

基于光学放大的混凝土约束收缩测试系统的研制

吕建福¹, 尤齐铭¹, 李恒民¹, 程佳洪¹, 张亚杰¹, 郭昊霖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约束收缩测试系统, 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: 混凝土约束收缩测试系统; 光学放大机构; 校准方法; 图像识别; 测距技术

Development of an Optical Amplification-Based Constrained Shrinkage Testing System for Concrete

Lv Jianfu¹, You Qimin¹, Li Hengmin¹, Cheng Jiahong¹, Zhang Yajie¹, Guo Haolin¹

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

Abstract: This paper presents a system for constrained 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 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 constrained shrinkage testing system; Optical amplification mechanism; calibration methods; image recognition; ranging technology.

1 设计背景

混凝土约束收缩时混凝土受到外部约束，当体积变化受外部约束时，混凝土内部产生拉应力，拉应力大于其本身抗拉强度时，可能会导致混凝土出现裂缝，从而降低混凝土结构物的承载能力、耐久性以及防水性，缩短结构寿命。基于此，通常使用混凝土在约束条件下的收缩变形来评价混凝土的开裂潜在风险，混凝土抗裂性试验方法，根据提供约束方式的不同主要分为环形约束试验、条形约束试验、板式约束试验等。

我国 GB/T50082-2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[1]中关于早期抗裂实验采用了平板式限制收缩开裂试验方法（平板法）。但是该方法存在着外部环境因素难以控制，约束应力不可控，缺乏足够的精度，与实际工程相差较大的缺陷。条形约束试验具有精确度高，试验误差较小的特点，还可分析混凝土的弹性模量、热膨胀系数和徐变等早期混凝土性能参数；但是试验装置造价高，制作工艺麻烦，还需保证其系统线性不偏心、无附加的摩擦力和扭转效应。

环形约束收缩开裂试验方法（圆环法）能保证试件受力均匀、可调节约束程度以及定量分析约束应力，所以使用频率最高、应用范围最广。我国的《混凝土结构耐久性设计与施工指南》CCES01—2004^[2]也收录了这种方法，将其定为测试混凝土早期抗裂性的标准方法之一。然而圆环法中混凝土圆环开裂存在发散性问题；混凝土的裂缝不在一个固定位置出现，而是可能在混凝土圆环的任何位置出现。其次混凝土圆环开裂时间难以捕捉；有时混凝土圆环已经发生了开裂，但在自动监测仪上却反映不出来。最后受力状态与实际应用不符，圆环内外侧收缩状态不一致。

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约束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

本系统根据混凝土约束收缩的特点，设计了相应的模具，从而减少了由模具产生的结果误差；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，得到混凝土试样约束收缩过程中放大机构的输出端的位移量，计算得到混凝土约束收缩的实际位移值，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，并自校正混凝土约束收缩实际位移值，消除了传统方法中的测量误差。

2.2 设计方法

1) 模具的设计

混凝土约束收缩测试用模具如图 1 所示；包括底板、外环形模具、内钢环和两个测头，外环形模具和内钢环由外至内依次固定安装在底板上，且外环形模具和内钢环同心，两个测头沿径向对称地固定安装于内钢环的内壁上，当进行混凝土约束收缩测试时，每个测头分别作为一个待测混凝土的位移输出端与一个光学放大机构的输入端固定连接。

内钢环可根据发明约束度的不同而改变厚度。如内钢环的外直径为 225mm 时，对于 35%、55%、75% 的约束度，可以分别取 5mm、12mm、25mm 的内钢环厚度去匹配相应的约束度，当待测混凝土的试样产生约束收缩时，内钢环会产生沿直径方向的位移，进而带动两个测头产生位移，测头带动放大机构的输入端，进而通过放大机构将输入端的位移放大，方便观察和测量。

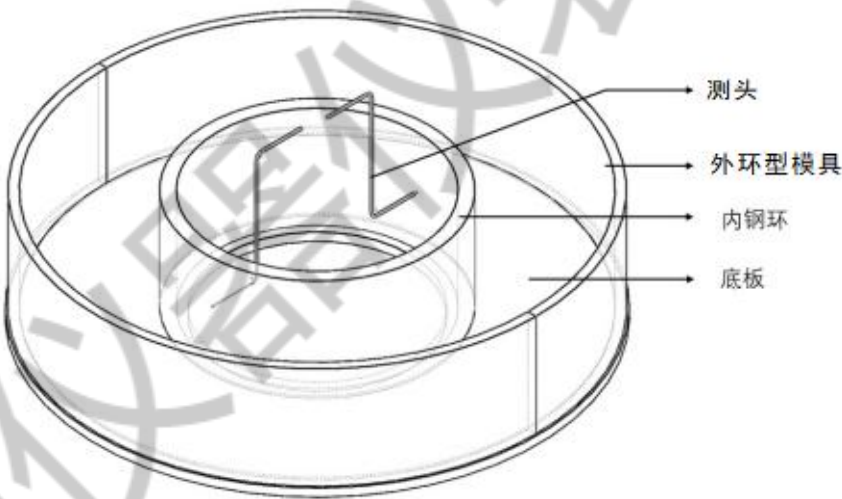


图 1 约束收缩测试用模具

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。

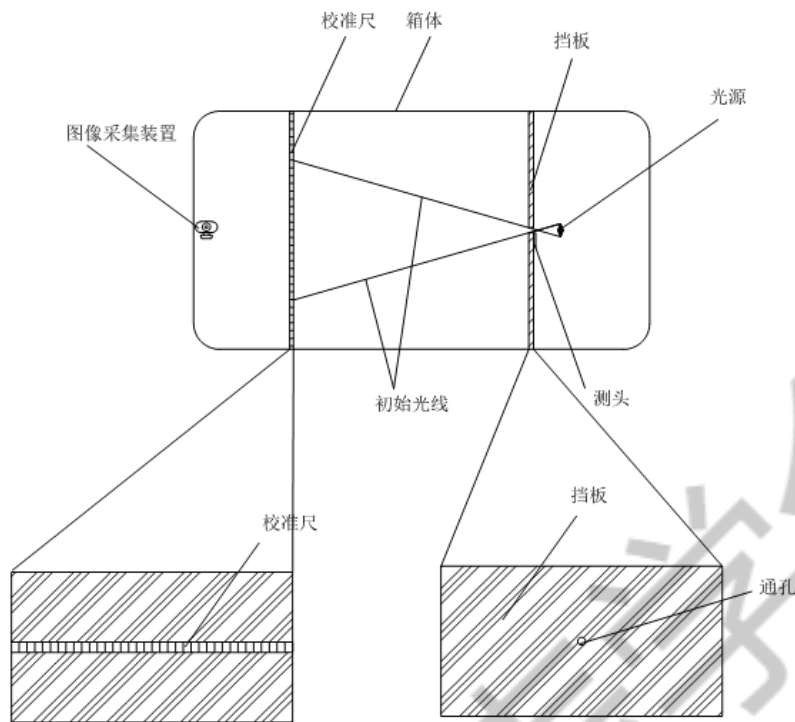


图 2 光学放大机构

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

将混凝土约束收缩测试用模具组装完成，将待测混凝土的试样倒入内钢环和外环形模具形成的槽体内，进行混凝土试样成型；将每个测头分别与一个光学放大机构的输入端固定连接；打开光源，得到投影到箱体内投影面上的放大后的图像，形成可分辨的光斑图形；待测混凝土的试样约束收缩的过程中，挤压内钢环使内钢环的直径减小，进而带动测头产生位移，测头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，并自校正混凝土约束收缩实际位移值，进一步消除测试误差，测试数据见表 1。

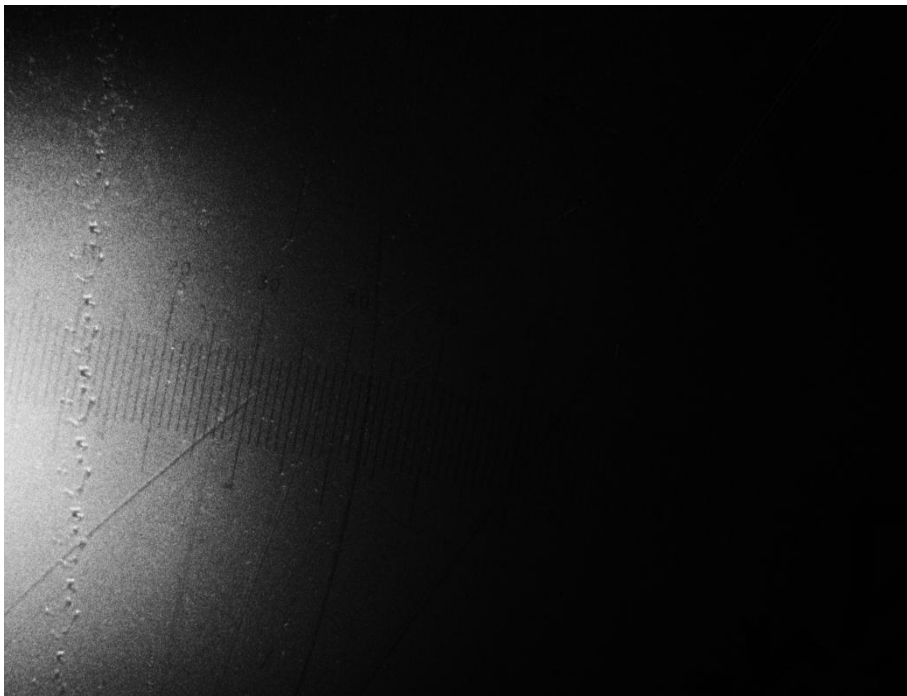


图3 本系统图像采集装置采集图像

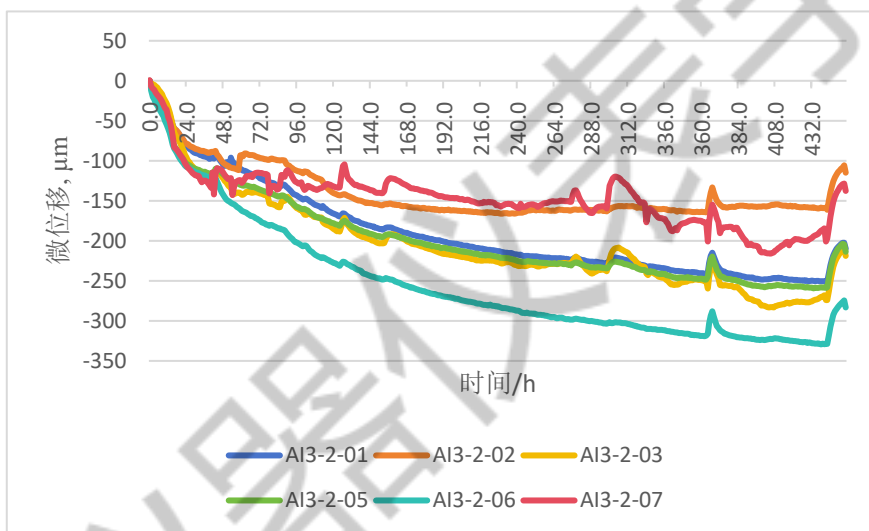


图4 混凝土约束环采用应变采集仪获得的试验结果

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

本文所描述的系统，本系统根据混凝土约束收缩的特点，设计了针对混凝土约束收缩的

模具。该模具结构简单,强度合理,可以减少由模具本身引起的测试结果误差,从而提高了测试的准确性。现有技术中,测量混凝土体积变形的微米级位移通常非常困难,容易受到干扰而导致误差;但本系统设计的通过光学原理的放大机构,可以有效地解决识别与干扰的问题,使得混凝土体积变形的测量更加准确;同时利用图像识别和显微尺进行高精度位移测量,通过对图像识别测距结果和校准尺测距结果进行对比和校准,不仅提供了更准确的位移测量结果,还能进行位移校准,进一步提高了数据的精度和可信度。本系统是混凝土约束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[S].北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [2]中国工程院土木水利与建筑工程学部.《混凝土结构耐久性设计与施工指南》:CCES 01-2004[M].中国建筑工业出版社,2005.