

基于光学放大的混凝土自生收缩测试方法及测试用模具的研制

郭昊霖¹, 尤齐铭¹, 李锦铭¹, 张亚杰¹, 吕建福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自生收缩测试系统, 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: 混凝土自生收缩测试系统; 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 Autogenous Shrinkage Testing of Concrete and Design of a Test Mold

Guo Haolin¹, You Qimin¹, Li Jinmin¹, Zhang Yajie¹, Lv Jianfu¹

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

Abstract: This paper presents a system for autogenous shrinkage testing of concrete, which features high-precision measurement, self-calibrating data, and real-time measurement capabilities. By designing an optical amplification mechanism, the system can magnify 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: Autogenous shrinkage testing system for concrete; Optical amplification mechanism; calibration methods; image recognition; ranging technology.

1 设计背景

混凝土的自生收缩测定不仅需要精确的测量方法，而且需要从初凝即开始测定，另外还需要保证被测试体系（试件）与外界无水分交换，因此给测试工作带来了很大的难度。国内通常依照 GB/T50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》^[1]中指定的收缩试验装置或 SL352-2006《水工混凝土试验规程》^[2]中的“混凝土自生体积变形试验”来测量混凝土的自生收缩值。但现有方法在浆体早期强度较低、弹性模量较低的阶段无法准确测量收缩值，导致结果精确度不足；其次，传统的混凝土自生收缩测定装置存在标靶固定不完全、测量系统会受外界环境电磁场、温度和湿度等因素的干扰而产生较大误差等问题，测量结果难以保证准确性。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。

为了解决这些问题，需要改进水泥基材料在终凝前的收缩测定方法，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，以解决环境变化和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自生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，得到混凝土试样自生收缩过程中放大机构的输出端的位移量，计算得到混凝土自生收缩的实际位移值，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，并自校正混凝土自生收缩实际位移值，消除了传统方法中的测量误差。

相较于传统方法，本系统可实现浇筑后即可进行混凝土自生收缩的测量，从而避免测试起始时间确定及由于测试起始时间不同而引起的误差，且降低了硬件要求与成本，同时避免了传感器易受环境因素干扰的情况，测量结果可实现校准和修正，更加准确、可靠。

2.2 设计方法

1) 模具的设计

混凝土自生收缩测试用模具如图 1 所示；包括底板、基板、两个固定支架、标靶、滑动装置和测头，基板与底板的边缘固定连接，形成槽结构，两个固定支架以底板的中线对称安

装在基板间，滑动机构水平安装在两个固定支架上，标靶和测头均与滑动机构的滑块固定连接，测头作为待测混凝土的位移输出端，当进行混凝土自生收缩测试时，滑动机构限位标靶和测头水平直线移动。

固定在固定支架上的滑动装置，能够保证在混凝土体积变化测试过程中一直保持水平，其滑动产生的摩擦力可以忽略；滑动装置中，滑块可沿滑轨直线移动，滑块同时连接测头和标靶，标靶由于预埋在待测混凝土中，当混凝土发生体积变化时，会带动标靶移动，从而带动滑块和测头同步移动。本模具结构设计合理，能够提供稳定的测试环境，以测量混凝土在自生收缩过程中的位移变化，滑动装置和测头的设计使得模具能够进行水平直线移动，能够有效地测量混凝土自生收缩。且该模具的使用能够提供可重复的测试条件，使研究人员能够准确评估混凝土自生收缩特性。

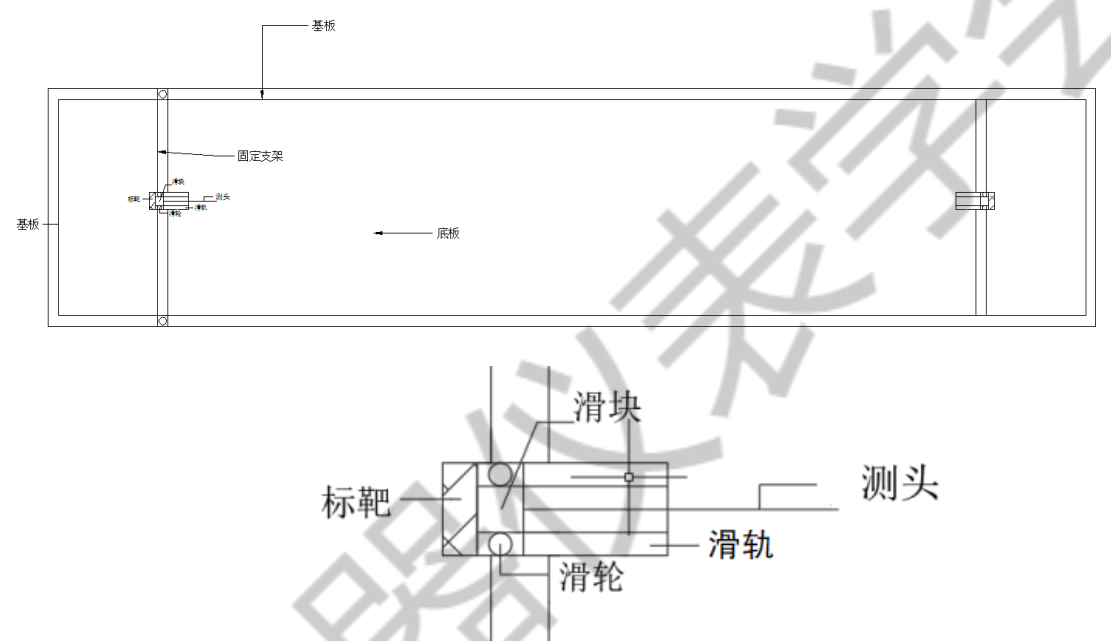


图1 自生收缩测试用模具

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。

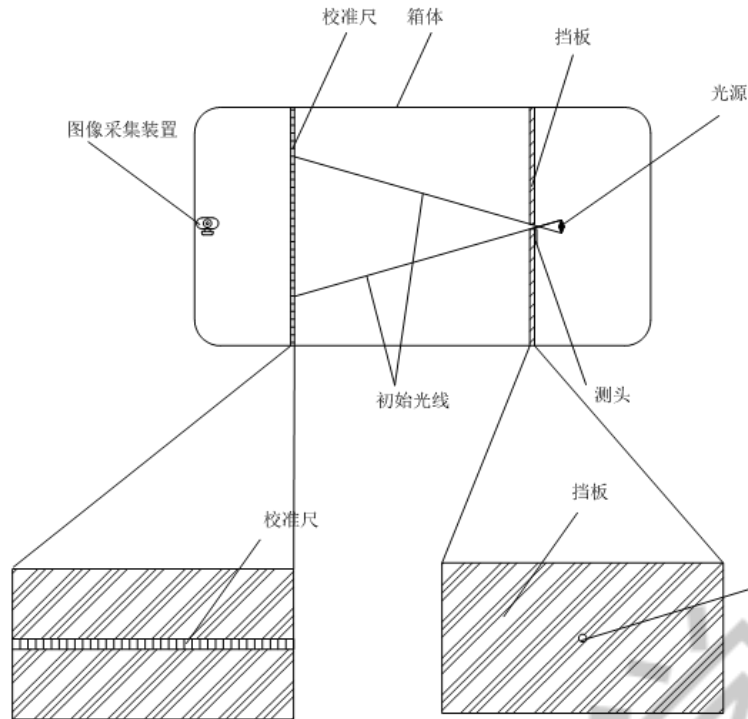


图2 光学放大机构

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

作为待测混凝土的新拌混凝土填充至模具底层后，下放标靶至新拌混凝土上，并将标靶上端与滑块固定连接，然后继续向模具中填充新拌混凝土直到达到预设量，以使得标靶的下端埋置于新拌混凝土中；将待测混凝土的位移输出端连接到光学放大机构的输入端上，并打开光源，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，并自校正混凝土自生收缩实际位移值，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

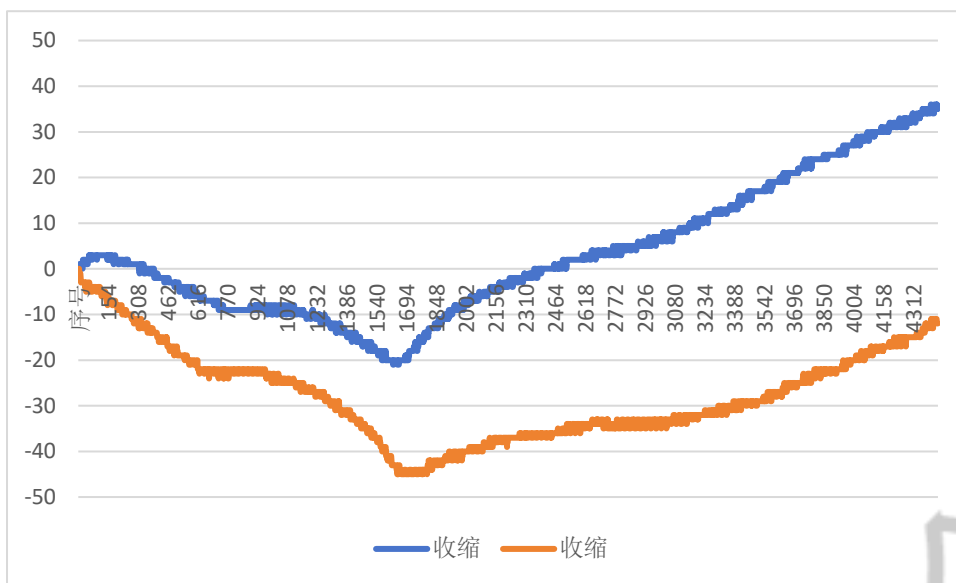


图 4 目前常见非接触式电涡流技术相同混凝土自生收缩测试试验结果

表 1 本系统（放大倍数 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	0.1
100	2001	0.05

3 小结

本文所描述的系统，根据混凝土自生收缩的特点设计设计相应的模具，可以减少由模具引起的结果误差。现有技术中，混凝土体积变形的微米级位移测量存在困难，容易受到干扰导致误差大。而本系统利用光学放大机构和图像识别测距方法，有效解决了测量难题，并提供了高精度的位移测量。通过在光学放大机构中设置校准尺，结合图像采集装置进行实时图像分析识别，可以进行实时校准。这样可以获得经过校准后的位移值，提高了测试结果的准确性和可靠性。模具的槽结构和滑动装置可以确保标靶的位置和姿态相对稳定，为混凝土体积变形测试提供了良好的条件。滑动装置和测头的设计使得待测混凝土的位移输出端可以灵活地连接到光学放大机构的输入端，同时也可以作为光学放大机构的输入端，在测试过程中实现精确的位移测量。这种可调节性和灵活性使得本系统的方法适用于不同类型的混凝土自生收缩测试需求。本系统是混凝土自生收缩测试装置跨越式发展的结果。

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. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.

[2]中华人民共和国水利部. 《水工混凝土试验规程》SL352-2006. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

[3]于靖军, 毕树生, 宗光华. 全柔性微位移放大机构的设计技术研究[J]. 航空学报, 2004, (01): 74-78.

中国仪器仪表杂志