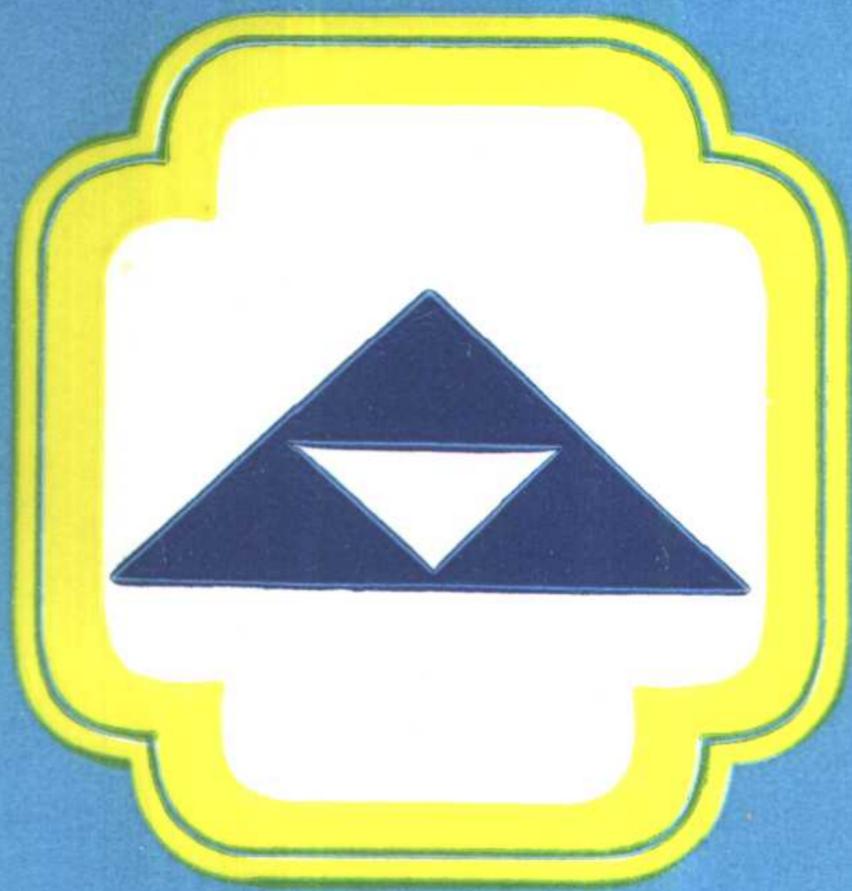


相似理论 与 静力学模型试验

袁文忠



西南交通大学出版社

相似理论
与
静力学模型试验

袁文忠

西南交通大学出版社

内 容 提 要

本书系统地介绍了静力学模型试验的基本原理和试验技术,内容包括相似理论、相似材料、模型试验的一般程序、线弹性模型试验、结构模型破坏试验、地质力学模型试验以及模型试验误差分析,同时,对静力学模型试验中的几个问题进行了讨论。本书在系统性和科学性的基础上突出其实用性,因此在模型制作和相似材料的配制方面作了较详尽的介绍。书中题材侧重于岩土工程及地下结构方面,但其原理和方法也适用于土建结构工程的其它领域。

本书可供从事岩土工程及地下结构模型试验工作的科研和工程技术人员参考,也可作为有关专业的研究生和大学学生的教材或参考用书。

相似理论与静力学模型试验

袁文忠

责任编辑 毛文义

*

西南交通大学出版社出版发行

(成都 二环路北一段 610031)

成都飞机工业公司印刷厂印刷

开本:787×1092 1/32 印张:4.9375

字数:100千字 印数:1-500册

1998年5月第1版 1998年5月第1次印刷

ISBN 7-81057-187-7/T·276

定价:10.00元

前 言

近年来,由于电子计算机的发展和广泛应用,计算力学在结构分析中起到了越来越重要的作用,但是,实验应力分析仍是研究各类结构问题的极其重要而又有效的途径之一。作为实验应力分析的一个重要组成部分,模型试验也仍然发挥着自己独特的作用。尤其对于一些复杂的、其中各相关物理量之间的数学模型尚未建立的结构(按现代岩土力学的观点,岩土本身也是一种结构),通过模型试验往往可以取得较好的结果。因此,国内外一些大型工程项目,如大型水电站的水坝、导流洞、地下厂房设计,长大隧道的围岩稳定及衬砌设计,新型长大桥梁的振动分析与结构设计,高层建筑的抗震设计,高边坡的稳定分析等,在使用计算机进行分析的同时,通常也要进行模型试验研究。

模型试验的理论基础是相似理论,只有掌握并正确运用相似理论的基本原理,才能保证模型试验取得预期的结果。

本书是在作者为岩土工程专业的研究生所写讲义的基础上完成的,可作为土木工程各专业的研究生和本科生的教材,也可供有关科研、设计和工程单位

的技术人员参考。

本书的一些资料摘自作者的学习和工作笔记,对某些原文的具体出处已很难查清,在此谨对这些资料的作者表示歉意,并致感谢。

在本书的写作过程中,西南交通大学郑洪泰先生提出了不少建设性的意见,作者深表谢意。

由于作者水平所限,本书一定会有不少错误和欠妥之处,敬请读者指正。

本书的出版得到西南交通大学出版基金资助。

西南交通大学 袁文忠

1997·10

目 录

第一章 绪 论	(1)
第二章 相似理论	(7)
第一节 概 述	(7)
第二节 物理量与量纲	(9)
第三节 相似的概念	(15)
第四节 相似判据与相似不变量	(18)
第五节 相似第二定理及其证明	(21)
第六节 相似第三定理	(27)
第七节 用方程分析法导出相似判据	(29)
第八节 相似函数与非相似函数	(33)
第九节 用量纲分析法导出相似判据	(36)
第十节 关于相似模拟的几个问题	(40)
第三章 相似材料	(43)
第一节 概 述	(43)
第二节 结构模型试验中常用的相似材料	(45)
第三节 五种常用原材料的特性及配比	(54)
第四节 影响相似材料性质的若干因素	(59)
第五节 相似材料的整体均匀性与性质再现性	(61)
第六节 相似材料力学特性的测试	(62)
第七节 正交试验在配制、选择相似材料中的应用	(67)
第八节 选择、确定相似材料的综合评判法	(81)

第四章	模型试验的一般程序	(84)
第一节	模型制作	(85)
第二节	模型加载	(87)
第三节	模型试验量测	(92)
第四节	试验结果的整理分析	(99)
第五章	线弹性模型试验	(106)
第六章	结构模型破坏试验	(109)
第七章	地质力学模型试验	(114)
第八章	模型试验误差分析	(120)
第一节	结构模型试验的可信性	(120)
第二节	电阻应变仪量测误差的分析	(121)
第三节	量测误差的类型	(128)
第四节	误差分析	(130)
第九章	模型试验中几个问题的讨论	(139)
第一节	关于用原型材料进行模型试验的问题	(139)
第二节	关于混凝土结构用原型材料进行模拟的问题	(142)
第三节	刚化效应对试验结果的影响	(144)
第四节	超过材料弹性极限后模型应力的计算	(148)
参考文献	(150)

第一章 绪论

一、解决物理问题的一般方法

科研人员或工程技术人员经常面临这样一个问题：如何获得解决某个实际问题的最佳手段。一般而言，解决某个问题的方法不是唯一的，能否在众多的方法中找出最合理的方法，取决于工作人员对该问题的了解、他的理论素养和（也许是更重要的）经验。一个现代的科技工作者或工程师，应该具备以最优方案处理问题的能力。

常用的解决物理问题（包括工程力学问题）的方法有：

(1) 直接试验法。该法直接对原型进行研究，其优点是可以直接得到所需的信息，缺点在于如原型的某一参数发生改变，则需重新进行试验。现场原位试验和室内材性试验都属于直接试验法。

(2) 连续试验法。该法依次改变研究对象的一种参数，而保持其它参数不变，并对所有感兴趣的参数进行重复试验。连续试验法可为认识问题的实质提供某些有益的信息，但不能提供各参数间相互影响、共同作用的信息，同时，该法对时间、经费和人力的耗费较大。

(3) 试验设计法（多因素法）。其特点是可同时改变所有（或部分）相关因素来研究系统的性状，然后用数理统计的方

法对试验结果进行分析，从而以较低的费用、较少的时间获得较大量的信息。试验设计法可以改变系统中不同参数而对系统的反应作出比较，搞清楚每一参数对试验结果的影响、分清各参数的主次及它们之间的相互关系。

(4) 量纲分析法。如果所研究问题的解答可以表示为各种变量的不同乘幂的线性组合，则根据量纲均匀性原理可使试验结果和试验设计的处理大为简化。从某种意义上讲，量纲分析法是模型试验的理论基础。

(5) 解析法。这是我们最熟悉的一种研究方法。如果构成物理现象的各变量之间的关系可用数学模型表述，而该数学模型又可求解的话，则我们将获得最普遍、最精确的解——解析解。

(6) 数值分析法。计算机的出现和广泛使用，使传统的解析法获得了新的活力。可以说，数值分析法是解析法的补充和推广。

(7) 模拟试验法（模型试验法）。这是建立在相似理论基础上的模型试验方法，也是本教材讨论的内容。

应该指出，以上各种方法并不是互相割裂、互不相干的。在处理一些复杂问题时，通常将各种（或其中几种）方法结合使用，用其所长，避其所短，最大限度地发挥它们的效能。比如，研究某隧道围岩的新型衬砌结构，一般会在现场钻芯取样，然后在室内对岩石的物理力学特性进行测试，再以测得的数据及衬砌参数为依据，进行模型试验。同时，用有限元法对衬砌受力及变形状态进行分析，算出其内力和各控制点位移，并与模型试验的结果进行比较。最后，综合计算和试验的结果，进行设计。而在进行模型试验前研制相似材料时，则会采

用试验设计法（正交试验法）。

二、模型与模型试验

“模型”是一个使用频率很高的概念，但又很难给其一个一般的定义。比如，有人称玩具汽车为模型汽车；按几何比例缩小的房屋建筑被称为建筑模型；以及作为教具的氢原子模型、人体模型等。在科学上，以下三个关于模型的概念是比较明确的，即

(1) 数学模型：描述所研究现象的固有形状和单值条件的物理变量之间的数学关系式（通常是微分方程）；

(2) 计算模型：建立在数学模型及其变换基础上的，可直接用于数值计算的代数方程组；

(3) 物理模型：将所研究对象根据相似理论的原则按比例制成的物体或系统。而被研究的对象，则称为模型的“原型”。

本教材中所谓“模型”均指物理模型。

模型试验是按一定的几何、物理关系，用模型代替原型进行测试研究，并将研究结果用于原型的试验方法。

就结构工程而言，模型试验的主要作用是：

(1) 对复杂的、尚未或难以建立准确数学模型的结构的行为进行研究，为设计或施工方案提供参考和依据，直接服务于工程目的；

(2) 为建立新的理论或计算（数学）模型提供依据；

(3) 检验新的理论或计算（数学）模型的正确性或实用性。

三、模型试验的优点与局限

模型试验的主要优点是：

(1) 可以严格控制试验对象的主要参数而不受外界环境的影响；

(2) 可以突出主要因素而略去次要因素，便于改变因素和进行重复试验，有利于验证或校核新的理论；

(3) (与直接试验相比)节省人力、物力和时间；

(4) 对某些正在设计的结构，可用模型试验来比较设计方案并校核该方案的合理性；

(5) 当所研究的对象尚未或难以建立数学模型时，模型试验可能是最重要的研究手段。

模型试验的主要局限是：

(1) 一般结构模型试验的试验周期较长、工作量大，大比例模型试验 ($C_1 \geq 1/30$) 更是如此；

(2) 相似条件难以完全满足；

(3) 对局部细节难以模拟；

(4) 直接对小比例模型 ($C_1 \leq 1/100$) 进行量测时，尺寸效应 (如应变片面积的影响) 不可忽视。

四、模型试验的发展趋势

目前国内外模型试验总的发展趋势是：试验技术现代化，试验对象大型化、复杂化。

试验技术现代化，具体来说，就是模型成型机械化，测试手段现代化。试验对象大型化、复杂化，是由于随着计算机的广泛使用，一般工程结构问题，通常只需进行计算分析就可以了，不一定要作模型试验。例如日本坝工设计规范 1978 年第二版就规定高度在 60 米以下的拱坝，一般不进行试验。因此，结构模型试验的重点转向解决重大工程和复杂、特殊结构

物的问题，如大坝、边坡的抗滑稳定，复杂地基对上部结构的影响，结构的破坏机理及可靠度，深基础、深基坑的开挖与支护，围岩应力分布、破坏机理及破坏形态等。地下结构和岩土力学问题，由于其复杂性，仅靠计算分析难以获得令人满意的结果，而正在成为模型试验的重要研究领域。

五、学习本课程的方法

本课程是一门理论与实践高度结合、应用性很强的课程，主要内容包括相似理论、相似材料、模型设计、模型试验及误差分析五部分。其中，相似理论是模型试验的理论基础，模型试验是我们学习相似理论的目的，而相似材料和模型设计又是进行模型试验必不可少的物质条件和技术保证，试验结果的误差分析处理则与能否解决实际问题有关系。只有搞清各部分的有机联系，才能学好本课程。

对于相似理论 应作到内容熟、概念清 能灵活、熟练地应用，同时要搞清其使用的条件和限制。

对于相似材料，要求了解以石膏为主要成分的脆性相似材料的主要力学性能；掌握材料配比的基本原则和用正交试验进行配比的方法；初步学会测试材料力学指标的手段。

对于模型设计，要求初步掌握从立题到选择相似材料、试验设备、测试方法直至进行模型试验的整个程序。

对于模型试验，要求了解模型制作、试验实施的全过程，并对线弹性模型试验、破坏模型试验和地质力学模型试验等三种试验的特点及任务有所了解。

至于误差分析，则要求了解误差产生的原因，并掌握基本的误差分析和处理方法。

在本书的最后一章的第一、三、四节，作者根据多年来从事模型试验的体会，对试验中存在的某些问题提出了自己的看法，愿与读者共同探讨。

必须指出，模型试验是一门既古老又年轻的学科，还有不少问题需要进行改进和完善，这就要求广大模型试验工作者善于学习 勇于实践 敢于探索。

通过本课程的学习，要着重培养独立分析、处理较复杂问题的能力以及综合思维的能力。

第二章 相似理论

第一节 概述

所谓相似，从哲学意义上讲，就是客观事物中同和异的矛盾统一，而相似现象是客观事物的一种和谐协调的组合形式。

无论在自然界、人类社会还是在人们的思维过程中，都普遍存在着相似的现象。

例如，绿色植物内存在的叶绿素，动物体内的血红素，似乎毫无关系，但现代化学证明，叶绿素和血红素的化学结构是相似的：它们都是卟吩络合物，叶绿素卟吩结合了镁元素，而血红素卟吩结合了铁元素。

再如文学作品中的典型、修辞学中的比喻、对偶、排比、绘画和表演艺术中的神似和形似等，都是相似的例子。

依据客观事物所具有的不同相似关系，可以把相似分为纵向相似和横向相似。由于客观事物内部的物理、化学联系而形成的相似关系，称为纵向相似；由于系统与系统之间相互联系、相互作用所形成的相似关系，称为横向相似。此外，从不同的角度出发，还可以把众多的相似现象分为动力相似、几何相似、现象相似、本质相似、静态相似、动态相似、宏观相似、微观相似等。

相似是相对的，有范围的，不在一定的范围内讨论相似，是毫无意义的。

如有的现象从静态看与某一现象相似，而从动态看又与另一现象相似。例如，子弹击穿玻璃，从肉眼看，认为是弹头直接撞击玻璃的结果，和低速（接近静态）下弹弓发射石子打碎玻璃相似。但高速同步摄影机拍摄的照片显示，子弹尚未接触玻璃时，玻璃已被弹头前产生的冲击波穿出一个洞了。这又与炸弹爆炸时产生的高速（动态）冲击波摧毁物体类似。

再如，某现象在宏观上与某一现象相似，而在微观上又与另一现象相似。制造飞机的过程，就是首先从宏观相似入手的。起初，人们幼稚地认为只要操纵两个巨大的、外观上与鸟的翅膀相似的东西，便可以飞上天。研究了鸟翅膀的微观结构后，才认识到鸟能飞翔，是因其翅膀呈拱形，从而使上下气流产生压力差的结果，于是对机翼作了改进，从而终于实现了像鸟一样在天空飞翔的愿望。

常识告诉我们，相似功能越多的事物，作用越大，应用越广。多媒体电脑就是一个极好的证明。

人的能力也是如此，当今世界，各学科之间相互渗透，相互影响，众多的边缘学科应运而生，这就要求我们成为具有多种学科知识并懂得组织、管理的“通才”。

本书中所讨论的相似，如未加专门说明，均指物理相似（包括几何相似）。

而相似理论则是研究自然界相似现象的相似原理的一门科学，它提供了确定相似判据的方法，是指导模型试验，整理试验结果，并把试验结果应用于原型的理论基础。限于课程的目的，在本书中，我们只讨论相似理论最基本的一些内容和结

论，对相似理论有兴趣的读者，可参阅有关专著。

第二节 物理量与量纲

系统的状态可由所谓状态空间点来描述。状态的变化可由这些点的连续曲线来描述。

状态的变化是系统的某些（或全部）物质基本性质在空间和时间上的变化。参与变化的性质，称为物理量。定义物理量时，一般从以下三方面考虑：

它在所讨论问题中的作用；

它与其它物理量的关系；

它在坐标变换时的性状。

下面分别加以讨论。

1. 在所讨论问题中的作用。应该指出，参与变换的物理量与控制这种变换的物理量是不同的，前者称为外延量，如体积、质量、能量等。不严格地讲，这类物理量服从加法律，后者称为内涵量，如温度、电势等，它们不服从加法律。

2. 一类物理量与其它物理量的关系由它们的量纲（Dimension）表示。在有的文献中，量纲又称为因次。

量纲是规定一类物理量的判据。量纲用“类型名称”的第一个大写英文字母表示，如 L 、 M 、 F 和 T 分别表示长度、质量、力和时间的量纲等等。

借助物理方程式，我们看到物理量是相互关联的，这使我们可以用一些物理量的量纲来表示另一些物理量的量纲。于是，在选择某些适当的物理量作为基本物理量后，其它物理量

的量纲就可以用基本物理量的量纲来表示了。

基本物理量的量纲称为基本量纲。由基本量纲表示的量纲称为导出量纲或次生量纲。基本量纲的选取一般是任意的或依习惯进行的，但作为一般的原则，在选取基本量纲时必须满足两个基本条件：

(1) 独立性。各基本量纲之间相互独立，其中的任何一个不可以由其它的基本量纲导出。例如长度、时间和速度就不能同时被作为基本量纲，这是因为速度量纲可由长度量纲和时间量纲组成。

(2) 完整性。在所讨论的问题中，所有物理量的量纲都可以由所选定的基本量纲组成。

任何满足以上两个条件的量纲都可以作为基本量纲，换言之，基本量纲不是唯一的和不变的。

然而，无论基本量纲如何选择，描述客观规律的物理方程的基本形式是不变的。因此，物理方程中，各项都必须具有相同的量纲，这就是量纲均匀性原理。

现以牛顿第二定律来说明基本量纲和导出量纲的关系。

$$F = ma$$

如选择质量、长度和时间的量纲作为一组基本量纲，则力的量纲就是导出量纲：

$$F = MLT^{-2}$$

如以力代替质量作为基本量纲，则质量的量纲又成了导出量纲：

$$M = T^2FL^{-1}$$

当然，也可以选择力、长度和质量作为基本量纲，这样时间的量纲又成了导出量纲：