

全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

土木工程试验与检测技术

张俊平 主编

蔡健 韩建强 主审

中国建筑工业出版社

013031216

TU-33
04

全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材

土木工程试验与检测技术

张俊平 主编
蔡健 韩建强 主审



TU-33/04

中国建筑工业出版社



北航

C1636644

013031516

图书在版编目 (CIP) 数据

土木工程试验与检测技术/张俊平主编. —北京:
中国建筑工业出版社, 2013. 2
全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材
ISBN 978-7-112-14941-4

I. ①土… II. ①张… III. ①土木工程—试验—高等
学校—教材 IV. ①TU-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 040256 号

本书根据全国高等学校土木工程学科专业指导委员会的有关精神, 将土木工程专业中建筑工程、道路与桥梁工程、地下工程三个主要方向的教学内容进行打通而编写的教材。本教材以突出工程性与应用性、扩大专业面、弱化行业规范为切入点, 在编写过程中汲取较为先进成熟的技术成果, 精选典型的工程检测试验实例, 力求既能较好地满足“大土木”本科专业教学的要求, 又能充分地适应生产实践的需要。本书共分九章, 涵盖建筑结构、桥梁、岩土及道路试验检测等方面的基本原理、方法与典型实例, 主要内容包括: 绪论、试验与检测的量测技术、试验检测方案设计与测试数据分析、无损检测技术、地基基础试验检测、结果静载试验、结构动力试验、既有结构的技术状况评估、其他试验检测技术简介等。

本书可作为高等学校土木工程专业建筑工程、道路与桥梁工程、地下工程等主要方向的教材, 也可供相关工程技术人员参考使用。

* * *

责任编辑: 王 跃 吉万旺
责任设计: 董建平
责任校对: 肖 剑 陈晶晶

全国高校土木工程专业应用型本科规划推荐教材
土木工程试验与检测技术

张俊平 主编
蔡 健 韩建强 主审

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)
各地新华书店、建筑书店经销
霸州市顺浩图文科技发展有限公司制版
北京同文印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 17 字数: 409 千字
2013 年 2 月第一版 2013 年 2 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-14941-4
(23008)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

序

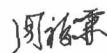
自 1952 年院系调整之后，我国的高等工科教育基本因袭了前苏联的体制，即按行业设置院校和专业。工科高校调整成土建、水利、化工、矿冶、航空、地质、交通等专科学校，直接培养各行业需要的工程技术人才；同样的，教材也大都使用从前苏联翻译过来的实用性教材，即训练学生按照行业规范进行工程设计，行业分工几乎直接“映射”到高等工程教育之中。应该说，这种过于僵化的模式，割裂了学科之间的渗透与交叉，并不利于高等工程教育的发展，也制约了创新性人才的培养。

作为传统工科专业之一的土木工程，在我国分散在房建、公路、铁路、港工、水工等行业，这些行业规范差异较大、强制性较强。受此影响，在教学过程中，普遍存在对行业规范依赖性过强、专业方向划分过细、交融不够等问题。1998 年教育部颁布新专业目录，按照“大土木”组织教学后，这种情况有所改观，但行业影响力依旧存在。相对而言，土木工程专业的专业基础课如建材、力学，专业课程如建筑结构设计、桥梁工程、道路工程、地下工程的问题要少一些，而介于二者之间的一些课程如结构设计原理、结构分析计算、施工技术等课程的问题要突出一些。为此，根据全国高等学校土木工程学科专业指导委员会的有关精神，配合我校打通建筑工程、道桥工程、地下工程三个专业方向的教学改革，我校部分教师以突出工程性与应用性、扩大专业面、弱化行业规范为切入点，将重点放在基本概念、基本原理、基本方法的应用上，将理论知识与工程实例有机结合起来，汲取较为先进成熟的技术成果和典型工程实例，编写了《工程结构设计原理》、《基础工程》、《土木工程结构电算》、《工程结构抗震设计》、《土木工程试验与检测技术》、《土木工程施工》六本教材，以使学生更好地适应“大土木”专业课程的学习。

希望这一尝试能够为跨越土建行业鸿沟、促进土木工程专业课程教学提供有益的帮助与探索。

是为序。

中国工程院院士



2012 年 11 月于广州大学

前 言

土木工程是一个古老而现代的学科，目前正处于黄金发展期。从土木工程设计理论的发展史来看，每一种设计计算理论的建立，都是建立在大量的科研试验、生产实践的基础上。试验检测技术的发展，对促进设计计算理论的成熟、解决生产实践中的疑难问题往往起到了重要的、不可替代的作用。

随着经济高速持续发展，我国已成为全球建筑业最繁荣的地区，建设规模与建设速度位居世界前列；与此同时，大批既有土木结构也逐步进入了老化期。为了确保新建工程的施工质量与可靠性、确保既有土木结构的安全服役与正常使用，建筑行业对土木工程的试验检测工作提出了更高、更全面的要求。另一方面，随着测试技术手段的进步、新材料新工艺的推广，测试技术、分析手段也取得了长足的进步，为土木工程试验检测提供了强有力的技术支持。基于上述两个方面，编者根据多年工程实践经验和教学体会，汲取较为先进成熟的技术成果，精选典型的工程检测试验实例，力求既能较好地满足“大土木”本科专业教学的要求，又能充分地适应生产实践的需要。

本书包含了建筑结构、桥梁、岩土及道路试验检测等方面的基本原理、方法与典型实例，全书共分九章，由张俊平主编，具体分工如下：第一、三、六章，第九章第二、四节，张俊平；第二章，梅力彪；第四章，李永河；第五章、第九章第三节，郑先昌；第七章，徐忠根；第八章，徐忠根、李永河；第九章第一节，吴旷怀；附录，梅力彪；全书由张俊平统稿。由于本教材覆盖面广、涉及内容多，对于打*的章节，在教学时可根据学时数及教学对象的需要选讲。在编写过程中，广州市设计院总工程师韩建强教授级高工、华南理工大学蔡健教授提出了许多宝贵的修改意见，特致谢忱。

限于编者水平和时间，谨请读者批评指正，使得本书在教学实践与生产实践中日臻完善。

目 录

第一章 绪论	1
第一节 土木工程试验与检测的意义	1
第二节 试验检测的主要工作内容	3
第三节 试验检测的一般程序	4
第二章 土木工程试验与检测的量测技术	6
第一节 概述	6
第二节 应变测试仪器与技术	8
第三节 变形测试仪器与技术	23
第四节 振动测试仪器与技术	34
第五节 其他物理参数测试仪器与技术	42
思考题	46
第三章 试验检测方案设计与测试数据分析	48
第一节 概述	48
第二节 模型试验方案设计	48
第三节 原型检测方案设计	58
第四节 量测数据的处理与误差分析	62
思考题	74
第四章 无损检测技术	75
第一节 概述	75
第二节 回弹法检测混凝土强度	78
第三节 超声-回弹综合法检测混凝土强度	85
第四节 钢筋混凝土结构缺陷检测	91
* 第五节 钢结构焊缝缺陷检测	104
* 第六节 局部破损检测方法简介	107
* 第七节 无损检测实例	111
思考题	117
第五章 地基基础试验与检测方法	118
第一节 概述	118

第二节	平板载荷试验	118
第三节	静力触探试验	125
第四节	十字板剪切试验	129
第五节	圆锥动力触探试验	132
第六节	标准贯入试验	134
第七节	桩基静载试验	138
第八节	桩的钻芯检测	141
第九节	桩的低应变检测	144
第十节	桩的高应变检测	146
	思考题	150
第六章	结构静载试验	152
第一节	概述	152
第二节	现场原型静载试验	153
第三节	静载试验的组织实施	166
第四节	静载试验实例	169
	思考题	178
第七章	结构动力试验	179
第一节	概述	179
第二节	结构动力响应测试	180
第三节	结构抗震试验	184
第四节	模拟地震振动台试验实例	195
	思考题	198
第八章	既有结构的技术状况评估	199
第一节	概述	199
第二节	建筑结构可靠性鉴定评估	200
第三节	桥梁检查与技术状况评定	211
第四节	检测评估实例	220
	思考题	221
* 第九章	其他试验检测技术简介	222
第一节	沥青及沥青路面检测	222
第二节	结构施工监测控制	233
第三节	基坑监测	243
第四节	结构长期监测与健康诊断	250
	思考题	255
附录	试验大纲	256

第一章 绪 论

第一节 土木工程试验与检测的意义

在科学技术的发展过程中,科学试验起着非常重要的作用。对土木工程而言,建筑材料、结构体系、设计计算理论、施工方法是其发展进步的四个主要支柱,从土木工程设计理论的演变历史来看,每一种理论体系的建立和发展,一般都建立在大量的科学试验、生产实践的基础上。试验研究对于推动和发展结构设计计算理论、解决生产实践中出现的疑难问题往往起到了重要的作用。

一般说来,土木结构主要可划分为建筑结构、桥梁结构、地下结构三大类,这三类结构虽然在功能用途、结构形式、施工方法等方面有一定的差异,但在建筑材料、设计计算理论、试验检测方法等方面存在密切的联系,在建设程序、质量检验、工程验收等方面基本一致,可以说,不同的土木结构虽然在形式上有一定区别,但具有同样的、内在的技术基础与建设管理流程。另一方面,土木工程作为一门传统的、古老的学科,虽然近30年在设计理论、结构体系、施工工艺技术等方面取得了非常大的进展,但仍未从根本上改变其半理论、半经验的本质,如一些设计参数往往需要通过现场试验勘察来确定,设计理论、计算模型也需要通过试验研究进行检验验证,试验研究与勘察测试仍然具有不可替代的作用。

随着我国大规模的土木工程建设进入中后期,一方面,土木工程中新结构、新材料、新工艺的不断发展,迫切需要通过试验、检测、监测技术来验证土木工程的设计计算理论,检验土木工程的施工质量,提升土木工程建设的技术水平;另一方面,随着既有土木结构服役年限的增长、病害的发展、用途功能的改变,需要通过检测监测技术来保障结构的安全使用,提高结构的可靠性与耐久性,提升土木结构运营与养护的技术水平。因此,土木工程检测试验技术日益受到人们的重视,并不断得到发展和提高。土木工程试验检测的任务主要包括以下几个方面:

1. 明确设计参数,检验材料或结构的性能参数,确定新建结构的承载能力。对于土木结构的一些设计参数,在设计之前,需要进行系统的勘察测试,以服务于施工图设计。对于主要的结构或功能材料,在施工过程中,需要进行细致的力学性能检验,以判定材料性能是否满足设计要求。对于重要的结构在建成竣工后,需要进行试验检测,以考察其施工质量与结构性能,确定其承载能力,为竣工验收、投入运营提供科学的依据。

2. 研究结构(构件)的受力行为,总结结构受力行为的一般规律。随着土木工程的不断发展,新结构、新材料、新工艺的推广应用,原有的规范、规程往往不能适应工程实践的要求。为了修改、完善既有的规范、规程,需要通过研究性试验与长期监测掌握新型复杂结构的受力状态,探索结构受力行为的一般规律,为充实和发展土木工程的设计计算

理论积累资料，以更好地指导设计与施工工作。

3. 评估既有结构的使用性能、承载能力与可靠性。对于既有结构在使用期间，因受水害、火灾、地震等自然灾害而产生损伤，或因设计施工不当而产生质量缺陷，或因用途功能改变而导致使用荷载发生变异，通常通过试验检测来评估既有结构的使用性能、承载能力或可靠性，评价加固改造的效果，为既有结构的养护、管理、加固、改建提供科学的依据。

按照试验的目的与要求分类，土木工程试验可以分为科学研究性试验和生产鉴定性试验两大类。就试验对结构产生的后果来说，试验检测可分为破坏性试验和非破坏性试验。总的说来，研究性试验的目的是为了建立或验证结构设计计算理论或经验公式，一般把对结构或构件的主要影响因素作为试验参数，多利用模型结构进行破坏试验，在专门的试验室内、利用特定的加载装置进行加载测试，以消除或减少外界因素的干扰影响，同时突出所要研究的主要因素，以便于更准确地反映一些因素的影响，也便于加载测试工作的开展，从而通过对模型系统的加载测试，对测试资料数据加以分析论证，揭示出具有普遍意义的规律，为设计、施工服务。

生产鉴定性试验也称为试验检测，具有直接服务于生产实践的意义，一般以原型结构作为试验对象进行非破坏性试验，即根据一定的规范、规程的要求，按照有关设计文件，多在现场进行试验，通过试验检测来确定材料的性能，结构的实际承载能力、使用性能和使用条件，检验设计施工质量，掌握土木工程结构或材料在试验荷载作用下的实际工作状态，提出相应的设计、施工或运营维护建议对策，保证结构的安全与正常使用。在土木工程试验中，原型试验存在费用高、期限长、测试环境多变等不利的影响因素，如对一些大型结构进行多因素的研究性试验，有时是难以实现的，因此结合原型结构进行模型试验往往成为科研的一种有效手段，可以更为方便全面地研究主要影响因素之间的关系，探索结构行为的普遍规律，推动新结构、新材料、新工艺的发展与应用。但总的说来，不论是原型试验还是模型试验，大体都包括试验准备、理论计算、加载测试、分析整理等一系列工作内容。

根据试验荷载作用的性质，试验检测可分为静荷载试验和动荷载试验。静载试验是将静止的荷载作用在结构上的指定位置而测试结构的静力位移、静力应变、裂缝宽度及其分布形态等参量的试验项目，从而推断结构在荷载作用下的工作性能及使用能力。动载试验是利用某种激振方法激起结构的振动，测定结构的固有频率、阻尼比、振型、加速度及位移响应等参数的试验项目，从而判断结构的整体刚度与动力性能。静载试验与动载试验虽然在试验目的、测试内容等方面不同，是两种性质的试验，但对于全面分析掌握结构的工作性能是同等重要的。

按试验持续时间的长短，可分为长期试验和短期试验。鉴定性试验与一般性的研究试验多采用短期试验方法，只有那些必须进行长期监测的现象才采用长期试验方法，如混凝土结构的收缩和徐变性能、基础的沉降及其影响规律、温度效应分布规律、结构风致振动等，这些参数对结构长期性能的影响，往往通过一些响应参数如位移、应力、加速度的长期监测来把握。此外，对于大型复杂结构或新型结构常常采用长期监测或健康状况监测手段，以掌握其某些荷载如风荷载的变化、结构静力动力响应变化的规律，积累这些结构长期使用性能的资料。

总之，结合具体的试验目的及试验周期，可选用一种或几种试验手段来检验土木结构的设计施工质量或使用性能。在选择试验方法时应从具体问题出发，综合考虑各种因素，降低试验费用，一般能用模型代替的，就不用大尺度的原型试验，通过非破坏性试验可以达到试验目的的，就不做破坏性试验。

第二节 试验检测的主要工作内容

土木工程试验检测的工作内容比较多，涉及很多方面。从试验检测对象来分，涉及建筑结构、桥梁结构与地基基础；从试验方法上来讲，分为静力试验、动力试验、无损检测和既有结构技术状况评估；从试验持续时间上来看，分为短期试验和长期试验；从试验检测进行时期来看，分为施工过程监测控制和结构竣工试验。一般说来，土木工程试验检测就是依据相应的规范、规程，采用专门的仪器设备，按照既定的试验检测方案，对特定的结构进行加载、测试、分析与评价，其主要工作内容大体可归纳如下。

1. 无损检测

无损检测技术是土木工程试验检测技术中一项重要的内容。所谓无损检测技术，是在不破坏结构内部构成和使用性能的情况下，利用声、光、热、电、磁和射线等方法，测定有关混凝土、钢材性能的物理量，推定混凝土或钢材的强度、缺陷等的测试技术。无损检测技术与破坏试验方法相比，具有不破坏结构的构件、不影响其使用性能、可以探测结构内部的缺陷、可以连续测试和重复测试等特点。应用无损检测技术，可以检测混凝土的强度、弹性模量、裂缝的深度和宽度，可以检查钢筋的直径、位置和保护层厚度，并可以探知混凝土的碳化程度、钢筋的锈蚀程度和混凝土构件的尺寸等参数，也可以检验钢结构焊缝质量，发现焊接缺陷。无损检测技术对于进行施工质量检验与管理，进行既有结构的养护维修管理，评定既有结构的承载能力、耐久性能、损伤程度及可靠性是非常重要的。

2. 地基基础试验检测

地基基础试验检测主要包括地质勘察、土的力学性能测试、地基试验检测、桩基础试验检测等方面。地质勘察就是采用相应的现场勘察钻探设备，来摸清土木工程建设场址的地质情况，掌握各土层的空间分布与变化状况。土的力学性能测试就是将建设场址土样运回实验室内，测试分析建设场址土样的力学性能指标。地基试验检测是采用相应的加载手段、测试方法，在现场测试评价地基基础承载能力的原位试验。桩基础试验检测包括桩基完整性检测、桩基承载力检测两个方面，具体包括桩基静载试验、桩基低应变检测、桩基高应变检测等。

3. 结构静载试验

结构静载试验是根据结构设计荷载标准，采用一定的分析计算手段，编制相应的加载、测试方案，在此基础上，将静荷载按一定程序作用在结构上的指定位置，测试结构的静力位移、静力应变、裂缝宽度及其分布形态等参量的试验项目，然后通过对实测结果与理论计算结果的比较、通过与规范规程限值的比较，来评价分析结构的承载能力与工作性能，提出相应的设计、施工或运营维护建议。结构静载试验对象可以是桥梁结构、建筑结构，也可以是地基基础或地下结构。

4. 结构动力试验

结构动力试验是采用一定的激振方法,使结构产生振动,采用相应的动测仪器设备,来测定结构的固有频率、阻尼比、振型、位移响应、加速度响应等参数的试验项目,然后根据理论计算结果、相关限值或经验公式,来宏观判断结构的整体刚度或使用性能,结构动载试验对象主要针对桥梁结构、建筑结构。

5. 既有结构的技术状况评估

受环境因素的侵蚀、自然或人为灾害的影响、使用荷载的反复作用等,既有结构在服役期间,其技术状况可能会发生大的变异,因此,对于建筑结构、桥梁结构、地下结构在使用过程中,要依据相应的规范、规程进行技术状况评估,从而确保结构安全正常使用,提出相应的维护建议。建筑结构的可靠性鉴定与评估是指通过静载试验、动载试验、无损测试、分析计算等手段,来综合评价建筑结构的可靠性。桥梁技术状况评估是在桥梁外观缺陷检查的基础上,结合无损测试等手段,掌握既有桥梁的基本状况,查明缺陷或潜在损伤的性质、部位、严重程度及其发展变化态势,评价得出桥梁的完好等级。

6. 施工监控与长期监测

对于大型复杂结构如大跨度桥梁、高层高耸结构、大跨空间结构、深基坑等,由于施工周期长,外界因素变化较大,为了确保施工能够较准确地实现设计意图,避免一些随机因素如温度、湿度、材料参数、施工误差对结构施工过程和竣工状态造成过大的影响,就需要在施工过程中对每一施工阶段结构的变形、应力、内力等参数进行实时监测,逐段与设计目标值进行比较,并预测下一施工阶段这些参量的变化态势,以便修正设计计算参数、采取调整控制措施,以确保施工过程中结构的安全性,并以预定的精度逼近设计目标值,达到较为理想的竣工状态,这就是施工监测控制,施工控制是大跨度结构、复杂结构安全顺利施工的保障措施之一。另一方面,为了能够及时准确地掌握一些时效因素如收缩、徐变、基础沉降、温度等时效因素对结构的影响程度,了解这些时效因素对结构影响的变化趋势,就需要在结构运营过程中,在一个相对较长的时期内定期或自动监测结构的变形、应变、内力、裂缝等参数,并对这些参数进行综合分析,以判断结构的实际状态与工作性能,这类监测测试称为长期监测,当采用自动化、系统化程度较高的监测系统来实现这一功能时,也称为健康监测系统。

7. 其他试验检测项目

除以上列举的几类试验检测项目之外,土木工程试验检测还有一些其他检测项目,如沥青及沥青混合料试验检测、路面弯沉性能试验检测,建筑材料试验检测(包括钢筋、水泥、混凝土、墙材等主材,也包括建筑管材、外加剂等辅材),建筑结构抗渗性能试验检测等。

第三节 试验检测的一般程序

不论是针对哪种土木工程结构,还是采用哪种试验检测手段,一般情况下,土木工程试验检测可分为三个阶段,即准备规划阶段、加载与观测阶段、分析总结阶段,简要叙述如下。

准备规划阶段是土木工程试验检测顺利进行的必要条件,该阶段工作包括工程设计文

件、施工记录、监理记录、既有试验资料等技术资料的收集（必要时前往试验现场考察，摸清现场工作条件，检查试验检测对象的外观），包括加载方案制定、量测方案制定、仪器仪表选用等方面（必要时进行结构设计内力计算），也包括搭设工作脚手架、设置测量仪表支架、测点放样及表面处理、测试元件布置、测量仪器仪表安装调试等现场准备工作。可以说，检测工作的顺利与否很大程度上取决于检测前的准备工作。

加载与观测阶段是整个检测工作的中心环节，这一阶段是在各项准备工作就绪的基础上，按照预定的试验方案与试验程序，利用适宜的加载设备进行加载，运用各种测试仪器，观测试验结构受力后的各项性能指标如挠度、应变、裂缝宽度、加速度、位移等，并采用适宜的记录手段记录各种观测数据和资料。需要强调的是，对于静载试验应根据当前所测得的各种技术数据与理论计算结果进行现场分析比较，以判断结构受力行为是否正常，是否可以进行下一级加载，以确保试验结构、仪器设备及试验人员的安全，这对于破坏性静载试验、存在病害的既有结构进行静载试验时尤为重要。

分析总结阶段是对原始测试资料进行综合分析的过程，原始测试资料包括大量的观测数据、文字记载和图片等材料，受各种因素的影响，一般显得缺乏条理性与规律性，未必能深刻揭示试验结构的受力行为规律。因此，应对它们进行科学的分析处理，去伪存真、去粗存精、由表及里，综合分析比较，从中提取有价值的资料。对于一些数据或信号，有时还需要按照数理统计的方法进行分析，或依靠专门的分析仪器和分析软件进行分析处理，或按照有关规程的方法进行分析或判断。测试数据经分析处理后，按照相关规范、规程以及试验检测的目的要求，对检测对象做出科学的判断与评价，必要时提出相应的设计、施工或运营维护建议。这一阶段的工作，直接反映整个检测工作的质量。

以上三个阶段的工作完成后，将全部检测工作依据相应规范、按照一定格式、规范地体现在试验检测报告中。试验检测报告内容主要包括试验概况、试验检测目的与依据、试验检测方案、试验检测日期及试验过程、试验记录图表摘录、试验主要成果与分析评价、技术结论等几个方面。

由此可见，土木工程试验检测是一门直接服务于工程实践的技术科学，其服务对象比较宽泛，涉及土木工程各个分支学科，其技术综合性较强，与土木工程的设计计算理论、结构受力行为等方面密切相关。随着我国大规模土木工程建设进入中后期，新结构、新材料、新工艺的不断涌现，以及大批在役结构进入老化期，工程实践对土木工程试验检测提出了更高、更全面的要求。完全可以相信，土木工程试验检测技术的进步，必将进一步地推动土木工程建设与营运的持续健康发展，为土木工程的设计、施工、营运起到更加重要的保障作用。

第二章 土木工程试验与检测的量测技术

第一节 概 述

土木工程是一门实践性极强的学科,从地基、基础到上部结构的设计施工中,试验与检测起着非常重要的作用。随着建设工程质量、安全与耐久性日益受到重视,地基、基础及上部结构检测的作用也越来越突出。量测技术、仪器设备、测试元件是试验与检测的重要技术保障,量测技术的科学性、准确性直接关系到试验与检测能否达到预期的目的。在土木工程试验与检测中,量测的内容一般包括以下几个方面。

1. 土木工程施工、运营及试验检测过程中作用力及内力的大小,包括荷载作用的大小,水压力、土压力、一些构件的内力、支座反力的大小。
2. 土木工程施工、运营及试验检测过程中构件截面或土体内部各种应力、压力的分布状态及其大小,如建筑结构、桥梁结构的构件某一截面上的应力大小;土石坝、路基、边坡、基坑及隧道等土体内部不同部位的土压力等。
3. 土木工程构筑物及结构的各种静态变形,如电视塔、索塔等高耸结构的水平位移;建筑物的沉降、结构构件的挠度、相对滑移、转角;土石坝、路基、边坡、基坑及其隧道等岩土工程土体变形测量等。
4. 土木工程结构局部的损坏现象,如混凝土裂缝的分布、宽度、深度等。
5. 在地震或特定的动荷载作用下,测定结构的动应力,或测定结构的自振特性、动挠度、加速度、衰减特性等。
6. 土木工程材料性能指标测试,如混凝土强度,沥青及沥青混合料的强度、稳定性、软化点等性能指标,地基土的土体参数及地基承载力测试。
7. 路基路面的相关指标测定,如路基密实度、路面弯沉、平整度测试等。

为了测定上述的各项数据,在进行试验与检测时需要使用相应的检测仪器,并要掌握量测仪器的基本性能和测量方法。

一、检测仪器的分类

测试仪器的分类方法很多,较为常用的分类方法有以下几种。

1. 按仪器的工作原理:分为机械式测试仪器、电测仪器、光学仪器、声学仪器、复合式仪器、伺服式仪器等。
2. 按仪器的用途:分为测力计、应变计、位移计、倾角仪、测振仪、测斜仪等。
3. 按结果的显示与记录方式:分为直读式、自动记录式、模拟式、数字式。
4. 按照仪器与结构的相对关系:分为附着式、接触式、手持式、遥测式等。

二、仪器的性能指标

仪器的性能指标一般包括以下几个方面。

1. 量程（测量范围）：仪器的最大测量范围叫做量程。如百分表的量程一般有 50mm 和 100mm，千分表的量程有 3mm 和 5mm。
2. 最小分度值（最小刻度）：仪器指示装置的每一最小刻度所代表的数值叫做最小刻度。百分表的最小刻度为 0.01mm，千分表的最小刻度为 0.001mm。
3. 灵敏度：被测结构的单位变化所引起仪器指示装置的变化数值叫做灵敏度，灵敏度与最小刻度互为倒数。
4. 准确度（精度）：仪器指示的数值与被测对象的真实值相符合的程度叫做准确度。
5. 误差：仪器指示的数值与真实值之差叫做仪器的误差。

三、试验与检测对仪器的要求

试验与检测对仪器的要求包括以下几个方面。

1. 仪器的量程、准确度、灵敏度要根据检测的要求合理选用，对于野外检测仪器还要求其工作性能稳定、抗干扰能力强。
2. 仪器结构简单，使用方便，安装快捷，无论是外包装还是仪器本身结构，都应具有良好的防护装置，便于运输安装，不易损坏。
3. 仪器轻巧，自重轻、体积小，便于野外试验与检测时携带。
4. 仪器适应性强，具有多种用途。如应变仪，既可单点测量，也可多点测量；既可测应变，也可测位移。
5. 使用安全。包括仪器本身的安全，不易损坏，对操作人员不会产生人身安全。

量测仪器的某些性能之间经常是互相矛盾的，如精度高的仪器，其量程较小；灵敏度高的，其适应性较差。因此在选用仪器时，应避繁就简，根据试验的要求来选用合适的仪器，灵活运用。目前应用于结构试验中的仪器，以电测类仪器较多，机械式仪器仪表已不能满足多点量测和数据自动采集的要求，从发展的角度看，数字化和集成化量测仪器的应用日益广泛，将给量测和数据处理带来更大的方便。

四、仪器的计量标定

为了保证检测数据的准确性，在检测过程中使用的仪器设备必须对其进行计量标定。标定是统一量值确保计量器具准确的重要措施；也是实行国家监督的一种手段。通过计量标定，对仪器的性能进行评定，确定其是否合格，从而保证检测仪表的量值在规定的误差范围内与国家计量基准的量值保持一致，达到统一量值的目的。仪器的标定可以分为强制标定和非强制标定两类。强制标定的仪器仪表实行定点、定期标定，非强制标定的仪器仪表可由使用单位依法自主自行标定。计量标定具有以下特点。

1. 标定的目的是确保量值的准确可信，主要是评定量测仪器的计量性能，确定仪器的误差大小、准确程度、使用寿命、安全性能，确定仪器是否合格，是否可以继续正常使用，是否达到国家计量标准。

2. 标定具有法制性，标定证书在社会上具有法律效力，标定的本身是国家对量测的一种监督，标定结果具有法律地位和效力。

在试验与检测中，以下常用仪器仪表应定期进行标定。

机械类仪器的标定：如百分表、千分表、测力计、回弹仪等。

电子类仪器的标定：如超声波仪、应变仪、应变计、振弦数据采集仪、荷载传感器等。

光学类仪器的标定：如精密水准仪、激光测距仪、激光挠度仪、读数显微镜等。

第二节 应变测试仪器与技术

土木构筑物及结构在外力的作用下，内部会产生应力，而直接测定应力比较困难，目前还没有直接的测试方法，一般的方法是测定应变。目前应用最广泛的应变测试技术是电阻应变测试技术和振弦式应变测试技术，近年来光纤光栅应变测试技术也逐渐得以推广应用。

一、电阻应变测试技术

电阻应变测试技术是凭借安装在试件上的电阻应变片将力学量（如应变、位移等）转换成电阻变化，并用专门的仪器使其转换为电压、电流或功率输出，从而获得应变读数的测试技术。通常简称为电测技术或电测法。其转换过程如图 2-1 所示。

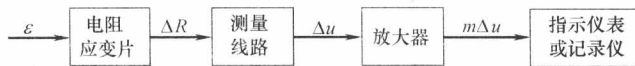


图 2-1 用电阻应变片测量应变的过程

(一) 电阻应变片

1. 电阻应变片的工作原理

电阻应变片简称应变片或应变计，是电阻应变测试中，将应变转换为电阻变化的传感元件，它的工作原理是基于金属丝的电阻随其机械变形而变化的一种物理特性，如图 2-2 所示。取长度为 L ，直径为 D ，截面积为 A ，电阻率为 ρ 的金属丝，则其电阻 R 为：

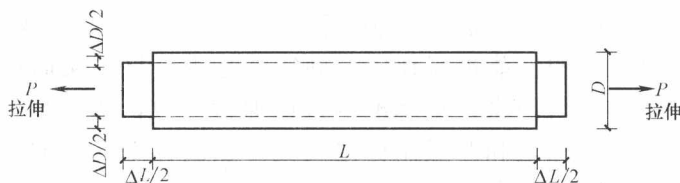


图 2-2 金属丝的应变原理

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2-1)$$

当金属丝受拉而伸长 ΔL ，则电阻的变化率为：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (2-2)$$

而

$$\frac{dA}{A} = \frac{\frac{\pi}{4}D^2 - \frac{\pi}{4}(D - \Delta D)^2}{\frac{\pi}{4}D^2}$$

略去 ΔD^2 项，则

$$\frac{dA}{A} = 2\frac{\Delta D}{D} = 2\epsilon' = -2\mu\epsilon \quad (2-3)$$

式中 ϵ' ——电阻丝的横向应变。

由材料力学可知，在一定范围内 $\epsilon' = -\mu\epsilon$ ，将式 (2-3) 代入式 (2-2)，得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \epsilon + 2\mu\epsilon = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)\epsilon$$

令

$$K_0 = \frac{d\rho}{\rho} + (1 + 2\mu)$$

则

$$\frac{dR}{R} = K_0\epsilon \quad (2-4)$$

式中 μ ——电阻丝材料的泊松比；

K_0 ——单电阻丝的灵敏系数。

K_0 与两个因数有关，一个是电阻丝材料的泊松比，由电阻丝几何尺寸改变引起，当选定材料后，泊松比为常数；另一个是由电阻丝发生单位应变引起的电阻率的变化，对大多数电阻丝而言也是一个常量。因此可以认为 K_0 是一个常数，通常式 (2-4) 可写为：

$$\frac{dR}{R} = K\epsilon \quad (2-5)$$

由此可见，应变片的电阻变化率与应变值呈线性关系。 K 通常由一批产品中抽样检验确定，作为该批产品的灵敏系数，一般取 $K=2.0$ 左右。

2. 电阻应变片的构造

电阻应变片的种类繁多，形式各种各样，但基本结构差异不大。图 2-3 所示是丝绕式电阻应变片的构造，由敏感栅、粘合剂、基底、覆盖层和引出线几个主要部分组成。

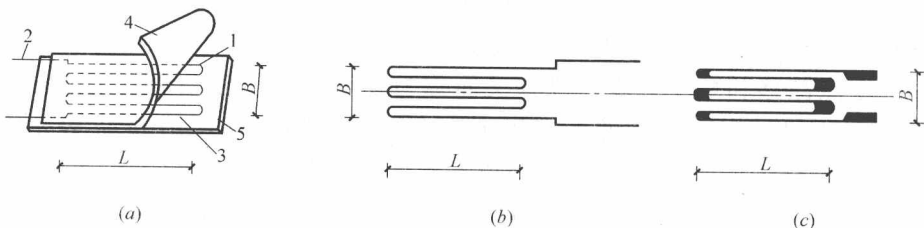


图 2-3 电阻应变片的构造

1—敏感栅；2—引出线；3—粘合剂；4—覆盖层；5—基底

(1) 敏感栅：是将应变变换成电阻变化量的敏感元件，一般由金属或半导体材料如康铜、镍铬合金制成的单丝或栅状体。敏感栅的形状和尺寸直接应变速片的性能。栅长 L 和栅宽 B 即代表应变片的规格。

(2) 基底和覆盖层：主要起到定位和保护电阻丝的作用，同时使电阻丝与被测试件之间绝缘。纸基常用厚度 $0.015\sim 0.02\text{mm}$ 高强度、绝缘性能良好的纸张制作。胶基用性能稳定、绝缘度高、耐腐蚀的聚合胶制作。

(3) 粘合剂：它是一种具有一定绝缘性能的粘结材料，用于固定敏感栅在基底上或将应变片粘贴在试件上。

(4) 引出线：一般采用镀银、镀锡或镀合金的软铜线制成，在制作应变片时与电阻丝焊接在一起。引出线通过测量导线接入应变仪。

3. 电阻应变片的技术指标

(1) 几何尺寸：栅长 L (mm) 是应变片电阻丝在其轴线方向的长度，栅宽 B 是应变片垂直于轴线方向的电阻丝栅外侧间的距离。

(2) 电阻值 R ：是指在室温条件下不受外力作用时测得应变片的电阻值，单位为欧姆 (Ω)。应变片阻值应与测量电路相适应，一般取 120Ω 。

(3) 灵敏系数 K ：是指应变片安装于被测试件表面，在其轴线方向的单向应力作用下，应变片的电阻相对变化与试件表面上安装应变片区的轴向应变之间的比值，即

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} \quad (2-6)$$

式中 K ——应变片灵敏系数；

$\Delta L/L$ ——试件上应变片安装区的轴向应变；

$\Delta R/R$ ——由 $\Delta L/L$ 所引起的应变片的电阻相对变化。

应变片包装上标出的灵敏系数是该批产品由抽样标定测得的平均值。

(4) 应变极限 ϵ_j ：一般是指温度一定时，在特定材料上指示应变和真实应变的相对误差不超过 10% 的应变数值。

(5) 最大允许电流 I_{\max} ：允许通过应变片而不影响其工作特性的最大电流。一般静态测量时为 25mA ，动态时为 $75\sim 100\text{mA}$ 。

(6) 温度效应：是指温度变化而引起的应变片阻值改变的现象。测试过程中，环境温度的变化，敏感栅通电发热，都能使应变片温度发生变化。

(7) 零点漂移和蠕变：零点漂移又简称为零漂，是指已粘贴好的应变片，在温度不变而又无机械应变的条件下，指示应变随时间而变化，用 $\mu\epsilon/h$ 表示。引起的原因可能是胶粘剂固化程度不良或环境气候变化引起绝缘电阻变化，或者是安装应变片的松弛等。蠕变是指已安装好的应变片，在温度一定并承受一定的机械应变时，指示应变随时间而变化。

(8) 疲劳寿命：是指已安装好的应变片，在一定的机械应变，一定的温度下，可以连续工作而不会产生疲劳损坏的循环次数。

4. 电阻应变片的分类

应变片的种类繁多，常见的分类方法有如下几种。