

# 全组分再生砂制备湿拌抹灰砂浆的抗冻性研究

曹芙波,魏子洋,王晨霞,方志昊

(内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

**摘要** 目的 研究全组分再生砂制备再生湿拌抹灰砂浆的抗冻性能,解决低温环境下的应用问题。**方法** 分别以全组分再生砂、机制砂作为细骨料,粉煤灰、再生砖粉作为矿物掺合料;以质量损失率( $\Delta m_m$ )、强度损失率( $\Delta f_m$ )为冻融损伤指标,分析了25次冻融循环后不同配合比湿拌抹灰砂浆的抗冻性能。**结果** 砂浆稠度分别与 $\Delta m_m$ 、 $\Delta f_m$ 有良好的线性关系。骨料与掺合料种类不变时,再生湿拌抹灰砂浆试件的胶砂比越小,其冻融破坏越严重。相同细度的再生砖粉需水量比和烧失量比粉煤灰小,火山灰活性更优,对抗冻性能的提升效果优于粉煤灰。全组分再生砂与机制砂相比吸水率较高,胶砂比及掺合料种类相同时,随着稠度值变大,全组分再生砂浆 $\Delta m_m$ 、 $\Delta f_m$ 值的增长率高于机制砂浆。再生湿拌抹灰砂浆的胶砂比不宜小于1/7。**结论** 再生砖粉对于砂浆抗冻性能的提升作用优于粉煤灰,与全组分再生砂结合使用可以大大缩小与机制砂浆抗冻性能差距,可同时满足工程需要和固废再利用的目标。

**关键词** 再生湿拌抹灰砂浆;全组分再生砂;冻融循环;质量损失率;强度损失率

中图分类号 TU391 文献标志码 A

## Frost Resistance of Wet-Mixed Plastering Mortar Prepared by Full-Component Recycled Sand

CAO Fubo, WEI Ziyang, WANG Chenxia, FANG Zhihao

(College of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010)

**Abstract:** Frost resistance of recycled wet-mixed plastering mortar prepared by full-component recycled sand is studied to provide reference for its application in low temperature areas. The frost resistance of wet-mixed plastering mortar with different mix ratios after 25 freeze-thaw cycles was studied by using full-component recycled sand and mechanism sand as fine aggregate, fly ash and recycled brick powder as mineral admixture, mass loss rate ( $\Delta m_m$ ) and strength loss rate ( $\Delta f_m$ ) as indicators of freeze-thaw damage. Experimental results are that mortar consistency has a good linear relationship with  $\Delta m_m$ ,  $\Delta f_m$ . When the type of aggregate and admixture is constant, the smaller the cement sand ratio of the specimen, the more serious the freeze-thaw damage is. The

收稿日期:2020-03-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51868061);内蒙古自治区自然科学基金项目(2020MS05071)

作者简介:曹芙波(1976—),男,教授,博士,主要从事再生混凝土及组合结构等方面研究。

ratio of water dosage and ignition loss of the recycled brick powder are smaller than those of fly ash when they have the same fineness. Recycled brick powder has better pozzolanic activity and its improvement on frost resistance of mortar is better than that of fly ash. The full-component recycled sand has higher water absorption than that of the mechanism sand. When the cement sand ratio and admixture are the same, as consistency increases, the growth rate of the  $\Delta m_m$  and  $\Delta f_m$  of the all-component recycled mortar are higher than that of the mechanism mortar. The cement sand ratio of recycled wet-mixed plastering mortar should not be less than 1/7. The effect of recycled brick powder on frost resistance of mortar is better than fly ash. The gap of frost resistance between recycled wet-mixed plastering mortar and mechanism mortar can be greatly reduced by combining of recycled brick powder and whole component recycled sand. It can also meet engineering needs and solid waste reuse objective.

**Key words:** recycled wet-mixed plastering mortar; full-component recycled sand; freeze-thaw cycles; mass loss rate; strength loss rate

湿拌砂浆是预拌砂浆的一种,由工厂根据施工要求加工生产,通过搅拌车运输至施工现场储存和使用<sup>[1]</sup>。同现场搅拌砂浆相比,湿拌砂浆无需严格控制用水量,不会产生粉尘污染,可以大量掺用粉煤灰等工业废渣和利用建筑固废制造的人工砂<sup>[2]</sup>。我国在基础建设和城乡改造过程中产生大量的建筑垃圾,2017年我国建筑垃圾总量已达到23.8亿t,其中废弃砖料达50%,我国对建筑垃圾再利用的重视程度远低于日本等国家,总利用率只有5%<sup>[3]</sup>。

目前,国内外学者对于不同类型的砂浆经冻融循环后的破坏特征、机理及影响因素的研究已取得一定量的学术成果,部分学者认为周期性冻胀力使砂浆内部裂缝生长扩张是造成冻融破坏的根本原因<sup>[4-5]</sup>。B. Ahmet等<sup>[6]</sup>研究了粉煤灰和硅灰对自密实砂浆抗冻性能的影响,结果显示随着两种材料掺量增加,砂浆相对动弹性模量降低,随着冻融循环次数增加,含硅灰的砂浆动弹性模量下降剧烈。J. Y. Jiang等<sup>[7]</sup>研究了消泡剂和聚羧酸减水剂对无碴水泥沥青砂浆抗冻性的影响,认为两种材料的加入消除了砂浆中的大气泡,促进了小的非连通孔的形成,并测量出了两种外加剂的最佳用量。段本硕等<sup>[8]</sup>将超细石粉用于砂浆性能的提升,指出预拌砂浆质量损失率随着超细石粉取代率的增加呈

现增大的趋势。张秀芝等<sup>[9]</sup>使用纳米SiO<sub>2</sub>与粉煤灰协同改善砂浆性能,结果表明,纳米SiO<sub>2</sub>可以促进水泥二次水化,并能填充砂浆孔隙,与粉煤灰复掺可以有效改善抗冻性能,改善效果较两种材料单掺使用时更优。郭远新等<sup>[10]</sup>认为,胶砂比的减小和再生粉体掺量的增加可减弱再生骨料抹灰砂浆的抗冻性能。G. F. Mohammad等<sup>[11]</sup>将遗传表达式编程模型用于预测强度等级水泥冻融循环后的力学性能,指出当水泥强度等级和循环次数被认为是独立的输入参数时,预测值与实验值之间存在密切的相关性。

笔者针对湿拌抹灰砂浆的抗冻性能,采用全组分再生砂和机制砂作细骨料,再生砖粉和粉煤灰作掺合料,研究了25次冻融循环后稠度与冻融损伤之间的关系,对比分析掺合料种类和胶砂比对于砂浆抗冻性能的影响,比较全组分再生砂与机制砂的性能,旨在对再生湿拌抹灰砂浆在寒冷地区的应用提供参考。

## 1 试验原材料

试验选用P·O 42.5水泥基本性能参数如表1所示。细骨料采用机制砂和全组分再生砂,其基本参数如表2所示,试验所用的全组分再生砂符合规范《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176—2010)中Ⅱ类再生细

骨料的技术要求。粉煤灰选用绿帆牌Ⅱ级粉煤灰,砖粉由废弃黏土砖磨制,两种掺合料性能及化学组成如表3、表4所示。

表1 水泥的基本性能

Table 1 Basic properties of fine cement

细度/ %	初凝	终凝	抗折强度/ MPa		抗压强度/ MPa	
	时间/ min	时间/ min	3 d	28 d	3 d	28 d
	2.4	165	254	4.2	7.5	18.0

表2 细骨料的物理性能

Table 2 Physical properties of fine aggregate

细骨料 种类	细度 模数	表观	堆积	石粉	压碎	吸水
		密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	含量/ %	指标/ %	率/ %
全组分 再生砂	2.8	2 549	1 589	2.4	9.3	6.8
机制砂	2.9	2 506	1 556	9.7	8.3	1.4

表3 粉煤灰与再生砖粉的基本性能

Table 3 Basic properties of fly ash and recycled brick powder

掺合料种类	细度	烧失量	含水率	需水量
粉煤灰	18	7.5	1.0	119
再生砖粉	17	1.2	0.9	102

表4 粉煤灰与再生砖粉的主要化学组成

Table 4 Chemical composition and mass fraction of fly ash and recycled brick powder

掺合料 种类	$w(\text{SiO}_2)$	$w(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$w(\text{CaO})$	$w(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$w(\text{MgO})$
粉煤灰	31.98	30.03	9.85	21.05	5.48
再生砖粉	51.38	28.22	8.55	5.98	3.11

## 2 试验概况

### 2.1 制备再生砖粉与全组分再生砂

再生细骨料与天然河砂相比吸水率高、表观密度小,含有老旧水泥浆等杂质;其颗粒表面粗糙,多棱角且含有微小裂缝<sup>[12]</sup>。全组分再生砂是将废混凝土进行完全破碎至一定细度后,再进行颗粒整形制成的再生细骨料。

笔者选用C30废混凝土作为原材料,首先用反击式破碎机将废混凝土块破碎至粒径小于4.75 mm,随后用颗粒整形设备对再生砂颗粒进行机械打磨,磨去表面大部分硬化水泥石以改善骨料表面,最后经筛分得到试验所需的全组分再生砂。

将废旧黏土砖先后用颚式破碎机、粉碎机磨制成砖粉,再用45  $\mu\text{m}$ 方孔筛进行筛分得到试验用砖粉。粉煤灰在使用前也用相同的方孔筛过筛。笔者借鉴刘飞等<sup>[13]</sup>的机械研磨强化方法激发砖粉活性,先将砖粉烘干除去水分,再用球磨仪进行30 min研磨,以此增加砖粉颗粒的堆积效应及填充效应。图1为两种材料成品。

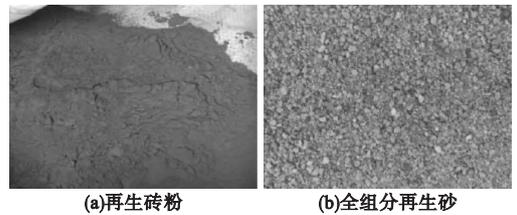


图1 再生砖粉与全组分再生砂

Fig. 1 Recycled brick powder and whole component regenerated sand

### 2.2 试验配合比设计

表5为试验试件控制参数,依照《抹灰砂浆技术规程》(JGJ/T 220—2010)进行砂浆配合比设计,掺合料用量固定为胶凝材料总量的40%。外加剂使用缓凝剂、减水剂、保水增稠剂,各个掺量分别为胶凝材料的0.3%、0.85%和0.1%。在试验中通过控制用水量来控制每个试件实际稠度值。试验设计的湿拌砂浆配合比如表6所示。

表5 试件参数设计表

Table 5 Specimen parameter design table

胶砂比	标准稠度值/mm	掺合料种类	细骨料种类
1:5	70	粉煤灰	机制砂
1:6	90	再生砖粉	全组分再生砂
1:7	110	—	—

表6 湿拌砂浆试验配合比

Table 6 Test mix proportion of wet mixed mortar

试件 编号	胶砂 比	机制砂 掺量/ (kg· m <sup>-3</sup> )	全组分 再生砂 掺量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	水泥掺 量/(kg· m <sup>-3</sup> )	粉煤灰 掺量/ (kg· m <sup>-3</sup> )	再生 砖粉 掺量/ (kg·m <sup>-3</sup> )	外加剂 掺量/ (kg· m <sup>-3</sup> )
J-1/5-F	1:5	1 708	0	205	137	0	4.27
J-1/5-Z	1:5	1 708	0	205	0	137	4.27
Q-1/5-F	1:5	0	1 708	205	137	0	4.27
Q-1/5-Z	1:5	0	1 708	205	0	137	4.27
J-1/6-F	1:6	1 757	0	176	117	0	3.66
J-1/6-Z	1:6	1 757	0	176	0	117	3.66
Q-1/6-F	1:6	0	1 757	176	117	0	3.66
Q-1/6-Z	1:6	0	1 757	176	0	117	3.66
J-1/7-F	1:7	1 794	0	154	103	0	3.21
J-1/7-Z	1:7	1 794	0	154	0	103	3.21
Q-1/7-F	1:7	0	1 794	154	103	0	3.21
Q-1/7-Z	1:7	0	1 794	154	0	103	3.21

注:J、Q 分别表示试件所用细骨料为机制砂、全组分再生砂,Z、F 分别表示试件所用掺合料为再生砖粉、粉煤灰。

### 2.3 砂浆试块的制备和养护

砂浆试块长宽高为 70.7 mm × 70.7 mm × 70.7 mm。每个配合比组制备 5 个冻融试件和一个对比试件。砂浆的搅拌时间控制在 150 s:干拌 40 s,加水搅拌 40 s,快速搅拌 40 s,慢速搅拌 30 s。由于砂浆稠度均大于 50 mm,因此装模后不可用机械振捣,需人工

用捣棒均匀地由边缘向中心按螺旋方式插捣 25 次。振捣完毕后应在 20 °C 左右室温下静置 24 h,随后拆模并将试块养护在温度(20 ± 2) °C,相对湿度 90% 以上的标准养护室中。

### 2.4 试验方法

抗冻性能试验操作按照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)的规定的慢冻法进行,冻融机制为气冻水融。设定冻结、水融过程冻融箱内的温度分别为 -18 °C、18 °C,冻结水融时长分别为 4 h、4.5 h。设定循环次数为 25 次。每 5 次冻融循环进行一次外观检查,所有试件均未出现分层、开裂等严重的破坏特征,满足试验及规范要求。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 砂浆稠度与抗冻性能的关系

砂浆稠度值是评价砂浆流动性能的指标,与材料性能、试验配合比密切相关。图 2、图 3 为实测稠度值  $C$  与 25 次冻融循环后质量损失率  $\Delta m_m$ 、强度损失率  $\Delta f_m$  关系图。

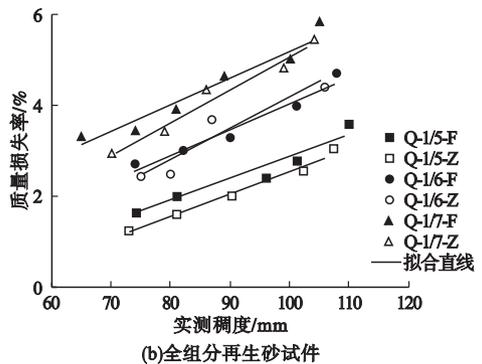
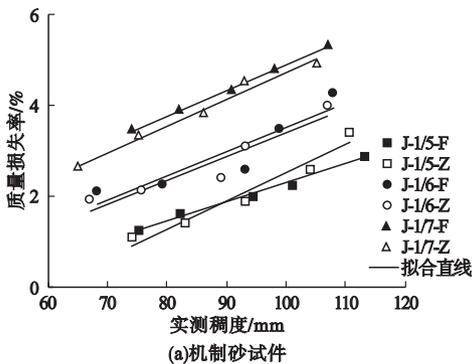


图2 实测稠度与质量损失率关系

Fig. 2 Relationship between measured consistency and mass loss rate

试验中砂浆实际稠度由用水量调控,而砂浆中自由水的含量是影响其冻融破坏程度的主因素,因此稠度与冻融破坏指标间关系紧密,分析二者之间的规律有助于了解湿拌砂浆的抗冻性能,为实际工程应用作参考。从图 2、图 3 可以看出,稠度每增加 10 mm,机制砂浆  $\Delta m_m$  平均增加 0.5%,  $\Delta f_m$  平均增加 1.8%;全组分再生砂浆  $\Delta m_m$  平均增加

0.6%,  $\Delta f_m$  平均增加 2.1%。试件 J-1/7-F、J-1/7-Z、Q-1/7-F、Q-1/7-Z 组在稠度值超过 100 mm 时,经 25 次冻融循环作用,其  $\Delta m_m$  与  $\Delta f_m$  已超过了《预拌砂浆》(GB/T 25181—2010)规定的 5% 和 25% 的限值,无法满足实际工程应用的要求。因此当再生湿拌抹灰砂浆工程应用中所需稠度值大于 100 mm 时,其实际的胶砂比应小于 1/7。

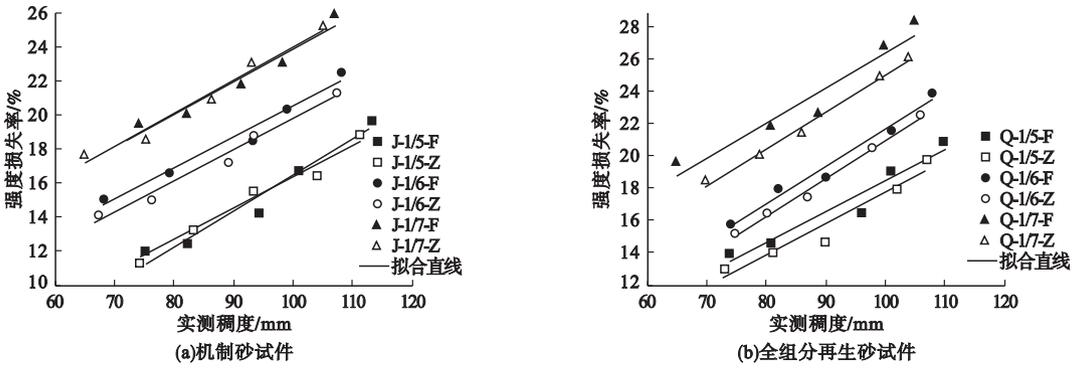


图 3 实测稠度与强度损失率关系

Fig. 3 Relationship between measured consistency and strength loss rate

表 7 为根据实测数据拟合出的回归方程。

表 7 冻融损伤与实测稠度值的回归关系式

Table 7 Regression relation between freeze-thaw damage and measured consistency

编号	参数	回归方程	判定系数
J-1/5-F	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0447x - 2.3053$	$R^2 = 0.915$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.2053x - 4.3614$	$R^2 = 0.871$
J-1/6-F	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0514x - 1.6114$	$R^2 = 0.812$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.1749x + 2.3508$	$R^2 = 0.801$
J-1/7-F	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0575x - 0.8825$	$R^2 = 0.998$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.1927x + 4.5936$	$R^2 = 0.884$
J-1/5-Z	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0402x + 2.0932$	$R^2 = 0.887$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.2014x - 4.4642$	$R^2 = 0.856$
J-1/6-Z	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0514x - 1.7404$	$R^2 = 0.882$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.1764x + 1.6346$	$R^2 = 0.890$
J-1/7-Z	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0575x - 1.1395$	$R^2 = 0.999$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.1853x + 4.7207$	$R^2 = 0.776$
Q-1/5-F	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0509x - 2.1850$	$R^2 = 0.925$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.1906x - 0.6215$	$R^2 = 0.931$
Q-1/6-F	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0592x - 1.8023$	$R^2 = 0.963$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.2452x - 2.7613$	$R^2 = 0.975$
Q-1/7-F	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0618x - 0.7724$	$R^2 = 0.982$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.2125x + 5.1875$	$R^2 = 0.915$
Q-1/5-Z	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0529x - 2.7314$	$R^2 = 0.907$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.2000x - 2.2000$	$R^2 = 0.915$
Q-1/6-Z	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0668x - 2.7990$	$R^2 = 0.937$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.2419x - 3.2082$	$R^2 = 0.990$
Q-1/7-Z	$C - \Delta m_m$	$y = 0.0733x - 2.1502$	$R^2 = 0.988$
	$C - \Delta f_m$	$y = 0.2273x + 2.2336$	$R^2 = 0.989$

对  $\Delta m_m$ 、 $\Delta f_m$  分别与  $C$  进行线性拟合, 得到变量间的回归关系式, 得到砂浆冻融损伤与稠度值之间的规律。可以看出  $C$  与  $\Delta m_m$ 、 $\Delta f_m$  之间线性关系良好, 利用线性规律, 可以在不明确用水量的情况下, 只通过稠度指标判定两种砂浆冻融破坏的程度。

### 3.2 胶砂比对砂浆抗冻性能的影响

由表 7 各组回归方程可计算得标准稠度 70 mm、90 mm、110 mm 时各组砂浆试件 25 次冻融循环后  $\Delta m_m$ 、 $\Delta f_m$  值(见图 4、图 5)。在同一标准稠度下可进行对比分析不同胶砂比、掺合料及细骨料对冻融损伤指标的影响。由图 4、图 5 可知, 胶砂比越小则试件冻融破坏越严重, 不同掺合料、细骨料的试件规律大致相同。胶砂比由 1/5 减小到 1/7 时,  $\Delta m_m$  平均增加 2.5%,  $\Delta f_m$  平均增加 7.3%。抹灰砂浆对于流动性能的要求高于对强度等级的要求, 因此相较于其他种类砂浆更适用于胶砂比小的配合比, 但降低胶砂比会导致砂浆中水泥的相对含量少, 水泥水化反应产物减少且水泥浆对砂粒的裹挟作用降低, 会降低砂浆强度<sup>[10]</sup>。胶凝材料少还会导致砂粒之间不能充分密实填充, 砂浆内部裂缝孔洞多, 容易积聚自由水, 在冻结过程中自由水冻结产生冻胀力造成裂缝的伸展和扩张, 造成水泥、骨料脱落, 导致砂浆质量与强度损失, 加剧冻融破坏。

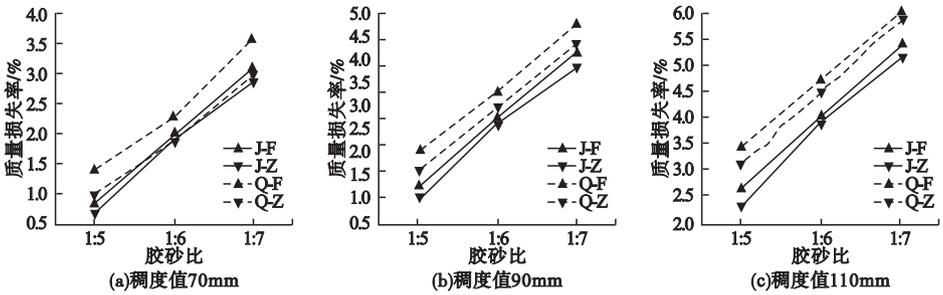


图4 冻融后标准稠度湿拌砂浆质量损失的规律

Fig. 4 Law of mass loss of standard consistency wet-mixed mortar after freeze-thaw cycles

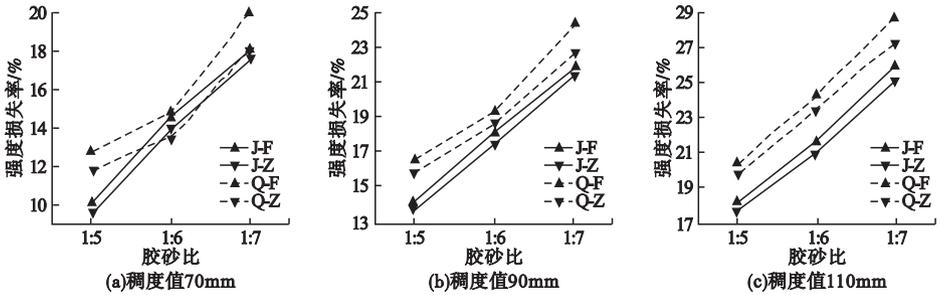


图5 冻融后标准稠度湿拌砂浆强度损失的规律

Fig. 5 Law of strength loss of standard consistency wet-mixed mortar after freeze-thaw cycles

### 3.3 掺合料种类对砂浆的抗冻性能的影响

再生砖粉与粉煤灰都是具有火山灰活性的矿物掺合料,富含硅铝相成分。且砖粉颗粒粒径小于 $45\ \mu\text{m}$ 时容易填充于内部缝隙中,加强砂浆的密实性<sup>[14]</sup>。图4、图5表明在骨料与胶砂比相同的情况下,同一稠度下掺再生砖粉的砂浆 $\Delta m_m$ 、 $\Delta f_m$ 值更低,说明再生砖粉作为掺合料使用时对于再生砂浆抗冻性的提升优于粉煤灰。从表3、表4可知再生砖粉的需水量比低于粉煤灰;相同质量下砖粉的 $\text{SiO}_2$ 质量分数比粉煤灰高约20%,对水泥水化反应的促进效果更强,可生成更多的C-S-H、胶凝物质,使砂浆结构更致密,减少内部连通孔隙数量,从而减少砂浆内部自由水的集聚,提升抗冻性能。因此再生砖粉更适合作为掺合料用于提升砂浆抗冻性,且在实际工程应用时还可以消耗砖材固废。

### 3.4 细骨料种类对砂浆抗冻性能的影响

图4、图5中虚线与实线分别表示全组分再生砂浆与机制砂浆的冻融破坏指标。胶砂比及掺合料种类相同时,掺砖粉的稠度值

70 mm的全组分再生砂浆抗冻性能可以达到机制砂浆的水平,随着稠度值变大,两种砂浆冻融损伤差距逐渐拉大,全组分再生砂浆 $\Delta m_m$ 、 $\Delta f_m$ 值的增长率高于机制砂浆,说明全组分再生砂浆的冻融损伤对稠度值的变化更敏感,在高稠度值时 $\Delta m_m$ 、 $\Delta f_m$ 更大。比较表2中骨料的基本参数,机制砂的石粉含量远大于全组分再生砂。研究表明,砂浆中含有10%~20%石粉对其抗冻性能的提升是有利的,因为适量石粉可以填充砂浆内部微裂隙,增强砂浆整体密实性<sup>[15]</sup>。此外,虽然全组分再生砂经过颗粒整形,但其吸水率仍远高于机制砂,高吸水率会使骨料在拌和过程中吸收多余水分,导致砂浆实际水胶比偏大,内部自由水更多,更易受到冻融损伤。

## 4 结论

(1) 砂浆稠度与 $\Delta m_m$ 、 $\Delta f_m$ 之间线性关系良好,稠度每增加10 mm,机制砂浆与全组分再生砂浆 $\Delta m_m$ 分别增加0.5%、0.6%, $\Delta f_m$ 分别增加1.8%、2.1%。胶砂比为1/7,稠度值

超过 100 mm 的试件在 25 次冻融循环后,其  $\Delta m_m$ 、 $\Delta f_m$  值达到 5% 和 25% 的限值。

(2) 全组分再生砂浆胶砂比由 1/5 减小到 1/7 时,  $\Delta m_m$  平均增加 2.3%,  $\Delta f_m$  平均增加 7.3%, 与机制砂浆抗冻性能差距逐渐增大。胶砂比小的试件水化反应弱, 砂粒间易形成微空隙, 冻融破坏更严重。

(3) 全组分再生砂与机制砂相比吸水率高, 对砂浆抗冻性能影响较大。胶砂比及掺合料种类相同时, 随着稠度值增大, 全组分再生砂浆  $\Delta m_m$ 、 $\Delta f_m$  的增长率高于机制砂浆。

(4) 相同细度的再生砖粉需水量比小于粉煤灰, 化学成分中  $\text{SiO}_2$  质量分数比粉煤灰多 20%, 火山灰活性更优, 对抗冻性能的提升效果优于粉煤灰, 具有实际的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 张伟, 李莉丽, 刘梁友, 等. 不同外加剂对湿拌砂浆性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(8): 2833 - 2837.  
(ZHANG Wei, LI Lili, LIU Liangyou, et al. Influence of different admixture on the properties of wet-mixed mortar[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2017, 36(8): 2833 - 2837.)
- [2] AREZKI T H, MONIQUE T T. Utilization of locally available industrial and agro-industrial wastes in concrete: a sustainable solution [J]. Journal of the Chinese ceramic society, 2015, 43(10): 1372 - 1384.
- [3] TAM V, SOOMRO M, EVANGELISTA A. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000—2017) [J]. Construction and building materials, 2018, 172: 272 - 292.
- [4] 刘荣涛, 朱建辉, 朱玮杰, 等. 建筑废弃黏土砖资源化综合利用综述[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(10): 3191 - 3195.  
(LIU Rongtao, ZHU Jianhui, ZHU Weijie, et al. Comprehensive research on utilizing the wasted building clay brick [J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2016, 35(10): 3191 - 3195.)
- [5] DONG Y J, SU C, QIAO P Z, et al. Microstructural damage evolution and its effect on fracture behavior of concrete subjected to freeze-thaw cycle [J]. International journal of damage mechanics, 2018, 27(8): 1272 - 1288.
- [6] AHMET B, KAZIM T, CEREN K. Influence of silica fume and class F fly ash on mechanical and rheological properties and freeze-thaw durability of self-compacting mortars [J]. Journal of cold regions engineering, 2018, 32(3): 1 - 8.
- [7] JIANG J Y, SHE W, LI W, et al. Effect of functional chemical admixtures on the performance of cement asphalt mortar used in ballastless track [J]. Journal of Wuhan university of technology (materials science edition), 2015, 30(5): 995 - 1000.
- [8] 段本硕, 孙跃东, 程光福, 等. 超细石粉对预拌砂浆性能影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(3): 96 - 99.  
(DUAN Benshuo, SUN Yuedong, CHENG Guangfu, et al. Experimental study on the effect of superfine stone powder on the performance of ready-mixed mortar [J]. Building structure, 2020, 50(3): 96 - 99.)
- [9] 张秀芝, 刘明乐, 杜笑寒, 等. 纳米  $\text{SiO}_2$  与粉煤灰协同改性水泥基材料性能研究[J]. 材料导报, 2017, 31(24): 50 - 55.  
(ZHANG Xiuzhi, LIU Mingle, DU Xiaohan, et al. Synergistic effect of nano silica and fly ash on the cement-based material [J]. Materials review, 2017, 31(24): 50 - 55.)
- [10] 郭远新, 李秋义, 徐庆宝, 等. 再生骨料抹灰砂浆抗冻性能试验研究 [J]. 混凝土, 2018(10): 118 - 122.  
(GUO Yuanxin, LI Qiuyi, XU Qingbao, et al. Experimental study on frost resistance of recycled aggregate plastering mortar [J]. Concrete, 2018(10): 118 - 122.)
- [11] MOHAMMAD G F, HAMID EI N, GHOLAM R E. Genetic prediction of cement mortar mechanical properties with different cement strength class after freezing and thawing cycles [J]. Structural concrete, 2018, 19(5): 1341 - 1352.
- [12] DING X M, CHEN Z F, LIU Q, et al. Effect of waste concrete with different strength on mechanical properties of recycled fine aggregate mortar [J]. Journal of southeast university (English edition), 2019, 35(3): 374 - 380.
- [13] 刘飞, 孙南屏, 李炜, 等. 废砖粉作为优质矿物掺和料的可行性研究 [J]. 砖瓦, 2014(8): 11 - 14.  
(LIU Fei, SUN Nanping, LI Wei, et al. Feasibility study on recycled brick powder used as admixture [J]. Brick-brick-tile, 2014(8): 11 - 14.)
- [14] LIN K L, CHEN B Y, CHIOU C S, et al. Waste brick's potential for use as a pozzolan in blended Portland cement [J]. Waste management & research, 2010, 28(7): 647 - 652.
- [15] 孔凌宇, 王磊, 韩冰. 石粉含量对机制砂水泥砂浆抗冻性能的影响 [J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2015, 34(5): 717 - 721.  
(KONG Lingyu, WANG Lei, HAN Bing. Effects of stone powder on anti-freeze behavior of cement mortar with manufactured sand [J]. Journal of Henan polytechnic university (natural science), 2015, 34(5): 717 - 721.)  
(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)