

新世纪土木工程专业系列教材



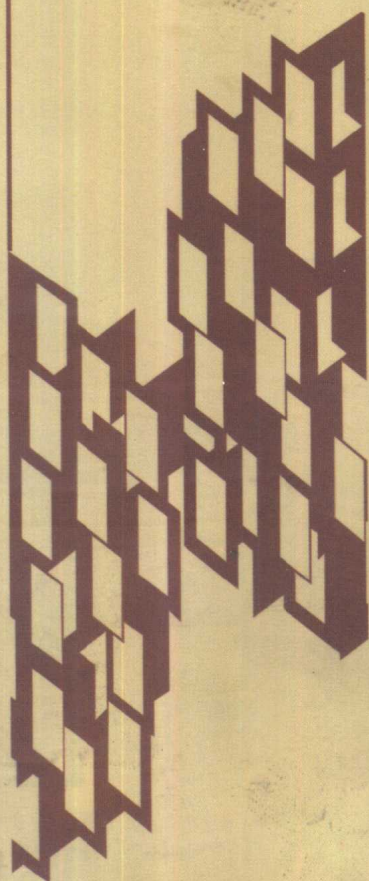
土木工程结构试验与检测

TUMU GONGCHENG JIEGOU SHIYAN YU JIANCE

周明华 主编

周明华 王晓 编著
毕佳 钱培舒

陈忠范 主审



东南大学出版社

新世纪土木工程专业系列教材

土木工程结构试验与检测

周明华		主 编
周明华	王 晓	编 著
毕 佳	钱培舒	
陈忠范		主 审



东南大学出版社

内 容 提 要

全书分上、中、下三篇,上篇主要介绍土木工程结构基本试验方法,内容包括土木工程结构试验概论、试验荷载与加载方法、试验量测技术与量测仪表、结构模型试验和试验数据处理等;中篇主要介绍土木工程结构静载试验、动载试验、抗震试验、路基路面结构静载试验和疲劳试验;下篇主要介绍土木工程结构的现场检测与评定,内容包括混凝土结构、钢结构及砌体结构的非破损检测方法与强度推定、桥梁的现场荷载试验与评定、道路工程的现场检测与评定、地下工程现场检测与评定、大型桥梁的健康监测等。

本书可作为高等学校土木工程专业本科生、研究生教材使用,也可作为科研人员、试验人员和有关工程技术人员的专业技术参考书。

图书在版编目(CIP)数据

土木工程结构试验与检测/周明华主编. —南京:东南大学出版社,2002.8

新世纪土木工程专业系列教材

ISBN 7-81050-980-2

I. 土... II. 周... III. ①土木工程-工程结构-结构试验-高等学校-教材 ②土木工程-工程结构-检测-高等学校-教材 IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 041951 号

东南大学出版社出版发行

(南京四牌楼 2 号 邮编 210096)

出版人:宋增民

江苏省新华书店经销 丹阳市兴华印刷厂印刷

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:23.25 字数:558 千字

2002 年 9 月第 1 版 2002 年 9 月第 1 次印刷

印数:1~4000 册 定价:39.00 元

(凡因印装质量问题,可直接向发行科调换。电话:025-3795802)

序

东南大学是教育部直属重点高等学校,在 20 世纪 90 年代后期,作为主持单位开展了国家级“20 世纪土建类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”课题的研究,提出了由土木工程专业指导委员会采纳的“土木工程专业人才培养的知识结构和能力结构”的建议。在此基础上,根据土木工程专业指导委员会提出的“土木工程专业本科(四年制)培养方案”,修订了土木工程专业教学计划,确立了新的课程体系,明确了教学内容,开展了教学实践,组织了教材编写。这一改革成果,获得了 2000 年教学成果国家级二等奖。

这套新世纪土木工程专业系列教材的编写和出版是教学改革的继续和深化,编写的宗旨是:根据土木工程专业知识结构中关于学科和专业基础知识、专业知识以及相邻学科知识的要求,实现课程体系的整体优化;拓宽专业口径,实现学科和专业基础课程的通用化;将专业课程作为一种载体,使学生获得工程训练和能力的培养。

新世纪土木工程专业系列教材具有下列特色:

1. 符合新世纪对土木工程专业的要求

土木工程专业毕业生应能在房屋建筑、隧道与地下建筑、公路与城市道路、铁道工程、交通工程、桥梁、矿山建筑等的设计、施工、管理、研究、教育、投资和开发部门从事技术或管理工作,这是新世纪对土木工程专业的要求。面对如此宽广的领域,只能从终身教育观念出发,把对学生未来发展起重要作用的基础知识作为优先选择的内容。因此,本系列的专业基础课教材,既打通了工程类各学科基础,又打通了力学、土木工程、交通运输工程、水利工程等大类学科基础,以基本原理为主,实现了通用化、综合化。例如工程结构设计原理教材,既整合了建筑结构和桥梁结构等内容,又将混凝土、钢、砌体等不同材料结构有机地综合在一起。

2. 专业课程教材分为建筑工程类、交通土建类、地下工程类三个系列

由于各校原有基础和条件的不同,按土木工程要求开设专业课程的困难较大。本系列专业课教材从实际出发,与设课群组相结合,将专业课程教材分为建筑工程类、交通土建类、地下工程类三个系列。每一系列包括有工程项目的规划、选型或选线设计、结构设计、施工、检测或试验等专业课系列,使自然科学、工程技术、管理、人文学科乃至艺术交叉综合,并强调了工程综合训练。不同课群组可以交叉选课。专业系列课程十分强调贯彻理论联系实际的教学原则,融知识和能力为一体,避免成为职业的界定,而主要成为能力培养的载体。

3. 教材内容具有现代性,用整合方法大力精减

对本系列教材的内容,本编委会特别要求不仅具有原理性、基础性,还要求具有现代性,纳入最新知识及发展趋向。例如,现代施工技术教材包括了当代最先进的施工技术。

在土木工程专业教学计划中,专业基础课(平台课)及专业课的学时较少。对此,除了少而精的方法外,本系列教材通过整合的方法有效地进行了精减。整合的面较宽,包括了土木工程

各领域共性内容的整合,不同材料在结构、施工等教材中的整合,还包括课堂教学内容与实践环节的整合,可以认为其整合力度在国内是最大的。这样做,不只是为了精减学时,更主要的是可淡化细节了解,强化学习概念和综合思维,有助于知识与能力的协调发展。

4. 发挥东南大学的办学优势

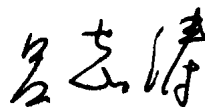
东南大学原有的建筑工程、交通土建专业具有 80 年的历史,有一批国内外著名的专家、教授。他们一贯严谨治学,代代相传。按土木工程专业办学,有土木工程和交通运输工程两个一级学科博士点、土木工程学科博士后流动站及教育部重点实验室的支撑。近十年已编写出版教材及参考书 40 余本,其中 9 本教材获国家和部、省级奖,4 门课程列为江苏省一类优秀课程,5 本教材被列为全国推荐教材。在本系列教材编写过程中,实行了老中青相结合,老教师主要担任主审,有丰富教学经验的中青年教授、教学骨干担任主编,从而保证了原有优势的发挥,继承和发扬了东南大学原有的办学传统。

新世纪土木工程专业系列教材肩负着“教育要面向现代化,面向世界,面向未来”的重任。因此,为了出精品,一方面对整合力度大的教材坚持经过试用修改后出版,另一方面希望大家在积极选用本系列教材中,提出宝贵的意见和建议。

愿广大读者与我们一起把握时代的脉搏,使本系列教材不断充实、更新并适应形势的发展,为培养新世纪土木工程高级专门人才作出贡献。

最后,在这里特别指出,这套系列教材,在编写出版过程中,得到了其他高校教师的大力支持,还受到作为本系列教材顾问的专家、院士的指点。在此,我们向他们一并致以深深的谢意。同时,对东南大学出版社所作出的努力表示感谢。

中国工程院院士



2001 年 9 月

前 言

土木工程结构试验与检测是研究和发展工程结构新材料、新体系、新工艺、新的设计理论和方法以及结构损伤鉴定和处理工程事故的重要手段,在工程结构科学研究和技术创新中起着重要作用,具有较强的工程实践性。它与结构设计、施工实践以及土木工程学科的发展有着密切的关系,因此,日益受到广大科研人员和工程技术人员的关注和重视。

土木工程结构试验与检测是土木工程专业的一门专业技术课程。其任务是通过理论和实践教学环节,使学生获得工程结构试验检测方面的基础知识和基本技能,能进行一般工程结构试验的规划和方案设计,并得到初步的训练和实践。

根据教育部新的普通高等学校本科专业目录,本教材与原教材相比在内容安排方面作了较大幅度的调整和扩充,力求涵盖土木工程各学科领域。编写的基本思路:一是在东南大学原有《结构试验》、《已有建(构)筑物现场检测技术》、《路基路面测试与评价》、《桥梁结构试验》等教材和讲义的基础上,将其共性的内容组合起来,避免重复,并根据建筑、桥涵、道路等不同试验对象,突出各自的特点,同时增加了桩基试验、地下工程施工监测、大型桥梁的健康监测等新内容;二是体现“新”的特色,力求反映科学技术的最新发现和最新成就,在阐述传统的基本试验方法的基础上,着重国内外最新发展的试验理论和最新试验方法的论述;三是注意理论与实践相结合,在阐明结构试验基本原理的基础上,重点介绍基本试验检测方法,并配以有代表性的试验实例,以启发和培养学生的实践能力;四是注意由浅入深,除了满足本科生的教学要求外,增加了本学科领域部分前沿学科内容,如健康监测等,以适应研究生的教学要求,同时可供本学科的科研人员、试验人员和有关工程技术人员参考。

本教材由周明华、王晓、钱培舒、毕佳合编,其中第1、2、3、4、6、7、10、14章和第13.3节由周明华编写,第9、11章由王晓编写,第12章由钱培舒编写,第5、8、13章由解放军理工大学毕佳编写,全书由周明华担任主编并负责统稿。

本教材的初稿采取分散审稿的方法,审稿者分别为南京工业大学刘伟庆教授(第1、2、3章),东南大学陈忠范教授(第4、5、8章)、孟少平教授(第6、7章)、黄晓明教授(第9、11章)、曹双寅教授(第10章)、叶见曙教授(第12章)、龚维明教授(第13章)、李爱群教授和邱洪兴教授(第14章),全书最后由陈忠范教授担任主审。他们提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢。

在初稿编写过程中得到了蓝宗建教授、舒赣平教授、吴刚博士、万水博士、王艳晗博士以及试验中心庞同和、张蓓、席瑶、郭恒宁、郇扣霞等老师和南京长江二桥管理局章登精、陈研等工

程师的无私帮助,并提供了许多有价值的资料及图片。教材的最后整理和编排得到陆飞博士、王燕华硕士的鼎力相助。教材中引用了有关单位的成果,特此一并致谢。

特别要指出的是在确定教材编写大纲过程中,教材编委会主任吕志涛院士,副主任蒋永生教授、邱洪兴教授和黄晓明教授以及其他委员们提出了不少指导性意见,在此特别表示感谢!

由于作者的业务水平有限,编写中难免有漏误之处,敬请专家、同行和读者批评指正。

周明华

2002年2月

目 录

上篇 土木工程结构基本试验方法

1 土木工程结构试验检测概论	(3)
1.1 概述	(3)
1.2 土木工程结构试验与检测的目的和任务	(4)
1.3 试验检测方法的重要性	(7)
1.4 土木工程结构试验的分类	(8)
1.5 土木工程结构试验的一般过程	(9)
复习思考题	(15)
2 试验荷载与加载方法	(17)
2.1 试验荷载概论	(17)
2.2 重物加载法	(18)
2.3 气压加载法	(20)
2.4 机械机具加载法	(20)
2.5 液压加载法	(21)
2.6 动力激振加载法	(29)
2.7 荷载试验支座及加载辅助设备	(35)
复习思考题	(37)
3 试验量测技术与量测仪表	(38)
3.1 概述	(38)
3.2 量测仪表的基本概念	(38)
3.3 仪表的率定	(40)
3.4 应力(应变)量测	(41)
3.5 位移量测	(54)
3.6 其它变形的量测	(56)
3.7 裂缝量测	(57)
3.8 力的测定	(58)
3.9 振动参量的量测	(59)
3.10 光纤传感器的应用	(66)
3.11 数据采集系统	(68)
复习思考题	(72)
4 结构模型试验	(74)

4.1 概述	(74)
4.2 模型试验的相似理论基础	(74)
4.3 模型的分类	(81)
4.4 模型设计	(82)
4.5 模型材料与模型试验应注意的问题	(86)
复习思考题	(89)
5 试验数据处理	(90)
5.1 概述	(90)
5.2 间接测定值的推算	(90)
5.3 试验误差分析	(90)
5.4 试验结果的表达	(100)
5.5 周期振动试验的数据处理	(105)
5.6 实验模态分析简介	(106)
复习思考题	(108)

中篇 土木工程结构荷载试验

6 土木工程结构静载试验	(113)
6.1 概述	(113)
6.2 静载试验加载和量测方案的确定	(113)
6.3 结构静载试验实例	(116)
6.4 静载试验量测数据整理要点	(125)
6.5 结构性能检验与评定	(129)
复习思考题	(133)
7 土木工程结构的动载试验	(135)
7.1 概述	(135)
7.2 工程结构动力特性的试验测定	(136)
7.3 工程结构的动力反应试验测定	(143)
7.4 工程结构的疲劳试验	(146)
7.5 工程结构的风洞试验	(150)
复习思考题	(155)
8 土木工程结构抗震试验	(156)
8.1 概述	(156)
8.2 结构伪静力试验	(157)
8.3 结构拟动力试验	(169)
8.4 结构模拟地震振动台试验	(172)
8.5 天然地震试验	(177)

复习思考题	(182)
9 路基路面室内试验	(183)
9.1 路基路面静载试验	(183)
9.2 路面结构疲劳试验	(186)
复习思考题	(190)

下篇 土木工程结构现场检测与评定

10 建筑结构现场检测与评定	(193)
10.1 现场检测概论	(193)
10.2 混凝土结构现场检测与评定	(196)
10.3 砌体结构的现场检测与评定	(211)
10.4 钢结构的现场检测与评定	(218)
10.5 火灾后工程结构的现场检测与评定	(221)
复习思考题	(232)
11 道路工程现场检测与评价	(233)
11.1 路面厚度与压实度的测试与评价	(233)
11.2 路面使用性能的现场测定与评价	(243)
11.3 路面承载力的现场测试与评定	(251)
11.4 路面抗滑性能的现场检测与评定	(266)
11.5 路面破损调查与检测	(276)
11.6 路基路面检测新技术简介	(283)
复习思考题	(287)
12 桥梁现场荷载试验与评定	(288)
12.1 实桥荷载试验概论	(288)
12.2 实桥试验的现场考察与调查	(289)
12.3 加载方案的制定和实施	(290)
12.4 现场测点布置与试验观测方法	(295)
12.5 桥梁成果分析与评定	(297)
12.6 桥梁现场荷载试验实例	(303)
复习思考题	(312)
13 地下结构工程的现场检测	(314)
13.1 桩基静载试验	(314)
13.2 桩承载力的荷载自平衡测试方法	(321)
13.3 桩的动测试验方法	(327)
13.4 地下工程的施工监测	(333)
复习思考题	(340)

14 大型桥梁的健康监测	(341)
14.1 桥梁健康监测概论	(341)
14.2 桥梁健康监测新技术	(344)
14.3 桥梁健康监测系统的设计	(346)
14.4 南京长江二桥南汊主桥(斜拉桥)健康监测实例	(347)
复习思考题	(354)
参考文献	(355)

上篇 土木工程结构基本试验方法

•

1 土木工程结构试验检测概论

1.1 概述

土木工程结构试验是研究和发展结构计算理论的重要手段。从确定工程材料的力学性能到验证由各种材料构成的不同类型的承重结构或构件(梁、板、柱、桥涵等)的基本计算方法,以及近年来发展的大量大跨、超高、复杂结构体系的计算理论,都离不开试验研究。特别是混凝土结构、钢结构、砖石结构和公路桥涵等设计规范所采用的计算理论,几乎全部是以试验研究的直接结果作为基础的。近几年来,由于计算方法的发展和计算机技术的广泛应用,为采用数学模型方法对结构进行计算分析创造了条件,尽管可以减少一定数量的试验研究,但由于实际结构的复杂性和结构在整个生命周期中可能遇到的各种风险,试验研究仍是必不可少的主要手段。例如,在建造阶段可能产生的设计和施工失误而留下的隐患以及由于在使用阶段结构受灾和结构老化所产生的各种损伤积累,导致正常抗力丧失等影响因素,特别是钢筋混凝土结构的塑性阶段性能、结构老化和损伤机理,钢结构的疲劳和稳定以及结构的动力性能等方面的问题;为使工程设计人员寻求合理的设计方法,保证结构有足够的承载力和安全储备,只有通过必要的实际结构试验研究才有可能弄清楚。

与此同时,土木工程学科的发展又推动了试验检测技术的发展。随着超高层建筑、大跨度桥涵结构、高速公路以及核反应堆压力容器、海洋石油平台、地铁、隧道、大型港口设施等各种工程结构物的出现,对结构整体工作、结构动力特性、结构非线性性能等问题的研究已日益突出,这就使结构试验由过去的单个构件试验向整体结构试验和足尺试验发展。目前,所采用的各种结构的伪静力试验、拟动力试验和振动台试验等已打破了过去静载试验和动载试验的界限,能较准确地再现各种复杂荷载作用,加之传感器技术的发展应用和量测数据的快速自动采集以及试验数据的分析处理方法等方面的科技进步,促使试验检测技术的发展发生了根本性的变化。在结构动力分析方面,为了对地震和台风等产生的结构动力反应进行实测和实施结构控制,近年来迅速发展的实验模态分析方法和系统识别技术已引起专家们的普遍关注,并开始进入应用阶段。

显然,试验检测技术的发展和各种现代科学技术的发展密切相关。尤其是各类学科的交叉发展和相互渗透所作出的贡献功不可没。近几年国内外推出的光纤传感量测技术就是突出例子。大跨度桥梁和超高层建筑的“健康”监测技术的开发研究,就综合运用了光纤传感技术、微波通讯、卫星跟踪监控等多项新技术,并已在香港青马大桥、江阴长江大桥、南京长江第二大桥和深圳帝王大厦等重要工程中实施与应用,并对这些工程的安全使用发挥了重要作用。另外在非破损检测方面,混凝土结构雷达和红外线热成像仪等新技术的出现为结构损伤检测开辟了新的途径。这些发展无疑使试验检测技术产生了质的飞跃。由此可以看出,试验检测技术是由各学科知识的综合运用而发展起来的,其本身已逐步形成一门真正的试验科学,今后将有更深入的发展。

1.2 土木工程结构试验与检测的目的和任务

1.2.1 研究性试验

研究性试验是以研究和探索为目的,其任务是通过验证结构设计计算的各种假定,提出新的结构理论,寻求新的更合理的计算方法,或为开发一种新结构、新材料、新工艺而进行的系统性试验研究。试验时要采用专门的或特殊设计的试验装置和先进的量测仪表,对试验对象在承受各种荷载后的性能进行详细观测,取得可靠的数据,找出规律,为设计和施工提供必要的参数。

研究性试验的试验对象称为试件或试验结构,是专为试验研究而设计制作的,它并不一定就是研究任务中的具体结构模型。在设计试件时要经过可行性分析,原则是:突出解决问题的关键和研究的主要因素,忽略一些对结构实际工作只有次要影响的因素,尽可能简化实验设备和试验装置。研究性试验一般都在实验室内进行,其试件尺寸要根据实验室的实验设备条件和场地大小而定,不一定和实际结构一样大,但为了避免尺寸效应的影响,试件尺寸应尽可能与实际结构接近。对于混凝土结构或砖石结构等材料变异性较大的材料制作的结构,同样的试件应在两个以上,以避免试验结果的偶然性。

试验研究的规模和试验方法,根据研究的目的和任务不同,也有很大差别。例如:为配合我国钢筋混凝土结构设计规范(TJ10-74)的修订,同济大学和东南大学等高校对钢筋混凝土受弯构件斜截面抗剪强度计算方法进行了大量的试验研究。但由于钢筋混凝土材料构成的复杂性,要想通过数学解析方法解决钢筋混凝土梁在不同情况下的抗剪强度计算方法是十分困难的。目前国内外大都采用半经验半理论的方法处理。试验研究的目的是要得出合理的、覆盖主要影响因素的、趋于更安全的、并得到专家们认可的斜截面抗剪强度计算方法。因而在总结前人已取得研究成果的基础上,需要进一步对不同混凝土强度等级、不同配筋率、不同截面形状和尺寸、不同剪跨比、不同荷载作用下的钢筋混凝土梁以及带有负弯矩的受弯梁(连续梁和约束梁)进行系统的试验研究,试件多达上百个,组织有关高校和研究机构分别进行,统一协调,历经十多年时间。与此同时,东南大学土木工程系还专门进行了预应力钢筋混凝土偏心受拉构件和开洞梁抗剪强度的试验研究,得出了更趋合理的经验系数公式。1976年唐山大地震中震坏开滦煤矿煤仓,煤仓的主体结构设计为复杂的空间结构,由筒壁、折形底板、圈梁和立柱等组合而成,一般采用钢筋混凝土结构建造。钢筋混凝土煤仓为什么会被震塌?对这类试验研究,通常采用缩小比例的弹性模型,以验证其在弹性工作阶段的内力及计算方法是否可靠,结构内部应力及总变形是否异常,并取得结构的自振频率等动力特性资料,为结构的重新设计和建造提供依据。图1-1为在东南大学进行的比例为1:100的煤仓结构有机玻璃模型试验。为弄清楚各组成部件的应力情况,测点多达460个,采用气压和黄砂模拟实际煤的颗粒级配等两种加载方法,使用日本产SD-520多点应变仪进行量测,试验历时近一年。由以上两个例子可以看出,试验研究的目的和任务不同,其试验规模和试验方法以及难度等均有较大差别。

研究性试验一般都是破坏性试验,而且主要在实验室内进行。

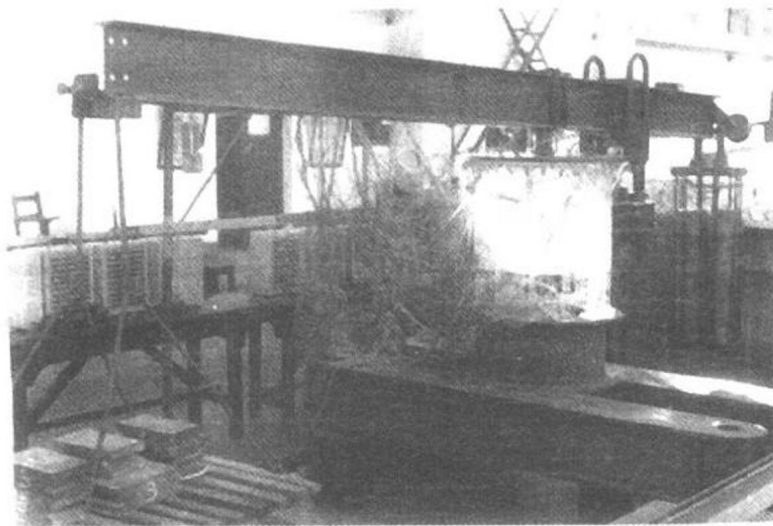


图 1-1 唐山开滦煤矿的煤仓模型试验

1.2.2 鉴定性试验

鉴定性试验以直接服务于生产为目的,以真实结构为对象,通过试验检测是否符合规范或设计要求,并作出正确的技术结论。这类试验通常用来解决以下几方面的问题:

(1) 重大建设工程的施工工艺试验和交工验收试验。此类工程由于采用了新结构、新材料、新工艺,除在设计阶段进行必要的试验研究,在施工前针对施工难点进行现场操作工艺试验以外,在实际工程建成后往往还需要进行荷载试验,综合鉴定结构的设计施工质量的可靠性。如 2001 年建成的南京长江第二大桥是中国目前跨度最大的斜拉桥,主跨 628 m,索塔高 195.41 m,由于索塔上塔柱采用了双肢空心截面和环向预应力混凝土结构设计方案,并引进了真空辅助压浆新工艺,为了验证设计并解决施工难点,在现场进行了节段足尺模型的操作工艺试验和结构承载力试验,见图 1-2。大桥交工验收前采用实际车辆进行了静荷载和动荷载试验,见图 1-3。

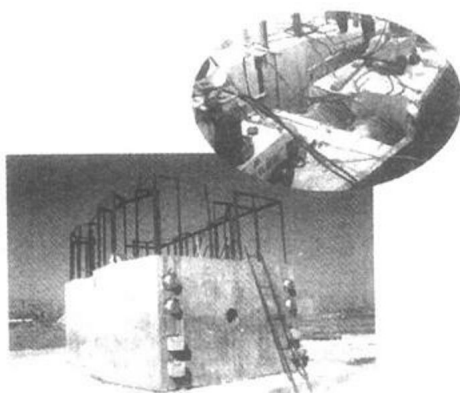


图 1-2 南京长江第二大桥索塔节段模型试验

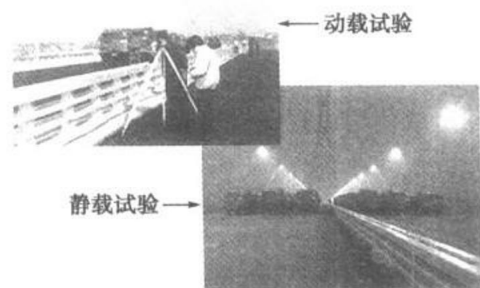


图 1-3 南京长江第二大桥交工前的荷载试验

(2) 建筑物需要改变使用功能进行扩建、加层或增加使用荷载等。在仅靠理论计算不能得到准确结论时,经常通过现场检测和荷载试验以确定这些结构的潜在承载能力。尤其在缺乏原有建筑物设计资料和图纸时,更有必要进行实际荷载试验,通过测定结构现有的实际承载能力,为对工程扩建改造提供实测依据。

(3) 具有历史性、纪念性的古代建筑、近代建筑或其它公共建筑的可靠性鉴定。这类建筑物随着建造年份和使用时间的增长,其结构逐渐出现不同程度的老化现象,有些已到了老龄期、退化期和更换期,甚至已到危险期。我国《文物法》规定,这类建筑物不能随便拆除,只能进行加固,并要保持原有历史面貌。图 1-4 为 1991 年经过鉴定加固后的东南大学礼堂(1930 年建,容有 3 000 人座位)。为了保证建筑物的安全使用,应尽可能采取有效措施延长其使用寿命,防止倒塌破坏。当今国内外专家对建筑物的使用寿命特别是剩余寿命特别关注,有众多学者从事这方面研究。通过对这类建筑物进行普查、搜集资料、现场检测、分析计算,按可靠性鉴定标准评定其结构的安全等级,推断其剩余寿命,为文物保护提供依据和合理的解决措施。可靠性鉴定大多数采用非破损检测方法。

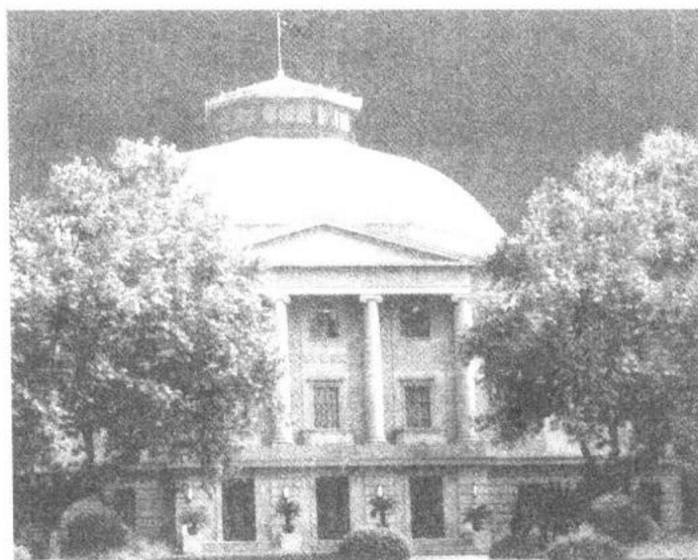


图 1-4 1991 年鉴定加固后的东南大学大礼堂(1930 年建成)

(4) 处理工程事故。通过现场检测和试验,为事故鉴定及处理提供依据。对一些建筑物在建造或使用过程中发现有严重缺陷(如设计或施工失误,使用了劣质材料,过度变形和裂缝等),或遭受地震、火灾、爆炸等原因而严重损伤的结构,往往需要通过对该建筑物的现场检测,了解实际受损程度和实际缺陷情况,进行计算分析,判断其实际承载力并提出技术鉴定结果和处理意见。

(5) 产品质量检验。对预制构件厂和大型工程现场成批制作的预制构件,在出厂和吊装前均应按国家标准要求进行抽样检验,以检查其产品质量水平。抽样频率、检验项目与检验方法在相关标准中均有详细规定

鉴定性试验一般是针对具体产品或具体建筑物所要解决的问题,而不是寻求普遍规律,试验主要在建筑物现场(实物试验)或在构件制作现场(实际产品)上进行。除特殊情况以外,一