

装配式轻质 ALC 砌块组装墙板的抗弯性能研究

徐春一¹, 郭育源¹, 孟祥君², 杨春艳³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 威海建设集团股份有限公司, 山东 威海 264200;
3. 辽宁省市工程设计研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110055)

摘要 目的 研究装配式新型轻质蒸压加气混凝土砌块配筋组装墙板的抗弯性能。
方法 对4块蒸压加气混凝土砌块隔墙板进行四分点加载方式的抗弯试验, 对比分析不同配筋及拼接方式对隔墙板破坏形式、刚度、挠度和抗弯承载力的影响。
结果 素墙板发生脆性破坏, 配筋墙板发生弯曲破坏; 破坏荷载均已超过墙体自重的1.5倍, 配筋墙板的抗弯开裂荷载与极限荷载远大于两块素墙板, 且配筋率越大, 试件抗弯承载力越大, 在同级荷载作用下, 产生的挠度越小。
结论 该砌块隔墙板符合平截面假定; 试验结果满足《蒸压加气混凝土建筑应用技术规程》(JGJ/T17—2008)要求, 并具有安全储备。

关键词 装配式; 轻质墙板; 蒸压加气混凝土; 抗弯承载力

中图分类号 TU522.3+2 文献标志码 A

Experimental Study on Flexural Behavior of Assembled Lightweight Block Assembled Wallboard

XU Chunyi¹, GUO Yuyuan¹, MENG Xiangjun², YANG Chunyan³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. Weihai Construction Group Company Limited, Weihai, China, 264200; 3. Liaoning Municipal Design & Research Institute Co. Ltd., Shenyang, China, 110055)

Abstract: In order to study the bending resistance of the assembled new lightweight autoclaved aerated concrete block reinforcement wall panel, the feasibility of its application in practical engineering is verified. The bending test of four autoclaved aerated concrete block partitions was carried out in four-point loading mode. The failure modes, stiffness, deflection and flexural capacity of the partition walls were compared and analyzed. The brittle failure of the plain wall panel and the bending failure of the reinforced wall panel; the failure load has exceeded 1.5 times of the wall's own weight, and the flexural cracking load and ultimate load of the reinforced wall panel are much larger than 2 plain wall panels, Under the same level of load, the reinforcement The higher the

收稿日期: 2019-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408373); 辽宁省自然科学基金指导计划(20170540765); 沈阳科技局中青年科技创新人才支持计划项目(RC170315); 沈阳建筑大学科研创新培育计划项目(CXPY2017022)

作者简介: 徐春一(1983—), 女, 副教授, 博士, 主要从事结构抗震和防灾减灾等方面研究。

rate, the greater the flexural capacity of the test piece, and the smaller the deflection produced. The block partition wall panel conforms to the flat section assumption; the test results meet the requirements of the Technical Specification for Autoclaved Aerated Concrete Buildings (JGJ/T17-2008) and have a safe reserve.

Key words: assembled; lightweight wall panel; autoclaved aerated concrete; flexural capacity

近些年我国对装配式建筑体系及住宅产业化进行了普及与推动。蒸压加气混凝土 (ALC) 具有轻质高强、隔热、保温、隔声性能良好、可加工性强、环保利废等优点^[1], 但 ALC 墙板的生产面临着生产工艺复杂、生产成本高、生产线少等一系列问题, 故国内多以 ALC 块材生产为主^[2]。较黏土实心砖与混凝土空心砌块, ALC 砌块尺寸较大、制品匀质性较好, 在砌体中的强度利用系数 (约为块体强度的 70% ~ 80%) 远高于黏土砖 (仅为 30% 左右)^[3]。相比 ALC 板材^[4], ALC 块材生产工艺简单、造价低廉, 现场拼装施工方便、简单易行。较钢筋混凝土装配式墙板, ALC 砌块拼装隔墙板自重轻, 吊装运输方便, 节约成本, 施工便捷。对比其他砌块的砌筑工程, 装配式 ALC 块材拼装墙板^[5]工厂预制、现场拼装, 加工精度高, 质量可靠, 无现场湿作业, 不仅能大幅提高施工效率, 且节能环保。

由于蒸压加气混凝土是一种多孔轻质材料^[6], 其抗拉强度和抗压强度都较低, 使得装配式轻质 ALC 砌块组装墙板在均匀荷载

作用下的破坏形态、裂缝开展、开裂荷载计算、极限荷载计算和变形规律都不同于普通混凝土, 且正常使用荷载下跨中挠度较大。基于此, 笔者通过研究蒸压加气混凝土墙板的抗弯性能和破坏模式, 验证此类新型砌块隔墙板在实际工程应用中是否具有可行性, 有助于明确该墙板的受力性能, 为其工程应用提供理论依据。

1 试验

1.1 材料

试验按照《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969—2008) 进行, 制作 6 组长宽高为 100 mm × 100 mm × 100 mm 的立方体试件。用砂纸打磨其表面, 保证表面垂直、边角完整。在标准养护温度 (20 ± 2 °C)、相对湿度在 95% 以上的条件下, 分别放在标准养护室里养护 28 d。

抗压试件编号 Y1、Y2、Y3, 抗压强度结果见表 1。劈裂抗拉试件编号 P1、P2、P3, 劈裂抗拉结果见表 2。

表 1 ALC 立方体抗压强度

Table 1 Test results of compressive strength of ALC cubes

砌块分组	密度/(kg·m ⁻³)	破坏荷载 P/kN	单块抗压强度 f_{ci} /MPa	平均抗压强度 f_c /MPa
Y1	600	54.16	5.42	—
Y2	600	57.50	5.75	5.62
Y3	600	56.90	5.69	—

表 2 ALC 立方体劈裂抗拉强度

Table 2 Test results of tensile splitting strength of ALC cubes

砌块分组	密度/(kg·m ⁻³)	破坏荷载 P/kN	单块劈拉强度 f_{tsi} /MPa	平均劈拉强度 f_{ts} /MPa
P1	600	10.95	0.70	—
P2	600	11.60	0.74	0.71
P3	600	10.86	0.69	—

通过表1结果可知,本次用于墙板砌筑的砌块抗压强度平均值为5.62 MPa,强度等级已达到A5.0。得到砌块单块强度与平均强度比值的平均值为1.0007,误差在10%以内,均方差为0.144,说明本次砌块强度离散型小,较为可靠,数据符合规范要求。

通过表2结果可知,本次用于墙板砌筑的砌块劈拉强度平均值为0.71 MPa,强度等级已达到A5.0。得到砌块单块强度与平均强度比值的平均值为1.0009,误差在10%以

内,均方差为0.022,说明本次砌块强度离散型小,较为可靠,数据符合规范要求。

1.2 墙板试件的设计与制作

试件截面600 mm × 150 mm,采用两种连接形式:一种为平口(见图1(a))、一种为企口(见图1(b)),企口单榫长高为50 mm × 50 mm。蒸压加气混凝土墙板试件编号及参数见表3^[7-8]。试件在15 ~ 25℃室温条件下,养护不低于28 d,制作过程如图2所示。

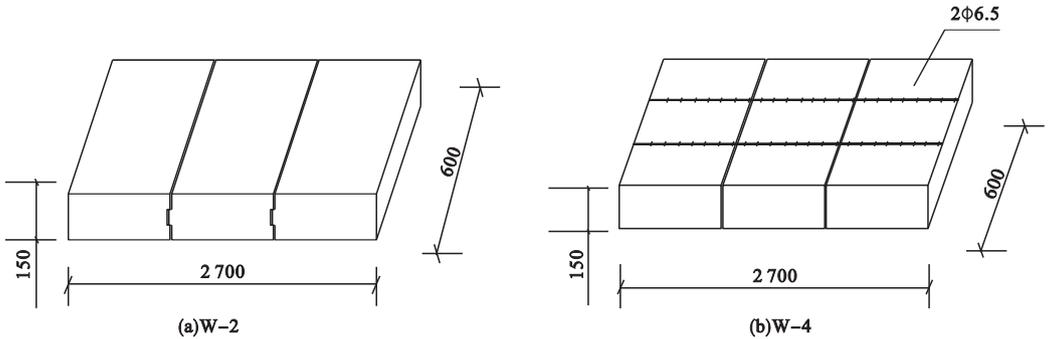


图1 试件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of specimen

表3 蒸压加气混凝土墙板试件参数

Table 3 Parameters of autoclaved aerated concrete partition plate

编号	连接形式	试件长 × 高 / mm	优化方式	施工方式
W-1	平口	2 700 × 150	无	专用粘结剂粘结
W-2	企口	2 700 × 150 (企口 50 × 50)	平口连接变企口连接	专用粘结剂粘结
W-3	平口	2 700 × 150	宽 1/3 处配筋 1Φ6.5 + 1Φ6.5	抠槽、锤击钉入
W-4	平口	2 700 × 150	宽 1/3 处配筋 2Φ6.5 + 2Φ6.5	抠槽、锤击钉入



(a) 钢筋钉入墙板



(b) 砂浆填充、墙板养护

图2 试件制作

Fig. 2 Production process of wallboard

1.3 试验装置

试验根据《蒸压加气混凝土板》(GB15762—2008)规定进行,采用四分点加载^[9],试验时墙板一端采用固定铰支座,另一端采用滚动铰支座,支座中心距离墙板端部 50 mm. 墙板通过叉车运输,并放置到固定好的支座上进行试验,试验装置见图 3. 应变片分布如图 4 所示,应变片 C1 在跨中截面沿着截面高度 150 mm 处布置,C2 在跨中截面沿着截面高度 75 mm 处布置,C3 在跨中截面沿着截面高度 0 mm 处布置;Y3 为墙板上部受压面跨中处应变片,Y4 为四分点附近受压应变片;L3 为墙板下部受拉面跨中处应变片,L4 为四分点附近受拉应变片.

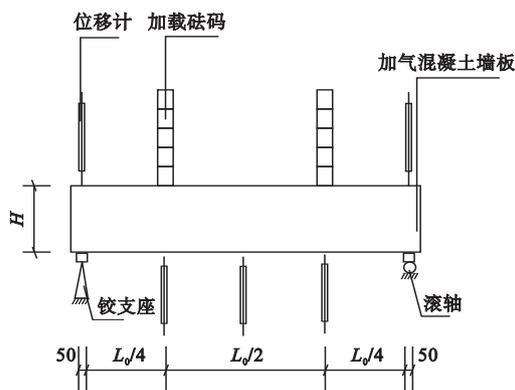


图 3 抗弯试验装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of bending test device

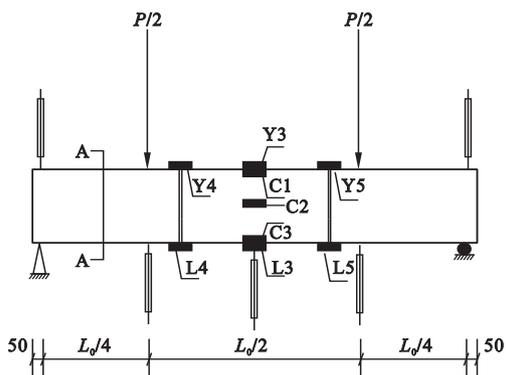


图 4 应变片分布图

Fig. 4 Distribution of strain slices

1.4 加载制度

试验采用四分点集中的加载方式^[10],单调多级的加载制度.试验开始前,首先进行预

加载,加载值取计算开裂荷载的 10%.正式加载时,每级加载取 0.3G(G 为蒸压加气混凝土砌块组装墙板自重),前 4 级每级加载后静置 2 min 左右,等试件变形逐步稳定后再观察裂缝发展并进行数据采集,第五级加载至 1.5G 后静置 5 min,若墙板仍未破坏,则继续循环加载直至蒸压加气混凝土砌块组装墙板断裂破坏.

2 试验现象

不同试件破坏过程及裂缝开展情况如下:

(1)试件 W-1 为脆性破坏:当荷载匀速加载至 3.4 kN 时,跨中位移达到墙板计算跨度值的 1/200,墙板已达正常使用极限状态,取此时荷载作为开裂荷载.直至加载到 4.4 kN,接触面位置裂缝贯通,墙板突然破坏(见图 5(a)).

(2)试件 W-2 破坏形态与 W-1 基本相同,未配筋的素墙板均发生了沿灰缝处开裂破坏(见图 5(b)).W-2 试件的极限荷载略大于 W-1,抗弯性能提高效果并不明显.

(3)试件 W-4 为弯曲破坏,破坏形态见图 5(d),破坏过程可分为三个阶段^[11-12]:

①弹性阶段:从荷载为零逐渐增加到墙板出现裂缝的过程,应力大致呈线性分布.

②带裂缝工作的弹塑性阶段:当荷载匀速加载至 5.6 kN 时,裂缝最先由跨中附近纯弯段部位产生,表明跨中底部的混凝土应变达到极限拉应变.

③破坏阶段:当加载至 7.2 kN,加载点处的细小裂缝从墙板底部逐渐延伸发展到两端支座处,下部受拉纵筋的应变急剧增大,墙板加载点至跨中范围内形成主裂缝.伴随着一声巨响墙板发生明显的断裂破坏,试验结束.

(4)试件 W-3 破坏形态与 W-4 基本相同(见图 5(c)).但配筋率较大的试件 W-4 比 W-3 的破坏阶段持续时间较长,破坏前有明显的预兆,裂缝宽度较大且较稀疏.

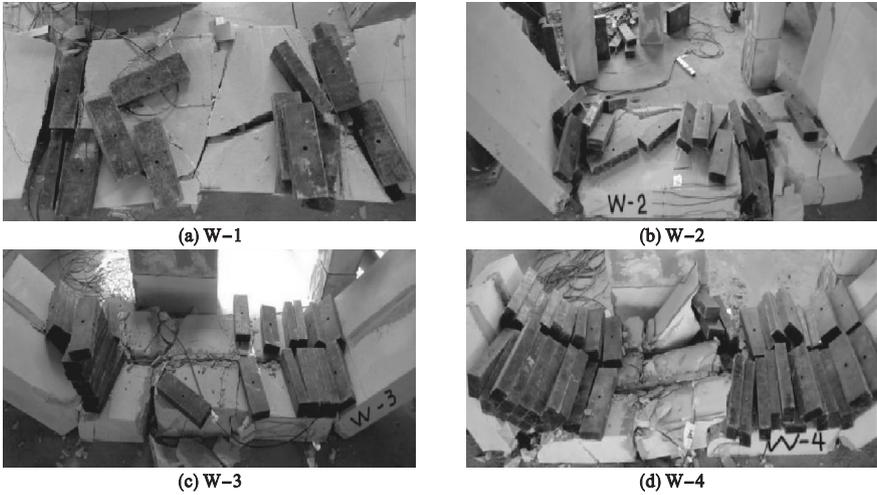


图5 试验现象

Fig. 5 Test phenomenon

极限荷载作用下,试件 W-3 与 W-4 的蒸压加气混凝土保护层首先脱落,露出纵向受力筋(见图 6),导致钢筋和加气混凝土

之间的握裹咬合能力急剧下降,最终钢筋爪不能牢固在墙板内,随着墙板开裂一起脱落。

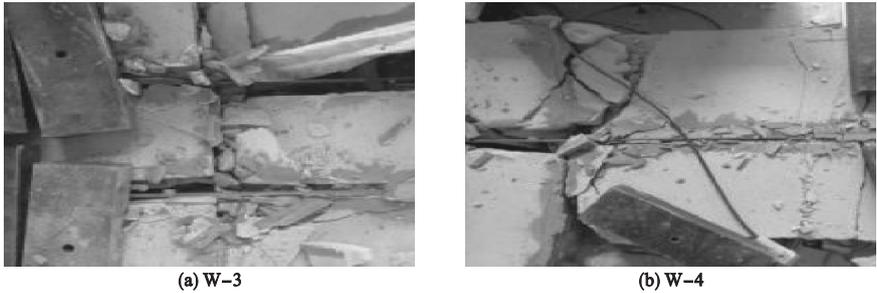


图6 钢筋脱落现象

Fig. 6 Phenomenon of steel reinforcement shedding

3 结果分析

3.1 跨中截面荷载-应变分析

以试件 W-4 为例,蒸压加气混凝土隔墙板试件在各级荷载作用下,抗弯截面的应变曲线如图 7 所示。

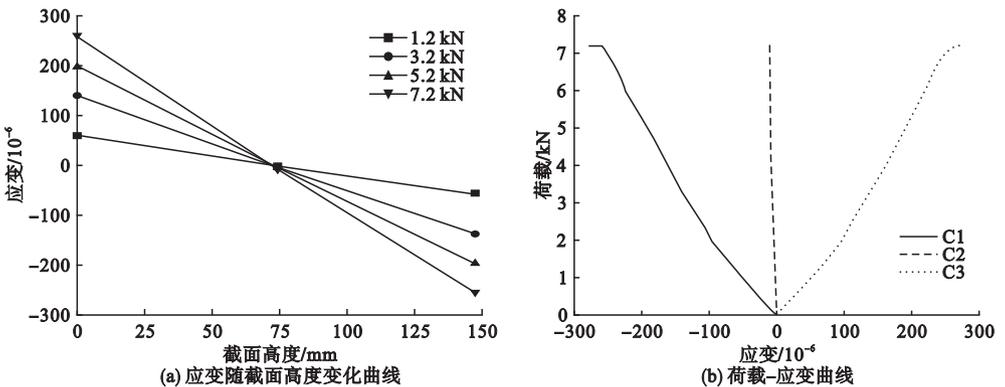


图7 试件 W-4 荷载-应变曲线

Fig. 7 Variation of load-micro strain

由图 7 可知,在各级荷载作用下,跨中截面的应变与截面高度呈线性关系,受压区和受拉区墙板中性轴对称位置的应变值在开裂前大小基本一致,正负相反.试件在弹性阶段和弹塑性阶段截面高度和各测点的应变呈线性关系^[13-15],离中性轴越远应力越大,可以判断受弯截面在受力前后基本保持在一个平

面内变化,因此试件的截面应变符合平截面假定.

3.2 跨度-挠度曲线分析

对隔墙板的跨中挠度按沉降差值法进行修正^[16-17].试件在不同荷载下挠度沿跨度分布规律如图 8 所示.

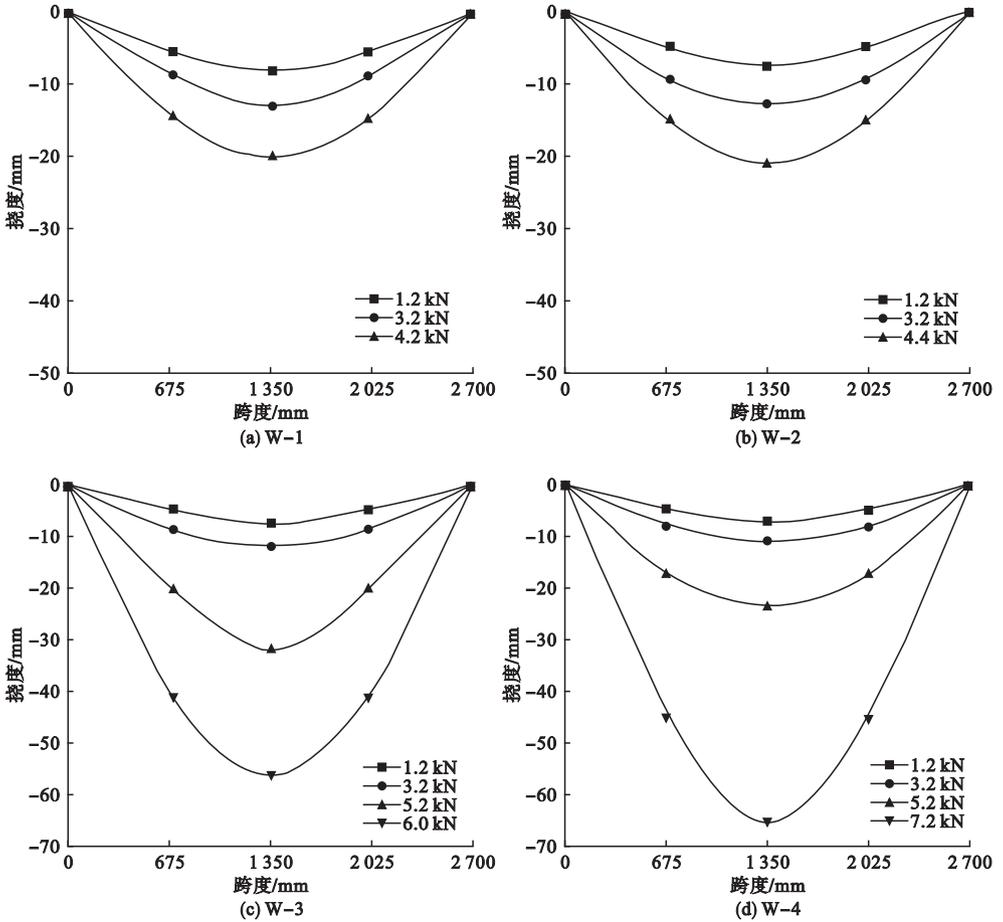


图 8 试件在不同荷载下的挠度-跨度曲线

Fig. 8 Deflection-span curves of each specimen under different loads

由图 8 分析可得:

①随着荷载的不断增大,试件的挠度逐渐增大,其挠度的变化规律近似正弦半波曲线^[18].

②砌块连接形式对挠度变形和极限荷载影响不大,虽企口 W-2 试件的极限荷载略大于平口 W-1 试件,但企口连接的墙板抗弯性能提高效果并不明显,且考虑到加工问

题,可直接采用平口连接.

③配筋墙板承受的极限荷载远大于无筋墙板.

④在同级荷载作用下,配筋率越大,挠度越小.

3.3 墙板荷载-位移曲线

素墙板荷载-位移曲线如图 9 所示,配筋墙板荷载-位移曲线如图 10 所示.

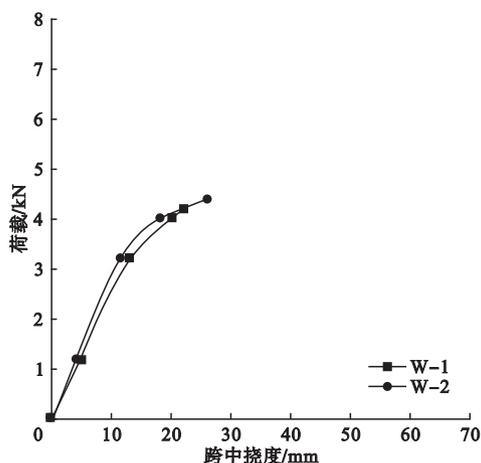


图9 W-1、W-2 荷载-位移曲线

Fig. 9 W-1, W-2 load-displacement curves

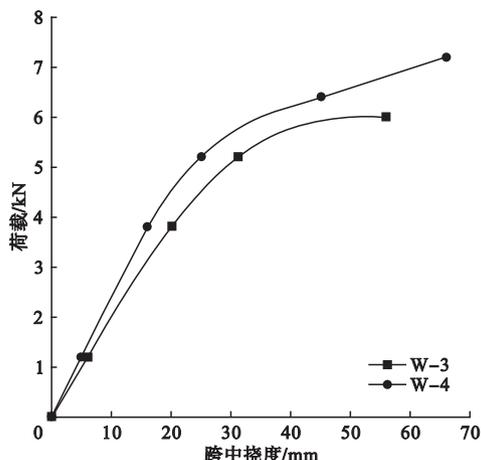


图10 W-3、W-4 荷载-位移曲线

Fig. 10 W-3, W-4 load-displacement curves

由图9可知,不同连接形式对墙板的极限荷载影响不大.企口形式连接墙板承受极限荷载的能力略大于平口形式,但并没有明显的提高.

由图10可知:

①W-4 相比于 W-3, 开裂荷载从 5.0 kN 增加到 5.6 kN, 提高接近 12%, 极限荷载从 6.0 kN 增加到 7.2 kN, 提高了 20%. 说明配筋率越大, 抗弯开裂荷载与抗弯极限荷载越大.

②开裂前墙板的荷载和挠度接近于正比增加, 开裂后挠度增长稍快但曲线斜率变化不大. 说明裂缝出现前板的抗弯刚度接近常数^[19], 裂缝出现后抗弯刚度略有降低但变化

幅度不大.

③随着截面配筋率增大, 截面的抗弯刚度增加, 曲线的斜率增加, 这是因为钢筋的弹性模量比加气混凝土大很多.

4 理论计算值与试验值对比

4.1 装配式墙板正截面抗弯承载力分析

对素墙板 W-1、W-2, 取其挠度达到 $l_0/200$ 左右时的对应荷载作为破坏荷载, 配筋墙板 W-3、W-4 的荷载取 $0.7 M_u$ (M_u 为极限弯矩试验值), 对应的荷载作为破坏荷载 F . 并将 F 与 $1.5G$ 进行比较, 用来验证墙板是否满足抗弯要求, 结果见表4. 表中 f_t 为抗弯构件跨中挠度计算值.

表4 破坏荷载试验值与 1.5G 对比结果

Table 4 Destructive load test value compared with 1.5G

编号	f_t/mm	F/kN	$1.5G/kN$	$F/1.5G$
W-1	13	3.4	3	1.13
W-2	13	3.6	3	1.2
W-3	13.15	4.2	3	1.4
W-4	20.8	5.2	3	1.73

根据表4可知, $F/1.5G$ 均大于 1, 说明破坏荷载达到《建筑隔墙用轻质条板通用技术要求》(JG/T 169—2016) 中对抗弯破坏荷载大于 1.5 倍自重的要求^[20-23].

对配筋墙板 W-3、W-4, 根据现行《蒸压加气混凝土建筑应用技术规范》(JGJ/T 17—2008) 规定, 配筋加气混凝土板材的正截面抗弯承载力可以根据式(1)计算:

$$\begin{cases} M \leq 0.75f_c b x (h_0 - \frac{x}{2}), \\ f_c b x = f_y A_s. \end{cases} \quad (1)$$

式中: M 为试件的极限弯矩设计值; f_c 为试件抗压强度设计值; b 为试件截面宽度; h_0 为截面有效高度; x 为试件的受压区的高度; f_y 为钢筋屈服强度; A_s 为试件下部纵向受拉钢筋截面面积. 计算结果见表5.

表5 正截面极限弯矩试验值与理论值对比

Table 5 Comparison between test value and theoretical value of the normal section limit bending moment

编号	A_s/mm^2	$M_u/$ (kN·m)	$M_u'/$ (kN·m)	M_u'/M_u
W-3	33.2	1.95	0.67	0.34
W-4	66.4	2.34	1.31	0.56

注: M_u 为试验值; M_u' 为规范公式计算值。

根据表5可知:W-3、W-4的开裂弯矩与极限弯矩试验值远大于理论计算值,说明式(1)具有较大的安全储备,偏于安全。说明公式适用于该砌块配筋拼装隔墙板的理论计算。

4.2 开裂荷载计算与分析

当加气混凝土的应变值达到极限拉应变时,受拉区加气混凝土开裂并退出工作,根据规范,受弯板材在开裂荷载之前截面的混凝土应变仍按线性分布,并呈三角形线性分布。根据规范《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010),取加气混凝土抗拉强度 $f_t = f_{ts}$,截面的开裂弯矩计算如下:

$$M_{cr}' = M_c + M_s = \frac{1}{2}f_t b \frac{h}{2} (h - 2 \times \frac{1}{3} \times \frac{h}{2}) + \sigma_s A_s (h - 2a_s). \quad (2)$$

钢筋应力计算如下:

$$\sigma_s = E_s \varepsilon_s = \frac{E_s h_0}{E_c h} f_t. \quad (3)$$

开裂弯矩试验值与理论计算结果见表6。

表6 开裂弯矩试验值与理论值对比

Table 6 Comparison of the test value and theoretical value of cracking moment

编号	A_s/mm^2	$M_{cr}/$ (kN·m)	$M_{cr}'/$ (kN·m)	M_{cr}'/M_{cr}
W-3	33	1.365	1.076	0.79
W-4	66	1.625	1.350	0.83

注: M_{cr} 为试验值; M_{cr}' 为规范公式计算值。

根据表可知,式(2)计算的理论值较小,说明规范的公式具有一定的安全储备。理论

值与试验值的比值在0.79~0.83,说明偏差比较小,理论值与试验值比较接近,式(2)可用于该类砌块配筋组装隔墙板的理论计算。

5 结论

(1)素墙板W-1、W-2均为脆性破坏,灰缝为薄弱区域,企口连接的W-2抗弯性能相比于平口W-1并无明显提高,考虑施工造价因素,不建议采用企口连接的优化方式。配筋墙板W-3、W-4为弯曲破坏,W-4破坏前有明显预兆,表现出了更好的抗弯性能,建议优化配筋率。

(2)所有墙板试件破坏荷载均已超过1.5G,达到了《建筑隔墙用轻质条板通用技术要求》(JG/T 169—2016)要求;配筋试件的抗弯开裂荷载与极限荷载较大,抗弯承载力越大、配筋率越大,在同级荷载作用下,墙板产生的挠度越小。综合考虑抗弯性能与施工造价因素,择优选取配置2Φ6.5钢筋的墙板作为砌块组装墙板优化类型。

(3)对ALC砌块组装墙板的挠度、开裂荷载及抗弯承载力进行计算,并将试验值与理论计算值进行对比,结果表明试验值符合理论计算要求,且具有安全储备。说明《蒸压加气混凝土砌块砌体结构技术规范》(CECS289—2011)提出的公式可指导该砌块隔墙板的理论计算。此装配式轻质ALC砌块组装墙板具有可行性,可推广使用。

参考文献

- [1] YANG H W. Exterior wall thermal insulation technology and application of building energy-saving materials[J]. Construction & design for engineering, 2017(11):41-42.
- [2] 苏宇峰,程才渊,姜勇,等.蒸压加气混凝土板:GB15762—2008[S].北京:中国计划出版社,2008.
(SU Yufeng, CHENG Caiyuan, JIANG Yong, et al. Autoclaved aerated concrete slab: GB15762—2008[S]. Beijing: China Planning Press, 2008.)
- [3] 熊立红,陈国武,林德全,等.配玄武岩纤维格栅蒸压加气混凝土砌块砌体基本力学性能试验[J].建筑科学,2017,33(9):48-54.

- (XIONG Lihong, CHEN Guowu, LIN Dequan, et al. Basic mechanical properties of autoclaved aerated concrete block masonry with basalt fiber grating [J]. Journal of building science, 2017, 33(9):48-54.)
- [4] 李晓丹. 轻质蒸压砂加气混凝土墙板的设计与研究[D]. 西安:长安大学, 2014.
(LI Xiaodan. Design and research of lightweight autoclaved sand aerated concrete wallboard [D]. Xi'an: Chang'an University, 2014.)
- [5] YAVUZ Y, WALEED A M T, JAAFAR M S, et al. AAC - concrete light weight precast composite floor slab [J]. Construction & building materials, 2012, 10(11):405-410.
- [6] 李梅时. 加气混凝土性能试验的研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2016.
(LI Meishi. Research on performance test of aerated concrete [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2016.)
- [7] WANG H, ZHAO Y, CHEN Y. Structural design of large span cast-in-place prestressed concrete hollow slab [J]. Concrete, 2013(6):107-109.
- [8] BARIS B, FURKAN G, ERDEM C, et al. In situ seismic testing of a reinforced autoclaved aerated concrete building [J]. Mauerwerk, 2018, 22(5):305-313
- [9] 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 Chengwen, ZHANG Liang, GAO Lianyu, et al. Experimental study on seismic behavior of a class of autoclaved aerated concrete block walls [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2009, 25(3):426-432.)
- [10] PENG J, PENG X. A review on structure and properties of aerated concrete [J]. Materials review, 2011, 25(1):89-93.
- [11] 刘泰玉. FCP复合墙板抗弯性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2015.
(LIU Taiyu. Research on flexural behavior of FCP composite wallboard [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2015.)
- [12] 杨晓艳. 蒸压加气混凝土板平面内水平刚度的研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2011.
(YANG Xiaoyan. Study on the horizontal stiffness of autoclaved aerated concrete slab in plane [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2011.)
- [13] WILSON S, TANNER J E, JENNIN - GS C. Evaluation of exterior wall behavior using reinforced autoclaved aerated concrete as cladding [J]. Journal of structural engineering, 2018, 144(10):1-7.
- [14] 张国伟, 陈博珊, 肖伟, 等. 蒸压加气混凝土外挂墙板受弯性能研究[J]. 建筑结构, 2016(13):97-102.
(ZHANG Guowei, CHEN Boshan, XIAO Wei, et al. Study on bending behavior of autoclaved aerated concrete wall panels [J]. Building construction, 2016(13):97-102.)
- [15] CAPPAP. A novel method for the simultaneous measurement of temperature and strain using a three-wire connection [J]. Measurement science & technology, 2010, 12(4):502.
- [16] PETER Schöps. Wall-floor-wall interaction considering fill units: fill units can contribute to the vertical load transfer - A proposal [J]. Ce/papers, 2018, 2(4):417-430.
- [17] 张国伟, 谷雷, 苗启松, 等. B03级加气混凝土复合板抗弯性能研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(22):67-77.
(ZHANG Guowei, GU Lei, MIAO Qisong, et al. Study on flexural behavior of B03 grade aerated concrete composite slab [J]. Building structure, 2018, 48(22):67-77.)
- [18] 刘锋涛, 张华侨. 嵌入式CFRP-PCPs复合筋加固混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(9):90-93.
(LIU Fengtao, ZHANG Huaqiao. Experimental study on flexural behavior of concrete beams strengthened with embedded CFRP-PCPs [J]. Building structure, 2015, 45(9):90-93.)
- [19] DANIELE F, ELENA M, GIANPAOLO R. Mechanical characterization of autoclaved aerated concrete masonry subjected to in-plane loading: experimental investigation and FE modeling [J]. Construction & building materials, 2015, 89(121):353-365.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑隔墙用轻质条板通用技术要求: JG/T 169—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Industry general technical requirements for lightweight strips for building partitions: JG/T 169—2016 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2016.)
- [21] FU W Q, ZHANG C W, SUN L, et al. Experimental investigation of a base isolation system incorporating MR dampers with the high-order single step control algorithm [J]. Applied sciences, 2017(4):344.
- [22] ZHANG C W, LI L Y, OU J P. Swinging motion control of suspended structures: principles and applications [J]. Structural control and health monitoring, 2010, 17(5):549-562.
- [23] CHUNG K L, LI Y S, ZHANG C W. Broadband artistic antenna array composed of circularly-polarized wang-shaped patch elements [J]. AEUE-international journal of electronics and communications, 2017, 74:116-122.
(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)