

基于光学放大的混凝土干燥收缩测试方法及测试用模具的研制

吕建福¹, 郭昊霖¹, 尤齐铭¹, 王策¹, 刘新阳¹, 张亚杰¹

(哈尔滨工程大学航天与建筑工程学院, 哈尔滨 150001)

摘要: 本文介绍了一种用于混凝土干燥收缩测试系统, 该系统具有高精度测量、自校正数据和即时测量的特点。通过设计光学放大机构, 系统可以将目标测试的微位移放大, 实现微位移可以方便地采用光学技术来实现测量, 从而消除电磁干扰等因素引起微位移测量的误差。采用图像识别与测距技术、显微尺测距与校准的方法, 测试设备可以高精度进行微位移测量及自校正功能, 解决了传统测量方法无法在测试过程中校准的功能。此外, 该系统可在混凝土浇筑后即时进行测量, 避免了起始测试时间引起的测量误差。

关键词: 混凝土干燥收缩测试系统; 光学放大机构; 校准方法; 图像识别; 测距技术

Development of an Optical Amplification-Based Method for Drying Shrinkage Testing of Concrete and Design of a Test Mold

Lv Jianfu¹, Guo Haolin¹, You Qimin¹, Wang Ce¹, Liu Xinyang¹, Zhang Yajie¹

(College of Aerospace and Civil Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper introduces a system for drying shrinkage testing of concrete, which is characterized by high-precision measurement, self-calibrating data, and real-time measurement capabilities. By designing an optical amplification mechanism, the system magnifies the micro-displacements in the target test, enabling convenient measurement using optical techniques and eliminating errors caused by factors such as electromagnetic interference in the measurement of micro-displacements. By employing image recognition, ranging technology, and a combination of micro-scale ruler measurements and calibration methods, the testing equipment achieves high-precision measurement of micro-displacements and self-calibration functionality, addressing the limitation of traditional measurement methods that lack in-process calibration capabilities. Additionally, this system allows for immediate measurement after concrete pouring, avoiding measurement errors caused by the starting time of the test.

Keywords: Concrete drying shrinkage testing system; Optical amplification mechanism; calibration methods; image recognition; ranging technology.

1 设计背景

干燥收缩在整个混凝土结硬过程中持续存在，28d 后依然进行，还有可能继续若干年甚至几十年。研究发现干缩往往是形成混凝土结构裂缝的关键因素，且干缩裂缝成因复杂，与施工、设计、环境条件及材料方面联系紧密，使此类问题不易解决。国内通常依照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》中指定的收缩试验装置来测量混凝土的干燥收缩值；由于试件需重复取出放置，易触碰表架及表杆，难以充分保证试件每次放置的位置与方向的一致性，且每次测量前需先用标准杆校正仪器的零点，故而任务量大，测量误差难以避免。此外，传统的测量系统在测试过程中缺乏校准技术，试验结果的准确性仅凭经验确定。

如何准确、智能、省时省力的测量混凝土干燥收缩还是行业技术人员亟需解决的问题。为了解决这些问题，需要开发合理的测量装置和实验方法。同时，应研发实时误差校准技术，以解决干扰因素对测定设备的测试结果准确性的影响。这些改进将有助于提高混凝土干燥收缩测定结果的准确性和可靠性。

2 实现方案简介

2.1 设计原理

本系统通过将待测混凝土填充至设计好的模具中，将标靶埋置其中，并设计了光学放大机构及制定相应的测试方法，通过分析放大后的图像，得到混凝土试样干燥收缩过程中放大机构的输出端的位移量，计算得到混凝土干燥收缩的实际位移值，进而得到混凝土的体积变化量/率，实现了高精度的位移测量；同时光学放大机构的输出端侧放置显微尺，进行显微尺图片的拍摄及读数，进行位移数据的实时校准。本系统使用图像识别测距技术，并结合显微尺测距与校准的方法，获得高精度的位移值，并自校正混凝土干燥收缩实际位移值，消除了传统方法中的测量误差。

传统方法在测量混凝土体积变形时面临微米级位移测量难度大的问题。该系统设计了光学放大机构，通过光学原理放大位移，采用图像识别测距方法，结合校准尺的使用，实现了自校正位移测量，解决了这一问题，实现了高精度的位移测量；且根据混凝土干燥收缩的特点设计模具，从而减少了由模具产生的结果误差。

2.2 设计方法

1) 模具的设计

混凝土干燥收缩测试用模具如图 1 所示；包括底板、两块大侧板、两块小侧板、标靶和

测头，两块大侧板和两块小侧板分别相对固定安装在底板上形成槽体，其中一块小侧板上开有贯穿孔，贯穿孔设有多个，用于测试不同深度混凝土的干燥收缩或者混凝土不同表面密封情况下混凝土的干缩梯度。当混凝土注模时，标靶的光滑一侧埋置于成型模具中，另一侧位于成型模具外，用螺母固定，保证标靶垂直于待测混凝土试件的侧面安装，并防止浆体流出；待水泥基材料凝固拆模后，将螺母拆除，将测量试件干燥收缩的测头安装在标靶上，标靶移动带动测头移动，进而带动光学放大机构的输入端移动。测试时，将测头单独插入一外置的滑槽中，滑槽可以限位测头，保证测试时测头为垂直于试件位移。

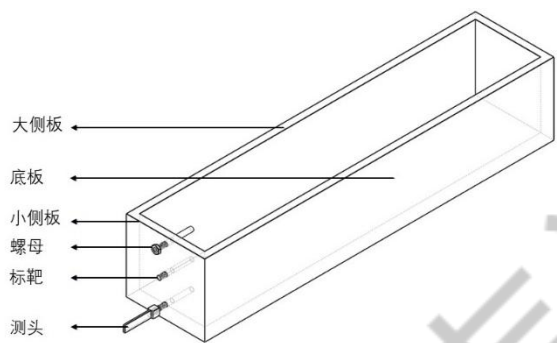


图1 干燥收缩测试用模具

2) 光学放大机构的设计

本系统所使用的光学放大机构如图2所示；包括箱体、光源、挡板、测头、校准尺和摄像头，挡板固定安装于箱体中，且挡板上开有一通孔，校准尺和摄像头依次设置于挡板的一侧，测头和光源依次设置于挡板的另一侧，光源、测头、通孔和校准尺均处于同一轴线上。

测头同时作为光学放大机构的输入端和待测混凝土的位移输出端，端部设计为三角形、菱形等带较尖锐形状的形式，方便图像识别时较为容易的观察到边界；测头在进行试验前遮挡在通孔上，随着标靶带动测头移动，进而形成投影的变化。

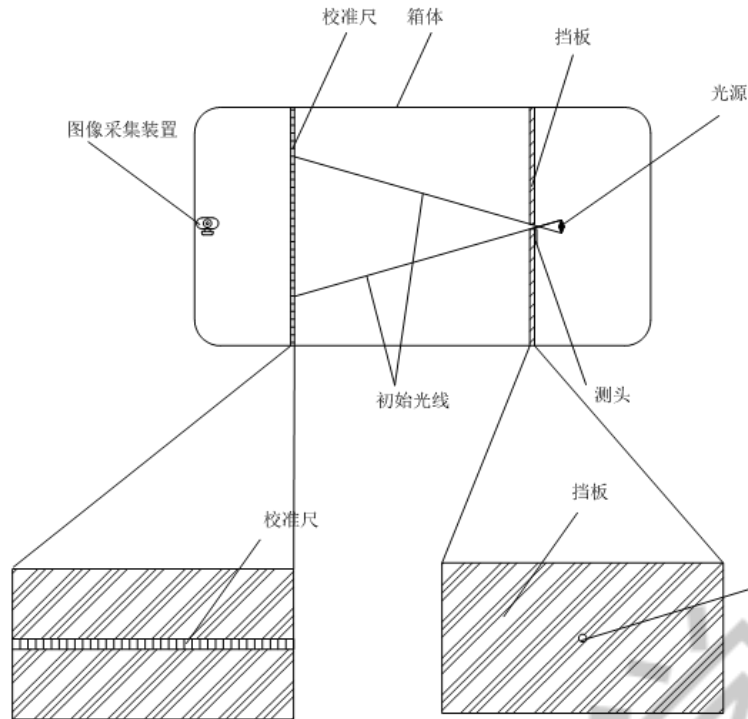


图2 光学放大机构

3) 数据采集与实时校准设计

使用图像采集装置按照所需频率进行目标图像的采集，采集投影的图像和校准尺的图像；对所需要观测的区域，使用边缘检测算法识别图像的边缘特征点；使用样条插值方法进行亚像素技术定位，细化图像局部特征，增加图像分辨率，应用灰度匹配方法对比运动前后的图像，根据零均值归一化最小距离平方相关函数进行子区匹配，使用基于空域的迭代算法和逆组合高斯-牛顿算法收敛准则，计算获得目标区域产生的实际位移并采集校准尺的数值；采用刻度为10微米及以上的校准尺进行位移测量和校准，直接读取刻度数值或通过匹配算法识别目标位置对应的校准尺刻度，并使用直线检测算法找到最小刻度，计算校准尺最小刻度与目标位置所对应的校准尺刻度之间的刻度数量，得到校准尺测得的位移值。将仅使用图像测距测得的位移值和仅应用校准尺测出的位移进行对比和校准，获得自校正后的高精度位移值，通过空间位置变换的映射原理，经过计算获得经过自校正后的混凝土收缩实际位移值。

通过亚像素技术定位和灰度匹配方法，以及应用显微尺进行位移测量和校准，能够实现高精度的图像测距。这种测量方法提供了对混凝土位移的高精度测量值，增加了测量结果的可信度。而通过使用校准尺进行校准并与图像测距结果对比，实现自校正和校准值的计算。通过校准尺测得的位移值和图像测距测得的位移值对比，得到经过自校正后的高精度位移值。这种自校正过程可以减少测量误差和提高测量结果的准确性。这种图像识别测距方法结合了多种技术，包括边缘检测算法、样条插值方法和灰度匹配方法。这种多功能性使该方法适用

于不同类型和规模的测量和实验需求。使用亚像素技术定位、细化图像局部特征以及增加图像分辨率的方法，能够获得更高的图像清晰度和精细度，提高测量结果的精度和分辨率。通过校准尺的校准，该方法能够提供稳定可靠的测量结果。对测得的位移值进行对比和校准，通过空间位置变换的映射原理，计算出经过自校正后的混凝土收缩实际位移值，进一步增加了测量结果的准确性。

4) 系统使用步骤

将混凝土干燥收缩测试用模具的槽体组装完成，开始混凝土注模，将标靶安装进贯穿孔内，标靶固定，标靶位于槽体内的一端埋置于混凝土内；然后拆除模具，单独保留固定在待测混凝土中的标靶，养护至指定龄期后，将测头与标靶的外端固定连接，测头作为待测混凝土的位移输出端与光学放大机构的输入端固定连接；打开光源，得到投影到箱体内部投影面上的放大后的图像，形成可分辨的光斑图形；在进行混凝土体积变形测试的过程中，标靶带动待测混凝土的位移输出端，待测混凝土的位移输出端同时作为光学放大机构的输入端在通孔处产生位移；通过图像采集装置对光斑图形进行图像采集，将采集到的图像传输到图像识别分析软件中进行图像分析识别，将校准尺直接放置在投影面的中部位置，直接读取校准尺上的读数，从而实现位移校准

5) 测试结果

实验证明，本系统可清晰的采集到光斑图形以及校准尺，如图 3。同时本系统通过设计光学放大机构和引入校准方法，特别是规避了常见的电磁干扰引起的测量误差，确保了测量结果的准确性测试过程中实时校准数据；使用图像识别测距技术和结合显微尺测距与校准的方法，获得高精度的位移值，并自校正混凝土干燥收缩实际位移值，进一步消除测试误差，测试数据见表 1。

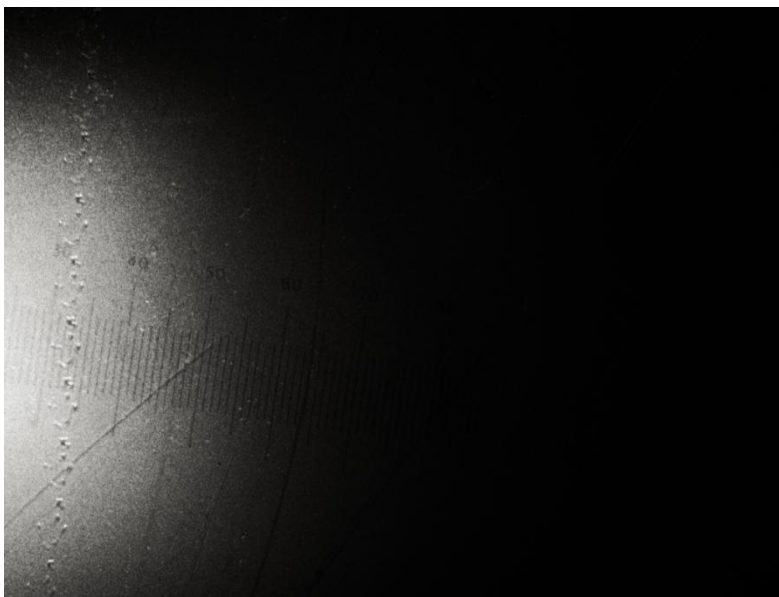


图 3 本系统图像采集装置采集图像

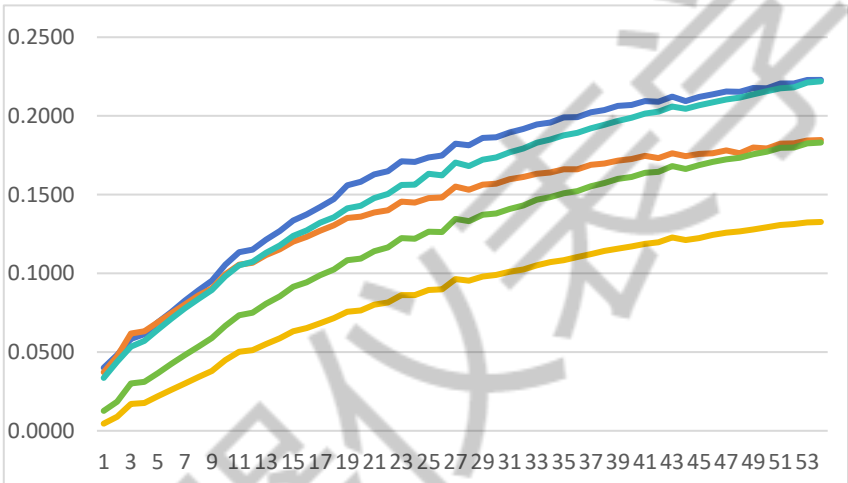


图 4 目前常见接触式混凝土干燥收缩测试试验结果

表 1 本系统（放大 20 倍）测试实验结果

输入位移(μm)	输出位移(μm)	误差
1	21	0.05
10	202	0.01
100	2002	0.001

3 小结

本系统可用于测试混凝土的干燥收缩特性，适用于多种混凝土性能研究和工程应用。通过将位移输出端与混凝土试样连接并连接到光学放大机构的输入端，可以实现对混凝土干燥

收缩的高精度测量。光学放大机构的输出端位移通过图像识别测距技术测量，并结合显微尺进行校准，可以实现自校正和校准的过程，提高了测量的准确性。同时，本发明的放大机构的输出端位移可以连续测量，还能够实时监测混凝土试样的体积变形。这有助于研究者或工程师了解混凝土体积变化的动态过程。通过测量得到的放大机构的输出端位移量，可以计算出混凝土的实际位移值和体积变形率。这种计算的自动化过程使得数据分析更加方便和准确。

参考文献：

- [1]中华人民共和国住房和城乡建设部.《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》:GB/T50082—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.