

矿物掺合料对机制砂水泥基自流平砂浆性能的影响

单俊鸿¹,张景华^{1*},王荣荣²,李 春²,赵常齐¹

(1. 河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038;2. 武汉德毅环保新材料有限公司,湖北 武汉 430200)

摘要: 试验选用普通硅酸盐水泥、硫铝酸盐水泥与半水石膏的三元胶凝体系,选用机制砂作为细集料,制备全机制砂水泥基自流平砂浆。选用粉煤灰、石粉与硅灰作为矿物掺合料,并研究矿物掺合料对全机制砂水泥基自流平砂浆流动度、抗压抗折强度与尺寸变化率的影响。研究结果表明:矿物掺合料的火山灰效应对自流平砂浆力学性能的发展产生积极影响,自流平砂浆流动度随硅灰掺量的增加而减小。通过正交试验优化自流平砂浆配方,得到最优矿物掺合料掺量为粉煤灰7%、石灰石粉4%、硅灰1.0%。

关键词: 机制砂;水泥基自流平砂浆;矿物掺合料;正交试验

中图分类号: TU525

文献标识码: A

Influence of Mineral Admixtures on the Properties of Machine-made Sand Cement-based Self-leveling Mortar

SHAN Junhong¹, ZHANG Jinghua^{1*}, WANG Rongrong², LI Chun², ZHAO Changqi¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China;

2. Wuhan Deyi Environmental Protection New Material Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430200, China)

Abstract: The test uses a ternary cementing system of ordinary Portland cement, sulphoaluminate cement and hemihydrate gypsum, and chooses machine-made sand as fine aggregate to prepare fully machine-made sand cement-based self-leveling mortar; chooses fly ash, stone powder and silica Ash as a mineral admixture to study the influence of mineral admixtures on the fluidity, compressive and flexural strength and dimensional change rate of cement-based self-leveling mortar made of fully machine-made sand. The pozzolanic effect of mineral admixtures has a positive impact on the development of the mechanical properties of self-leveling mortar, and the fluidity of self-leveling mortar decreases with the increase of silica fume content. The formula of self-leveling mortar is optimized through orthogonal experiments, and the best content of the excellent mineral admixture: fly ash 7%, limestone powder 4%, silica fume 1.0%.

Key words: machine-made sand; cement-based self-leveling mortar; mineral admixture; orthogonal test

随着建筑业的飞速发展和工业化水平的显著提高,厂房、商场与住宅等工程建设趋于施工便捷高效化发展,这为自流平砂浆的推广应用提供了广阔的市场。水泥基自流平干混砂浆是由胶凝材料、矿物掺和料(粉煤灰、重钙粉与硅灰等)、外加剂组成,具有只需人工辅助摊铺,依靠自重就能够流动找平的特点。由于其市场潜力巨大,自欧美

等国家引入中国后发展相当迅速^[1]。近年来,天然砂石等建筑材料的短缺现象已然出现,许多专家利用天然岩石或尾矿废石破碎生产的机制砂代替天然砂石,这大大缓解了日渐严重的“砂荒”现象。目前,我国机制砂替代天然河砂制备高性能混凝土在国内的应用技术相对成熟,机制砂在干混砂浆中的性能表现已经得到业内的认可^[2-3],对

收稿日期:2021-05-21

基金项目:中央引导地方科技发展专项资金项目(YDZX20181400002774)

作者简介:单俊鸿(1964-),男,江苏镇江人,博士,教授,从事建筑材料方面的教学与研究工作。

* 通讯作者:张景华(1994-),男,山东淄博人,硕士研究生,研究方向为新型土木工程材料研究。

矿物掺合料的研究也未曾间断^[4],廖国胜等^[5]人研究了硅灰对硫铝酸盐水泥水化反应的影响,发现掺加 5% 硅灰对硫铝酸盐水泥水化反应的促进最显著;姜博等^[6]人复掺硅灰与粉煤灰实现了材料的“超叠效应”,获得强度优于单组分基准砂浆;姚武等^[7]人采用选择性溶解法研究了水泥-硅灰-粉煤灰三元胶凝体系的水化特点:硅灰火山灰反应要早于粉煤灰,且随着二者掺量的不同,硅灰与粉煤灰的火山灰反应速率均发生改变。

而利用机制砂制备自流平砂浆的研究与应用相对较少^[8]。为提高机制砂自流平砂浆的整体性能,本次实验选用粉煤灰、石灰石粉与硅灰作为矿物掺合料,并通过正交试验的方法优化矿物掺合料掺量,制备全机制砂水泥基自流平干混砂浆。

1 原材料与试验方法

1.1 原材料

胶凝材料:实验选用普通硅酸盐水泥(P·O) 42.5;武汉市亚鑫水泥有限公司生产;硫铝酸盐水泥(SAC)42.5;河南某公司生产;半水石膏:市售半水石膏;外加剂:粉状聚羧酸减水剂,粘度为 400 mPa·s 的羟丙基甲基纤维素醚,瓦克 5 044 N 乳胶粉、德国明凌 AGITANR P803 型粉体消泡剂。水泥性能检测结果如表 1,矿物掺合料化学组成见表 2—表 4。

表 1 水泥物理力学性能指标

Tab. 1 Cement physical and mechanical performance index

技术指标	比表面积/($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	凝结时间/min	
		初凝	终凝
P. O	365	140	210
SAC	382	32	65

技术指标	抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
	3 d	28 d	3 d	28 d
P. O	5.6	8.0	27.8	48.7
SAC	7.2	8.5	48.5	57.6

表 2 石灰石超细粉化学组分 (单位: %)

Tab. 2 Chemical composition of ultrafine limestone powder

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	其他
2.82	0.61	0.29	51.20	1.30	0.11	43.67

表 3 硅灰化学成分 (单位: %)

Tab. 3 Chemical composition of Silica fume

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
96.09	1.21	0.80	0.30	0.60	1.00

表 4 粉煤灰化学成分 (单位: %)

Tab. 4 Chemical composition of fly ash

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	NaO	K ₂ O	其他
55.30	27.20	5.90	4.82	1.41	0.73	1.63	3.01

矿物掺合料:粉煤灰为市售一级粉煤灰;石灰石粉比表面为 650 cm^2/g 。

砂:本次实验制备水泥基自流平砂浆采用全机制砂,机制砂由武汉德毅环保新材料有限公司生产,机制砂物理性能指标如表 5 所示。

表 5 机制砂物理特性

Tab. 5 Physical properties of machine-made sand

石粉含量/%	含泥量/%	含水率/%	表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	松堆密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	细度模数 M_x
3.8	0.9	0.4	2 670	1 768	2.0

1.2 试验方法

1.2.1 配合比

固定三元胶凝材料的用量,普通硅酸盐水泥 25%、硫铝酸盐水泥 8%、半水石膏 2%、可再分散性乳胶粉 0.8%、纤维素醚 0.04% 与消泡剂 0.2%,水胶比为 0.5。

1.2.2 试件制备

根据 JC/T 985—2017《地面用水泥基自流平砂浆》的规定,砂浆搅拌设备采用行星式砂浆搅拌机(符合 JC/T 681 规定),实验环境温度为 $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 。

流动度检测:将表面整洁无水渍的玻璃试板水平放置在实验室操作台上,在玻璃板中央放置流动度试模,将待测自流平砂浆匀速垂直倒入试模内,避免砂浆溢出,并刮去试模口多余的砂浆,垂直向上提起 50~100 mm 并保持 10~15 s,使其自流平砂浆自由流动,等待 4 min 使其充分扩展分散,沿两个垂直方向测量,取其算术平均值作为实验结果。20 min 后低速搅拌 15 s,按照同样的方法测定 20 min 流动度。

抗压抗折强度检测:按照 GB/T17671 规定,采用 40 mm×40 mm×160 mm 三联棱柱体钢制试模进行抗压抗折强度测定,将拌和好的砂浆倒入三联试模,无需振动,1、3、28 d 各一组,每组三块。

尺寸变化率:符合 JGJ/T70 要求的立式砂浆收缩仪,试模采用内部尺寸为 10 mm×40 mm×160 mm 金属试模,三个试件为一组,在标准试验条件下养护 24 h 脱模,并标注试件编号与测定方向,按如下公式进行实验结果计算:

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L - L_d} \times 100\%$$

式中:ε 为尺寸变化率,%; L_0 为试件初始长度,单位为 mm; L_1 为自然养护干燥后试件的长度,单位为 mm; L 为试件本体的长度,160 mm; L_d 为伸缩头埋入砂浆试件中的长度之和,即(20±2) mm。

1.3 试验方案

试验通过改变石粉与硅灰的掺加量,观察二者各自对自流平砂浆流动性能与力学性能的影响,由于两种矿物掺合料对需水量的要求不同,调整减水剂掺量,实验安排如表 6 所示。

表 6 矿物掺合料实验安排

Tab. 6 Experimental arrangements for mineral admixtures

编号	胶凝材料/%	石粉/%	硅灰/%	减水剂/%
L-1	35	0	0	0.2
L-2	35	2	0	0.2
L-3	35	4	0	0.2
L-4	35	6	0	0.2
L-5	35	8	0	0.2
编号	胶凝材料/%	石粉/%	硅灰/%	减水剂/%
S-1	35	4	0.0	0.25
S-2	35	4	0.5	0.25
S-3	35	4	1.0	0.25
S-4	35	4	1.5	0.25
S-5	35	4	2.0	0.25

利用正交实验优化矿物掺合料的最佳掺量,试验采用 $L_9(3^4)$ (三因素三水平) 正交试验表,三因素分别为粉煤灰、石粉与硅灰。并分别调整其各自掺量:粉煤灰掺量为 3%、5%、7%,石粉掺量为 2%、4%、6%,硅灰掺量为 0.5%、1.0%、1.5%;控制外加剂掺量,乳胶粉 0.8%,减水剂 0.2%,纤维素醚 0.04%,消泡剂 0.15%。其因素水平表以及正交试验安排如表 7 与表 8 所示。

表 7 正交试验因素水平表

Tab. 7 Orthogonal test factor level table

水平	因素		
	A	B	C
	粉煤灰掺量/%	石粉掺量/%	硅灰掺量/%
水平 1	3	2	0.5
水平 2	5	4	1.0
水平 3	7	6	1.5

2 结果与分析

2.1 石粉与硅灰对自流平砂浆性能的影响

2.1.1 石粉与硅灰对流动性能的影响

石粉与硅灰对机制砂水泥基自流平砂浆流动

性影响的实验结果如图 1、图 2 所示:

表 8 正交试验安排

Tab. 8 Orthogonal test arrangement

编号	因素水平		
	A	B	C
Z-1	1	1	1
Z-2	1	2	2
Z-3	1	3	3
Z-4	2	1	2
Z-5	2	2	3
Z-6	2	3	1
Z-7	3	1	3
Z-8	3	2	1
Z-9	3	3	2

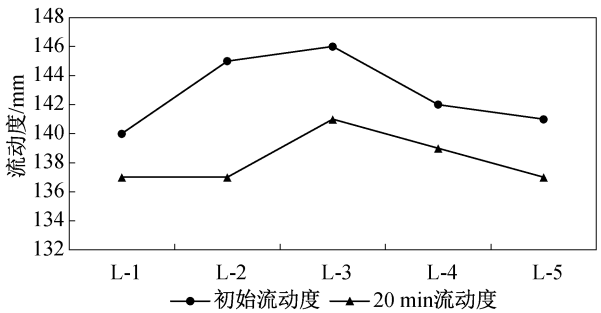


图 1 石粉对流动性的影响

Fig. 1 Influence of stone powder on fluidity

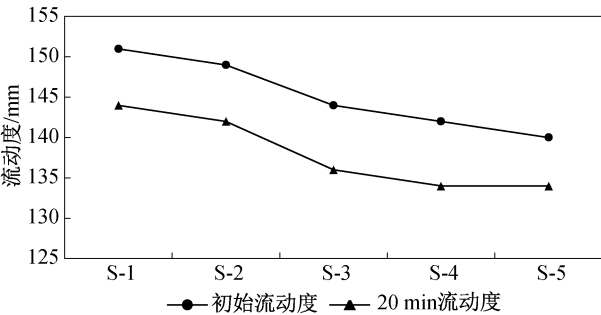


图 2 硅灰对流动性的影响

Fig. 2 Influence of stone powder on fluidity

由图 1、图 2 可知:石粉掺量为 0%、2%、4%、6%、8%的初始流动度与 20 min 流动度分别为 140 mm/137 mm、145 mm/137 mm、146 mm/141 mm、142 mm/139 mm、141 mm/137 mm,石粉掺量为 4%时达到最优流动度,较对比组(L-1)初始与 20 min 流动度分别增大 4.3%与 2.2%;而随着硅灰掺量的不断增加流动性能不断减小,硅灰掺量为 0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%时分别对应的初始与 20 min 流动度为 151 mm/144 mm、149 mm/132 mm、144 mm/136 mm、142 mm/134 mm、140 mm/134 mm,掺量为 2.0%时初始与 20 min 流动度最低。

石灰石粉相较于硅灰水化活性较低,早期需水量较小,石粉在合适掺量下对自流平砂浆的流动性能起到一定帮助,增大浆体流动度;而硅灰比表面积大,需水量高,随硅灰掺量的增多,砂浆浆体中自由水含量减少,无法缓冲集料颗粒间的摩擦阻力,导致自流平砂浆流动性能受损。硅灰的火山灰活性要高于石灰石粉,故硅灰对自流平砂浆性能的影响要更显著。

2.1.2 矿物掺合料对力学性能的影响

在砂浆材料中,石粉常以惰性材料作填充集料,而硅灰具有高火山灰活性,常作为早强组分被利用,本次实验就两类矿物掺合料对机制砂自流平砂浆力学性能的影响做具体研究,实验结果如图3、图4所示。

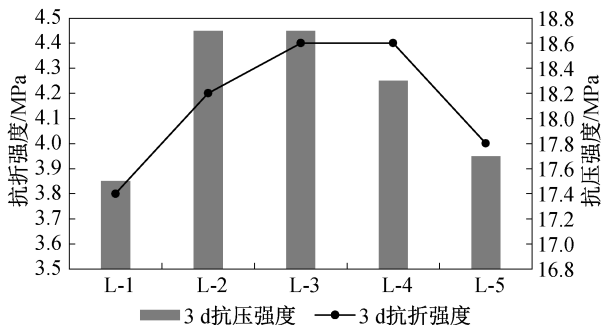


图3 石粉对3 d强度的影响

Fig. 3 The influence of mineral admixtures on 3 d strength

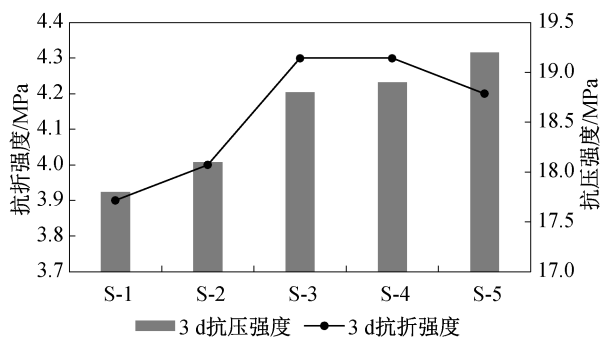


图4 硅灰对3 d强度的影响

Fig. 4 Influence of silica fume on 3d strength

由图3与图4可知:石粉掺量为0、2%、4%、6%、8%时,3 d抗折抗压强度分别为3.8 MPa/17.5 MPa、4.2 MPa/18.7 MPa、4.4 MPa/18.7 MPa、4.4 MPa/18.3 MPa、4.0 MPa/17.7 MPa;硅灰掺量为0、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%时,3 d抗折抗压强度分别为3.9 MPa/17.8 MPa、4.0 MPa/18.1 MPa、4.3 MPa/18.8 MPa、4.3 MPa/18.9 MPa、4.2 MPa/19.2 MPa;石粉与硅灰对自流平砂浆的早期强度均产生正面影响,石粉掺量为4%时达到最大抗折抗压强度4.4 MPa /

18.7 MPa,但过量石粉的加入导致砂浆强度降低;硅灰掺量的增加对砂浆抗压强度显著提高,当掺量为2%时抗压强度为9.2 MPa,较基础组S-1提高7.9%,当硅灰掺量超过1.5%,砂浆抗折强度降低。

石粉与硅灰对28 d强度的影响如图5、图6所示:28 d抗折抗压强度随石粉掺量的增加,出现先增大后减小的趋势,抗折强度在掺量为1.0%时达到最大值9.7 MPa,抗压强度在掺量为0.5%时达到最大值39.7 MPa,石粉掺量为1.5%与2.0%时,抗压强度较对比组L-1分别降低1.1%与1.3%;硅灰掺量的增加对28 d抗压强度的发展产生了正面影响,28 d抗折强度则在掺量为1.0%时达到最大值9.1 MPa,而随着硅灰掺量的不断增多,掺量为2.0%时出现28 d抗折强度低于基础组S-1,即硅灰对28 d抗折强度产生负面影响,其反应机理为硅灰的火山灰效应消耗浆体中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,自流平砂浆浆体碱度降低,胶凝材料水化反应受到影响。

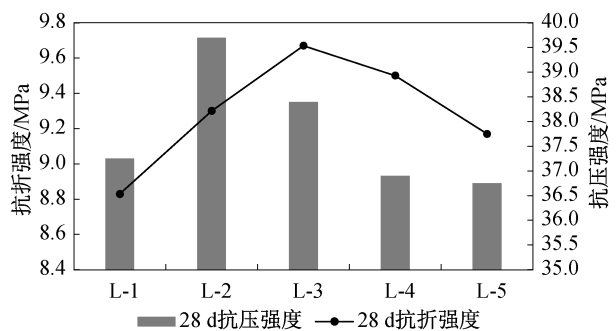


图5 石粉对28 d强度的影响

Fig. 5 Influence of stone powder on 28 d strength

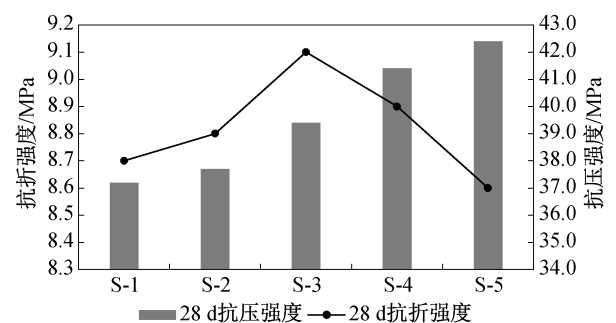


图6 硅灰对28 d强度的影响

Fig. 6 Influence of silica fume on 28 d strength

2.2 正交试验优化自流平配方

试验采用 $L_9(3^4)$ 正交表,实验结果见表9。

计算自流平砂浆流动度各水平均值,并对各因素结果进行极差分析($k_{\max} - k_{\min}$),如表10所示。

由结果可知,矿物掺合料对机制砂水泥基自流平砂浆初始流动度影响的先后顺序为:硅灰>粉煤

灰>石粉,对 20 min 流动度影响的先后顺序为:粉煤灰>硅灰>石粉;各个影响因素对流动度的优化组合为:初始流动度为 A3B2C1,20 min 流动度为 A3B2C1。

硅灰自身比表面积大,影响自流平砂浆需水量,在固定水灰比的试验条件下,流动度减小,有学者发现硅灰加快硫铝酸盐的水化速率,缩短水泥的凝结时间^[6];粉煤灰多为单个玻璃微珠状态且聚集度小,在自流平砂浆中起到“滚珠效应”,降低细集料之间的摩擦增大流动度^[9]。

综合实验数据与分析,矿物掺合料对流动度影响的重要性而言,20 min 流动度是影响自流平砂浆工作性能的重要指标,自流平砂浆不仅要保证足够初始流动度,而且不能出现过大的 20 min 流损,本实验依照 20 min 流动度的大小给出流动度最优水平:7%的粉煤灰、4%的石灰石粉与 0.5%的硅灰。

2.3 抗压抗折强度

机制砂制水泥基自流平砂浆正交试验抗压抗折强度极差分析结果如表 11 与表 12 所示。

表 9 正交试验结果

Tab.9 Orthogonal Test Results

试验编号	初始流 动度/mm	20 min 流 动度/mm	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa			尺寸变 化率/%
			1 d	3 d	28 d	1 d	3 d	28 d	
Z-1	139	128	2.2	7.1	3.5	14.6	7.4	31.7	0.05
Z-2	138	127	2.1	6.4	3.4	15.3	8.2	34.1	0.01
Z-3	137	125	2.5	8.3	3.6	16.5	8.4	34.6	-0.01
Z-4	138	127	2.0	6.2	3.5	15.6	7.0	33.1	0.03
Z-5	138	126	2.5	7.9	3.5	16.1	8.5	35.4	-0.11
Z-6	140	128	2.4	7.8	3.5	15.7	7.8	33.3	-0.07
Z-7	138	128	2.3	7.1	3.6	15.4	8.0	36.7	-0.09
Z-8	140	131	2.2	6.7	3.4	14.7	8.3	34.9	-0.04
Z-9	139	131	2.5	8.2	3.7	16.7	8.6	33.5	-0.09

表 10 流动度极差分析

Tab.10 Fluidity range analysis

编号	初始流动度/mm			20 min 流动度/mm		
	A	B	C	A	B	C
均值 1	138.000	138.333	139.667	126.667	127.667	129.000
均值 2	138.667	138.667	138.333	127.000	128.000	128.333
均值 3	139.000	138.667	137.667	130.000	128.000	126.333
极差	1.000	0.334	2.000	3.333	0.333	2.667

表 11 抗折强度极差分析

Tab.11 Flexural strength range analysis

编号	1 d 抗折强度/MPa			3 d 抗折强度/MPa			28 d 抗折强度/MPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
均值 1	2.267	2.167	2.267	3.500	3.533	3.467	8.000	7.467	7.833
均值 2	2.300	2.267	2.200	3.500	3.433	3.533	7.767	8.333	7.933
均值 3	2.333	2.467	2.433	3.567	3.600	3.567	8.300	8.267	8.300
极差	0.066	0.300	0.233	0.067	0.167	0.100	0.533	0.866	0.467

表 12 抗压强度极差分析

Tab.12 Compressive strength range analysis

编号	1 d 抗压强度/MPa			3 d 抗压强度/MPa			28 d 抗压强度/MPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
均值 1	7.267	6.800	7.200	15.467	15.200	15.000	33.467	33.833	33.300
均值 2	7.300	7.000	6.933	15.800	15.367	15.867	33.933	34.800	33.567
均值 3	7.333	8.100	7.767	15.600	16.300	16.000	35.033	33.800	35.567
极差	0.066	1.300	0.834	0.333	1.100	1.000	1.566	1.000	2.267

对表中实验数据进行极差分析,得到三种矿物掺合料对机制砂自流平砂浆抗折抗压强度影响的先后顺序为:

1 d 抗折强度:石粉>硅灰>粉煤灰;1 d 抗压强度:石粉>硅灰>粉煤灰。

3 d 抗折强度:石粉>硅灰>粉煤灰;3 d 抗压强度:石粉>硅灰>粉煤灰。

28 d 抗折强度:石粉>粉煤灰>硅灰;28 d 抗压强度:硅灰>粉煤灰>石粉。

由极差分析的结果,正交试验的优化组合如表 13 所示。

表 13 正交试验优化组合

Tab. 13 Optimum combination of orthogonal test

龄期	1 d	3 d	28 d
抗折强度	A3B3C3	A3B3C3	A3B2C3
抗压强度	A3B3C3	A2B2C3	A3B2C3

石粉通常被认为是一种惰性材料,随着石粉在各类砂浆材料中的应用,发现石粉的抗压强度比能够达到 60%,且对早期强度有较好的提升作用。收尘石灰石粉经过球磨机进一步研磨可以达到较高的比表面积,除本身对于胶凝体系强度的贡献之外,还起到物理填充作用,使自流平砂浆更加密实,具有更好的力学性能。

硅灰可以有效促进水泥的早期水化,硅灰颗粒的“成核”作用,促进了水化产物的结晶析出,加快了胶凝材料的早期水化进程。同时,硅灰可以改善硫酸盐水泥体系中钙矾石的形态,多为粗针状钙矾石;另一方面硅灰比表面积大,同样可以起到物理填充作用,使砂浆材料更加密实,常作为一种增强组分,应用在各类特种砂浆材料之中。

粉煤灰对早期强度的影响主要体现在物理填充作用上^[10],随着水化反应的进行,砂浆浆体碱度不断上升,促进了粉煤灰与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的反应,即火山灰效应,粉煤灰的火山灰效应生成水化硅酸钙凝胶,不断填充砂浆空隙,使自流平砂浆结构更加密实,提高砂浆强度。

结合试验数据,且综合考虑自流平砂浆的各方面性能,选出强度最优方案为:7%的粉煤灰、4%的石灰石粉与 1.5%的硅灰。

2.4 尺寸变化率

整理正交试验尺寸变化率,并对数据进行极差分析,结果汇总如表 14。

表 14 尺寸变化率极差分析

Tab. 14 Dimensional change rate range analysis

编号	尺寸变化率		
	A	B	C
均值 1	0.017	-0.003	-0.020
均值 2	-0.050	-0.047	-0.017
均值 3	-0.073	-0.057	-0.070
极差	0.090	0.054	0.053

从表中可以看到三因素的极差值,对机制砂水泥基自流平砂浆尺寸变化率影响的先后顺序为:粉煤灰>石粉>硅灰,对自流平砂浆的尺寸变化率影响最大的为粉煤灰,从实验数据中能够发现,粉煤灰、石粉与硅灰均会引起自流平砂浆的尺寸收缩,随着粉煤灰、石粉与硅灰掺量的增加自流平砂浆自收缩增大,但对自流平砂浆尺寸变化率的影响不大,综合考虑推荐自流平砂浆中的配比为:7%粉煤灰、2%石粉、1%硅灰。

3 结论

1)石灰石粉对自流平砂浆流动度的影响不大,掺加石灰石粉对自流平砂浆的 1、3 与 28 d 强度具有提高,石灰石粉相较于粉煤灰与硅灰的活性指数低,在自流平砂浆体系中主要起到微集料作用,提高自流平砂浆密实度。

2)硅灰具有较高的比表面积,颗粒粒径小,填充自流平砂浆中的微孔,增强砂浆密实性,且在水化早期就体现出较高的火山灰活性,与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成水化硅酸钙凝胶,随硅灰掺量增加自流平砂浆抗压强度提高,自流平砂浆的流动度减小,抗折强度随硅灰掺量的增加先增大后减小,掺量为 1.0%时抗折强度达到优。

3)粉煤灰可以增大机制砂水泥基自流平砂浆的流动性,粉煤灰早期火山灰活性低于硅灰,粉煤灰在自流平砂浆胶凝材料水化早期主要起到物理填充作用,使砂浆更加密实,水化后期随着浆体内碱度上升,粉煤灰发生火山灰效应,提高自流平砂浆强度。

4)通过正交试验优化矿物掺合料的最佳掺量为:7%粉煤灰、4%石粉、1%硅灰,可得到流动度满足要求、力学性能优异且表面无开裂的机制砂水泥基自流平砂浆。

参考文献:

- [1] 黄天勇,章银祥. 水泥基自流平砂浆机理研究综述[J]. 硅酸盐通报,2015,34(10):2864-2869.

(下转第 68 页)

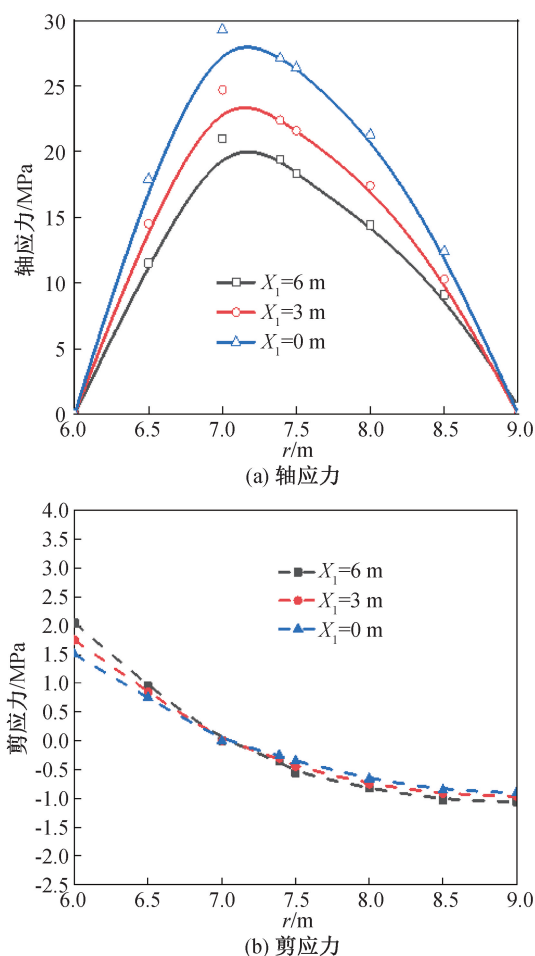


图9 不同 X_1 值的锚固体应力分布

Fig.9 Stress distribution of anchor solid with different X_1 values

合岩体力学理论,得到一种新的锚固体应力分布理论解析方法。

2)构建隧道三维数值模型,通过数值模拟与理论分析对比研究锚固体应力分布规律,两种方式计算得到的锚固体应力趋势基本一致,误差在

可控范围之内,验证了本文锚固体应力分布理论解析方法的可行性。

3)锚杆长度 L 对应力分布的影响最大,锚固体直径 d_s 、围岩内聚力 c 和初期支护施作时距掌子面的距离 X_1 对应力分布的影响次之。隧道设计和施工时,应合理考虑锚杆长度及其它要素,根据围岩条件科学选择支护时机,最大程度发挥注浆锚杆的锚固性能。

参考文献:

- [1]邵伟.地铁隧道围岩稳定性分析与锚注支护研究[D].青岛:山东科技大学,2008.
- [2]蒋庆,范宏运,李涛,等.超大断面小净距隧道应力场演化研究[J].中外公路,2021,41(1):197-202.
- [3]肖旺.考虑峰后特性的隧道围岩锚杆支护力学机制[D].长沙:湖南大学,2016.
- [4]汪珂.深埋隧道岩爆预测及防治技术现状综述[J].隧道建设:中英文,2021,41(2):212-224.
- [5]朱训国,杨庆,栾茂田.全长注浆锚杆的解析本构模型研究[C]//第九届全国岩石力学与工程学术大会论文集.2006.
- [6]宋洋,王贺平,常泳涛,等.含贯通节理岩体锚固界面应力分布规律分析[J].防灾减灾工程学报,2020,40(3):387-394.
- [7]张培胜.岩土锚杆的锚固力学特性研究[D].重庆:重庆大学,2003.
- [8]蔡美峰.岩石力学与工程[M].北京:科学出版社,2002.
- [9]王军,罗章.受锚岩石的力学特性与时效承载稳定性分析[M].北京:化学工业出版社,2020.
- [10]龙景奎.深部巷道围岩协同锚固机理研究与应用[D].徐州:中国矿业大学,2015.

(责任编辑 王利君)

(上接第6页)

- [2]汪良强,符海龙.机制砂在干混砂浆中的应用和发展趋势[J].工程技术研究,2020,5(06):143-144.
- [3]王稷良.机制砂特性对混凝土性能的影响及机理研究[D].武汉:武汉理工大学,2008.
- [4]TAO W H, LIU C, FU X H, et al. The Performance of Cement-Based Self-Leveling Mortars Affected by Mineral Admixtures[J].Applied Mechanics and Materials,2015,740:19-22.
- [5]廖国胜,徐路,廖宜顺.硅灰对硫铝酸盐水泥水化行为的影响机理[J].建筑材料学报,2017,20(06):840-845.
- [6]姜博,赵壮,刘刚.硅灰/粉煤灰复掺对水泥砂浆强度

的影响[J].北方建筑,2017,2(03):38-41.

- [7]姚武,吴梦雪,魏永起.三元复合胶凝体系中硅灰和粉煤灰反应程度的确定[J].材料研究学报,2014,28(03):197-203.
- [8]郑娟荣,卢晓玉.全机制砂水泥基自流平干混砂浆的试验研究[J].混凝土,2016(04):107-109+114.
- [9]张建隽,靳秀芝.自流平砂浆流动性的影响因素研究[J].中北大学学报:自然科学版,2014,35(05):620-624.
- [10]李东旭,陈益民,沈锦林,等.碱对粉煤灰的活化和微观结构的影响[J].材料科学与工程,2000(01):52-54+59.

(责任编辑 王利君)