



高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

Structural Test

结构试验

· 平台课课程群 ·

■ 主编 张望喜 ■ 主审 易伟建



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

结构试验

主编 张望喜

主审 易伟建



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP) 数据

结构试验/张望喜主编. —武汉:武汉大学出版社,2016.6
高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材
ISBN 978-7-307-17359-0

I. 结… II. 张… III. 建筑结构—结构试验—高等学校—教材 IV. TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 295000 号

责任编辑:王亚明 责任校对:杨赛君 装帧设计:吴 极

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)
(电子邮件:whu_publish@163.com 网址:www.stmpress.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本:880×1230 1/16 印张:20 字数:636 千字

版次:2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-17359-0 定价:42.00 元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材

学术委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:周创兵

副主任委员:方志 叶列平 何若全 沙爱民 范峰 周铁军 魏庆朝
委员:王辉 叶燎原 朱大勇 朱宏平 刘泉声 孙伟民 易思蓉
周云 赵宪忠 赵艳林 姜忻良 彭立敏 程桦 靖洪文

编审委员会名单

(按姓氏笔画排名)

主任委员:李国强

副主任委员:白国良 刘伯权 李正良 余志武 邹超英 徐礼华 高波
委员:丁克伟 丁建国 马昆林 王成 王湛 王媛 王薇
王广俊 王天稳 王曰国 王月明 王文顺 王代玉 王汝恒
王孟钧 王起才 王晓光 王清标 王震宇 牛荻涛 方俊
龙广成 申爱国 付钢 付厚利 白晓红 冯鹏 曲成平
吕平 朱彦鹏 任伟新 华建民 刘小明 刘庆潭 刘素梅
刘新荣 刘殿忠 闫小青 祁皑 许伟 许程洁 许婷华
阮波 杜咏 李波 李斌 李东平 李远富 李炎锋
李耀庄 杨杨 杨志勇 杨淑娟 吴昊 吴明 吴轶
吴涛 何亚伯 何旭辉 余锋 冷伍明 汪梦甫 宋固全
张红 张纯 张飞涟 张向京 张运良 张学富 张晋元
张望喜 陈辉华 邵永松 岳健广 周天华 郑史雄 郑俊杰
胡世阳 侯建国 姜清辉 娄平 袁广林 桂国庆 贾连光
夏元友 夏军武 钱晓倩 高飞 高玮 郭东军 唐柏鉴
黄华 黄声享 曹平周 康明 阎奇武 董军 蒋刚
韩峰 韩庆华 舒兴平 童小东 童华炜 曾珂 雷宏刚
廖莎 廖海黎 蒲小琼 黎冰 戴公连 戴国亮 魏丽敏

出版技术支持

(按姓氏笔画排名)

项目团队:王睿 白立华 曲生伟 蔡巍

特别提示

教学实践表明,有效地利用数字化教学资源,对于学生学习能力以及问题意识的培养乃至怀疑精神的塑造具有重要意义。

通过对数字化教学资源的选取与利用,学生的学习从以教师主讲的单向指导的模式而成为一次建设性、发现性的学习,从被动学习而成为主动学习,由教师传播知识而到学生自己重新创造知识。这无疑是锻炼和提高学生的信息素养的大好机会,也是检验其学习能力、学习收获的最佳方式和途径之一。

本系列教材在相关编写人员的配合下,将逐步配备基本数字教学资源,其主要内容包括:

课程教学指导文件

- (1)课程教学大纲;
- (2)课程理论与实践教学时数;
- (3)课程教学日历:授课内容、授课时间、作业布置;
- (4)课程教学讲义、PowerPoint 电子教案。

课程教学延伸学习资源

- (1)课程教学参考案例集:计算例题、设计例题、工程实例等;
- (2)课程教学参考图片集:原理图、外观图、设计图等;
- (3)课程教学试题库:思考题、练习题、模拟试卷及参考解答;
- (4)课程实践教学(实习、实验、试验)指导文件;
- (5)课程设计(大作业)教学指导文件,以及典型设计范例;
- (6)专业培养方向毕业设计教学指导文件,以及典型设计范例;
- (7)相关参考文献:产业政策、技术标准、专利文献、学术论文、研究报告等。



本书基本数字教学资源及读者信息反馈表请登录www.stmpress.cn下载,欢迎您对本书提出宝贵意见。

丛书序

土木工程涉及国家的基础设施建设,投入大,带动的行业多。改革开放后,我国国民经济持续稳定增长,其中土建行业的贡献率达到 1/3。随着城市化的发展,这一趋势还将继续呈现增长势头。土木工程行业的发展,极大地推动了土木工程专业教育的发展。目前,我国有 500 余所大学开设土木工程专业,在校生达 40 余万人。

2010 年 6 月,中国工程院和教育部牵头,联合有关部门和行业协(学)会,启动实施“卓越工程师教育培养计划”,以促进我国高等工程教育的改革。其中,“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划”由住房和城乡建设部与教育部组织实施。

2011 年 9 月,住房和城乡建设部人事司和高等学校土建学科教学指导委员会颁布《高等学校土木工程专业本科指导性专业规范》,对土木工程专业的学科基础、培养目标、培养规格、教学内容、课程体系及教学基本条件等提出了指导性要求。

在上述背景下,为满足国家建设对土木工程卓越人才的迫切需求,有效推动各高校土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,促进高等学校土木工程专业教育改革,2013 年住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会启动了“高等教育教学改革土木工程专业卓越计划专项”,支持并资助有关高校结合当前土木工程专业高等教育的实际,围绕卓越人才培养目标及模式、实践教学环节、校企合作、课程建设、教学资源建设、师资培养等专业建设中的重点、亟待解决的问题开展研究,以对土木工程专业教育起到引导和示范作用。

为配合土木工程专业实施卓越工程师教育培养计划的教学改革及教学资源建设,由武汉大学发起,联合国内部分土木工程教育专家和企业工程专家,启动了“高等学校土木工程专业卓越工程师教育培养计划系列规划教材”建设项目。该系列教材贯彻落实《高等学校土木工程专业本科指导性专业规范》《卓越工程师教育培养计划通用标准》和《土木工程卓越工程师教育培养计划专业标准》,力图以工程实际为背景,以工程技术为主线,着力提升学生的工程素养,培养学生的工程实践能力和工程创新能力。该系列教材的编写人员,大多主持或参加了住房和城乡建设部高等学校土木工程学科专业指导委员会的“土木工程专业卓越计划专项”教改项目,因此该系列教材也是“土木工程专业卓越计划专项”的教改成果。

土木工程专业卓越工程师教育培养计划的实施,需要校企合作,期望土木工程专业教育专家与工程专家一道,共同为土木工程专业卓越工程师的培养作出贡献!

是以以为序。



2014 年 3 月于同济大学四平路校区

前 言

结构试验既是一门学科,又是一种技术,是研究和发展土木工程新结构、新材料、新工艺,以及检验结构分析和设计理论的重要手段,在结构工程科学研究和技术创新等方面起着重要作用。目前,“结构试验”已成为土木工程专业学生必修的一门专业基础课程。

“卓越工程师教育培养计划”的教学模式可以借鉴“工学结合”模式。作为工学结合的教材,在传授知识的同时必须对学生的工作过程有指导意义。教材应当结合具体的项目(工程实践)进行编写。只有这样,才能对学生的工作过程起引导作用,引导学生一步一步地将学到的专业知识应用到实际操作中,对学生在学习过程中遇到的问题适时进行理论上的阐述,解释在工作中涉及的理论知识。这实际上就是将理论知识融入工程实践中。

工程项目涉及的知识一般系统性较差,往往是不同学科、多种知识相互交融,是一种综合知识。这就需要编者将各种知识巧妙地整合起来。这种整合绝不是简单地组合和拼凑,而要符合人们的认知规律,以及知识从易到难、循序渐进的逻辑关系,并要尽可能构建好知识的系统性。

本书根据土木工程专业的教学要求编写,以结构试验的基本理论和基础知识为重点,注重理论与实践相结合,能使读者全面地掌握结构试验的基本方法与技能,以适应土木工程结构设计、施工、检测鉴定和科学研究工作的需要。

在本书编写过程中,编者融合了“教”与“做”两个方面,这里的“做”就是指工程实践的过程。一个具体项目涉及的知识往往具有一定的局限性,仅仅围绕一个特定的项目编写教材可能会导致知识结构的片面性,造成教材个性太浓而共性不足,不具备普遍意义。本书在项目涉及的各个知识点上融合了相关(或相近)理论知识,以期使学生达到触类旁通、举一反三的效果,使学生的知识更加全面、丰富。

本书由张望喜副教授组织编写,由易伟建教授主审。在编写过程中,得到了以下研究生的大力支持:刘蒙、叶飞、程超男、彭顶、郑卡云、周亮、赵杰超、张勇等。

本书参考了近年来国内各高校出版的结构试验教材和专著,引用了一些学术论文中与结构试验方法相关的内容,在此向相关作者表示感谢。

由于编者的水平与实践经验有限,书中难免有不当和遗漏之处,敬请读者批评、指正。

编 者

2016年3月

目 录

第1篇 基础篇

1 绪论	(3)
1.1 结构试验的目的	(4)
1.2 结构试验的分类	(4)
1.2.1 实物(真型)试验与模型试验	(5)
1.2.2 结构静力试验和结构动力试验	(5)
1.2.3 短期荷载试验和长期荷载试验	(6)
1.2.4 实验室试验和现场试验	(7)
1.2.5 结构非破损检测	(7)
1.3 结构试验技术的发展	(7)
1.3.1 先进的大型和超大型试验装备	(7)
1.3.2 基于网络的远程协同结构试验技术	(8)
1.3.3 现代测试技术	(8)
1.3.4 计算机与结构试验	(8)
1.4 结构试验课程的特点	(8)
2 加载与量测设备的使用方法和技术	(10)
2.1 常用的试验装置和加载方法	(10)
2.1.1 静力加载设备及加载方法	(10)
2.1.2 动力加载设备及加载方法	(13)
2.1.3 荷载支承设备、试验台座	(17)
2.2 试验测量仪器	(23)
2.2.1 变形测量仪器	(24)
2.2.2 裂缝测量仪表	(25)
2.2.3 力测量仪表	(26)
2.3 应变测试技术	(27)
2.3.1 电阻应变片的工作原理	(27)
2.3.2 电阻应变仪的测量原理	(28)
2.3.3 电阻应变测试中的温度补偿	(29)
2.3.4 电阻应变片和电阻应变仪的构造和种类	(30)

2.3.5 电阻应变片的安装及测试技术要点	(31)
2.4 数据采集与记录系统	(32)
2.4.1 自动记录仪	(32)
2.4.2 数据采集系统	(34)
3 工程结构试验设计	(37)
3.1 结构试验中试件、荷载和量测设计的内容及关系	(37)
3.1.1 结构试验的试件设计	(38)
3.1.2 结构试验的荷载设计	(44)
3.1.3 结构试验的量测设计	(47)
3.2 材料力学性能对结构试验的影响、加荷速度与应变速率对材料力学性能的影响	(50)
3.2.1 材料力学性能对结构试验的影响	(50)
3.2.2 加荷速度与应变速率对材料力学性能的影响	(51)
3.3 相似理论及其应用	(52)
3.3.1 概述	(52)
3.3.2 相似理论	(53)
3.3.3 结构模型设计	(61)
3.3.4 模型的材料、制作与试验	(67)
4 试验数据的处理与分析	(71)
4.1 概述	(71)
4.2 测量中的误差	(71)
4.2.1 系统误差	(71)
4.2.2 偶然误差	(72)
4.2.3 过失误差	(72)
4.3 数据的整理依据及误差的检验	(72)
4.3.1 偶然误差的分布	(72)
4.3.2 误差的传递	(73)
4.3.3 误差的检验	(74)
4.4 一元线性回归	(76)

4.4.1	最小二乘法	(76)
4.4.2	直线回归方程的有效性	(77)
4.4.3	直线回归方程的精度	(78)
4.5	试验数据的表达方法	(79)
4.5.1	表格方式	(79)
4.5.2	图形方式	(80)
4.5.3	用曲线拟合的方式表达数据	(83)

第2篇 应用篇

5	工程结构静载试验	(89)
5.1	概述	(89)
5.2	试验前的准备工作	(89)
5.2.1	调查研究,收集资料	(89)
5.2.2	制订试验大纲	(90)
5.2.3	试件准备	(91)
5.2.4	材料物理、力学性能测定	(91)
5.2.5	试验设备与试验场地的准备	(92)
5.2.6	试件安装就位	(92)
5.2.7	加载设备和量测仪器的安装	(92)
5.2.8	试验控制特征值的计算	(92)
5.3	基本构件的单调加载静载试验	(92)
5.3.1	受弯构件的试验	(92)
5.3.2	受压构件的试验	(97)
5.4	组合构件的单调加载静载试验	(99)
5.4.1	屋架试验	(99)
5.4.2	薄壳和网架结构试验	(103)
5.5	试验资料整理与分析	(107)
5.5.1	试验原始资料的整理	(107)
5.5.2	试验结果的表达	(107)
5.5.3	应变测量结果分析	(109)
5.5.4	挠度测量结果计算	(113)
5.5.5	结构性能评定	(114)
6	工程结构动载试验	(117)
6.1	概述	(117)
6.2	数字信号处理	(118)
6.2.1	数字信号处理技术简介	(118)
6.2.2	数字信号处理技术在结构动载试验中的应用	(118)
6.2.3	周期信号的幅值谱、相位谱、功率谱	(119)
6.2.4	信号 A/D、D/A 转换	(119)

6.2.5	采样定理	(120)
6.2.6	窗函数	(121)
6.2.7	快速傅立叶变换(FFT)	(121)
6.2.8	数字信号处理系统的组成	(121)
6.3	结构动力测试的主要内容及测量方法和手段	(122)
6.3.1	动力荷载特性的测试	(122)
6.3.2	结构自振特性的测定	(124)
6.3.3	结构动力反应的测定	(127)
6.3.4	结构疲劳试验	(129)
6.4	试验资料处理	(132)
6.4.1	谱量分析	(132)
6.4.2	工程结构自振特性的数据处理方法	(134)
6.4.3	相关分析与频谱分析	(138)

7	工程结构抗震试验	(143)
7.1	低周反复加载试验	(143)
7.1.1	加载制度	(143)
7.1.2	试验加载设计	(145)
7.1.3	试验的观测设计	(149)
7.1.4	试验的数据整理	(152)
7.2	拟动力试验	(155)
7.2.1	试验的工作原理	(155)
7.2.2	试验的工作流程	(155)
7.2.3	试验设备	(157)
7.3	模拟地震振动台动力试验	(158)
7.3.1	模拟地震振动台	(158)
7.3.2	试验的加载过程和试验方法	(159)
7.3.3	试验的观测和动态反应量测	(159)
7.3.4	试验的安全措施	(160)
7.4	人工地震模拟试验	(160)
7.4.1	爆破方法	(160)
7.4.2	试验的动力反应问题	(161)
7.4.3	试验的量测技术	(162)
7.5	天然地震试验	(162)

第3篇 拓展篇

8	建筑工程结构的现场检测与试验	(167)
8.1	概述	(167)

8.1.1 检测方案的基本内容	(167)	9.4 桥梁结构实际承载能力的评定	(215)
8.1.2 检测方法和抽样方案	(167)	9.4.1 桥梁实际工作模型的建立	(216)
8.2 混凝土结构现场检测技术	(168)	9.4.2 静载试验数据整理与分析	(217)
8.2.1 材料性能	(168)	9.4.3 动载试验数据分析与评定	(220)
8.2.2 混凝土强度	(168)	9.4.4 动力特性试验数据分析与评定	(221)
8.2.3 混凝土构件质量与缺陷	(174)	9.5 桥梁健康监测	(221)
8.2.4 混凝土结构构件的变形与损伤	(179)	9.6 桥梁现场试验实例	(224)
8.2.5 构件性能实荷检验与结构动测	(180)	9.6.1 静载试验实例	(224)
8.3 砌体结构的现场检测技术	(181)	9.6.2 动载试验实例	(234)
8.3.1 砌体结构检测的工作程序及准备	(181)	10 隧道工程结构的现场检测与试验	(237)
8.3.2 砌体强度	(182)	10.1 隧道检测内容的分类	(237)
8.3.3 砌筑质量与构造	(188)	10.1.1 材料检测	(237)
8.3.4 变形与损伤	(188)	10.1.2 施工检测	(237)
8.3.5 砌体结构裂缝分级标准	(189)	10.1.3 环境检测	(238)
8.4 钢结构现场检测技术	(190)	10.2 开挖施工质量检测	(238)
8.4.1 一般要求	(190)	10.2.1 开挖质量标准	(238)
8.4.2 钢材强度检测	(191)	10.2.2 爆破开挖质量要求	(239)
8.4.3 钢材和焊缝缺陷检测	(192)	10.2.3 超、欠挖量测定	(239)
8.4.4 钢结构防火涂层厚度的检测	(194)	10.3 钢支撑施工质量检测	(242)
8.5 结构现场荷载试验	(195)	10.3.1 钢支撑的形式	(242)
8.5.1 结构现场静载试验的荷载	(195)	10.3.2 施工质量检测	(243)
8.5.2 结构现场静载试验的观测内容	(196)	10.4 喷锚支护施工质量检测	(243)
8.5.3 钢结构性能的静力荷载检验	(197)	10.4.1 锚杆施工质量检测	(243)
8.5.4 结构现场静载试验的组织和实施	(198)	10.4.2 锚杆拉拔力测试	(244)
9 桥梁工程结构的现场检测与试验	(199)	10.4.3 砂浆锚杆砂浆注满度检测	(245)
9.1 概述	(199)	10.4.4 喷射混凝土质量检测	(246)
9.2 桥梁现场试验的准备工作	(199)	10.4.5 初期支护背部空洞检测	(249)
9.2.1 资料收集	(199)	10.4.6 二次衬砌厚度质量检测	(250)
9.2.2 试验方案的拟订	(200)	10.5 隧道施工监控量测	(252)
9.2.3 仪器准备	(202)	10.5.1 概述	(252)
9.3 桥梁现场荷载试验	(202)	10.5.2 围岩收敛位移监测	(253)
9.3.1 现场准备	(202)	10.5.3 围岩内部位移量测	(255)
9.3.2 现场荷载试验	(204)	10.5.4 锚杆轴力量测	(258)
9.3.3 桥梁结构构件试验	(206)	10.5.5 压力量测	(259)
9.3.4 试验数据整理	(212)	10.5.6 混凝土应力量测	(260)
		10.6 检测实例	(262)
		10.6.1 工程概况	(262)
		10.6.2 地质条件	(262)
		10.6.3 支护结构设计	(263)
		10.6.4 施工监测	(263)

第4篇 实践篇

11 电阻应变片灵敏系数的测定	(271)	14.3 试验方法	(291)
11.1 电阻应变片的粘贴工艺	(271)	14.4 试验步骤	(292)
11.2 应变片(计)的工作特性等级	(271)	14.5 试验结果的整理和分析	(293)
11.3 常用黏结剂和防潮剂	(274)	14.6 试验报告	(295)
11.4 电阻应变片灵敏系数测定试验 ...	(276)		
12 回弹法检测混凝土的抗压强度	(278)	15 简支钢桁架非破损试验	(297)
12.1 试验目的	(278)	15.1 试验目的	(297)
12.2 试验设备及仪表	(278)	15.2 试验设备和仪器	(297)
12.3 试验方法	(278)	15.3 试验方案	(297)
12.4 结构数据整理与报告	(279)	15.4 试验步骤	(298)
		15.5 试验结果的整理、分析和试验报告	(298)
13 钢筋混凝土简支梁正截面承载力试验	(287)	16 钢筋混凝土短柱破坏试验	(301)
13.1 试验目的	(287)	16.1 试验目的	(301)
13.2 试验设备和仪器	(287)	16.2 试验设备及仪器	(301)
13.3 试验方案	(287)	16.3 试验方案	(302)
13.4 试验步骤	(289)	16.4 试验报告	(303)
13.5 试验结果的整理、分析和试验报告	(289)		
14 预制钢筋混凝土空心板鉴定试验	(291)	17 钢筋混凝土简支梁动力特性测试	(304)
14.1 试验目的	(291)	17.1 试验目的	(304)
14.2 试验设备	(291)	17.2 试验设备和仪器	(304)
		17.3 测试方案	(304)
		17.4 测试报告	(305)
		参考文献	(307)

第 1 篇

基 础 篇



1 绪 论

工程结构是以工程材料为主体构成的不同类型承力构件(梁、板、柱等)相互连接组成的组合体。结构理论分析工作中,一方面可以利用传统的理论计算方法;另一方面可以利用实验方法,即通过结构试验,采用实验应力分析方法来解决实际问题。

由材料力学可知,受弯梁截面上应力的分布是不均匀的,上部纤维受压,下部纤维受拉。而对这么简单问题的正确理解也经历过一个过程。早在 17 世纪,人们认为其是均匀受拉的;伽利略在 1638 年出版的著作中,错误地认为受弯截面上的应力是均匀受拉分布的;过了 40 年后,法国物理学家马里奥特和德国数学家莱布尼兹对伽利略的理论提出修正,认为不是均匀分布,而是三角形分布;后来虽然胡克和伯努利建立了平面假定,但应力分布问题仍未被人们正确认识;1713 年,法国人巴朗才提出受弯梁截面应力分布的正确观点,即中和层理论,虽然理论研究不断深入,但巴朗的解答仍有待试验验证,受弯梁截面上存在压应力的说法仍未被人们接受;1767 年,法国科学家容格密里在没有量测仪器的情况下,首次用实验方法令人信服地证明了截面上压应力的存在;1821 年,法国科学院院士拿维叶从理论上证明了现在材料力学中的受弯公式;而用实验方法验证这个公式,又经过了 20 多年才由法国科学家阿莫列恩完成。

人类对这个问题进行了 200 多年的不断探索,至此才告一段落。从这段历史中可以看出,科学的发展往往是以技术的突破为契机的。结构理论的发展与结构试验的紧密联系,结构模型试验对工程结构和工程技术的推动作用更是比比皆是。

传统的结构工程科学由建筑材料、结构力学和结构试验组成。现代结构工程科学中结构设计理论和结构计算技术的发展,使结构工程科学成为体系相对完整的工程科学。结构试验是结构工程科学的一个重要组成部分。百余年来,结构试验一直是结构理论发展的主要手段。

现代计算机技术和计算力学的发展,以及长期以来结构试验所积累的成果,使结构试验不再是研究和发 展结构理论的唯一途径。结构工程师已能利用计算机试验处理大型复杂结构的设计问题。但结构试验仍是结构工程科学的主要支柱之一。例如,钢筋混凝土结构、砌体结构的设计理论主要就建立在试验研究的基础之上。

结构试验是结构工程科学发展的基础;反过来,结构工程科学发展的要求又推动结构试验技术的不断进步。高层建筑、大跨径桥梁、大型海洋平台、核反应堆安全壳等大型复杂结构的出现,对结构整体工作性能、结构动力反应及结构在极端灾害性环境下的力学行为提出了更高要求。与此同时,计算机技术和其他现代工业技术的发展,也为结构试验技术的发展提供了广阔的空间。

结构试验是土木工程专业的一门专业课。这门课程主要介绍结构试验的理论和方 法。通过这门课程的学习,学生应掌握结构试验的基本原理,了解结构试验的仪器、仪表和试验设备,在结构试验中,进一步认识结构性能并培养进行结构试验的能力。

结构试验的任务是在结构物或试验对象(实物或模型)上,以仪器设备为工具,以各种实验技术为手段,在荷载(重力、机械扰动力、风荷载……)或其他因素(温度、变形、地震)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、抗裂性及结构实际破坏形态方面来判明建筑结构的实际工作性能,估计结构的承载能力,确定结构对使用要求的满足程度,并用以检验和发展结构的计算理论。

结构试验以实证的方式反映结构的实际性能,它为工程实践和结构理论提供的依据是其他方法不能取代的。在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方面构成的结构工程科学中,结构试验本身也已成为真正的试验科学。

1.1 结构试验的目的 >>>

根据不同的试验目的,结构试验一般分为科学研究性试验和生产鉴定性试验。

科学研究性试验的目的是:验证结构设计计算的各种假定;通过制定各种设计规范,发展新的设计理论,改进设计计算方法;为发展和推广新结构、新材料及新工艺提供理论与实践经验。

① 通过结构试验,验证结构计算理论或创立新的结构理论。随着科学技术的进步,新方法、新材料、新结构、新工艺不断涌现,例如高性能混凝土结构的工程应用,高温、高压工作环境下的核反应堆安全壳,新的结构抗震设计方法,全焊接钢结构节点的热应力影响区等。一种新的结构体系、新的设计方法都必须经过试验的检验,结构计算中的基本假设需要试验验证。结构试验也是新发现的源泉,结构工程科学的进步离不开结构试验。我们称结构工程为实验科学,就是强调结构试验在推动结构工程技术发展中所起的作用。

② 通过结构试验,制定工程技术标准。工程结构关系到公共安全和国家经济发展,建筑结构的设计、施工、维护必须有章可循。这些规章就是结构设计规范和标准、施工验收规范和标准,以及其他技术规程。我国现行的各种结构设计和施工规范除了总结已有的工程经验和结构理论外,还进行了大量的混凝土结构、砌体结构、钢结构的梁、柱、板、框架、墙体、节点等构件和结构试验。系统的结构试验和研究为结构的安全性、使用性、耐久性提供了可靠的保证。

生产鉴定性试验通常具有直接的生产目的。它是以实际建筑物或结构构件为试验鉴定的对象,通过试验对具体结构做出正确的技术结论。

① 通过结构试验检验结构构件或结构部件的质量。建筑工程由很多结构构件和结构部件组成。例如,在钢筋混凝土结构和混合结构房屋中,大量采用预制混凝土构件。这些预制构件的产品质量必须通过结构试验进行检验。对于后张法生产的预应力混凝土结构,锚具等部件是结构的组成部分,其质量必须通过试验进行检验。大型工程结构如大跨度桥梁结构建成后,要求进行荷载试验。这种试验可以全面、综合地鉴定结构的设计和施工质量,并为结构长期运行和维护积累基本数据。结构试验也是处理工程结构质量事故的常用方法之一。

② 通过结构试验确定已建结构的承载能力。结构设计规范规定,已建结构不得随意改变结构用途。当结构用途需要改变,单凭结构计算又不足以完全确定结构的承载能力时,就必须通过结构试验来确定结构的承载能力。已建结构随着使用年限的增长,其安全度逐渐降低,结构可靠性鉴定的主要任务就是确定结构的剩余承载能力。遭遇极端灾害性作用,如火灾、地震灾害后,结构发生破损,在对结构进行维护加固前,也要求通过试验对结构的剩余承载能力做出鉴定。

③ 通过结构试验验证结构设计的安全度。这类试验大多在实际结构开始施工前进行。设计规范称之为结构试验分析方法。结构试验的主要目的是由试验确定实际结构的设计参数,验证结构施工方案的可行性和结构的安全度。试验对象多为实际结构的缩小比例模型。例如,对于大跨度体育场馆屋盖结构和高耸结构的风洞试验,前者通过试验确定结构的风压设计参数,后者通过试验确定结构的风振特性;又如,在地震区建造体形复杂的高层建筑时,通常要进行地震模拟振动台试验,试验结果和计算结果相互验证,以确保结构的安全。

1.2 结构试验的分类 >>>

建筑结构试验以试验对象、荷载性质、试验场合、试验时间等不同因素进行分类。

1.2.1 实物(真型)试验与模型试验

(1) 实物(真型)试验

实物(真型)试验的试验对象是实际结构(实物)或按实物结构尺寸复制的结构或构件。工业厂房结构刚度试验、秦山核电站安全壳加压整体性试验、砌块房屋抗震试验等都是此类试验。

(2) 模型试验

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。它是具有实际结构的全部或部分特征,尺寸却可以比真型小很多的缩尺结构。试验时,由真型按相似理论设计模型,按比例施加荷载,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。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。由于严格的相似条件会给模型设计和试验带来一定困难,故在结构试验中尚有另一类型的模型,它仅是真型(原型)结构缩小几何比例尺寸后的试验代表物。将该模型的试验结果与理论计算进行对比校核,用以研究结构的性能,验证设计假定与计算方法的正确性。

1.2.2 结构静力试验和结构动力试验

根据结构试验中被试验的结构或构件所承受的荷载,结构试验可分为结构静载试验和结构动载试验两大类。

(1) 结构静载试验

结构静载试验是建筑结构最常见的试验。所谓静载,一般是指试验过程中结构本身运动的加速度效应(即惯性力效应)可以忽略不计。根据试验性质的不同,静载试验可分为单调静力荷载试验、低周反复荷载试验和结构拟动力试验。

① 在单调静力荷载试验中,试验加载过程从0开始,在几分钟到几小时的时间内,试验荷载逐渐单调增加到结构破坏或预定的状态目标。钢筋混凝土结构、砌体结构、钢结构的设计理论和方法就是通过这类试验建立起来的。

② 低周反复荷载试验属于结构抗震试验方法中的一种。房屋结构在遭遇地震灾害时,强烈的地面运动使结构承受反复作用的惯性力。在低周反复荷载试验中,利用加载系统使结构受到逐渐增大、反复作用的荷载或发生交替变化的位移,直到结构破坏。在这种试验中,结构或构件的受力历程有结构在地震作用下受力历程的基本特点,但加载速度远低于实际结构在地震作用下所经历的变形速度。为区别于单调静力荷载试验,有时又称这种试验为伪静力试验。

③ 结构拟动力试验也是一种结构抗震试验方法。结构拟动力试验的目的是模拟结构在地震作用下的行为。在结构拟动力试验中,将试验过程中量测的力、位移等数据输入计算机中,计算机根据结构的当前状态信息和输入的地震波,控制加载系统使结构产生计算确定的位移,由此形成一个递推过程。这样,计算机和试验机联机试验,便可得到结构在地震作用下的时程响应曲线。

结构静载试验所需的加载设备较为简单,有些试验可以直接采用重物加载。由于试验进行的速度很慢,因此可以在试验过程中仔细记录各种试验数据,对试验对象的行为进行仔细的观察,得到直观的破坏形态。例如,在钢筋混凝土梁的受弯试验中,需要观测并记录截面的应变分布、沿梁长度方向的挠度分布、荷载-挠度曲线、裂缝间距和裂缝宽度、破坏形态等。这些数据和信息都通过结构静载试验获取。

按荷载作用的时间长短,结构静载试验又可分为短期静力荷载试验和长期静力荷载试验。建筑材料具有一定的黏弹性特性,如可反映为混凝土的徐变和预应力钢筋的松弛。此外,影响建筑结构耐久性的因素往往是长期的,如可反映为混凝土的碳化和钢筋的锈蚀。在短期静力荷载试验中,忽略了这些因素的影响。当这些因素成为试验研究的主要对象时,就必须进行长期静力荷载试验。长期静力荷载试验的持续时间为几个月到几年不等。在试验过程中,观测结构的变形和刚度变化,从而掌握时间因素对结构构件性能的影响。在实验室条件下进行的长期静力荷载试验,通常对试验环境有较严格的控制,如恒温、恒湿、隔振等,突出荷载作用这个因素,消除其他因素的影响。除在实验室进行长期静力荷载试验外,在实际工程中,对结构

的内力和变形进行长期观测,也属于长期静力荷载试验。这时,结构所承受的荷载为结构的自重和使用荷载。近年来,工程师和研究人员较为关心的“结构健康监测”,就是通过长期静力荷载试验所获取的观测数据对结构的运行状态和可能出现的损伤进行监控。

(2) 结构动载试验

实际工程结构大多受到动力荷载作用,如铁路或公路桥梁、工业厂房中的吊车梁。风对大跨度结构和高耸结构的作用,地震对结构的作用也是一种强烈的动力作用。结构动载试验利用各类动载试验设备使结构受到动力作用,并观测结构的动力响应,进而了解、掌握结构的动力性能。结构动载试验包括疲劳试验、动力特性试验、地震模拟振动台试验和风洞试验等。

① 疲劳试验。

当结构处于动态环境,其材料承受波动的应力或应变作用时,结构内的某一点或某一部分发生局部的、永久性的组织变化(损伤)的一种递增过程称为疲劳。经过足够多次应力或应变循环后,材料损伤累积导致裂纹生成并扩展,最后发生结构疲劳破坏。结构或构件的疲劳试验就是利用疲劳试验机使构件受到重复作用的荷载,通过试验确定重复作用荷载的大小和次数对结构强度的影响。对于混凝土结构,常规的疲劳试验按 400~500 次/min、总次数为 200 万次进行。疲劳试验多在单个构件上进行,有为鉴定构件性能而进行的疲劳试验,也有以科学研究为目的的疲劳试验。

② 动力特性试验。

结构动力特性是指结构物在振动过程中所表现出的固有性质,包括固有频率(自振频率)、振型和阻尼系数。结构的抗震设计、抗风设计与结构动力特性参数密切相关。在结构分析中,采用振型分解法求得结构的自振频率和振型,称为模态分析。用试验获得这些模态参数的方法称为试验模态分析方法。测定结构动力特性参数时,要使结构处于动力环境(振动状态)下。通常,采用人工激励法或环境随机激励法使结构产生振动,同时量测并记录结构的速度响应或加速度响应,再通过信号分析得到结构的动力特性参数。动力特性试验的对象以整体结构为主,可以在现场测试真型结构的动力特性,也可以在实验室对模型结构进行动力特性试验。

③ 地震模拟振动台试验。

地震时强烈的地面运动使结构受到惯性力作用,结构因此发生倒塌破坏。地震模拟振动台是一种专用的结构动载试验设备,是结构抗震试验的关键设备之一,它能真实地模拟地震时的地面运动。试验时,在振动台上安装结构模型,然后控制振动台按预先选择的地震波运动,量测并记录结构的动位移、动应变等数据,观察结构的破坏过程和破坏形态,研究结构的抗震性能。地震模拟振动台试验的时间很短,通常在几秒到十几秒内完成一次试验,对振动台控制系统和动态数据采集系统都有很高的要求。大型复杂结构在地震作用下表现出非线性非弹性性质,目前的分析方法还不能完全解决结构非线性地震响应的计算问题,地震模拟振动台试验常常成为必要的结构试验分析方法。

④ 风洞试验。

工程结构风洞试验装置是一种能够产生和控制气流,用以模拟建筑或桥梁等结构物周围的空气流动,并可量测气流对结构的作用,以及观察有关物理现象的一种管状空气动力学试验设备。在多层房屋和工业厂房结构设计中,房屋的风载体形系数就是风洞试验的结果。结构风洞试验模型可分为钝体模型和气弹模型两种。其中,钝体模型主要用于研究风荷载作用下结构表面各个位置的风压,气弹模型则主要用于研究风致振动及相关的空气动力学现象。超大跨径桥梁、大跨径屋盖结构和超高层建筑等新型结构体系常用风洞试验确定与风荷载有关的设计参数。

除上列几种典型的结构动载试验外,在工程实践和科学研究中,根据结构所处动力学环境的不同,还有强迫振动试验、周期抗震试验、冲击碰撞试验等结构动载试验方法。

1.2.3 短期荷载试验和长期荷载试验

(1) 短期荷载试验

实际荷载作用是长期的,但实际上不得不大量采用短期荷载试验,荷载从 0 开始施加,直到结构破坏或