

利用杠杆式固结仪校准测力环的方法

刘钰¹, 黄正均¹, 张栋¹, 陈倩男¹

(1. 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 测力环是土工试验设备的重要组成部分, 测力环系数对试验结果的可靠性和精度有着至关重要的作用, 因此测力环需要定期进行校准。为了解决实验室内数量较大的测力环校准问题, 在实验室现有条件下, 开发了一种利用杠杆式固结仪进行测力环校准的方法。该方法具有改造成本低、试验设备易取得、易于推广等优点, 为实验室节省了大笔校准费用。应用该方法对实验室内测力环进行校准, 并应用到实验教学中, 取得了良好的教学效果。

关键词: 杠杆式固结仪; 测力环; 测力环系数; 校准

中图分类号: U416.03 **文献标识码:** A

Method for Calibrating Force Measuring Ring Using Lever Type Consolidation Apparatus

Abstract: The force measuring ring is an important part of the geotechnical testing equipment. The force measuring ring coefficient plays a vital role in the reliability and accuracy of the test results. Therefore, the force measuring ring needs to be calibrated regularly. In order to solve the problem of calibration of the large number of force measuring rings in the laboratory, under the existing conditions of the laboratory, a method of using the consolidation apparatus to calibrate the force measuring rings was developed. This method has the advantages of low modification cost, easy acquisition of test equipment, easy promotion, which saves a large amount of calibration costs for the laboratory. This method is used to calibrate the force measuring ring in the laboratory, and it is applied to the experimental teaching, and a good teaching effect has been achieved.

Keywords: leveraged consolidation apparatus, force measuring ring, force measuring ring coefficient, calibrate

1 背景介绍

在土工试验设备中, 需要应用到测力环的仪器设备较多, 如土工直剪仪、无侧限压力仪、三轴仪等。每一个测力环出厂时都会有检定证书, 并记录有其测力环系数。随着在实验中的不断使用, 测力环在循环应力的作用下会产生疲劳损伤, 测力环系数会有所变化。根据测力环的使用情况以及《工作测力仪检定规程》(JJG455-2000) [1] 5.4 条的规定, 一般要求至少一

年需要对测力环进行标定一次，如果平时使用的比较频繁，需要适当缩短校准周期。

周亦泉^[2]等运用回归分析中散点图和相关系数的方法确定测力环的负荷和百分表示值的相互关系；王蓁丽^[3]等利用 EXCEL 来分析基于最小二乘法的测力环线性回归方程；麻青春^[4]等通过理论分析证实，基于最小二乘法的测力环线性回归分析法建立的回归方程回归直线误差最小，是测力环回归分析的最佳方法。以上研究主要是针对测力环的线性数据分析，但是针对测力环的校准方法及校准设备的研究未见涉及。因此提出一种利用杠杆式固结仪对测力环进行校准的方法，可以解决实验室内数量较多的测力环校准问题，达到高效且节约成本的目的。

2 校准原理及设备

2.1 校准原理

常见的测力环是用线性和重复性较好的金属弹性体制成圆环，圆环内装置百分表，当金属弹性体圆环受力产生变形后，通过百分表读出变形量。根据弹性力学理论，测力环在弹性范围内，受到的力与变形的比值为常量，称为测力环系数。如式（1）所示：

$$C = \frac{F}{R} \quad (1)$$

式中， C 为测力环系数； F 为测力环受力； R 为百分表读数。

据水利部行业标准《应变控制式直剪仪校验方法》（SL116-2012）^[5]，测力环既可按《工作测力仪检定规程》（JJG455-2000）方法校准，也可用专用砝码直接加荷法校准。水利水电部《土工试验规程》（SD128-84）^[6]中提到 2 种直接加荷法：直立率定法和磅秤率定法，本文所采用的方法是受到直立率定法的启发，对实验室内现有的杠杆式固结仪进行加工改造，完成测力环的校准工作。

2.2 试验设备

图 1 和图 2 分别为测力环校准方法中改造使用的单联杠杆式固结仪的实物图和示意图，是土力学实验室中比较常见的土工试验设备，主要用于测定土在不同载荷和有侧限的条件下的压缩性能。根据固结仪正向压力范围等参数的不同分为多个型号，本次用于改造的单联杠杆式固结仪型号为 YS-1，最大载荷为 12KN，杠杆比为 1:12。

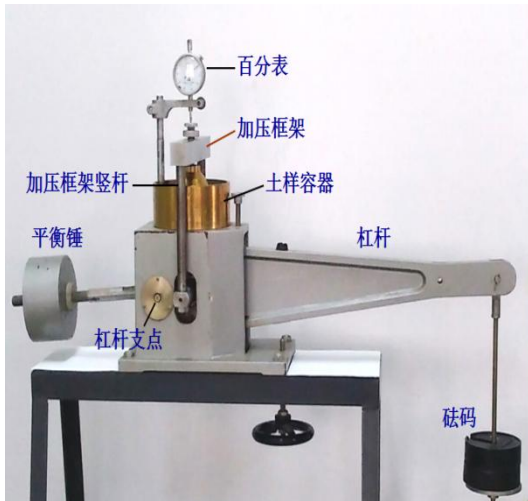


图 1 单联杠杆式固结仪实物图

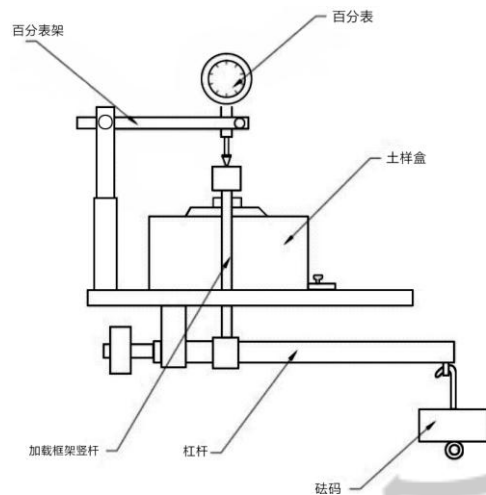


图 2 单联杠杆式固结仪示意图

由单联杠杆式固结仪改装后的测力环校验装置实物图如图 3 所示，示意图如图 4 所示。卸除原测量压缩高度的百分表及百分表架，将固结仪两根原长 23cm 的加压框架竖杆加长至 38cm，测力环和百分表作为整体，“一表一环”，测力环底部置于土样盒盖上，测力环上部与固结仪加载框架相连，上下均配有钢珠，确保受力轴线与重力轴向相重合。采用分级加载的方式，并记录每一级对应的测力环中百分表读数。

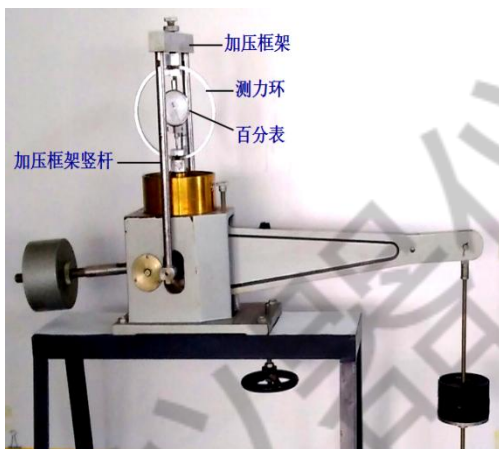


图 3 改装后测力环校准装置示意图

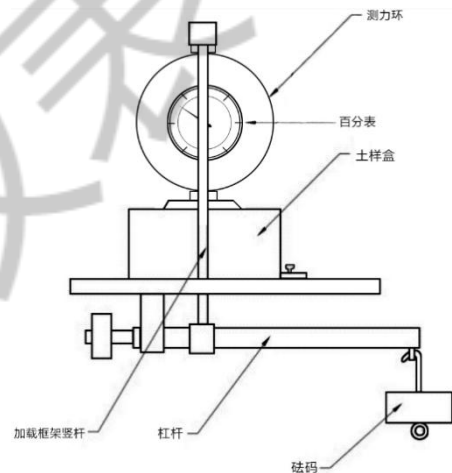


图 4 改装后测力环校准装置示意图

3 测力环校准及数据处理

3.1 测力环校准

温度与湿度会对测力环的变形产生一定的影响，因此需要在温湿度较为适宜的条件下进行校准，一般要求室温在 $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ ，相对湿度不大于 80%^[7-10]。校准时，周围应无影响校准结果的振动、电磁场或其它干扰。测力环的检定点为 5 个点，各点均匀分布，按照测量上限的 20%、40%、60%、80%、100% 布置。此次校准采用砝码加载，为了保证每级加载力值的准确性，采用电子天平（最大称量 2000g，感量 0.01g）测定砝码质量，每级荷载砝码力值

的计算如式（2）所示。

$$F_n=m_ngL \tag{2}$$

式中， F_n 为 n 级砝码力值； m_n 为 n 级砝码质量； L 为杠杆比，本次校准方法杠杆比为 12；以量程为 1.2KN 的剪切测力环为例，各级加载情况如表 1 所示。

表 1 各级加载情况汇总表

加载级数	1	2	3	4	5
n 级砝码质量/g	1911.72	3822.92	5735.09	7647.70	9560.84
n 级砝码力值/N	224.82	449.58	674.45	899.37	1124.35

校准工作开始前，首先观察测力环是否有肉眼可见的变形及损伤，并记录测力环的编号及校准前的测力环系数。测力环和百分表作为整体如图 3 所示安装好，“一环一表”作为整体进行校准。为保证测力环与仪器上下各部件之间接触良好，施加 1.5582N 的预压力，然后调整百分表使读数为零。

校准时，按照荷载递增顺序逐点进行校准，如表 1 所示。每级荷载加到后，保持一定的时间，通常取 30s，记录此时百分表的读数，直到最后一级。依次卸载，观察百分表读数是否回零，用式（3）计算回零差，校准过程结束。

$$Z=\frac{X_0'-X_0}{X_N} \tag{3}$$

式中， Z 为回零差； X_0' 为卸除荷载后百分表读数； X_0 加荷前百分表读数； X_N 额定荷载下百分表读数。

3.2 数据处理

测力环的受力和百分表的读数具有线性关系，比值为常量，即为测力环系数。处理数据时，使用 origin 软件自带的线性拟合功能，通过 Origin 线性拟合窗口工作列表可以获得斜率、相关系数等参数^[11-13]。使用本次校准方法对实验室内 10 个测力环进行了校准，校准结果汇总如表 2 所示，部分校准曲线如图 5 所示。

表 2 校准结果汇总表

测力环编号	出厂测力环系数 N/0.01mm	校准后测力环系数 N/0.01mm	变化率 %
10673	4.767	4.598	-3.52
20581	6.09	5.982	-1.77
E1217	5.25	5.133	-2.23
A1999	5.715	5.586	-2.26
E1239	5.067	4.989	-1.54

10603	4.695	4.598	-2.07
97043	7.260	7.146	-1.57
07122	7.410	7.350	-0.81
98801	7.380	7.287	-1.26
10672	4.716	4.614	-2.16

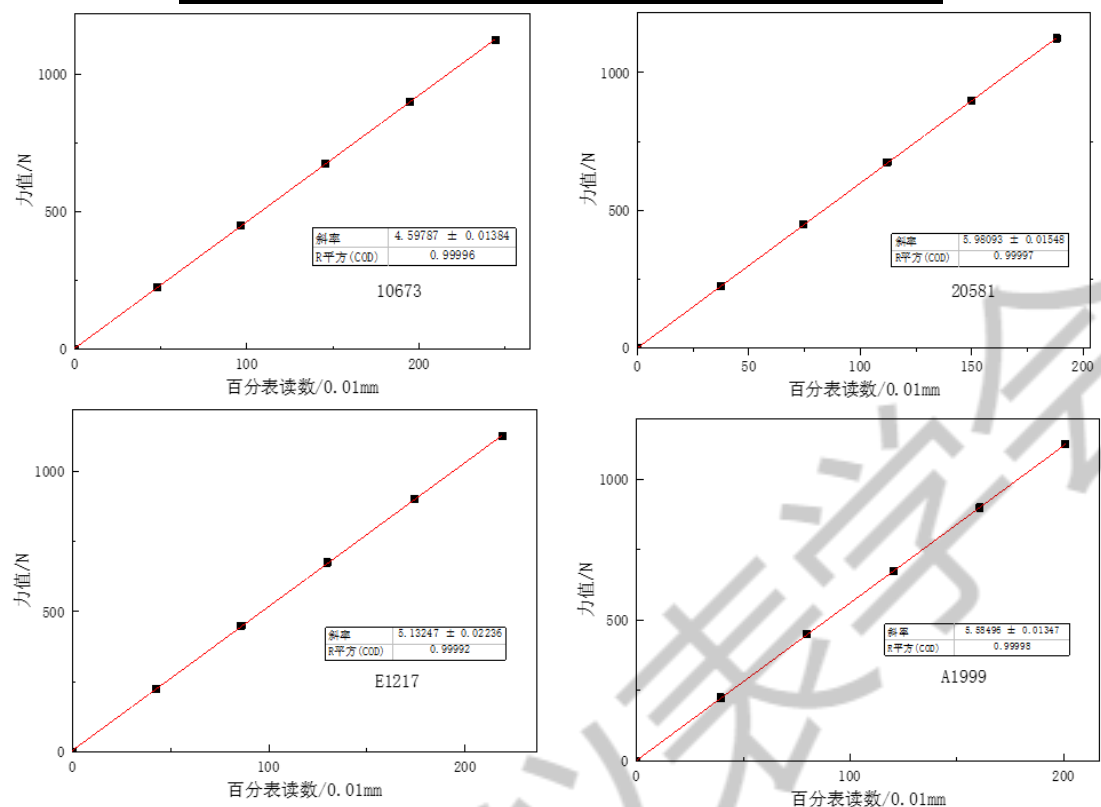


图5 部分测力环校准曲线

3.3 数据分析

已校准的十个测力环的测力环系数汇总情况如图6所示，与出厂时的系数相比，误差均在5%以内，符合教学要求，将测力环系数更正为校准后结果还可以继续使用。校准后的测力环系数均比出厂时小，这是因为测力环在长期的使用过程中，在循环应力和温湿度的共同作用下，产生了局部永久性的累积损伤，产生了一定塑性变形。误差率最小的07122号测力环，它的测力环系数最大，测力环壁比较厚，平时只在教学实验中使用；误差率最大的10673号测力环，其测力环系数较小，测力环壁较薄，平时不仅在教学实验中使用也会在科研实验中使用，使用频率较高。因此，测力环的壁厚、出厂时测力环的系数大小、使用频次均会对测力环系数产生影响。

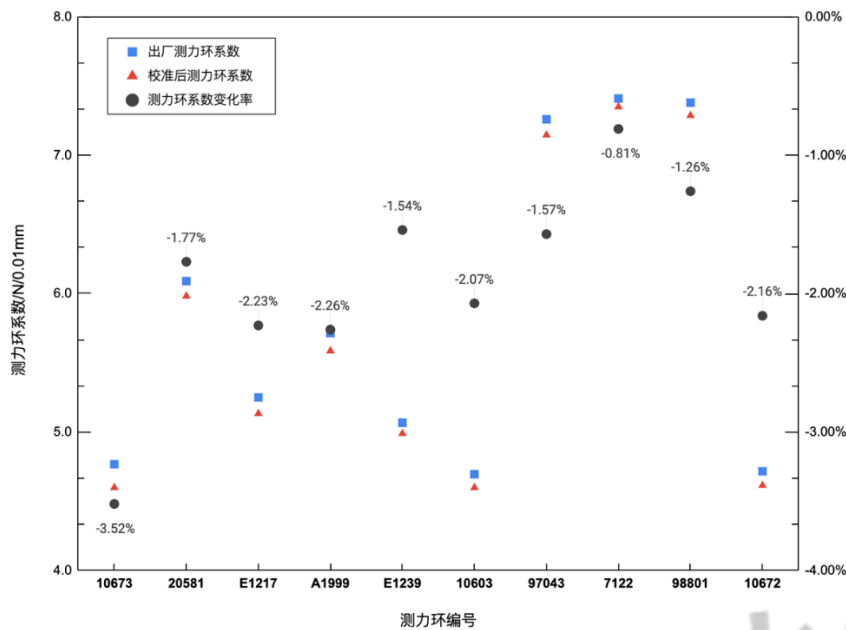


图 6 测力环系数汇总情况图

4 结语

本次测力环校准方法是利用实验室现有的杠杆式固结仪进行改造,具有试验设备易于取得、改造成本较低、易于推广等优点,达到节省时间与经费的目的。本次使用的是 1:12 杠杆比的单联固结仪,也可以使用其它型号的固结仪进行改造。分级加载中使用的砝码是通过电子天平(最大称量 2000g,感量 0.01g)称量并代入计算的,高于行业标准的 0.1%精度要求。测力环在出厂时都带有标定证书,附有测力环系数,但是其仅对测力环进行了标定并没有考虑百分表的误差。本次校准方法,提出“一表一环”,每个测力环都配有专用的百分表,在校准时,将测力环与百分表作为整体安装与校准,从而提高精度。使用该方法校准后的测力环已经在科研及教学实验中得以应用,均取得较好的试验结果。

参考文献:

- [1] JJG455-2000 工作测力仪检定规程.[M].北京 中国计量出版社, 2000.
- [2] 周亦泉, 王福泉, 何济泉.回归分析在测力环校准中的研究[J].计量技术, 2015 (11): 71-74.
- [3] 王蓁丽. 利用 EXCEL 分析工作用测力环的线性回归方程[J]. 科技创新导报, 2018, (28): 71-73.
- [4] 麻青春, 钱武威. 基于最小二乘法的测力环线性回归分析与检验[J]. 交通标准化, 2009, (15): 137-139.
- [5] SL116-2012 应变控制式直剪仪校验方法.[M].北京 水利水电出版社, 2012.

- [6] SD128-84 土工试验规程.[M].北京 水利水电出版社, 1984.
- [7] 徐含青.利用 EXCEL 进行线性拟合的应用[J]. 上海计量测试, 2013,40 (2): 55-58.
- [8] 刘美玲, 王锐.基于 Origin 和 Excel 的牛顿环数据处理[J]. 上海农机, 2019, (12): 31-31.
- [9] 莫林利, 赵秀绍, 王旭, 郑伟. 基于 Excel 的直剪数据处理方法[J]. 铁道建筑, 2015, (09): 102-105.
- [10] 柴海华, 裴俊华.常规三轴试验应力环测力计读数周期与应力应变曲线绘制分析[J]. 兰州工业学院学报, 2018,25 (05): 43-46.
- [11] 朱林,李志峰,何建新,毛勤卫.基于 MATLAB 的应力环校准方程线性回归分析[J].计量技术, 2013 (08): 65-67.
- [12] 陆健.最小二乘法及其应用[J].中国西部科技, 2007(19): 19-21.
- [13] 王常焕. 试验中 CBR 测力环系数的优化[J].实验室科学, 2004(3): 52-53.