



高等院校卓越计划系列丛书

土木工程试验与检测

王柏生 主编

中国建筑工业出版社



高等院校卓越计划系列丛书

土木工程试验与检测

王柏生 主编

中国建筑工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

土木工程试验与检测/王柏生主编. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 7

(高等院校卓越计划系列丛书)

ISBN 978-7-112-18195-7

I. ①土… II. ①王… III. ①土木工程-工程试验-高等学校-教材②土木工程-检测-高等学校-教材 IV. ①TU

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 131222 号

本教材是高等院校卓越计划系列丛书中浙江大学建筑工程学院卓越计划系列教材之一。是在浙江大学本科生课程“结构试验”与研究生学位课程“土木工程试验与检测”的教学内容基础上, 参考同类书目, 结合作者教学、科研、工程技术服务的经验编写而成。主要介绍土木工程研究性试验、工程质量检测与监测、既有建筑鉴定的仪器设备、方法、原理, 包括: 土木工程结构试验的仪器与设备、荷静试验、模型试验、结构检测技术、动态测试与分析、岩土工程试验、桩基动测技术、既有建筑鉴定、抗震试验、风洞试验、施工监测。

本书可作为本科生、研究生的教材或教学参考书, 也可供相关科研人员和工程技术人员使用。

责任编辑: 赵梦梅 李东禧

责任设计: 董建平

责任校对: 李美娜 刘梦然

高等院校卓越计划系列丛书

土木工程试验与检测

王柏生 主编

*

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

北京红光制版公司制版

北京云浩印刷有限责任公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 26 $\frac{3}{4}$ 字数: 646 千字

2015 年 10 月第一版 2015 年 10 月第一次印刷

定价: 58.00 元

ISBN 978-7-112-18195-7

(27439)

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)

高等院校卓越计划系列丛书
浙江大学建筑工程学院卓越计划系列教材

《土木工程试验与检测》

主 编 王柏生

编 写 王奎华 王步宇 刘承斌 余世策

林伟岸 蔡金标

浙江大学建筑工程学院卓越计划系列教材

丛书序言

随着时代进步,国家大力提倡绿色节能建筑,推进城镇化建设和建筑产业现代化,我国基础设施建设得到快速发展。在新型建筑材料、信息技术、制造技术、大型施工装备等新材料、新技术、新工艺广泛应用新的形势下,建筑工程无论在建筑结构体系、设计理论和方法以及施工与管理等各个方面都需要不断创新和知识更新。简而言之,建筑业正迎来新的机遇和挑战。

为了紧跟建筑行业的发展步伐,为了呈现更多的新知识、新技术,为了启发更多学生的创新能力,同时,也能更好地推动教材建设,适应建筑工程技术的发展和落实卓越工程师计划的实施,浙江大学建筑工程学院与中国建筑工程出版社诚意合作,精心组织、共同编纂了“高等院校卓越计划系列丛书”之“浙江大学建筑工程学院卓越计划系列教材”。

本丛书编写的指导思想是:理论联系实际,编写上强调系统性、实用性,符合现行行业规范。同时,推动基于问题、基于项目、基于案例多种研究性学习方法,加强理论知识与工程实践紧密结合,重视实训实习,实现工程实践能力、工程设计能力与工程创新能力的提升。

丛书凝聚着浙江大学建筑工程学院教师们长期的教学积累、科研实践和教学改革与探索,具有了鲜明的特色:

(1) 重视理论与工程的结合,充实大量实际工程案例,注重基本概念的阐述和基本原理的工程实际应用,充分体现了专业性、指导性和实用性;

(2) 重视教学与科研的结合,融进各位教师长期研究积累和科研成果,使学生及时了解最新的工程技术知识,紧跟时代,反映了科技进步和创新;

(3) 重视编写的逻辑性、系统性,图文相映,相得益彰,强调动手作图和做题能力,培养学生的空间想象能力、思考能力、解决问题能力,形成以工科思维为主体并融合部分人性化思想的特色和风格。

本丛书目前计划列入的有:《土力学》、《基础工程》、《结构力学》、《混凝土结构设计原理》、《混凝土结构设计》、《钢结构原理》、《钢结构设计》、《工程流体力学》、《结构力学》、《土木工程设计导论》、《土木工程试验与检测》、《土木工程制图》、《画法几何》等。丛书分册列入是开放的,今后将根据情况,做出调整和补充。

本丛书面向土木、水利、建筑、园林、道路、市政等专业学生,同时也可以作为土木工程注册工程师考试及土建类其他相关专业教学的参考资料。

浙江大学建筑工程学院卓越计划系列教材编委会

2014.10

前 言

土木工程试验与检测技术是土木工程学科研究新材料、新体系、新工艺、新理论、新方法的重要途径,也是保障工程质量、处理工程事故、维护既有建筑物安全运行的重要手段,在土木工程学科的科学研究、技术创新与开发中起着举足轻重的作用,与工程设计、施工技术以及土木工程学科的研究和发展有着密切的关系。近年来,随着我国基本建设的蓬勃发展,土木工程试验与检测技术已越来越受到相关科研人员、工程技术人员的广泛关注和重视。

培养卓越的土木工程师是土木工程专业的主要任务,而土木工程是一门实践性很强的工程学科,试验与检测技术作为实践环节的主要内容之一,无论是本科生的培养还是研究生的培养都是非常重要的。本书以浙江大学本科生课程“结构试验”以及研究生学位课程“土木工程试验与检测”的教学内容为基础,参考同类已出版书目的同时,还结合作者的教学、科研、工程技术服务的丰富经验。相比同类其他书,本书紧跟土木工程试验测试技术的最新发展,结合土木工程建设的工程实际,收纳了土木工程试验与检测的现行标准、规范的相关内容,具有很强的时效性和实用性。尤其在应变测量温度补偿技术、温度应变测量、桩基动测技术等方面有独到的见解,另外在动态测试技术方面有更详细的介绍。

本书除可作为土木工程专业本科生的“结构试验”、土木工程专业研究生的“工程试验与检测”等课程的教材外,也可作为土木工程检测技术人员、监理、设计、工程管理技术人员以及土木工程科学等有关科研人员、工程技术人员的参考用书。

本书由王柏生、王奎华、王步宇、刘承斌、余世策、林伟岸、蔡金标合作编写,其中王柏生编写了第1、3、4、9章,2、5章的主要部分以及第6章的一部分,王奎华编写了第8章和12.1节,王步宇编写6章的部分以及5章的小部分,刘承斌编写了第10章以及第2章的小部分,余世策编写了第9章,林伟岸编写了第7章,蔡金标编写了12.2节,全书由王柏生负责统稿。

本书在书稿整理的过程中,得到了硕士研究生叶灵鹏、汪建伟的许多帮助,在此表示衷心感谢!

由于作者的水平有限,编写中难免存在错误或不妥之处,谨请专家、同行和读者批评指正。

王柏生
2015年4月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 土木工程试验与检测的重要性	1
1.2 土木工程试验与检测的目的与任务	2
1.3 土木工程试验与检测的分类	4
第 2 章 土木工程试验仪器与设备	8
2.1 试验加载方法与设备	8
2.2 试验量测技术与量测仪表	26
2.3 数据采集系统	58
2.4 虚拟仪器	60
第 3 章 荷载试验	62
3.1 概述	62
3.2 结构静载试验的程序与试验准备工作	63
3.3 结构试验荷载与加载方案	66
3.4 结构试验观测	69
3.5 结构试验数据处理	71
3.6 桥梁荷载试验	80
3.7 桩基荷载试验	83
第 4 章 结构模型试验	86
4.1 模型试验理论基础——模型相似理论	87
4.2 结构模型的分类	94
4.3 模型设计	94
4.4 模型试验材料及制作要求	100
4.5 模型试验实例	103
第 5 章 结构检测技术	108
5.1 钢筋混凝土结构检测	108
5.2 钢结构现场检测	132
5.3 砌体结构现场检测技术	139
5.4 木结构检测	145
第 6 章 动态测试与分析	149
6.1 振动过程及其描述	149
6.2 振动系统对激励的响应	175
6.3 频率分析及数字信号处理技术	199
6.4 结构模态试验分析技术	217

第 7 章 岩土工程试验	242
7.1 土工试验原理	242
7.2 先进土工试验	261
7.3 地基与边坡工程模型试验	269
第 8 章 桩基动测技术	275
8.1 一维波动理论	275
8.2 桩基低应变动测原理与技术	279
8.3 桩基高应变动测原理与技术	283
第 9 章 既有建筑鉴定	297
9.1 既有建筑的可靠性鉴定	297
9.2 危险房屋鉴定	312
9.3 火灾后结构鉴定	313
第 10 章 抗震试验	317
10.1 结构伪静力试验.....	317
10.2 结构拟动力试验.....	323
10.3 振动台试验.....	329
第 11 章 风洞试验	337
11.1 风洞试验概述.....	337
11.2 风洞试验设备.....	337
11.3 结构风洞试验.....	343
第 12 章 施工监测	357
12.1 基坑围护施工监测技术.....	357
12.2 桥梁工程施工监控技术.....	386
参考文献	416

第 1 章 概 述

1.1 土木工程试验与检测的重要性

从工程技术的发展历史可以知道,工程技术的进步和发展是与工程技术实验密不可分的,新的理论、新的技术都需要通过实验进行验证和检验。工程技术方面的科学研究促进了相关实验技术的发展,与此同时,工程实验技术的不断更新,也会带动工程学科的新发展。土木工程学科的发展也是一样,其中土木工程试验的作用是功不可没的。1767年由法国科学家容格密里完成的梁的试验可算是最早的结构试验,该试验在简支木梁上缘开一槽,槽的方向与梁轴垂直,并用同样大小的硬木块塞入槽内。试验证明了这种木梁的作抗弯承载力丝毫不低于未开槽的木梁,因此,验证了梁受弯时并非整个断面都受拉,而是上缘受压、下缘受拉。容格密里的这个实验受到当时科学家们的高度评价,给人们指出了进一步发展结构强度计算理论的正确方向和方法,因此被誉为“路标试验”。

1949年新中国成立以后,应社会主义基本建设的需要,我国对土木工程相关的试验十分重视。1956年各有关大学开始设置土木工程相关的试验课程(如结构试验),各有关研究机构和大学也开始建立土木工程相关的实验室。虽然当时试验条件和技术水平无法与现在相比,但通过系统的试验研究,为制定我国自己的设计标准、施工验收标准、试验方法标准和可靠性鉴定标准等做出了应有的贡献,为我国一些重大土木工程的建设做出了贡献。改革开放以后,随着计算机技术的普及、发展,大量的研究者都热衷于研究数值计算分析技术与软件开发,当然现在已被广泛应用的一些设计、计算分析的实用软件也被成功的开发,但试验研究却一度被许多研究人员轻视。随着我国城市化进程的发展、基本建设规模的不断扩大,许多工程建设项目尤其是重大工程项目对试验检测技术也不断提出新的要求。而国家对防灾减灾的重视,更使结构抗震、抗风方面的试验研究显得非常重要。同时,我国对教育科技投入也不断增加,许多学者也意识到试验研究的重要性,国家启动的211建设、985计划等都加大了对实验室建设的力度,这些都促成了我国许多高校、和相关研究院、所加大对土木工程试验研究的投入,加强对土木工程工程相关实验室的建设,加上试验检测技术的日新月异,使得我国土木工程试验研究的能力与水平得到了很大的提高。

试验与检测技术在土木工程施工质量检验中起到的重要作用,目前已得到广大工程技术人员普遍认可。但这是通过多次惨痛的教训、血的代价后才形成的,许多的工程质量安全事故与试验检测或监测有关,如:2008年11月15日杭州地铁工程施工发生坍塌事故致21人死亡(图1.1.1),据查其施工监测报告有杭州某检测机构出具,但实际监测工作由施工单位自己完成;2009年6月27日上海闵行区莲花河畔景苑小区内一栋在建的13层住宅建筑整体倒塌事故(图1.1.2)与相邻基坑开挖施工及堆土有关,显然基坑施工监

测及周边房屋监测工作不到位是脱不了干系的。



图 1.1.1 杭州地铁工程坍塌事故现场



图 1.1.2 上海“楼倒倒”

1.2 土木工程试验与检测的目的与任务

1.2.1 科学研究性试验

科学研究性试验是以研究新问题、探索新理论、揭示新规律为目的，其任务就是，通过试验研究在土木工程设计、施工中出现的新问题，验证土木工程学科的各种新理论、新方法，验证各种科学的判断、推理、假设及概念的正确性，验证新的施工方法的可行性，或通过试验开发新型建筑材料、新型结构型式、新型施工工艺。

科学研究性试验的试验对象或称试件,是专门根据具体研究任务要求而设计制作的,它不一定是实际工程中的具体对象,往往的是经过力学分析后抽象出来的模型,模型必须反映研究任务中的主要参数。研究性试验一般都在实验室进行,需要使用专门的试验设备和数据测试系统,以便对试件的各种性能反应作连续的观察、测量和全面的分析研究,从而找出其变化规律,为验证设计理论和计算方法提供依据。这类试验通常研究以下几个方面的问题。

(1) 验证计算理论的假定。在土木工程设计中,人们经常为了计算上的方便,对各种计算图式和本构关系作出某些简化的假定。如:土力学计算分析中的固结理论、抗震计算中的恢复力模型等,均需要通过试验进行验证和确定。

(2) 为制订设计规范提供依据。以结构设计为例,我国现行的各种结构设计规范除了总结已有大量科学试验和经验以外,为了理论和设计方法的发展,进行了大量钢筋混凝土结构、砌体结构和钢结构的构件及足尺和缩尺模型的试验,以及实体结构物的试验研究,为我国编制各类结构设计规范提供了基本资料与试验数据。事实上现行规范采用的钢筋混凝土结构构件和砌体结构的计算理论,几乎全部是以试验研究的直接结果为基础的。这也进一步体现了结构试验学科在发展设计理论和改进设计方法上的作用。

(3) 为发展和推广新结构、新材料与新工艺提供实践经验。随着土木工程学科和基本建设发展的需要,新结构、新材料和新工艺不断涌现。例如在钢筋混凝土结构中各种新结构体系的应用,钢-混凝土组合结构、轻型钢结构的设计推广,纤维混凝土材料、节能建筑材料的发展,以及大跨度结构、高耸结构、超高层建筑与特种结构的设计施工等。但是是一种新材料的应用,一个新结构的设计和新工艺的施工,往往需要经过多次的工程实践与科学试验,即由实践到认识,由认识到实践的多次反复,从而积累资料,丰富认识,使设计计算理论不断改进和不断完善。

1.2.2 生产鉴定性试验

生产鉴定性试验是非探索性的。一般是在比较成熟的设计理论基础上进行。其目的是通过试验来检验实际工程是否符合工程设计规范及施工验收规范的要求,并对检验结果做出技术结论。

生产鉴定性的试验以实际工程的整体或部分作为试验对象,这类试验常应用在以下几方面:

(1) 检验工程质量,说明工程的可靠性。对某些重要性工程的基础、结构或采用新材料、新工艺及新设计计算理论而设计建造的结构物或构筑物,在建成后需进行总体的性能检验,以综合评价工程设计及施工质量的可靠性。

(2) 检验构件或部件的结构性能,判定构件的设计及制作质量。例如预制构件厂或建设工地生产的预制构件,在出厂或吊装前均应对其承载力、刚度和变形性能进行抽样检验,以确定其结构性能是否满足结构设计和构件检验规程所要求的指标。此外对某些结构构造较复杂的部件(如网架节点、特种桥梁、高耸桅杆和焊接构件等)均应进行严格的质量检验。检验性试验应严格按照有关的检验规程或规定进行。

(3) 判断既有基础、结构的实际承载力,为改造、扩建工程提供数据。当建筑物由于使用功能发生了变化,原有基础或结构需要加固、改造时(如厂房、桥梁等)往往需要通过试验实测及分析,以确定原有基础、结构的实际潜力。

(4) 检验和鉴定既有建筑物或构筑物的可靠性。这类建筑物或构筑物一般是指经过几十年的使用,发生过异常变形或局部损伤,继续使用时人们对其安全性及可靠性持有怀疑。这类鉴定首先应进行全面的科学调查,调查的方法包括观察、试验、检测和分析。检测手段大多采用无损检测方法,必要时也可采用荷载试验,在调查和分析基础上评定其所属安全等级,最后推算其可靠性。这类鉴定工作应按照相关鉴定规程的有关规定进行。

(5) 为处理工程事故提供依据。对于因遭受地震、大风、洪水、火灾、爆炸而损毁的建筑物、构筑物,或在建造期间及使用过程中发生过严重事故的工程,产生了过度变形、裂缝、倾斜的结构或基础,都要通过试验为加固和修复工作提供依据。

1.3 土木工程试验与检测的分类

土木工程试验与检测包括:材料性能试验与检测、地基基础及土工试验与检测、结构试验与检测。

1.3.1 材料性能试验与检测

每一个土木工程都由多种建筑材料采用各种方式建造而成,显然,这些建筑材料对一个土木工程非常重要,因此,为了解土木工程质量,对建筑材料的物理力学性能、化学性能进行试验检测是非常必要的,而研究开发新的建筑材料或提高建筑材料的性能更是需要进行大量的材料性能试验与检测。

土木工程中常用的建筑材料包括:水泥、砂子、石材、木材、混凝土、沥青、钢材、其他金属材料、碳纤维、玻璃纤维等等,所关注的主要力学性能有:抗压强度、抗拉强度、屈服强度、伸长率、弹性模量、泊松比、抗折强度、硬度、膨胀性能、收缩性能、徐变性能、松弛性能、抗冻性能、抗渗性能、抗冲击性能等等,关注的其他物理性能有:密度(比重)、含水量(率)、细度、流动度、坍落度、稠度、烧失量、含泥量等等,关注的主要化学性能有:化学成分、pH值、碱集料反应、氯离子渗透等等。这些材料性能的试验或检测一般采用单一的或相对简单的仪器设备可以实现,详见相关的试验方法标准或产品标准中的试验方法,本书不再赘述。

1.3.2 地基基础及土工试验与检测

众所周知,地基基础对土木工程建筑物或构筑物至关重要,在土木工程建设开工之前,就要进行工程地质勘探,以了解工程场地的岩土构成、分布,并通过对岩土样品的试验检测,了解地基土层的物理力学性能,如:颗粒成分、粗细、含水量、密度、孔隙比、压缩模量、塑性指数、液性指数、粘聚力、内摩擦角等等,为基础设计提供技术数据。

尽管通过工程地质勘探可以详细的了解有关地基岩土的土工性能,鉴于岩土工程问题的复杂性,地基基础地下工程依然存在许多不确定性,需要进行各种试验检测予以检验和验证,常见的有:地基(天然地基、复合地基)承载力试验、静力触探、动力触探、桩基荷载试验(抗压、抗拔、水平)、桩基检测(低应变动测、高应变动测、超声波跨孔检测、混凝土钻芯检测)、基坑监测(土体位移、沉降、孔隙水压力、支撑内力等监测)、锚杆抗拔试验、地基动力性能检测等等。

1.3.3 结构试验与检测

结构是土木工程的主体,它起到承受荷载传递荷载的作用。结构在外荷载作用下,它

就会产生各种反应。例如钢筋混凝土简支梁在静力集中荷载作用下,可以通过测得梁在不同受力阶段的挠度、角变位、截面上纤维应变和裂缝宽度等参数,来分析梁的整个受力过程以及结构的强度、刚度和抗裂性能。当一个框架承受水平的动力荷载作用时同样可以从测得结构的自振频率、阻尼系数、振幅(动位移)和动应变等研究结构的动力特性和结构承受动力荷载作用下的动力反应。近年来在结构抗震研究中,经常是通过结构在承受低周反复荷载作用下,由试验所得的反应力与变形关系的滞回曲线为分析抗震结构的强度、刚度、延性、刚度退化、变形能力等提供数据资料。

结构试验与检测就是在结构物或试验对象(实物或模型)上,以仪器设备为工具,各种实验技术为手段,在荷载(重力、机械扰动力、地震力、风力……)或其他因素(温度、变形)作用下,通过量测与结构工作性能有关的各种参数(变形、挠度、应变、振幅、频率……),从强度(稳定)刚度和抗裂性以及结构实际破坏形态来判断建筑结构的实际工作性能,评估结构的承载能力,确定结构对使用要求的符合程度,检验和发展结构的计算理论。

结构试验与检测通过实验中测定有关数据,来反映结构或构件的工作性能、承载能力和相应的安全性能,为结构的安全使用和设计理论的发展提供重要的依据。结构试验按试验对象分为以下几类。

原型试验,原型试验的试验对象是实际结构或是按实物结构足尺复制的结构或构件。对于实际结构试验一般均用于生产鉴定性试验。例如核电站安全壳加压整体性的试验,工业厂房结构的刚度试验、楼盖承载能力试验以及桥梁在移动荷载下的动力特性试验等均在实际结构上加量测,另外在高层建筑上直接进行风振测试和通过环境随机振动测定结构动力特性等均属此类。在原型试验中另一类就是足尺结构或构件的试验。以往一般对构件的足尺试验做得较多的对象就是一根梁、一块板或一榀屋架之类的实物构件,它可以在试验室内试验,也可以在现场进行。由于工程结构抗震研究的发展,国内外开始重视对结构整体性能的试验研究,因为通过对这类足尺结构物进行试验,可以对结构构造、各构件之间的相互作用、结构的整体刚度以及结构破坏阶段的实际工作性能进行全面观测了解。

模型试验,由于进行原型结构试验投资大、周期长、测量精度受环境因素等影响,在经济上或技术上存在一定困难。因此,人们在结构设计的方案阶段进行初步探索比较或对设计理论和计算方法进行科学研究时,可以采用按原型结构缩小的模型进行试验。模型是仿照原型(真实结构)并按照一定比例关系复制而成的试验代表物,它具有实际结构的全部或部分特征。模型的设计制作及试验是根据相似理论,用适当的比例和相似材料制成与原型几何相似的试验对象,在模型上施加相似力系(或称比例荷载),使模型受力后重演原型结构的实际工作,最后按照相似理论由模型试验结果推算实际结构的工作。为此这类模型要求有比较严格的模拟条件,即要求做到几何相似、力学相似和材料相似。目前在试验室内进行的大量结构试验均属于这一类。

结构试验也可按荷载性质分为以下几类。

静力试验是结构试验中最大量最常见的基本试验,因为大部分建筑结构在工作时所承受的是静力荷载,一般可以通过重力或各种类型的加载设备来实现和满足加载要求。静力试验的加载过程是从零开始逐步递增一直到结构破坏为止,也就是在一个不长的时间段内完成试验加载的全过程,我们称它为结构静力单调加载试验。

近年来由于探索结构抗震性能,结构抗震试验无疑成为一种重要的手段。结构抗震静力试验是以静力的方式模拟地震作用的试验,它是一种控制荷载或控制变形作用于结构的周期性的反复静力荷载,为区别于一般单调加载试验,称之为低周反复静力加载试验。亦有称之为伪静力试验,目前国内外结构抗震试验较多集中在这一方面。

静力试验的最大优点是加载设备相对来说比较简单,荷载可以逐步施加,还可以停下来仔细观测结构变形的发展,给人们以最明确和清晰的破坏概念。在实际工作中即使是承受动力荷载的结构在试验过程中为了了解静力荷载下的工作特性,在动力试验之前往往也先进行静力试验,如结构构件的疲劳试验就是这样。静力试验的缺点是不能反映应变速率对结构的影响,特别是在结构抗震试验中与任意一次确定性的非线性地震反应相差很远。目前在抗震静力试验中虽然发展一种计算机与加载器联机试验系统,可以弥补后一种缺点,但设备耗资大大增加,而且静力试验的每个加载周期还是远远大于实际结构的基本周期。

动力试验,对于那些在实际工作中主要承受动力作用的结构或构件,为了了解结构在动力荷载作用下的工作性能,一般要进行结构动力试验,通过动力加载设备直接对结构构件施加动力荷载。如研究厂房结构承受吊车及动力设备作用下的动力特性,吊车梁的疲劳强度与疲劳寿命问题,多层厂房由于机器设备上楼后所产生的振动影响,又如高层建筑和高耸构筑物(塔桅、烟囱)等在风载作用下的动力问题,结构抗爆炸抗冲击荷载(冲击波)的影响等。特别是结构抗震性能的研究中除了用上述静力加载模拟以外,更为理想的是直接施加动力荷载进行试验,目前抗震动力试验一般用电液伺服加载设备或地震模拟振动台等设备来进行。对于现场或野外的动力试验,利用环境随机振动试验测定结构动力特性模态参数也日益增多。另外还可以利用人工爆炸产生人工地震的方法甚至直接利用天然地震对结构进行试验。由于荷载特性的不同,动力试验的加载设备和测试手段也与静力有很大的差别,并且要比静力试验复杂得多。

结构试验也可以按试验时间分为短期荷载试验和长期荷载试验。时间对于主要承受静力荷载的结构构件实际上荷载是长期作用的。但是在进行结构试验时限于试验条件、时间和基于解决问题的步骤,我们不得不大量采用短期荷载试验,即荷载从零开始施加到最后结构破坏或到某阶段进行卸荷的时间总和只有几十分钟,几小时或者几天。对于承受动荷载的结构,即使是结构的疲劳试验,则整个加载过程也仅在几天内完成,与实际工作有一定差别。对于爆炸,地震等特殊荷载作用时,整个试验加载过程只有几秒甚至是微秒或毫秒,这种试验实际上是一种瞬态的冲击试验。所以严格地讲这种短期荷载试验不能代替长年累月进行的长期荷载试验。这种由于具体客观因素或技术的限制所产生的影响,我们在分析试验结果时必须加以考虑。

对于研究结构在长期荷载作用下的性能,如混凝土结构的徐变,预应力结构中钢筋的松弛,钢筋混凝土受弯构件裂缝的开展与刚度退化等就必须要进行静力荷载的长期试验。这种长期荷载试验也可称为持久试验,它将连续进行几个月或甚至于数年,通过试验以获得结构的变形随时间变化的规律。为了保证试验的精度,经常需要对试验环境有严格的控制,如保持恒温恒湿,防止振动影响等,当然这就必须在试验室内进行。如果能在现场对实际工作中的结构物进行系统长期的观测,则这样积累和获得的数据资料对于研究结构的实际工作,进一步完善和发展工程结构的理论都具有极为重要的意义。

工程结构和构件的试验可以在有专门设备的试验室内进行，也可以在现场进行试验。

室内试验由于可以获得良好的工作条件，可以应用精密和灵敏的仪器设备进行试验，具有较高的准确度。甚至可以人为的创造一个适宜的工作环境，以减少或消除各种不利因素对试验的影响，所以适宜于进行研究性试验。这样有可能突出研究的主要方面，而消除一些对试验结构实际工作有影响的次要因素。这种试验可以在原型结构上进行，也可以采用模型试验，并可以将结构一直试验到破坏。尤其近年来发展足尺结构的整体试验，大型试验室为之提供了比较理想的条件。

现场试验与室内试验相比由于客观环境条件的影响，使用高精度的仪器设备来进行观测受到了一定的限制，相对来看，进行试验的方法也比较简单，所以试验精度和准确度较差。现场试验多数用以解决生产鉴定性的问题，所以试验是在生产和施工现场进行的，有时研究或检验的对象就是已经使用或将要使用的结构物，它可以获得近乎完全实际工作状态下的数据资料。

第2章 土木工程试验仪器与设备

用于土木工程试验的仪器与设备非常多,本章主要介绍常用加载设备及相关辅助设备,同时也介绍相应的加载方法;而量测仪器主要按照量测内容来介绍,对各项常见的量测内容,介绍几种常用的量测方法及相应的仪器,包括量测原理、技术性能指标、适用范围、适用条件等。

2.1 试验加载方法与设备

2.1.1 静力加载方法与设备

可以用于土木工程静载试验加载的方法与设备很多,试验不论是研究性的,还是生产服务性的,是在实验室内进行的,还是在工程现场进行的,无论采用何种方法,其加载设备必须满足以下基本要求:

(1) 所用设备必须能够实现试验大纲要求的荷载布置,满足对荷载等效的要求,包括荷载传递方式、边界条件、相关截面内力的等效等;

(2) 产生的荷载应当满足试验的准确度、精度的要求,并能保持相对稳定性,即不会随时间、环境条件的变化、结构的变形而产生变化,保证荷载值的相对误差不超过 $\pm 5\%$;

(3) 加载设备必须具备足够的刚度、强度和稳定性能,保证试验使用的安全可靠;

(4) 加载设备不能参与试验对象的工作,以致改变其受力状态或使其产生次内力;

(5) 能方便调节以满足加载分级及荷载速率控制的要求,并满足分级精度的要求。

常用的加载方法众多,主要有重物加载、液压加载、机械加载、气压加载以及拆除施工支架加载等。

1. 重物加载及其设备

可用于静载试验加载的重物很多,常用的有:铁块(砝码)、混凝土块、砖、袋装水泥、砂石料、水等,甚至非构件也可以,前提必须满足前述的基本要求。

要引起关注的是,在实际试验采用重物加载时很容易方法不当,可能产生试验荷载“失真”的问题,即不能完全反映试验要求的加载条件。对于如图2.1.1(a)所示的情

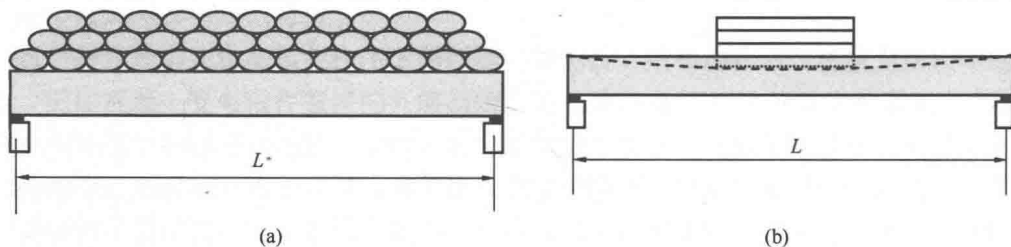


图 2.1.1

(a) 沙袋堆载示意图; (b) 构件堆载示意图

况，堆积在试验构件上的沙袋在加载后产生起拱现象，增加了试件的刚度，出现实测挠度比应该的试验挠度偏小的情况。在采用构件加载时，图 2.1.1 (b) 所示，同样会引起荷载“失真”，而且与模拟的局部均布荷载相差甚远。

采用重物施加均布荷载，比较规范的做法如图 2.1.2 所示，即重物应分垛堆放，垛间拟保持 5~15cm 间距，堆放时应避免产生较大的冲击作用，尤其在荷载已经比较大时。

采用重物也可以施加集中荷载，可以通过荷载盘、水箱（桶）、木箱、纤维袋和杠杆等来实现。图 2.1.3 为重物施加集中荷载的几种情况。

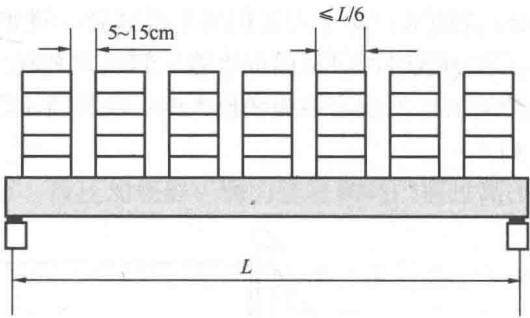
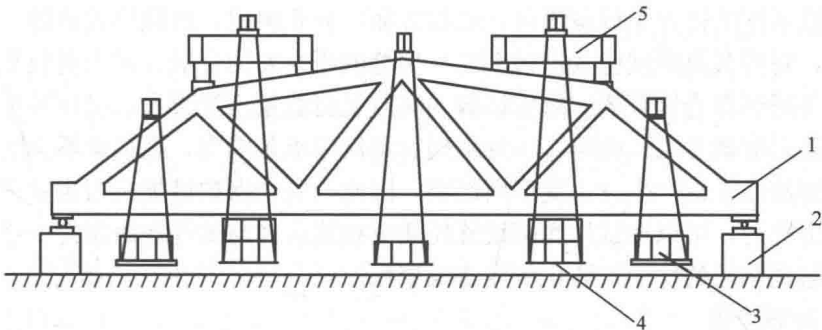


图 2.1.2 重物施加均布荷载

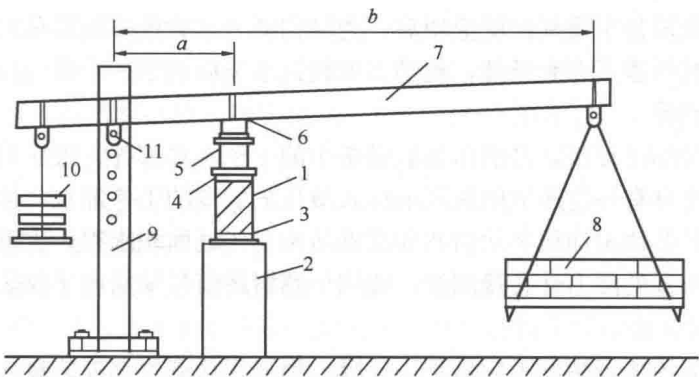
用象砂石等非均匀材料作为重物加载时，拟每袋称重，以使所加荷载能够准确计量。用砖块加载时，可以抽取 20 块或更多的数量，称重后取其平均值作为计算加载量的依据，但所用砖块规格、型号、厂家等要求一致，干燥程度也相同，以确保各砖块的重量误差小于±5%。



(a)

(a) 直接施加集中荷载

1—试件；2—支座；3—重物；4—加载托盘；5—分配梁



(b)

(b) 利用杠杆加载

1—试件；2—支墩；3—支座；4—分配梁支座；5—分配梁；6—加载点；7—杠杆；8—加载重物；9—杠杆拉杆；10—杠杆平衡重；11—钢销（支点）

图 2.1.3 重物施加集中荷载