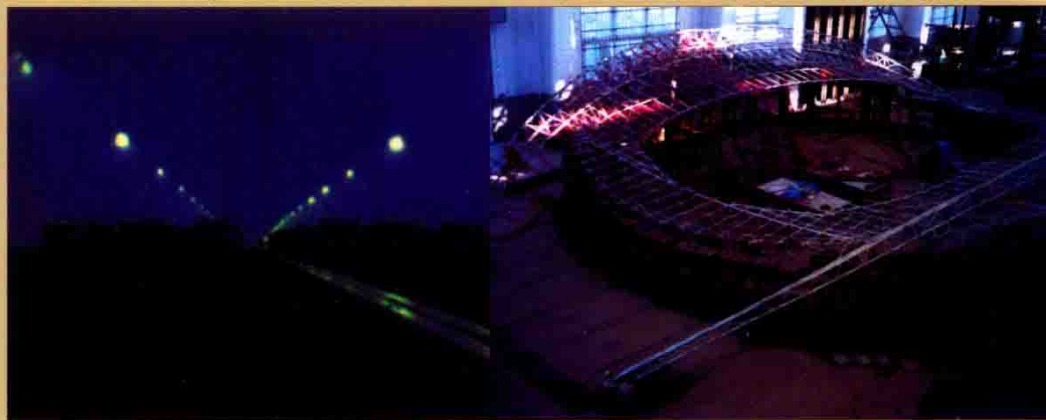


新世纪土木工程专业系列教材



# 土木工程结构试验与检测

TUMU GONGCHENG JIEGOU SHIYAN YU JIANCE


(第4版)

周明华 主编

周明华  
王晓佳 编著  
毕佳  
钱培舒

陈忠范 主审  
刘其伟



 东南大学出版社  
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

新世纪土木工程专业系列教材  
(建设部普通高等教育“十一五”规划教材)

# 土木工程结构试验与检测 (第4版)

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

东南大学出版社  
· 南京 ·

## 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与检测概论、试验荷载与加载方法、试验量测技术与量测仪表、工程结构模型试验、试验误差分析与数据处理等;中篇主要介绍土木工程结构荷载试验,内容包括工程结构静载试验、工程结构的动载试验、土木工程结构抗震试验、路基路面荷载试验;下篇主要介绍土木工程结构现场试验检测技术,内容包括工程结构物的现场非破损检测技术、路基路面工程现场检测、桥梁现场荷载试验与检测、地下结构工程的现场试验与检测、大跨度桥梁的健康监测等。

本书主要作为普通高等学校土木工程专业本科生和研究生教育使用的专业技术教材,也可作为电大、函大、网大、职业技术学院和专科教育的教材,亦可作为科研、试验、工程监理及设计、施工等相关工程技术人员专业技术参考书。

### 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. —4 版 —南京:  
东南大学出版社,2017. 8

ISBN 978-7-5641-7407-1

I. ①土… II. ①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. ①TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 208593 号

出 版 人 江建中  
出版发行 东南大学出版社  
社 址 江苏省南京市四牌楼 2 号东南大学校内  
邮政编码 210096  
网 址 <http://www.seupress.com>  
电 话 025-83793191(发行) 025-57711295(传真)  
印 刷 常州市武进第三印刷有限公司  
开 本 787mm×1092mm 1/16  
印 张 23.5  
字 数 586 千字  
版 印 次 2002 年 9 月第 1 版 2017 年 8 月第 4 版第 13 次印刷  
印 数 37001~42000 册  
书 号 ISBN 978-7-5641-7407-1  
定 价 46.00 元

(本社图书若有印装质量问题,请直接与营销中心联系。电话:025-83791830)

# 新世纪土木工程专业系列教材编委会

顾问 丁大钧 容柏生 沙庆林

主任 吕志涛

副主任 蒋永生 陈荣生 邱洪兴 黄晓明

委员 (以姓氏笔画为序)

丁大钧 王 炜 冯 健 叶见曙 石名磊 刘松玉 吕志涛

成 虎 李峻利 李爱群 沈 杰 沙庆林 邱洪兴 陆可人

舒赣平 陈荣生 单 建 周明华 胡伍生 唐人卫 郭正兴

钱培舒 曹双寅 黄晓明 龚维民 程建川 容柏生 蒋永生

# 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

## 第 4 版前言

本教材《土木工程结构试验与检测》是新世纪土木工程专业系列教材之一。自 2002 年第 1 版出版以来,被很多兄弟院校选用,已三次再版,累计 12 次印刷。2007 年被列为国家建设部普通高等教育“十一五”规划教材。

本次第 4 版修订,根据近几年国家相关规范和现场检测技术标准的修订和变更,重点对以下内容进行修订:第 10 章工程结构物的现场非破损检测技术,其中对混凝土结构采用回弹法、超声回弹综合法和钻芯法检测测区混凝土强度推定方法,以及对砌体工程采用原位轴压法、扁顶法等五种方法检测砌体工程的强度推定计算方法,混凝土内部钢筋和保护层检测方法等内容;第 11 章路基路面工程现场检测;第 12 章桥梁现场荷载试验与检测等。其他章节也进行了局部少量修改。

第 4 版修订仍由原作者负责进行。全书由周明华教授担任主编并负责统稿。

第 4 版仍由陈忠范教授(第 1~8 章和第 10 章)和刘其伟教授(第 9 章和第 11~14 章)担任主审。特别感谢两位教授在百忙中对本教材修订第 4 版的认真审查和所提出的宝贵修改意见。

本次修订还采纳了兄弟院校老师在使用本教材过程中提出的修改建议,在此一一表示衷心感谢!

第 3 版修订时应使用本教材的兄弟院校任课老师要求,提供了第 3 版教材课件 PPT。PPT 由本校任课教师编辑制作,仅供参考。第 4 版的教材课件希望各任课老师按各自的教学需要根据本版修订内容,对 PPT 进行相应修改。经过一轮教学实践后,我们将会提供更新后的 PPT。

同时也敬请专家、同行和读者对本版教材多提宝贵意见,并批评指正!(意见反馈邮箱:1910116486@qq.com)。

主 编 周明华

2017 年 7 月于东南大学

# 第 1 版前言

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的基本技能,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。

本教材是根据教育部 1998 年全国高校调整后的专业目录,为土木工程专业本科学生而编写的。为适应土木工程专业的需要,对教材内容的安排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,一是在原有《建筑结构试验》《路基路面测试与评价》《桥梁结构试验》等三本教材的基础上,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、地下工程施工监测以及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以外,增加了本学科领域部分前沿学科内容,以适应研究生的教学要求,同时可供从事本学科的科研人员、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最后统稿。

本教材的初稿采取分散审稿,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、舒贛平教授、吴刚博士、万水博士、王艳晗博士以及试验中心张蓓、邵扣霞等老师和南京长江二桥管理局章登精、陈研、郭志明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。教材中引用了有关兄弟单位的成果,特此一并致谢。

特别要指出的,在编写和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,特别表示感谢!由于编者的业务水平有限,编写中难免有漏误之处,敬请专家同行和读者批评指正。

主 编 周明华

2002 年 2 月 东南大学

# 目 录

## 上篇 土木工程结构基本试验方法

<b>1 土木工程结构试验与检测概论</b> .....	3
1.1 试验检测技术在土木工程学科中的作用与应用发展 .....	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 .....	6
1.4 土木工程结构试验的分类 .....	8
1.5 试验策划与试验的一般过程 .....	9
复习思考题 .....	16
<b>2 试验荷载与加载方法</b> .....	17
2.1 概述 .....	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 地震模拟振动台(地震荷载模拟) .....	25
2.7 产生动荷载的其他加载方法 .....	29
2.8 荷载试验加载辅助设备 .....	33
复习思考题 .....	34
<b>3 试验量测技术与量测仪表</b> .....	35
3.1 概述 .....	35
3.2 量测仪表的基本概念 .....	35
3.3 仪表的率定 .....	37
3.4 应力(应变)量测 .....	38
3.5 位移量测 .....	51
3.6 其他变形量测 .....	54
3.7 裂缝量测 .....	54
3.8 力的测定 .....	55
3.9 振动参量的量测 .....	56
3.10 光纤传感器的应用 .....	63
3.11 数据采集系统 .....	68
复习思考题 .....	69

<b>4 工程结构模型试验</b> .....	71
4.1 模型试验的基本概念 .....	71
4.2 模型试验的相似理论基础 .....	72
4.3 模型的分类 .....	78
4.4 模型设计 .....	79
4.5 模型材料与模型试验应注意的问题 .....	84
复习思考题 .....	87
<b>5 试验误差分析与数据处理</b> .....	88
5.1 概述 .....	88
5.2 间接测定值的推算 .....	88
5.3 静力试验误差分析 .....	88
5.4 试验结果的表达方法 .....	98
5.5 周期振动试验的数据处理 .....	103
5.6 实验模态分析简介 .....	104
复习思考题 .....	106

## 中篇 土木工程结构荷载试验

<b>6 工程结构静载试验</b> .....	109
6.1 概述 .....	109
6.2 静载试验加载和量测方案的确定 .....	109
6.3 结构静载试验实例 .....	112
6.4 静载试验量测数据的整理要点 .....	123
6.5 结构性能的检验(产品检验) .....	127
复习思考题 .....	130
<b>7 工程结构的动载试验</b> .....	131
7.1 概述 .....	131
7.2 工程结构动力特性的试验测定 .....	132
7.3 工程结构的动力反应试验测定 .....	139
7.4 工程结构疲劳试验 .....	142
7.5 工程结构的风洞试验 .....	146
复习思考题 .....	150
<b>8 土木工程结构抗震试验</b> .....	151
8.1 概述 .....	151
8.2 结构的伪静力试验(亦称低周反复加载试验) .....	152
8.3 结构拟动力试验 .....	166
8.4 结构模拟振动台的试验方法 .....	168

8.5 天然地震观测试验 .....	174
复习思考题 .....	179
<b>9 路基路面荷载试验 .....</b>	<b>180</b>
9.1 概述 .....	180
9.2 路基路面静载试验 .....	180
9.3 路基路面动载试验 .....	183
9.4 路面结构疲劳试验 .....	183
复习思考题 .....	187

## 下篇 土木工程结构现场检测

<b>10 工程结构物的现场非破损检测技术 .....</b>	<b>191</b>
10.1 工程结构物现场检测概论 .....	191
10.2 回弹法检测结构混凝土强度 .....	194
10.3 超声法检测混凝土强度 .....	197
10.4 超声回弹综合法检测结构混凝土强度 .....	198
10.5 钻芯法检测结构混凝土强度 .....	202
10.6 超声法检测混凝土缺陷 .....	203
10.7 混凝土结构内部钢筋检测 .....	209
10.8 砌体结构的现场检测 .....	211
10.9 钢结构现场检测 .....	217
10.10 火灾试验研究与火灾后结构物的现场检测 .....	221
复习思考题 .....	231
<b>11 路基路面工程现场检测 .....</b>	<b>232</b>
11.1 路面厚度与压实度的现场检测 .....	232
11.2 路面使用性能的现场测试方法 .....	239
11.3 路面强度与承载力现场测试 .....	245
11.4 路面抗滑性能的现场检测 .....	258
11.5 路面破损现场调查与测试 .....	267
11.6 路基路面检测新技术简介 .....	275
复习思考题 .....	276
<b>12 桥梁现场荷载试验与检测 .....</b>	<b>277</b>
12.1 概述 .....	277
12.2 实桥荷载试验 .....	277
12.3 索力检测与拉索护套管检查 .....	294
12.4 桥梁现场荷载试验实例 .....	303
复习思考题 .....	312

<b>13 地下结构工程的现场试验与检测</b> .....	313
13.1 地下结构工程的基本概念 .....	313
13.2 桩基静载试验 .....	313
13.3 桩承载力的荷载自平衡测试方法 .....	320
13.4 桩的动测法 .....	326
13.5 地下洞室工程的监测 .....	332
13.6 地下洞室工程施工监测实例 .....	336
复习思考题 .....	339
<b>14 大跨度桥梁的健康监测技术</b> .....	340
14.1 桥梁健康监测概论 .....	340
14.2 健康监测的主要监测项目 .....	342
14.3 健康监测中的新技术应用 .....	342
14.4 桥梁健康监测系统的设计 .....	346
14.5 苏通大桥健康监测系统实例 .....	349
复习思考题 .....	359
<b>主要参考文献</b> .....	360

# 上篇 土木工程结构基本试验方法



# 1 土木工程结构试验与检测概论

## 1.1 试验检测技术在土木工程学科中的作用与应用发展

土木工程结构试验与检测技术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 20 年来,由于计算机技术的广泛应用,推动了结构计算方法的发展,为采用数学模型方法编制计算软件,对结构进行计算分析创造了条件。但由于实际工程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。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,以及在使用阶段结构受灾和结构老化所产生的各种损伤积累、钢结构的疲劳和稳定等诸多问题;为寻求合理的设计方法,保证结构有足够的使用寿命和安全储备,只有通过结构试验研究才有可能获得解决。

由此可见,试验检测技术对土木工程学科发展中所要解决的难题有举足轻重的地位和作用,随着试验检测技术不断进步,促使结构试验由过去的单个构件试验向整体结构试验发展。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所应用的电液伺服液压技术等已打破了过去静载和动载试验的界限,能较正确地再现各种实际荷载作用。随着量测各种参数的智能化传感器技术的发展应用和量测数据的快速自动采集以及分析处理技术,加快了结构从线性到非线性阶段试验研究进程。因此,对地震和风荷载等产生的结构动力反应进行实测和实施结构控制技术,成为可能。

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、光纤微波通讯、GPS 卫星跟踪监控等多项新技术,并已在香港青马大桥、润扬大桥、南京长江二桥、南京长江三桥、深圳地王大厦等重要工程上实施与应用,对这些工程的安全健康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。展望未来,随着大数据时代的到来和云计算技术的发展应用,将转变人们对传统结构试验研究的思维方法。试验检测技术对结构物理现象的“因果性”认识固然重要,但土木工程结构现象统计的“相关性”与结构物理规律的因果关系同样重要。当下有识之士已开始运用大数据思维,不仅仅关注结构的抽样试验数据的因果性,而且注意搜集土木工程结构现象“相关性”统计信息,即土木工程结构变形协调与结构稳定平衡的关系,以及力的合理传递和结构损伤能量累积转移途径的相关性研究分析,由此获得的整体数据,再通过云计算寻找解决结构的安全性方法和结构损伤原因。



## 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,通过试验研究对各种结构寻求更合理的设计计算方法,或者为开发一种新材料、新结构和新的施工工艺而进行的系统性试验研究。试验对象是专为试验研究而设计制作的,它并不一定代表实际工程中的具体结构。因此在设计试件时,要求突出研究的主要因素而忽略一些次要影响因素。力求试验方法与试件受力状态合理,达到试验研究的预期目的。

研究性试验的规模和试验方法,根据研究的目的和任务不同,有很大差别。

(1) 验证结构设计理论的各种假定,寻求更合理的计算方法

在结构设计中,为了计算方便、精确,不是完全依靠编制设计软件能解决的。近几年有专家提出概念设计,这就要求人们对结构或构件的荷载作用计算图式和本构关系做一些具有科学概念的简化和假定,然后根据实际结构荷载作用模式通过试验加以验证,寻求合理的计算方法用于实际工程中的结构计算。如编制“混凝土结构设计规范”时,对于钢筋混凝土受弯构件斜截面抗剪强度计算方法,要想通过数学解析方法确定计算方法是有难度的。因此,编制组曾组织多个单位对影响受弯梁抗剪强度的主要影响因素进行了大量试验研究,试件多达几百个,得出了趋于安全和较为合理的带有半理论的经验系数公式,即现行“混凝土结构设计规范”所采用的受弯构件斜截面抗剪强度计算公式。其中公式中表达的混凝土、箍筋、弯起钢筋、预应力筋等所起的抗剪作用,以及不同荷载作用方式和不同剪跨比所产生的影响的相关修正系数,都是根据试验研究结果经过统计分析而得出来的。

(2) 为一些大型特种结构谋求设计依据

对于实际工程中处于不同条件的特种结构,例如海洋石油平台、核电站、仓储结构、网壳结构、地下洞室等,仅应用理论分析的方法是不够的,还要通过结构试验的方法进行验证,为实际工程提供设计依据。1976年唐山大地震中,开滦煤矿3000t容量的煤仓被震坏。煤仓的钢筋混凝土主体结构是由筒体、圈梁、折板形底板和立柱等组合而成的空间结构,是上世纪50年代由波兰政府援建的项目。为研究煤仓在地震中震坏的原因和重建新煤仓,采用原煤仓1:100的有机玻璃试验结构模型进行试验研究(如图1-1所示)。探索原煤仓在弹性工作阶段的设计内力及设计方法存在的缺陷,结构各部件的设计应力与变形是否超出设计允许范围,并探测仓储结构的自振频率。



图1-1 唐山开滦煤矿的煤仓1:100有机玻璃模型试验