

加气混凝土 砌体承重墙抗震性能研究

吴会阁 凌沛春 曹秀玲 著



中国建筑工业出版社
CHINA ARCHITECTURE & BUILDING PRESS

加气混凝土砌体承重墙抗震性能研究

吴会阁 凌沛春 曹秀玲 著

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

加气混凝土砌体承重墙抗震性能研究/吴会阁, 凌沛春, 曹秀玲著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2018. 7
ISBN 978-7-112-22397-8

I. ①加… II. ①吴… ②凌… ③曹… III. ①加气混凝土-砌体结构-承重墙-抗震性能-研究 IV. ①TU528. 2
②TU227

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 128873 号

本书是土木工程学科砌体结构方面关于加气混凝土砌体墙抗震性能分析的研究专著。全书系统地介绍了不同构造措施的加气混凝土砌块砌体承重墙在低周反复荷载下的受力和变形情况, 探讨了影响加气混凝土砌块砌体承重墙抗震性能的因素等问题。全书共分 6 章, 内容包括: 绪论、试验概况、试验结果及分析、构造柱与设芯柱墙体的性能比较、应用 ABAQUS 软件的有限元模拟及验证、设芯柱加气混凝土砌块承重墙抗震性能的影响因素分析。

本书可供结构工程抗震领域的科学研究人员、土木工程设计人员、工程技术人员阅读, 也可高等院校相关专业师生提供参考。

责任编辑: 曹丹丹

责任校对: 王宇枢

加气混凝土砌体承重墙抗震性能研究

吴会阁 凌沛春 曹秀玲 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京科地亚盟排版公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 7¼ 字数: 144 千字

2019 年 2 月第一版 2019 年 2 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-22397-8

(32277)

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)

前 言

墙体材料改革和建筑节能是当前建筑业发展面临的重要课题。我国农村建筑占全国建筑面积的 60% 以上,因而农村建筑在全国建筑行业占有重要的位置。为此,结合地域特点和农村建筑的要求,选择确定加气混凝土兼作保温和承重材料建造低层建筑,用这种单一材料满足节能与结构的双向功能。加气混凝土有着保温、隔热、吸声、耐火、轻质等良好的物理性能。近年来,加气混凝土砌块在我国工程建设中的应用越来越广泛,并逐渐向保温节能与承重一体化方向发展。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。作者多年来针对此类墙体的性能进行了大量的试验与分析工作,归纳总结研究成果,撰写了这本加气混凝土砌块砌体承重墙方面的著作。

本书以砌体结构抗震理论为基础,综合运用结构力学、结构抗震设计知识,对加气混凝土砌块承重墙体考虑采用不同的构造措施,进行足尺寸墙体试件的拟静力试验,研究确定其实际的抗震性能。通过两个试点工程的应用,表明这种体系在节能保温、居住舒适、施工方便、经济合理、结构抗震等方面均可满足农村建筑的要求。

本书由吴会阁、凌沛春、曹秀玲共同撰写。全书共分为 6 章,包括绪论、试验概况、试验结果及分析、设构造柱与设芯柱墙体的性能比较、应用 ABAQUS 软件的有限元模拟及验证、设芯柱加气混凝土砌块承重墙抗震性能的影响因素分析。全书由吴会阁统稿和整理。

本书内容所开展的相关研究工作得到了河北省科技支撑计划(编号:15275430)、河北省教育厅青年基金项目(编号:QN2014020)的支持。

本书的写作和出版,得到了河北地质大学各级领导的帮助和支持,也得到了勘查技术与工程学院各位老师的热情帮助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请广大读者指正。

目 录

1 绪论	1
1.1 课题背景	1
1.2 砌体结构的发展	2
1.2.1 国内砌体结构的发展	2
1.2.2 国外砌体结构的发展	2
1.2.3 砌体结构的发展趋势	3
1.3 加气混凝土的研究与发展	4
1.3.1 加气混凝土的特点	4
1.3.2 国内外应用发展概况	5
1.3.3 国内外研究概况	6
1.4 研究目的及意义	10
1.5 研究内容	11
1.6 本章小结	12
2 试验概况	13
2.1 试件设计与制作	13
2.1.1 试件设计	13
2.1.2 试件制作	15
2.1.3 试验竖向荷载的确定	16
2.2 加载方案及平面布置图	17
2.2.1 加载装置	17
2.2.2 加载控制	18
2.3 量测方案	20
2.4 材性试验	22
2.4.1 钢筋力学性能	22
2.4.2 砂浆强度	22
2.4.3 混凝土强度	23

2.4.4	加气混凝土砌体抗压强度	23
2.4.5	加气混凝土砌体水平抗剪强度	24
2.5	试件破坏过程及现象	25
2.5.1	WJ-1 试件	25
2.5.2	WJ-2 试件	26
2.5.3	WJ-3 试件	28
2.5.4	WX-1 试件	29
2.5.5	WX-2 试件	31
2.5.6	WX-3 试件	32
2.6	本章小结	34
3	试验结果及分析	35
3.1	试验实测结果	35
3.1.1	荷载位移实测值	35
3.1.2	实测滞回曲线	36
3.2	主要试验结果分析	39
3.2.1	墙体滞回性能及破坏过程分析	39
3.2.2	试件承载力分析与对比	40
3.2.3	变形性能分析	41
3.2.4	耗能分析	44
3.2.5	刚度退化	45
3.2.6	钢筋应变的量测结果及钢筋受力分析	47
3.2.7	加载后期的承载力及变形	61
3.3	本章小结	62
3.3.1	构造柱墙体抗震性能总结	62
3.3.2	芯柱墙体抗震性能总结	63
4	设构造柱与设芯柱墙体的性能比较	64
4.1	破坏特征对比与分析	64
4.1.1	WJ-1 与 WX-1	64
4.1.2	WJ-2 与 WX-2	64
4.1.3	WJ-3 与 WX-3	64
4.2	承载力对比与分析	65

4.3	顶点水平位移对比分析	66
4.4	骨架曲线对比分析	66
4.5	滞回耗能对比分析	68
4.6	刚度退化对比分析	69
4.7	本章小结	71
5	应用 ABAQUS 软件的有限元模拟及验证	72
5.1	有限元软件 ABAQUS	72
5.1.1	有限元简介	72
5.1.2	ABAQUS 简介	73
5.2	砌体结构的有限元分析现状	73
5.3	砌体结构有限元模型的类型	74
5.3.1	分离式模型	74
5.3.2	整体式模型	74
5.4	基本假定及单元选取	75
5.5	ABAQUS 中各材料的本构模型	75
5.5.1	加气混凝土砌块墙体的本构模型	75
5.5.2	混凝土的本构模型	75
5.5.3	钢筋的本构模型	76
5.6	试件的 ABAQUS 有限元模型建立	76
5.6.1	模型中的材料参数	77
5.6.2	模型中的加载方式	77
5.6.3	砌体结构塑性准则的选取	77
5.6.4	有限元建模步骤	78
5.7	计算结果与试验的对比验证	80
5.7.1	曲线分析对比	81
5.7.2	破坏特征对比	82
5.7.3	裂缝分析对比	85
5.7.4	刚度分析对比	86
5.8	本章小结	87
6	设芯柱加气混凝土砌块承重墙抗震性能的影响因素分析	88
6.1	研究内容及研究方案	88

6.2 竖向压应力对墙体抗震性能的影响	88
6.2.1 承载力对比分析	89
6.2.2 刚度退化对比分析	91
6.3 水平配筋对墙体抗震性能的影响	92
6.3.1 承载力对比分析	92
6.3.2 刚度退化对比分析	94
6.3.3 裂缝对比分析	94
6.4 洞口宽度对墙体抗震性能的影响	95
6.4.1 窗洞宽度对墙体抗震性能的影响	95
6.4.2 门洞宽度对墙体抗震性能的影响	97
6.5 洞口位置对墙体抗震性能的影响	98
6.6 本章小结	100
参考文献	102

1 绪 论

1.1 课题背景

砌体结构系指其主要承重构件（墙、柱）的材料是由块体和砂浆砌筑而成的结构，在我国各烈度区的农村乃至中小城市的建筑中得到了长期、广泛的应用。砌体结构中砖石砌体占 95% 以上，黏土砖是砌体结构建筑的传统墙体材料，它具有造价低、便于就地取材、保温隔热性能好等优点，但制造过程中毁田烧砖的现象对农业造成了极大的影响。据有关资料显示：1949 年以来因烧制黏土砖瓦毁坏的耕地已达 14 万公顷。截至 1996 年，我国共有砖瓦企业 11 万个，占地 500 万亩（1 亩 $\approx$ 666.67m²），每年毁田都在十万亩以上，生产消耗 7000 多万吨标准煤。众所周知，我国是一个农业大国，现人均耕地不足 1.19 亩，为最大限度地保护耕地，保护生态环境，墙办发（2000）06 号文件规定，2001 年在全国 160 个大中城市限时淘汰使用实心黏土砖，2003 年 6 月 30 日后，县级及以上城市禁止使用实心黏土砖。

实施可持续发展战略是我国的一项基本国策。墙体材料革新是可持续发展战略和建筑业“节能减排”的必然要求。随着我国人口的不断增加，经济的持续快速发展，资源和环境的压力加大，要求必须从根本上淘汰包括实心黏土砖在内的落后工艺和产品，节约耕地，减少能源消耗，保护环境，大力开发和推广应用科技含量高的轻质、高强、保温、隔热、施工效率高的新型墙体材料，形成与社会可持续发展相适应的新型建筑材料产业。

随着新农村建设步伐的加快，新型墙材开始向农村市场推广。加气混凝土砌块是墙体材料改革中考虑可以替代黏土砖的一种材料，与传统的砌体材料黏土砖相比，具有自重小、造价低、保温、防火、吸声、可加工、低碳、环保等诸多方面的优点。加气混凝土砌块按照主要原料的选用不同分为粉煤灰砌块和砂砌块，以工业废料粉煤灰为主要原料的称为粉煤灰砌块，以天然材料石英砂为主要原料的称为砂砌块。以上述两种原料中的任一种为基础，采用铝粉或铝浆作为发泡剂，经高温、高压、蒸气养护，制成轻质多孔的混凝土材料。

目前，在加气混凝土砌块技术发展的同时，也逐步暴露出一系列亟待解决的问题。在一些加气混凝土技术较为发达的国家（如瑞典、法国、日本等），将加气混凝土砌块应用于墙体的住宅一般都低于 4 层，且大都位于非抗震设防区，

不存在抗震设防问题。国内外有关加气混凝土砌块砌体房屋震害的资料很少。而我国地震区域广阔, 1/3 以上国土面积列入 7 度或 7 度以上地震区。要在砌体建筑中推广加气混凝土砌块承重体系, 有效地替代黏土砖, 首先需解决的是抗震问题。

1.2 砌体结构的发展

1.2.1 国内砌体结构的发展

石材和砖是两种古老的土木工程材料, 砌体结构是一种具有悠久历史的建筑结构形式。我国早在 5000 年前就建造了石砌祭坛和石砌围墙, 殷商时代的黏土筑墙, 秦代的万里长城, 都江堰水利工程, 北魏的嵩岳寺砖塔, 隋代的安济桥, 明代的灵谷寺等闻名世界的砌体结构物, 均显示了我国砌体结构辉煌的历史和特色。

20 世纪上半叶, 我国砌体结构发展缓慢。1949 年后, 中小型砖石结构建筑物大量兴建, 砌体结构得到了迅速的发展, 取得了显著的成绩。我国已从过去用砖石建造低矮的民房, 发展到现在建造大量的多层住宅、办公楼等民用建筑和中小型单层工业厂房、多层工业厂房以及影剧院、食堂、仓库等建筑, 此外还建造各种砖石构筑物, 如烟囟、筒仓、挡土墙等。20 世纪 60 年代以来, 我国小型空心砌块和多孔砖的生产以及应用有了较大的发展, 特别是近 10 余年来, 砌块生产与砌块建筑的年递增量均在 20% 左右。

在设计理论方面, 从 20 世纪 60 年代至今, 在有关部门领导和组织下, 在全国范围内对砌体结构作了较为系统的试验研究和理论探讨, 总结了一套具有我国特色的、比较先进的砌体结构理论、计算方法和应用经验。1973 年颁布了《砖石结构设计规范》GBJ 3—1973, 这是我国第一部砖石结构设计规范; 1980—1982 年颁布了《中型砌块建筑设计与施工规程》JGJ 5—1980 和《混凝土小型砌块建筑设计与施工规程》JGJ 14—1982; 1988 年编制了《砌体结构设计规范》GBJ 3—1988, 2011 进行了全面修订, 编制了现行的《砌体结构设计规范》GB 50003—2011, 标志着我国建立了较为完整的砌体结构设计理论体系和应用体系。在建筑材料方面, 从天然石材、木、瓦、黏土砖到各种工业废料做成的砌块, 砌体材料在不断地更新和发展。

1.2.2 国外砌体结构的发展

在国外, 砌体结构也有很长的发展历史。19 世纪及以前, 砌体结构一直是占统治地位的结构形式, 古埃及金字塔、古罗马大斗兽场、巴黎圣母院等的结构

形式均为砌体结构。到了 19 世纪末,在北美,工业化推动钢铁、水泥、塑料、木材等成为新的建筑材料,同时相关设计规范和标准也得以快速发展,使得砌体结构的地位受到了很大的影响。但是,随着技术的改进,从 20 世纪下半叶开始,砌体结构重新占据了重要地位。北美推广了混凝土砌块砌体,在当时的苏联,大型砖石砌块生产量也明显增加。

砌体结构的规范化设计最早可溯源至 20 世纪的前 10 年。当时已经形成一套简单的砌体结构设计规程。然而这套设计规程缺乏必要的工程研究数据,仅仅是依靠经验建立的。在设计理论方面,1966 年美国砖体材料研究所(Brick Institute of American)首次出版发行了《砖砌体结构技术规程》,1970 年美国国家混凝土砌体研究协会(National Concrete Masonry Association)出版了《承载混凝土砌体结构标准》,1976 年出版了《混凝土砌体结构施工技术标准》,1979 年美国混凝土研究所(American Concrete Institute)出版了《混凝土砌体结构建筑规范》,进入 20 世纪 90 年代后又相继出版了一系列有关砌体结构的标准与技术规程。

1.2.3 砌体结构的发展趋势

我国是应用砌体结构的大国,尤其是中小城市和农村的基本建设中,砌体结构占有相当大的比例。长期以来砌体建筑一直采用“秦砖汉瓦”的旧模式,使用的建筑材料以砖、瓦、灰、砂、石为主,这些传统建筑材料浪费土地资源、耗能大、破坏环境,与建设能源、资源节约型社会相违背,给自然环境和社会经济带来了严重问题。加上这些传统材料自重大、砌块与砂浆黏结力差、砌体的抗拉抗剪能力低等缺点,严重制约了砌体结构的健康发展。据统计,我国的农村人口占全国总人口的 57.01%,村镇住宅建筑面积约为 240 亿平方米,占全国建筑面积的 60%以上,生活能耗占全国总能耗的 37%,其中 60%为不可再生资源。为使砌体结构的发展适应低碳社会的要求,应考虑以下几个方面:

1. 大力发展轻质、高强、低碳、环保的复合型新墙材

发展新型墙材的原则是:节能、节土、充分利用废料,保护环境,实现可持续发展。同时,要开发系列化、功能多样化的产品,提高新型建材的整体配套水平。

2. 大力发展新技术、新工艺、新设备

在施工技术上,砌体结构长期以来主要靠手工砌筑,效率低,劳动强度大,施工质量也不易保证。加强施工技术革新研究,用机械化或自动化取代手工砌筑,既可以提高生产效率,又减轻了人工的劳动强度。

3. 编制或完善相应的规范、规程,提高砌体的抗震性能

多次震害表明,要保证人民生命财产的安全,首先要解决农村砌体结构建筑

的抗震性能。目前我国的墙材革新正处于发展期，相应的规范规程还不甚完善，应在总结经验、积累资料的基础上，对现行规范进行增补及修订，为新型墙材的抗震设计提供完备的理论依据。

1.3 加气混凝土的研究与发展

1.3.1 加气混凝土的特点

加气混凝土是以钙质和硅质材料为基本组分，以铝粉为发泡剂，经配料和搅拌浇筑成型、切割及蒸压养护而成的一种多孔轻质材料。与传统的建筑材料相比，蒸压加气混凝土不以黏土为原材料，不仅不破坏耕地，而且能综合利用工业废渣、治理环境污染。此外，还有以下优点：

1. 轻质

通常所说的密度是指蒸压加气混凝土砌块的干密度。由于孔隙率达 70%~85%，大大降低了体积密度，一般为 400~900kg/m³，为普通混凝土的 1/5，黏土砖的 1/4，空心砖的 1/3，与木质差不多，能浮于水。可减轻建筑物自重，进而大幅度降低建筑物的综合造价。

2. 防火

其耐火性能远远好于普通混凝土材料。这是由于加气混凝土砌块的主要原材料大多为无机材料，因而具有良好的耐火性能，并且遇火不散发有害气体。耐火 650℃，为一级耐火材料，90mm 厚墙体耐火性能达 245min，300mm 厚墙体耐火性能达 520min。

3. 吸声

由于特有的多孔结构，因而具有一定的吸声能力，10mm 厚墙体可达到 41dB。

4. 保温

由于材料内部具有大量的气孔和微孔，因而有良好的保温隔热性能。导热系数为 0.11~0.16W/(m·K)，是黏土砖的 1/4~1/5。通常 20cm 厚加气混凝土墙的保温隔热效果，相当于 49cm 厚的普通实心黏土砖墙。

5. 抗渗

材料由许多独立的小气孔组成，吸水导湿缓慢，同体积吸水至饱和和所需时间是黏土砖的 5 倍。用于卫生间时，墙面进行界面处理后即可直接粘贴瓷砖。

6. 环保

制造、运输、使用过程无污染，可以保护耕地、节能降耗，属绿色环保建材。

7. 耐久

材料强度稳定,对试件在大气暴露1年后进行测试,强度提高了25%,10年后仍保持稳定。

8. 快捷

具有良好的可加工性,可锯、刨、钻、钉,并可用适当的粘结材料粘结,为建筑施工创造了有利的条件。

9. 经济

综合造价比采用实心黏土砖降低5%以上,并可以增大使用面积,大大提高建筑面积利用率。

当然,任何一种建筑材料都不可能十全十美,蒸压加气混凝土也有自身的缺点:强度相对较低,弹性模量较小,因此在短期荷载作用下变形较大,同时在干湿交变的情况下易破坏。

1.3.2 国内外应用发展概况

我国是生产和应用加气混凝土较早的国家之一。20世纪50年代末,国内少数单位曾试制过一批蒸压加气混凝土制品,建造了一些试验性建筑,取得了一定的经验教训。60年代引进了瑞典加气混凝土生产成套技术,在北京市加气混凝土厂建成年产量15万立方米的加气混凝土制品生产线,加气混凝土制品——砌块、屋面板、楼板、墙板、保温板和保温块等大量用在工业及民用建筑中,推动了建材工业的技术进步,促进了国内轻质建材的发展。此后,在天津、上海、南京等地,相继建成100多条生产线。20世纪90年代以来,国内生产厂家又陆续引进了德国先进的生产技术和设备,使得加气混凝土砌块产品的性能有了明显改善,强度有了较大提高。国外技术和设备的引进进一步促进了我国加气混凝土工业的发展,加快了我国加气混凝土技术进步步伐。目前,29个省市已有大大小小的生产企业370多家,年生产能力达到2000万立方米,而且还有较大的发展空间。但我国所生产的传统加气混凝土砌块由于受到原料和生产工艺的限制,砌块强度偏低(目前国内生产的加气混凝土的最高强度级别为A10.0),这使得应用范围受到了很大的限制,主要集中在非/低抗震区的填充墙、围护墙等非承重墙体上,很少用于承重。如果能采取有效的措施将加气混凝土砌块用于承重多层砌体结构中兼作保温和承重材料,建造低层建筑,用这种单一材料满足节能与结构的双向功能,将产生良好的社会效益和经济效益。

加气混凝土的发源地是欧洲,将加气混凝土承重砌块最早应用到住宅体系上的国家是欧洲的瑞典和德国。在这些国家,加气混凝土主要应用在4层以下住宅、公寓以及一些公共设施中。1923年瑞典人埃克森取得了以铝粉为发气剂工业化生产加气混凝土的专利,1929年开始工业化生产加气混凝土制品。第二次

世界大战前,加气混凝土的生产地主要集中在瑞典、波兰、芬兰,年总产量不超过 100 万立方米。第二次世界大战后,很多国家相继引进加气混凝土生产技术,加气混凝土工业得到了很大的发展,至今已有 50 多个国家和地区在生产和应用加气混凝土制品,年产量 4500~5000 万立方米,其中德国是加气混凝土的技术中心。在德国,加气混凝土被称为“两性建筑材料”,具有满足建筑力学要求和建筑物理要求的双重性能。日本在加气混凝土板材的花纹加工、图案设计方面位居世界领先水平。在一些发达国家,由于加气混凝土的研制和应用较早,技术已趋于成熟,加气混凝土制品在墙体材料的产量中所占比例已达到了 40%。

1.3.3 国内外研究概况

从 20 世纪 70 年代起,由清华大学土木系、北京建筑设计研究院、北京加气混凝土厂、东北建筑设计院组成的北京加气混凝土制品应用研究组对加气混凝土材性、配筋加气混凝土板、加气混凝土砌体等进行了系统的研究。

20 世纪 80 年代后,清华大学、浙江大学、同济大学、天津大学等高校和中国建筑东北设计研究院等科研院所对加气混凝土的物理和力学性能、砌块墙体和砌块房屋的抗震性能进行了初步的探讨。

清华大学对矿渣砂加气混凝土砌块、砌体的应力-应变全曲线进行了试验研究,得知由于矿渣砂加气混凝土的多孔性,其在最大应力强度时的变形较小,后期的变形较大。陈志鸥、宝志雯、王宗纲利用脉动试验的方法,对北京农业大学 12 层科研楼和新华通讯社黄亭子 12 层宿舍楼进行了动力特性的现场试验量测。试验结论认为:加气混凝土填充的高层建筑,由于其自重减轻,对减小地震反应是有利的;由于加气混凝土材料的内阻大,所得到结构第二阶振型的阻尼比大,对抗震是有利的。

浙江大学对粉煤灰加气混凝土的物理力学性能进行了研究。钱晓倩对材料的抗拉强度及轴拉应力-应变曲线进行了研究;姚谏等对 72 个加气混凝土砌体试件的轴心抗压承载力进行了试验,分析了轴心压力下粉煤灰加气混凝土砌体构件的工作性能、破坏特征及砂浆强度的影响,确定了砌体组成材料(砌块和砂浆)的本构关系。研究表明:轴压构件的破坏属典型的脆性破坏,高厚比较小的构件在整个加载过程中全截面受压,破坏时构件侧移较小。

同济大学程才渊、吴明舜等对采用专用胶粘剂砌筑的伊通砂加气混凝土砌体进行了轴压、偏压、弯曲抗拉和通缝抗剪的基本力学性能试验,对不同构造措施的伊通砌体墙在垂直荷载和水平反复荷载作用下进行了抗震性能试验。对基本力学性能的研究表明:采用专用胶粘剂砌筑的伊通砌体对砌块抗压强度的利用率较高,不同等级砌块砌体的抗剪通缝试验的破坏形态有所不同,砌块的强度越高,砌体的抗剪强度也越高。对墙体抗震性能试验的研究表明:在墙体内设置的构造

柱使墙体承载力提高了 50% 以上, 极限位移提高了 3 倍以上; 李国强、方明霁、陆烨对一个钢结构建筑轻质砂加气混凝土外墙板和砌块填充墙的足尺模型进行了振动台试验, 试验表明钢结构建筑轻质砂加气混凝土外墙板和砌体填充墙具有较好的抗震性能, 填充墙砌块本身强度足以抵抗地震荷载, 但是随着地震烈度的加大, 墙上窗洞口周围是裂缝发展的集中位置, 属于薄弱环节; 李友庆、程才渊对 7 块伊通轻质砂加气混凝土板进行了抗弯试验, 试验表明: 板的开裂荷载和开裂挠度与截面高度、纵向钢筋配筋率、跨度都有关, 增加试验板的厚度对提高抗弯强度和抗弯刚度有明显的作用; 田海、陈以一对蒸压轻质加气混凝土 (ALC) 拼合墙板进行了 4 个界面纯剪试验、6 个拼合墙板面内单调剪切试验以及 1 个墙板和钢框架协同工作的单调以及反复加载试验, 试验结果表明: 影响墙板自身剪切性能的主要因素为拼合界面的粘结性能、连接工法的钩头螺栓布置方式、墙板和灌浆的材性, 试验全程钩头螺栓连接完好; 桂苗苗通过对粉煤灰蒸压加气混凝土材料在不同含水状态下的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度的试验研究, 分析了不同含水率对砌块抗压强度和劈裂抗拉强度的影响。结果表明: 随着含水率的增大, 粉煤灰蒸压加气混凝土砌块的抗压强度和劈裂抗拉强度不断降低并逐渐趋于稳定; 金勇、程才渊对 4 种连接件不同尺寸和厚度的 38 块蒸压加气混凝土墙板进行了墙板连接节点性能研究。试验发现: 不同的连接节点破坏形式各有差异, 但随着板厚增加, 节点的极限承载力增加。合适的钢筋保护层厚度和焊接良好的纵横钢筋网, 有助于提高节点的极限承载力。

中国建筑东北设计研究院高连玉等对加气混凝土砌块的抗压、抗剪性能及采用普通砂浆和专用砂浆砌筑的缩尺砌体墙进行了抗震性能的研究, 提出了适合于此类墙体的行之有效的构造措施。研究表明: 专用砂浆墙体比普通砂浆墙体的承载力提高了 8%。同时, 对 6 片蒸压粉煤灰砖和 2 片加气混凝土砌块墙体进行了水平低周反复加载试验。研究表明: DY-1 专用砂浆砌筑的蒸压粉煤灰砖砌体的抗侧力性能基本与普通黏土砖砌体相同, 但考虑到无筋墙体的剪切斜裂缝集中, 变形能力差, 耗能能力低, 因此, 建议在设计施工中也可参照黏土砖配筋墙体的有关规定处理。

2004 年起, 天津大学用缩尺模型对不同构造措施下的加气混凝土砌体承重墙进行了一系列研究。赵彤、赵全斌对设构造柱和混凝土水平配筋条带的加气混凝土承重墙的抗震性能进行了研究, 研究发现: 构造柱、混凝土水平配筋条带等构造措施, 使墙体的开裂荷载和极限荷载及延性均有了一定程度的提高。在墙体进入荷载下降阶段后, 即使主裂缝贯通, 由于构造柱的框架作用, 墙体也不会很快地失去承载力, 仍能继续承受 50% 的极限荷载。适当减少构造柱的间距或增加构造柱的数量将能更有效地发挥加气混凝土砌块墙体的抗震承载力。混凝土水平配筋条带在承受水平荷载的过程中, 起到了限制裂缝和提高延性的作用, 增加

条带的数目和增大条带的高度,会提高墙体的延性;赵彤、李敬明通过 6 片 1/2 缩尺试件 AAC 砌块墙体进行水平低周反复加载试验,研究了高宽比和竖向压应力对加气混凝土承重墙体的破坏形式、抗剪强度及变形的影响。研究表明:砌块墙体的破坏形态属于剪切破坏模式,裂缝主要为砌块裂缝,试件破坏时以对角线交叉斜裂缝为主。高宽比较大的墙体、竖向压应力比较大的墙体,出现的竖向裂缝比较多,具有一定的斜压破坏性质。在高宽比相同的情况下,当水平位移相同时,竖向压应力大的墙体刚度比较大。减小高宽比或增大竖向压应力对墙体的抗震抗剪强度有提高,但对墙体的延性有所降低。减小竖向压应力可以提高墙体的延性,但高宽比对延性的影响不大;赵彤、蒋伟通过 5 片 1/2 缩尺试件加气混凝土砌块墙体单元的水平低周反复荷载试验,研究了不同设置位置的加气混凝土构造柱墙体的抗震性能,并与黏土砖墙体进行了对比,结果表明:墙体开裂以后,黏土砖墙体的刚度下降程度比蒸压加气混凝土砌块墙体快很多。加气混凝土砌块墙体开裂较早,开裂荷载比黏土砖墙体低得多,但抗倒塌能力与黏土砖相当,说明其延性优于黏土砖墙体;姚谦峰、颜雪洲对加气混凝土砌块进行了力学性能试验,得出了单轴受压的应力-应变全曲线,并总结了应力-应变的全曲线方程;田淑明、于敬海等用 ANSYS 对加气混凝土承重开洞墙体的抗震性能进行了有限元分析,主要研究了开窗洞墙体在水平配筋方案和混凝土水平配筋条带方案下的破坏特征,并对墙体在不同竖向力作用下两种构造方案的抗震性能进行了比较。研究表明:在竖向正应力很小时,采用混凝土配筋条带方案更能提高墙体的整体刚度。在较大的竖向压力下,两种构造方案的效果大致相同;李久鹏、于敬海对 3 组灰砂加气混凝土试块进行了轴心抗压试验,得出了试块的应力-应变关系,并总结了上升段的曲线方程;刘雪梅对蒸压加气混凝土承重砌体力学性能进行了试验研究,包括含水率与立方体抗压强度的关系研究、轴心抗压强度试验、应力-应变全曲线以及劈裂抗拉强度等方面的试验研究。试验结果表明:含水率越高,材料的强度越低,但相比矿渣砂加气混凝土,灰砂加气混凝土的强度受含水率的影响较小。砌块的峰值应变在 $1700 \sim 3000 \epsilon$ 范围内,材料的弹性模量较小;费添慧对 3 片 AAC 承重墙体在不同正应力作用下进行了抗震抗剪性能试验。研究表明:竖向压应力比较大的墙体,出现的竖向裂缝比较多,具有一定的斜压破坏性质。增加竖向压应力可以提高墙体的开裂抗剪强度和极限抗剪强度,但随着竖向压应力的增大,墙体的延性降低,墙体的变形能力和能量耗散系数有所增加。墙体在开裂前的刚度差别比较大,在开裂后的刚度差别比较小。当水平位移相同时,竖向压应力大者刚度比较大。墙体的水平变形进一步表现了墙体的破坏形态属于剪切破坏模式,且此种墙体在后期的残余变形较大。

天津城市建设学院的吴东云、何向玲等,对强度等级相同而构造形式不同的粉煤灰加气混凝土砌块砌体进行抗压、抗剪性能试验,研究了不同构造形式粉煤

灰加气混凝土砌块砌体的基本力学性能和破坏特征。通过研究 3 组共 9 个抗压试件及 3 组共 9 个砌体抗剪试件, 结果表明: 开槽砌块砌体有利于推迟裂缝的出现, 破坏荷载值也有所提高, 方槽比圆槽提高砌体抗压性能效果略好, 圆槽砌块比方槽砌块更有利于砌体抗剪。此外, 他们还对 7 片 5 皮高的粉煤灰加气混凝土砌块墙体进行了抗剪试验, 研究了强度等级相同而外形不同的粉煤灰加气混凝土砌块砌筑的配筋墙体、无筋墙体的抗剪性能及其破坏特征, 为粉煤灰加气混凝土砌块作为承重墙体材料的应用提供试验依据。研究表明: 钢筋网的铺设, 使砂浆与砌块的黏结力加大, 提高了整体协同工作力, 提高了墙片的抗剪承载力及延性; 通过在砌块上开圆、方槽, 增强砂浆与砌块的结合力, 提高了墙片的整体工作性能, 使墙体的抗剪承载力得到极大提高, 且不低于配筋砌体, 属典型的墙体剪切破坏。但延性略低, 裂缝发展快, 属脆性破坏。

东北农业大学马铝臣在加气混凝土三点弯曲加载梁试件不同初始裂纹相对长度情况下, 对荷载-裂纹口张开位移-初始裂纹尖端张开位移-初始裂纹尖端韧带沿直线方向若干测点张开位移全曲线进行了系统研究。结果表明: 在全曲线下降段沿初始裂纹及其韧带直线方向张开位移呈线性分布; 平均裂纹张开角与裂纹口张开位移呈线性关系, 且该关系不决定于初始裂纹相对长度; 在载荷水平一定、初始裂纹相对长度较小时, 平均裂纹张开角较小, 断裂过程区长度较大。

沈阳建筑大学赵成文、刘雅楠、周培厚等对 5 组 (共 30 块) 不同砌筑方式蒸压加气混凝土砌块砌体进行抗压强度研究。结果表明: 蒸压加气混凝土砌体开裂后还可以承受一定的压力, 延性较好; 蒸压加气混凝土砌体对砌块的抗压强度利用率较高, 轴心受压砌体的抗压强度为砌块抗压强度的 70% 左右; 在灰缝中配钢筋和纤维能显著提高抗压砌体的开裂强度, 延缓抗压砌体开裂, 提高其延性; 蒸压加气混凝土承重砌块砌体的强度与传统承重砌体的强度水平相当, 完全可以用于多层住宅房屋的承重结构。

天津大学建筑设计规划研究总院于敬海等对 6 片不同竖向压力值的蒸压加气混凝土砌块墙体使用 ANSYS 软件进行了分析, 分析认为: 蒸压加气混凝土砌块墙的破坏可分为受拉破坏和受压破坏, 同时还在考虑已有的砌体抗剪强度理论的基础上提出了受拉破坏时考虑竖向正应力和高宽比影响的抗震抗剪强度简化计算公式。

吉林建筑工程学院王洪杰、胡洪亮研究了加入纤维对粉煤灰蒸压加气混凝土的开裂影响。研究表明: 纤维的加入明显改善加气混凝土的开裂性能, 但纤维的掺量不能过大, 应控制在 0.3% 以内, 否则会影响其和易性; 纤维在加气混凝土中形成的乱向支撑体系可以使孔结构得到有效改善。

吉林建筑工程学院巴盼锋等通过有限元软件 ANSYS 对不同竖向承载力和不同构造措施 5 片加气混凝土单片墙体进行了分析, 结果表明: 增设构造柱和水平钢筋带等措施能够明显提高竖向承载力。