

结构模型和试验技术

[美] G.M. 萨布尼斯 (哈佛大学土木工程教授)
H.G. 哈里斯 (德克塞尔大学土木工程教授)
R.N. 怀特 (康奈尔大学结构工程教授) 合著
[加] M. 萨德. 米尔扎 (麦吉尔大学土木工程
和应用力学教授)

译者 朱世杰 何保康 钱国芳 傅恒菁 等



中国铁道出版社

1989年·北京

结构模型和试验技术

[美] G.M. 萨布尼斯 (哈佛大学土木工程教授)
H.G. 哈里斯 (德克塞尔大学土木工程教授)
R.N. 怀 特 (康奈尔大学结构工程教授) 合著
[加] M. 萨德. 米尔扎 (麦吉尔大学土木工程
和应用力学教授)

译者 朱世杰 何保康 钱国芳 傅恒菁 等

中 国 铁 道 出 版 社

1989年·北京

内 容 提 要

本书是一本全面而又系统的论述结构模型和试验技术的专著。全书十一章，大体可分为四部分。第一部分（第一、二章）介绍结构模型的一般情况和相似理论；第二部分（第三、四、五章）论述弹性模型、非弹性模型及其结构材料；第三部分（第六、七、八、九章）论述尺寸效应、加载系统、测试技术、精度与可靠性；第四部分（第十、十一章）介绍模型实例、动力相似性及其模拟技术。

本书可作为结构专业及其它有关专业研究生、本科师生教学参考用书，并可供有关科研、设计及其它工程技术人员参考。

Structural Modeling and Experimental Techniques
GAJANAN M.SABNIS HARRY G.HARRIS
RICHARD N.WHITE M.SAEED MIRZA
Prentice-Hall 1983

* * *

结构模型和试验技术

〔美〕G.M.萨布尼斯 H.G.哈里斯
R.N.怀特 〔加〕M.萨德·米尔扎
朱世杰 童岳生等 译校
中国铁道出版社出版、发行
责任编辑 刘启山 封面设计 刘景山
各地新华书店经售
中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：21.5 字数：538 千

1989年12月 第1版 第1次印刷

印数：1—1200册 定价：10.10元

ISBN7-113-00668-X/TU·153

译者说明

长期以来,模型试验一直是解决新型结构或复杂课题的重要手段。模型在结构分析中起着显著的作用。近年来,由于新材料的应用,应力应变测试技术的不断发展,以及测试结果分析处理方法的现代化,大大促进了结构模型的应用。

过去几十年,国内外都进行了大量的结构模型研究,这对房屋、桥梁、大坝,储油罐、宇宙飞船、核反应堆等结构的设计、施工提供了丰富成果。1966年3月美国混凝土协会成立了结构模型特设委员会,1968年3月该协会在洛杉矶召开了结构模型专业会议,并在1970年出版了混凝土结构模型试验论文集。1972年,美国有关大学主持出版了论文汇编。1979年3月,地质力学模型国际讨论会在意大利贝加莫召开,并出版了论文集。美国混凝土协会在1980年3月及9月分别召开了年会及秋季会议,并在1982年发行了《混凝土结构动力模型》论文集。由此可以看出这门学科日益发展的状况。

随着科学技术的进步,新兴计算技术虽然可以减少一部分模型试验的任务,但同时也被模型试验所吸收与利用,进而使模型试验技术得到丰富和提高。

国内在结构模型试验方面虽然先后出版了一些专门著作和教科书,但在教学和科学实验上仍缺乏一本内容全面、并能反映新成就而又适合于初学者阅读的书籍。译者鉴于G.M. Sabnis等四位教授所著的《结构模型和试验技术》(美国Prentice-Hall 1983年出版)是一本内容新颖、系统而全面的新书。对有关工科大专院校师生来说,它是一本好教材,对从事这方面工作的科研、设计人员以及试验工作者,也是一本好的参考书。因此我们把它译出来,希望对模型试验的发展与提高有所裨益。

全书共十一章,内容涉及模型分析的历史背景、相似理论、弹性模型、钢筋混凝土和预应力混凝土模型的用材、模型试验的尺寸效应、实验室技术及其加载方法,还介绍了模型误差、精度和可靠性方面的资料,列举了结构模型的实际应用,最后阐述了动力荷载下结构的动力相似性和模拟技术。

参加本书翻译的有:西安冶金建筑学院(按章次先后为序)何保康(第三、六章)、钱国芳(第四、五章)、傅恒菁(第七、八、九章);铁道部科学研究院朱世杰(前言、第一、二、十一章)、徐慧(第十章)。校对者:西安冶金建筑学院童岳生(前言、第一、二、四、五、十一章)、丰定国(第三、六章)、卫云亭(第七、八、九章);铁道部科学研究院朱世杰(第十章)。总校为童岳生、朱世杰。在本书的翻译出版过程中李德成,张善同等同志给予了大力协助,在此谨表示衷心感谢。

限于水平,书中一定存在缺点和错误,希望读者批评指正。

译者

1986年5月

序 言

结构模型在结构工程的研究和设计中起着重要作用。1950年以来,欧洲建立了一些引人注目的实验室,这一事实大大促进了欧洲工程师们对模拟方法的应用。新近,美国、加拿大钢筋混凝土结构的模型技术取得了显著的发展。本书目的是介绍当前用于设计、科研和教学方面一些最新颖的结构模拟方法。重点放在如何模拟钢筋混凝土和预应力混凝土结构的性能方面。

作者认为结构模型是数学模型的补充,它既不是数学模型的竞争者,更不是要代替分析方法。对某种一定情况,如果有一个经过验证的合适的分析方法,那么一般说来,它比实验方法更便宜,也更省时间。如果分析方法不可行,或边界条件难以确定或变异太大,那么模型试验可能是解决问题的唯一方法。必须有选择地使用模型,随着分析方法日益完善,模型的使用范围也在不断地改变。本书将使读者正确地认识到何时何地应该采用模型技术。

近来,结构模型实验有相当大的发展,这些发展反映在1960年以来发表的有关文献以及下面几次会议的资料中,即1968年和1972年由美国混凝土协会主办的会议、1972年由McGill大学主办的会议以及1972年由Sydney大学主办的会议。这些会议论文集汇集了大量新资料,对于已经从事结构模型试验的人来说,它们是一些很有价值的参考书。然而,对于还不熟悉结构工程中这一重要方法的人们,显然不能把这些文献作为主要的入门书籍来学习。

确定结构弹性反应的模型已使用多年,大量有价值的资料都写成了研究报告和论著。近年来,许多弹性模型试验技术已由以计算机为基础的分析方法所代替,因此本书对弹性模型只作简要的论述。

本书重点放在结构的真实非弹性性能模拟方面。与弹性模型相比,非弹性模型方面的问题相当多,从模型材料的研制、模型制作技术、模型试验方法,直至对模型结果的整理分析并从而对所模拟原型的性能作出评定。

模拟技术应用于实际结构,将有助于人们更好地理解模型分析的实际方法。同时,也有助于人们弄清对什么样的结构类型物理模型具有重要作用。对于一些特种结构来说,模型方法对设计起着重要作用。对这些课题将通过实例予以详细论述。

第一、二两章讨论模型分析的历史背景和对模型设计、试验和数据处理具有支配作用的相似原理。第三章介绍弹性模型的各个方面,指出弹性模型在一定情况下的局限性和适用性,以及和模型有关的一些问题。第四、五两章论述钢筋混凝土模型的材料。准确地模拟钢材和混凝土材料的特性,是模拟方法中最基本的也是较困难的问题之一。第六章论述模型试验的尺寸效应问题。了解尺寸效应的来源和性质,是了解模拟技术能力和局限性的关键。第七章对经过精选的一些实验室技术及加载方法作了介绍。熟悉这些技术,是模型分析中不可缺少的一个部分。

第八章讨论测试仪表方面的技术,并着重讨论了应变测量和试验结果的整理。在这一章中,还相当深入地论述了现代化自动数据采集系统,以便让读者能为自己的实验室规划出一种新体系。第九章的内容是误差和精度,以及物理模型的可靠性。讨论了随机误差,并介绍

目 录

1 结构工程物理模型简介

1.1 引 言	1	1.9 模型实验室	8
1.2 结构模型的定义和分类	1	1.10 模型研究实例	8
1.2.1 模型分类	1	1.10.1 研究实例A, 美国环球航空 公司飞机库结构模型	8
1.3 关于模型的简单回顾	3	1.10.2 研究实例B, 三姊妹桥梁	9
1.4 结构模型和实施规程	4	1.10.3 研究实例C, 多层钢筋 混凝土框架	10
1.5 几何比例的选择	5	1.10.4 研究实例D, 预制混凝土 大板建筑	13
1.6 模拟方法	5		
1.7 模型分析的优点和局限性	6		
1.8 结构模型的精度	7		

2 结构模型理论

2.1 引 言	17	2.4.1 具有全相似的模型	27
2.2 量纲和量纲一致性	17	2.4.2 和全相似有关的技术难点	29
2.3 量纲分析	19	2.4.3 具有第一级相似的模型	30
2.3.1 白金汉 π 定理	21	2.4.4 失真模型	31
2.3.2 量纲独立性和 π 项的形成	22	2.5 相似要求	32
2.3.3 量纲分析的用途	24	2.5.1 钢筋混凝土模型	33
2.3.4 应用量纲分析时的一些 其它问题	25	2.5.2 混凝土砌体模型	35
2.4 结构模型	27	2.5.3 受热力荷载的结构	36
		2.5.4 受动力荷载的结构	39

3 弹性模型——材料和制作技术

3.1 概 述	40	3.5 加载速率、温度和环境的影响	51
3.2 弹性模型的材料	40	3.5.1 应变速率对塑料机械特性 的影响	51
3.3 塑 料	41	3.5.2 温度影响和有关热影响 问题	51
3.3.1 热塑性塑料和热凝性塑料	41	3.5.3 热膨胀系数	52
3.3.2 塑料的拉、压和弯曲特性	43	3.5.4 热传导性	52
3.3.3 塑料的粘弹性性能	44	3.5.5 软化和脱模温度	53
3.3.4 塑料的机械特性	45	3.5.6 相对湿度对塑料特性的影 响	53
3.3.5 聚酯树脂混合方解石填料 的机械特性	46	3.6 与塑料模型有关的特殊问题	53
3.4 塑料的时间影响——计算与补偿	47	3.6.1 原型体系的徐变模拟	53
3.4.1 与时间有关的弹性模量和 泊松比的确定	48	3.6.2 泊松比问题	54
3.4.2 计及时间影响的加载方法	49		

3.6.3 塑料商品的厚度变化.....54	3.7.5 真空成型法.....59
3.6.4 辗压过程对弹性模量的影响.....54	3.7.6 热成型的制造误差.....59
3.7 弹性模型的制作方法.....55	3.7.7 塑料模型的浇注.....60
3.7.1 模型制造应考虑的因素.....56	3.7.8 金属壳体旋压成型.....60
3.7.2 二个或几个部件组成的模型拼装方法.....56	3.8 弹性模型在设计和试验研究中的应用.....60
3.7.3 热成型法.....57	3.9 利用间接模型确定影响线和影响面——Muller-Breslau原理.....61
3.7.4 壳体模型的塑落成型法或重力成型法.....58	3.10 Beggs变位仪.....61
	3.11 结语.....63

4 非弹性模型：混凝土及砌体结构材料

4.1 概 述.....64	4.7 抗拉与抗剪性能.....80
4.2 原型和模型混凝土.....64	4.7.1 劈裂抗拉强度.....80
4.3 混凝土的工程性质.....65	4.7.2 圆柱体模型的劈裂试验结果.....82
4.3.1 原型和模型混凝土——微型结构效应.....66	4.7.3 劈裂抗拉强度与龄期的关系.....82
4.4 无侧限抗压强度及应力-应变关系.....66	4.7.4 劈裂抗拉强度与弯曲强度之间的相互关系.....83
4.4.1 原型混凝土.....66	4.8 模型混凝土的设计配合比.....85
4.4.2 模型混凝土.....67	4.8.1 概 述.....85
4.4.3 原型和模型混凝土应力-应变特征的比较.....67	4.8.2 模型材料比例的选择.....85
4.4.4 混凝土的徐变及徐变恢复.....68	4.8.3 原型性质的模拟.....85
4.4.5 骨料含量的影响.....69	4.8.4 影响混凝土力学性质的重要参数.....86
4.4.6 应变速率的影响.....72	4.9 各研究者所用模型混凝土配合比摘要.....87
4.4.7 水分散失的影响.....72	4.10 石膏砂浆.....94
4.4.8 强度-龄期关系以及养护.....72	4.10.1 养护和密封方法.....96
4.4.9 抗压强度的统计变异性.....74	4.10.2 力学性质.....96
4.5 混凝土的抗拉强度.....76	4.11 砌体结构模型.....97
4.6 原型和模型混凝土的弯曲性能.....77	4.11.1 概 述.....97
4.6.1 试件的尺寸和特性.....77	4.11.2 材料性质.....98
4.6.2 应力-应变曲线.....77	4.11.3 制作工艺.....102
4.6.3 弯折模量随试件尺寸的变化情况.....78	4.11.4 基本强度性质.....103
4.6.4 加载速率.....78	4.12 结 语.....107
4.6.5 应变梯度的影响.....80	

5 非弹性模型：结构钢和钢筋

5.1 概 述.....109	5.4 小比例模型的钢筋.....113
5.2 钢 材.....109	5.4.1 各研究者所采用的模型钢筋.....114
5.2.1 钢 筋.....109	5.5 模型预应力钢筋及其技术.....114
5.2.2 结构钢.....110	5.5.1 模型预应力钢筋及其锚固系统.....114
5.2.3 预应力钢筋.....110	5.5.2 模型的预应力技术.....115
5.3 结构钢模型.....111	

5.6 钢筋混凝土模型用的钢筋	120	5.7.2 制作方法	128
5.6.1 小模型用的钢丝	120	5.7.3 钢筋位置的精度	129
5.6.2 黑退火钢丝用作模型钢筋	122	5.8 模型钢筋的粘结特性	129
5.6.3 市场供应的变形钢丝用作 模型钢筋	123	5.9 粘结相似性	133
5.7 模型钢筋的制作	128	5.10 钢筋混凝土构件中的开裂相似性 以及总变形相似性	135
5.7.1 概 述	128	5.11 结 语	139

6 材料体系和模型的尺寸效应

6.1 概 述	140	6.4.5 抗拉强度试验工作的评述	155
6.2 影响尺寸效应的因素	140	6.4.6 混凝土持久性能的尺寸效应	155
6.3 尺寸效应的理论研究	141	6.4.7 石膏砂浆中的尺寸效应	156
6.3.1 经典的纤维束强度理论	141	6.5 钢筋混凝土和预应力钢筋混凝土 的尺寸效应	157
6.3.2 最弱环理论	143	6.5.1 粘结性能	157
6.3.3 其它理论研究	144	6.5.2 开裂模拟 (使用条件)	158
6.3.4 理论研究的评述	145	6.5.3 极限强度 (荷载-变形 性能)	158
6.4 素混凝土的尺寸效应——试验 工作	145	6.6 金属和钢筋的尺寸效应	159
6.4.1 影响尺寸效应的试验因素	146	6.7 砌体砂浆的尺寸效应	159
6.4.2 尺寸效应的试验研究	147	6.8 结 语	161
6.4.3 试验研究的评述	149		
6.4.4 水泥砂浆的抗拉和弯曲强度	150		

7 加载系统与试验技术

7.1 引 言	162	7.4.3 荷载间距效应	173
7.2 荷载类型和加载系统	162	7.5 压屈加荷技术和侧移结构加荷 技术	175
7.2.1 荷载反力系统	162	7.5.1 壳体的失稳	175
7.2.2 非连续荷载的加载装置	164	7.5.2 产生侧移的结构	176
7.2.3 气压和真空加载系统	164	7.6 其他加荷装置	179
7.3 不连续荷载与分布荷载的比较	167	7.6.1 热荷载	179
7.4 薄壳和其它模型的加荷技术	169	7.6.2 自重效应	179
7.4.1 真空和气压加荷	169	7.7 结 语	180
7.4.2 不连续荷载系统	172		

8 试验装置原理及其应用

8.1 概 述	181	8.4.2 线性可调差动变压器式 位移计	199
8.2 量测的参数	181	8.4.3 线性电阻电位差计	200
8.3 应变测量	182	8.5 应变场的应变测量和裂缝 检测方法	201
8.3.1 机械式应变计	182	8.5.1 脆性涂层	201
8.3.2 电测应变计	183	8.5.2 光弹贴片	202
8.3.3 电阻应变仪的线路及其应用	187	8.5.3 其它的裂缝检测方法	202
8.4 位移测量	199		
8.4.1 机械式千分表	199		

8.6 应力和力的测量.....202	8.7 温度测量方法.....208
8.6.1 荷重传感器的类型及尺寸.....203	8.8 徐变、收缩和含水量测量.....209
8.6.2 埋入式应变计和应力栓.....205	8.9 数据采集和处理.....210
8.6.3 其它量测仪表.....207	8.9.1 各种数据采集系统.....211
	8.10 结 语.....212

9 结构模型的精确性和可靠性

9.1 概 述.....214	9.5 随机误差的传递.....224
9.2 结构模型研究中的误差.....214	9.6 混凝土模型的准确性.....229
9.3 误差的类别.....216	9.6.1 尺寸及其制作准确性.....229
9.3.1 过失误差.....216	9.6.2 材料特性.....234
9.3.2 随机误差.....216	9.6.3 试验和量测结果的准确性.....235
9.3.3 系统误差.....217	9.6.4 试验结果分析中的精度.....236
9.4 量测结果的统计分析.....217	9.7 模型试验结果的总体可靠性.....236
9.4.1 概率密度函数.....217	9.8 时间和费用对模型精度的影响.....238
9.4.2 正态概率密度函数.....219	9.9 结 语.....239
9.4.3 契比雪夫不等式.....223	

10 模型应用的研究实例

10.1 引 言.....240	航空公司(TWA)飞机库
10.2 模型应用.....240	结构271
10.2.1 建筑结构.....240	10.3.2 研究实例B, 三姊妹桥梁274
10.2.2 桥梁结构.....246	10.3.3 研究实例C, 多层钢筋
10.2.3 特殊结构.....256	混凝土框架.....278
10.3 研究实例.....271	10.3.4 研究实例D, 预制混凝土
10.3.1 研究实例A, 美国环球	大板房屋建筑289

11 承受风、爆炸、冲击和地震荷载的结构模型

11.1 引 言.....299	11.5 动力模型实例.....312
11.2 相似要求.....299	11.5.1 自振频率和振型312
11.2.1 概 述.....299	11.5.2 房屋建筑和结构的气动弹性
11.2.2 弹性结构的振动.....299	模型研究.....315
11.2.3 流体弹性模型.....302	11.5.3 爆炸对防护结构的效应320
11.2.4 爆炸和冲击荷载模拟.....303	11.5.4 钢筋混凝土框架和桥梁的
11.2.5 结构地震模拟.....305	地震模拟323
11.3 动力模型材料.....306	11.6 多伦多市政大厅风洞试验研究
11.3.1 钢结构的动力特性.....306	实例328
11.3.2 钢筋混凝土.....306	11.6.1 课 题.....328
11.4 动力模型试验的加载系统.....309	11.6.2 试验程序.....328
11.4.1 振动试验和共振试验.....309	11.6.3 试验技术.....329
11.4.2 风洞试验.....309	11.6.4 结 论.....329
11.4.3 激波管和爆炸洞.....310	附录 本书常用缩写词和英制与国际单位
11.4.4 振动台.....312	制符号对照.....331

1

结构工程物理模型简介

1.1 引言

这一章提出了对结构物理模型的看法，其中包括经过多年来发展而成的各种物理模型分类，以及对在北美或其它地方这些模型类别在设计、发展和研究方面所起的作用进行了某些评述。

结构模型（及缩尺模型）在结构工程的研究和设计中总是起着突出的作用。在讲授结构力学和结构工程时，缩尺结构和试件的实验也是很重要的。在计划、实施和整理分析结构性能的实验研究时，会遇到广泛的课题。这些领域包括，自理论相似要求直至相当广泛的实验应力分析的科目，其中每个领域均将在以后各章详细讨论。本章把结构模型的广泛物理意义向读者加以概括性介绍，并说明模型是怎样用在专业中的。在计划新的建筑物及其相关空间时，纯建筑学上的模型也是重要的，但是，由于它的作用和结构模型完全不同，因此本书不研究这类模型。

1.2 结构模型的定义和分类

美国混凝土协会给结构模型下的定义是：“模型是一个结构或一部分结构的任何物理模拟。最通常的情况，模型将按缩小的比例制造”。自然，这个定义同样适用于任何材料制成的结构模型。Janney等人（1970）给出的第二定义是：一个结构模型是按缩尺（和足尺结构相比较）建成的任何结构构件或其组合体，这种模型是作试验用的，且在整理分析试验结果时，必须使用相似定律。

这两个定义包括了对多种原型（足尺）结构的模拟研究，譬如桥梁、房屋建筑、大坝、塔式建筑、反应堆容器、薄壳建筑、宇宙飞船及机械工程结构、海中结构物等等。荷载则包括静力、模拟地震力、热效应和风效应等。

许多缩尺结构构件在习惯上用作探索性研究，即使相似条件一般不适用于大比例的研究性模型，一些研究者也把这些结构归类为模型的范畴。设计方法和公式都直接以这些探索性模型的观测性能为根据，因此，这就受到设计者的充分认可。

本书包括了钢筋混凝土结构模型的广泛内容，模型的几何比例系数约为 $1/10$ 。不过，其中多数内容也适用于其它类型的结构模型，同时也适用于不同的比例系数。

1.2.1 模型分类

结构模型可以按各种方式来定义和分类。这里采用的定义则和预定的功能有关。即就是说，我们想从试验中达到什么目的？是只想作弹性反应呢，还是期望把模型加载到破坏，以资观测包括破坏状态及其能力的全部性能？是只满足于从模型实验中来确定影响线呢，还是需

要根据规定的荷载得出应变的实测值？在这些应用中，每一种模型都需要有一个很适当的名称。

弹性模型 这类模型和原型的几何形状直接相似，虽然模型材料并不一定要和原型材料相似，但是它应由均匀的弹性材料作成。因为弹性模型的性能被限制在原型性能的弹性范围内，所以这种模型不能预计混凝土在开裂后的性能；同样也不能预计钢在屈服后的性能，以及不能预计实际承载结构中所发生的许多其它非弹性性能。第三章将详细介绍弹性模型并包括材料的选择，塑料如甲基丙烯酸甲酯（聚异丁烯酸树脂、2-甲基丙烯酸、聚乙-甲基丙烯酸甲酯）和聚氯乙烯（PVC），尽管它们有随时间而变的特性，会引起某些失真，但仍被广泛用来制造弹性模型。

间接模型 当弹性模型用来探求结构的反力和内应力的合力（剪力、弯矩和轴向力）的影响线或影响面时，这样的弹性模型就称为间接模型（图1.1）。所以，间接模型是弹性模型的一种特殊形式。由于荷载效应系根据影响值叠加求得，所以施加给间接模型的荷载，不必要和原型结构上所预定的实际荷载相一致。一个间接模型并不总是要和原型具有物理上的直接相似。例如，当框架性能由框架的抗弯刚度特性（EI）控制时，就能够正确地模拟出相对刚度值的间接模型。在间接模型中，横截面形状可以不按精确的比例（间接模型中的圆形截面能表示原型的宽翼缘截面），同时，只要不影响实验结果，构件面积可以有较大失真。

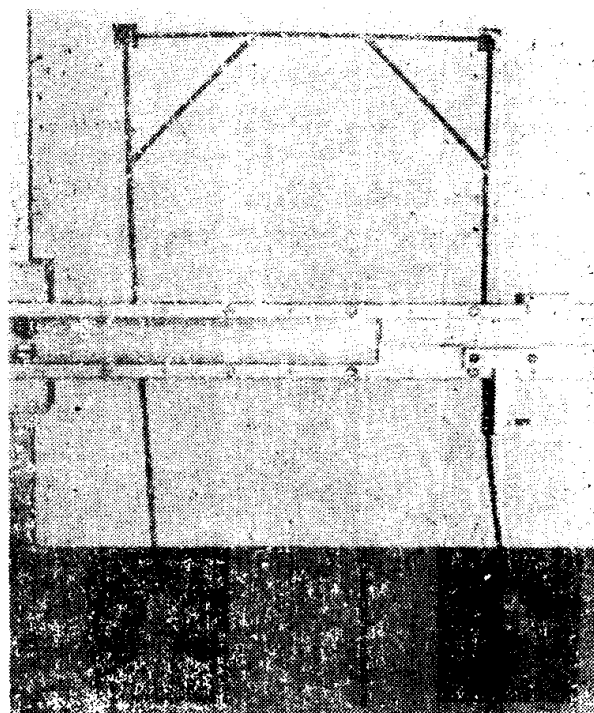


图1.1 隅撑框架的右侧基底力矩影响线
(注意使右侧基底转动而得出框架的挠曲形状)

在过去，间接模型大多用于超静定框架的非均匀构件；现在，这些单纯性的计算很容易由计算机来完成，所以这种模型已经没有多大用处了。

直接模型 一个直接模型在各个方面都和原型几何相似，同时施加在模型上的荷载也和施加在原型上的荷载情况相同。在每级荷载情况下，模型的应变、变形及应力都代表原型在对应荷载情况下的相似量。因此，一个弹性模型也可以是一个直接模型。

强度模型 这类模型也叫做极限强度模型或仿真模型（realistic model），它是由一种和原型材料相似的材料制成的直接模型，所以，在直至破坏的全部荷载作用下，它都能预计原型的性能（见图1.5、1.7、1.9、1.14）。一个钢筋混凝土构件或结构的强度模型，必须由模型混凝土及模型钢筋制成，每种材料都要满足原型材料的相似条件。后者是混凝土结构强度模型中遇到的最困难的问题，第四及第五两章将进一步讨论这些题目。强度模型也适用于钢结构、木结构等等，而且在每一种情况下，最主要的问题是寻求模型的适用材料及其制造工艺。

按定义，一个强度模型必须是一个直接模型。为了利用间接模型的结果，人们必须依靠结果的叠加，而叠加原理对于一切强度模型中所出现的超线性反应方面并不有效。因此，如果只在弹性性能范围内利用强度模型，那么制造强度模型是不经济的。

风效应模型 风效应模型的分类方法有多种。如果利用形状模型，可以量测结构上的总力或风压力（图1.3）；为了量测由风所引起的结构应力和变形，以及结构与风的动力相互作用，可以利用气动弹性模型，这种模型须模拟原型结构的形状和刚度特性。

研究、设计和教学用模型 人们常常会看到有研究用模型、教学用模型和设计用模型这样的分类。每种模型的用途是明显的，值得指出的是，每种模型中所需要的完善程度大不相同。教学模型应该做得尽量简单，能表示所研究的基本原理即可，对于所要求的性能并无显著影响的任何相似上的失真都是容许的。由于研究用的模型在于证实理论并推广应用于一类结构，所以通常都要尽可能按照实验技术条件所能达到的最大精度来进行模拟。设计用模型的精度，可在教学用模型至研究用模型的精度要求范围内，其程度取决于所希望达到的结果。有些设计用模型可仅作为初步设计的工具，对于计划中的结构，它们在荷载下的变形如何，借此工具可以获得更好的概念；也有些其它设计模型用来预计可能出现的不稳定性状态，或者用来预计结构的真实承载能力。

利用结构模型作为设计中的直接助手，这是结构模型在用途上的最大功效之一。一个工程师常常被请去设计如象在1965年纽约世界博览会上柯达亭（Kodak Pavilion）自由型薄壳那样的结构；然而，利用现行的通用分析工具并不能解决这类结构的设计问题。在这种情况下，往往使用一系列塑料模型来作为最后设计的主要途径。

物理模型在设计中的另外一个主要用途，是帮助验证巨大的和纪念性的结构计算，因为这种结构一旦破坏，其后果可能极端严重（如丧失生命或主要投资的重大损失，或者重要生命线设施的破坏）。例如，核反应堆结构是利用模型来验证计算的一个好例子。

从顾问工程师的观点看，设计用模型的主要缺点也许是模型研究中涉及的时间和费用问题，这一题目将在1.7节中进一步提到。

其它模型 其它类别的模型包括动力模型，这类模型通常是弹性模型、直接模型、热效应模型。热效应模型研究温度梯度对结构的效应。虽然有些人试图把一般荷载和热力荷载结合起来用于强度模型，但是热力荷载模型通常也是弹性模型、直接模型。还有一种利用光学效应的光学力学模型。施工程序模型用来帮助设计结构极其复杂的建筑物，如解决核反应堆容器中及悬臂梁桥梁中钢筋的布置问题，就可用施工程序模型。

1.3 关于模型的简单回顾

工程师和建筑师用的小比例模型可以追溯至几百年以前，甚至几千年。不过，这些早期的模型主要用来帮助计划和修建结构物，而不是预计原型的变形和强度。它们和近代的建筑模型几乎更相似，不能认为它们是结构模型的范畴。

用来预计结构性能的大多数模型则要求量测其应变、位移和力。因此，作为一种实用工具的模型，其发展明显受到实验应力分析能力的影响。实验应力分析中的最常用技术仅在这一世纪才建立起来。它们包括：

1. 当结构的几何形状复杂时，用来分析其弹性应力的光测弹性学技术；
2. 为了把变形引入间接模型中，然后利用Muller-Breslau原理确定结构的影响线（图1.1），为此，由Beggs及其他一些人研制成了变形计；
3. 量测表面应变用的机械和光学应变计；
4. 电阻应变计；

5. 线性可调差动变压器式位移计 (LVDT)、线性电位计、以及类似的电子位移记录装置;

6. 脆漆层、波动光栅和干涉条纹方法、以及在结构或模型表面为“全场”应变测量的光测弹性涂层;

7. 利用微型计算机来控制和处理多通道数据的自动数据采集系统。

就对结构的静力或动力应变测定能提供简易的方法而论, 第4项的电阻应变计也许是最重要的。这种电阻应变计常用来构成压力盒及传感器中的敏感装置。因此, 二十世纪四十年代开始采用这种应变计, 被认为是近代实验应力分析和结构模型分析的基础。

除了光测弹性研究和间接模型外, 在1940年以前模型分析是相当少的。不过, 1930年建造的1/240比例的Hoover坝模型则是一个明显的例外。自那时起, 结构模型的快速制作、测试装置以及试验等方面的技术, 继续不断地得到了发展。这一章介绍结构模拟的常规用途, 读者通读本书之后, 即可对模型用途的全部范围有较深入的了解。

1.4 结构模型和实施规程

在大多数的北美房屋建筑规程和规范中, 对模型的重视程度是相当小的; 然而, 大多数规程确实又包括有容许工程师在设计过程中基本上使用模型的特别条文。

澳大利亚容许某种类型结构的全部设计仅需使用模型分析, 所以在设计规范中, 使用模型的可能性相当大。只要工程师了解到, 许多规程上关于分析方法的条款主要都是来自缩尺模型试验这一事实, 他们就乐意在设计中使用模型了。

规程条款在许多情况下可用于实际, 然而大多数场合, 分析方法并不完全适用。对于加载到几乎破坏或某种极限状态的钢筋混凝土结构, 分析方法尚未发展到足以掌握其极端复杂性能的程度, 这就是工程师们常常使用模型技术来研究结构破坏问题的原因。

在设计阶段, 下列各类结构可能适合作模型研究:

1. 外形和边界条件复杂的薄壳屋顶结构;
2. 有必要作风洞模型的高大结构和对风效应敏感的结构;
3. 许多构件有相互影响的新型建筑结构系统;
4. 如象预应力混凝土箱形梁这类复杂的桥梁结构;
5. 核反应堆容器以及其它钢筋混凝土和预应力混凝土压力容器;
6. 受风和地震力这种复杂荷载及荷载历程的普通框架结构;
7. 边界或荷载条件不一般的平板结构, 几何外形不规则(如切口和厚度变化)的结构;
8. 大坝;
9. 海中结构;
10. 细部构造。

第10项指出了模型的一个重要用途, 即用于研究仅仅发生在结构有限区内的研究课题, 如象涉及接头的细部构造, 或者由于大预应力引起的局部应力课题等。细心地设计和试验这类部分结构模型, 对于验证设计和改进设计可能是非常重要的。部分结构模型的主要难点在于提供适当的边界条件, 因为物理模型的边界条件不适当, 甚至会得出比分析解中用差的边界条件更坏的结果。

1.5 几何比例的选择

要在一个给定的实验室中建造一个模型，就存在一个最佳比例系数的选择问题。很小的模型只需要轻量级荷载，但是，在其制造和装配仪器上会出现很大困难。大比例模型易于制造，但要求有较为重型的加载设备。对于有充分装备而能进行大型结构试验的实验室来说，后者这样的要求并不难办到；但对于一个较小的实验室来说，其要求就成为严重障碍。几种结构的典型比例系数如表1.1所列。

结构模型的典型比例系数 表1.1

结 构 类 型	弹 性 模 型	强 度 模 型
薄 壳 屋 顶	1/200至1/50	1/30至1/10
公 路 桥 梁	1/25	1/20至1/4
反 应 堆 容 器	1/100至1/50	1/20至1/4
平 板 构 结	1/25	1/10至1/4
大 坝	1/400	1/75
风 效 应 结 构	1/300至1/50	不 适 用

在读完本书各章之后，对表1.1的基本原则会了解得更透彻。至于混凝土结构强度模型，还有许多诸如最小合理厚度、钢筋间距、保护层厚度等等实际尺寸限制上的问题。在这种模型范畴内，满足材料的相似要求则是一个极端关键的问题。

1.6 模拟方法

在物理模拟方法中，要使模拟研究获得成功，就得精细地计划好许多不同的实验步骤。就一个工程结构的实验研究而论，本身就是一个小型工程设计。如同任何一种尝试性的工程一样，有条不紊地安排事情的先后程序是绝对需要的。

通常，不可能在半途上用模拟方法来改进结构模型，所以仔细作好实验计划比计划好分析方法更重要。计划的一个主要方面，乃是解决好要从模型试验中得到什么预期结果。是否只需获得弹性应力和弹性位移？要不要看到在超载下导致结构破坏时的现象？可能破坏的状态是否失稳？要不要包括热效应？是否非要模拟动力效应不可？就完成模型研究所需的时间而论，简单的部分结构的弹性模型也许只花费一周或半个月时间，而预计全部结构破坏性能用的详细极限强度加筋砂浆模型，也许要花费六个月或更多的时间。正如要避免过多的结构分析那样，显然要防止“过多”的模拟研究。因为工程师对设计负最后的责任，所以他是确定模型实验将要完成哪些内容的关键人物。

典型的模拟研究可分为以下一些步骤：

1. 定义课题的范围，确定需要从模型实验中解决什么和不必解决什么。
2. 确定可靠度或精度的要求水平。如果设计用的精度有±30%即合适，那么，企图达到±10%的精度就会浪费精力和时间（见第九章）。
3. 规定几何外形、材料、加载、结果整理等的相似条件。在作薄壳及板结构的弹性模

拟时,譬如要求混凝土及塑料的泊松比相等,就要格外注意这些不能得到满足的相似要求(第二章)。

4. 在恰当注意到上述步骤(1)、(2)、(3)的情况下,选择模型材料(第三、四、五章)。

5. 在计划制造模型的阶段,就和将要制造模型的技术人员协商,紧接着就进行制造工作,因为这一步骤很费时间,搞不好会使模型实验落空。

6. 设计和准备加载设备。在模型使用新加载系统之前,对其系统应作彻底检查和标定(第七章)。

7. 选择测定应变、位移、力和其它物理量的仪器和记录设备。这一步骤必须和第(5)及(6)两步密切配合进行,特别是要在混凝土模型中使用埋入式应变计时要配合好。对于特殊应变计和其它设备,还必须在实际使用之前调配好(第八章)。

8. 观察模型在加载过程中的反应,并作好全部性能的笔记和摄影记录。不搞突击性试验,也不要让任何事情都凭记忆。在此阶段,有些研究者利用磁带录音机或录像机详细记录有关荷载历程、裂缝发展、失稳状态、以及其它难于用数字描述的情况。在实验前要对反应作近似计算,以估计所期望的反应等级。此外,还应根据早先试验所得的结果来进行均衡检验,因为正确地记录数据是十分重要的。如果必须由人工记录时,这里还有几条特殊说明:

(a) 准备好表格式的记录纸,在第一页上填上日期、试验人员姓名、模型名称。

(b) 直接记录读数,切忌在头脑中缩减数据。

(c) 记录零读数,因为要记的零读数往往不只一次,故至少要留两行空间。

(d) 为了整理结果,应留有相邻栏。

(e) 当破坏临近时,应取较小的荷载增量并相应读数。

(f) 在实际发生屈服或破坏时,要读数,即使所达到的精度水平不高,近似读数也能提供性能方面的较好概念。

(g) 卸载后记录最后读数。

9. 全部试验尚在记忆犹新之际,尽快分析数据和写出报告。除了报告其结果外,还应提出改进技术的建议,以便在以后的实验中更好地改善模拟结果。

1.7 模型分析的优点和局限性

物理模型的优点之所以比分析模型的优点多,在于前者能刻画出加载至破坏阶段全部结构的性能。虽然以计算机为基础的结构分析方法不断取得实质性的进展,但是仍然不能以分析方式来预计破坏能力。譬如三维钢筋混凝土构件的组合结构即为其例。

采用缩尺结构进行实验,其主要动机在于降低实验费用,费用降低的原因大体来自两方面:一是简化了加载设备及有关装置等等;二是节省了被试结构在制造、准备和试验后清除等方面的费用。由于原型上的集中荷载与模型比例系数的平方成正比(在1/20比例的模型上,如原型上的荷载为100kN,则模型上为0.25kN),所以荷载折减系数是相当令人满意的。如果模型用塑料之类的低弹性模量材料制造时,其折减数就更令人注目了。

在进行设计时,使用结构模型的主要局限性是时间和经费。如将物理模型和分析模型作比较,正常情况下,则后者比前者省钱省时间。所以,当后者能对原型结构的性能求得满意的解释时,人们就不期望用物理模型来取代结构分析模型。因此,几乎是当数学分析不能满

足要求或不合理的场合下,才使用物理模型,这是物理模型使用上受限制的因素之一。其次,如果模型研究的结果会引起原型设计上的改变,这时就要求有第二个模型来检验修改后的设计,这是受限制的另一因素。因此,实际情况常常把模型限于验证一个“近乎最终形式的”设计。

通常是当几种通用的途径已被证明不能满足要求时,才在最后时刻作出采用物理模型研究的决定,因此,模型研究的时间受到进一步的限制。必须作出适当的努力在设计之前就提出需要的试验,这样能较早作出计划,促使模型研究得以从容不迫地进行。

设计上利用结构模型的问题,已在前面概括提到。另外,结构模型也广泛适用于下述的研究项目:

1. 提供实验数据来验证所建议的分析方法的适宜性。
2. 研究薄壳之类复杂结构形式的基本性能。
3. 研究构件性能的参数。钢筋混凝土抗弯构件的基本特性,其中大部分是根据大比例模型研究得来的。
4. 研究全部结构系统在受复杂荷载历程下的性能,例如双肢剪力墙及其连系梁。

在这些研究性模型领域中,大多数都将在下面各章用一些例子来加以探讨。要很好认识到,研究性模型对于增进结构性能方面的知识起着非常宝贵的作用,并进而为改进设计和建立新的设计方法铺平道路。因为普通材料制成的真实系统的物理性能是发展学科的坚实基础,所以说研究性模型总是在结构工程中起重要作用。

1.8 结构模型的精度

关于从一定物理模型研究所得结果的可靠度,也许是模拟方法采用者所考虑的最重要的一个因素。这个问题将在第九章深入探讨,在此仅稍加说明,目的在于激励读者深入思考这一问题。可靠度和精度的确切定义是难于用公式表达的。模型能够再现原型结构反应的程度就是说明精度的一个明显度量标准。在这个对比中会遇到这样的问题:原型本身从来就是变异的,特别是钢筋混凝土结构更是如此。试对两个完全相同的钢筋混凝土构件或结构进行比较,在正常情况下,它们的差别就可高达20%或更高;如将一个模型和单一原型作比较,则要对精度作出肯定性结论显然是困难的。为了对结果进行统计,需要多个原型和多个模型,但是,即使通常只试验一个结构的费用就足够高的了,所以利用有意义的统计性试验来取得充分可靠资料的作法,当然会受到严格限制。

影响模型精度的因素包括:模型材料特性、制造精度、加载技术、量测手段、以及试验结果的整理等。弹性模型可以与以计算机为基础的详细结果建立起很好的相关性,而唯一的限制则是制作合适的模型和对模型加载所需的费用。因钢筋混凝土结构弹性模型只能预计弹性反应,因此对只有微细裂缝的结构(譬如薄壳),其精度是相当高的(误差等级小于5%至10%)。

对于经过精心设计和试验的钢筋混凝土梁、框架、薄壳及其它结构的强度模型,如果钢筋和模型混凝土之间的粘结力在性能方面不起控制因素,则就预计结构开裂后的位移和极限承载能力而言,那么最大误差通常是约在15%以下。本书后面章节将表明,多层框架模型研究(1.10.3节中研究实例c)的结果显示了模型和原型梁—柱节点性能之间很好的一致性,这些性能包括开裂、刚度、破坏状态和极限承载能力等。框架模型提供了结构性能方面的资

料, 而目前通用的计算机分析程序则不能提供此种资料。

只有在细心研究大量单独实例之后, 才能对任何特定模型试验方案作出预期可靠度的判断。第九章和其它有关章节及参考文献, 为读者研究模型可靠度提供了大量资料。

1.9 模型实验室

欧洲有许多引人注目的实验室, 在物理模型方面它们已很有声望。北美还没有类似的商业性实验室, 但是, 在许多专用的和大学的实验室中, 却有一些很好的结构模拟设备。很多大学的实验室还具有在振动台上作动力试验的条件。

和结构模型有关的问题是多种多样的, 所以高质量结构模型最好由熟练的工程师和技术员在建成的实验室中进行。这种看法并不是给新手泄气, 而是对于作好实验工作将会遇到的困难的客观真实陈述。建立一个多功能足尺的或大大缩减的小比例模型结构实验室, 需要有相当多的时间和颇大的耐心。在建立实验室时, 读者可以细心地充分利用当前所积累起的资料。自从1960年就有了一些先驱性结构模型, 再结合现代仪器仪表的轻便性和可靠性, 至少可以部分减轻筹建实验室所面临的许多困难。

1.10 模型研究实例

为了说明模型的各个方面, 本书引用了几个结构模型研究实例。在此, 用了两个设计性模型实例(称为A和B), 两个研究性项目(C和D)。本章只作一般性叙述, 其余详情将在第十章介绍。更特殊的模型研究实例也将在后面介绍, 其中包括预应力混凝土压力容器、动力反应方面的课题和薄壳稳定性问题等。

1.10.1 研究实例A, 美国环球航空公司飞机库结构模型

美国环球航空公司飞机库维修工厂位于密苏里Kansas市区, 对它的设计曾借助于一系列的模型。全部工厂由四座长跨薄壳结构组成, 每座位于十字形框架建筑物的转角处。两个完整的薄壳示于图1.2。每个薄壳的跨度约为320ft(96m), 薄壳为双曲线抛物面(简称双抛面), 具有三角形空心边缘构件, 另在两个抛物面相交处形成一个拱。薄壳厚度为3至6in.(75至150mm)。为了解决该飞机库的一系列设计问题, 使用了四个独立的模型, 这些模型被称为A1、A2、A3、A4。

模型A1是一个具有四块薄壳的形状模型(Shape model), 结构形状十分复杂, 比例为1/300。模型放在风洞中加荷载, 用以研究风压和风流经过现场时的一般特性。这个研究仅仅是关于模型的形状, 故模型可用任何取材方便的固体材料做成(例如软木)。

模型A2(图1.3)是另一个单独飞机库薄壳结构的风洞形状模型, 比例为1/100, 试验目的在于获得更详细和更精确的局部风压以及在大门开、闭等情况下的气流结构。

在分析设计阶段, 使用风洞模型试验资料的目的在于帮助提出最后设计。建造第三个模型的目的, 是确定多种不同荷载下的弹性性能。模型A3是一个塑料制成的1/50比例结构模型(图1.4)。采用分离式集中荷载和真空加载法加载。在本模型研究中, 特别重要的一点是测定重型维修装置悬挂在薄壳上时, 薄壳产生的弯曲效应。对于靠近刚性边缘构件处应力