

竖向灰缝处有无砂浆砌体沿齿缝截面 抗弯性能研究

徐春一¹,许纪峰¹,马莹莹²,佟舟³

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中国铁建十六局集团有限公司,北京 100018;
3. 沈阳城市建筑学院土木工程系,辽宁 沈阳 110167)

摘要 目的 研究竖向灰缝处有无砂浆对砌体抗弯性能的影响,并对此类无砂浆砌体是否满足砌体结构规范要求进行论证. 方法 笔者分别以竖向灰缝处有无砂浆、竖向灰缝处砌块截面形式为参数,进行砌体沿齿缝截面的弯曲抗拉试验,对比分析各参数对砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度的影响. 结果 竖向灰缝处砌块截面形式为企口的竖向无砂浆砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度大于截面形式为平口的竖向无砂浆砌体,而竖向有砂浆的平口砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度均大于竖向无砂浆砌体;竖向有砂浆的平口砌体和竖向无砂浆的企口砌体沿齿缝截面的弯曲抗拉强度值均符合砌体规范要求,而竖向无砂浆平口砌体沿齿缝截面的弯曲抗拉强度值不符合砌体规范要求. 结论 在砌块块体之间几何互锁的基础上,能够实现砌体的无砂浆砌筑,为促进无砂浆砌体的推广提供了有效途径. 并提出竖向灰缝处有无砂浆砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度平均值的建议计算公式.

关键词 砌体结构;竖向灰缝;无砂浆;沿齿缝抗弯;蒸压加气混凝土砌块

中图分类号 TU362

文献标志码 A

Experimental Study on Flexural Behavior of Mortar Masonry with and without Vertical Mortar Joints along Teeth Joint Section

XU Chunyi¹, XU Jifeng¹, MA Yingying², TONG Zhou³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Railway 16th Bureau Group Co. Ltd., Beijing, China, 100018; 3. Department of Civil Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang, China, 110167)

Abstract: This paper studies the influence of mortar on the bending resistance of masonry with and

收稿日期:2019-09-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51808353);辽宁省教育厅服务地方项目(Infw201905);沈阳建筑大学
科研创新培育计划项目(CXPY2017022);沈阳市科技局高层次人才创新成果转化补助资金项目
(RC190104)

作者简介:徐春一(1983—),女,副教授,博士,主要从事现代砌体结构及加固改造方面研究.

without vertical mortar joints, and demonstrates whether such mortar-free masonry meets the requirements of masonry structure specifications. The authors takes the presence or absence of mortar at the vertical mortar joint and the section form of the block at the vertical mortar joint as parameters respectively to carry out bending tensile tests of masonry along the section of the tooth joint, and compares and analyzes the influence of various parameters on the bending tensile strength of masonry along the section of the tooth joint. The bending tensile strength of the vertical mortar-free masonry with the section form of tongue-and-groove at the vertical mortar joint is greater than that of the vertical mortar-free masonry with the section form of flat joint, while the bending tensile strength of the vertical mortar-free masonry with the section form of flat joint is greater than that of the vertical mortar-free masonry. The bending tensile strength values of the vertical mortar flat masonry and the vertical mortar-free tongue-and-groove masonry along the section of the slot meet the masonry specification requirements, while the bending tensile strength values of the vertical mortar-free flat masonry along the section of the slot do not meet the masonry specification requirements. On the basis of geometric interlocking between block blocks, mortar-free masonry can be realized, which provides an effective way to promote the popularization of mortar-free masonry. Furthermore, a suggested formula for calculating the average bending tensile strength of masonry with and without mortar at the vertical mortar joint along the section of the tooth joint is proposed.

Key words: masonry structure; vertical mortar joint; mortarless; bending resistance along the tooth seam; autoclaved aerated concrete block

在新型墙体材料大力发展的今天,各类新型砌块应运而生,在各类新型砌块中,包括一类新型无砂浆砌块,其砌体与传统砌块砌筑而成砌体的本质不同在于:无砂浆砌块砌体实现块体之间的有效联结是通过几何互锁、灌孔连接、预应力连接等方式^[1],以几何互锁方式实现的无砂浆砌体墙主要是依赖块体间的几何咬合连接传力^[2].这种砌体形式在一些非抗震的欧洲国家已有使用,而砌体的本质是砂浆和砌块共同受力的整体结构,其强度与灰缝砂浆是否饱满有很大的关系.国家规范要求砌体灰缝砂浆应密实饱满,砖墙水平灰缝的砂浆饱满度不得低于80%;砖柱水平灰缝和竖向灰缝饱满度不得低于90%^[3].

国内外对无砂浆砌体结构均有所研究,而国外的研究较之于国内而言起步较早^[4-12].N. J. Vincent^[9]对一个1:1的全尺寸无砂浆砌块砌体房屋进行了试验,试验结果表明,即使在未经灌孔的条件下,采用无砂浆砌块砌筑的墙体也具有一定的稳定性.M. S.

Jaafar等^[10]通过研究发现,无砂浆砌块间的缝隙允许砌块之间出现一定程度的相对位移,此时砌块间的摩擦力可在一定程度上起到消耗能量的作用;研究结果表明,在不采取加固措施的情况下,普通无砂浆砌块砌体也可直接应用于低抗震设防要求的地区.C. Bella^[11]通过研究指出,增强无砂浆砌块砌体的整体强度、刚度、稳定性可以通过对砌块中的孔洞进行灌孔处理来实现.A. V. Dyskin等^[12]的研究成果表明,外部约束对无砂浆砌块砌体的整体刚度有很大影响.国内对无砂浆砌体结构也有一定研究^[13-18].王天凤等^[15]对无砂浆砌体结构的基本受力性能进行试验研究,得到了无砂浆砌体抗压试件的应力-应变曲线及弹性模量,并且建立了受压和受剪模型,提出了相应的计算公式.黄靓等^[16]还对无砂浆灌孔砌块砌体的基本力学性能进行了相关试验研究.陈功^[17]为了推动无砂浆砌块的发展,设计了一种新型无砂浆砌块,这种砌块能与相邻砌块全部实现几何互锁,并对这种砌块的力学性能进行研究.

目前,无砂浆砌体的实现方式还不成熟,关于无砂浆砌体受力性能的研究还很匮乏,考虑到竖向灰缝处有无砂浆对砌体抗弯性能的影响很大,故对竖向灰缝处有无砂浆砌体进行了抗弯性能试验与理论研究,研究结果表明企口砌块的无砂浆砌筑受力性能良好,满足砌体结构规范要求,为无砂浆砌块砌体在国内的推广应用提供试验依据与理论参考。

1 试验

1.1 试件设计与制作

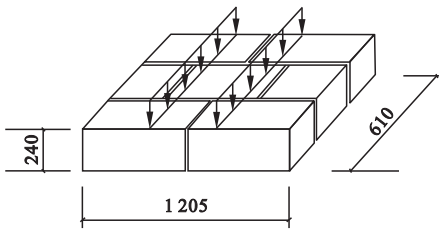
试验采用由大连铁龙新型材料有限公司提供的强度等级为 A5.0 级、容重为 B06 级的蒸压加气混凝土砌块。试验所需砌块的规格

有两种,分别为 600 mm × 200 mm × 240 mm 和 295 mm × 200 mm × 240 mm。砌筑砂浆选用大连铁龙新型材料有限公司生产的加气混凝土专用粘结剂,其中砂浆的立方体抗压强度按照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T70—2009)^[19]通过试验确定。根据《砌体基本力学性能试验方法标准》(GB/T50129—2011)^[20]的要求,在砌筑完成后,在试件的上部放两皮同类砌块,平压 20 d,以使砌筑的试件灰缝平整、密实;并在室内养护不少于 28 d,实验室内温度 15 ℃ ~ 25 ℃,试件长宽高设为 1 205 mm × 610 mm × 240 mm。试验共制作 3 类试件,参数见表 1,试件如图 1 所示。试验中的企口砌块如图 2 所示。

表 1 弯曲抗拉试件设计

Table 1 Design of bending tensile specimens

试件名称	编号	砌块形式	竖向灰缝有无砂浆	砂浆强度/MPa	砂浆灰缝厚度/mm	数量/个
无砂浆企口试件	WA-1 ~ WA-6	企口	无	18.16	5	6
无砂浆平口试件	WB-1 ~ WB-6	平口	无	18.16	5	6
有砂浆平口试件	ZA-1 ~ ZA-6	平口	有	18.10	5	6



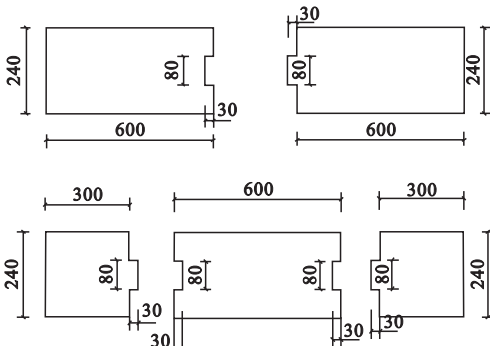
(a) 试件参数



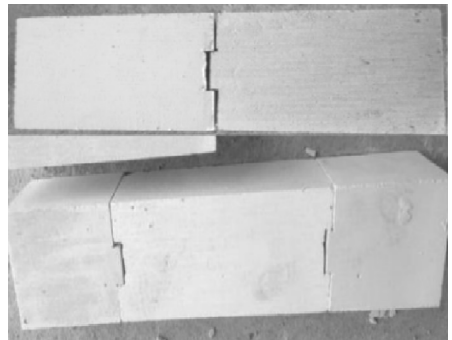
(b) 试验试件

图 1 弯曲抗拉试件及参数

Fig. 1 Bending tensile test piece and its size



(a) 企口砌块参数



(b) 企口砌块

图 2 企口砌块及参数

Fig. 2 Rabbit block its size

1.2 试验装置及加载步骤

按照文献[20]的要求进行试验,试验开始前用记号笔在试件上准确地标记出支座位置和荷载作用线位置,并使用水平仪辅助定位,方便试件的准确安放,并对纯弯区段截面尺寸进行具体量测,精度定为1 mm;为了避免应力集中,以荷载作用线为中轴线均匀地铺一层细砂.按照文献[20]的要求,在试验前对各组试件自重进行测量,精度为10 N.最后将试件严格按照简支梁三分点集中加载方案的规范要求,在试验台上准确就位,试验时墙片一端采用固定铰支座,另一端采用滚动铰支座,支座中心距离墙片端部50 mm.在试件破坏的瞬间对荷载破坏值进行记录,再对破坏现象进行重点拍照,破坏应在试件跨中1/3长度内发生,否则视为无效试验,试验数据不予取用.试验加载装置见图3,加载过程如图4所示.

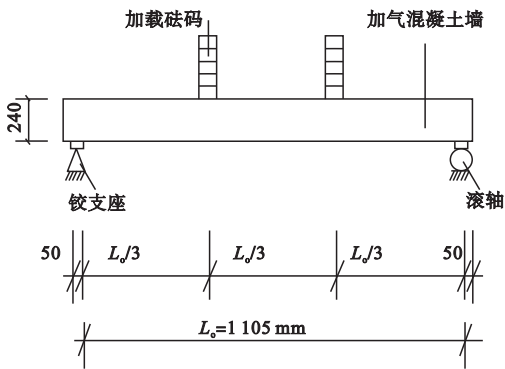


图3 试验装置

Fig. 3 Test device



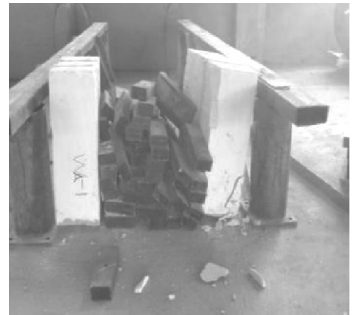
图4 加载过程

Fig. 4 Loading process

2 试验现象及结果分析

2.1 试验现象

试验过程中各试件破坏现象相同,破坏过程比较突然且短暂,没有任何明显的破坏征兆和迹象.试件在加载过程中跨中位移增长很小,随着荷载持续不断增大,当加载至破坏荷载值时,试件突然破坏,表现出明显的脆性破坏特征.试件均在跨中1/3处的纯弯段内发生破坏,属于正常的弯曲受拉破坏.有砂浆的平口试件ZA和无砂浆平口试件WB破坏形式是沿跨中灰缝处发生断裂破坏,无砂浆企口试件WA的破坏形式是沿跨中一截面发生断裂破坏,并没有出现常见的沿灰缝处破坏.分析原因是企口砌块榫卯结构的存在加强了砌块之间的连结,砌体自身的整体性方面也有所增强,故无砂浆企口试件WA表现出未沿灰缝截面的破坏特征.其中有砂浆的平口试件ZA破坏耗时最长,其次是无砂浆企口试件WA,耗时最短的是无砂浆平口试件WB.各试件具体破坏形态如图5所示.



(a) WA试件



(b) ZA试件



(c) WB试件

图5 试件破坏形态

Fig. 5 Failure phenomenon of specimens

2.2 试验结果分析

砌体沿齿缝截面的弯曲抗拉强度按《砌体基本力学性能试验方法标准》(GB/T 50129—2011)的规定,计算如下:

$$f_{tm,m} = \frac{(N_{tm} + 0.75G)l}{bh^2} \quad (1)$$

式中: $f_{tm,m}$ 为弯曲抗拉强度,MPa; N_{tm} 为弯曲抗拉破坏荷载值,N; G 为试件本身的自重,N; l 为计算跨度,mm; b 为截面宽度,mm; h 为截面高度,mm.

各组试件变异系数与砌体沿齿缝截面的弯曲抗拉强度标准差计算如下:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{S}{\bar{f}} \quad (3)$$

式中: S 为弯曲抗拉强度标准差; \bar{f} 为弯曲抗拉强度平均值; f_i 为弯曲抗拉强度试验值; n 为试件的个数; δ 为变异系数.

各试件沿齿缝截面实测弯曲抗拉强度及其变异系数见表2.

表2 沿齿缝截面弯曲抗拉强度试验结果

Table 2 Test results of tensile strength along the section of the tooth gap

试件名称	编号	砂浆强度/MPa	试件自重/N	截面宽度/mm	截面高度/mm	计算跨度/mm	破坏荷载/N	抗拉强度/MPa	抗拉强度平均值/MPa	变异系数
无砂浆企口试件(WA)	WA-1	18.16	1 130	606	240	1 105	6 300	0.23	0.24	0.10
	WA-2	18.16	1 220	608	240	1 103	6 000	0.22		0.10
	WA-3	18.16	1 100	612	240	1 104	5 600	0.20		0.10
	WA-4	18.16	1 330	610	240	1 106	6 900	0.25		0.10
	WA-5	18.16	1 150	608	240	1 105	7 400	0.27		0.10
	WA-6	18.16	1 120	610	240	1 105	6 300	0.22		0.10
无砂浆平口试件(WB)	WB-1	18.16	1 120	610	240	1 104	4 700	0.17	0.16	0.13
	WB-2	18.16	1 210	612	240	1 104	4 100	0.16		0.13
	WB-3	18.16	1 110	608	240	1 105	5 200	0.19		0.13
	WB-4	18.16	1 300	606	240	1 103	3 900	0.15		0.13
	WB-5	18.16	1 180	610	240	1 106	4 300	0.16		0.13
	WB-6	18.16	1 160	609	240	1 104	3 200	0.12		0.13
有砂浆平口试件(ZA)	ZA-1	18.16	1 250	610	240	1 105	12 500	0.42	0.39	0.07
	ZA-2	18.16	1 340	612	240	1 106	11 200	0.38		0.07
	ZA-3	18.16	1 200	608	240	1 104	10 400	0.37		0.07
	ZA-4	18.16	1 410	612	240	1 106	10 100	0.35		0.07
	ZA-5	18.16	1 260	610	240	1 105	12 600	0.43		0.07
	ZA-6	18.16	1 240	610	240	1 105	11 000	0.38		0.07

由表2结果分析可知,有砂浆的平口试件 ZA 与无砂浆平口试件 WB 比较,试件 ZA 沿齿缝截面弯曲抗拉强度均值大于试件 WB,其弯曲抗拉强度均值是试件 WB 的 2.44 倍。同时有砂浆的平口试件 ZA 与无砂浆企口试件 WA 比较,试件 ZA 沿齿缝截面弯曲抗拉强度均值大于试件 WA,其是试件 WA 弯曲抗拉强度均值的 1.70 倍。由以上分析可知竖向灰缝处砂浆饱满度对砌体沿齿缝截面的抗弯性能影响程度较高。无砂浆平口试件 WB 与无砂浆企口试件 WA 比较,试件 WA 沿齿缝截面弯曲抗拉强度均值高于试件 WB,其弯曲抗拉强度均值是试件 WB 的 1.44 倍,分析原因是竖向灰缝处砌块的企口延缓了试件的破坏过程,约束单一砌块滑动,促使砌块相互间接触更加紧密,提高了砌体的整体性和稳定性,对提升其抗弯性能起到了一定作用,说明竖向灰缝处砌块的几何互锁结构可以在一定程度上提高砌体沿齿缝截面的抗弯性能。

3 沿齿缝截面弯曲抗拉强度取值

根据现行国家标准《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)的规定,砌体沿齿缝截面的弯曲抗拉强度平均值计算如下:

$$f_{tm,m} = k_4 \sqrt{f_2} \quad (4)$$

式中: $f_{tm,m}$ 为砌体弯曲抗拉强度平均值; f_2 为砂浆强度值; k_4 为弯曲抗拉强度计算系数,对于混凝土砌块沿齿缝取 $k_4 = 0.081$ 。弯曲抗拉强度试验值与规范计算值比较见表3。

式(4)适用于混凝土砌块,而试验采用的蒸压加气混凝土砌块,由表3可知三种试件的实测弯曲抗拉强度皆与式(4)规范计算值有很大出入,故结合式(4)及表3中数据进行回归分析,对式(4)系数进行修正,具体修正结果见式(5)、式(6)、式(7)。

有砂浆的平口试件 ZA 沿齿缝截面弯曲抗拉强度:

$$f_{tm,m} = 0.087 \sqrt{f_2} \quad (5)$$

表3 弯曲抗拉强度试验值与规范计算值比较

Table 3 Comparison of flexural tensile strength test value with the standard calculation value

试件名称	试件 编号	规范计算值 f_{v1}/MPa	试验值 $f_{v,m}/\text{MPa}$	$f_{v,m}/f_{v1}$
无砂浆企 口试件(WA)	WA-1	0.34	0.23	0.68
	WA-2	0.34	0.22	0.65
	WA-3	0.34	0.20	0.59
	WA-4	0.34	0.25	0.74
	WA-5	0.34	0.27	0.79
	WA-6	0.34	0.22	0.65
无砂浆平 口试件(WB)	WB-1	0.34	0.17	0.50
	WB-2	0.34	0.16	0.47
	WB-3	0.34	0.19	0.56
	WB-4	0.34	0.15	0.44
	WB-5	0.34	0.16	0.47
	WB-6	0.34	0.12	0.35
有砂浆平 口试件(ZA)	ZA-1	0.34	0.42	1.24
	ZA-2	0.34	0.38	1.12
	ZA-3	0.34	0.37	1.09
	ZA-4	0.34	0.35	1.03
	ZA-5	0.34	0.43	1.26
	ZA-6	0.34	0.38	1.12

无砂浆平口试件 WB 沿齿缝截面弯曲抗拉强度:

$$f_{tm,m} = 0.035 \sqrt{f_2} \quad (6)$$

无砂浆企口试件 WA 沿齿缝截面弯曲抗拉强度:

$$f_{tm,m} = 0.051 \sqrt{f_2} \quad (7)$$

试验实测结果平均值和式(4)、式(5)、式(6)、式(7)的计算结果见表4。

表4 沿齿缝截面弯曲抗拉强度试验实测值与公式计算值

Table 4 Measured value and formula calculated value of flexural tensile strength test along tooth gap section MPa

试件	弯曲抗拉强度 试验实测值	弯曲抗拉强度 规范计算值	弯曲抗拉强度 修正后计算值
ZA	0.39	0.34	0.37
WB	0.16	0.34	0.15
WA	0.24	0.34	0.22

由表4可以得出:

(1)就无砂浆平口试件 WB 和无砂浆企

口试件 WA 而言,沿齿缝截面弯曲抗拉强度试验实测值都小于规范计算值,导致结构存在安全隐患,表明砌体结构设计规范公式对无砂浆平口砌体和无砂浆企口砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度的计算不适用。

(2)式(5)、式(6)、式(7)的计算结果与试验结果基本一致,略低于试验结果,考虑到安全储备因素,故把式(5)、式(6)、式(7)分别作为有砂浆平口砌体 ZA、无砂浆平口砌体 WB 和无砂浆企口砌体 WA 弯曲抗拉强度平均值的建议计算公式。

依据现行砌体规范《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011),砌体标准强度与平均强度有如下关系:

$$f_k = f_m (1 - 1.645\delta_f). \quad (8)$$

式中: δ_f 为变异系数,由表2可知,有砂浆平口砌体变异系数 $\delta_f = 0.07$,无砂浆平口砌体变异系数 $\delta_f = 0.13$,无砂浆企口砌体变异系数 $\delta_f = 0.10$,代入式(8)得:

有砂浆平口砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度标准值为

$$f_{tm,k} = 0.88f_{tm,m}. \quad (9)$$

无砂浆平口砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度标准值为

$$f_{tm,k} = 0.79f_{tm,m}. \quad (10)$$

无砂浆企口砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度标准值为

$$f_{tm,k} = 0.84f_{tm,m}. \quad (11)$$

依据现行砌体结构设计规范,砌体的材料分项系数取 $\gamma_f = 1.6$,砌体标准值与设计值之间的关系为

$$f = f_k / \gamma_f. \quad (12)$$

将各组弯曲抗拉强度标准值代入式(12)得:

有砂浆平口砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度设计值为

$$f_{tm,d} = 0.55f_{tm,m}. \quad (13)$$

无砂浆平口砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度设计值为

$$f_{tm,d} = 0.49f_{tm,m}. \quad (14)$$

无砂浆企口砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度设计值为

$$f_{tm,d} = 0.53f_{tm,m}. \quad (15)$$

由式(9)~式(15)对弯曲抗拉强度的标准值与设计值进行计算,结果见表5。

表5 沿齿缝截面弯曲抗拉强度标准值与设计值
Table 5 Standard values and design values of bending tensile strength along the section of the tooth gap MPa

类别	弯曲抗拉强度	弯曲抗拉强度
	标准值	设计值
有砂浆平口砌体	0.33	0.21
无砂浆平口砌体	0.12	0.08
无砂浆企口砌体	0.19	0.12

由《砌体结构设计规范》(GB 50003—2011)可知,当砂浆强度等级在 Mb10 以上时,混凝土和轻集料混凝土砌块砌体沿齿缝截面的弯曲抗拉强度标准值、设计值分别为 0.17 MPa、0.11 MPa,与以上蒸压加气混凝土砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度的标准值与设计值对比,可知有砂浆平口砌体和无砂浆企口砌体沿齿缝截面的弯曲抗拉强度均满足规范要求。只有无砂浆平口砌体沿齿缝截面的弯曲抗拉强度不满足规范要求。

4 结 论

(1)竖向无砂浆企口砌体 WA 和竖向无砂浆平口砌体 WB 沿齿缝截面弯曲抗拉强度试验值都小于竖向有砂浆平口砌体 ZA,说明竖向灰缝处有无砂浆对砌体沿齿缝截面的弯曲抗拉强度有较大的影响。竖向无砂浆企口砌体 WA 与竖向无砂浆平口砌体 WB 相比,砌体 WA 的弯曲抗拉强度试验值皆高于 WB,表明砌体竖向灰缝处砌块的截面形式同样也是影响其沿齿缝截面弯曲抗拉强度的一个重要因素。

(2)利用回归分析的方法对规范公式进行修正,得出该类蒸压加气混凝土砌块砌体

沿齿缝截面的弯曲抗拉强度建议计算公式. 计算结果与试验值吻合较好, 可为该类蒸压加气混凝土无砂浆砌块砌体的结构设计提供参考.

(3) 针对蒸压加气混凝土砌块砌体, 竖向有砂浆平口砌体 ZA 和竖向无砂浆企口砌体 WA 满足规范要求, 无砂浆平口砌体 WB 不符合我国规范要求. 单纯采用无砂浆砌块砌体不适合有抗震要求地区使用, 但可以在几何互锁方式的基础上来实现无砂浆砌筑.

参考文献

- [1] 黄靓. 一种新型绿色结构体系-无砂浆砌体结构[J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(增刊): 107-110.
(HUANG Liang. A new type of green structural system-no mortar masonry structure [J]. Engineering journal of Wuhan university, 2015, 48(S): 107-110.)
- [2] 李晓希. 自保温无砂浆砌块砌体的基本力学性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
(LI Xiaoxi. Research on mechanical properties of self-insulation grouted mortarless concrete block reinforced masonry. [D]. Changsha: Hu'nan University, 2016.)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体结构工程施工规范: GB50924—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for construction of masonry structures engineering: GB50924—2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.)
- [4] THANOON W A M, ALWATHAF A H, NOORZAEI J, et al. Finite element analysis of interlocking mortarless hollow block masonry prism [J]. Computers & structures, 2008, 86(6): 520-528.
- [5] JAYASINGHE C, MALLAWAARACHCHI R S. Flexural strength of compressed stabilized earth masonry materials [J]. Materials and design, 2009, 30(9): 3859-3868.
- [6] SAFIEE NA, JAAFAR MS, ALWATHAF AH, et al. Structural behavior of mortarless interlocking load bearing hollow block wall panel under out-of-plane loading nor [J]. Advances in structural engineering, 2011, 14(6): 1185-1196.
- [7] ALI M, GULTOM R J, CHOUW J. Capacity of innovative interlocking blocks under monotonic loading [J]. Construction and building materials, 2012, 37(12): 812-821.
- [8] DRYSDALE R G, HAMID A A. Behavior of concrete block masonry prisms under axial compression [J]. ACI journal proceedings, 1979, 76(6): 898-915.
- [9] VINCENT N J. Stability of dry-stack masonry [D]. Johannesburg: University of the Witwatersrand, 2005.
- [10] JAAFAR M S, THANOON W A, NAJM A M S, et al. Strength correlation between individual

block, prism and basic wall panel for load bearing interlocking mortarless hollow block masonry [J]. Construction and building materials, 2006, 20: 492-498.

- [11] BEALL C. New masonry products and materials [J]. Progress in structural engineering and materials, 2000, 2(2): 296-303.
- [12] DYSKIN A V, PASTERNAK E, ESTRIN Y. Mortarless structures based on topological interlocking [J]. Frontiers of structural and civil engineering, 2012, 6(2): 188-197.
- [13] THANOON W A, ALWATHAF A H, NOORZAEI J, et al. Nonlinear finite element analysis of grouted and ungrouted hollow interlocking mortarless block masonry system [J]. Engineering structures, 2008, 30(6): 1560-1572.
- [14] 黄靓, 王路. 无砂浆配筋砌体剪力墙抗震试验的滑移研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(4): 794-800.
(HUANG Liang, WANG Lu. Study on slide phenomenon of mortarless reinforced masonry shear walls seismic experiment [J]. Journal of railway science and engineering, 2017, 14(4): 794-800.)
- [15] 王天凤. GFRP 增强无砂浆砌块砌体基本力学性能研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
(WANG Tianfeng. Based mechanical properties of GFRP reinforced mortar-less block masonry [D]. Changsha: Hu'nan University, 2014.)
- [16] 黄靓. 无砂浆灌孔砌块砌体的基本力学性能试验 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2015, 48(3): 339-343.
(HUANG Liang. Experimental study of basic mechanical properties of grouted mortarless masonry [J]. Journal of Wuhan university (engineering edition), 2015, 48(3): 339-343.)
- [17] 陈功. 新型无砂浆砌块设计及其砌体抗剪性能试验研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2015.
(CHEN Gong. Shape optimization of innovative mortar less block sand experimental research on the masonry shear performance [D]. Xiangtan: Hu'nan University of Science and Technology, 2015.)
- [18] 祝明桥. 新型无砂浆再生混凝土砌块受力性能试验研究 [J]. 建筑结构, 2016, 46(16): 45-48.
(ZHU Mingqiao. Experimental study on mechanical behavior of new type recycled aggregate concrete mortarless blocks [J]. Building structure, 2016, 46(16): 45-48.)
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性能试验方法标准: JGJ/T70—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
(Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for test methods of basic performance of building mortar: JGJ / T70—2009 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2009.)
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 砌体基本力学性能试验方法标准: GB/T50129—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of basic mechanical properties of masonry: GB / T50129—2011) [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2012.)
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)