

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201809149

碱激发矿渣混凝土空心砌块砌体抗压强度试验

郑文忠^{1,2}, 焦贞贞^{1,2}, 邹梦娜^{1,2}, 王 英^{1,2}

(1. 结构工程灾变与控制教育部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090;

2. 土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室(哈尔滨工业大学), 哈尔滨 150090)

摘 要: 为考察碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块(alkali-activated slag ceramsite concrete hollow block, 简称 AASCHB)砌体的轴心受压性能, 完成了由强度等级为 MU7.5、MU10、MU15 的 AASCHB 和强度等级为 Mb20、Mb25、Mb30 的碱激发矿渣陶砂砂浆(alkali-activated slag mortar with pottery sand, 简称 AASM)砌筑的 36 个砌块砌体试件的轴心受压试验. 试验结果表明: AASCHB 砌体的抗压强度随 AASCHB 抗压强度的增大而增大; 而 AASM 抗压强度对砌体抗压强度的影响相对复杂. 用 AASCHB 和 AASM 砌筑的砌块砌体轴心抗压强度试验值普遍低于按 GB 50003—2011《砌体结构设计规范》砌体轴心抗压强度计算公式的预估值. 在《砌体结构设计规范》砌体轴心抗压强度计算公式的基础上, 通过引入 AASM 特性系数, 调整砂浆强度影响修正系数, 建立了以 AASCHB 抗压强度和 AASM 抗压强度为关键参数的这类新型砌块砌体的轴心抗压强度计算公式.

关键词: 碱激发矿渣陶粒混凝土; 碱激发矿渣陶砂砂浆; 空心砌块; 砌体; 抗压强度

中图分类号: TU375.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)06-0040-06

Experiment of axial compressive strength of alkali-activated slag concrete hollow block masonry

ZHENG Wenzhong^{1,2}, JIAO Zhenzhen^{1,2}, ZOU Mengna^{1,2}, WANG Ying^{1,2}

(1. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China;

2. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters (Harbin Institute of Technology), Ministry of Industry and Information Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: To investigate the axial compressive performance of alkali-activated slag ceramsite concrete hollow block (AASCHB) masonry, a total of 36 masonry specimens of the AASCHB at MU7.5, MU10, and MU15 as well as alkali-activated slag mortar with pottery sand (AASM) at Mb20, Mb25, and Mb30 were tested. Results show that the axial compressive strength of the AASCHB masonry increased with that of AASCHB, while the axial compressive strength of the AASM had a complicated impact on that of the masonry. Based on the formula provided in *Code for Design of Masonry Structures* (GB 50003—2011), the estimated values of the axial compressive strength of the masonry using AASCHB and AASM are generally higher than the experimental results. By introducing the characteristic coefficient of AASM and adjusting the correction coefficient of the axial compressive strength for mortar, a formula for the axial compressive strength of the new type of block masonry with the key parameters of the compressive strength of AASCHB and AASM was proposed, which is in accordance with the codified formula of the masonry axial compressive strength adopted in *Code for Design of Masonry Structures*.

Keywords: alkali-activated slag ceramsite concrete; alkali-activated slag mortar with pottery sand; hollow block; masonry; axial compressive strength

粒化高炉矿渣(简称矿渣)是指在高炉冶炼生铁时,得到的以硅铝酸盐为主要成分的熔融物,经淬冷成粒形成的具有潜在活性的材料^[1]. 中国每年矿渣的产量约为 10 亿 t,粉煤灰的排放量到 2020 年预计达到 9 亿 t^[2]. 碱激发矿渣胶凝材料是以具有潜在活性的工业副产品为原料,采用适当的碱性激发剂激发形成的胶凝材料,其制备过程耗能低、排放

低,还具有与普通硅酸盐水泥相似的性能^[3]. 此外,碱激发矿渣胶凝材料具有快硬早强、高强特点,在高温下性能较稳定^[4-5]. 同时,陶粒、陶砂是经过高温煅烧制得,用其代替普通骨料与碱激发矿渣胶凝材料浆体混合制备的砌块和砌筑砂浆砌筑的砌体似应具有较好的防火性能.

普通混凝土空心砌块砌体中常用的水泥砂浆和混合砂浆的抗压强度等级一般为 Mb7.5 ~ Mb20,而碱激发矿渣陶砂砂浆(AASM)的抗压强度等级为 Mb20 ~ Mb30. GB 50003—2011《砌体结构设计规范》^[6]中的普通混凝土砌块砌体轴心抗压强度的计

收稿日期: 2018-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(51478142)

作者简介: 郑文忠(1965—),男,博士生导师,长江学者特聘教授

通信作者: 郑文忠, hitwzheng@163.com

算公式的适用范围为砂浆抗压强度不大于 20 MPa 且不高干块体强度. 考虑到碱激发矿渣凝胶材料相比于普通水泥强度高,很容易就能制备出抗压强度等级为 Mb20 及以上的 AASM. 同时,其收缩明显高于普通水泥砂浆和混合砂浆^[7]. 因此,碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块(AASCHB)砌体的抗压强度能否按《砌体结构设计规范》^[6]进行计算,是关注的问题.

1 试验材料

1.1 原材料

矿渣:“哈尔滨矿渣”来自哈尔滨三发新型节能建材有限公司、“唐山矿渣”来自唐山唐龙新型建材有限公司,比表面积分别为 379 m²/kg 和 424 m²/kg.

粉煤灰:黑龙江省双达电力设备有限公司生产

的 I 级粉煤灰,密度为 2.43 g/cm³.
陶砂:河南省宇轩环保科技有限公司生产,粒径为 1 mm,密度为1.8 g/cm³,孔隙率为 53%.
矿渣、粉煤灰和陶砂的化学成分见表 1.
陶粒:河南省宇轩环保科技有限公司生产,粒径为 5 ~ 16 mm,干表面密度为 830 kg/m³,吸水率为 20%,筒压强度为 4.2 MPa.
水玻璃:液态硅酸钠水玻璃,其模数为 3.2,含水率为 64.5%. 在试验的过程中改变氢氧化钠用量来调整水玻璃模数.
氢氧化钠:天津市大陆化学试剂厂生产的颗粒状分析纯氢氧化钠,其 NaOH 含量≥96%.
碳酸钠:天津市致远化学试剂有限公司生产的粉状分析纯碳酸钠,其 Na₂CO₃ 含量≥99.8%.

表 1 原材料的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of the raw materials

%

名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	SO ₃	其他
哈尔滨矿渣	34.18	12.64	26.60	15.32	0.69	8.11	0.42	0.50	1.51
唐山矿渣	32.83	17.19	36.69	0.38	0.37	8.20	0.65	1.94	1.75
粉煤灰	58.29	21.50	7.94	4.73	1.59	1.57	0.69	0.31	3.38
陶砂	62.12	16.32	3.26	7.84	1.62	2.04	1.60	—	5.20

1.2 AASCHB 和 AASM 配合比

试验所采用的砌块是由矿渣、陶砂、陶粒、激发

剂配制而成的 AASCHB,砌筑砂浆是由矿渣、粉煤灰、陶砂、激发剂配制而成的 AASM,配合比见表 2、3.

表 2 AASCHB 的配合比

Tab. 2 Mix proportions of AASCHB

kg/m³

强度等级	唐山矿渣	哈尔滨矿渣	陶砂	陶粒		水玻璃	NaOH	水
				5 ~ 10 mm	10 ~ 16 mm			
MU7.5	0	451	768	130	303	131	29	76
MU10	0	457	776	131	307	134	20	69
MU15	381	0	540	457	320	110	25	64

表 3 AASM 的配合比

Tab. 3 Mix proportions of AASM

kg/m³

强度等级	哈尔滨矿渣	粉煤灰	陶砂	水玻璃	NaOH	水	Na ₂ CO ₃
Mb20	510	0	1 062	0	22	219	6
Mb25	221	221	1 106	158	27	90	0
Mb30	247	247	1 029	182	36	92	0

1.3 材料性能试验

1.3.1 AASCHB 抗压强度

AASCHB 主砌块尺寸为 390 mm × 190 mm × 190 mm,空心率 48.3%;辅助砌块尺寸为 190 mm × 190 mm × 190 mm,空心率为 36.0%. 砌块的细部尺寸见图 1. 按照 GB/T 4111—2013《混凝土砌块和砖试验方法》^[8]对砌块进行轴心抗压试验,每组 5 个. AASCHB 抗压强度见表 4.

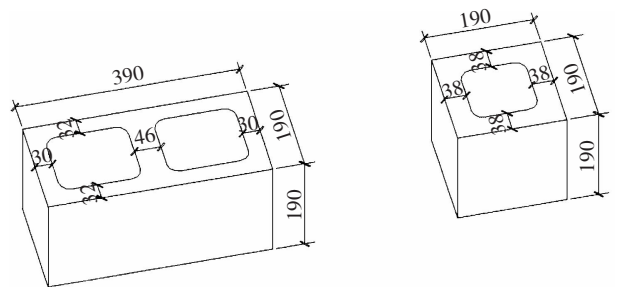


图 1 AASCHB 尺寸(mm)

Fig. 1 Geometrical sizes of AASCHB (mm)

表 4 AASCHB 抗压强度实测值

Tab. 4 Measured axial compressive strengths of AASCHB

砌块强度等级	抗压强度/MPa	变异系数
MU7.5	8.06	0.16
MU10	10.84	0.09
MU15	16.10	0.13

注:试件尺寸为 390 mm×190 mm×190 mm.

1.3.2 AASM 抗压强度

根据 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[9] 测试砂浆抗压强度试件的尺寸为 70.7 mm×70.7 mm×70.7 mm,试块底模材质为钢底模.而《砌体结构设计规范》^[6] 中规定,确定砂浆强度等级时应采用同类块体作为试块底模.由砖底模改为钢底模后,砂浆抗压强度降低,因此,将其抗压强度实测值乘以 1.35 作为折算后抗压强度值^[9].这里需要指出,之所以对钢底模成型的砂浆试块抗压强度实测值通过乘以 1.35 的系数进行折算,是因为砖底模会吸取砂浆中多余的水分,结硬后的砂浆强度相对较高,而钢底模不吸水,故由砖底模改为钢底模后,砂浆抗压强度会降低^[10].AASM 抗压强度实测值及折算值见表 5.

表 5 AASM 抗压强度实测值及折算值

Tab. 5 Axial compressive strengths of AASM MPa

砂浆强度等级	抗压强度	折算后抗压强度
Mb20	16.22	21.90
Mb25	21.43	28.93
Mb30	25.98	35.07

注:每个强度等级的砂浆抗压强度与其相应的砌体轴心抗压试验同时进行;后继结果分析均采用折算后的砂浆抗压强度平均值.

2 试验设计

2.1 试件设计

轴心受压试验的试件设计参照 GB/T 50129—2011《砌体基本力学性能试验方法标准》^[11] 中规定的砌筑方法,试件尺寸为 990 mm×590 mm×190 mm,见图 2.试验共制作了由 3 个不同强度等级的 AASCHB 和 3 个不同强度等级的 AASM 砌筑的 6 组轴心抗压试件,每组 6 个.试件命名为 W7.5-20,其中“W”表示墙,第一个编号“7.5”表示砌块抗压强度等级,第二个编号“20”表示砂浆抗压强度等级,依次类推,所有试件顶部用砂浆找平.轴心抗压试验设计及试件个数见表 6.

2.2 试验加载装置及测量方案

本试验采用《砌体基本力学性能试验方法标准》^[11] 中规定的轴心抗压强度试验方案.所有试件顶

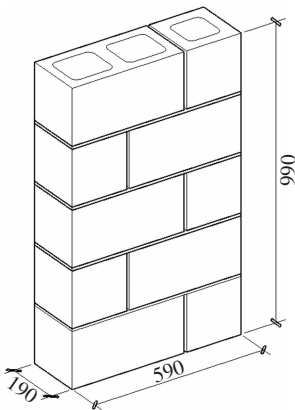


图 2 砌体轴心受压试件尺寸 (mm)

Fig. 2 Geometrical size of axial compression specimen of masonry (mm)

表 6 抗压试验设计及试件个数

Tab. 6 Design of axial compressive strength test and the number of specimens 个

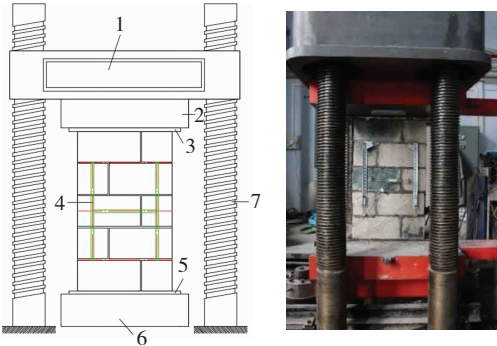
砌块强度等级	砂浆强度等级		
	Mb20	Mb25	M30
MU7.5	6	—	—
MU10	6	6	—
MU15	6	6	6

注:表中砌体尺寸为 990 mm×590 mm×190 mm.

部用石膏进行二次找平,确保加载面的平整.

砌体轴压试验在 10 000 kN 电液伺服压剪机上进行,加载装置见图 3.试验正式加载前,采用预计破坏荷载 5%~20% 反复预压 3~5 次,在 2 次宽面的轴向变形之差小于 10%^[11] 之后进行正式加载.正式加载采用等速率位移控制,上升段为 0.3 mm/min,下降段为 0.2 mm/min,以此来避免砌体突然破坏.

所有试件在加载过程中仔细观察并记录试件初始裂缝的出现位置及荷载大小、裂缝的发展情况、试件的破坏形态及破坏荷载的大小.



(a) 试验加载装置示意 (b) 实际加载装置

注:1-压力机横梁;2-上加载板;3-上钢板;4-位移传感器;5-下钢板;6-下加载板;7-压力机立柱

图 3 试验加载装置

Fig. 3 Test setup

3 结果与分析

3.1 试验现象

根据对试件轴心受压过程的观察和统计分析,AASCHB 砌体受压变形过程与普通混凝土空心砌块砌体基本相似. AASCHB 砌体从开始受力到破坏的整个过程可分为 4 个阶段:弹性阶段、单砖裂缝阶段、贯穿裂缝阶段和破坏阶段.

在弹性阶段,砌体处于弹性受力状态,受压变形较小. 当荷载增长到极限荷载的 40% ~ 80% 时,内部发出轻微的撕裂声,单个块体开始出现沿砌块高度贯通的微裂缝,通常出现在试件宽面中间第 2 ~ 3 匹的沿竖向灰缝处(图 4(a)),或在宽面第 1 匹的沿孔边处(图 4(b)),裂缝发展较缓慢.



图 4 初裂缝出现位置
Fig.4 Initial crack location

随着荷载的进一步增加,宽面出现的裂缝越来越多,沿孔边的细小裂缝逐渐开始向内扩展,沿灰缝竖向的微裂缝逐渐上下贯通. 同时,窄面也开始出现

竖向裂缝并逐渐扩宽. 内部的劈裂声越来越大,裂缝发展速度变快. 贯穿的裂缝越来越多,裂缝宽度不断变大,逐渐形成贯通的裂缝群,将砌体分割为若干个长细柱. 随着加载的继续,长细柱开始出现失稳或被压碎,砌块壁出现严重外鼓,随竖向压缩变形的增大而砌体承载力降低,AASCHB 砌体的破坏形态见图 5.



图 5 试件典型破坏形态
Fig.5 Typical failure patterns of the specimens

3.2 试验结果

AASCHB 砌体轴心抗压强度 $f_{m,t}$ 根据《砌体基本力学性能试验方法标准》^[11] 公式计算:

$$f_{m,t} = \frac{N}{A} = \frac{N}{bh}, \tag{1}$$

式中: N 为峰值荷载(N); A 、 b 、 h 分别为试件的截面面积(mm^2)、平均宽度(mm)和平均厚度(mm).

AASCHB 砌体轴心抗压试验结果见表 7. 在砂浆强度一定时,AASCHB 砌体抗压强度随砌块抗压强度的增大而增大. 在砌块强度一定时,AASM 抗压强度对 AASCHB 砌体抗压强度的影响相对复杂.

表 7 砌体轴心抗压强度试验结果
Tab.7 Test results of axial compressive strength of masonry

组号	序号	f_1/MPa	f_2/MPa	P_{cr}/kN	P_u/kN	$(P_{cr}/P_u)/\%$	$f_{m,t}/\text{MPa}$	f_m/MPa	变异系数
W7.5-20	1	8.06	21.90	246	422.8	58.2	3.78	4.43	0.19
	2	8.06	21.90	420	536.4	78.3	4.77		
	3	8.06	21.90	270	368.0	73.4	3.26		
	4	8.06	21.90	385	484.8	79.4	4.32		
	5	8.06	21.90	406	533.6	76.1	4.74		
	6	8.06	21.90	496	641.0	77.4	5.70		
W10-20	1	10.84	21.90	500	828.4	60.4	7.58	7.19	0.16
	2	10.84	21.90	550	798.8	68.9	7.20		
	3	10.84	21.90	—	—	—	—		
	4	10.84	21.90	518	671.0	77.2	6.01		
	5	10.84	21.90	621	808.4	76.8	7.30		
	6	10.84	21.90	491	860.8	57.0	7.85		

续表 7

组号	序号	f_1/MPa	f_2/MPa	P_{cr}/kN	P_u/kN	$(P_{\text{cr}}/P_u)/\%$	$f_{\text{m,t}}/\text{MPa}$	f_{m}/MPa	变异系数
W10-25	1	10.84	28.93	319	645.8	49.4	5.91	5.90	0.18
	2	10.84	28.93	444	732.8	60.6	6.70		
	3	10.84	28.93	400	828.0	48.3	7.52		
	4	10.84	28.93	404	563.2	71.7	4.98		
	5	10.84	28.93	380	537.6	70.7	4.79		
	6	10.84	28.93	430	624.8	68.8	5.49		
W15-20	1	16.10	21.90	597	818.4	72.9	7.37	9.21	0.17
	2	16.10	21.90	709	1 062.0	66.8	9.41		
	3	16.10	21.90	843	1 359.6	62.0	11.98		
	4	16.10	21.90	650	899.8	72.2	8.05		
	5	16.10	21.90	417	1 016.8	41.0	8.96		
	6	16.10	21.90	670	1 072.0	62.5	9.47		
W15-25	1	16.10	28.93	750	1 001.6	74.9	8.97	8.64	0.17
	2	16.10	28.93	530	767.8	69.0	6.89		
	3	16.10	28.93	612	966.0	63.4	8.57		
	4	16.10	28.93	476	839.8	56.7	7.50		
	5	16.10	28.93	570	1 237.2	46.1	11.05		
	6	16.10	28.93	450	997.4	45.1	8.88		
W15-30	1	16.10	35.07	628	844.8	74.3	7.57	7.51	0.20
	2	16.10	35.07	304	363.8	83.6	3.16		
	3	16.10	35.07	800	1 142.2	70.0	10.03		
	4	16.10	35.07	430	822.6	52.3	7.25		
	5	16.10	35.07	538	675.0	79.7	6.05		
	6	16.10	35.07	629	741.0	84.9	6.65		

注: f_1 为 AASCHB 抗压强度, f_2 为 AASM 折算后抗压强度, P_{cr} 为砌体开裂荷载, P_u 为砌体最大峰值破坏荷载, $f_{\text{m,t}}$ 为砌体抗压强度实测值, f_{m} 为 AASCHB 砌体抗压强度平均值;试件 W10-20-3 在吊运中损坏,故无试验数据;W15-30-2 试验失真,后续不参与分析。

3.3 试验结果分析

中国现行国家标准《砌体结构设计规范》^[6] 规定砌体轴心抗压强度平均值按下式计算:

$$f_m = k_1 f_1^\alpha (1 + 0.07 f_2) k_2, \tag{2}$$

式中: f_1 为砌块抗压强度平均值 (MPa); f_2 为砂浆抗压强度平均值 (MPa); k_1 为与块材类别有关的系数,对于混凝土砌块, $k_1 = 0.46$; α 为与块材高度有关的系数,对于混凝土砌块, $\alpha = 0.9$; k_2 为砂浆强度影响修正系数,当 $f_2 > 10$ MPa 时, $k_2 = 1.1 - 0.01 f_2$.

考虑到 AASCHB 的孔洞率和平整度与普通混凝土空心砌块基本相当,故 k_1 取 0.46;考虑到 AASCHB 的高度及壁的高厚比与普通混凝土空心砌块基本持平,故 α 取 0.9. 通过对试验数据的回归分析,得到 AASCHB 砌体的轴心抗压强度计算公式为

$$f_m = \alpha_1 0.46 f_1^{0.9} (1 + 0.04 f_2) k_2, \tag{3}$$

式中: α_1 为 AASM 特性系数, $\alpha_1 = 1.15$;当 20 MPa ≤ f_2 ≤ 30 MPa 时, k_2 取 $1.2 - 0.02 f_2$.

选取式 (3) 中与砂浆强度 f_2 有关的部分,即 $\varphi(f_2) = (1 + 0.04 f_2) k_2 = (1 + 0.04 f_2) (1.2 -$

$0.02 f_2)$. 对其一阶求导,可得 $\varphi'(f_2) = 0.028 - 0.0016 f_2$. 可得出当 $f_2 > 17.5$ MPa 时, $\varphi'(f_2) < 0$; 当 $f_2 < 17.5$ MPa 时, $\varphi'(f_2) > 0$. 即当砂浆强度小于 17.5 MPa 时,砌体的抗压强度随着砂浆强度的增大而增大;当砂浆强度大于 17.5 MPa 时,砌体的抗压强度随着砂浆强度的提高反而降低. 本次试验所采用的砂浆强度等级为 Mb20 ~ Mb30,可以看出试验结果与式 (3) 的变化规律基本保持一致.

当砂浆强度大于 17.5 MPa 时,随着 AASM 抗压强度的提高,砌体抗压强度降低,这主要是因为 AASM 抗压强度越高,激发用碱的掺量越大,反应速度越快,收缩也就越大^[12]. 收缩引起结硬的砂浆层开裂,致使其沿墙长出现不连续,对砌体的约束作用降低,砌体抗压强度降低.

砌体轴心抗压强度实测值、拟合值和规范值对比见表 8.1) $f_{\text{m,3}}/f_{\text{m,t}}$ 平均值为 1.04,标准差为 0.18,变异系数为 0.17,说明用式 (3) 预估 AASCHB 砌体轴心抗压强度是可行的;2) $f_{\text{m,t}}$ 普遍低于相应基于式 (2) 的计算值,是由于 AASM 较相同体积含砂率的

普通水泥砂浆和混合砂浆收缩大^[13-15]。

表 8 砌体轴心抗压强度实测值与拟合公式值对比
Tab.8 Comparison of measured and calculated values by fitting
formulae for masonry axial compressive strength

组号	序号	$f_{m,1}/\text{MPa}$	$f_{m,2}/\text{MPa}$	$f_{m,3}/\text{MPa}$	$f_{m,3}/f_{m,1}$
W7.5-20	1	3.78	6.72	4.95	1.31
	2	4.77	6.72	4.95	1.04
	3	3.26	6.72	4.95	1.52
	4	4.32	6.72	4.95	1.15
	5	4.74	6.72	4.95	1.04
	6	5.70	6.72	4.95	0.87
W10-20	1	7.58	8.77	6.46	0.85
	2	7.20	8.77	6.46	0.90
	4	6.01	8.70	6.46	1.07
	5	7.30	8.77	6.46	0.88
	6	7.85	8.77	6.46	0.82
W10-25	1	5.91	9.64	6.06	1.02
	2	6.70	9.64	6.06	0.90
	3	7.52	9.64	6.06	0.81
	4	4.98	9.64	6.06	1.22
	5	4.79	9.64	6.06	1.26
	6	5.49	9.64	6.06	1.10
W15-20	1	7.37	12.52	9.22	1.25
	2	9.41	12.52	9.22	0.98
	3	11.98	12.52	9.22	0.77
	4	8.05	12.52	9.22	1.15
	5	8.96	12.52	9.22	1.03
	6	9.47	12.52	9.22	0.97
W15-25	1	8.97	13.76	8.65	0.96
	2	6.89	13.76	8.65	1.25
	3	8.57	13.76	8.65	1.01
	4	7.50	13.76	8.65	1.15
	5	11.05	13.76	8.65	0.78
	6	8.88	13.76	8.65	0.97
W15-30	1	7.57	14.52	7.73	1.02
	3	10.03	14.52	7.73	0.77
	4	7.25	14.52	7.73	1.07
	5	6.05	14.52	7.73	1.28
	6	6.65	14.52	7.73	1.16

注: $f_{m,1}$ 为砌体抗压强度实测值, $f_{m,2}$ 为基于式(2)的计算值, $f_{m,3}$ 为基于式(3)的计算值。

4 结 论

- 1)发现用 AASCHB 和 AASM 砌筑的砌体轴心抗压强度试验值普遍低于《砌体结构设计规范》相应公式的预估值。
- 2)在《砌体结构设计规范》砌块砌体抗压强度计算公式的基础上,通过引入 AASM 特性系数,调整砂浆强度影响修正系数,建立了与试验结果吻合良好的 AASCHB 砌体抗压强度计算公式。

参考文献

[1] 郑文忠,朱晶. 碱矿渣胶凝材料结构工程应用基础[M]. 哈尔

滨:哈尔滨工业大学出版社,2015:1
ZHENG Wenzhong, ZHU Jing. Application foundation of alkali-activated slag cementitious material in structural engineering[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015: 1
[2] 吴元锋,仪桂云,刘全润,等. 粉煤灰综合利用现状[J]. 洁净煤技术,2013,19(6):100
WU Yuanfeng, YI Guiyun, LIU Quanrun, et al. Current situation of comprehensive utilization of fly ash[J]. Clean Coal Technology, 2013, 19(6):100
[3] PROVIS J L, BERNAL S A. Geopolymers and related alkali-activated materials[J]. Annual Review of Materials Research, 2014, 44(44):300
[4] 祝贺. 碱矿渣地质聚合物的制备及其高温性能研究[D]. 南宁:广西大学,2016:45
ZHU He. The preparation and high temperature performance research of alkali slag base geopolymer materials[D]. Nanning: Guangxi University, 2016:45
[5] 郑文忠,陈伟宏,王英. 碱矿渣胶凝材料的耐高温性能[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2009,37(10):98
ZHENG Wenzhong, CHEN Weihong, WANG Ying. High-temperature resistance performance of alkali-activated slag cementitious materials[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2009,37(10):98
[6] 砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011
[7] 孔德玉,张俊芝,倪彤元,等. 碱激发胶凝材料及混凝土研究进展[J]. 硅酸盐学报,2009,37(1):151
KONG Deyu, ZHANG Junzhi, NI Tongyuan, et al. Research progress on alkali-activated binders and concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2009, 37(1): 151
[8] 混凝土砌块和砖试验方法:GB/T 4111—2013[S]. 北京:中国标准出版社,2013
[9] 建筑砂浆基本性能试验方法标准:JGJ/T 70—2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009
[10] 黄靓,陈行之. 应规范建筑砂浆强度试块的底模材料[J]. 建筑砌块与砌块建筑,2011(3):19
HUANG Liang, CHEN Xingzhi. The bottom mould material of building mortar strength test block should be standardized[J]. Building Block & Block Building, 2011(3):19
[11] 砌体基本力学性能试验方法标准:GB/T 50129—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011
[12] AYDIN S, BARADAN B. Effect of activator type and content on properties of alkali-activated slag mortars[J]. Composites Part B Engineering, 2014, 57(3):168
[13] 陈科,杨长辉,潘群,等. 碱-矿渣水泥砂浆的干缩特性[J]. 重庆大学学报,2012,35(5):64
CHEN Ke, YANG Changhui, PAN Qun, et al. Drying shrinkage characteristics of alkali-slag cement mortar[J]. Journal of Chongqing University, 2012,35(5):64
[14] 顾亚敏,方永浩. 碱矿渣水泥的收缩与开裂特性及其减缩与增韧[J]. 硅酸盐学报,2012(1):76
GU Yamin, FANG Yonghao. Shrinkage, cracking, shrinkage-reducing and toughening of alkali-activated slag cement-a short review[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012(1):76
[15] 王维才,饶福才,唐和俊,等. 碱矿渣混凝土干燥收缩性能与预测模型研究[J]. 建筑技术,2013,44(2):161
WANG Weicai, RAO Fucui, TANG Hejun, et al. Drying shrinkage and prediction model of alkali-slag concrete[J]. Architecture Technology, 2013, 44(2):161