



国家级实验教学示范中心
“土木工程实验教学中心”系列实验教材
西南交通大学“323实验室工程”系列教材

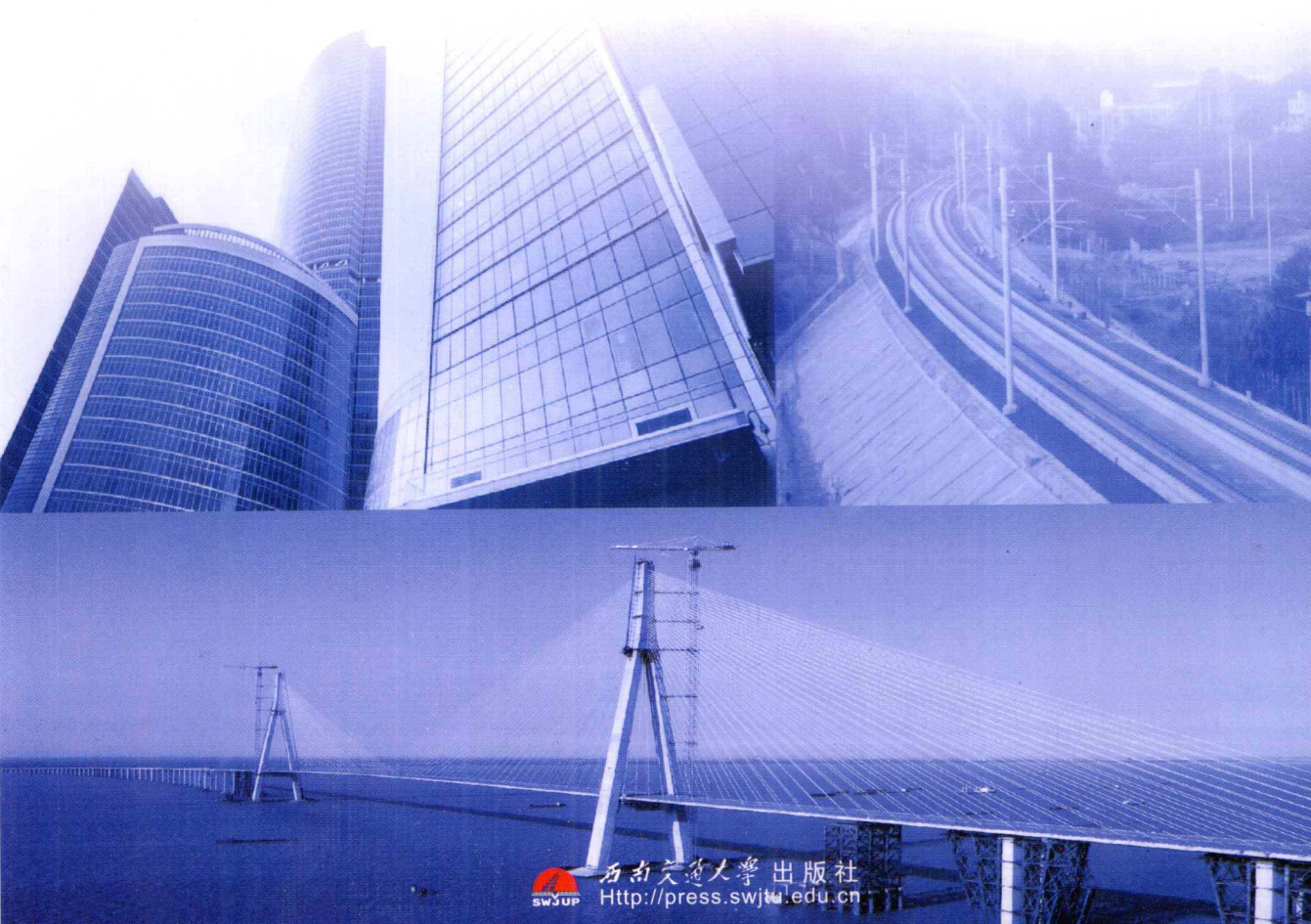
工程结构检测与试验技术

**GONGCHENG JIEGOU JIANCE YU
SHIYAN JISHU**

主编 冯 岚 张 扬

主审 蒲黔辉

西南交通大学实验室及设备管理处



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

国家级实验教学示范中心

“土木工程实验教学中心”系列实验教材

西南交通大学“323 实验室工程”系列教材

工程结构检测与试验技术

主编 冯 岚 张 扬

主审 蒲黔辉

西南交通大学实验室及设备管理处

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

工程结构检测与试验技术 / 冯岚, 张扬主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2009.9
(国家级实验教学示范中心“土木工程实验教学中心”系
列实验教材. 西南交通大学“323 实验室工程”系列教材)
ISBN 978-7-81104-942-8

I. 工… II. ①冯…②张… III. 工程结构—检测—高等
学校—教材 IV. TU3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 094057 号

国家级实验教学示范中心
“土木工程实验教学中心”系列实验教材
西南交通大学“323 实验室工程”系列教材

工程结构检测与试验技术

主编 冯岚 张扬

*

责任编辑 张波

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都市二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm×260 mm 印张: 17.125 插页: 2

字数: 425 千字 印数: 1—3 000 册

2009 年 9 月第 1 版 2009 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81104-942-8

定价: 26.80 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

土木工程结构检测与试验技术是检验结构可靠性以及研究和发 展工程结构新材料、新体系、新工艺，探索结构设计新理论的重要手段，在工程结构科学研究和技术革新等方面起着重要的作用。它与结构设计、施工技术以及土木工程结构学科的发展有着密切的关系。土木工程结构检测与试验技术在工程结构领域的运用越来越多，并成为土木工程专业学生必须掌握的理论知识和试验技能。

土木工程结构检测与试验技术属于土木工程专业的一门专业技术课程，教学中通过理论及试验两大环节，使学生初步了解和掌握工程结构检测与试验方面的基础知识和基本技能，能够进行一般工程结构检测与试验的规划和检测，并能对结构可靠性进行初步评定，同时学会用试验手段验证结构的计算理论。

本教材面向土木工程专业本科学生，主要阐述工程结构检测与试验的基本原理、主要技术手段以及在工程实践中的应用。教材编写的指导思想：一是力求涵盖建筑、桥梁、岩土、隧道等土木工程各学科领域的试验检测技术；二是力求反映科学技术的最新发现与最新成就，在阐述传统试验方法及手段的基础上，着重介绍国内外最新发展的试验理论及方法，特别是对既有结构质量及损伤状况无损检测的多种技术方法进行了介绍，并阐述了各种检测试验方法的优缺点；三是注意理论与实践相结合，在阐明结构检测与试验基本原理的基础上，重点介绍检测与试验方法与技能，通过理论与实践的紧密结合，培养学生的实践经验，能够更好地将理论知识应用到实践中；四是列举一些常用检测试验类型的实例，在实例中详细介绍了工程结构检测与试验的基本过程、原则及数据处理方法，增强学生的实践经验。

本教材共分工程结构检测与试验概述、结构荷载试验的数据采集及常用量测仪器、结构试验的加载方法及加载设备、结构静力检测与试验、结构动力检测与试验及结构现有质量状况的无损检测技术六章，由冯岚、张扬主编，蒲黔辉教授主审，张子璐、朱俊老师分别参与了第四章和第六章部分内容的编写，并参与了教材校核工作。同时，在编写的过程中得到了赵人达教授、赵世春教授、杨永清教授、夏招广高级工程师、余川高级工程师、薛爱高级工程师、刘海波讲师、伍星工程师的大力协助，以及众多同事的帮助。

本书在编写过程中参考了大量文献及试验成果，不论书中是否列出，在此一并致谢！

由于编者业务水平有限，时间仓促，编写中难免有疏漏、错误存在，在今后教材使用过程中将逐步进行修改完善。

编 者
2009.8

目 录

1 工程结构检测与试验技术概述	1
1.1 土木工程结构检测与试验的定义及任务	1
1.1.1 土木工程结构检测与试验的意义与发展前景	1
1.1.2 土木工程结构检测与试验的目的及定义	3
1.2 土木工程结构检测与试验的类型	6
1.2.1 按检测及试验的对象分类	6
1.2.2 按检测与试验的性质分类	7
1.2.3 按检测与试验时间长短分类	9
1.2.4 按检测与试验是否破坏分类	9
1.2.5 按进行检测与试验场地分类	10
1.3 土木工程结构检测与试验的一般过程	10
1.3.1 检测与试验的规划设计阶段	11
1.3.2 检测与试验的现场准备阶段	13
1.3.3 检测与试验的正式实施阶段	14
1.3.4 检测与试验的分析评定阶段	14
思考题	16
2 结构荷载试验的数据采集及常用测量仪器	17
2.1 概 述	17
2.1.1 数据采集仪器的组成	17
2.1.2 数据采集仪器的测量方式	18
2.1.3 测量仪器的分类	18
2.1.4 测量仪器的主要性能指标	19
2.1.5 测量仪器的选择	21
2.1.6 数据采集原则	21
2.1.7 数据记录与处理原则	22
2.2 电阻应变计及其应变测量	23
2.2.1 电阻应变计	24
2.2.2 用电阻应变计测量应变	28
2.2.3 电阻应变计的基本工作原理	35
2.2.4 应变测量要考虑的因素	36
2.3 其他常用测量仪器	36
2.3.1 位移传感器	36

2.3.2	荷载传感器	39
2.3.3	裂缝观测仪	40
2.3.4	测振传感器	41
2.3.5	光纤光栅式传感器	49
2.4	数据采集系统	51
2.4.1	数据采集系统的组成	51
2.4.2	数据采集的过程	53
	思考题	54
3	结构荷载试验的加载方法及加载设备	56
3.1	概 述	56
3.1.1	作用在结构上的常见荷载类型	56
3.1.2	荷载试验的一般过程	56
3.1.3	结构试验荷载设备的类型及选用原则	57
3.2	静力试验加载方法及设备	57
3.2.1	重力加载法	57
3.2.2	机械力加载法	59
3.2.3	气压加载法	60
3.3	激振加载方法及设备	61
3.3.1	冲击力加载——自由振动法	61
3.3.2	电磁激振加载法——强迫振动法	63
3.3.3	环境随机振动激振法——脉动法	63
3.4	液压加载法及设备	64
3.4.1	液压加载器	64
3.4.2	液压加载系统	65
3.4.3	电液伺服加载系统	66
3.4.4	地震模拟振动台	67
3.5	荷载支承、传递及反力装置	68
3.5.1	试件支承装置	68
3.5.2	荷载传递装置	72
3.5.3	荷载反力装置	73
3.5.4	试验台座	73
3.5.5	现场试验反力装置	74
	思考题	75
4	结构静力检测与试验	76
4.1	概 述	76
4.1.1	结构静力荷载类型	76
4.1.2	结构静力检测与试验的目的与定义	76
4.1.3	结构静力检测与试验的分类	77

4.1.4 结构静力试验的优点	77
4.1.5 结构静力试验的常见的结构构件类型及主要研究内容	77
4.1.6 结构静载试验的现状与未来展望	78
4.2 结构静力试验方案	78
4.2.1 确定加载方案	78
4.2.2 确定量测方案	84
4.3 结构工程中常见构件类型静力试验设计	85
4.3.1 受弯构件的试验	85
4.3.2 压杆构件的试验	92
4.3.3 桁架试验	93
4.4 房建结构现场静载试验设计	97
4.4.1 试验荷载布置	97
4.4.2 试验观测	100
4.5 桥梁结构现场静载试验设计	101
4.5.1 桥梁试验孔(墩、台)的选择	101
4.5.2 检查架与仪表架的搭设	101
4.5.3 加载方案与实施	101
4.5.4 观测项目的确定	103
4.6 桩基静载试验设计	103
4.6.1 试验方案的确定	104
4.6.2 试验加载方法	104
4.6.3 试验测量方法	105
4.7 静载试验实施过程	105
4.7.1 试验观测与记录	106
4.7.2 终止加载条件及结构极限承载力的确定	107
4.8 静力试验数据的整理	108
4.8.1 原始数据的初步整理	108
4.8.2 结构变形的计算	109
4.8.3 试验结果的表示	113
4.9 结构性能的检验与评定	116
4.9.1 构件性能检验与评定的项目与标准	117
4.9.2 桥梁结构现场荷载试验工作状况评定	118
4.10 静力荷载试验检测实例	119
4.10.1 实例一 四川南充某拱桥静载检测	119
4.10.2 实例二 南京长江第三大桥静载试验	124
4.10.3 实例三 静载法检测某单桩竖向抗压承载力	141
思考题	144

5	结构动力检测与试验	146
5.1	概 述	146
5.1.1	结构动力荷载类型及特点	146
5.1.2	结构动力检测与试验的主要内容	146
5.1.3	动力检测与试验准备	147
5.2	结构动力特性试验	148
5.2.1	动力特性试验的目的	148
5.2.2	试验方法分类	149
5.2.3	人工激振法测量结构动力特性	149
5.2.4	用环境随机振动法测量结构动力特性	152
5.2.5	测量结构动力特性时激振力及传感器的布置原则	157
5.2.6	自由振动法、强迫振动法和脉动法的特点及应用	158
5.2.7	结构动力特性试验实例	159
5.3	动荷载特性检测	165
5.3.1	主振源探测	166
5.3.2	振源动力特性测试	167
5.4	结构动力反应试验	167
5.4.1	动应力的测定	167
5.4.2	动位移的测定	167
5.4.3	动力系数的测定	168
5.4.4	动力系数的测定实例(南京长江第三大桥无障碍及有障碍行车的动力系数测定)	169
5.5	结构疲劳性能试验	173
5.5.1	结构疲劳试验的目的	173
5.5.2	疲劳检测项目	174
5.5.3	疲劳试验技术参数	174
5.5.4	试验加载程序	174
5.5.5	疲劳试验观测设计	176
5.5.6	模型疲劳试验实例(某钢-混凝土组合桥面板模型疲劳试验)	176
5.6	结构抗震试验	181
5.6.1	低周反复加载试验	182
5.6.2	地震模拟振动台试验	197
5.6.3	拟动力试验	199
	思考题	202
6	既有结构质量及损伤状况的无损检测技术	204
6.1	概 述	204
6.1.1	既有结构质量及损伤状况的检测目的	204
6.1.2	常用无损检测方法的分类及其检测内容	205

6.2 混凝土强度的现场检测及推定	205
6.2.1 混凝土强度的现场检测的基本理论及分类	205
6.2.2 无损检测法测定混凝土强度	207
6.2.3 半破损检测法测定混凝土强度	215
6.2.4 非破损法和半破损法的比较和综合使用	219
6.3 混凝土缺陷的检测	220
6.3.1 超声法检测混凝土缺陷	220
6.3.2 低应变反射波法检测桩基完整性	238
6.3.3 冲击回波法检测混凝土缺陷	245
6.3.4 红外成像	246
6.3.5 雷达法检测混凝土缺陷	248
6.3.6 实例：108 国道某隧道雷达法无损检测	251
6.3.7 几种混凝土缺陷检测方法的比较	253
6.4 钢筋混凝土结构内部钢筋检测技术	253
6.4.1 钢筋位置、直径及保护层厚度的检测	253
6.4.2 钢筋锈蚀程度的检测	254
6.5 砌体结构的现场检测技术	255
6.5.1 概 述	255
6.5.2 砌体强度的检测法	256
6.6 钢结构的现场检测技术	258
6.6.1 钢材强度测定	258
6.6.2 超声法检测钢材和焊缝缺陷	259
6.6.3 磁粉探伤与射线探伤法	260
思考题	260
参考文献	262
附 图	265

1 工程结构检测与试验技术概述

1.1 土木工程结构检测与试验的定义及任务

1.1.1 土木工程结构检测与试验的意义与发展前景

随着科学技术的进步和国家基础设施建设的大力推进,我国城镇建筑及交通运输业的发展取得了举世瞩目的成就。基础设施建设的推进,使我国居民的居住环境得到很大程度的改善,缓解了日益严峻的交通问题;此外,也为我国的建筑设计、工程施工提供了较多的发展机遇。同时,市政建筑和工程结构的美学需求也对当前不断发展的施工工艺技术提出了更高的要求。

土木结构的工程质量除了与人身和公共财产的安全息息相关外,还要满足技术、美学、发展等多方面的要求,这对工程技术人员提出了更高的要求。因此,必须真正地将基本结构理论、计算理论、施工理论、工程美学等多学科知识,很好地应用于工程实践,在确保结构安全性能得到满足的同时,兼顾人文因素来进行工程建设。这样,结构检测与试验的重要性越来越直接地体现在工程实践中,成为结构工程投入运营前不可缺少的环节。

土木工程结构通常包括建筑结构、桥梁结构、地质结构、隧道结构、水工结构、土工结构及各类特种结构(如高耸结构和各种构筑物)等。这些工程结构都是以各种工程材料为主体构成的不同类型的承重构件相互连接而成的组合体。为满足结构在功能、使用及美观上的要求,必须保证这些结构在规定的使用限期内能安全有效地承受外部及内部产生的各种作用。从土木工程结构的建设及使用过程中可以看出,影响结构可靠性和安全性的主要因素包括结构设计的合理性、施工的质量、使用的情况以及结构的自然老化等。

对于任何一个工程结构,在正式投入使用之前,首先必须进行严格、合理的设计,而在结构设计时首要必须考虑的因素是结构的安全性。土木工程结构在整个生命周期中,除了承受正常的使用荷载外,还会遇到各种风险,即各种非正常外界活动的影响,如地震、风力和冲击波等特种荷载。因此,结构设计必须考虑足够的安全储备。其次,要考虑结构的经济性,不能无限制地加大结构的安全度,必须在建设方能够承受的经济条件下设计出安全、合理、经济的结构。另外,还要考虑结构的实用性和美观性。例如,在桥梁结构、大型厂房中的跨度是主要的考虑因素,民用建筑中更多地要考虑室内平面布局的合理性。但是在保证实用性的同时,为了使结构的外观美观,则需要采取一些非常规的设计手段,如采用一些异型结构等。为此,工程技术人员为了进行合理的设计,必须掌握在各种作用下结构的实际应力分布和工作状态,了解结构构件的刚度、抗裂性能以及实际所具有的强度及安全储备。要判断结构是否能够满足使用及安全要求,必须全面了解结构的应力分布及工作状态。在进行结构应力及工作状态分析过程中,一方面可以采用传统的理论计算方法,另一方面可以利用试验方法,即通过结构荷载试验,采用试验应力分析方法来解决。这两种方法是相辅相成的。

因此,从设计角度看,对于常见结构,而且是在计算理论已经非常成熟的条件下,理论计算能够较准确地计算出结构的实际承载能力,但是对于新型或异型结构,就不能完全依靠

理论计算了, 必须通过试验才能真正了解结构的实际工作情况。从土木工程结构历史的发展过程中, 我们可以看出, 传统的理论计算方法也是建立在结构试验的基础上的, 大部分的理论预言都是通过试验来证实的。新的试验技术(包括仪器、设备、方法等)能够向人们揭示新的事实, 提出新的问题, 导致新的假设和新学说的出现。结构理论和结构试验在土木工程结构历史上的相互关系也是如此。

其次, 结构设计完成后, 就是施工环节。在结构的施工过程中, 经常会出现因施工管理不完善及一些意外因素导致施工质量差的情况出现, 从而使结构的承载能力降低, 如, 混凝土强度达不到设计要求, 混凝土振捣不够使混凝土出现蜂窝、麻面、空洞等不密实的情况, 混凝土养护不好出现温度裂缝, 混凝土内部钢筋定位不准确, 钢筋直径不满足设计要求, 桩出现断桩、缩颈, 钢结构焊缝出现裂纹等。

最后, 在结构正式投入使用后, 还会出现超载、地震等自然灾害的伤害以及结构老化等问题。这些造成结构损伤的因素是无法预知的, 由此产生缺陷的位置、大小及其对结构的损伤程度也是无法控制和计算的, 在这种情况下, 必须通过结构现场检测来确定既有结构的现状(如结构损伤程度、老化程度、剩余寿命等)及在设计荷载下结构是否满足规范要求。

因此, 土木工程结构检测与试验是检验结构安全性的重要方法。“结构试验”主要用于发展结构理论, 在结构工程学科的发展演变过程中形成的由结构试验、结构理论与结构计算三级构成的新学科架构中, 结构试验本身也成为一门真正的试验科学, 而且通过试验能够将经过验证的新的结构理论推广到实践中去; 而“结构检测”主要用于解决实际工程问题, 是鉴定结构可靠性、安全性以及是否能满足现有规范要求的主要手段之一和重要依据。科学实践是人们正确认识事物本质的源泉, 可以帮助人们认识事物的内在规律。在结构工程学科中, 人们为了正确认识结构的性能和不断深化这种认识, 结构检测与试验技术是一种已被实践所证明的行之有效的办法。

随着结构试验检测仪器及设备的不断改进和新的试验检测方法的不断完善, 对结构工作性能进行的分析、对结构可靠性进行的评价也越来越准确, 因此结构试验检测技术已经不仅仅是应用于对结构的一般工作性能进行评价了, 而是应用到土木工程结构的各个领域。如在结构荷载试验方面, 随着非电量电测、自动控制和电子计算机技术的发展, 不仅为用数学模型方法进行计算分析创造了条件, 同样利用计算机控制的结构荷载试验, 为实现荷载模拟、数据采集和数据处理, 以及整个试验实现自动化提供了有利条件, 使结构试验技术的发展产生了根本的变化。人们利用计算机控制的多维地震模拟振动台可以实现地震波的人工再现, 模拟地面运动对结构作用的全部过程; 用计算机联机的拟动力伺服加载系统帮助人们在静力状态下量测结构的动力反应; 由计算机完成的各种数据采集和自动处理系统可以准确、及时、完整地收集并表达荷载与结构行为的各种信息。由此可见, 计算机大大加强了人们进行结构荷载试验的能力, 特别是以前不容易实现的结构动力试验。同时, 结构现场检测技术的飞速发展, 使人们摆脱了只能通过荷载试验才能评定既有结构工作性能的单一方法, 并且避免了荷载试验只能确定结构现有承载能力的局限性, 结构检测技术可以对结构现状进行多方面的观测和诊断, 如结构老化程度、结构剩余寿命、结构损伤情况等, 这就为结构可靠性评定奠定了科学的依据。

今天, 科学试验已经作为一种独立的社会实践广泛地应用在工程结构领域, 它将有力地促进生产的发展。“土木工程结构检测与试验”将与其他科学试验工作一样, 对建筑科学的发展产生巨大的促进和推动作用!

1.1.2 土木工程结构检测与试验的目的及定义

土木工程结构检测与试验就是一个对结构实施各种试验方法,然后运用各种测试手段观测和分析结构状态,并对结构工作性能进行评价的过程。土木工程结构检测与试验的主要任务是通过各种不同的手段及方法,确定结构工作性能和实际承载能力、检测结构的内在质量、分析结构病害原因及其变化规律等,并准确判断结构的实际工作情况。但是,根据土木工程结构试验检测在实际中不同的应用,我们对试验和检测的定义也不相同,结构试验主要用于科学研究性领域,而结构检测是对即将或已经投入使用的结构的安全性进行评价。

上世纪80年代以前,我国的结构试验主要应用于建筑结构构件的设计理论,因此试验对象通常是将结构中的某一部分做成不同类型的试件,然后对其进行荷载试验,这就是通常意义上的科学研究型试验。从90年代起,我国的结构试验的重心开始从理论研究向工程检测方向转移,其主要原因是:一方面由于我国对结构工程施工的质量鉴定越来越重视,目前几乎每一个重要的、新型的结构都是经过规模或大或小的检验后才投入使用;另一方面,既有结构安全可靠鉴定及改扩建工程的项目也越来越多,而这些都是必须以检测结果为依据。因而,现在的结构现场检测与评定占据了越来越重要的地位。

1.1.2.1 土木工程结构试验——科学研究性试验

土木工程结构试验通常采用传统的荷载试验方法,根据理论计算结果对结构有计划、有目的地施加荷载作用(如重力、机械扰动力、地震力、风力……)或其他影响作用(如温度、变形等),然后对其性能进行观测,并对结构构件在荷载作用下的测量参数(如变形、挠度、应变、振幅、频率……)进行分析,研究不同形式的结构在不同荷载作用下的变化规律,达到对所研究结构构件的工作性能做出评价,对承载能力做出评定,并为验证和发展结构的计算理论提供可靠分析依据的目的。

科学研究性试验具有研究、探索和开发的性质,其目的在于验证结构设计的某一理论,或验证各种科学的判断、推理、假设及概念的正确性,或者是为了建立某种新型结构体系及其计算理论,而有系统地进行的试验研究。

科学研究性试验的试验对象即试件,它可能是研究任务中的具体结构,但更多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。因而,研究性试验的试件都是针对某一研究目的而设计和制作。研究性试验一般都在室内进行,需要使用专门的加载设备和数据测试系统,以便对受载试件的变形性能作连续观察、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. 验证结构计算理论的假定

大部分结构设计的计算方法都是通过试验验证的。如对于像离散性较大的钢筋混凝土结构,只依靠传统的理论计算方法是不能精确地分析出其内部的受力情况的,必须通过大量的试验来得出其规律;又如人们经常为了计算上的方便,对结构构件的计算图式和本构关系作某些简化的假定,这些简化的假定是否合理、其精确程度如何,也要通过试验来验证。

2. 为制定设计、检测规范提供依据

根据每个国家和地区的具体情况,都要制定不同的设计规范。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的成果和经验以外,还进行了大量钢筋混凝土结构、砖石砌

体结构和钢结构等构件的足尺和缩尺模型的试验,以及实体结构物的试验研究,为编制各类符合我国实际情况的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砖石结构的计算理论,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在发展设计理论和改进设计方法上的作用。除了设计规范外,我国结构检测规范中规定的各种检测方法、检测数据的分析计算方法以及结构安全性评定的原则,也都是通过各种形式科学研究性试验,对大量的数据进行分析后制定的。

3. 为发展和推广新结构新材料与新工艺提供实践经验

随着建筑科学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钢种的应用,薄壁弯曲轻型钢结构的设计推广,升板、滑模施工工艺的发展,以及大跨度结构、高层建筑与特种结构的设计施工等。但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完善。如近年来已经投入运营的香港西部铁路,是目前世界上最环保、最安静的一条铁路线,其结构完全不同于现有的轨道系统,为浮板轨道系统(Floating Slab Track System),为验证该系统设计的合理性、所选用新材料(钢纤维混凝土和黏结混凝土与螺栓用的高强环氧树脂等)以及全新设计的各种连接件(如轨底板及其与钢轨之间的扣件等)的可靠性,进行了大量的疲劳及静载试验。又如重庆市跨座式单轨交通系统,也是我国目前较先进的城市交通系统。它作为城市快速客运交通系统,具有运量大、方便快捷、爬坡能力强、可以适应小半径曲线的特点,为验证其设计的合理可靠性,对其直梁、曲梁及其相应支座进行了系统模拟试验,试验包括PC梁的抗弯疲劳、梁端抗剪疲劳、抗扭、抗弯开裂、重裂和破坏试验,以及外观尺寸测量、CT检测和解剖试验,为我国形成对该类型梁的鉴定检测标准及今后该项技术的发展奠定了基础。

4. 为开发研制新型检测理论、方法与仪器提供技术支持

随着对土木工程的质量的要求越来越高,传统的手段与设备已经远远不能满足试验检测的要求,在近20年的发展中,许多新型的检测理论、方法与仪器已经普遍地运用在土木工程检测与试验中。如回弹法、超声法等检测混凝土抗压强度,超声法等检测混凝土缺陷,低应变反射波法检测桩基完整性,超声波法、射线法、磁粉法等检测钢材缺陷,原位轴压法检测砌体结构强度等。而结构的这些特性与相关检测参数的关系曲线,就是通过大量严谨的科学试验后建立的。随着试验检测技术的更进一步研制开发,红外线法、冲击回波法等更新型的试验检测理论与方法也越来越多地应用在土木工程试验检测领域。

1.1.2.2 土木工程结构检测——生产鉴定性检测

土木工程结构检测是在不破坏结构或不影响结构承载能力的前提下,通过对结构实施设计荷载下的荷载试验,或检测影响结构承载能力的主要材料的相关参数与特性,评定结构目前的承载能力、现有质量及损伤状况以及结构剩余寿命的过程。这是近20年我国结构试验的主要应用方向,目前已经在评定结构安全可靠方面得到广泛应用,是鉴定结构可靠性的重要手段和依据。

既有结构现场检测是非探索性的,一般是在比较成熟的试验检测理论基础上进行的,其目的是为检验结构工程的质量或鉴定既有结构的性能等所实施的检测工作,因此结构检测就与科研性试验在测试方案制订、测试过程、数据分析及结果评定等方面有很大的区别。科研

试验工作是在对结构没有详细、确切的了解下实施的测试工作，是在不断探索、改进、调整中进行的；而结构检测的理论已经比较成熟，目前我国有许多检测规范，这些规范对结构检测及评定过程进行了详细的规定，检测工作是在这些规范的严格要求下实施的，检测数据的分析及结构性能评价也是根据相应的设计、施工及验收规范进行的。

根据检测目的的不同，土木工程结构检测又可分为结构工程质量的检测和既有结构现状的检测。结构工程质量检测的主要目的是检测结构施工质量，为工程结构的验收提供依据。既有结构的现状检测主要在既有结构的原有施工、设计资料缺乏，对结构施工情况不了解，结构受到外界因素影响导致损伤的情况下采用，为判断实际结构的真正承载能力提供了强有力的试验手段和方法。土木工程结构检测的主要内容是检测影响结构工作性能的关键指标，如强度、损伤、配筋情况等。

土木工程结构检测具有直接的生产目的，通常以真实的实际建筑物或结构构件作为试验鉴定的对象，过去也称为生产鉴定性试验，这类试验主要应用于以下几个方面：

1. 综合鉴定结构设计和施工的可靠程度

对于一些大型、重要的工程项目，除了在设计阶段进行必要而大量的试验研究以证实其设计的合理性外，还要在结构建成及正式使用之前对结构进行总体的性能检验，通过试验综合性地鉴定其整体设计的合理性及施工质量的可靠程度。如厦门海沧大桥、南京长江第二和第三大桥建成后，对成桥进行了静、动载试验，通过试验证明其整体结构性能良好，能够满足设计使用的要求。

2. 检验预制构件或部件的结构性能，判定构件的设计及制作质量

对于预制构件厂或建设工地生产的预制构件，为保证整批构件的整件质量，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. 判断既有结构的实际承载能力，估计结构的剩余寿命，为工程改建和加固提供依据

首先，通过检测可以确定结构目前的实际情况，为结构的改扩建和加固提供依据。在结构的实际使用过程中，为了满足当前的使用要求（如生产车间为加大生产能力需要提高车间的起重能力，建筑抗震需要提高抗震烈度，结构需要加高、加宽，桥梁需要提高通车能力等），必须要对结构进行改建和加固。这时往往需要通过试验实测及分析，从而确定原有结构物的实际潜力，特别是在缺乏既有结构的设计图纸及施工资料的情况下，更要通过试验来确定这些结构的潜在能力。如四川资阳某桥，为满足目前的交通能力需要进行加宽，通过荷载试验，鉴定了该桥的现有承载能力能够满足今后交通发展的需求。

其次，通过检测可以检验和鉴定已建结构物的可靠性。这类结构一般是指经过几十年的使用，发生过异常变形、局部损伤和材料老化（如混凝土经过长期使用会产生碳化现象，导致混凝土开裂，混凝土内钢筋锈蚀等等），继续使用时人们对其安全性及可靠性持有怀疑。鉴定这类结构的性能首先应进行全面的科学调查。调查的方法包括观察、检测和分析。检测手段大多采用无损检测方法。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可靠性鉴定规程的有关规定进行。

第三，由于各种因素导致工程结构在施工过程中停工的情况在目前较为常见，过了相当

长一段时间之后又重新开始施工,这就要对原来的施工情况进行评估。例如,成都某商住楼地下室刚刚完工,由于种种原因停工,几年之后继续修建。新的施工单位没有以前的施工资料,又由于停建期间地下室灌入3 m多高的水以防止地下水的浮力将地下室浮起,并且楼板及梁有较多裂缝,因此在重新开工之前,必须对原有结构进行鉴定,检测内容主要为混凝土强度、混凝土内钢筋锈蚀情况、裂缝宽度及深度等。

4. 为处理工程事故提供技术依据

在结构的使用过程中会遭受地震、火灾、水灾、爆炸等灾害,从而使结构受到损伤,或在建造和使用过程中,结构发现有严重缺陷(因施工质量事故、结构超载产生过度变形和严重开裂等),往往有必要对结构进行详细的检验,检验之后判断结构是否能继续使用或是否需要加固处理等。例如四川德阳某铸造车间在使用过程中曾经发生过锅炉爆炸,而且由于该车间为铸造车间,使用环境非常恶劣,造成其普通混凝土屋架开裂严重,经检测断定该屋架现有的承载能力已不能满足使用的需要,必须进行加固。又如四川什邡某仓库,使用过程中超载,造成混凝土柱开裂,经检测判断结构还可以继续使用,但要降低使用承载能力。

1.2 土木工程结构检测与试验的类型

从前面的叙述中可以看出,目前的土木工程结构试验和检测常用的方法与手段主要分为结构构件荷载检测与试验和结构现有质量及损伤状况检测与试验两大类。在这两大类型的检测与试验中,又根据试验对象、试验性质、试验时间、破坏与否、试验场地等不同因素进行分类。

1.2.1 按检测及试验的对象分类

在土木工程结构试验及检测中,按照试验对象可以分为真型试验和模型试验。

1. 真型检测与试验

真型试验的试验对象是实际结构(实物)或者是按实物结构足尺复制的结构或构件,主要用于对既有结构进行的检测鉴定。例如成桥检测及房屋鉴定等试验,属于对整体结构进行试验的类型,这类试验一般在现场进行,都是对实际结构或构件施加设计荷载,确定结构实际承载能力,或为确定组成结构的材料的实际情况,在实际结构构件上利用各种检测手段对结构材料的相关指标进行实地检测,从而能真实地反映出结构的实际情况。另一种是对整体结构中的某一部位进行荷载试验,如实际结构中的或按足尺比例复制的梁、板、柱或屋架,前面所述的香港西部铁路FST系统试验及重庆轻轨PC梁、支座的试验均属此类试验。通过对足尺结构物施加荷载,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进行全面观测了解。真型试验的优点在于试验直接在实际的结构上进行,能够真实反映结构的受力状态及实际情况,但是由于真型试验需要在实际结构上进行,或需制作较大尺寸的构件,导致投资大、周期长、加载难度大,测量精度受环境因素等影响,有时在物质或技术上存在一定的困难。

2. 模型检测与试验

对于结构荷载试验,由于真型试验存在上述问题,因此在结构的设计方案阶段,进行初步探索比较或对设计理论计算方法进行探讨研究时,可以采用比真型结构缩小的模型进行试验。

重庆万州长江大桥全长 420 m,在设计阶段要求对所采用的结构设计方法及理论进行试验论证,因此在试验室内制作了一个 1:10 的模型,对模型进行静力试验,并利用试验结果对结构的设计进行指导。而对于结构的动力荷载下的性能研究,如抗震、抗风性能,需要将结构放在地震振动台或风洞中进行试验,考虑到试验设备的加载能力,必须将结构按一定的比例进行缩小才能进行试验。而制定相应的各种规范通常是在大量经过力学分析后抽象出来的模型上进行。

模型试验的试验对象是仿照真型(真实结构)并按照一定比例关系复制而成的试验代表物——模型,它具有实际结构的全部或部分特征,但尺寸却是比真型小得多的缩尺结构。模型试验一般用于科学研究性试验。

模型的设计制作与试验是根据相似理论,用适当的比例尺和相似材料制成与真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),使模型受力后重演真型结构的实际工作,最后按照相似理论由模型试验结果推算实际结构的工作性能。对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。

由于严格的相似条件给模型设计、制作和试验带来一定困难,因此,在结构试验中尚有另一类型的模型,它仅是真型结构缩小几何比例尺寸的试验代表物,将该模型的试验结果与理论计算对比较核,用以研究结构的性能,验证设计假定与计算方法的正确性,并认为这些结果所证实的一般规律与计算理论可以推广到实际结构中去,这类试验就不一定要满足严格的相似条件了。

1.2.2 按检测与试验的性质分类

根据检测与试验的性质,可将结构检测与试验分为荷载检测与试验与结构工程质量检测与试验两大类。

1.2.2.1 结构荷载检测与试验

结构荷载试验是评定结构安全性能的传统手段,根据施加到结构上的不同荷载类型,结构荷载试验又分为静力试验、动力特性试验、动力反应试验及抗震试验四类。

1. 静力试验

静力试验是结构试验中最常见的基本试验。因为大部分结构在使用时所承受的荷载以静荷载为主,而且在动力荷载不宜施加时,也可采用静力荷载替代。静力荷载一般可以通过重物或各种类型的加载设备来实现和满足加载要求。

结构静力试验是在一个不长的时间内,荷载从零开始按一定级别递增至规定荷载或结构破坏,完成试验加载的全过程,其目的是了解结构在静力荷载作用下的工作性能,也称为结构静力单调加载试验。

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察结构变形的发展,给试验人员以最明确和清晰的破坏概念。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用静力模拟的地震作用与任意一次确定性的非线性地震反应相差很远。虽然拟动力试验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仍然远远大于实际结构的基本周期。

2. 动力特性试验

如果要研究结构在动力荷载作用下的工作性能,了解结构动力特性是必不可少的,因为

结构承受动力荷载的能力不仅仅与施加到结构上的动荷载类型、大小等有关，还与结构自身的自振频率、阻尼等动力特性息息相关，因此在进行结构动力试验前，通常要进行结构动力特性试验。结构动力特性试验就是采用小荷载使结构产生小变形激振，通过测量分析结构在小变形激振情况下的振动情况，确定结构的动力特性。

3. 动力反应试验

为了解结构在动力荷载作用下的工作性能，对于在实际工作中主要承受动力作用的结构或构件，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与实际情况相近的动力荷载。如研究承受动力荷载结构（如桥梁、安装有吊车及动力设备的厂房）的抗疲劳性能、动力反应及动力特性，又如高层建筑、高耸构筑物（塔桅、烟囱）及大跨度桥梁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。

4. 抗震试验

由于地震对结构的危害性非常巨大，因此结构抗震研究在土木工程结构领域占有相当重要的地位，这样结构抗震试验无疑就成为一种重要的研究手段。

结构抗震试验中最为理想的是直接对结构物施加地震动力荷载进行试验，目前抗震动力试验一般用电液伺服加载设备驱动地震模拟振动台等设备来进行。试验时将结构模型放在地震模拟振动台上，然后通过控制系统将地震波施加到地震台上，并使安装在台面上的结构产生相应的惯性力，模拟地震作用的全过程，并由计算机系统及摄像设备记录结构的整个变化过程。这种试验的最大优点是可以按人们的意图和要求，再现各种形式的地面运动加速度记录，模拟结构受地震作用从弹性到塑性再到破坏倒塌的受力过程和结构物的破坏现象，是评价结构抗震性能的一种有效的试验方法。但是这种试验方法也有一定的局限性。首先这种试验对加载系统驱动能力的要求非常高，结构的模型比例不能过大，试验过程太快不能详细观察结构的变化等。

第二种常用的试验方法是低周反复加载静力试验，是一种以控制结构变形或控制施加荷载，由小到大对结构构件进行多次反复作用的结构抗震静力试验。它可以形成结构构件在正反两个方向加载和卸载的过程，以此模拟地震对结构的作用，并由试验获得结构构件超过弹性极限后的荷载-变形曲线，进而评价结构在非弹性阶段的工作性能（即恢复力特性）和破坏特征，也可以用来比较或验证抗震构造措施的有效性和确定结构的抗震极限承载能力。

第三种是拟动力试验，其方法是由计算机控制加载系统，对结构施加按输入地震加速度时程曲线计算得到的结构某时刻的位移反应，强迫结构按真实地震反应产生的变形而变形，并承受与此相应的荷载，并由荷载传感器实时将地震波输入至计算机中，并建立数学模型，完全由计算机进行控制加载。

低周反复加载静力试验和拟动力试验不同于地震振动台试验，这两种方法加载速度基本相当于静力加载，因此低周反复加载静力试验也称为伪静力试验、周期抗震静力试验或恢复力特性试验，而拟动力试验也称为非周期抗震静力试验或计算机—加载联机试验。

1.2.2.2 结构工程质量检测与试验

结构荷载试验通常是检测结构设计的合理性及结构的现有承载能力，但影响结构安全性能的除了设计因素外，还有施工质量、使用情况等因素，而这些因素对结构安全性的影响程度通常不是单单通过荷载试验就能确定的，这就需要将对影响结构安全性的各种技术参数进