

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201806114

碱激发矿渣陶砂砂浆砌筑的砌体弯曲受拉性能试验

郑文忠^{1,2,3}, 焦贞贞^{1,2,3}, 王英^{1,2,3}, 黄文宣^{1,2,3}, 赵宇健^{1,2,3}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090;
2. 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;
3. 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: 为研究碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块(alkali-activated slag ceramsite concrete hollow block, 简称 AASCHB)砌体的弯曲受拉性能, 完成了 108 个用 Mb25 ~ Mb90 碱激发矿渣陶砂砂浆(alkali-activated slag mortar with pottery sand, 简称 AASM)砌筑的 AASCHB 砌体的弯曲受拉性能试验. 试验结果表明: GB 50003—2011 表 B.0.1—2 中所给公式不能准确预估 AASM 砌筑的 AASCHB 砌体的弯曲抗拉强度, 砂浆强度低于 70.3 MPa 时, 沿通缝截面弯曲抗拉强度预估值偏高, 砂浆强度介于 70.3 ~ 91.9 MPa 时, 沿通缝截面弯曲抗拉强度预估值偏低; 当砂浆强度低于 46.2 MPa 时, 沿齿缝截面弯曲抗拉强度预估值偏高, 砂浆强度介于 46.2 ~ 91.9 MPa 时, 沿齿缝截面弯曲抗拉强度预估值偏低. 同时发现 AASCHB 砌体弯曲抗拉强度不但与 AASM 的抗压强度有关, 而且受水灰比、砂灰比、Na₂O 含量和水玻璃模数的影响. 基于试验结果, 分别建立了 AASCHB 砌体沿通缝截面和沿齿缝截面弯曲抗拉强度的计算公式.

关键词: 碱激发矿渣胶凝材料; 陶粒; 陶砂; 混凝土; 空心砌块; 砂浆; 弯曲抗拉强度

中图分类号: TU375.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)06-0033-07

Experimental study on bending tensile strength of masonry with alkali-activated slag mortar with pottery sand

ZHENG Wenzhong^{1,2,3}, JIAO Zhenzhen^{1,2,3}, WANG Ying^{1,2,3}, HUANG Wenxuan^{1,2,3}, ZHAO Yujian^{1,2,3}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control (Harbin Institute of Technology), Ministry of Education, Harbin 150090, China;
3. 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 study the bending tensile performance of alkali-activated slag ceramsite concrete hollow block (AASCHB) masonry, tests on 108 masonry specimens with Mb25 ~ Mb90 of alkali-activated slag mortar with pottery sand (AASM) were carried out. The experimental results show that the formula calculation based on Table B.0.1—2 of GB 50003—2011 cannot exactly estimate the bending tensile strength of AASCHB masonry with AASM. When the compressive strength of mortar was lower than 70.3 MPa, the formula calculation of the bending tensile strength along straight joint was higher than the test result. When the compressive strength of mortar was between 70.3 MPa and 91.9 MPa, the formula calculation of the bending tensile strength along straight joint was lower than the test result. The formula calculation of the bending tensile strength along slot joint was higher than the test result as the compressive strength of mortar was lower than 46.2 MPa. When the compressive strength was in the range of 46.2 MPa to 91.9 MPa, the formula calculation of the bending tensile strength along slot joint was lower than the test result. It was found that the bending tensile strength of AASCHB masonry was not only related to the compressive strength of AASM, but also affected by the factors of water to cementitious material ratio, sand to cementitious material ratio, Na₂O content, and silicate modulus. Based on the experimental results, the formulae for the bending tensile strengths of AASCHB masonry along straight joint and slot joint were developed, respectively.

Keywords: alkali-activated slag; ceramsite; pottery sand; concrete; hollow block; mortar; bending tensile strength

粒化高炉矿渣(简称矿渣)是在高炉冶炼生铁时,得到的以硅铝酸盐为主要成分的熔融物,经冷淬

成粒后具有潜在活性的材料^[1]. 以矿渣为主要原材料,采用相应的碱性激发剂激发而成的胶凝材料称为碱激发矿渣胶凝材料^[2]. 碱性激发剂的种类一般包括硅酸钠水玻璃、氢氧化钠和碳酸钠 3 种^[3]. 碱激发矿渣胶凝材料凝结硬化快、早期强度高,并且耐高温;另外,碱激发矿渣胶凝材料省去了水泥“两磨一

烧”的繁琐工艺,是一种环境友好的绿色环保材料^[4-6].但是碱激发矿渣胶凝材料收缩大^[7],成型过程中易开裂,限制了碱激发矿渣胶凝材料在实际工程中的应用.因此,设想假如在碱激发矿渣胶凝材料中填充不存在收缩的填充物,便可减少碱激发矿渣胶凝材料的收缩.碱激发矿渣胶凝材料耐火性能好,在温度不高于 600 ℃ 时其力学性能不降低^[1],而陶粒、陶砂是经过高温烧制而成,具有保温、隔热、耐火性等优点.因此,预想用陶粒、陶砂制备出的碱激发矿渣陶砂砂浆(AASM)和碱激发矿渣陶粒混凝土(AASC),也可用于高温环境工作中.

AASM 砌筑的砌体与水泥砂浆/混合砂浆砌筑的砌体存在明显不同,主要表现在:水泥砂浆/混合砂浆的强度等级介于 Mb7.5 ~ Mb20,而 AASM 的强度等级介于 Mb25 ~ Mb90;AASM 的细骨料是陶砂,陶砂粒径为 1 mm 左右,而普通砂的粒径为 0 ~ 4.75 mm,普通砂鲜明的棱角增大了相邻砌块之间的剪摩作用,陶砂光滑的球形表面弱化了相邻砌块之间的剪摩作用;水泥砂浆和混合砂浆分别用结硬的水泥浆体、水泥“+”石灰的浆体为胶凝材料,而 AASM 是以结硬的碱激发矿渣浆体为胶凝材料,当体积含砂率相同时,AASM 收缩相对较大.当 AASM 抗压强度相同时,水灰比越大,收缩越大,但砂浆的流动性越好;砂灰比越大,收缩越小,但工作性越差;激发剂用量和水玻璃模数的不同会影响 AASM 的工作性能.

相关学者^[8-11]进行了用水泥砂浆/混合砂浆砌筑的砌体的弯曲受拉性能试验,普遍认为弯曲抗拉强度与砂浆的抗压强度的 1/2 次幂成正比,《砌体结构设计规范》^[12]也采用了上述表达方式.上述试验砌体弯曲抗拉强度按他们所建立公式的预估值与实测值比值的平均值介于 0.799 ~ 1.164,离散性比

较大,这或许是因为当砂浆抗压强度相同时,水灰比和砂灰比不同所致.考虑到水泥砂浆/混合砂浆砌筑的砌体弯曲受拉性能不但与砂浆抗压强度有关,可能还与水灰比和砂灰比有关;同时考虑到 AASM 力学性能和工作性能不但与水灰比、砂灰比有关,而且与 Na₂O 含量或水玻璃模数有关.因此,合理考虑各关键参数对 AASM 工作性能和力学性能及用其砌筑的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块(AASCHB)砌体弯曲受拉性能的影响,基于试验结果,建立该新型砌体弯曲抗拉强度计算公式,具有现实意义.

1 试验概况

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%.在试验的过程中通过调整 NaOH 溶液来调整水玻璃模数.

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 AASM 的配制

通过改变水灰比(W)、砂灰比(S)、Na₂O 含量(N)和水玻璃模数(n)来确定 6 种强度等级的 AASM 砌筑砂浆,其配合比见表 2.碱激发矿渣胶凝材料的反应过程中,首先需要在水和 OH⁻作用下,使矿渣由外到内进行溶解,Si-O-Si、Al-O-Al

和 Si-O-Al 断裂,矿渣玻璃体结构解体,SiO₄⁴⁻、Ca²⁺等离子溶入液相,并和液相中原有的离子重新聚合,最终生成 C-S-H 凝胶^[13].掺加粉煤灰主要是降低凝结速度,延长凝结时间,便于 AASM 砌筑使用.

表 2 AASM 配合比								
Tab. 2 Mix proportions of AASM								kg/m ³
强度等级	哈尔滨矿渣	唐山矿渣	粉煤灰	陶砂	水玻璃	氢氧化钠	碳酸钠	水
Mb25	513			1 069.3		24.5	6.1	220.3
Mb35	253		253	1 052.9	186.6	36.5		93.8
Mb45	265		265	1 070.2	162.5	27.9		92.3
Mb60	447			1 118.7	165.2	32.3		107.6
Mb70	286		286	1 009.3	176.5	30.3		100.3
Mb90		449		1 122.3	165.8	32.4		108.0

注: 水玻璃为液态, 含水率为 64.5%; 表中水为自来水; 配合比计算水灰比时的水包括液态水玻璃中的水、氢氧化钠按照 $2\text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ 计算的水和自来水。

1.3 材性试验

1.3.1 AASM 抗压强度

参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[14], 测试砌筑砂浆抗压强度试块的尺寸为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm, 每组 3 个, 结果见表 3。AASM 强度等级为 Mb25、Mb35、Mb45、Mb60、Mb70、Mb90。

表 3 AASM 的抗压强度		
Tab. 3 Compressive strength of AASM		MPa
砌筑砂浆设计强度等级	抗压强度实测平均值	折算抗压强度平均值
Mb25	20.5	27.7
Mb35	27.9	37.7
Mb45	34.2	46.2
Mb60	47.1	63.6
Mb70	52.1	70.3
Mb90	68.1	91.9

注: 根据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》, 经大量试验由砖底模改为钢底模后, 不同原材料砂浆强度降低幅在一个较大范围内, 考虑到结构安全性, 换算系数取 1.35 是最保守情况; 砌筑砂浆抗压强度与其相应砌体弯曲抗拉试验同时进行; 折算抗压强度平均值用 f_2 表示, 它是后继砌体弯曲抗拉性能分析的重要参数。

1.3.2 AASCHB 抗压强度和抗折强度

AASCHB 主砌块的尺寸为 390 mm × 190 mm × 190 mm, 辅助砌块的尺寸为 190 mm × 190 mm × 190 mm, 空心率分别为 48.3% 和 36.0%。具体尺寸见图 1。按照《混凝土砌块和砖试验方法》^[15] 进行 AASCHB 抗压和抗折强度测试, 每组 5 个, 见图 2 (图 2(b) 计算跨度 360 mm)。该砌块抗压强度实测值的平均值为 15.8 MPa, 最小值为 14.8 MPa, 根据《普通混凝土小型砌块》^[16] 将该砌块强度等级划分为 MU15。该砌块抗折试验破坏荷载为 10.2 kN, 破坏面的抵抗弯矩为 0.8 kN · m。这里需要特别指出抗折和弯拉的本质是相同的, 一般对于材性试验称之为抗折, 对于墙片称之为弯拉。

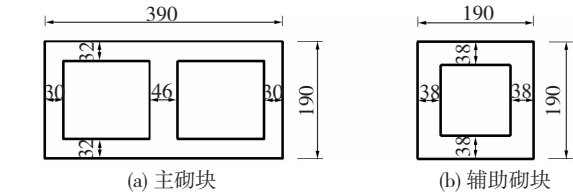


图 1 AASCHB 尺寸 (mm)
Fig. 1 Geometrical sizes of AASCHB (mm)

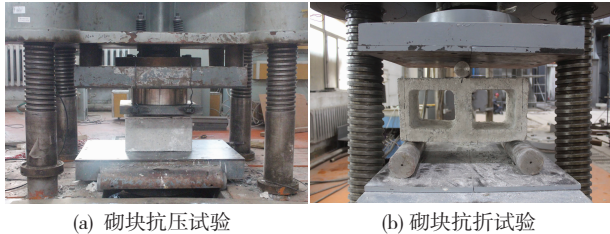


图 2 AASCHB 抗压与抗折试验
Fig. 2 Compressive and flexural tests of AASCHB

1.4 试件设计与制作

《砌体基本力学性能试验方法标准》^[17] 对砌体弯曲抗拉试验是分沿通缝截面和沿齿缝截面弯曲抗拉破坏两种性能来论述的。AASCHB 砌体沿通缝截面弯曲抗拉强度试件由 14 个主砌块分 7 层砌筑而成, 尺寸为 390 mm × 390 mm × 1 390 mm; 沿齿缝截面弯曲抗拉试件由 12 个主砌块与 4 个辅助砌块分 4 层砌筑而成, 尺寸为 1 390 mm × 190 mm × 790 mm; AASM 的水平灰缝控制在 9 ~ 11 mm, 见图 3。沿通缝截面和沿齿缝截面的弯曲抗拉试件均每组 9 个, 共 108 个试件, 主要参数见表 4。砌体弯曲抗拉试件制作完成后, 在自然条件下养护至相应的强度时, 将沿通缝截面的弯曲抗拉试件平放或沿齿缝截面的弯曲抗拉试件沿长轴旋转 90°, 安装到试验台座上, 进行该砌块砌体弯曲抗拉试验。所有试件于试验前 3 d, 在试件的支座处和荷载作用处采用水泥砂浆找平, 并用水平尺进行检查, 使支座处或荷载作用面处于同一水平面上。找平层的厚度不应小于 10 mm, 宽度不应小于加荷垫板宽度。

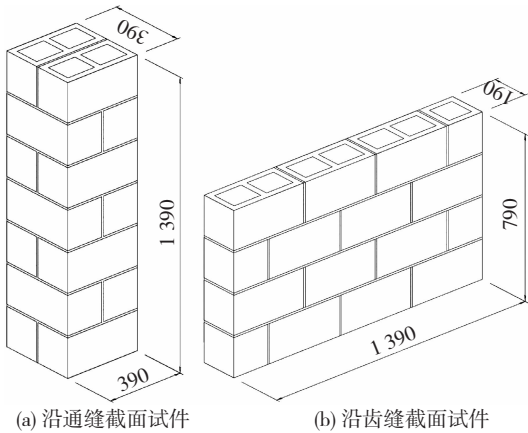


图 3 AASCHB 砌体弯曲抗拉试件 (mm)

Fig. 3 Bending tensile specimen of AASCHB masonry (mm)

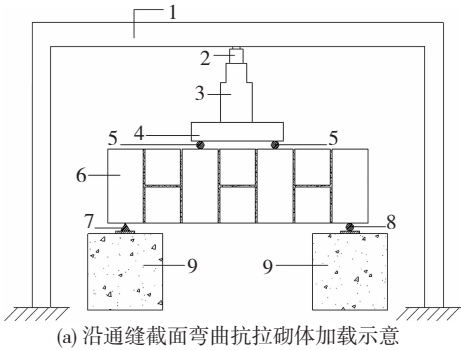
表 4 AASCHB 砌体弯曲抗拉试件主要参数

Tab. 4 Main parameters of AASCHB masonry bending tensile specimens

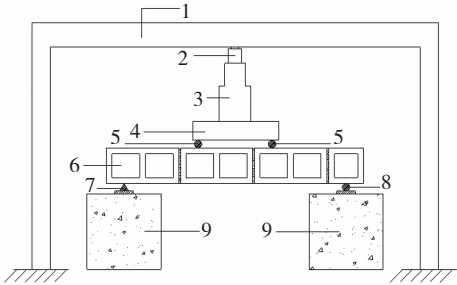
砌块强度等级	砌体砂浆强度等级	砌体砂浆折算抗压强度 平均值/MPa	试件个数/个		水平灰缝厚度/mm
			沿通缝	沿齿缝	
			截面	截面	
MU15	Mb25	27.7	9	9	9 ~ 11
MU15	Mb35	37.7	9	9	9 ~ 11
MU15	Mb45	46.2	9	9	9 ~ 11
MU15	Mb60	63.6	9	9	9 ~ 11
MU15	Mb70	70.3	9	9	9 ~ 11
MU15	Mb90	91.9	9	9	9 ~ 11

1.5 试验装置和加载方案

参照《砌体基本力学性能试验方法标准》^[17]进行 AASCHB 砌体弯曲抗拉试验,见图 4. 试验加载装置由混凝土台座、千斤顶、反力架、压力传感器、荷载分配梁、固定铰支座和滑动铰支座组成.



(a) 沿通缝截面弯曲抗拉砌体加载示意



(b) 沿齿缝截面弯曲抗拉砌体加载示意

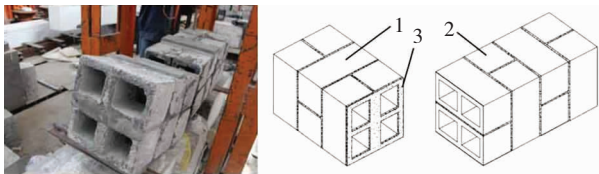
注:1- 反力架;2- 压力传感器;3- 千斤顶;
4- 分配梁;5- 滚轴;6- 弯曲抗拉试件;
7- 固定铰支座;8- 滑动铰支座;9- 混凝土台座

图 4 AASCHB 砌体弯曲抗拉试验加载示意

Fig. 4 Bending tensile tests of AASCHB masonry

2 试验现象

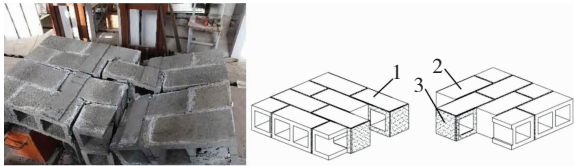
AASCHB 砌体弯曲抗拉破坏分沿通缝截面和沿齿缝截面破坏两种. 沿通缝截面破坏均发生在 AASM 与砌块的黏结面,见图 5;沿齿缝截面破坏分有 1 个砌块被折断和有 2 个砌块被折断两种情况,见图 6. 有砌块被折断是因为砌块的抗折强度低于砌体的齿缝截面抗折强度.



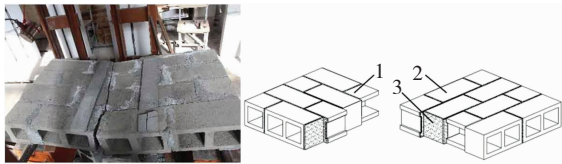
注:1- 破坏通缝左侧部分;2- 破坏通缝右侧部分;3- 破坏通缝

图 5 试件沿通缝截面弯曲受拉破坏

Fig. 5 Failure of straight section



(a) 有 1 个砌块被折断



(b) 有 2 个砌块被折断

注:1- 被折断砌体的左侧部分;2- 被折断砌体的右侧部分;
3- 灰缝

图 6 试件沿齿缝截面弯曲受拉破坏

Fig. 6 Failure of slot section

3 结果与分析

3.1 试验结果

AASCHB 砌体弯曲抗拉强度 $f_{t,i}$ 依据《砌体基本力学性能试验方法标准》^[17] 公式计算:

$$f_{t,i} = \frac{(N_t + 0.75G)L}{bh^2}, \quad (1)$$

式中: N_t 为试件的抗弯破坏荷载值,包括荷载分配梁等附件的自重,当有砌块被折断时扣除被折断砌块承受的破坏荷载; $N; G$ 为试件的自重; $N; L$ 为试件的计算跨度, mm; b 为试件的截面宽度,当有砌块被折断时扣除被折断砌块沿墙宽度方向的边长, mm; h 为试件的截面高度, mm.

AASCHB 砌体沿通缝截面和沿齿缝截面的弯曲抗拉强度试验结果见表 5. 沿齿缝截面破坏存在砌块被折断,是因为砌块的抗折弯矩仅为 $0.8 \text{ kN} \cdot \text{m}$,

低于相应齿缝剪摩对砌体抵抗弯矩的贡献。

3.2 试验结果分析

水灰比、砂灰比、Na₂O 含量和水玻璃模数对 AASM 抗压强度均有显著影响^[18]。当抗压强度相同时,水灰比越大,收缩越大,但砂浆的流动性越好;砂

灰比越大,收缩越小,但工作性越差;激发剂用量和水玻璃模数的不同会影响 AASM 的工作性能。因此,对 AASM 砌筑的砌块砌体,着力考察水灰比、砂灰比、Na₂O 含量、水玻璃模数和 AASM 抗压强度1/2 次幂对砌体弯曲抗拉强度的影响。

表 5 AASCHB 砌体弯曲抗拉试验结果
Tab. 5 Results of bending tensile strength tests of AASCHB masonry

强度等级	f_2/MPa	W	S	N	n	$f_{\text{tm},T}/\text{MPa}$	破坏形态(通缝)	$f_{\text{tm},C}/\text{MPa}$	破坏形态(齿缝)
Mb25	27.7	0.44	2.08	0.044	0.00	0.141	沿通缝	0.240	1 个砌块被折断
Mb35	37.7	0.44	2.08	0.088	1.16	0.315	沿通缝	0.465	2 个砌块被折断
Mb45	46.2	0.38	2.02	0.067	1.26	0.340	沿通缝	0.773	2 个砌块被折断
Mb60	63.6	0.50	2.50	0.088	1.16	0.401	沿通缝	0.940	2 个砌块被折断
Mb70	70.3	0.39	1.76	0.068	1.26	0.479	沿通缝	1.217	2 个砌块被折断
Mb90	91.9	0.50	2.50	0.088	1.16	0.589	沿通缝	1.379	2 个砌块被折断

注: f_2 为 AASM 折算抗压强度; W 为水灰比(AASM 配合比中水与矿物粉料的质量比); S 为砂灰比; N 为 Na₂O 含量(激发剂中 Na₂O 与矿物粉料质量比); n 为水玻璃模数; $f_{\text{tm},T}$ 为沿通缝截面弯曲抗拉强度实测值; $f_{\text{tm},C}$ 为沿齿缝截面弯曲抗拉强度实测值。

3.2.1 水灰比、砂灰比、Na₂O 含量、水玻璃模数和砂浆强度对沿通缝截面弯曲抗拉强度的影响

为考察水灰比和砂灰比的影响,将二者乘积作为一个综合参数;为考察 Na₂O 含量和水玻璃模数的影响,将二者之积作为一个综合参数。以水灰比与砂灰比乘积 WS 和水玻璃模数与 Na₂O 含量乘积 nN 为横坐标,以 $f_{\text{tm},T}/\sqrt{f_2}$ 为纵坐标建立坐标系。将水灰比介于 0.38~0.50、砂灰比介于 1.76~2.50、Na₂O 含量介于 4.4%~8.8%、水玻璃模数介于 0~1.26 和 AASM 折算抗压强度介于 27.7~91.9 MPa 的弯曲抗拉强度实测值置于坐标系中,发现当 $0 \leq nN \leq 0.10$ 时, $f_{\text{tm},T}/\sqrt{f_2}$ 随着 W 或 S 的增加而减小;当 $0.10 \leq nN \leq 0.11$ 时, $f_{\text{tm},T}/\sqrt{f_2}$ 随着 W 或 S 的增加而增大。当 $0.67 \leq WS + 2.085nN \leq 0.98$ 时, $f_{\text{tm},T}/\sqrt{f_2}$ 随着 n 或 N 的增加而减小;当 $0.98 \leq WS + 2.085nN \leq 1.48$ 时, $f_{\text{tm},T}/\sqrt{f_2}$ 随着 n 或 N 的增加而增大。Na₂O 含量和水玻璃模数均存在一个最佳掺量,这是由于在水化过程中,当 Na₂O 较低时,随着 Na₂O 含量的增加,有效地增加激发剂的碱度,促进矿渣水解,并与溶解的 Ca²⁺ 生成 C-S-H 凝胶,从而提高了 AASM 的强度;而过量的 Na₂O 导致 OH⁻ 的浓度过高,反应发生迅速,在矿渣颗粒表面反应生成的水化产物形成一层保护膜,阻止反应进行,导致后期强度发展缓慢^[19-20];增大水玻璃模数可以提高 SiO₄⁴⁻ 的含量,从而产生更多的水化硅(铝)酸钙提高 AASM 的抗压强度^[21],而过高的水玻璃模数会形成过多的 SiO₄⁴⁻ 不利于矿渣的解聚与聚合而降低砂浆的强度^[22]。结合图 7,拟合得到下列用 AASM 作砌筑砂

浆的 AASCHB 砌体沿通缝截面弯曲抗拉强度的计算公式:

$$f_{\text{tm},T} = (-5.194nN - 0.529WS + 5.309WSnN + 5.535n^2N^2 + 0.512) \sqrt{f_2}, \tag{2}$$

式中: $f_{\text{tm},T}$ 为 AASCHB 砌体沿通缝截面弯曲抗拉强度,MPa; f_2 为 AASM 折算抗压强度,MPa; n 为水玻璃模数; N 为 Na₂O 含量; W 为水灰比; S 为砂灰比。

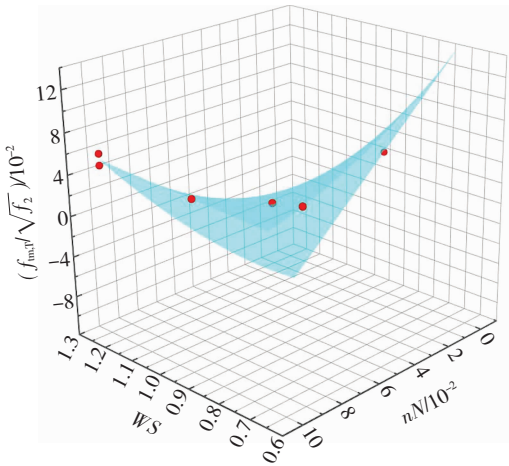


图 7 水灰比、砂灰比、Na₂O 含量和水玻璃模数对 $f_{\text{tm},T}/\sqrt{f_2}$ 的影响

Fig. 7 Effects of water to slag ratio, sand ratio, Na₂O content, and silicate modulus on $f_{\text{tm},T}/\sqrt{f_2}$

3.2.2 水灰比、砂灰比、Na₂O 含量、水玻璃模数和砂浆强度对沿齿缝截面弯曲抗拉强度的影响

以水灰比与砂灰比乘积 WS 和水玻璃模数与 Na₂O 含量乘积 nN 为横坐标,以 $f_{\text{tm},C}/\sqrt{f_2}$ 为纵坐标建立坐标系。将水灰比介于 0.38~0.50、砂灰比介于 1.76~2.50、Na₂O 含量介于 4.4%~8.8%、水玻

璃模数介于 0 ~ 1.26 和 AASM 折算抗压强度介于 27.7 ~ 91.9 MPa 的弯曲抗拉强度实测值置于坐标系中,发现当 $0 \leq nN \leq 0.10$ 时, $f_{tm,c}/\sqrt{f_2}$ 随着 W 或 S 的增加而减小;当 $0.10 \leq nN \leq 0.11$ 时 $f_{tm,c}/\sqrt{f_2}$ 随着 W 或 S 的增加而增大. 当 $0.67 \leq WS + 0.371nN \leq 0.93$ 时, $f_{tm,c}/\sqrt{f_2}$ 随着 n 或 N 的增加而减小;当 $0.93 \leq WS + 0.371 nN \leq 1.29$ 时, $f_{tm,c}/\sqrt{f_2}$ 随着 n 或 N 的增加而增大. 结合图 8,拟合得到下列用 AASM 作砌筑砂浆的 AASCHB 砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度的计算公式:

$$f_{tm,c} = (-28.545nN - 2.984WS + 30.822WSnN + 5.720n^2N^2 + 2.781)\sqrt{f_2}, \quad (3)$$

式中 $f_{tm,c}$ 为 AASCHB 砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度,MPa.

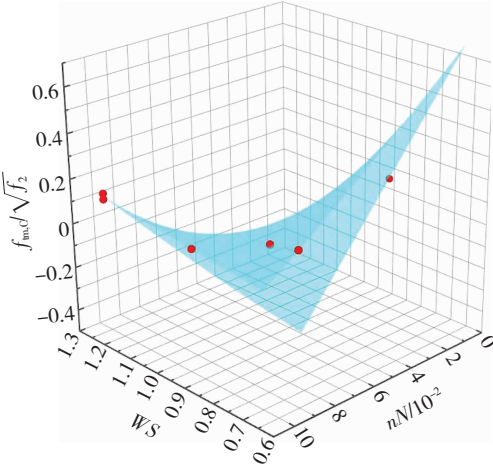


图 8 水灰比、砂灰比、Na₂O 含量和水玻璃模数对 $f_{tm,c}/\sqrt{f_2}$ 的影响

Fig. 8 Effects of water to slag ratio, sand ratio, Na₂O content, and silicate modulus on $f_{tm,c}/\sqrt{f_2}$

3.2.3 砌体弯曲抗拉强度实测值、拟合值与规范值对比

《砌体结构设计规范》^[12]附录 B 的表 B.0.1-2 给出了砌体弯曲抗拉强度平均值计算公式:

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

式中: f_{tm} 为砌体弯曲抗拉强度平均值,MPa; f_2 为砂浆抗压强度平均值,MPa; k_4 为弯曲抗拉强度系数,对于混凝土砌块砌体沿通缝截面取 0.056 和沿齿缝截面取 0.081.

将砌体弯曲抗拉强度实测值、拟合公式计算值和规范值对比分析,见表 6、7. 对于 AASCHB 砌体, $f_{tm,T}^e/f_{tm,T}^c$ 平均值为 1.010,标准差为 0.065,变异系数为 0.064; $f_{tm,c}^e/f_{tm,c}^c$ 平均值为 1.004,标准差为 0.064,变异系数为 0.063. GB 50003—2011 表 B.0.1-2 中所给公式不能准确预估 AASM 砌筑的砌体弯曲抗拉强度,AASM 强度低于 70.3 MPa 时,沿通缝截面

弯曲抗拉强度预估值偏高,AASM 强度介于 70.3 ~ 91.9 MPa 时,沿通缝截面弯曲抗拉强度预估值偏低; AASM 强度低于 46.2 MPa 时,沿齿缝截面弯曲抗拉强度预估值偏高,AASM 强度介于 46.2 ~ 91.9 MPa 时,沿齿缝截面弯曲抗拉强度预估值偏低.

表 6 砌块砌体沿通缝截面弯曲抗拉强度实测值、拟合公式计算值和规范计算值对比

Tab.6 Comparison of measured values, calculated values of fitting formulae, and code formula for block masonry bending tensile strength along straight section

f_2/MPa	$f_{tm,T}^t/\text{MPa}$	$f_{tm,T}^c/\text{MPa}$	$f_{tm,T}^c/f_{tm,T}^t$	$f_{tm,T}^g/\text{MPa}$
27.7	0.141	0.143	1.011	0.295
37.7	0.315	0.317	1.006	0.344
46.2	0.340	0.342	1.005	0.381
63.6	0.401	0.449	1.119	0.447
70.3	0.479	0.481	1.003	0.470
91.9	0.589	0.540	0.916	0.537

注: $f_{tm,T}^t$ 为 AASCHB 砌体沿通缝截面弯曲抗拉强度实测值, $f_{tm,T}^c$ 为基于式(2)的砌体沿通缝截面弯曲抗拉强度计算值, $f_{tm,T}^g$ 为基于式(4)的混凝土砌块砌体沿通缝截面弯曲抗拉强度计算值.

表 7 砌块砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度实测值、拟合公式计算值和规范计算值对比

Tab.7 Comparison of measured values, calculated values of fitting formulae, and code formula for block masonry bending tensile strength along slot section

f_2/MPa	$f_{tm,c}^t/\text{MPa}$	$f_{tm,c}^c/\text{MPa}$	$f_{tm,c}^c/f_{tm,c}^t$	$f_{tm,c}^g/\text{MPa}$
27.7	0.240	0.240	1.000	0.426
37.7	0.465	0.465	1.000	0.497
46.2	0.773	0.773	1.000	0.551
63.6	0.940	1.045	1.111	0.646
70.3	1.217	1.217	1.000	0.679
91.9	1.379	1.256	0.911	0.777

注: $f_{tm,c}^t$ 为 AASCHB 砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度实测值, $f_{tm,c}^c$ 为基于式(3)的砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度计算值, $f_{tm,c}^g$ 为基于式(4)的混凝土砌块砌体沿齿缝截面弯曲抗拉强度计算值.

4 结 论

1)GB 50003—2011 表 B.0.1-2 中所给公式不能准确预估 AASM 砌筑的砌体弯曲抗拉强度,砂浆强度低于 70.3MPa 时,沿通缝截面弯曲抗拉强度预估值偏高,砂浆强度介于 70.3 ~ 91.9 MPa 时,沿通缝截面弯曲抗拉强度预估值偏低;当砂浆强度低于 46.2MPa 时,沿齿缝截面弯曲抗拉强度预估值偏高,砂浆强度介于 46.2 ~ 91.9 MPa 时,沿齿缝截面弯曲抗拉强度预估值偏低. AASCHB 砌体沿齿缝截面的弯曲抗拉强度高于沿通缝截面的弯曲抗拉强度.

2)用 AASM 砌筑的 AASCHB 砌体的弯曲抗拉

强度不但与 AASM 的抗压强度有关,而且受水灰比、砂灰比、 Na_2O 含量和水玻璃模数的影响. 基于试验结果,分别建立了 AASCHB 砌体沿通缝截面和沿齿缝截面的弯曲抗拉强度的计算公式.

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] 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(10):96
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(10):96

[3] KOVTUN M, KEARSLEY E P, SHEKHOVTSOVA J. Chemical acceleration of a neutral granulated blast-furnace slag activated by sodium carbonate[J]. Cement and Concrete Research, 2015, 72:1

[4] DODIOMOV I. 碱矿渣胶凝材料的工作性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015
DODIOMOV I. The workability of alkali-activated slag cementitious material[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015

[5] 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
ZHU He. The preparation and high temperature performance research of alkali slag base geopolymer materials[D]. Nanning: Guangxi University, 2016

[6] 郑文忠,黄文宣,焦贞贞,等. 碱矿渣陶粒混凝土基本性能试验研究[J]. 北京工业大学学报,2017,43(8):1182
ZHENG Wenzhong, HUANG Wenxuan, JIAO Zhenzhen, et al. Experiment research on basic performance of alkali-activated slag ceramsite concrete[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(8): 1182

[7] 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

[8] 杜云丹. 页岩多孔砖砌体基本力学性能试验研究[D]. 柳州:广西工学院,2012
DU Yundan. Experimental study on basic mechanical properties of shale perforated brick masonry[D]. Liuzhou: Guangxi University of Technology, 2012

[9] 杨伟军,祝晓庆,禹慧. 混凝土多孔砖砌体弯曲抗拉强度试验研究[J]. 建筑结构,2006(11):71
YANG Weijun, ZHU Xiaoqing, YU Hui. Experimental research on flexural tensile strength of perforated concrete brick masonry[J]. Building Structure, 2006(11): 71

[10] 黄榜彪,杜云丹,胡尚,等. 混凝土多排孔砖砌体弯曲抗拉强度试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版),2011(4):694
HUANG Bangbiao, DU Yundan, HU Shang, et al. Experimental study on bending tensile strength of the masonry made of porous concrete bricks[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science

Edition), 2011(4): 694

[11] 张中脊,杨伟军. 蒸压灰砂砖砌体弯曲抗拉强度试验研究[J]. 新型建筑材料, 2009(5):43
ZHANG Zhongji, YANG Weijun. Study on autoclaved sand-lime brick masonry by bending tensile strength test[J]. New Building Material, 2009(5): 43

[12] 砌体结构设计规范:GB 50003—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2011
Code for design of masonry structures: GB 50003—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011

[13] 于霖. 碱激发矿渣胶凝材料的制备及其性能研究[D]. 郑州:郑州大学,2010
YU Lin. A study on the preparation and properties of alkali-activated slag cementitious material[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010

[14] 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
Standard for test method of performance on building mortar: JGJ/T 70—2009[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009

[15] 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
Test methods for the concrete block and brick: GB/T 4111—2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013

[16] 普通混凝土小型砌块:GB/T 8239—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014
Normal concrete small block: GB/T 8239—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2014

[17] 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
Standard for test method of basic mechanics properties of masonry: GB/T 50129—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011

[18] JIAO Z, WANG Y, ZHENG W, et al. Pottery sand as fine aggregate for preparing alkali-activated slag mortar[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018

[19] RASHAD A M, ZEEDAN S R, HASSAN A A. Influence of the activator concentration of sodium silicate on the thermal properties of alkali-activated slag pastes [J]. Construction and Building Materials, 2016, 102

[20] 孙小巍,吴陶俊. 碱激发矿渣胶凝材料的试验研究[J]. 硅酸盐通报,2014(11):3036
SUN Xiaowei, WU Taojun. Experimental research of alkali-activated slag cementitious material[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2014(11): 3036

[21] 王熊鑫. 碱矿渣再生骨料混凝土试验研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2017
WANG Xiongxin. Experimental research on alkali-activated slag concrete with recycled aggregate [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017

[22] 付兴华,陶文宏,孙凤金. 水玻璃对地聚物胶凝材料性能影响的研究[J]. 水泥工程,2008(2):6
FU Xinghua, TAO Wenhong, SUN Fengjin. Study on the effect of water glass on the performance of geopolymer cementitious material [J]. Cement Engineering, 2008(2): 6