

地下工程试验与测试技术

徐祯祥 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1984年·北京

地下工程试验与测试技术

徐祯祥 编著

中 国 铁 道 出 版 社

1984年·北京

内 容 简 介

全书共分七章。主要包括：地下工程现场试验和模型试验的意义和方法，试验数据的分析和处理，国内外常用的各种测试元件和仪器，地下工程设计、施工与测试技术之间的信息关系，以及地下工程测试中的几个基本理论性问题的探讨。

本书可供从事地下工程的施工、设计和科研的人员参考，亦可供高等院校地下工程专业和岩土工程专业的师生学习参考。

地下工程试验与测试技术

徐祯祥 编著

中国铁道出版社出版

责任编辑 刘曼华 封面设计 赵敬宇

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092 $\frac{1}{32}$ 印张：7.25 字数：162 千

1984年10月 第1版 1984年10月 第1次印刷

印数：0001—5,000册 定价：1.40元

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 研究的意义和目的	1
第二节 研究的对象和概念	3
第二章 测试元件	15
第一节 测试元件的原理及分类	15
第二节 测试元件的率定	82
第三章 工程测试中的常用仪器	92
第一节 常用测试仪器	92
第二节 常用辅助仪器和仪表	112
第四章 工程试验与试验结果分析	117
第一节 工程试验的内容	117
第二节 测试元件的安设方法	137
第三节 工程试验中的岩石力学参数测试	146
第四节 试验结果分析	151
第五章 地下工程施工与测试技术	161
第一节 测试数据用于施工的实例	161
第二节 地下工程测试技术的具体规定	167
第六章 地下工程设计与测试技术	178
第一节 地下工程设计的发展	178
第二节 测试数据作为设计的信息	184
第三节 建议的设计方法——信息控制法	192
第七章 工程测试技术中的若干基本理论问题	196

第一节	关于测试元件与介质变形一致问题	196
第二节	关于温度影响问题	210
第三节	关于徐变影响问题	214
结束语		220
参考文献		221

第一章 绪 论

工程试验与测试技术作为一项研究课题和应用技术已经在土建工程中占有重要的地位。它在各类工程建筑,尤其是在地下工程建筑中已成为一个不可缺少的组成部分。因此,工程建筑及地下工程建筑的设计,施工和科研工作者们对于各种工程试验与测试技术的研究和应用越来越感到需要。本章将对研究工程试验与测试技术的意义,范围和一些基本概念作简要的阐述。

第一节 研究的意义和目的

一切工程建筑物都必然要经过设计,施工和运营等几个阶段。为了验证设计是否正确,施工是否合理,运营是否安全,人们往往要在事先用一定比例的实物模型做一些室内试验,或者在现场做一些实体试验和观测试验。这一类试验统称工程试验。

对于一个大型的工程建筑物,特别是与地基和周围岩体密切相关的建筑物,就更需要工程试验。

在修建大坝的工程中,当初步选定坝基和坝体类型以后,为了了解它的受力性能,往往要作一些缩小比例的坝体模型试验以及现场岩体试验。有了这些试验数据,用有限单元法进行分析计算,可以为最终设计提供依据。在大坝运营过程中,为了监视它的安全可靠程度,一般都要作长期的现场观测试验。

当修建一个路基挡土墙时,为了验证在设计中采用的土压理论,常常用压力量测工具作实体结构的观测试验。通过

试验为支挡建筑物的正确设计提供可靠依据。在近年来采用的锚杆挡墙新技术中,为了了解锚杆的锚固拉力以及挡板承力大小,也往往通过工程试验得到为设计和施工所必须的数据。在长期的使用中,挡土墙能否满足设计的要求,上述的试验观测设备就成为安全监视的工具。

对于地下工程的修建,由于它的设计理论发展的不断完善,工程试验的重要性就显得更加突出。早在50年代,我国的一些地下工程研究者就企图通过工程试验解决作用在地下工程结构上的地层压力问题,并进一步解决设计理论问题。这项研究目前仍在进行之中。最近几年,随着喷锚技术和新奥法(NATM)在我国地下工程中的逐步推广,工程试验的方法已被人们所重视。目前,国内外提出所谓“信息设计”和“信息施工”的方法,其中“信息”的获得就必须依赖于工程试验。

归纳起来看,工程试验的重要意义和目的在于:

1. 作为工程设计的依据和信息;
2. 作为工程施工的指导和控制;
3. 作为工程运营的安全监视;
4. 作为理论研究的手段。

要成功地进行一次工程试验,除了有一个完整的,切合实际工程情况的试验计划外,还必须掌握一系列测试技术。

工程试验中,需要了解的物理-力学参数为:岩土的重、静动弹模、内聚力、摩擦角、泊桑系数;岩体和结构的应力、应变、位移、压力、速度、加速度等等。这些参数不论在室内或现场都必须通过一些仪器、仪表、探头(传感器)来测定,从测定中得到参数本身和它们的变化值。进行这类测定的技术,包括测定方法和测定工具,统称为测试技术。

测试技术是工程试验成败的关键。随着各项新技术的发展,包括冶金、水电、建筑、铁道、煤炭、地质、军工和院校系统在内为数众多的单位都在开展测试技术的研究。而且有更多的单位计划将测试技术应用于工程实践中去。这种情况表明一种趋势,今后,凡是搞工程建设的人都有必要掌握工程试验中的测试技术这一门课程,以适应工程建设中的现代化技术不断涌现的状况。

尽管工程试验的方法很多,测试技术的种类五花八门,但是它们最直接的目的都是要用数据告诉人们:所设计和建造的工程建筑物是否安全可靠。此外,人们还不只满足于一个工程的结论,还需利用工程试验和测试技术对若干个工程进行研究,从中得出规律性的东西,使某些理论得到发展。例如关于土压理论、结构振动理论、隧道力学理论,等等。有了这些理论,反过来再用工程试验的方法在以后的工程实践中应用和改进。这就是工程试验和测试技术的最终目的。

第二节 研究的对象和概念

一、研究的对象

从结构所受的荷载性质来划分,工程试验可分为工程动态试验和工程静态试验。前者主要是研究工程结构物在动荷载(例如爆破力、列车振动力、地震力,等等)作用下的力学状态和安全状态。后者主要是研究工程结构物在静荷载或缓慢变化荷载(例如岩土压力、地基反力、静水压力、自重,等等)作用下的力学状态和安全状态。

从试验的角度看,除了加荷的性质不同以外,上述两种试验的主要区别仅在于部分测试项目和仪器不同。本书的研究对象是工程静态试验和静力测试技术。关于动力测试技术,

因为已有专门的著作介绍，本书则不作讨论。

二、地面工程与地下工程

从工程建筑物所处的位置来看，可分为两类。第一类是建筑在地面以上的称为地面工程，例如大坝、挡土墙、桥梁、路基、房屋等等；第二类是建筑在地面以下的称为地下工程，例如矿井、隧道、洞室等等。

地下工程与地面工程的区别如下，

（一）作用体系的区别

地面工程一般只与地基相互作用。因此，除了地基探测和基础设计外，结构可以看成是一个空间自由状态的作用体系；而地下工程则与周围地层有密切的关系，属于二者共同作用的体系。

（二）外荷的区别

地面工程所受的外荷一般说来是已知的，明确的；而地下工程，从力学上看处于与围岩相互作用的体系之中，从地质上看处于千变万化的地质体之中。因此外荷的大小和分布与地层性质、施工方法和支护类型有着很紧密的关系。迄今为止，地下工程的外荷问题仍是一个有待解决的研究课题。

虽然地面工程与地下工程在上述两个方面存在着根本的差别，但是二者在工程试验的测试中却有着以下相同的内容：

（一）外荷的测试

外荷的测试又可称为压力测试。它是地面工程和地下工程中一项非常关键的测试内容。特别是与岩土地基有密切关系的工程，更需要实际外荷的测试数据作为设计的依据。

（二）内力的测试

内力包括正应力、剪应力、弯矩和扭矩等形式。某一点

的内力一般可以用该点的法向和切向应力来表示。所以内力的测试常用应力这一种形式表示。在结构受力的弹性阶段，往往通过测试应变来换算成应力。对于非弹性材料，则最好直接测试应力。但是，应力的直接测试是很困难的。内力的测试数值与材料的强度直接相关，因此本项测试是结构安全度的保证。

（三）位移的测试

从力学观点看，任何发生应变的地方，必然伴随着位移。但是应变位移是相对位移的概念。我们这里讨论的位移指的是某一点的绝对位移的概念。位移测试包括结构上某些关键部位的空间位移测试，地面沉陷测试，岩体和土体内部位移测试等等。本项测试是结构的稳定程度的重要指标，所以目前已被广泛应用。

上述三项测试都可包括动态和静态两个部分。也就是说包括静动荷载、静动应变和静动位移。其测试工具基本相同，所不同的是动态仪器必须具备有一定频率响应特性的传感和记录装置。另外，动态测试内容还包括振动速度和振动加速度两项。

在本书中将主要研究和讨论地下工程的试验和与之相应的测试技术问题。由于上面已谈到的理由，地下工程试验的方法和测试技术对于地面工程试验和测试将会有直接的参考价值。

三、一些有关的名词和概念

为了以下几章叙述的方便以及为了实际应用的需要，现将与工程试验和测试技术有关的名词和概念作一些解释。因为这里提到的名词和概念是从工程和力学的实用出发进行的解释，所以有些名词的含义与电学上的定义有所不同。

（一）非电量的电测法

如前所述，在工程试验中所遇到的力学量，如压力、应变、位移等，都属于非电量的物理量。对这些非电量进行测试，有两种方法：一种是直接测试法，另一种就是非电量的电测法。直接测试法比较容易理解，就是用机械式仪表直接去测量一个物理量，比如说拿一块百分表直接去测位移。非电量电测法的原理是：先将非电量通过传感器转换成某一种电量（例如电压、电流、感生电动势、电感等等），这种电量经接收仪的放大（或不放大）而得到读数，这种读数经事先与所测非电量的共同率定而还原为非电量数值。

非电量的电测法（简称电测法）是测试技术中一种范围和用途最广的方法，它的详细原理和方法将在第二章中介绍。

（二）一次仪表和二次仪表

在电测法中，放置在被测物体上，或埋设在被测物体内部，将非电量转换成电量的仪表称为一次仪表；接收从一次仪表传输过来的电量讯号，经过（或不经过）放大，然后显示读数的仪表称为二次仪表，二次仪表又称为接收仪或测试仪器。

（三）传感器

传感器就是一次仪表。传感器的名称在一些文章中经常出现，在测试技术人员中用的也较广。另外，有的人还称之为“探头”俗称“头子”。

（四）测试元件

在测试技术中，除了非电量电测法以外，还有其他的一些测试方法，比如机械式、液压式、光弹式等等。所有这些方法（包括电测法在内）中，凡是放置于被测物体上或埋设于被测物体内部感受力学量的工具，统称为测试元件。所以测

试元件包括传感器和一切其他类型的测试工具。

（五）遥测

遥测的概念是随着电测法的产生而来的。当测试的目标距测站很远，以及对于人不容易接近或运营时无法接近的目标，就势必用遥测方法。根据目前的技术发展，除了有线遥测外，还有一种无线遥测。有线遥测是用导线传输电讯号。传输导线的允许长度与电测法的传感器类型有关，其允许长度可以从数十米到数千米。无线遥测是将非电量转换为高频无线电讯号，讯号从发射机发出，测站的接收机天线接到该讯号，经过接收机的放大并由事先的率定将其还原成非电量的数值。

（六）率定（又称为“标定”）

率定是任何测试元件和测试仪器都要进行的工作。它的含义是：任何测试元件都是由某一种原理（电学的或机械的）制成的，用它来感受和测读某一个力学量。但是，它被仪器所直接读出来的数值不是我们所测力学量的度量单位（例如毫米、公斤等）数值，为了得到所测力学量的实际数值，必须把仪器读出的数值与要求测到的力学量建立对应关系。有了这个对应关系，就可以从测读的数值推求出被测的力学量。以上这个工作就称作测试元件的率定。测试仪器也有率定的问题，它的率定是建立某一种已知的力学量与仪器刻度或者显示数字之间的关系。少数测试仪器直接显示力学量的度量单位，但是它只能与某种特定的元件配合使用，因此限制了它的使用范围。仪器的率定工作是由制造厂家已经完成的，使用者一般不必重新率定。而测试元件的率定工作一般应由使用者进行。当元件出厂时已有率定数据时，使用者在使用以前也应作检验。率定的具体方法也将在第二章中详述。

(七) 误差

当我们用某种元件对力学量进行测试时，按照测定误差的定义：

误差 = 力学量的测定值 - 力学量的真值。

实际上真值无法得到，但是当进行多次重复测试时，可得到测定值 x_i 的算术平均值 $\bar{x}$ ，将它近似地看作是真值。此时的误差称为偶然误差。我们在测试中讨论的也就是偶然误差的数值：

偶然误差 = 测定值 - 算术平均值

即

$$m = x_i - \bar{x}$$

偶然误差的估计，通常用标准离差 S 表示：

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (1-1)$$

有时用相对值表示偶然误差的估计，称作变异系数 C_v ：

$$C_v = \frac{S}{\bar{x}} \cdot 100\% \quad (1-2)$$

造成测试误差的原因包括外界环境影响、仪器和元件的影响、人为因素的影响等三个方面。为了减小误差，针对三方面的原因，有以下一些措施：首先要克服测读仪器时所造成的误差，某一组数据要由指定的一名熟练人员测读；其次要尽量在一致的外界条件下测读，在无法做到时，要进行不同外界条件的校正测试，以对读数进行修正；提高仪器和元件的精度也是一个重要措施。

(八) 精度

精度的概念在数理统计学中是与误差联系在一起的。如果一组测试数据的分析结果，它们的标准离差较小，那么就认为测试的精度较高，标准离差越小，测试精度越高。一台

仪器的精度高低在出厂时常用相对值表示，这个相对值也就是上面提到的变异系数。在实际应用中，精度的含义是：某种仪器测定一个力学量的读数精确程度。例如，我们用千分表和百分表同时测一个结构的位移值如下：

用百分表测得数为 0.53 mm

用千分表测得数为 0.534 mm

这是由于千分表的最小读数可到 0.001 mm ，百分表为 0.01 mm ，也就是说它们的精度分别为 0.001 mm 和 0.01 mm ，或者说千分表的精度是百分表的10倍。另一个例子，是应变仪甲的读数盘最小刻度为 $1\mu\varepsilon$ ，应变仪乙为 $5\mu\varepsilon$ ，那么它们的精度分别为 $1\mu\varepsilon$ 和 $5\mu\varepsilon$ ，或者说甲的精度是乙的5倍。

另一种实用的精度表示法是用仪器的满量程的百分之几来表示的。例如某种频率仪的满量程是 2000 Hz ，如果标明精度是满量程的 0.05% ，也就是说该仪器精度是 1 Hz 。

（九）灵敏度

灵敏度在测试技术中表示输出的信息与输入的信息之间的相对关系。如果讲得通俗一点，可以这样说：对于测试元件来说，所谓灵敏度高，指的是用相等的被测外界量作用，该元件输出的电量比别的灵敏度低的元件高；对于接收仪器来说，所谓灵敏度高指的是同样一个微弱的输入电量在表头上的读数值比别的灵敏度低的仪器上读数值大。有的仪器对于微弱讯号可能毫无反映，我们就说这种仪器灵敏度很低。

现举一个例子说明灵敏度的意义。有两种电阻片式的测力计如图1—1所示。其中甲种测力计的截面积为 F ，乙种为 $F/2$ ，二者的材料相同，即弹模 E 相同，测力计内设置电阻丝应变片。这两种测力计在受相等的 P 力作用时，电阻应变片的电阻值变化不等，甲测力计中的电阻变化量是乙测力计的一半。二者在同一台应变仪上的读数值也是1与2之

比, 假定读数 $\varepsilon_{\text{甲}} = 10\mu\varepsilon$, $\varepsilon_{\text{乙}} = 20\mu\varepsilon$ 。现在用弹性材料的单轴虎克定律来证明上述结果。

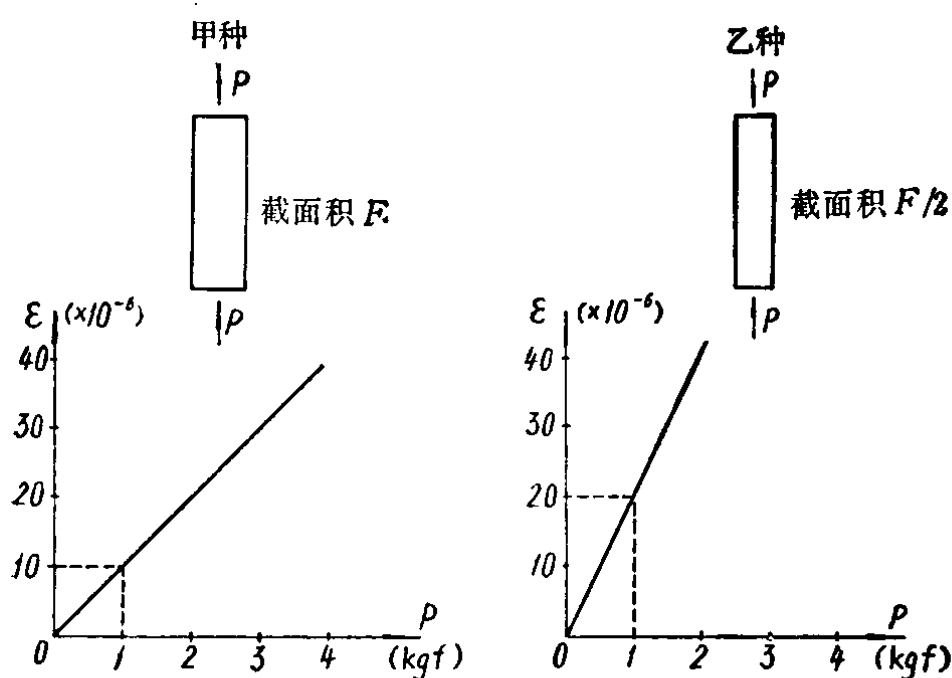


图 1—1 灵敏度举例

两种测力计截面上的应力为:

$$\sigma_{\text{甲}} = \frac{P}{F}$$

$$\sigma_{\text{乙}} = \frac{P}{F/2} = \frac{2P}{F},$$

相应的应变为:

$$\varepsilon_{\text{甲}} = \frac{\sigma_{\text{甲}}}{E} = \frac{P}{EF}$$

$$\varepsilon_{\text{乙}} = \frac{\sigma_{\text{乙}}}{E} = \frac{2P}{EF};$$

比较两式可以看出,

$$\varepsilon_{\text{乙}} = 2\varepsilon_{\text{甲}},$$

从而得到证明。也就是说, 乙种测力计的灵敏度比甲种测力计高一倍。

由于灵敏度的概念是相对的比较值，而被测试的力学量和输入仪器的电量种类又多，所以灵敏度没有一个统一的单位和名称。对于测试元件来说，它的第一种表示方法可用它所能感受到的最小力学量来表示。比如某种压力盒，它能感受到的最小压力为 0.1kgf/cm^2 ($\approx 10\text{kPa}$)，这就是它的灵敏度，或者称为分辨能力。这种表示法往往容易和精度的概念相混淆，所以常用第二种方法：用元件和接收仪器的共同率定值来表示。例如上面这一种 0.1kgf/cm^2 ($\approx 10\text{kPa}$)的压力盒，在率定过程中得到每 1kgf/cm^2 ($\approx 100\text{kPa}$)的压力值与仪器读数的关系。假定 1kgf/cm^2 对应于 $100\mu\varepsilon$ （电阻式压力盒）或者 150Hz （振弦式压力盒），那么它们的灵敏度分别是 $100\mu\varepsilon/(\text{kgf/cm}^2)$ 和 $150\text{Hz}/(\text{kgf/cm}^2)$ 。

至于接收仪器（二次仪表）的灵敏度常常在出厂的技术性能中注明。由于这些灵敏度是用电学的名称表示，与工程试验无直接关系，本书不作介绍。

（十）稳定性

稳定性是测试技术中的一个很重要的概念。它之所以重要，因为我们做任何一个工程试验，总是希望测试元件和仪器是稳定可靠的，这样才能得到可信的数据。

稳定性的含义是：测试元件和仪器在相当长时间（该时间的长短取决于试验性质）的测试中，环境条件和其他（除力学量以外）的因素对它的影响之大小。也就是它们在长时间工作中读数是否正常。

一般情况，稳定性包括两方面的内容：一是零点飘移，二是使用的耐久性。

零点飘移指的是在温湿度较稳定的室内，在非埋置使用条件下，元件和仪器读数的稳定程度。一台合格的仪器，至少要经过八小时的连续通电观测，其零飘应在允许范围之

内；一个合格的元件，至少要经过一个月的断续观测，其零飘应在允许的范围之内。

耐久性指的是元件在现场试验的使用条件下能正常工作的时间。在现代工程建筑的试验中，元件的耐久性要求为大于一年。我国已有长达13~14年仍正常工作的测试元件的例子。耐久性好的元件对于长期观测试验是很重要的手段。

(十一) 重复性

对一个反复加载和卸载的结构进行测试，元件的重复性应该是很好的。重复性的含义是：当元件受多次反复荷载时，它在每一级荷载上的几次读数值相接近的程度。如果相等或很相近，就认为该元件重复性好。图1—2表示一只振弦式应力计一次反复荷载的测试曲线。加载曲线与卸载曲线在每一级荷载上的频率偏差值分别为 $f_1, f_2, f_3 \dots f_8$ 。该元件重复性的评定可以用误差理论中的标准离差公式(1—1)表示：

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (f_i - \bar{f})^2} = \sqrt{\frac{1}{7} \sum_{i=1}^8 (f_i - \bar{f})^2}$$

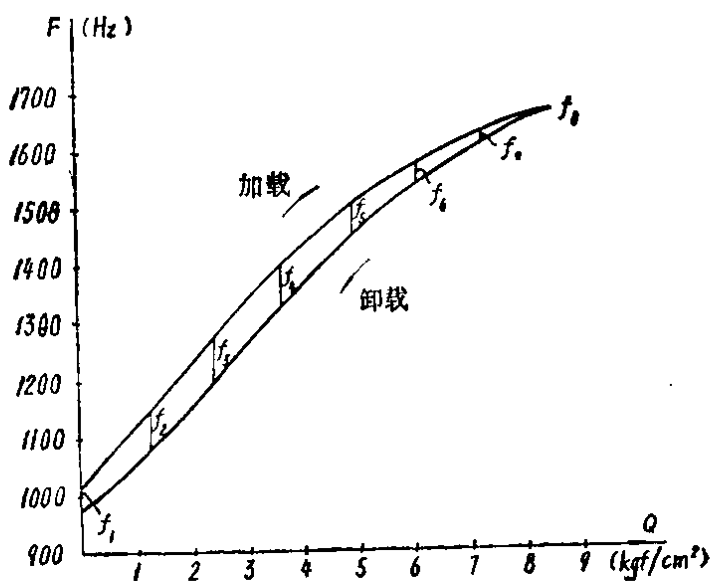


图1—2 重复性偏差