其承载力虽有提高但不呈现无限性。

2000年以后,许多加入不同材料的混凝土砌块砌体应运而生,其中蒸压加气混凝土砌块较为常见。2001年 Y. A. Daou 制作了36个蒸压加气混凝土砌块砌体墙体,旨在研究混凝土强度、砂浆强度等不同参数下对蒸压加气混凝土砌块砌体墙体抗压强度的影响^[26]。

2005年,S. C. Miller 等人就加拿大规范所规定的配筋砌块砌体剪力墙进行验证试验,发现规范所规定较为保守,抗剪钢筋并不是影响墙体抗剪强度的决定性因素,轴压比、混凝土强度等级以及箍筋的间距均对墙体抗

剪强度承载力具有不同程度的影响。在反复循环荷载的作用下,墙体表现出具有吸收耗散能量的能力^[27]。Majid Maleki 对承受平面荷载的灌芯混凝土配筋砌块砌体结构进行受力分析,在其建立模型时则采用了一种能够将受拉硬化以及强度退化均考虑进去的弥散型裂缝层模型。经与试验值进行对比,误差均在允许范围内,模拟结果较为准确^[28]。

Salah R. Sarhat 等人对混凝土空心砌块砌体结构进行了一系列的试验研究,推出一个简单的、较为准确的经验公式预测无黏结空心混凝土砌块砌体的抗压强度^[29]。Liu Lipeng 等人则研究了双轴灌浆混凝土砌块砌体的抗压强度,各向异性的程度是影响墙体应力状态的决定性因素。当承受单方向压力时,两向应力彼此逐渐削弱,主压应力减小,即应力比增大。在平等的双轴压缩下,不同单元的优势几乎相同,可以将砌体视为各向同性^[30]。

1.3 抗震设计中平面不规则结构及余震震害研究

1.3.1 抗震设计中针对平面不规则结构的研究

1938 年美国学者 R. S. Ayre 首次发表关于地震作用下平面不规则结构的平动和扭转耦合作用的文章,说明人们开始认识结构扭转的存在,各国学者纷纷开展不规则结构的研究。Rakesh K. Goel 和 Anil K. Chopra^[31] 为了研究单层平面不对称结构的弹塑性反应,分别改变抗侧力构件的数量、位置、方向及屈服位移,研究刚度和强度对其的影响。结果表明,竖向构件的扭转刚度对体系弹塑性影响较大,质量偏心和刚度偏心对结构的弹塑性影响反应不同。X. N. Duan 和 A. M. Chandler^[32] 根据欧洲建筑抗震规范(UC8-93)、美国规范(UBC-94)和加拿大规范(NBCC-95)设计单层扭转不规则结构模型,并进行计算分析,说明偶然偏心造成的扭转反应比规范规定的偏大,提出需要考虑强度折减系数和耦联平动周期两个影响因素。Rakesh K. Goel^[33] 用能量分析方法分析不对