

文章编号:1673-2049(2012)04-0044-09

# 加气混凝土砌块墙力学性能研究现状与展望

郭 猛<sup>1</sup>, 徐 健<sup>2</sup>, 徐福泉<sup>1</sup>, 杜德杰<sup>1</sup>

(1. 中国建筑科学研究院, 北京 100013; 2. 中国葛洲坝集团国际工程有限公司, 北京 100022)

**摘要:**依据中国加气混凝土砌块墙体试验研究资料,围绕墙体的构造特点、竖向受力性能和抗剪抗震性能,综述了无筋加气混凝土砌块墙、约束加气混凝土砌块墙和 RC-加气混凝土砌块组合墙的研究进展,并对 3 类墙体的主要力学性能进行了总结;在此基础上,对加气混凝土砌块墙的研究方向进行了展望。

**关键词:**加气混凝土砌块墙;约束加气混凝土砌块墙;RC-加气混凝土砌块组合墙;力学性能  
**中图分类号:**TU317 **文献标志码:**A

## Research Status and Prospect in Mechanical Properties of Aerated Concrete Block Wall

GUO Meng<sup>1</sup>, XU Jian<sup>2</sup>, XU Fu-quan<sup>1</sup>, DU De-jie<sup>1</sup>

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. China Gezhouba Group Corporation International Ltd., Beijing 100022, China)

**Abstract:** On the basis of experiment data of aerated concrete block wall, focusing on the structural characteristics, vertical force performance, shear and seismic performance, the research status in unreinforced aerated concrete block wall, confined aerated concrete block wall and RC-aerated concrete block composite wall was reviewed, and the main mechanical properties of the three types of walls were summarized. On this basis, the research directions about aerated concrete block wall were discussed.

**Key words:** aerated concrete block wall; confined aerated concrete block wall; RC-aerated concrete block composite wall; mechanical property

## 0 引 言

现阶段,中国建筑墙体材料中烧结粘土砖的使用量仍占有相当大的比例,尤其是在广大中小城市和村镇地区,民用住宅类建筑粘土砖使用量约占墙体材料总量的 80% 以上。粘土砖在生产和使用过程中消耗大量的土地、煤炭和石油等自然资源,环境污染严重。随着中国对保护环境和降低建筑能耗的日益重视,以生态环保型墙体材料取代粘土砖是墙体材料改革发展的必然趋势。

蒸压加气混凝土砌块是以硅质和钙质材料为主要原材料,以铝粉为发气剂,经加水搅拌、浇筑成型、蒸压养护等工艺过程制作而成的具有一定强度的砌块<sup>[1]</sup>;由发气剂引入气泡产生的微小气孔是加气混凝土砌块的主要组成部分,孔隙率可达 70%~80%,常见重度为 3~10 kN·m<sup>-3</sup>。加气混凝土砌块相对于粘土砖而言具有轻质保温、节能环保等优点,是一种理想的新型墙体材料。早在 20 世纪 50 年代初期,中国即开始进行加气混凝土砌块的生产 and 研究工作,较为系统的研究工作集中于 20 世纪

收稿日期:2012-04-10

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAJ04A03-04)

作者简介:郭 猛(1982-),男,内蒙古赤峰人,助理研究员,工学博士,E-mail:guomeng673@163.com。

80 年代初,清华大学、中国建筑东北设计研究院等对加气混凝土的力学性能、砌块墙体及砌体房屋抗震性能等进行了试验与理论研究,并进行了加气混凝土砌块墙结构房屋的试点建设。但之后的近 20 年时间里中国却并未对加气混凝土砌块的研究工作给予足够的重视,以至于研究工作实际上是处于一种缓慢发展的状态。加气混凝土砌块墙虽然广泛应用于各种类型非承重填充墙,但似乎又仅仅局限于填充墙,中国广大村镇地区的低层、多层房屋住宅结构仍以砖砌体结构为主。进入 21 世纪,随着低碳建筑的兴起,人们愈来愈重视新型墙体材料的研究工作,相应地,对于加气混凝土砌块及加气混凝土砌块墙的研究也给予了较多科研力量的投入,取得了一定的研究成果,并制定了行业标准与技术规范。

根据加气混凝土砌块墙的不同构造特点和适用范围,本文中笔者将其分为无筋加气混凝土砌块墙、约束加气混凝土砌块墙、RC-加气混凝土砌块组合墙 3 种类型墙体。结合近年来中国加气混凝土砌块墙试验研究资料,在墙体力学性能方面选取若干关注的问题,对上述 3 种类型墙体的研究进展进行了总结和评述;在此基础上,对加气混凝土砌块墙体的研究方向进行展望。

# 1 无筋加气混凝土砌块墙

无筋加气混凝土砌块墙是指由加气混凝土砌块和砂浆砌筑而成的非承重素墙,墙体内不含钢筋或仅含有连接构造性质的钢筋,建筑中常见的加气混凝土砌块填充墙、隔墙等均属于无筋加气混凝土砌块墙。虽然无筋加气混凝土砌块墙一般不直接用于承重墙,但其在竖向、水平荷载下的力学性能是进行约束砌块墙和组合墙力学性能研究的基础。

## 1.1 竖向受力性能

竖向荷载作用下加气混凝土砌块墙从初始受力至最终破坏的过程包括弹性受力、裂缝形成、瞬间破坏 3 个阶段。加气混凝土砌块墙体的屈服过程并不明显,采用开裂荷载所占极限荷载的比例对墙体弹性进行衡量,比例的大小表明了开裂后砌体承载能力富裕度的多少,亦间接反应了墙体延性性能的优劣。于静海等<sup>[2]</sup>通过 7 组 21 个灰砂蒸压加气混凝土砌块墙试件的受压试验得出,开裂荷载为极限荷载的 57%;赵成文等<sup>[3]</sup>进行了 5 组 30 个加气块砌体试件的受压试验,得出开裂荷载为破坏荷载的 34%~58%,平均为 48%;陈小萍<sup>[4]</sup>进行了 1 组 4 个陶粒增强加气混凝土砌块墙试件的受压试验,开

裂荷载与极限荷载比值平均为 60%。由此可见,对于工程中常见类型的加气混凝土砌块墙体,其受压开裂荷载占极限荷载的比例为 50%~60%。该值过大表明墙体缺乏必要的延性,应采取配筋、设置构造柱等方式予以解决;该值过小则表明墙体在承受荷载初期即出现开裂现象,可以通过在灰缝砂浆层中配置纤维予以改善。文献[3]中的试验结果表明,砌体水平灰缝中配置纤维虽无助于提高竖向承载力,但能够明显提高开裂荷载,试验实测值比普通加气块墙体试件提高 20%以上。

与粘土砖或空心混凝土砌块墙体相比,由于加气混凝土砌块的孔隙率大,竖向荷载作用下墙体脆性性质更加明显,导致其破坏过程具有突发性,获得墙体的应力-应变全曲线存在一定难度。单轴受压下加气混凝土砌块墙的应力-应变( $\sigma-\epsilon$ )曲线是墙体数值分析的基础,目前研究人员在进行加气混凝土砌块墙有限元分析时一般采用 2 种方法:①以加气混凝土砌块的应力-应变曲线近似代替加气混凝土墙体应力-应变曲线,曲线具有上升段和下降段,如图 1(a)所示;②根据加气混凝土砌块墙试验数据拟合应力-应变曲线,目前所得曲线的上升段较为规律,而下降段则受多种因素影响相对较发散,有限元分析时一般以屈服后的直线段进行表示,如图 1(b)所示。2 种方法中,前者没有考虑砂浆及砌块与砂浆的相互作用对砌块墙性能的影响,后者则容易造成计算值偏大,且无法得到理想的荷载-位移曲线下降段,亦无法对构件延性性能进行准确评价。

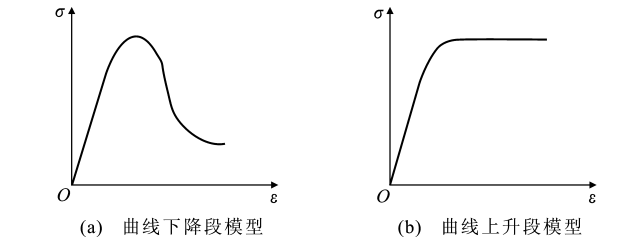


图 1 加气混凝土砌块墙应力-应变曲线

Fig.1 Stress-strain Curves of Aerated Concrete Wall

强度利用率是描述加气混凝土砌块抗压强度的重要概念之一,是指由砂浆和加气块砌筑而成的砌块墙的整体抗压强度与砌块自身抗压强度的比值,该值越大意味着加气混凝土砌块自身抗压强度发挥的越充分。近年来,加气混凝土砌块强度利用率试验结果的统计见表 1。由表 1 可知,在保证砌筑质量的前提下,加气混凝土砌块的强度利用率能够达到 70%,A5.0 级加气混凝土砌块砌筑形成的砌体大致与 MU10 粘土砖 M5 混合砂浆砌筑的砖砌体强

表 1 加气混凝土砌块强度利用率

Tab. 1 Strength Usage Ratios of Aerated Concrete Block

试件编号	砌块类型	砂浆类型	试件数量	强度利用率/%	数据来源
1	灰砂	专用砂浆	21	77	文献[2]
2	普通	混合砂浆 专用砂浆	30	72	文献[3]
3	陶粒	专用砂浆	4	75	文献[4]
4	轻质砂	专用砂浆	12	70	文献[5]
5	粉煤灰	专用砂浆	18	65	文献[6]

度相当,相比之下粘土砖的强度利用率仅为 20%~30%。提高加气块的强度利用率,意味着一方面能够以较低强度的砌块,达到结构设计所需的承载力,另一方面砌体墙的容重可进一步降低,有利于减轻结构的地震反应。在实际复杂施工条件下,如何能保证加气块的强度利用率,是需要进行进一步研究和实践操作的。

1.2 抗剪性能

抗剪强度是承重型加气混凝土砌块墙抗震设计的重要指标之一,影响其抗剪强度的主要因素有砌块及砂浆强度、砂浆类型、砌筑质量、灰缝厚度等。对于不同影响因素下加气混凝土砌块墙的通缝抗剪强度进行了较多的试验研究。赵成文等通过试验考察了普通混合砂浆和专业砂浆砌筑下砌体沿通缝破坏的强度及破坏特点,研究表明,专用砂浆的粘结强度较大,试验值离散性较小,在减小灰缝厚度的同时又可以提高砂浆与砌块的协调工作能力。杨伟军等通过试验研究了砂浆层灰缝厚度对砌体抗剪承载力的影响,认为砌体的抗剪强度随着砂浆灰缝厚度的增大而减小的理论并不适用于专用砂浆砌筑的加气混凝土砌块墙,而是呈现随着灰缝厚度的减小,其抗剪强度也随之减小的变化规律。

除了通缝抗剪破坏以外,加气混凝土砌块墙剪切破坏形式还包括剪压破坏、斜压破坏、局部破坏等形式<sup>[7]</sup>,其中,剪压破坏和斜压破坏以墙体出现斜裂缝为主要特征,可归为一般意义上的斜截面破坏。从试验方法上来看,在进行通缝抗剪试验时采用的试件尺寸较小,一般由 3 块或 4 块加气混凝土砌块砌成,具有 2 个或 4 个明确的通缝抗剪面,此时大多数试件均表现为沿通缝的剪切破坏;而对于尺寸较大的整片墙而言,水平荷载作用下则存在发生斜截面破坏的可能。刘文如等<sup>[8]</sup>进行了 7 片 1 015 mm×930 mm×250 mm 的灰砂加气混凝土砌块墙体的单调加载抗剪性能试验,结果表明,墙体发生的是斜截面破坏和水平通缝抗剪破坏 2 种形式的复合破坏。

加气混凝土砌块墙的几种常见破坏形式如图 2 所示。可见,在截面构造、施工质量基本相同的情况下,加气混凝土砌块墙的破坏形式具有很强的随机性,这也是其与一般砖砌体墙齿缝破坏的重要区别之一。

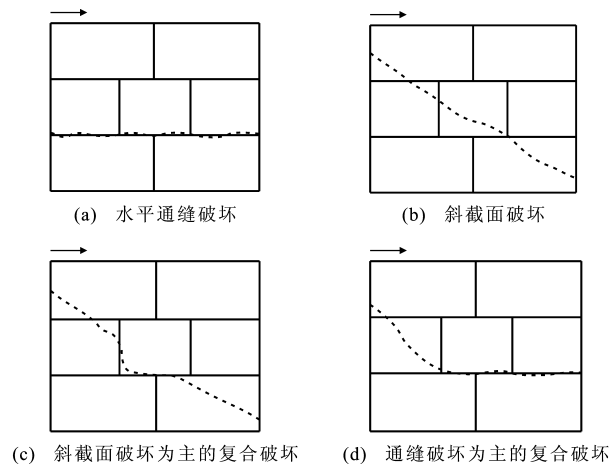


图 2 加气混凝土砌块墙剪切破坏形式

Fig. 2 Shear Failure Modes of Aerated Concrete Block Wall

普通砖砌体、混凝土空心砌块砌体承受剪压应力作用时,砌块自身强度对砌体的抗剪强度影响不大,砌体抗剪强度主要取决于水平、竖向灰缝砂浆与砌块的粘结强度,砌体沿通缝或齿缝截面的抗剪强度差异很小,中国砌体结构设计规范给出了沿灰缝破坏的抗剪强度。对于加气混凝土砌块墙而言,由于砌块自身强度相对较小,且随着专用砂浆的使用,砂浆与砌块之间的粘结性能更好,砌体抗剪强度取决于砌块抗拉强度和水平灰缝砂浆与砌块粘结强度的较小值,应选取斜截面破坏和通缝破坏 2 种模式中的最不利破坏模式进行验算。现行的《蒸压加气混凝土建筑应用技术规程》(JGJ/T 17—2008)中<sup>[9]</sup>均基于砌块墙发生沿通缝破坏的形式给出了砌体抗剪强度设计值以及受剪承载力计算公式,不能完全保证砌体的安全性,因此,对于加气混凝土砌块墙受剪破坏机理及抗剪承载力计算方法亦应继续进行研究。

1.3 抗震性能

抗震性能试验采用竖向荷载作用下的低周反复加载方式,可以更多地了解反复荷载作用下砌体墙承载力、延性、刚度等方面的信息。于静海<sup>[10]</sup>通过 9 片无筋蒸压加气混凝土砌块墙的低周反复荷载试验,考察了墙体的破坏形态和抗震性能,以及不同高宽比、不同竖向压应力对墙体抗震性能的影响。试验结果表明,加气混凝土砌块墙体的破坏以 X 形斜

裂缝穿越加气混凝土砌块的方式呈现,很少发生如图 2(a)所示的沿水平通缝的破坏,或者如图 2(d)所示的以水平通缝破坏为主的复合形式破坏。赵成文等<sup>[11]</sup>进行了 1 片无筋加气混凝土砌块墙的抗震性能试验,结果表明,当水平荷载达到开裂荷载时,墙体突然出现沿 45°方向的斜裂缝并迅速扩展。加气混凝土砌块墙一旦开裂,承载能力提高幅度一般不会太大,表明墙体开裂后的强度储备较少,脆性现象明显。

由上述对无筋加气混凝土砌块墙竖向受力性能、抗剪性能及抗震性能的分析可见,无筋加气混凝土砌块墙虽然具有一定的抗压或抗剪强度,但其脆性性质明显,延性较差,不适于直接在地震区建造房屋。周炳章<sup>[12]</sup>指出,砌体结构抗震的出路在于发展配筋砌体。因此,在加气混凝土砌块墙房屋结构中,采用构造柱、圈梁、水平配筋等形成约束加气混凝土砌块墙结构,或者采用加气混凝土砌块墙与钢筋混凝土框格形成 RC-加气混凝土砌块组合墙,是加气混凝土砌块墙发展的必然趋势。

## 2 约束加气混凝土砌块墙

约束加气混凝土砌块墙又称为配筋加气混凝土砌块墙,由构造柱、圈梁对加气混凝土砌块墙进行约束,主要用于低层或多层砌块墙承重房屋结构,如图 3 所示。根据计算要求的不同可以在墙体水平通缝中设置受力钢筋或钢筋网片以增强砌体墙的抗剪承载力及延性。约束加气混凝土砌块墙中,加气混凝土砌块墙是承重、抗震的主体部分,构造柱和圈梁仅发挥约束砌体墙、增强其整体性并限制墙体裂缝的开展等作用。对于砖砌体结构,人们已习惯于采用构造柱增强其抗震性能,同样,在加气混凝土砌块墙为承重主体的结构中,构造柱-加气混凝土砌块墙的结构形式无疑是容易被人们接受且有着广泛实践基础的方式。

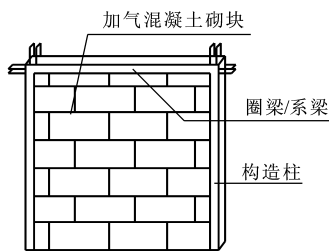


图 3 约束加气混凝土砌块墙

Fig. 3 Confined Aerated Concrete Block Wall

以北京地区为例,约束加气混凝土砌体结构已应用于低层房屋。2009 年,北京市建筑设计院与北

京金隅加气厂、京北新型建材厂等分别联合进行了加气混凝土自承重结构体系的试点建设<sup>[13]</sup>,建成了 2 栋二层墙承重型住宅楼和办公楼。

### 2.1 竖向受力性能

与加气混凝土砌块墙抗压性能、抗剪性能的试验资料相比,中国关于约束加气混凝土砌体墙竖向受力性能的试验资料较少,目前研究工作主要集中在利用通用有限元程序对约束加气混凝土砌块墙进行模拟分析方面。文献[10]中利用 ANSYS 程序对构造柱-圈梁-加气混凝土砌块墙竖向承载力进行了有限元分析,探讨了构造柱间距、墙体高度、厚度等参数对砌块墙竖向极限承载力的影响规律。算例分析表明,当构造柱间距小于 2.5 m 时,开裂荷载和极限荷载受柱间距的影响较明显,而当构造柱间距大于 3.0 m 时,构造柱的增强效果减弱,当构造柱间距大于 4.0 m 时,墙体的开裂荷载和极限荷载已基本不再受构造柱间距的影响。尹新生等<sup>[14]</sup>利用 ANSYS 程序对约束加气混凝土砌块墙竖向承载力进行了有限元分析,分析结果同样证明了构造柱对提高加气混凝土砌块墙竖向承载力的有利作用,只有给出的构造柱合理间距数值与文献[10]略有不同。可见,一方面构造柱通过自身的承载力分担竖向荷载,另一方面通过与圈梁共同约束墙体,间接提高了墙体的竖向承载力。

中国《蒸压加气混凝土砌块砌体结构技术规范》(CECS 289:2011)对于加气混凝土砌块墙体构件的轴压承载力计算,并未考虑构造柱的有利作用。实际工程中当加气混凝土砌体墙的偏心距超限时,技术人员采用了加密构造柱形成组合砌体的方法,直接按照《砌体结构设计规范》中的组合砌体偏心受压构件承载力公式进行配筋设计。由于加气混凝土砌块的抗压强度及弹性模量仅为混凝土的 1/10 左右,竖向荷载在砌块墙与构造柱之间的分配规律以及承载力计算方法势必与一般构造柱-砖砌块墙有着较大的不同,且承载力提高的幅度可能会更大,而目前的近似设计方法无法考虑到加气混凝土砌块墙与一般砖砌体在力学性能上的差异,对此需要进行进一步的试验研究。

### 2.2 抗剪性能与抗震性能

吴东云等<sup>[15]</sup>进行了 7 片 2 460 mm×1 390 mm×250 mm 配筋粉煤灰加气混凝土砌块墙的单调加载抗剪性能试验,研究水平灰缝配置钢筋后墙体破坏形态及抗剪性能的变化,从试验结果来看,发生剪切破坏的 5 片墙体中,3 片墙体发生的是以斜截面开

裂为主的复合形式破坏,2 片墙体发生的是以水平通缝破坏为主的复合形式破坏,试验结果同样验证了加气混凝土砌块墙受剪破坏形态的多样性与随机性。赵成文等进行了 6 片  $1\,210\text{ mm}\times 1\,290\text{ mm}\times 240\text{ mm}$  蒸压加气混凝土砌块墙的抗震性能试验,探讨普通砂浆配钢筋、普通砂浆配纤维以及专用砂浆配纤维等构造措施对墙体抗震性能的影响。试验表明,适量的配筋和配纤维可以很好地改善加气块墙体的脆性,增强砂浆与砌块的粘结力,提高其抗剪承载力和变形能力。

于静海等对 5 片  $2\,418\text{ mm}\times 1\,310\text{ mm}\times 125\text{ mm}$  约束加气混凝土砌块墙进行了低周反复荷载试验,约束措施包括仅设置两侧构造柱、同时设置两侧构造柱与墙体中部构造柱、变化构造柱配筋率等,研究不同约束措施对墙体抗震性能的改善程度。试验表明,约束加气混凝土砌块墙的破坏形态与无筋加气混凝土砌块墙有着明显的区别。对于无筋加气混凝土砌块墙,其裂缝形式为一组主交叉裂缝,墙体裂缝一旦出现即成为主裂缝,其他位置较少形成主裂缝;而对于约束加气混凝土砌块墙,墙体出现多条斜裂缝,无法区分主斜裂缝与次裂缝,同时,裂缝沿墙面分布均匀,宽度也较细,表明约束措施下加气混凝土砌块墙体内力分布更均匀合理。

通过上述约束加气混凝土砌块墙体抗剪性能及抗震性能试验可以看出,一方面,构造柱和水平灰缝配置的钢筋延缓墙体斜裂缝的发展,提高了墙体整体的变形能力;另一方面,约束作用还使得砌体产生更多的裂缝,从而提高了加气混凝土砌块的耗能能力。

此外,文献[16],[17]对加气混凝土砌块墙作为填充墙用于框架结构、钢框架结构等的抗震性能进行了模型试验,研究了外框架约束下加气混凝土砌块墙的抗震性能以及墙体对框架抗震性能的影响,研究成果亦有助于人们从更多角度理解约束条件下加气混凝土砌块墙的破坏规律与抗震性能。

利用约束加气混凝土砌块墙可以建造 3 层及 3 层以下的低层房屋,但是,将加气混凝土砌块墙应用于多层房屋乃至小高层建筑时,采用一般砌体结构的抗震构造形式已经不能满足设计要求,由此,在约束加气混凝土砌块墙的基础上发展出了 RC-加气混凝土砌块组合墙。

3 RC-加气混凝土砌块组合墙

RC-加气混凝土砌块组合墙是指在分布较密且

截面较小的 RC 框格(框格柱、框格梁)内部嵌入加气混凝土砌块墙而形成的组合式抗震墙,又称为密肋复合墙,如图 4 所示。RC-加气混凝土砌块组合墙中,混凝土框格部分占组合墙体积比重的 20% 左右,加气混凝土砌块占组合墙体积比重的 80% 左右,层数越多混凝土部分所占比例就越大。

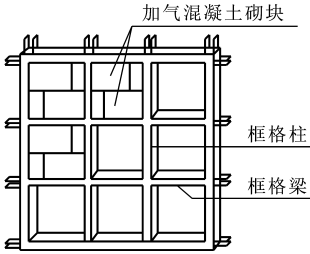


图 4 RC-加气混凝土砌块组合墙

Fig. 4 RC-aerated Concrete Block Composite Wall

对于约束加气混凝土砌块墙(图 3)和 RC-加气混凝土砌块组合墙(图 4),除了构造形式不同之外,本文中定义 2 种墙体本质区别如下:当加气混凝土砌块墙的承载力由砌体抗剪强度或通缝抗剪强度决定,即以墙体自身抗剪作用作为承载水平荷载的主体时,归为约束加气混凝土砌块墙,而当加气混凝土砌块墙在框格约束下以对角斜压杆支撑框格机制发挥抗剪作用时,归为 RC-加气混凝土砌块组合墙。RC-加气混凝土砌块组合墙可以用于多层及小高层建筑<sup>[18]</sup>、震后受损框架抗震加固等。

3.1 加气混凝土砌块与 RC 框格共同工作性能

根据加载方式的不同将加气混凝土砌块与框格共同工作性能的试验方法分为 2 类,一是对角加载,二是纯剪加载,如图 5 所示。

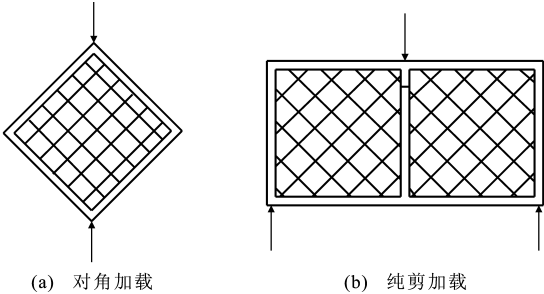


图 5 加载方式

Fig. 5 Loading Modes

喻磊等<sup>[19]</sup>根据 1:2 比例对角加载方式下加气混凝土砌块填充 RC 框格单元模型试验的主要测试结果,分析了框格的受力机理,讨论了框格构件截面性能、砌块材料强度、加载历程等因素对框格单元力学性能的影响。姚谦峰等<sup>[20]</sup>通过对加气混凝土单轴受压及加气混凝土框格单元模型的对角加载试

验,研究了框格与填充砌块的相互作用、框格梁/柱截面高度的变化对框格单元承载能力及变形性能的影响。文献[21]中采用图 5(b)所示的纯剪加载方式,进行了 3 组 6 个框格试件的单调加载试验,分析了高宽比对砌体填充 RC 框格侧向刚度与极限承载能力的影响。试验表明,框格内加气混凝土砌块的破坏主要集中在肋格对角线区域,砌块多出现沿对角线的斜裂缝,框格单元内形成砌体压杆传力机制。

根据试验结果,加气混凝土砌块填充 RC 框格的受力特点如下:①由于框格尺寸较小,加气混凝土砌块与框格共同工作,砌块受到框格的约束,框格又受到砌块的反约束,两者相互作用,充分发挥各自性能;②框格中砌块的抗剪作用机理与约束加气混凝土砌块墙不同,由砌块自身抗剪为主转变为以斜压杆机制为主,能够充分发挥加气混凝土砌块的抗压能力,如图 6 所示。将加气混凝土砌块墙体由一般意义上的水平截面抗剪机制转变为利用框格约束下的以对角受压支撑框格机制发挥抗剪作用,也正是将加气混凝土砌块与钢筋混凝土进行组合的优势所在。

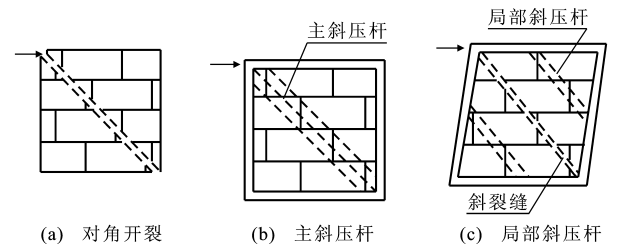


图 6 框格内砌体斜压杆机制  
Fig. 6 Oblique Compression Bar Mechanism of Frame Grid

### 3.2 竖向受力性能

王爱民<sup>[22]</sup>进行了 4 片 1:2 比例 RC-加气混凝土砌块组合墙模型试验,研究了竖向荷载作用下复合墙体的破坏模式、高厚比对墙体承载力的影响、砌块对墙体抗压的贡献等;马静等<sup>[23]</sup>通过对 RC-加气混凝土砌块组合墙在单调竖向荷载作用下试验研究,探讨了墙体的受力特点,提出了墙体竖向受压承载力计算公式;张杰<sup>[24]</sup>在进行 7 片 RC-加气混凝土砌块组合墙试件抗震性能试验之前进行了竖向加载试验,试件竖向压应力设计值为 0.8 MPa,该值大致相当于正常使用状态下墙体承受上部 6~7 层负荷范围内的竖向荷载标准值,试验时逐级加载至 5.6 MPa,然后卸载至 0.8 MPa,以研究墙体在较大竖向荷载作用下是否发生开裂以及加气混凝土砌块的受压变形状态。

试验研究表明,由于 RC-加气混凝土砌块组合墙中砌块的弹性模量远小于框格柱混凝土弹性模量,竖向荷载作用下墙体内力主要由框格柱承担,加气混凝土砌块承受较小部分的竖向荷载,竖向应变分布形状如图 7 所示。

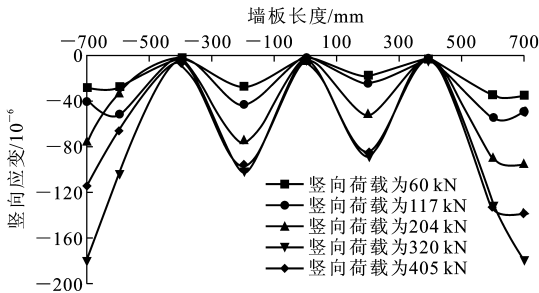


图 7 墙体表面同一横截面处竖向应变  
Fig. 7 Longitudinal Strains of Cross Section of Wall

对于工程中常用截面构造的 RC-加气混凝土砌块组合墙,竖向荷载作用下轴向压力在各部分构件中基本按照轴向刚度大小分配,框格柱承担了全部竖向荷载的 80%~90%,填充砌块所承担的竖向荷载只占全部轴力的 10%~20%。填充砌块虽然不直接承担竖向荷载,但其作用在约束和支撑框格柱,避免了框格柱发生弱轴方向的压弯破坏或局部失稳破坏。文献[22]通过 RC-加气混凝土砌块组合墙和无填充砌块的空框格试件的对比试验,证明了加气混凝土砌块在组合墙竖向承力体系中具有不可替代的作用。由图 7 可以看出,由于荷载的边移效应和框格梁的水平连接作用,竖向荷载作用下的组合墙又具有“拉杆-拱”承力体系的特点。由此可见,与仅设置构造柱、圈梁的约束加气混凝土砌块墙相比,2 类墙体承受竖向荷载的机理有着明显的区别,RC 框格柱直接承受竖向荷载,使得加气混凝土砌块组合墙向着多层及小高层结构方向发展成为可能。

### 3.3 抗震性能

对于 RC-加气混凝土砌块组合墙的抗震性能,西安建筑科技大学和北京交通大学等开展了一系列试验研究工作,从试验规模来看,RC-加气混凝土砌块组合墙的试验经历了从单层单跨到多层多跨,从小比例模型到足尺比例模型,从单向加载、低周反复加载到振动台试验的发展过程。

姚谦峰等<sup>[25]</sup>进行了 8 片 RC-加气混凝土砌块组合墙的水平低周反复荷载试验,所考虑的主要影响因素包括框格柱数量、框格柱纵筋配筋率、尺寸效应等,通过试验研究了墙体的主要破坏过程,分析了墙体的受力特点、承载力等抗震性能。张杰进行了

7 片 RC-加气混凝土砌块组合墙的抗震性能试验,依次改变轴压比、高宽比等参数,考察了墙体的破坏机理。试验表明,墙体中加气混凝土砌块首先开裂和破坏,继而墙板中框格梁端部形成塑性铰,最后两端框格柱发生压弯破坏,遵从“加气混凝土砌块—RC 框格梁—RC 框格柱”的破坏顺序,减轻了 RC 框格部分的震害,具有多道抗震防线,是一种抗震性能优良的结构受力构件。荆罡等<sup>[26]</sup>在 RC-加气混凝土砌块组合墙的斜截面抗剪和正截面受弯 2 组试验基础上,对比分析了 RC-加气混凝土砌块组合墙的 2 种典型破坏模式,即剪切型破坏和弯曲型破坏,研究表明,剪切破坏墙体的延性和变形能力明显优于受弯试验中弯曲破坏的墙体,属于有利的破坏模式。笔者针对 RC-加气混凝土砌块组合墙的构造特点及其破坏顺序,提出利用加气混凝土砌块置换墙体中破坏的砌块以恢复和提高受损 RC-加气混凝土砌块组合墙结构抗震性能的加固方法<sup>[27]</sup>,并通过试验对加固后墙体抗震性能进行了分析。此外,袁泉<sup>[28]</sup>进行了 1:10 比例 10 层 RC-加气混凝土砌块组合墙房屋结构模型房屋模拟振动台试验,对结构整体的动力特性进行了研究。

上述研究成果为多层及中高层 RC-加气混凝土砌块承重墙体系房屋的抗震设计及其在地震区的合理应用提供了试验依据。

## 4 结 语

砌体结构作为中国传统的建筑形式,在今后相当长时期内仍将是中小城镇、乡村地区住宅建筑中的常用结构类型。以约束加气混凝土砌块墙、RC-加气混凝土砌块组合墙为承重主体的砌体结构是一种有着广阔发展前途的新型建筑结构体系。综合分析现阶段中国对加气混凝土砌块墙的研究进展及应用情况,笔者认为应重点开展以下 4 个方面的研究工作:

(1)约束加气混凝土砌块墙试验研究。与传统的砌块墙的大量试验资料相比,约束加气混凝土砌块墙竖向承载力及抗震性能的试验资料总体来说还是偏少,表现在对于某一影响参数的试验,缺乏不同单位之间所做试验结果的相互验证,试验中所考虑的影响因素不够全面。由于试验的周期较长、试验经费开支较大,对此需要包括科研、设计、生产、施工等单位在内的众多科研力量积极参与,更多地开展约束加气混凝土砌块墙力学性能试验研究,既可为今后低层、多层约束加气混凝土砌块墙房屋结构的

抗震设计提供依据,同时也有助于中国墙体材料改革以及低碳建筑的推广和应用。

(2)约束加气混凝土砌块墙设计计算方法研究。对于砖砌体和钢筋混凝土面层或钢筋砂浆面层的组合砌体构件、砖砌体和钢筋混凝土构造柱组合墙等多种形式的配筋砌体构件,中国砌体结构设计规范均给出了具体的计算方法。然而,对于加气混凝土砌块承重墙与构造柱形成的约束加气混凝土砌块墙等构件,现有相关规范并未给出计算方法,因此,应在试验的基础上对约束加气混凝土砌块墙设计计算方法继续进行研究。

(3)RC-加气混凝土砌块组合墙结构弹塑性阶段计算模型。对于 RC-加气混凝土砌块组合墙在弹塑性阶段的精细化计算模型,开展以局部斜压杆机制为主的等效斜撑模型研究,以期更准确地对中高层 RC-加气混凝土砌块组合墙结构进行弹塑性分析;RC-加气混凝土砌块组合墙是一种“变承载力、变刚度、变阻尼”的构件,不仅可以通过变化框格与加气混凝土砌块各自所占比例优化墙体,还可以在框格与加气混凝土砌块比例不变的条件下通过改变加气混凝土砌块强度的方法实现优化设计,对此需要进行相关研究工作。

(4)加气混凝土砌块砌体结构规范与密肋复合墙结构技术规程的集成研究。目前,适用于加气混凝土砌块砌体结构的规范主要有《蒸压加气混凝土砌块砌体结构技术规范》、《蒸压加气混凝土建筑应用技术规程》、《密肋壁板结构技术规程》等,其中,前两者主要是针对约束加气混凝土砌块砌体结构设计的规范,后者则是针对 RC-加气混凝土砌块组合墙结构的技术规范。事实上,约束加气混凝土砌块墙与 RC-加气混凝土砌块组合墙是相互联系的,亦可以相互结合进行使用,如对于低层、多层约束加气混凝土砌块墙房屋结构,在底部剪力最大的位置,采用 RC-加气混凝土砌块组合墙显然是较好的选择。因此,建议对加气混凝土砌块砌体结构规范与密肋复合墙结构技术规程进行集成,以便更好地促进加气混凝土砌块墙及砌体结构的研究与应用。

## 参考文献:

### References:

- [1] CECS 289:2011, 蒸压加气混凝土砌块砌体结构技术规范[S].  
CECS 289:2011, Technical Code for Masonry Structure of Autoclaved Aerated Concrete Block[S].
- [2] 于静海,费添慧,谢 宁,等.灰砂蒸压加气混凝土承

- 重砌块受压变形性能试验研究[J]. 建筑科学, 2008, 24(1): 31-34.
- YU Jing-hai, FEI Tian-hui, XIE Ning, et al. Experimental Study on Compressive Deformation Properties of Sand-lime-AAC Bearing Masonry[J]. Building Science, 2008, 24(1): 31-34.
- [3] 赵成文, 刘雅楠, 周培厚, 等. 不同砌筑方式蒸压加气混凝土砌块砌体抗压强度研究[J]. 新型建筑材料, 2010(1): 32-35.
- ZHAO Cheng-wen, LIU Ya-nan, ZHOU Pei-hou, et al. Experimental Study on the Compressive Strength of Autoclaved Aerated Concrete Block Masonry with Different Masonry Methods [J]. New Building Materials, 2010(1): 32-35.
- [4] 陈小萍. 陶粒增强加气混凝土砌块的试制及其砌体性能试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- CHEN Xiao-ping. Trial-production of Ceramsite-reinforced Aerated Concrete Block and Experiment of Masonry Performance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [5] 程才渊, 吴明舜, 苏宇峰, 等. 伊通砂加气混凝土砌体性能试验研究[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 2005(4): 39-42.
- CHENG Cai-yuan, WU Ming-shun, SU Yu-feng, et al. Research on Performance of Ytong Aerated Concrete Masonry with Sand[J]. Building Block and Block Building, 2005(4): 39-42.
- [6] 杨伟军, 郑思文. 薄灰缝砌筑加气混凝土砌体力学性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2011(1): 34-36.
- YANG Wei-jun, JIA Si-wen. Experimental Research on Mechanical Properties of Aerated Concrete Masonry with Thin Mortar Joint[J]. New Building Materials, 2011(1): 34-36.
- [7] 费添慧. 蒸压加气混凝土承重砌体剪压复合受力性能试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2006.
- FEI Tian-hui. Experimental Study on the Shear-compression Behavior of the Autoclaved Aerated Concrete Bearing Masonry [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006.
- [8] 刘文如, 刘 毅. 加气混凝土砌体抗剪强度试验研究[J]. 哈尔滨建筑工程学院学报, 1985(3): 40-49.
- LIU Wen-ru, LIU Yi. Experimental Study on Shear Strength of Porous Concrete Masonry[J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute, 1985(3): 40-49.
- [9] JGJ/T 17—2008, 蒸压加气混凝土建筑应用技术规程[S].
- JGJ/T 17—2008, Technical Specification for Application of Autoclaved Aerated Concrete[S].
- [10] 于静海. 新型轻质加气混凝土承重砌体抗震性能的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- YU Jing-hai. Research on Seismic Performance of a New Light-weight Bearing Masonry of Autoclaved Aerated Concrete [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [11] 赵成文, 张 亮, 高连玉, 等. A类蒸压加气混凝土砌块墙体抗震性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2009, 25(3): 426-432.
- ZHAO Cheng-wen, ZHANG Liang, GAO Lian-yu, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Autoclaved Aerated Concrete Block Bearing Walls [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2009, 25(3): 426-432.
- [12] 周炳章. 砌体结构抗震的出路在于发展配筋砌体[J]. 建筑结构, 2009, 39(12): 159-162.
- ZHOU Bing-zhang. Reinforcement Is the Solution for the Earthquake Resistance of Masonry Structure[J]. Building Structure, 2009, 39(12): 159-162.
- [13] 夏祖宏, 顾同曾, 周炳章. 采用加气混凝土制品建造新农村住宅的研究[J]. 墙材革新与建筑节能, 2010(7): 22-25.
- XIA Zu-hong, GU Tong-zeng, ZHOU Bing-zhang. Study on the Construction of Rural Residential Use the Aerated Concrete[J]. Wall Materials Innovation & Energy Saving in Buildings, 2010(7): 22-25.
- [14] 尹新生, 巴盼锋, 蔡婧妮, 等. 配筋加气混凝土墙竖向极限承载力分析[J]. 新型建筑材料, 2010(10): 34-37.
- YIN Xin-sheng, BA Pan-feng, CAI Jing-wei, et al. Analysis on the Vertical Ultimate Bearing Capacity of Reinforced Aerated Concrete Wall[J]. New Building Materials, 2010(10): 34-37.
- [15] 吴东云, 何向玲, 成美凤. 粉煤灰加气混凝土砌块墙体抗剪性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2006(11): 20-23.
- WU Dong-yun, HE Xiang-ling, CHENG Mei-feng. Experiment Research on Shear Resistant of Fly Ash Aerated Concrete Block Wall[J]. New Building Materials, 2006(11): 20-23.
- [16] 曹万林, 庞国新, 李云霄, 等. 轻质填充墙异型柱边框架抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 1997, 17(2): 106-112.
- CAO Wan-lin, PANG Guo-xin, LI Yun-xiao, et al. Test Research on Aseismic Behavior of Edge Frame with Special-shaped Columns and Light-weight Filled Walls[J]. Earthquake Engineering and Engineering

- Vibration, 1997, 17(2): 106-112.
- [17] 顾乐乐. 伊通墙板节点强度、重复荷载作用及墙体模拟地震振动台试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.  
GU Le-le. Experiment Study on Ytong Panel Joint Intensity and Iterative Load Action and Ytong Wall Simulate Earthquake Shaking Talbe [D]. Shanghai: Tongji University, 2007.
- [18] 周铁钢, 张 荫. 密肋壁板轻框结构体系施工技术[J]. 工业建筑, 2003, 33(1): 23-25.  
ZHOU Tie-gang, ZHANG Yin. Construction Techniques of Structure of Multi-ribbed Wall Slab with Light-weight Outer Frame [J]. Industrial Construction, 2003, 33(1): 23-25.
- [19] 喻 磊, 张 荫, 姚谦峰. 循环荷载作用下钢筋混凝土框格单元结构受力机理试验研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(8): 47-53.  
YU Lei, ZHANG Yin, YAO Qian-feng. An Experimental Study on the Load-bearing Mechanism of Elemental Reinforced Concrete Frames Under Cyclic Load [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(8): 47-53.
- [20] 姚谦峰, 孟宏睿, 喻 磊, 等. 加气混凝土密肋复合墙板框格单元的试验研究[J]. 混凝土, 2007(5): 92-95.  
YAO Qian-feng, MENG Hong-rui, YU Lei, et al. Test Research of the Reinforced Concrete Fundamental Frame Structure with Autoclaved Aerated Concrete Masonry Infilled in Multi-ribbed Walls [J]. Concrete, 2007(5): 92-95.
- [21] 喻 磊, 姚谦峰, 岳亚锋. 密肋复合墙体框格单元结构刚度与承载力分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2006, 38(1): 23-29.  
YU Lei, YAO Qian-feng, YUE Ya-feng. Analysis of Stiffness and Load-resisting Capacity of Fundamental Frame Structures in High-performance Concrete Multi-rib Walls [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2006, 38(1): 23-29.
- [22] 王爱民. 中高层密肋复合墙体受力性能及设计计算方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2008.  
WANG Ai-min. Research on Load-bearing Performance and Design Method of Multi-ribbed Composite wall in Moderate High Storied Multi-ribbed Slab Structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.
- [23] 马 静, 黄 炜, 姚谦峰. 密肋壁板结构中复合墙体的竖向承载力及稳定性研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(2): 187-192, 223.  
MA Jing, HUANG Wei, YAO Qian-feng. Research on the Vertical Bearing Capacity and Stability of the Composite Wall in Multi-ribbed Slab Structures [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(2): 187-192, 223.
- [24] 张 杰. 密肋复合墙板受力性能及斜截面承载力实用设计计算方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2004.  
ZHANG Jie. Mechanical Property Study and Practical Oblique Section Design Method Study on Multi-ribbed Composite Wall [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2004.
- [25] 姚谦峰, 黄 炜, 田 洁, 等. 密肋复合墙体受力机理及抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(6): 67-74.  
YAO Qian-feng, HUANG Wei, TIAN Jie, et al. Experimental Analyses of Mechanical Characteristics and Seismic Performance of Multi-ribbed Panel Wall [J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(6): 67-74.
- [26] 荆 罡, 姚谦峰, 黄 炜, 等. 密肋复合墙体的抗震性能对比分析[J]. 工业建筑, 2009, 39(12): 45-50, 35.  
JING Gang, YAO Qian-feng, HUANG Wei, et al. Comparative Analysis of Seismic Performance of Multi-ribbed Composite Walls [J]. Industrial Construction, 2009, 39(12): 45-50, 35.
- [27] 郭 猛, 袁 泉, 李鹏飞, 等. 加气混凝土砌块置换加固受损密肋复合墙抗震性能试验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43(1): 51-57.  
GUO Meng, YUAN Quan, LI Peng-fei, et al. Seismic Performance Experimental Research for Multi-ribbed Composite Wall Strengthened with Aerated Concrete Blocks [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43(1): 51-57.
- [28] 袁 泉. 密肋壁板轻框结构非线性地震反应分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2003.  
YUAN Quan. Non-linear Earthquake Response Analysis on Multi-ribbed Slab with Light Frame Structure [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2003.