

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.06.015

纤维网格布表层强化混凝土早期开裂特性

李悦媛¹, 许巍¹, 张俊^{1,2}, 江帆³, 高培伟², 胡成⁴

(1. 空军工程大学航空工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 210016;
3. 中国人民解放军海军研究院, 北京 100070; 4. 93023 部队, 内蒙古 呼伦贝尔 021000)

摘要:为解决机场道面水泥混凝土在施工期易产生早期微裂缝,给使用期飞机运行带来安全隐患的问题,提出通过在混凝土表层砂浆层中布设纤维网格布的方式强化机场道面的表面性能。选择了碳纤维、芳纶纤维和玄武岩纤维 3 种纤维网格布作为强化材料,以水泥砂浆早期开裂性能表征混凝土早期抗开裂性能,探究了在高温多风模拟环境下水灰比、灰砂比、细度模数和纤维网格布对水泥砂浆早期抗开裂性能的影响。结果表明,当水灰比为 0.43、灰砂比为 0.47、细度模数为 3.4 时,水泥砂浆早期抗开裂性能最好;当纤维网格布为玄武岩纤维网格布,网格尺寸为 3 mm×3 mm 时水泥砂浆早期抗开裂性能强化效果最好。

关键词:混凝土;表层强化;纤维网格布;平板开裂试验;抗裂性能

中图分类号:U416.216 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2022)06-0114-09

Early cracking characteristics of concrete strengthened with fiber mesh

LI Yueyuan¹, XU Wei¹, ZHANG Jun^{1,2}, JIANG Fan³, GAO Peiwei², HU Cheng⁴

(1. College of Aeronautical Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;
3. Naval Research Institute of the PLA Army, Beijing 100070, China;
4. PLA Unit 93023, Hulunbuir 021000, China)

Abstract: In order to solve the problem that the cement concrete of the airport pavement is easy to produce early micro cracks during the construction period and bring potential safety hazards to the aircraft operation during the service period, this study proposed a method to strengthen the surface performance of the airport pavement by laying fiber mesh in the concrete surface mortar layer. Carbon fiber, aramid fiber and basalt fiber mesh were selected as reinforcement materials to characterize the early cracking resistance of concrete with the early cracking performance of mortar. The effects of water cement ratio, cement sand ratio, fineness modulus and fiber mesh on the early cracking resistance of cement mortar in high temperature and multi wind simulation environment were studied. The results show that the early cracking resistance of cement mortar is the best when the water cement ratio is 0.43, the cement sand ratio is 0.47 and the fineness modulus is 3.4, and when the fiber mesh is basalt fiber with a grid size of 3 mm × 3 mm, the strengthening effect of early cracking resistance is the best.

Key words: concrete; surface strengthening; fiber mesh; plate cracking test; crack resistance performance

通常机场道面水泥混凝土所用的水泥强度等级较高,且施工期多为夏季,导致水泥混凝土道面在施工过程及施工完成后终凝前这段时间极易产生早期微裂缝,在后期环境及飞机荷载的作用下,早期微裂缝会不断扩展,导致道面板产生渗漏,腐蚀其组分,加速道面表层破坏,并直接或间接地影响道面强度和道面整体的稳定性,进而影响跑道的使用性能和安全性能,因此寻找一种有效提高道面混凝土早期抗开裂性能的方法具有重大意义^[1-5]。

混凝土开裂的原因有多种,但多是由收缩变形引起的。因此解决高性能混凝土开裂的问题,主要从解决

基金项目: 中国博士后科学基金(2020M671485);江苏省自然科学基金(BK20200429);陕西省自然科学基金基础研究计划(2020JQ474);海军研究院青年创新基金(NA-J201902-JJ0-HF001)

作者简介: 李悦媛(1999—),女,硕士研究生,主要从事机场道面工程研究。E-mail: 985914773@qq.com

通信作者: 许巍(1978—),男,副教授,博士,主要从事机场工程研究。E-mail: xuwei_afeu@sina.com

引用本文: 李悦媛,许巍,张俊,等. 纤维网格布表层强化混凝土早期开裂特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(6):114-122.
LI Yueyuan, XU Wei, ZHANG Jun, et al. Early cracking characteristics of concrete strengthened with fiber mesh [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022, 50(6): 114-122.

收缩变形引起的裂缝入手,其中主要的途径有两种:①降低混凝土内部的收缩应力,使其不超过混凝土的自身强度;②提高混凝土早期抵抗收缩应力的能力,目前主要有掺加纤维、外加剂、矿物掺合料及改进养护方式和优化混凝土组分 5 种方式。施凤莲等^[6]研究发现在混凝土中掺入纤维是克服混凝土早期塑性收缩裂缝的有效途径之一;Borg 等^[7]研究发现聚对苯二甲酸乙二醇酯纤维可以有效抑制混凝土干缩和塑性开裂,且抑制效果与纤维掺量和长度有关;Shen 等^[8]研究发现掺入 3D 钢纤维可以有效地减少高强混凝土自收缩,提高其抗开裂性能;Akkaya 等^[9]提出通过掺入膨胀剂来抵消水泥基材料的干缩,从而起到增强抗开裂性能的效果;Yoo 等^[10]提出同时掺入减收缩剂和膨胀剂可以提高混凝土早期抗开裂性能。

养护方式主要从内养护和外养护两方面考虑。内养护方面,目前对高吸水聚合物的研究较多^[11];外养护包括预湿轻骨料^[12]、涂层养护法^[13-14]和加热养护法^[15]等。这两类养护方式均能在一定程度上提高混凝土早期抗开裂的性能。优化混凝土组分主要从水泥细度、粗细集料含量和级配等方面进行改善,在一定程度上能够提高混凝土早期抗开裂的性能,但仍存在如纤维拌和的不均匀性可能导致道面水泥混凝土其他性能下降、掺加减收缩剂和膨胀剂等外加剂不能很好地兼顾其他性能的强化、掺入矿物掺合料可能导致混凝土强度等性能的下降、养护和组分优化效果有限等一些不足。

纤维网格布是一种以纤维为原材料,经过特定工序制成的强化材料,其在经向和纬向均具有较高的强度。目前,纤维网格布在墙体保温、防水、混凝土修复等行业已取得成功的应用。张勇超^[16]研究发现,无论老化前后,相比素试件,纤维网格布增强聚合物砂浆试件的抗弯比例极限强度和抗弯破坏强度均有大幅度的提高,而且最终破坏时的位移也有很大的提升。封雷等^[17]研究得出玻璃纤维网格布增强复合保温墙板的抗压强度为 4.29 MPa 的结论。许景欣^[18]认为,复合在抹面砂浆中的耐碱网格布能够改善面层的机械强度,保证饰面层的抗力连续性,增强防护层的拉伸强度。陈培鑫等^[19]认为,耐碱玻纤网格布可以明显增强抹灰砂浆与墙面的黏结,提高墙面抹灰层的黏结强度;在其他条件相同的情况下,随着耐碱玻纤网格布单位面积质量的增加,墙面抹灰层的拉伸黏结强度有明显增强。刘玲玲^[20]通过 TRC 薄板的单轴拉伸试验、四点抗弯试验、三点抗折试验,探讨了织物层数、掺入短切钢纤维及预应力对 TRC 薄板力学行为的影响。王海涛等^[21]通过有限元方法探讨了纤维增强复合材料板影响疲劳裂纹修复效果的因素。

纤维网格布在建筑行业的应用表明,其可有效增强水泥砂浆等基础材料的力学性能,特别是胡成等^[3]的初步研究结果更加表明纤维网格布可有效增强机场混凝土道面的抗冻性能。因此,通过纤维网格布对混凝土表层进行增强的方法有望解决机场水泥混凝土道面表层抗裂性不足的问题。

为此,本文提出在混凝土表面水泥砂浆层中布设纤维网格布对混凝土进行强化,对不同水灰比、砂率、细度模数的素水泥砂浆以及不同种类、尺寸纤维网格布强化水泥砂浆的早期抗开裂性能进行研究。

1 试验概况

1.1 试验材料

试验用水泥为 PO-42.5R 硅酸盐水泥且掺量固定为 320 kg/m³。砂是产自西安灞河的天然河砂,按照原中国人民解放军总后勤部《军用机场场道工程施工及验收规范》将砂分级,配制相应的细度模数,所配制出不同细度模数砂的级配曲线如图 1 所示。吴胜兴等^[22]认为骨料分布均匀性是新拌混凝土均匀性的最重要因素。因此,考虑到混凝土的均匀性,本试验粗集料选用陕西茂县的石灰石碎石,分为 5~10 mm、>10~20 mm 和>20~40 mm 3 种级配,为 2:3:6。该比例通过优选法获得,为振实密度最大时的比例,且该比例需满足表 1 中规定的级配范围。以此配置的混凝土抗折强度试验结果如表 2 所示。

本文试验共选用 3 种纤维网格布,其中玄武岩纤维网格布分为 3 mm×3 mm、5 mm×5 mm 和 10 mm×10 mm 3 种;芳纶纤维网格布和碳纤维网格布网孔尺寸均为 5 mm×5 mm。纤维网格布外形如图 2 所示,性能参数见表 3。

1.2 试验方法

考虑到机场水泥混凝土道面属于板状构件,因此,采用平板式限制收缩法开展试验。由于混凝土浇筑的

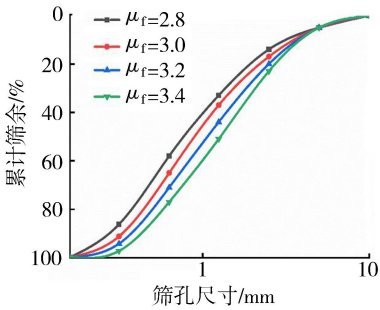


图 1 砂的级配曲线
Fig.1 Grading curve of sand

表1 粗集料颗粒级配
Table 1 Particle grading of coarse aggregate

公称粒径/ mm	不同筛孔尺寸(方孔筛)累计筛余(按质量计)/%								
	2.36 mm	4.75 mm	9.50 mm	16.0 mm	19.0 mm	26.5 mm	31.5 mm	37.5 mm	53 mm
5~10	95~100	90~100	40~80		0~10				
>10~20			95~100		80~100			0~10	
>20~40		95~100	70~90		30~65			0~5	

表2 抗折试验结果
Table 2 Results of bending resistance test

试验组别	水灰比	砂率/%	细度模数	抗折强度/MPa	试验组别	水灰比	砂率/%	细度模数	抗折强度/MPa
1	0.44	34	3.4	5.28	9	0.42	34	3.0	6.16
2	0.44	32	3.2	6.03	10	0.42	32	2.8	5.80
3	0.44	30	3.0	5.29	11	0.42	30	3.4	5.98
4	0.44	28	2.8	6.05	12	0.42	28	3.2	6.38
5	0.43	34	3.2	6.31	13	0.41	34	2.8	5.61
6	0.43	32	3.4	6.64	14	0.41	32	3.0	4.89
7	0.43	30	2.8	6.22	15	0.41	30	3.2	4.54
8	0.43	28	3.0	5.69	16	0.41	28	3.4	5.28

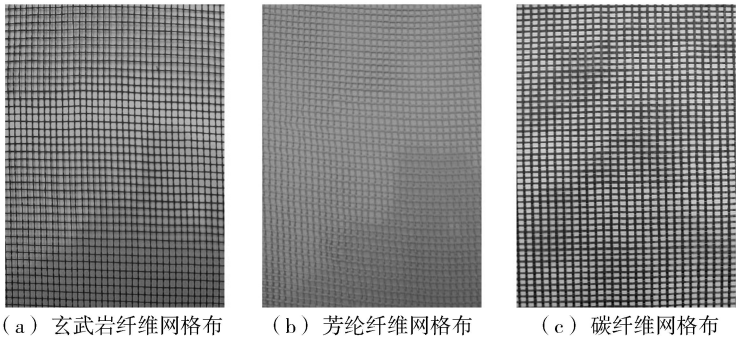


图2 纤维网格布形态
Fig.2 Fiber mesh morphology

表3 纤维网格布性能参数
Table 3 Performance parameter of fiber mesh

类别	密度/ (kg·m ⁻³)	比热容/ (J·(kg·K) ⁻¹)	热传导率/ (W·(m·K) ⁻¹)	热膨胀系数/ 10 ⁻⁶ ℃	泊松比	拉伸强度/ MPa	弹性模量/ GPa
玄武岩纤维网格布	3000	0.94	0.0400	-7.5	0.28	127.67	93.1
碳纤维网格布	1750	0.75	0.0223	-1.4	0.31	4210	230
芳纶纤维网格布	1440	0.33	0.0440	-2.0	0.30	2053	126

平板试件不易出现明显的裂缝,难以进行数据分析和对比,且早期开裂裂缝主要产生于表层砂浆层中,而纤维网格布强化位置也位于砂浆层,因此,本文通过对水泥砂浆进行早期抗裂研究,来表征纤维网格布表层强化水泥混凝土的早期抗开裂性能。

1.2.1 试验步骤

提前24 h将原材料置于试验环境中,使其在进行试验时,原材料的温度与室温一致;并将试验所需的纤维网格布裁剪成590 mm×590 mm。水泥砂浆搅拌完成后,将拌合物浇筑至试模中并抹平,当需要铺入纤维网格布时,应将纤维网格布平摊在试件表面,使用抹子将纤维网格布下压,压至肉眼不可见时停止并抹面。

试验在温度为(20±2)℃,相对湿度为(60±5)%的恒温恒湿环境中进行,试件成型30 min后水泥砂浆已经初凝,风速不会造成砂浆二次流动,此时开始多风高温环境模拟。调整风扇距离试件的距离,使试件中心往上0.1 m处保持(5±0.5)m/s的风速大小,吹24 h;开启风扇的同时开启距试件1 m高的碘钨灯进行照射,照射4 h后关闭,如图3所示。

在试件成型24 h后,开始对试件裂缝信息进行统计。使用读数显微镜和电子游标卡尺测量裂缝宽度,

沿裂缝长度预估 3 个裂缝宽度最大位置进行测量,取最大值作为最大宽度;通过棉线和钢尺实现对裂缝长度的测量。

1.2.2 评价指标

以单位面积总开裂面积和裂缝降低系数作为评价指标。

a. 单位面积总开裂面积。每条裂缝的平均开裂面积 A_1 、单位面积裂缝数 b 、单位面积的总开裂面积 A_2 公式分别为

$$A_1 = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^n W_i L_i$$

(1)

$$b = \frac{N}{A}$$

(2)

$$A_2 = A_1 b$$

(3)

式中: W_i 为第 i 条裂缝的最大宽度,精确到 0.01 mm; L_i 为第 i 条裂缝的长度,精确到 1 mm; N 为总裂缝数,条; A 为平板面积, m^2 。

b. 裂缝降低系数。根据统计的裂缝信息,计算每个试件的裂缝名义总面积 A_{cr} ,然后计算裂缝降低系数 η :

$$A_{\text{cr}} = \sum_i^n W_i L_i$$

(4)

$$\eta = \frac{A_{\text{mer}} - A_{\text{fer}}}{A_{\text{mer}}} \times 100\%$$

(5)

式中需作比较的砂浆试件记为 A_{fer} ,基准试件记为 A_{mer} 。

1.3 试验方案

用水量、细集料用量及粗细程度、水泥等级、水泥用量及细度和外部环境等都会对混凝土早期开裂造成一定的影响,因此本文主要通过水泥砂浆早期开裂试验研究水灰比、砂率、细度模数、不同种类和网格尺寸的纤维网格布对混凝土早期开裂性能的影响。首先研究不同水灰比、灰砂比、细度模数的素水泥砂浆,之后对纤维网格布表层强化水泥砂浆的早期开裂性能进行对比。试验配合比采用绝对体积法得到,水泥用量固定为 320 kg/m^3 ,试验方案如表 4 所示,每组包括 3 个试件,取平均值作为试验结果。

2 试验结果与分析

2.1 素水泥砂浆早期开裂试验

2.1.1 水灰比对水泥砂浆早期开裂性能影响

不同水灰比的水泥砂浆平板开裂试验结果如图 4 所示。由图 4 可以看出,随着水灰比的不断增大,4 种开裂参数均呈现先减小后增大的趋势,说明随着水灰比的不断增长,水泥砂浆的早期抗开裂性能呈现出先增大后减小的趋势,在所研究的范围内,当水灰比为 0.43 时早期抗开裂性能最好,相对于水灰比为 0.50 时,其最大裂缝宽度减少了 40%,单位面积总开裂面积减少了 38.5%,裂缝总长度降低了 27.3%,若以水灰比为 0.5 的水泥砂浆作为基准砂浆组,当水灰比为 0.43 时,裂缝降低系数可达 27.7%。

水泥浆体包括液相和固相两部分,水化反应会导致液相减小,减小的部分由固相填充,是一个逐渐密实的过程。水灰比越小,需固相填充的地方越少,说明混凝土更加密实。低水灰比可以很大程度地提高混凝土强度,但会对混凝土收缩性能造成较大影响。影响道面混凝土早期开裂的收缩主要是自收缩、塑性收缩和干燥收缩。当水灰比较低时,自收缩起主导作用。Tazawa 等^[23]的研究结果表明,随着水灰比的减小,自收缩值占总收缩值的比例不断增大,当水灰比为 0.40、0.30 和 0.19 时,自收缩所占比例分别为 25%、35% 和 75%。因此,当

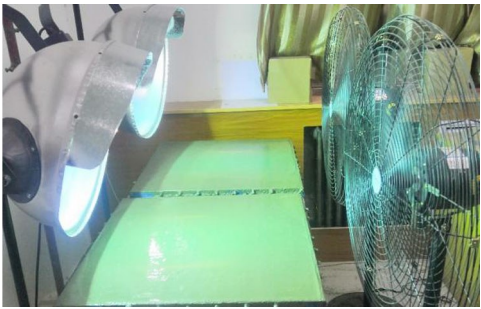


图 3 水泥砂浆平板开裂试验

Fig.3 Plate cracking test of cement mortar

表 4 试验方案

Table 4 Test scheme

组号	水灰比	灰砂比	细度模数	纤维网格布
1	0.37	0.56	2.8	
2	0.40	0.56	2.8	
3	0.43	0.56	2.8	
4	0.46	0.56	2.8	
5	0.50	0.56	2.8	
6	0.43	0.53	2.8	
7	0.43	0.49	2.8	
8	0.43	0.47	2.8	
9	0.43	0.56	3.0	
10	0.43	0.56	3.2	
11	0.43	0.56	3.4	
12	0.50	0.56	2.8	5 mm×5 mm 玄武岩
13	0.50	0.56	2.8	5 mm×5 mm 碳纤维
14	0.50	0.56	2.8	5 mm×5 mm 芳纶纤维
15	0.50	0.56	2.8	3 mm×3 mm 玄武岩
16	0.50	0.56	2.8	5 mm×5 mm 玄武岩
17	0.50	0.56	2.8	10 mm×10 mm 玄武岩

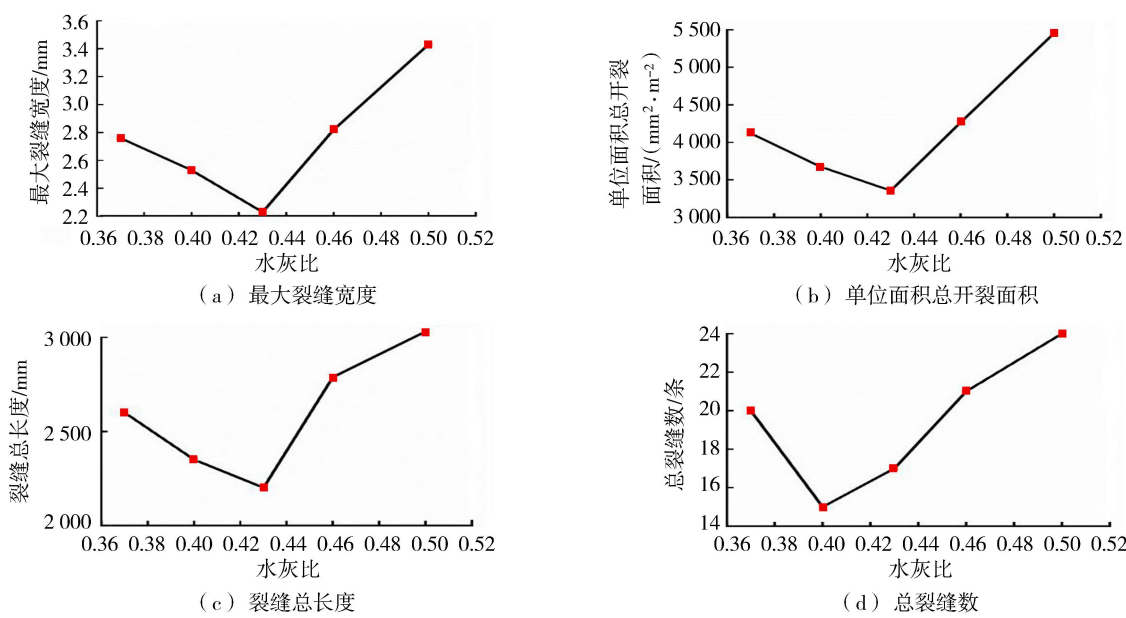


图 4 裂缝评价参数(不同水灰比)

Fig. 4 Crack evaluation parameters (different water cement ratio)

水灰比小于某个临界值时,水灰比越低,自收缩越大,而开裂程度越明显。依据本次试验结果,水灰比临界值为 0.43,几乎接近 Powers^[24] 确定的临界值 0.42。当水灰比超过该临界值时,随着水灰比的不断增大,水泥砂浆的含水量增大,在外部高温干燥环境作用下,其塑性收缩值和干燥收缩值增大,从而开裂程度更加明显。

2.1.2 灰砂比对水泥砂浆早期开裂性能影响

不同灰砂比的水泥砂浆平板开裂试验结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,随着灰砂比的减小,最大裂缝宽度逐渐增大,单位面积总开裂面积逐渐减小,裂缝总长度规律不够明显,总裂缝数呈现先增大后减少的趋势。虽然不同参数表现出的开裂性能规律不一样,但因评价其开裂性能的主要参数为单位面积总开裂面积,因此可以认为,在所研究的范围内,随着灰砂比的不断减小,水泥砂浆早期抗开裂性能不断增强。以第 6 组水泥砂浆为基准砂浆,当灰砂比为 0.47 时,其裂缝降低系数可达 13.8%,这与马—平等^[25] 开展的结构工程水泥砂浆塑性干缩开裂试验结果一致。其试验结果表明:当灰砂比从 1 : 1 减小到 1 : 3 时,水泥砂浆塑性开裂总权值不断减小,以 1 : 1 灰砂比为基准,当灰砂比为 1 : 2 和 1 : 3 时,塑性开裂总权值可减少 50% 和 90%。

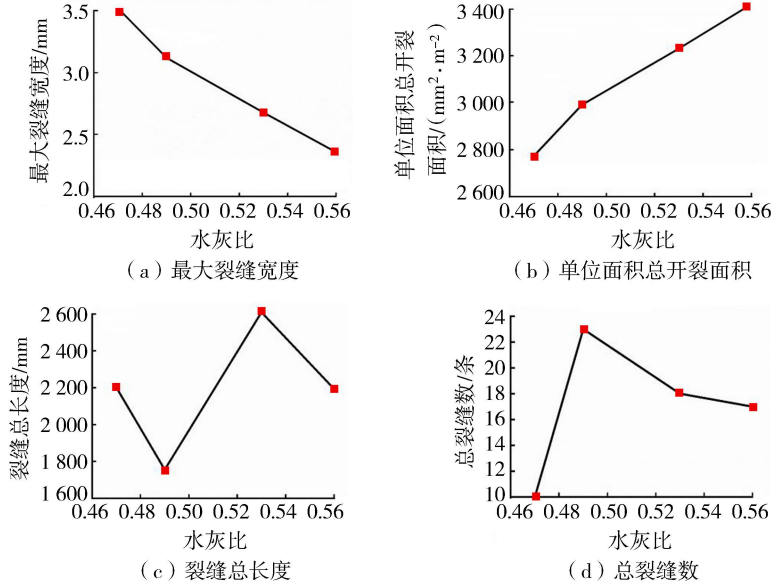


图 5 裂缝评价参数(不同灰砂比)

Fig. 5 Crack evaluation parameters (different cement sand ratio)

因此,工程中可通过适当增加砂的含量来提高水泥砂浆的早期抗开裂性能。砂对水泥砂浆早期抗开裂性能的影响主要包括两方面,一方面一定程度增加砂的含量有助于增强水泥砂浆的泌水性,另一方面增加砂的比例意味着水泥所占比例减少,因此早期水化反应消耗的水量也相应地减少,从而减小了收缩应力。但是灰砂比不宜过小,因为砂的含量过多,会减小水泥砂浆的和易性,致使其早期抗拉强度降低,不利于早期抗开裂。

2.1.3 细度模数对水泥砂浆早期开裂性能影响

不同细度模数的水泥砂浆平板开裂试验结果如图 6 所示。由图 6 可以看出,随着细度模数逐渐增大,最大裂缝宽度、单位面积总开裂面积及裂缝总长度均逐渐减小,总裂缝数逐渐增大。在所研究的范围内,当细度模数为 3.4 时,水泥砂浆早期抗开裂性能最好。以第 10 组水泥砂浆作为基准砂浆,当细度模数为 3.4 时,裂缝降低系数为 15.8%。本文认为细度模数主要影响砂的比表面积,从而影响水泥砂浆早期开裂性能,细度模数增大,比表面积减小,一方面会使砂表面的吸附水减小,一定程度增加了砂浆可蒸发的水量,从而减缓水泥砂浆早期开裂,这与马一平等^[25]所得结论一致。另一方面,采用平板式限制收缩法进行试验,是考虑比表面积减小会使水泥砂浆之间的黏聚力减小,从而导致开裂程度增加。因此,相对于细砂和粗砂,中砂早期开裂程度更加明显。

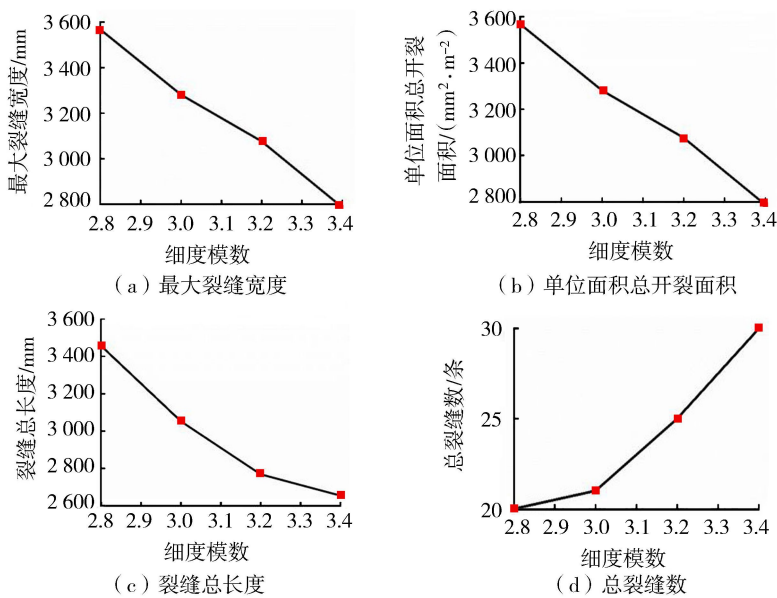


图 6 裂缝评价参数(不同细度模数)

Fig. 6 Crack evaluation parameters (different fineness modulus)

2.2 纤维网格布表层强化水泥砂浆早期开裂试验

2.2.1 纤维网格布种类的影响

不同种类纤维网格布强化水泥砂浆平板开裂试验结果如表 5 所示。由表 5 可以看出,相对于对照组,纤维网格布表层强化水泥砂浆的最大裂缝宽度、单位面积总开裂面积和裂缝总长度都有了较大程度的降低,以玄武岩纤维网格布表层强化水泥砂浆组为例,其裂缝降低系数为 92.9%。事实上,纤维网格布对水泥砂浆抗裂效果的增强实际效果要比试验效果更好,这是因为为了使存在一定倾斜变形的玄武岩纤维网格布能够顺利铺入水泥砂浆中,试验中将纤维网格布大小统一定为 590 mm×590 mm,而对于经纤维网格布强化后的水泥砂浆,其大部分裂缝都在试件边角,在试件中心区域裂缝很少。可以看出,纤维网格布极大提高了水泥砂浆早期抗开裂性能;3 种纤维网格布中,玄武岩纤维网格布提升效果最好,芳纶纤维网格布次之,最后是碳纤维网格布。

表 5 不同种类纤维网格布裂缝评价参数

Table 5 Crack evaluation parameters under different kinds of fiber mesh

组号	最大裂缝宽度/mm	单位面积总开裂面积/(mm ² ·m ⁻²)	裂缝总长度/mm	总裂缝数/条	裂缝降低系数/%
14	3.5	5 566	3 210	27	
15	0.61	395	865	21	92.9
16	0.71	444	1 067	22	92.0
17	0.65	430	1 011	24	92.3

纤维网格布对水泥砂浆早期抗开裂性能的增强机理可用复合力学理论来解释。纤维网格布以耐碱纤维

网格布为主,采用中无碱纤维砂,主要成分是铝硼硅酸盐,其化学性质稳定。中无碱纤维砂是由高温熔制成连续的纤维丝再纺织成网状形成的。纤维网格布由多种不同化学特性的成分熔制而成,成网状结构,且表面并不光滑连续,水泥砂浆可以充分地流入并包裹住纤维网格布,待到水泥砂浆硬化后形成一个整体,纤维网格布与水泥砂浆之间的拉伸黏结力和摩擦力大大增大,同时,在黏结面的空气大大减少,从而提高了拉伸黏结力,增强了水泥砂浆的早期抗开裂性能。

首先,由于纤维网格布与水泥砂浆间的摩擦力增大,它们之间的界面性能发生改变,抗裂性能、抗冲击性能得到提升,进而提高了承载能力。其次,纤维网格布在水泥砂浆中均匀分布,减少了收缩现象,推迟了微裂缝现象出现的时间,从而防止了开裂。这是因为一方面,通常在砂浆中的纤维网格布分布在各个点所受到的力是平均的,从而提高了抵抗外力的连续性,增强了表层的强度。另一方面,水泥砂浆属于脆性材料,而纤维网格布有一定的韧性,其与水泥砂浆相结合,会使脆性的水泥砂浆在受到弯力时具有一定的延展性。试验中在早期开裂的试件底部铺设了两层聚乙烯薄膜,水分无法从底部蒸发,因此裂缝主要产生在试模表面。纤维网格布可看作表层水泥砂浆的结构钢筋,分散并承担了一定的外部约束,使水泥砂浆产生拉应力。研究结果表明,纤维网格布拉伸强度远大于水泥砂浆早期能够产生的拉应力,因此当约束使水泥砂浆内部产生的拉应力值在一定范围时,纤维网格布表层强化区域几乎没有裂缝;但当产生的拉应力超过一定值时,仍会产生开裂现象。与通过添加外加剂等提升抗开裂性能效果不同,纤维网格布存在网格区域,在单独网格区域中,其包含的水泥砂浆相当于没有进行强化的水泥砂浆,该区域是否产生开裂与网格尺寸有较大的关系。

2.2.2 纤维网格布网格尺寸的影响

不同网格尺寸的纤维网格布强化水泥砂浆平板开裂试验结果如表6所示。由表6可以看出,相对于对照组,3种尺寸的玄武岩纤维网格布表层强化砂浆早期抗开裂性能得到了极大的提升;不同尺寸的纤维网格布表层的强化效果不同,网格尺寸越小,其提升效果越明显。以3 mm×3 mm玄武岩纤维网格布强化水泥砂浆组为例,相对于对照组,最大裂缝宽度、单位面积总开裂面积和裂缝总长度分别减少了87.4%、94.7%和74.6%,裂缝降低系数为94.7%;相对于10 mm×10 mm玄武岩纤维网格布表层强化水泥砂浆组,其最大裂缝宽度、单位面积总开裂面积和裂缝总长度分别减少了53.8%、54.9%和45.7%。由此可见,网格尺寸对纤维网格布强化水泥砂浆早期抗开裂性能有较大的影响,3 mm×3 mm玄武岩纤维网格布对水泥砂浆早期抗开裂性能增强效果最好,但考虑5 mm×5 mm和10 mm×10 mm两种纤维网格布较为常用,生产较多,为了降低成本并取得较好的抗开裂效果,推荐使用5 mm×5 mm的玄武岩纤维网格布进行混凝土早期抗开裂性能的增强。分析其原因,可能主要是网格尺寸越小,单独网格所包含的水泥砂浆面积越小,从而纤维网格布能够分担更多的约束拉应力,因此试件的开裂程度更小。随着纤维网格布网格数量的增加,纤维网格布与水泥砂浆之间的摩擦力更大,它们之间的拉伸黏结力也越大,力学性能得到提升。纤维网格布是一种复合材料,根据复合材料的基本理论,网格尺寸越小,采用的纤维含量越高,因此提高了复合材料的性能及抗开裂能力。随着网格尺寸的减小,纤维网格布的韧性能够更好地抑制水泥砂浆的开裂,并在一定程度上阻止了裂缝的拓展;同时,增强了纤维网格布表层的强度和弯曲韧性,很好地抵抗了外界拉力。

表6 不同网格尺寸裂缝评价参数

Table 6 Crack evaluation parameters under different mesh sizes

组别	最大裂缝 宽度/mm	单位面积 总开裂面积/ (mm ² ·m ⁻²)	裂缝总 长度/mm	总裂缝 数/条	裂缝降低 系数/%
18	3.4	5 546	3 110	28	
19	0.43	295	790	25	94.7
20	0.72	395	1 203	24	92.9
21	0.93	654	1 456	20	88.2

3 结 论

- a. 水灰比对水泥砂浆早期开裂性能有很大的影响,其主要通过影响自收缩和塑性收缩两者所占比重来影响水泥砂浆早期开裂性能,当水灰比为0.43时,水泥砂浆早期抗开裂性能最好。
- b. 灰砂比对水泥砂浆早期开裂性能有较大的影响,其主要通过影响水泥砂浆泌水性和水化反应的耗水量来影响水泥砂浆早期开裂性能,当灰砂比为0.47(对于混凝土砂率为34%),水泥砂浆早期抗开裂性能最好。
- c. 细度模数对水泥砂浆早期开裂性能有一定的影响,其主要通过影响比表面积来影响水泥砂浆早期开裂性能,当细度模数为3.4时,水泥砂浆早期抗开裂效果最好。

d. 纤维网格布表层强化极大地提升了水泥砂浆早期抗开裂性能,不同纤维网格布提升效果不同,玄武岩纤维网格布效果最好;不同网格尺寸,提升效果不同,当网格尺寸为 $3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 时,其早期抗开裂性能最好。

参考文献:

- [1] ZHANG Jun, WENG Xingzhong, JIANG Le, et al. Durability of airport concrete pavement improved by four novel coatings[J]. *Advances in Cement Research*, 2019, 31(5): 214-224.
- [2] 孟博旭, 许金余, 彭光. 纳米碳纤维增强混凝土抗冻性能试验[J]. *复合材料学报*, 2019, 36(10): 2458-2468. (MENG Boxu, XU Jinyu, PENG Guang. Anti-freeze performance test of nano carbon fiber reinforced concrete[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2019, 36(10): 2458-2468. (in Chinese))
- [3] 胡成, 翁兴中, 朱懋江, 等. 纤维网格布表层强化混凝土抗冻性能[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(1): 84-92. (HU Cheng, WENG Xingzhong, ZHU Maojiang, et al. Frost resistance performance of surface reinforced concrete with fiber mesh[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2021, 49(1): 84-92. (in Chinese))
- [4] 徐世琅, 葛唯. 硅灰和石灰石粉对碾压混凝土抗裂性能的影响[J]. *水利水电科技进展*, 2018, 38(3): 54-59. (XU Shilang, GE Wei. Effect of silica fume and limestone powder on crack resistance property for roller compacted concrete[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2018, 38(3): 54-59. (in Chinese))
- [5] 谢宇晨, 翁兴中, 刘鹏程, 等. 表层强化混凝土抗冻耐久性研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017(9): 80-87. (XIE Yuchen, WENG Xingzhong, LIU Pengcheng, et al. Study on frost resistance durability of surface-strengthened concrete[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017(9): 80-87. (in Chinese))
- [6] 施凤莲, 顾平. 纤维对水泥混凝土早期塑性开裂性能及抗冲击性能的影响[J]. *混凝土与水泥制品*, 2012(8): 48-49. (SHI Fenglian GU Ping. Effect of fiber on early plastic cracking and impact resistance of cement concrete[J]. *Concrete and Cement Products*, 2012(8): 48-49. (in Chinese))
- [7] BORG R P, BALDACCHINO O, FERRARA L. Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete[J]. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2016, 1(3): 231-239.
- [8] SHEN D, LIU X, LI Q, et al. Early-age behavior and cracking resistance of high-strength concrete reinforced with Dramix 3D steel fiber[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 196: 307-316.
- [9] AKKAYA Y, OUYANG C, SHAH S P. Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2007, 29(2): 117-123.
- [10] YOO D Y, MIN K H, LEE J H, et al. Shrinkage and cracking of restrained ultra-high-performance fiber-reinforced concrete slabs at early age[J]. *Construction & Building Materials*, 2014, 73: 357-65.
- [11] SHEN D, LIU C, FENG Z, et al. Influence of ground granulated blast furnace slag on the early-age anti-cracking property of internally cured concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 223: 233-243.
- [12] SHEN D, FENG Z, ZHU P, et al. Effect of pre-wetted lightweight aggregates on residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258: 119151.
- [13] DANG Y, QIAN J, QU Y, et al. Curing cement concrete by using shrinkage reducing admixture and curing compound[J]. *Construction & Building Materials*, 2013, 48: 992-997.
- [14] YOO D Y, PARK J J, KIM S W, et al. Early age setting, shrinkage and tensile characteristics of ultra-high performance fiber reinforced concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 41: 427-438.
- [15] KHAN I, XU T, CASTEL A, et al. Risk of early age cracking in geopolymer concrete due to restrained shrinkage[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 229: 1116840.
- [16] 张勇超. 纤维网格布的耐腐蚀性及其对混凝土力学性能的影响[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [17] 封雷, 封叶, 王庆华. 玻璃纤维网格布增强复合保温墙板的保温性能和力学性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2016, 43(3): 73-76. (FENG Lei, FENG Ye, WANG Qinghua. Thermal insulation performance and mechanical properties of glass fiber mesh reinforced composite thermal insulation wallboard[J]. *New building materials*, 2016, 43(3): 73-76. (in Chinese))
- [18] 许景欣. 冻融循环作用下外墙外保温系统黏结效果的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- [19] 陈培鑫, 李建新. 耐碱玻纤网格布在墙面抹灰施工中的应用研究[J]. *广东土木与建筑*, 2019, 26(5): 82-84. (CHEN Peixin, LI Jianxin. Application of alkali resistant glass fiber mesh cloth in wall plaster construction[J]. *Guangdong Civil Engineering & Architecture*, 2019, 26(5): 82-84. (in Chinese))
- [20] 刘玲玲. 碳纤维织物增强混凝土薄板力学性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.

[21] 王海涛,吴刚,张磊. FRP板修复开裂钢板的应力强度因子影响因素分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(5): 440-445. (WANG Haitao, WU Gang, ZHANG Lei. Influencing factor analysis of stress intensity factor for FRP-strengthened cracked steel plates[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2020,48(5):440-445. (in Chinese))

[22] 吴胜兴,孙克伟,沈德建. 新拌混凝土骨料分布均匀性表征方法及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1): 67-75. (WU Shengxing, SUN Kewei, SHEN Dejian. Characterization method and application of the uniformity of aggregate distribution in fresh concrete[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2022,50(1):67-75. (in Chinese))

[23] TAZAWA E I,MIYAZAWA S. Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste[J]. Cement & Concrete Research,1995,25(2):281-287.

[24] POWERS T C. Structure and physical properties of hardened portland cement paste[J]. Journal of the American Ceramic Society,1946,41(1):1-6.

[25] 马一平,谈慕华,朱蓓蓉,等. 水泥基体参数对砂浆塑性收缩开裂性能的影响[J]. 建筑材料学报,2002,5(2):171-175. (MA Yiping, TAN Muhua, ZHU Beirong, et al. Influence of cement matrix parameters on the plastic shrinkage and cracking performance of motorar[J]. Journal of Construction Materials,2002,5(2):171-175. (in Chinese))

(收稿日期:2021-10-22 编辑:胡新宇)

(上接第32页)

[17] 姚成,李致家,张珂,等. 基于栅格型新安江模型的中小河流精细化洪水预报[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(1):19-25. (YAO Cheng, LI Zhijia, ZHANG Ke, et al. Fine-scale flood forecasting for small and medium-sized rivers based on Grid-Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(1):19-25. (in Chinese))

[18] 张珂,张企诺,陈新宇,等. 栅格新安江-地表地下双人工调蓄分布式水文模型[J]. 水资源保护,2021,37(5):94-101. (ZHANG Ke, ZHANG QINUO, CHEN XINYU, et al. Gridded Xin'anjiang-dual anthropogenic aboveground and underground regulation distributed hydrological model[J]. Water Resources Protection,2021,37(5):94-101. (in Chinese))

[19] 霍文博. 半湿润-半干旱地区产流模式及洪水预报模型研究[D]. 南京:河海大学,2020.

[20] 刘玉环,李致家,刘志雨,等. 半湿润半干旱流域空间组合模型研究[J]. 湖泊科学,2020,32(3):826-839. (LIU Yuhuan, LI Zhijia, LIU Zhiyu, et al. Spatial combination model for semi-humid and semi-arid watersheds[J]. Journal of Lake Sciences,2020,32(3):826-839. (in Chinese))

[21] MACCORMACK R W. Numerical solution of the interaction of a shock wave with a laminar boundary layer[J]. Lecture Notes in Physics,1971,8:151-163.

[22] 李致家,臧帅宏,刘志雨,等. 新安江模型中河道汇流方法的改进[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(3):189-194. (LI Zhijia, ZANG Shuaihong, LIU Zhiyu, et al. Improvement of channel routing method for Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2020,48(3):189-194. (in Chinese))

[23] 姚成,纪益秋,李致家,等. 栅格型新安江模型的参数估计及应用[J]. 河海大学学报(自然科学版),2012,40(1):42-47. (YAO Cheng, JI Yiqiu, LI Zhijia, et al. Parameter estimation and application of grid-based Xin'anjiang model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2012,40(1):42-47. (in Chinese))

[24] YAO Cheng, LI Zhijia, YU Zhongbo, et al. A priori parameter estimates for a distributed grid-based Xin'anjiang model using geographically based information[J]. Journal of Hydrology,2012,468/469:47-62.

[25] RAWLS W J, BRAKENSIEK D L, MILLER N. Green-Ampt infiltration parameters from soils data[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1983,109(1):62-70.

[26] ANDERSON R M, KOREN V, REED S. Using SSURGO data to improve Sacramento Model a priori parameter estimates[J]. Journal of Hydrology,2006,320:103-106.

[27] CARSEL R F, PARRISH R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics[J]. Water Resources Research,1988,24(5):755-769.

[28] 水利部水文局. 水文情报预报规范:GB/T22482—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

(收稿日期:2021-11-08 编辑:刘晓艳)