

纤维在水泥基材料分布状态研究

周浩¹, 张桂霞², 王振¹

(1. 山东建筑大学交通工程学院, 山东 济南 250101; 2. 山东公路技师学院, 山东 济南 250103)

摘要: 纤维可显著改善水泥基材料的性能, 但纤维对水泥基材料的具体影响由纤维的分散和分布程度决定。为研究纤维在水泥基材料中的分散和分布状态, 本文以水泥稳定碎石为例, 建立了对细料-水泥-纤维胶浆材料进行水洗制备纤维分布试件, 基于图像分析和基尼系数评价纤维分散性的评价方法; 并得到如下结论: 随着拌合时间的延长, 纤维分布趋于均衡; 当拌合时间较短时大部分纤维集中在很小的区域内, 纤维分布不均匀性严重; 拌合时间较长时, 无纤维或少纤维的区域很少, 纤维分布的均匀性得到显著的改善; 基尼系数可以有效评价纤维分散均匀程度, 0.35 可以作为均分和非均匀的判断阈值。

关键词: 纤维; 分布均匀度; 图像处理; 基尼系数

中图分类号: U416 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 09—0157—04

水泥基材料是我国基建的最基本材料, 其强度和性能对我国基础设施的质量和寿命有决定性作用^[1]。水泥基材料具有很强的抗压强度, 但其抗拉强度和变形能力很差, 可能在长期力学荷载和环境荷载 (失水、温度变化) 的作用下发生微观裂缝, 并进一步发展为宏观裂缝, 导致材料强度显著下降, 基础设施结构破坏。在水泥基材料中添加纤维可有效减少基体材料的微裂缝, 并提高水泥石和被稳定集料之间的韧性和变形强度, 从而改善其力学性能和变形能力, 从而有效降低外界荷载的不利影响, 保证其耐久性^[2]。在古代天然纤维 (稻草或动物毛发等) 加入到建筑材料中, 如在黏土砖中掺加稻草等^[3]。现代纤维在水泥基材料中的应用开始于 19 世纪 70 年代, 钢纤维最早被用来提高建筑工程的结构强度, 之后聚酰胺纤维和聚丙烯纤维, 聚乙烯醇纤维等纤维先后被开发出来。并研究了化学分散法、机械分散方法等工

艺^[4-5]。但在实践中, 加入纤维的水泥基材料性能变异性较大, 一般情况下水泥基材料的强度和性能都有较大提高, 但也存在强度无明显变化甚至有一定程度降低的情况。其根本原因在于纤维分散的均匀性, 对其使用效果有直接影响^[6-7]。纤维分散均匀性是保证纤维水泥基材料性能的基础, 为了评价纤维分散均匀性, 进行了广泛的研究。

常用的方法^[8]有水洗分析法、图像分析、X 射线成像、电导率法等。其中水洗分析^[9]是将制备好的水泥稳定材料抽取适量样品, 用水洗涤干净后收集纤维; 并分析测得的纤维的实验值与理论值之间的偏差; 钢纤维与石料和水泥基材料密度有明显差异, 可以用 X 射线穿透钢纤维水泥基材料试块, 得到钢纤维分散状态图片^[10-11]; 对于可导电的纤维, 可以通过试块电阻率变动系数来评价材料中纤维的分散性^[12-13]。图像分析法是基于图像

量形成的关键环节和关键点, 从而便于精细化管理在总承包项目质量控制中得到切实应用, 并提升项目的质量, 节约时间和人力成本, 使总承包项目得以顺利完成, 满足要求。

参考文献:

- [1] 蒋瑛. 精细化管理在工程项目质量控制中的应用 [D]. 广西: 广西大学, 2013.
- [2] 吴小军. 电力工程建设项目管理存在的问题和精细化管理 [J]. 中国新技术新产品, 2016, 15(24): 112-113.

[3] 田晓宇. 精细化质量管理在舰船项目中的应用探索 [J]. 经济研究导刊, 2017, 325 (11): 164-165.

[4] 田娜, 米思坤等. 舰船建造过程精细化质量管理技术框架 [J]. 船舶标准化与质量, 2017, 272 (5): 60-65.

[5] 刘含伟, 朱亚蓉等. 精细化质量管理在新一代运载火箭研制过程中的应用研究 [J]. 质量与可靠性, 2019, 200 (2): 24-28.

[6] 孟凡斌. 精细化质量管理在航空发动机故障处置中的应用 [J]. 航空科学技术, 2014, 25 (5): 114-118.

[7] 袁家军. 航天工程精细化质量管理 [J]. 中国工程科学, 2011, 13 (8): 36-42.

处理的技术^[14]，对纤维分布状态进行拍摄、增强、分割、识别、解释，确定纤维分布状态。其中，X射线法只能用于评价金属类纤维，电导率法只能用于评价可导电纤维，如碳纤维或金属纤维，水洗分析法本身能获得信息相对简单，图像分析法适用于大部分纤维，并能获取丰富的信息。也有研究者把水洗法和图像分析法联合使用，可以更有效评价纤维的分散程度^[15]。

但这些方法中，水洗法检测对象为纤维单体，无法获取其在水泥基材料混合料中的实际状态，CT和电导率等方法可以有效获取纤维在实际材料中的分布情况，但只对金属纤维、碳纤维等特定材料有效；荧光显微镜可以对高聚物纤维在材料中的真实分布情况，但荧光显微镜只能检测较局部内的纤维分布情况，代表性不足。

为了有效评价纤维在水泥基材料混合料中的分布分散情况，需要能对较大体积水泥基材料内的纤维进行精确定量评价。本文以水泥稳定碎石为例，制备纤维水泥稳定碎石进行水洗，基于图像分析法进行研究和评价。由于水泥稳定碎石^[16-17]中粗集料占据的空间内纤维无法进入，纤维只能进入集料间空隙的空间；集料的分布状态会影响纤维的分布状态，试件整体中的纤维分布测试结果很大程度上是反映粗集料的分布情况，而并非纤维自身的分布情况。水稳碎石的特点是粗集料构成骨架，细集料和水泥浆体填充空隙，纤维是分布于细集料浆体中；所以分析纤维在细集料的分布可以更有效表征纤维对水稳碎石的影响。

1 实验材料与试件制备

本次所用的水泥为矿渣硅酸盐水泥PSA42.5水泥，水泥剂量为25%，水泥剂量为纤维为聚丙烯纤维，纤维剂量为1‰。本实验选取集料为石灰石细集料，其级配采用骨架密实级配细集料级配范围中线作（4.75mm通过率为100%），具体级配曲线如图1所示。

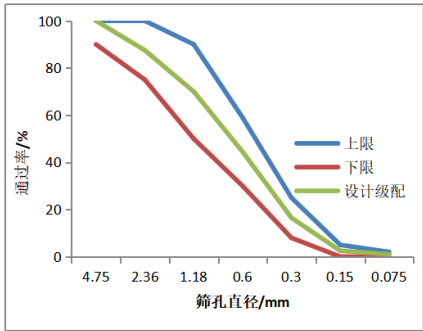


图1 水泥稳定碎石细料级配

按照前文的配合比，制备1200g细料-水泥-纤维，加水拌合制作成胶浆。参考集料取料四分法，一次取约300g细料-水泥-纤维胶浆，通过水洗法冲洗水泥浆并同时保持纤维的分布状态，并将其黏贴到黏贴板上，制作成如图2试件，纤维的分布面积约850cm²，纤维的具体形态如图2，为细料-水泥-纤维胶浆搅拌45秒后的纤维分布图。

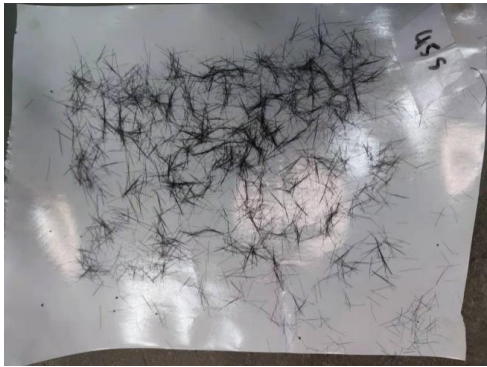


图2 纤维分布图

2 纤维提取与统计

2.1 基于图像分析的纤维提取

为降低实验操作误差的影响，对纤维分布图像的中心部分进行图像截取和分析，分析范围的宽度为纤维分布面宽度的一半，所截取的实际纤维分布试件如图3(a)所示。对纤维分布原始图像^[18-19]进行灰度化，然后转为二值图，如图3(b)所示，然后行降噪，提取骨架。所提取的纤维骨架图像即为纤维的实际分布。

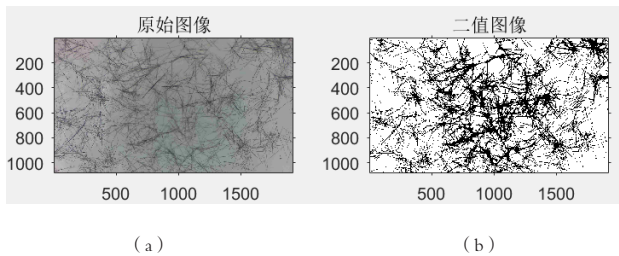


图3 纤维提取图

2.2 纤维分布统计

将纤维分布图像划分为约10×20个小方块（每个小方块约12mm×12mm），统计每个方块上的纤维图像总量，即为本方块上的纤维长度比例；然后分析整个区域内纤维分布的密度频率及其均匀性。

如图4为纤维分布密度图，方柱的高度为本方块上纤维的数量比例，图5位不同拌合程度（时间）条件下的纤维分布密度曲线。从图4中可以看出不同区域内纤

纤维分布差距明显，需要用科学的方法量化纤维分布的不均匀程度。

图5为不同拌合程度（时间）条件下，纤维分布密度图。图中横坐标为每个12mm×12mm方格区域内的纤维像素密度，即纤维的长度比例，右侧为高纤维分布量的方格；纵坐标为像素密度分布频率比，即不同方格纤维长度分布比例，从中可以看到：

（1）随着拌合时间的延长，纤维分布密度曲线在不同像素上的分布情况趋于均衡；

（2）当拌合时间为15s-30s时，纤维长度分布曲线线性接近单调下降的直线，0像素或低像素占很大比例，说明大部分区域内没有纤维或很少纤维；而具有高密度的区域比例，一般在5%以下，说明大部分纤维集中在很小的区域内，纤维分布不均匀性严重；

（3）图中红框和蓝框中像素密度比例对比显示，当拌合时间达到150s后，低纤维量的区域比例显著降低，这表明大部分区域内都分布一定量的纤维，无纤维或少纤维的区域很少；纤维分布的均匀性得到显著改善。

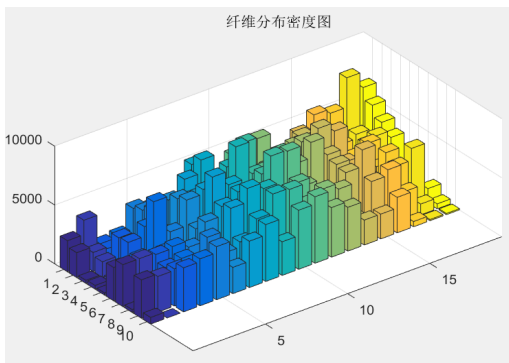


图4 纤维分布密度图

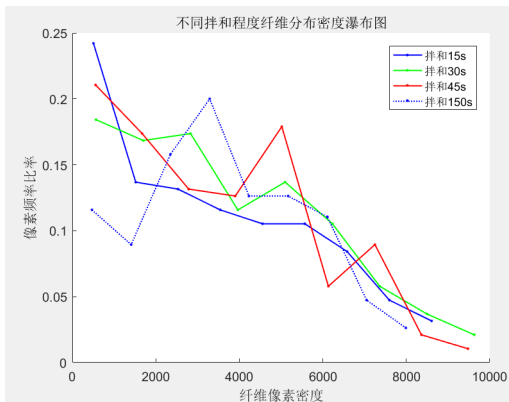
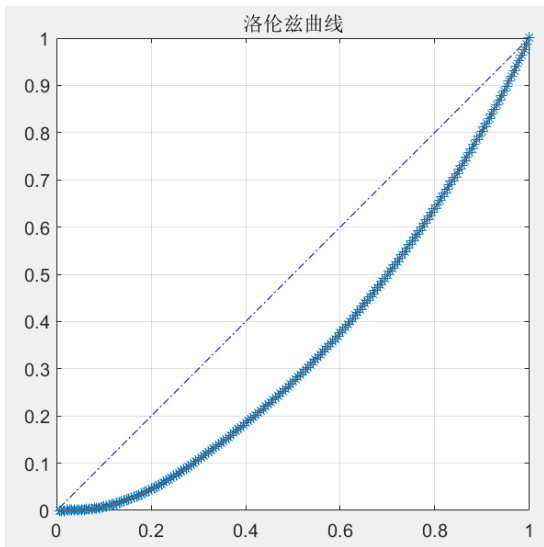


图5 不同拌和程度时的纤维分布密度

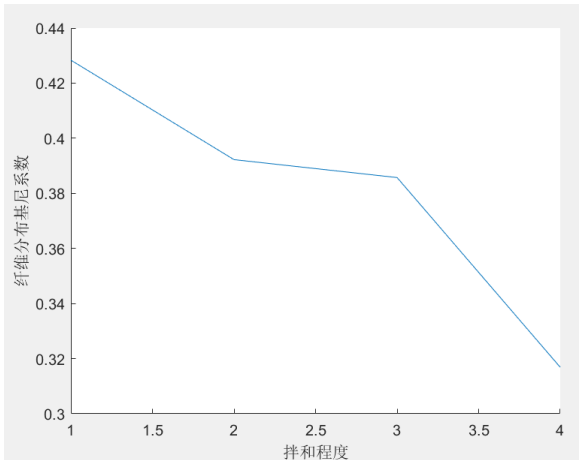
3 纤维分布评价

本文通过基尼系数评价纤维分散均匀程度。基尼

系数为经济学基本参数，用来评价不同地区/人群间贫富差距程度，即不同个体所包含的货币的不均匀程度；本项目用基尼系数评价不同方格上纤维数量的不均匀程度，其结果如图6(a)所示，基于洛伦兹曲线进行计算。不同拌合程度下的纤维分布基尼系数如图6(b)所示，从中可以看出，随着拌合时间的延长，纤维分布基尼系数逐步下降，表明纤维的分布逐步趋于平均。根据经济学基尼系数阈值划分和水稳碎石纤维分布实验经验，暂时建议把0.35作为均分和非均匀的阈值。



(a) 单次实验的基尼系数



(b) 不同拌和程度的基尼系数变化情况

图6 纤维分布基尼系数

4 结论

本文在水泥稳定碎石纤维图像分析的基础上，创新性提出通过细料-水泥-纤维胶浆中纤维分布状态来评

价水泥稳定碎石中纤维分布状态和通过基尼系数评价纤维分布均匀程度。

(1) 提出了对细料-水泥-纤维胶浆材料进行水洗制备纤维分布试件, 基于图像分析和基尼系数评价纤维分散性。

(2) 随着拌合时间的延长, 纤维分布趋于均衡。当拌合时间较短时, 纤维胶浆大部分区域内没有纤维或很少纤维, 大部分纤维集中在很小的区域内, 纤维分布不均匀性严重; 拌合时间较长时, 无纤维或少纤维的区域很少, 纤维分布的均匀性得到显著的改善。

(3) 基尼系数可以有效评价纤维分散均匀程度, 0.35 可以作为均分和非均匀的判断阈值。

参考文献:

[1] 宋子健. 硅质添加剂定向改性水泥基材料及作用机理 [D]. 西南科技大学, 2022.

[2] 童攀. PVA 纤维水泥稳定碎石基层材料及结构性能研究 [D]. 硕士学位论文. 重庆: 重庆交通大学, 2017.

[3] 杨芳. 改性聚酯纤维混凝土的纤维分散性检测方法和耐久性研究. [D] 北京科技大学, 2013.

[4] Yi-Jun Lin, Leeyih Wang, J.G. Lin, Y.Y. Huang, Wen-Yen Chiu. Preparation and Properties of Poly(acrylic acid)-Stabilized Magnetite Nanoparticles[J]. Synthetic Metals, 2003, 135: 769-770.

[5] 曹露, 李永鹏, 郑逢时. PVA 纤维在 ECC 材料中分散性的定量评价方法 [J]. 中外公路, 2013, 33(04): 310-315.

[6] Zollo R F. Fiber-reinforced concrete: an overview after 30 years of development[J]. Cement & Concrete Composites, 1997, 19(2): 107-122.

[7] Ozyurt N, Mason T O, Shah S P. Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs[J]. Cement & Concrete Composites, 2007, 29(2): 70-79.

[8] 杨芳. 改性聚酯纤维混凝土的纤维分散性检测方法和耐久性研究. [D] 北京科技大学, 2013.

[9] Standard Test Method for Determination of Glass Fiber Content in Glass Fiber Reinforced Concrete (GFRC) (Wash-Out Test)[S]. Astm.

[10] 马艳奉. 定向钢纤维混凝土中钢纤维分布特性研究 [D]. 河北工业大学, 2016.

[11] 从志敏. 成型方式对钢纤维混凝土力学性能的影响 [J]. 公路, 2021.

[12] 姚武, 陈兵, 吴科如. 碳纤维水泥基材料的机敏特性研究 [J]. 复合材料学报, 2002, 19(2): 49-53.

[13] GAO Jie, SHA Ai-min, WANG Zhen-jun, et al. Characterization of carbon fiber distribution in cement-based composites by Computed Tomography[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177: 134-147.

[14] 杨杰, 黄朝兵. 数字图像处理及 MATLAB 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2010. 202-206.

[15] 袁龄卿. PVA 纤维分散程度对水泥基复合材料性能的影响研究 [D]. 重庆交通大学, 2020.

[16] 胡力群, 沙爱民. 结构类型对水泥稳定碎石性能的影响 [J]. 中外公路, 2010, 30(3): 4.

[17] 马士宾; 张晓云; 曲磊; 邓建海. 微裂后水泥粉煤灰稳定碎石力学性能变化规律研究 [J]. 硅酸盐通报, 2021, 37(12): 3781-3788.

[18] 武文红, 牛恒茂, 赵燕茹, 等. 基于图像处理的纤维分布与取向分布对水泥基材料弯曲性能的影响 [J]. 材料导报, 2017, 31(6): 7.

[19] 梁振江. 基于图像处理的混合纤网纤维分布情况分析研究 [D]. 天津工业大学, 2018.

