

doi:10.11835/j.issn.1005-2909.2023.06.013

欢迎按以下格式引用:陈娟,郑晓,钟世英,等.地下工程监测与检测实验环节教学设计[J].高等建筑教育,2023,32(6):105-111.

# 地下工程监测与检测实验环节 教学设计

陈娟,郑晓,钟世英,张慎河,柴志刚

(山东建筑大学 土木工程学院,山东 济南 250101)

**摘要:**地下工程监测与检测是一门实践性非常强的课程,实验环节是该课程教学非常必要的部分。然而,真实的地下工程现场监测实验耗时耗力,开展难度大、风险系数高,而模型箱实验又与工程实际相差较远。因此,提出一种模拟实验的教学设计,充分利用大学校园空地和实验室现有实验设备,通过简化改进标准实验步骤,设计了超载下土压力测试和平板载荷现场模拟实验。教学实践表明,学生据此完成实验基本操作,取得了符合规律的实验数据,教学效果良好。模拟实验步骤开展实验环节教学,既有利于学生掌握实验原理,了解地下工程现场监测的实况,又充分保障了师生安全,是该课程实验教学较好的设计思路。

**关键词:**实验环节教学设计;模拟实验;土压力测试;平板载荷实验;岩土工程监测

**中图分类号:**G642.423;TU91 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2909(2023)06-0105-07

岩土工程的测试、检测与监测是从事岩土工程勘察、设计、施工和监理的工作者必须掌握的基本知识,同时也是从事岩土工程理论研究所必须具备的基本手段<sup>[1-3]</sup>。随着自动化监测和远程监控技术的实现,监测和检测在现代岩土工程中的地位逐渐提高,地下工程监测与检测或岩土工程测试与监测技术成为全国土木工程(岩土方向)和城市地下空间工程本科专业非常重要的一门专业课<sup>[4-6]</sup>。通过本课程的学习使学生初步掌握工程监测与检测的基本要求、方法、手段,对不同类型工程能制定合理的监测方案,针对不同工程关键问题给出合理的检测方法,并利用已有的监测与检测数据有效控制现场施工质量,及时信息反馈以调整设计,确保施工安全和保护周边环境,并为今后类似地下工程的设计和施工提供经验数据。

该课程内容丰富,涉及岩土工程的多个方面,如地基加固、桩基础、基坑工程、隧道工程以及边

修回日期:2021-12-27

**基金项目:**山东省自然科学基金青年项目(ZR2020QE264);山东省高等学校“青创科技计划”(2019KJG015);教育部产学研合作协同育人项目(202101277008,202101265002)

**作者简介:**陈娟(1989—),女,山东建筑大学土木工程学院讲师,博士,主要从事地铁环境振动与隔振、地下工程监测以及岩土工程数值方法研究,(E-mail)chenjuanjk@126.com;(通信作者)钟世英(1982—),女,山东建筑大学土木工程学院副教授,博士,主要从事地下工程勘察、监测和检测等研究,(E-mail)zhongshiyi@sdjzu.edu.cn。

坡工程的监测和检测等,并具有较强的实践性。针对课程的上述特点,刘永莉等从教师、学生和学校3个方面提出开设课程应满足的基本要求,提出提高课程教学质量的建议,如提高教师素质、培养学生自学能力、提高资源投入等,并分析了现代教育技术(网络技术和多媒体技术等)在课程教学中的应用<sup>[6-7]</sup>。沈超等指出课程课堂教学环节中存在的问题,如缺乏课堂互动、仪器设备操作少、操作技能不熟练等,提出边学边做、强调实践能力是提高课程教学质量的关键<sup>[5]</sup>。结合大型地下结构与工程地质实验场地进行了岩土工程测试与监测技术实践教学改革的探索,提出通过合理设置实践教学环节,优化实践教学方法和内容,完善实践教学成绩的考核,激发学生学习该课程的积极性和创造性<sup>[8]</sup>。

地下工程监测与检测是一门实践性非常强的课程,传统课堂教学对提高学生实践能力有一定局限性,仅通过视频演示无法让学生获得直接训练,必须开设高质量的实践教学环节。实验是地下工程监测和检测课程的重要组成部分,是了解地下工程测试技术、基本测试仪器操作和使用的重要环节。然而实际地下工程监测费时费力,并且风险性较高,难以在教学中开展。比如,基坑工程监测往往在基坑开挖前就需要埋设测点,随项目进行定期测试,测试时长持续数月;再如,边坡工程监测往往开始于边坡施工前,在边坡施工完成后还要进行长达数月甚至数年的监测,直至边坡稳定。一些典型的原位测试技术,比如,现场开展平板载荷实验等需要的场地和堆载条件,在教学中也很难实现。若开展小型的模型箱实验,则与工程实际相差较远,无法再现复杂的现场环境。

鉴于此,结合教学团队近年来对课程实践教学环节的思考和实践,提出一种模拟实验的实验环节教学设计。通过简化改进标准实验步骤,开展课程的实验教学环节,取得了较好的教学效果,可为相关院校该课程实践教学环节的设计提供参考。

## 一、地下工程监测和检测课程设置概况

地下工程监测与检测是山东建筑大学土木工程学院土木工程专业(岩土与地下工程方向)和城市地下空间工程专业开设的一门专业限选课。课程设置32个学时,于大三下学期开设。本课程的先修课程是工程地质、土力学和岩土工程勘察,同期的专业课程有基坑工程、基础工程和隧道工程等,后续课程为毕业设计。根据工程教育认证要求,该课程需要满足下列4个培养目标。

课程目标1:了解各种传感器的基本原理和类型,掌握测试基础的基本知识及各种原位测试技术基本原理与适用条件等。

课程目标2:学习运用各种监测与检测手段,为不同岩土工程问题制定合理的监测方案,根据监测数据及时信息反馈,设计、保护周边环境。

课程目标3:熟悉常用传感器和检测方法的使用范围及局限性,对基坑工程、地下工程等监测指标进行观测、预测和模拟。

课程目标4:通过分组实验,了解并掌握实验小组内人员分工、合作、协调组织,能够在团队中承担个体、团队成员或负责人的角色。根据工程教育认证要求,课程目标与毕业要求中的“问题分析、研究、使用现代工具和个人与团队”具有一一对应关系。

为适应上述要求、提高教学质量,课程教学团队于2018年修订课程大纲,在32个学时中以4个学时开展实践教学环节,即32个总学时的课程分为28学时课堂教学和4学时的实验教学。主要安排2个实验项目:土压力测试(2学时)和浅层平板载荷实验(2学时)。通过这2个实验的教学和设计,使学生掌握运用理论设计实验方案的初步能力,正确选用识读土压力盒、百分表及压力表读数规则,掌握振弦式土压力计及平板载荷实验的基本实验方法和数据处理步骤,对实验数据规律进行

初步分析。培养学生的实践动手能力、团结协作能力和解决问题能力,提升学生的科研兴趣。

## 二、采用标准实验步骤开展实验教学存在的问题

介绍土压力测试和浅层平板载荷实验的标准实验步骤,分析教学中采用标准实验步骤存在的困难和问题。

### (一) 土压力测试标准实验步骤及存在的问题

土压力是岩土工程领域的基本概念,土压力测试是基坑工程的重要监测项目<sup>[9]</sup>,即基坑支护结构周围土体传递给挡土结构的压力,其大小直接决定挡土构筑物的稳定性和安全,进而决定整个基坑的安全。土压力测试一般采用钢弦式土压力计,即常说的土压力盒。其测试原理是:将土压力盒置于土体与结构界面上或埋设在自由土体中,其作用在薄膜上的压力不同,钢弦被拉紧的程度不同,测量得到的频率也随之变化。根据测到的不同频率推算作用在薄膜上压力的大小,即土压力值。根据频率计算土压力的计算公式为

$$p = K(f_i^2 - f_0^2) \quad (1)$$

式中: $p$ 为被测土压力所受的力,MPa; $K$ 为土压力计的率定系数,MPa/Hz<sup>2</sup>; $f_0$ 为土压力计的初始频率读数,Hz; $f_i$ 为土压力计工作频率值,Hz。

在基坑工程监测中,围护结构土压力盒的埋设常采用钻孔法和挂布法<sup>[1]</sup>,如图1所示。本次实验选用常州金土木公司生产的JTM-V2000型振弦式土压力计、JTM-V10A型频率读数仪(图2)。

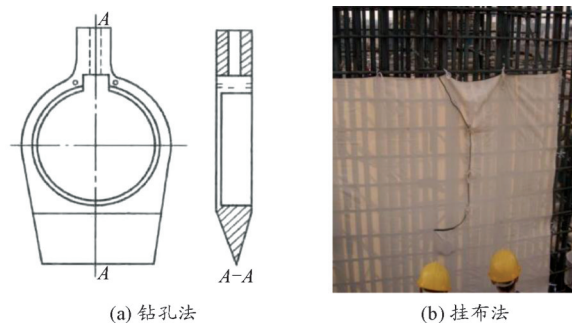


图1 基坑围护结构土压力监测方法



图2 JTM-V2000型振弦式土压力计及JTM-V10A型频率读数仪

采用上述土压力盒进行土压力实验的标准实验步骤主要为埋设安装和量测,具体步骤参见仪器使用说明书。理论上讲,可以采用标准实验步骤开展土压力监测,在空地挖土埋设土压力盒即可测试自重应力下的竖向土压力。但是,这种情况下,由于人工挖坑深度受限,即使采用最小量程的土压力盒,也难以测得较小的土压力值,无法获得测试数据。教学中,更无法模拟实际基坑开挖后产生的侧向土压力工况。

## (二) 平板载荷实验标准实验步骤及存在的问题

载荷实验(plate load test, PLT)是在现场用一个刚性承压板逐级加荷,测定天然地基、单桩或复合地基沉降随荷载的变化,借以确定其承载能力的现场实验。地基土浅层平板载荷试验适用于确定浅部地基土层的承压板下应力主要影响范围内的承载力和变形系数。在拟建建筑场地上将一定尺寸和几何形状(方形或圆形)的刚性板安放在被测地基持力层上,逐级增加荷载,由固定在基准梁上的变形测量装置测得相应的稳定沉降,直至达到地基破坏标准,由此可得到荷载沉降曲线,即 $p-s$ 曲线。通过对 $p-s$ 曲线计算分析,可以得到地基土的承载力 $f_{ak}$ 和地基土的变形模量 $E_0$ 。

实验采用K-30平板载荷实验仪,包括承压板、加荷装置和沉降观测装置,如图3(a)所示,真实的平板载荷现场实验布置如图3(b)所示。



图3 平板载荷实验

其加载系统由手动油泵、千斤顶、高压油管和载荷板组成。载荷板直径300 mm,厚度25 mm;千斤顶推力最大值为5 t,行程120 mm,升降杆起升高度100 mm;手动油泵的额定压力为30 MPa。实验前应检查油泵的液压,及时补充液压油。根据仪器使用说明书和岩土工程勘察规范的规定<sup>[10]</sup>,采用上述设备进行土压力实验的标准实验步骤包括实验设备安装和实验操作两个基本步骤。实验设备安装包括开挖试坑、放置承压板、安装千斤顶、测力计和百分表;实验操作主要包括加载操作、稳压操作、沉降观测和实验记录等。

实验中沉降观测可采用慢速法和快速法,根据规范要求,两种观测方法的具体要求如下:

(1)当采用慢速法时,对于土体,每级荷载施加后,间隔5、5、10、10、15和15 min测读一次沉降,再间隔30 min测读一次沉降。当连续2 h的每小时沉降量不大于0.1 mm时,认为沉降已达到相对稳定标准,可施加下一级荷载;

(2)当采用快速法时,每加一级荷载按间隔15 min观测一次沉降。每级荷载维持2 h,即可施加下一级荷载,最后一级荷载可观测至沉降达到相对稳定标准或仍维持2 h。

由上述实验步骤及加载条件可知,若严格按照标准实验步骤开展平板载荷实验,需要较大体量的堆载,如图3(b)所示,在课堂教学中受场地条件的限制,很难实现,且堆载后对实验人员的安全造成一定威胁。同时,根据标准的沉降观测要求,完成一级加载需要数天时间,完成整个加载过程则持续数月,2学时的实验教学也无法满足标准实验时间的要求。综上,受时间、场地和堆载条件的限制,在教学中采用上述实验步骤是不可行的。

## 三、基于模拟实验的改进实验教学环节设计

针对上述问题,结合教学实际,适当改进、简化上述两个实验的标准实验步骤,通过模拟实验开展课程实验教学环节。将验证性实验改为半设计性实验,由学生根据实验指导书自主设计实验步

骤,锻炼学生的动手能力,加深了其对实验基本原理和实验目的的理解,初步培养了其科研兴趣,提高了学生的积极性和创造力。

### (一) 土压力测试的改进设计

为克服教学过程难以模拟基坑开挖实际工况,而人工挖坑又受深度限制难以测得土压力的困难,教学团队提出在地面堆置砝码以提高土压力大小的办法,即开展超载下土压力测试。根据这一改进思路,将土压力测试实验改进为半设计型实验。

实验仪器包括JTM-V10A型频率读数仪1个、JTM-V2000型振弦式土压力计3个和20 kg的砝码10个。自行设计土压力盒的埋深 $h_1$ 、 $h_2$ 和 $h_3$ ,在地面超载40 kg、80 kg和160 kg时,测试竖向土压力沿深度的分布。写明实验目的、所用仪器、实验原理、实验步骤(附图片),详细记录实验数据,绘制土压力沿深度分布图,并对实验结果进行分析。设计实验数据记录表,需记录设备编号以便查找该仪器对应的率定系数,记录设计土压力盒埋深,并记录初始和最终频率,据此计算土压力值。

### (二) 平板载荷模拟实验设计

为克服平板载荷实验时间、场地和堆载条件的限制,设计模拟实验。考虑实验室设备、校园场地和实验安全,堆载上限设计为10个20 kg的砝码。考虑实际实验学时,沉降观测要求简化为每间隔5、5、10、10和15 min读数,并施加下一级荷载。采用这种模拟实验的方式,虽无法测得真实的地基承载力,但有助于学生掌握平板载荷实验的原理,体验实际加载过程与步骤。

由于实验场地、堆载条件及上课时间限制,此次开展平板载荷实验的模拟实验。将所提供的堆载总质量作为加载最终荷载 $F(F=m \cdot n \cdot g)$ , $m$ 为单个砝码质量,20 kg, $n$ 为砝码个数,10个, $g$ 为重力加速度,取9.8 N/kg,平均分成5级加载,计算各级加载增量 $\Delta p_i$ ,及各级荷载对应的油压表读数 $p_i$ ,根据液压表控制各级荷载。采用简化快速法进行加载,每间隔5、5、10、10和15 min读数,并施加下一级荷载。根据实验结果绘制 $p-s$ 曲线,分析本模拟实验曲线与标准实验曲线产生差别的原因,根据土力学知识补全该曲线,预测地基承载力。设计实验记录样表,需记录油压表读数和载荷板压强,油压表读数根据载荷板压强计算,记录左右两百分表读数,取两者平均值作为沉降值,根据数值绘制 $p-s$ 曲线。

学生根据实验指导书先行预习,设计具体实验方案,教师检查各组方案设计。到达现场后,实验指导教师现场演示,强调仪器操作步骤和注意事项,学生根据自行设计方案开展实验,记录实验数据。实验后,各组绘制实验曲线,分析实验结果,形成实验报告。现场实验前,各组先提交自行设计的实验方案,教师检查通过后方可参加现场实验,提高了学生参与实验的积极性。到达现场后,实验指导教师首先示范仪器操作步骤及注意事项,学生随后根据设计实验方案开展实验操作,分工合作完成试坑开挖、仪器组装调试、测试读数以及数据记录工作。实验结束后,整理实验数据,画测试曲线并分析其规律,各组提供一份实验报告。

## 四、改进实验教学效果分析

图4为超载下土压力现场测试情况,通过前期预习及教师现场演示,学生能按步骤完成试坑开挖、确定土压力盒埋深和测读采集仪频率数值的工作,土压力盒埋深为学生自主设计。由图5可见,土压力曲线随深度变化满足科学规律,本改进实验设计可行。通过实验报告可知,学生较好地掌握了钢弦式土压力计的测试原理、土压力计埋设方法、土压力数据处理方法,并且可分析土压力随深度及地面超载情况的变化规律,以及产生该变化规律的原因,取得了较好的实验教学效果。

土压力实验中仍存在以下问题:1)土压力盒摆放中较难定位其平面位置,3个土压力盒较难对

中;2)回收土压力盒过程中,出现只找到引线,土压力找寻不到的现象,导致过度拉扯引线,损害引线连接的问题。在后期教学中,应提前强调问题,加强实验督导。

图6为现场平板载荷实验情况,根据实验指导书和现场教师指导,学生逐步安装实验设备,包括载荷板、压力表、油泵、百分表等,按指导书给出的简化步骤完成实验堆载,并进行仪器读数,包括百分表及压力表读数。根据提交的实验报告可知,各组均测得了 $p-s$ 曲线的前半段,能分析造成该结果的原因,可根据土力学规律补全曲线,模拟分析地基承载力,达到了实验教学目的。



图4 超载下土压力测试现场开展情况

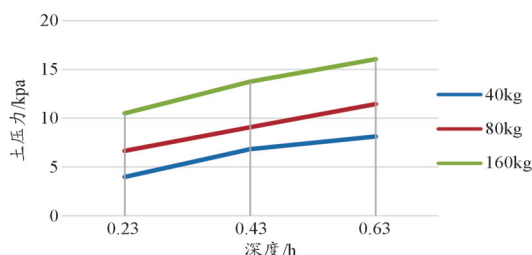


图5 实验报告中超载下土压力随深度变化曲线

由于实验步骤及仪器操作复杂,平板载荷实验过程中还存在一些问题:1)实验开展过程中,个别组未拧紧和油泵连接的压力表,导致油泵漏油,进而导致加压无法达到设定压力值;2)现场条件暂不允许安装基准梁,因此,百分表读数精度有待提高。上述问题可在后续实践教学中改进。

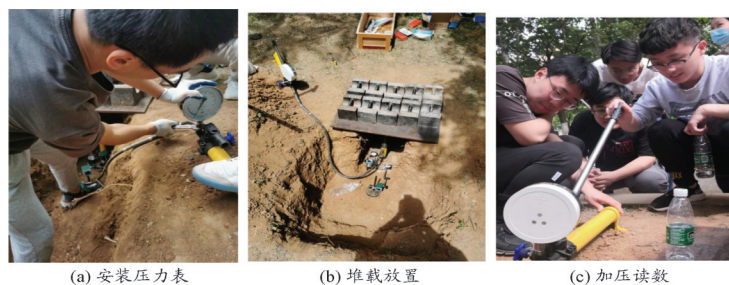


图6 平板载荷模拟实验

## 五、结语

实践教学环节是保证地下工程监测与检测课程教学效果的关键,针对实际岩土工程监测实验费时费力,较难开展的问题,提出模拟实验的解决方案。对土压力监测和平板载荷实验进行了实验步骤的改进,提出模拟实验和半设计型实验的实践教学设计。

(1)针对人工挖坑深度较浅、土压力数值太小无法测试的问题,提出地面堆载的方法增大土压力,将实验改进为超载下的土压力测试,并要求学生自行设计土压力盒埋深,达到半设计性实验的效果。

(2)针对平板载荷实验开展时间长、占地面积大且堆载风险高的问题,设计了简化的实验步骤和沉降观测要求,有效保障了课堂实验的顺利进行。实验得到非标准曲线,由实验学生自主分析其产生原因,将实验结果分析扩展为开放性问题,锻炼了学生分析解决问题的能力,初步培养了其科研兴趣。

该改进实验设计充分利用了实验室现有仪器设备和校园空地条件,取得了良好的教学效果。加深了学生对实验基本原理的理解,提高了仪器操作的熟练程度,锻炼其实验设计和问题分析能力,并在实验过程中充分保障了师生的人身安全。该实验设计克服地下工程监测实验课程的时间和空间条件限制,可为相关院校地下工程监测与检测实验环节教学设计提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 宰金珉,王旭东,徐洪钟. 岩土工程测试与监测技术[M]. 2版. 北京:中国建筑工业出版社,2016.
- [2] 何开胜. 岩土工程测试和安全监测[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [3] 任建喜,年廷凯,赵毅. 岩土工程测试技术[M]. 2版. 武汉:武汉理工大学出版社,2020.
- [4] 李德营,殷坤龙.《岩土工程监测》课程双语教学实践与思考[J]. 教育教学论坛,2013(35):75-76.
- [5] 沈超,蔡晓光,王伟. 关于高校岩土工程测试与监测技术课程教学的思考[J]. 科技视界,2015(22):30,294.
- [6] 刘永莉. 高校岩土工程测试与监测技术课程教学分析及对策[J]. 亚太教育,2016(14):47.
- [7] 刘永莉. 现代教育技术在高校《岩土工程测试与监测技术》课程教学中的应用[J]. 人力资源开发,2016(6):210.
- [8] 沈超,蔡晓光,王伟. 岩土工程测试与监测技术实践教学探索[J]. 课程教育研究,2016(11):197-198.
- [9] 建筑基坑工程监测技术标准:GB 50497—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
- [10] 岩土工程勘察规范:GB 50021—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

## Design of the experimental teaching in the course of testing and inspecting of underground engineering

CHEN Juan, ZHENG Xiao, ZHONG Shiyong, ZHANG Shenhe, CHAI Zhigang

(School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, P. R. China)

**Abstract:** Testing and inspecting of underground engineering is a practical discipline, and the experimental teaching is an essential part of this course. However, the actual in-situ underground monitoring and inspecting tests are generally difficult to conduct on campus, since they are always laborious, time-consuming, and high-risking. Meanwhile, the model box experiments are so far from the engineering reality. Consequently, this paper proposes a simulated test design in the experimental teaching. By simplifying the standard testing steps, two simulated test design cases of soil pressure test under preloading and plate loading test (PLT) are presented, making good use of open space on the campus and the available testing equipment in the lab. The teaching practice shows that, following the experimental steps of the simulated test design, students could smoothly accomplish the tests and obtain testing data with rather good quality, and good teaching result could be achieved. It leads to several benefits to conduct the experimental teaching according to the designed simulated experimental procedures, including enhancing students' understanding of the experimental principles, obtaining vivid feeling of how in-situ tests are conducted, and ensuring the safety of the students and teachers in the testing. It is an effective way to conduct the experimental teaching according to the proposed simulated test design.

**Key words:** design of experimental teaching; simulated test; soil pressure test; plate loading test; geotechnical engineering monitoring

(责任编辑 周沫)