

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201806062

碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪试验

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砌体的受剪性能, 对 108 个用 Mb25 ~ Mb130 碱激发矿渣净浆和用 Mb25 ~ Mb80 碱激发矿渣陶砂砂浆砌筑的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体进行抗剪试验. 试验结果表明: 碱激发矿渣净浆作砌筑浆体的砌体抗剪强度低于碱激发矿渣陶砂砂浆作砌筑浆体的砌体. 碱激发矿渣陶砂砂浆作砌筑浆体的砌体抗剪强度低于用水泥砂浆和混合砂浆作砌筑浆体的砌体. 砌体的抗剪强度随砌筑浆体抗压强度的提高而增大, Na_2O 含量、砂灰比对砌体抗剪强度的影响不容忽视. 基于试验结果, 分别建立了用碱激发矿渣净浆和碱激发矿渣陶砂砂浆作砌筑浆体时的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪强度计算公式.

关键词: 碱激发; 矿渣; 陶砂; 砌筑浆体; 抗剪强度

中图分类号: TU375.6

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)12-0165-06

Experimental study on shear performance of alkali-activated slag ceramsite concrete hollow block masonry

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 investigate the shear performance of alkali-activated slag ceramsite concrete hollow block masonry, tests on 108 masonry prisms with Mb25 ~ Mb130 of alkali-activated slag paste and Mb25 ~ Mb80 of alkali-activated slag mortar with pottery sand were carried out. The results show that the shear strength of masonry with alkali-activated slag paste was less than that with alkali-activated slag mortar, and the shear strength of masonry with alkali-activated slag mortar was lower than that with ordinary cement and composite mortars, respectively. The shear strength of masonry increased as the compressive strength of alkali-activated slag paste and mortar increased. The effects of Na_2O contents and sand to cementitious materials ratios on the shear strength of masonry should not be ignored. Based on the results, the formulae for the shear strength of alkali-activated slag ceramsite concrete hollow block masonry with alkali-activated slag pastes and mortars were developed, respectively.

Keywords: alkaline activator; slag; pottery sand; masonry slurry; shear strength

用铁矿石炼铁的工业副产品是粒化高炉矿渣. 中国每年粒化高炉矿渣产量约 10 亿吨. 约 20% ~ 30% 的矿渣用作混凝土矿物掺合料, 其余 70% ~ 80% 的矿渣依然被当作固体废弃物闲置^[1]. 碱激发矿渣胶凝材料是以粒化高炉矿渣为原材料, 采用适当的碱性激发剂激发, 经搅拌而成的胶凝材料. 碱激发矿渣胶凝材料不用水泥, 省去了水泥“两磨一烧”的繁琐工艺^[2]. 碱激发矿渣胶凝材料耐火性能好, 在不低于 600 °C 时其力学性能不降低^[3], 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, 设想以碱激发矿渣陶粒混凝土替代水泥混凝土制作砌块、用碱激发矿渣净浆或碱激发矿渣陶砂砂浆替代水泥砂浆作砌筑浆体砌筑的砌体, 预计可用于高温环境.

用碱激发矿渣净浆砌筑砌体, 其灰缝厚度较薄 (约为 4 ~ 7 mm), 小于砂浆砌筑灰缝厚度的 9 ~ 11 mm; 用碱激发矿渣陶砂砂浆作砌筑浆体, 陶砂的外形较为光圆, 不像普通砂一样有鲜明的棱角; 砌筑用碱激发矿渣净浆强度等级介于 Mb25 ~ Mb130, 碱激发矿渣陶砂砂浆强度等级介于 Mb25 ~ Mb80, 而常用水泥砂浆和混合砂浆强度等级介于 Mb5 ~ Mb20. 因此, 碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪性能应具有其自身新的特点.

为考察碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体的

收稿日期: 2018-06-09

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, hitwzzheng@163.com

抗剪性能,用 Mb25、Mb35、Mb40、Mb45、Mb55、Mb130 六种强度等级的碱激发矿渣净浆和 Mb25、Mb35、Mb40、Mb45、Mb55、Mb80 六种强度等级的碱激发矿渣陶砂砂浆与 MU15 的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌筑而成 108 个抗剪试件. 基于抗剪试验结果,当碱激发矿渣净浆作砌筑浆体时,考察了砌体抗剪强度与 Na_2O 含量和碱激发矿渣净浆抗压强度的关系;当碱激发矿渣陶砂砂浆做砌筑浆体时,考察了砌体抗剪强度与碱激发矿渣陶砂砂浆抗压强度、 Na_2O 含量及砂灰比的关系.

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 和 424 m^2/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/cm^3 .
陶砂:河南省巩义市宇轩环保科技有限公司生产,粒径为 1 mm,密度为 1.8 g/cm^3 ,孔隙率为 53%.
矿渣、粉煤灰和陶砂的化学成分见表 1.
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 $\geq 96\%$.
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 Na_2CO_3 含量 $\geq 99.8\%$.

1.2 碱激发矿渣净浆和碱激发矿渣陶砂砂浆的配制

由于碱性激发剂对碱激发矿渣胶凝材料的各性能指标影响较大,因此通过改变氧化钠含量(N)和砂浆的砂灰比(S)、水灰比(W)来确定六种强度等级的砌筑浆体,其配合比见表 2.

表 1 原材料的化学成分

Tab. 1 Chemical composition of the raw materials

%

名称	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	SO_3	其它
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

表 2 碱激发矿渣砌筑浆体配合比

Tab. 2 Mix proportions of alkali-activated slag pastes and mortars

kg/m^3

砌筑浆体类别	强度等级	哈尔滨矿渣	唐山矿渣	粉煤灰	陶砂	液态水玻璃	氢氧化钠	碳酸钠	水
碱激发矿渣净浆	Mb25	1 359				669.1	79.5		73.7
	Mb35	1 359					64.9	16.3	508.5
	Mb40	1 359					97.3	24.4	501.3
	Mb45	1 070		267		493.7	96.6		174.5
	Mb55	1 359				376.4	73.7		263.8
	Mb130		1 372			506.8	99.2		179.2
碱激发矿渣陶砂砂浆	Mb25	513			1 069		24.5	6.1	220.3
	Mb35	213		213	1 063	197.7	33.9		112.3
	Mb40	253		253	1 053	186.6	36.5		93.8
	Mb45	447			1 119	165.2	32.3		107.7
	Mb55	236		236	982	219.3	37.6		124.6
	Mb80		449		1 122	165.8	32.4		108.0

注:1. 水玻璃为液态,含水率 64.5%;2. 水为自来水;3. 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 碱激发矿渣砌筑浆体抗压强度

试验设计的砌筑浆体有碱激发矿渣净浆和碱激发矿渣陶砂砂浆两种. 测试砌筑浆体抗压强度试块的尺寸为 70.7 mm $\times$ 70.7 mm $\times$ 70.7 mm,每组 3 个试件. 砌筑浆体立方体试块的抗压强度按照 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》^[4]进行测试,将算术平均值的 1.35 倍作为该组试件的浆体立方体试件抗压强度平均值,结果见表 3. 本文

碱激发矿渣净浆的强度等级有 Mb25、Mb35、Mb40、Mb45、Mb55、Mb130,碱激发矿渣陶砂砂浆的强度等级有 Mb25、Mb35、Mb40、Mb45、Mb55、Mb80.

1.3.2 碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块抗压强度

碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块块型选用主砌块的尺寸为 390 mm $\times$ 190 mm $\times$ 190 mm,辅助砌块的尺寸为 190 mm $\times$ 190 mm $\times$ 190 mm,空心率分别为 48.3% 和 36.0%. 具体尺寸见图 1. 空心砌块按 MU15 进行材料配比并制作. 按照 GB/T 4111—2013

《混凝土砌块和砖试验方法》^[5]进行碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块抗压强度测试,每组 5 个砌块.该空心砌块抗压强度实测值的平均值为 15.8 MPa,最小值为 14.8 MPa.

表 3 碱激发矿渣净浆和碱激发矿渣陶砂砂浆的抗压强度
Tab.3 Compressive strength of alkali-activated slag pastes and mortars

砌筑浆体类别	设计强度等级	抗压强度实测 平均值/MPa	折算抗压强度 平均值/MPa
碱激发矿渣净浆	Mb25	19.1	25.8
	Mb35	26.7	36.1
	Mb40	29.7	40.1
	Mb45	34.5	46.6
	Mb55	43.7	59.0
	Mb130	97.3	131.4
碱激发矿渣陶砂砂浆	Mb25	20.8	28.1
	Mb35	28.2	38.1
	Mb40	32.5	43.9
	Mb45	36.2	48.8
	Mb55	43.0	58.1
	Mb80	60.9	82.3

注:1. 根据 JGJ/T 70—2009《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;2. 每个强度等级的砌筑浆体立方体抗压强度与其相应的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪强度试验同时进行测试;3. 折算抗压强度实测值用 f_2 表示,它是后继砌体抗剪性能的分析的重要参数.

1.4 试件设计与制作

根据 GB/T 50129—2011《砌体基本力学性能试验方法标准》的规定^[6],碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪试件采用双剪试件,其设计尺寸为 590 mm×390 mm×190 mm,见图 2. 试验分别设计了 6 个强度等级的碱激发矿渣净浆和 6 个强度等级碱激发矿渣陶砂砂浆砌筑碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体的抗剪试验,共 12 组,每组 9 个,共 108 个试件. 试件主要参数见表 4.

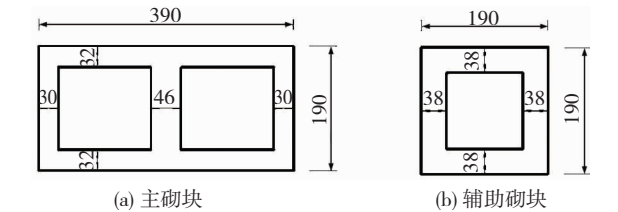


图 1 碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块尺寸
Fig. 1 Geometrical sizes of alkali-activated slag ceramsite concrete hollow blocks

砌体抗剪试件由 2 个主砌块和 2 个辅助砌块分 3 层砌筑而成,碱激发矿渣净浆和碱激发矿渣陶砂砂浆的灰缝分别控制在 4~7 mm 和 9~11 mm. 由于碱激发矿渣胶凝材料早期强度上升很快^[7-9],因此碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪试件制

作完成后,在自然条件下养护至相应的强度等级时进行该砌块砌体抗剪试验.

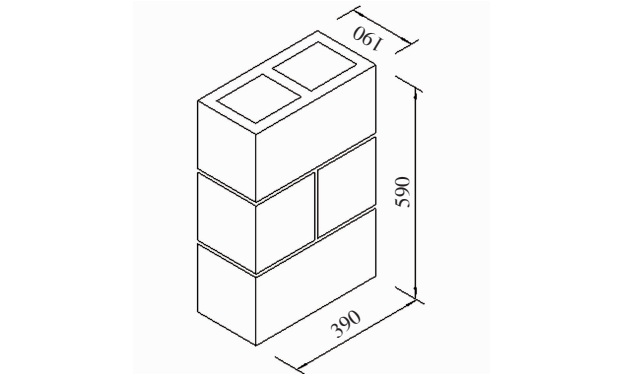


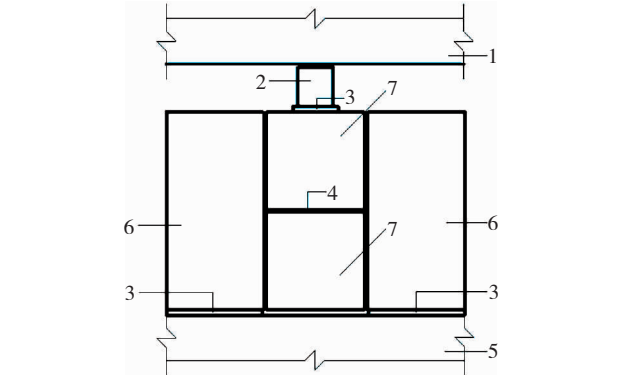
图 2 碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪试件
Fig. 2 Shear specimen of alkali-activated slag ceramsite concrete hollow block masonry

表 4 碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪试件主要参数
Tab. 4 Main parameters of alkali-activated slag ceramsite concrete hollow block masonry shear specimens

砌筑浆体类别	砌块强度等级	砌筑浆体折算 抗压强度/MPa	试件 数量/个	灰缝 厚度/mm
碱激发矿渣净浆	MU15	25.8	9	4~7
	MU15	36.1	9	4~7
	MU15	40.1	9	4~7
	MU15	46.6	9	4~7
	MU15	59.0	9	4~7
	MU15	131.4	9	4~7
碱激发矿渣陶砂砂浆	MU15	28.1	9	9~11
	MU15	38.1	9	9~11
	MU15	43.9	9	9~11
	MU15	48.8	9	9~11
	MU15	58.1	9	9~11
	MU15	82.3	9	9~11

1.5 试验装置和加载方案

碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪试验方案见图 3. 两侧主砌块(390 mm×190 mm×190 mm)



注:1 - 压力机上压头;2 - 压力传感器;3 - 10 mm 厚钢板;
4 - 灰缝;5 - 压力机下压头;6 - 主砌块;7 - 辅助砌块
图 3 碱激发矿渣陶粒混凝土砌块砌体抗剪试验方案
Fig. 3 Test program of alkali-activated slag ceramsite concrete hollow block masonry shear strength

的下方和中间辅助砌块(190 mm × 190 mm × 190 mm)的上方各设置一190 mm × 190 mm × 10 mm的钢板,将图3试件置于压力机上下压头之间,并使试件中心线与试验机上下压头中心重合后开始加载,当至少有一个平行于加载方向的灰缝被剪坏即认为试件发生了受剪破坏. 108个试件中1个灰缝被剪坏的有101个试件,2个灰缝被剪坏的有7个试件. 108个试件均发生灰缝受剪破坏,块体未见损伤.

2 结果与分析

2.1 试验结果

GB/T 50129—2011《砌体基本力学性能试验方法标准》^[6]给出砌体抗剪强度计算公式:

$$f_{v,i} = \frac{N_v}{2A}, \tag{1}$$

式中: $f_{v,i}$ 为试件抗剪强度,MPa; N_v 为试件的抗剪破坏荷载值,N; A 为试件一个受剪面的面积,mm².

碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪试验结果见表5. 碱激发矿渣净浆和碱激发矿渣陶砂砂浆砌筑的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪强度均随着砌筑浆体抗压强度的提高而增大(碱激发矿渣净浆抗压强度25.8 MPa组除外). 当采用相同强度的碱激发矿渣净浆与碱激发矿渣陶砂砂浆作砌筑浆体时,碱激发矿渣陶砂砂浆砌筑的砌体抗剪强度均高于用净浆砌筑的砌体抗剪强度. 从表5还发现,随砌筑浆体抗压强度的提高砌体抗剪强度增大有限. 这主要是因为碱激发矿渣陶砂砂浆掺加陶砂,相同体积的砌筑浆体,掺加陶砂使得胶凝材料减少,而收缩主要是由胶凝材料引起,骨料不会收缩,碱激发矿渣陶砂砂浆的收缩小于碱激发矿渣净浆的

表5 碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪试验结果
Tab.5 Results of shear strength tests of alkali-activated slag ceramsite concrete hollow block masonry

砌筑浆体类别	浆体折算抗压强度/MPa	Na ₂ O含量/%	砂灰比	抗剪强度实测值/MPa
碱激发矿渣净浆	25.8	8.8		0.122
	36.1	4.4		0.050
	40.1	6.6		0.094
	46.6	8.8		0.110
	59.0	6.6		0.114
	131.4	8.8		0.167
碱激发矿渣陶砂砂浆	28.1	4.4	2.083	0.094
	38.1	10.2	2.500	0.164
	43.9	8.8	2.083	0.222
	48.8	8.8	2.500	0.240
	58.1	10.2	2.083	0.253
	82.3	8.8	2.500	0.284

收缩;砌筑浆体抗压强度越高收缩越大. 因此,砌筑浆体的含砂率应作为考察这类砌体抗剪强度的一个重要参数. 在一定限度内,由于随着激发剂中Na₂O含量的增加碱激发矿渣净浆的流动性有所减小,保水性有所改善. 对于砌筑浆体还应将Na₂O含量作为考察这类砌体抗剪强度的另一重要参数.

2.2 对试验结果的分析

2.2.1 碱激发矿渣净浆抗压强度和Na₂O含量对砌体抗剪强度的影响

以Na₂O含量 N 和碱激发矿渣净浆抗压强度 $1/2$ 次幂 $\sqrt{f_2}$ 为横坐标,以碱激发矿渣净浆砌筑的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪强度 f_{vm} 为纵坐标建立坐标系. 将Na₂O含量(相对于矿物粉料质量)介于4.4%~8.8%、碱激发矿渣净浆折算抗压强度介于25.8~131.4 MPa的试验数据置于坐标系中,发现 f_{vm} 与 N 和 $\sqrt{f_2}$ 近似呈线性关系. 在参数试验取值区间内,当Na₂O含量 N 相同时, f_{vm} 随着 $\sqrt{f_2}$ 的增大而增大;当碱激发矿渣净浆折算抗压强度 f_2 相同时, f_{vm} 随着 N 的增大而增大. 结合图4,拟合得到用碱激发矿渣净浆作砌筑浆体的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪强度的公式:

$$f_{vm} = 0.008 \sqrt{f_2} + 1.440N - 0.057, \tag{2}$$

式中: f_{vm} 为碱激发矿渣净浆作为砌筑浆体时碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体的抗剪强度,MPa; f_2 为碱激发矿渣净浆折算抗压强度,MPa; N 为激发剂中Na₂O质量占矿物粉料质量的百分比.

认为在Na₂O含量介于4.4%~8.8%时,随着Na₂O含量的增加碱激发矿渣净浆的流动性有所减小,保水性能有所改善. 这是在Na₂O含量试验取值区间内随Na₂O含量增加抗剪强度提高的原因.

2.2.2 碱激发矿渣陶砂砂浆抗压强度、Na₂O含量、砂灰比对砌体抗剪强度的影响

激发剂碱含量、水灰比和砂灰比均是变量,由于陶砂具有一定的吸水性,水灰比无法准确量化对碱激发矿渣陶砂砂浆的激发效果,但是激发剂中碱含量和砂灰比对碱激发矿渣陶砂砂浆强度的影响较显著. 因此,对碱激发矿渣陶砂砂浆砌筑的砌块砌体,着力考察碱激发矿渣陶砂砂浆折算抗压强度 f_2 、Na₂O含量 N 、砂灰比 S 对砌体抗剪强度的影响. 以砂灰比 S 和Na₂O含量 N 为横坐标,以 $f_{vm}/\sqrt{f_2}$ 为纵坐标建立坐标系. 将砂灰比介于208.3%~250.0%、Na₂O含量介于4.4%~10.2%、碱激发矿渣陶砂砂浆折算抗压强度介于28.1~82.3 MPa的试验数据置于坐标系中,发现当 $S + 12.987N < 3.296$ 时, $f_{vm}/\sqrt{f_2}$ 随着 N 的增加而增大;当 $S +$

12.987 $N > 3.296$ 时, $f_{vm}/\sqrt{f_2}$ 随着 N 的增加而减小. 碱激发矿渣陶砂砂浆中陶砂的加入可以改善该砂浆的收缩性能, 而 Na_2O 含量存在一个最佳掺量^[10], 若 Na_2O 含量低于 8.6%, 用碱激发矿渣陶砂砂浆砌筑的空心砌块砌体抗剪强度随着砂灰比的增大而增大; 若 Na_2O 含量高于 8.6%, 用碱激发矿渣陶砂砂浆砌筑的空心砌块砌体抗剪强度随着砂灰比的增大而减小. 过量的 Na_2O 导致反应过程中产生饱和的 Na^+ , 过量存在的 Na^+ 并没有形成稳定性产物而导致力学性能的降低^[10]. 结合图 5, 拟合得到下列碱

激发矿渣陶砂砂浆砌筑的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪强度计算公式:

$$f_{vm} = (3.319N + 0.087S - 1.007SN - 6.539N^2 - 0.205) \sqrt{f_2}, \quad (3)$$

式中: f_{vm} 为碱激发矿渣陶砂砂浆作为砌筑浆体的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体的抗剪强度, MPa; f_2 为碱激发矿渣陶砂砂浆折算抗压强度, MPa; N 为激发剂中 Na_2O 质量占矿物粉料质量的百分比; S 为碱激发矿渣陶砂砂浆配合比中的陶砂与矿物粉料质量比.

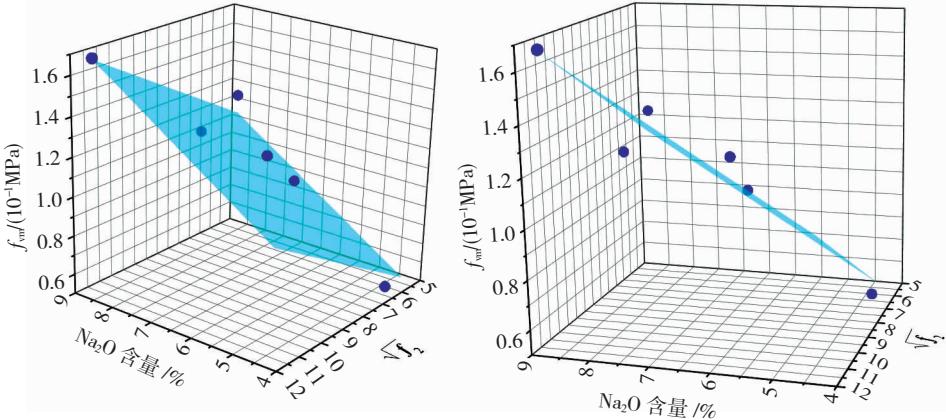


图 4 Na_2O 含量和 f_2 对砌块砌体抗剪强度的影响
Fig. 4 Effects of Na_2O content and f_2 on the shear strength of block masonry

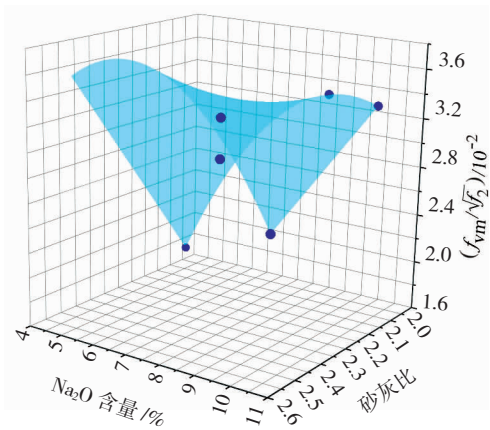


图 5 Na_2O 含量、砂灰比对 $f_{vm}/\sqrt{f_2}$ 的影响
Fig. 5 Effects of Na_2O content and sand to cementitious materials ratio on $f_{vm}/\sqrt{f_2}$

2.2.3 砌体抗剪强度实测值、拟合值与规范值对比
GB 50003—2011《砌体结构设计规范》^[11] 附录 B 的表 B.0.1—2 中给出砌体抗剪强度平均值计算公式:

$$f_{vm} = k_5 \sqrt{f_2}, \quad (4)$$

式中: f_{vm} 为砌体抗剪强度, MPa; f_2 为砂浆折算抗压强度, MPa; k_5 为抗剪强度系数, 对于混凝土小型空心砌块取 0.069.

将砌体抗剪强度实测值、拟合公式计算值和规

范值对比分析, 见表 6.

表 6 砌块砌体抗剪强度实测值、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 shear strength of block masonry

砌筑浆体类别	f_2 / MPa	f_{vm}^t / MPa	f_{vm}^c / MPa	f_{vm}^c / f_{vm}^t	f_{vm}^g / MPa
碱激发矿渣净浆	25.8	0.122	0.110	0.902	0.350
	36.1	0.050	0.054	1.080	0.415
	40.1	0.094	0.089	0.947	0.437
	46.6	0.110	0.124	1.127	0.471
	59.0	0.114	0.100	0.877	0.530
碱激发矿渣陶砂砂浆	131.4	0.167	0.161	0.964	0.791
	28.1	0.094	0.092	0.979	0.366
	38.1	0.164	0.161	0.982	0.426
	43.9	0.222	0.219	0.986	0.457
	48.8	0.240	0.226	0.942	0.482
	58.1	0.253	0.250	0.988	0.526
	82.3	0.284	0.294	1.035	0.626

注: f_2 为碱激发矿渣净浆或碱激发矿渣陶砂砂浆的抗压强度, f_{vm}^g 为碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体的抗剪强度实测值, f_{vm}^c 为基于式(2)和式(3)的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪强度计算值, f_{vm}^t 为基于式(4)的混凝土小型砌块砌体抗剪强度计算值.

由表 6 可知, 当砌筑浆体为碱激发矿渣净浆时, f_{vm}^c / f_{vm}^t 的平均值为 0.983, 标准差为 0.100, 变异系

数为 0.101;当砌筑浆体为碱激发矿渣陶砂砂浆时, f_{vm}^c/f_{vm}^t 的平均值为 0.985,标准差为 0.030,变异系数为 0.030.12 组不同强度的碱激发矿渣净浆和碱激发矿渣陶砂砂浆砌筑的碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪强度实测值均低于按式(4)的计算值,这是由于碱激发矿渣胶凝材料早期收缩大,一般常温下碱激发矿渣的干燥收缩是普通硅酸盐水泥的 3~5 倍^[12],而碱激发矿渣陶砂砂浆是以结硬的碱激发矿渣浆体为胶凝材料的,当体积含砂率相同时,与水泥砂浆/混合砂浆相比,碱激发矿渣陶砂砂浆的收缩也相对较大.砌筑用碱激发矿渣净浆和碱激发矿渣陶砂砂浆的浆体结硬过程中,沿墙长和墙宽方向受拉,在剪切荷载作用下,水平灰缝或存在拉应力,或受拉开裂,其与砌块间的剪摩作用减小.

3 结 论

1)不论是碱激发矿渣净浆作砌筑浆体,还是碱激发矿渣陶砂砂浆作砌筑浆体,砌体的抗剪强度均低于用相同强度的水泥砂浆和混合砂浆做砌筑浆体的砌块砌体.砌筑浆体抗压强度相同时,碱激发矿渣净浆比碱激发矿渣陶砂砂浆砌筑的砌块砌体的抗剪强度低.这是由于碱激发胶凝材料的收缩大于水泥胶凝材料.

2)砌体的抗剪强度随砌筑浆体抗压强度的提高而增大, Na_2O 含量、砂灰比对砌体抗剪强度的影响不容忽视.并建立了碱激发矿渣陶粒混凝土空心砌块砌体抗剪强度的计算公式.

3)用碱激发矿渣陶砂砂浆砌筑的砌体抗剪强度与浆体抗压强度 1/2 次幂的比值随碱激发剂中 Na_2O 含量和砂灰比的变化而变化.当砂灰比为 208.3%~250.0%、 Na_2O 含量为 4.4%~10.2%、碱激发矿渣陶砂砂浆折算抗压强度为 28.1~82.3 MPa 时,若 $S + 12.987N < 3.296, f_{vm}/\sqrt{f_2}$ 随着 Na_2O 含量的增加而增大;若 $S + 12.987N > 3.296, f_{vm}/\sqrt{f_2}$ 随着 Na_2O 含量的增加而减小;若 $N < 8.6\%, f_{vm}/\sqrt{f_2}$ 随着砂灰比的增大而增大;若 $N > 8.6\%, f_{vm}/\sqrt{f_2}$ 随着砂灰比的增大而减小,建立了相关的计算公式.

参 考 文 献

[1] PUERTASF, MARTINEZ S, ALONSO S, et al. Alkali-activated fly ash/slag cements strength behaviour and hydration products[J]. England: Cement and Concrete Research,2000, 30(10): 1625

[2] 朱晶. 碱矿渣胶凝材料耐高温性能及其在工程中应用基础研究

[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014

ZHU Jing. Basic research on high temperature resistance of alkali-activated slag cementitious material and its application in engineering[D]. Harbin: Harbin institute of Technology, 2014

[3] 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

ZHENG Wenzhong, ZHU Jing. Application foundation of alkali-activated slag cementitious material in structural engineering[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2015

[4] 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

[5] 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

[6] 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

[7] 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

[8] 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

[9] 张兰芳,陈剑雄. 碱激发复合渣体混凝土的试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(4): 640

ZHANG Lanfang, CHEN Jianxiong. Experimental study of alkali-activated compound industrial by-products [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2008, 40(4):640

[10] RASHAD M A, ZEEDAN R S, 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, 811

[11] 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

[12] 史才军,巴维尔·克利文科,黛拉·罗伊,等. 碱-激发水泥和混凝土[M]. 北京:化学工业出版社,2008: 91

SHI Caijun, KRIVENKOP V, ROY D, et al. Alkali-activated cements and concretes [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 91

(编辑 赵丽莹)