

水工大坝与地基 模型试验及工程应用

(第二版)

SHUIGONG DABA
YU DIJI MOXING SHIYAN
JI GONGCHENG YINGYONG

主 编 张 林 陈 媛
副主编 杨宝全 董建华 陈建叶



科学出版社

水工大坝与地基 模型试验及工程应用 (第二版)

主 编 张 林 陈 媛

副主编 杨宝全 董建华 陈建叶

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书较系统地介绍了水工大坝结构模型与地质力学模型试验的有关理论、方法和技术,以及在高坝工程中的应用;主要包括模型相似理论、大坝结构试验方法与技术、大坝地质力学模型试验方法与技术;重点介绍两类模型的相似原理、模型材料、加载系统、量测技术和成果分析。本书在第一版的基础上增加了基于变温相似材料的降强法试验技术的内容以及应用模型试验手段解决高坝工程稳定安全问题的典型工程实例。

本书可作为高等院校水利水电工程专业本科生、研究生的教学或参考用书,同时也可供从事水利、土建工程结构模型和地质力学模型试验的科研及工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水工大坝与地基模型试验及工程应用(第二版)/张林,陈媛主编.
—北京:科学出版社,2015.8
ISBN 978-7-03-045476-8
I. ①水… II. ①张… ②陈… III. ①大坝-水工模型试验
IV. ①TV64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 198945 号

责任编辑:杨 岭 于 楠 / 责任校对:贺江艳
封面设计:墨创文化 / 责任印制:余少力

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号
邮政编码:100717
<http://www.sciencep.com>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015年8月第一次印刷 印张:17

字数:460千字

定价:58.00元

前 言

为了保证水工大坝的顺利建成及安全运行,必须解决好大坝结构的强度和高坝地基稳定问题,数值分析与物理模型是解决上述问题的两种有效途径。数值分析是以计算力学为基础,随着有限元分析方法和电子计算机技术的迅速发展得到广泛应用;物理模型则是以实验力学为基础,随着试验方法与技术的不断发展和创新而具有独特的优势,尤其是本书介绍的大坝结构模型试验与大坝地质力学模型试验是解决上述问题的重要方法之一。一直以来,国内外许多高坝工程均采用计算分析与试验研究相结合的方法,充分发挥各自的优点,相互验证和互为补充,以此全面分析论证大坝结构的强度与稳定问题。

本书是在第一版的基础上,根据使用本书的教师、学生和相关专家的建议,以及模型试验一些新的研究进展等进行全面的修订。修订后全书共分为10章:第1章介绍了相似现象的基本概念、相似原理、相似关系的分析方法、线弹性与弹塑性模型相似关系;第2章概述了大坝模型主要试验方法,重点介绍了大坝结构模型、地质力学模型两种重要试验方法,并对其他模型如动力模型、离心模型等进行了简要介绍;第3章讲述了大坝结构模型试验的目的及意义、试验分类、模型材料、加载系统、量测技术及成果分析;第4章对大坝地质力学模型试验方法与技术进行了阐述,重点介绍了破坏试验的三种方法,即超载法、强度储备法和综合法的基本原理及安全系数评价体系,并简述了地基岩石力学指标测试技术和方法;第5章对基于变温相似材料的降强法试验技术进行了系统介绍,包括变温相似材料的原理、分类、温度特性研究,升温降强试验技术,以及最新开展的坝肩坝基岩体结构面弱化效应研究的初步成果。第6~10章列举了国内外部分高坝工程模型试验实例,试验类型包含了结构模型试验和地质力学模型试验、三维整体模型试验和平面模型试验、拱坝模型试验和重力坝模型试验,并附有相关的试验照片。

本书得到国家自然科学基金面上项目(编号:51379139)和青年基金项目(编号:51109152、51409179)的资助,是国家特色专业(四川大学水利水电工程专业)的建设成果之一。书中的许多观点与成果凝聚着四川大学水工结构研究室老一辈模型试验工作者的智慧结晶,特别是李朝国教授和陈世英教授,长期以来在模型材料研究方面、试验方法与技术方面给予作者精心指导和真诚教诲,在此,向他们表示衷心的感谢!

本书修订工作是在张林、陈媛主持下完成的,参加修订的有董建华、陈建叶、杨宝全、胡成秋、徐进、刘建锋等。作者所在教研室的老师和同事们对本书的修订再版也给予了大力支持与帮助,在此一并致谢!

本书的撰写参考了大量的相关文献和专业书籍,谨向这些文献的作者表示衷心感谢!由于作者水平与经验所限,本书难免有一些错误和不妥之处,敬请读者不吝指正。

目 录

第 1 章 模型试验相似理论	1
1.1 相似的概念	1
1.2 相似理论	2
1.2.1 相似第一定理——相似现象的性质	2
1.2.2 相似第二定理——相似判据的确定	4
1.2.3 相似第三定理——相似现象的必要和充分条件	5
1.2.4 相似条件	5
1.3 相似关系分析方法	8
1.3.1 牛顿普遍相似定律	8
1.3.2 齐次原理与白金汉 π 理论	10
1.3.3 方程分析法	16
1.4 弹塑性阶段的相似关系	16
1.4.1 弹性阶段的相似关系	17
1.4.2 塑性阶段的相似关系	21
1.5 大坝模型试验的相似条件	23
1.5.1 结构模型试验的相似条件	23
1.5.2 地质力学模型试验的相似条件	25
第 2 章 大坝模型试验方法分类	27
2.1 大坝结构模型试验	27
2.1.1 结构模型试验的意义和任务	27
2.1.2 结构模型试验的主要研究内容	27
2.1.3 结构模型试验的类型	28
2.2 大坝地质力学模型试验	29
2.2.1 地质力学模型试验的目的与意义	29
2.2.2 地质力学模型试验的特点和研究内容	30
2.2.3 地质力学模型试验的类型	30
2.3 其他模型试验方法	33
2.3.1 动力模型试验方法	33
2.3.2 离心模型试验方法	33
第 3 章 大坝结构模型试验方法与技术	34
3.1 概述	34
3.1.1 结构模型试验的发展	34

3.1.2	结构模型试验的目的及意义	36
3.2	结构模型试验的模型材料	36
3.2.1	模型材料的分类	36
3.2.2	结构模型试验材料的选择	37
3.2.3	石膏材料	38
3.3	荷载模拟及加载系统布置	39
3.3.1	模型荷载的模拟	40
3.3.2	模型加载系统	41
3.4	结构模型试验量测技术	43
3.4.1	电测法的基本原理	44
3.4.2	应变量测的准备工作	44
3.4.3	应变量测计——电阻应变片	46
3.4.4	位移的量测	52
3.4.5	光纤传感监测大坝裂缝	53
3.5	结构模型的设计与制作	55
3.5.1	模型设计	55
3.5.2	模型的制作	60
3.6	结构模型试验成果分析	63
3.6.1	试验数据的整理及误差分析	63
3.6.2	应力成果分析与计算	68
3.6.3	模型和原型的位移计算	76
3.6.4	结构模型破坏试验成果分析	76
第4章	大坝地质力学模型试验方法与技术	78
4.1	地质力学模型试验方法	78
4.1.1	三种破坏试验方法	78
4.1.2	模型试验安全系数表达式	80
4.1.3	地质力学模型试验程序	84
4.2	地基岩石力学指标测试概述	85
4.2.1	试样	85
4.2.2	岩石块体密度测试	87
4.2.3	单轴压缩试验	89
4.2.4	岩石抗拉强度测试	92
4.2.5	岩石三轴压缩试验	93
4.3	地质力学模型材料	95
4.3.1	材料选用的基本原则	95
4.3.2	模型相似材料的研制	96
4.3.3	不同性能的岩体相似材料	99
4.3.4	模型材料的成型工艺	102

4.4	模型加载系统与量测系统	104
4.4.1	自重的模拟	104
4.4.2	荷载设计与加载系统	105
4.4.3	模型量测系统	107
4.5	地质力学模型的设计与制作	108
4.5.1	模型的设计内容与优化	108
4.5.2	模型比尺 C_L 的选择	108
4.5.3	地质力学模型制作	109
4.6	试验成果分析	113
4.6.1	试验数据误差分析	113
4.6.2	试验成果整理分析	114
4.6.3	试验成果报告的编写	115
第5章	模型试验新技术	116
5.1	概述	116
5.2	变温相似材料	117
5.2.1	基本原理	117
5.2.2	变温相似材料分类	120
5.2.3	变温相似材料的温度特性研究	121
5.3	升温降强试验模拟技术	123
5.3.1	升温降强试验原理	123
5.3.2	升温降强控制系统及其在模型中的实现	123
5.4	岩体结构面弱化效应试验研究	125
5.4.1	弱化试验的目的	125
5.4.2	弱化试验设计与试验步骤	125
5.4.3	弱化试验成果	128
第6章	沙牌拱坝结构模型试验研究	130
6.1	工程概况与试验研究任务	130
6.1.1	工程枢纽概况	130
6.1.2	坝址区地形地质条件	133
6.1.3	工程主要特征参数及荷载	135
6.1.4	试验研究任务	136
6.2	坝体分缝形式结构模型试验研究	136
6.2.1	试验方案	136
6.2.2	模型设计与制作	137
6.2.3	试验成果及分析	139
6.3	拱坝开裂与破坏机制模型试验研究	146
6.3.1	试验研究内容	146
6.3.2	基于断裂力学的诱导缝原、模型开裂相似关系式	146

6.3.3	断裂特性试验研究	148
6.3.4	模型材料力学参数的确定及诱导缝的相似模拟	153
6.3.5	拱坝结构模型破坏试验	155
6.4	沙牌拱坝的建设及运行现状	161
第7章	锦屏一级拱坝地质力学模型试验研究	164
7.1	工程概况及试验研究内容	164
7.1.1	工程枢纽概况	164
7.1.2	地形地貌	164
7.1.3	岩层特性	166
7.1.4	影响坝肩稳定的主要地质构造	166
7.1.5	坝肩坝基加固处理方案	167
7.1.6	试验研究内容	168
7.2	拱坝三维地质力学模型试验设计	168
7.2.1	模型模拟范围	168
7.2.2	模型的制作与加工	169
7.2.3	模型加载与量测系统	173
7.2.4	综合法试验降强幅度的确定	175
7.2.5	试验方法与试验程序	176
7.3	天然地基条件下试验研究成果	176
7.3.1	应变及变位分布特征	176
7.3.2	破坏过程、破坏形态及综合稳定安全系数	179
7.4	加固地基条件下试验研究成果	181
7.4.1	应变及变位分布特征	181
7.4.2	破坏过程、破坏形态及综合稳定安全系数	184
7.5	加固前后试验成果对比分析及加固效果评价	186
7.5.1	两次试验的异同点	186
7.5.2	坝体变位和应变成果对比分析	188
7.5.3	坝肩及抗力体表面变位对比分析	190
7.5.4	主要结构面相对变位对比分析	191
7.5.5	破坏过程与破坏形态对比分析	193
7.5.6	两次试验综合稳定安全系数的比较	195
7.5.7	加固效果评价	196
7.6	锦屏一级拱坝建设与运行现状	196
第8章	小湾拱坝地质力学模型试验研究	198
8.1	工程概况及试验研究内容	198
8.1.1	工程概况	198
8.1.2	坝址区工程地质条件	198
8.1.3	坝肩加固措施	200

8.1.4	试验研究内容	201
8.2	拱坝平面地质力学模型试验	201
8.2.1	试验内容及要求	201
8.2.2	模型设计与制作	201
8.2.3	模型加载与量测系统	204
8.2.4	加固前后试验成果对比分析	205
8.3	拱坝整体地质力学模型试验研究	209
8.3.1	模型设计与制作	209
8.3.2	浅层卸荷岩体及节理裂隙模拟	210
8.3.3	模型加载与量测系统	212
8.3.4	试验成果分析	213
8.3.5	模型破坏过程、破坏形态及安全度评价	216
8.4	小湾工程建设情况与运行现状	218
第9章	武都重力坝三维地质力学模型试验研究	219
9.1	工程概况及试验研究内容	219
9.1.1	工程概况	219
9.1.2	模型试验研究内容	220
9.2	三维地质力学模型试验方案与模型设计	221
9.2.1	模型相似常数及原模型力学参数	221
9.2.2	天然地基方案模型试验	222
9.2.3	加固地基方案模型试验	224
9.3	天然坝基模型试验研究成果	227
9.3.1	变位及应变成果	227
9.3.2	模型破坏形态与破坏机理	229
9.3.3	超载稳定安全系数评价	231
9.3.4	坝基加固处理的必要性	231
9.4	加固坝基模型试验研究成果	232
9.4.1	变位及应变成果	232
9.4.2	模型破坏形态	234
9.4.3	综合稳定安全系数评价	235
9.4.4	坝基加固效果评价	235
9.5	武都水库工程建设情况与运行现状	236
第10章	国外典型大坝工程地质力学模型试验	238
10.1	伊泰普空腹重力坝	238
10.1.1	工程概况	238
10.1.2	工程地质条件	240
10.1.3	坝基岩体力学特性研究	241
10.1.4	地质力学模型试验	242

10.2 瓦依昂拱坝	244
10.2.1 工程概况	244
10.2.2 瓦依昂坝址地质特征	245
10.2.3 瓦依昂坝基岩石力学试验	246
10.2.4 地力学模型试验	246
10.3 川俟拱坝	248
10.3.1 工程概况	248
10.3.2 工程地质条件	249
10.3.3 坝基岩体力学性质研究	250
10.3.4 坝肩岩体稳定分析及采用的安全系数	251
10.3.5 基础处理	252
主要符号表	255
主要参考文献	256

第 1 章 模型试验相似理论

1.1 相似的概念

在自然界中,从宏观的天体到微观的粒子,从无机界到有机界,从原生生物到人类,一般来说,都是由一定要素组成的系统,存在着某些具体的属性和特征。各个系统的属性和特征是客观存在的,不依赖于人们的感性认识而存在。在不同类型、不同层次的系统之间可能存在某些共有的物理、化学、几何等具体属性或特征。这些属性和特征具有明确概念和意义,并可以进行数值上的度量。对于两个或两个以上不同系统间存在着某些共有属性或特征,并在数值上存在差异的现象,我们称之为相似。相似的概念首先出现在几何学中,例如图 1.1.1 中的两个相似三角形,是指对应尺寸不同,但形状一样的图形。

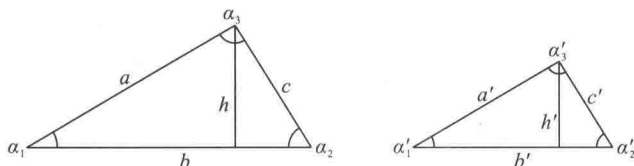


图 1.1.1 相似三角形

这两个相似的三角形具有如下的性质:各对应线段(各边长、各垂线)的比例相等,各对应角角度相等,即

$$\left. \begin{aligned} \frac{a}{a'} = \frac{b}{b'} = \frac{c}{c'} = \frac{h}{h'} = C_L \\ \alpha_1 = \alpha'_1, \alpha_2 = \alpha'_2, \alpha_3 = \alpha'_3 \end{aligned} \right\} \quad (1.1.1)$$

式中, C_L 为几何相似常数。

有此同类性质的还有相似的多边形、圆、椭圆、立方体、长方体、球等,而这相似现象均称为几何相似。推而广之,有物理相似。在自然界的一切物质体系中,存在着各种不同的物理变化过程,这些物理变化过程可以具体反映各种物理量(如时间、力、速度、加速度、位移、变形等)的变化。物理相似,是指不同物理体系的形态和某种变化过程的相似。通常所说的“相似”,有下面三种类型:

(1)相似,或同类相似(similitude),即两个物理体系在几何形态上,保持所对应的线性尺寸成比例,所对应的夹角角度相等,同时具有同一物理变化过程,如图 1.1.1 所示两个相似三角形。

(2)拟似,或异类相似(analogy),即两个物理体系物理性质不同,但它们的物理变化过程,遵循同样的数学规律或模式,如渗流场和电场,热传导和热扩散现象。

(3)差似,或变态相似(affinity),即两个物理体系在几何形态上不相似,但有同一物理变化过程。

本书主要讨论的是第一种相似,即几何形状相似体系进行的同一物理变化过程,这种体系中对对应点上的同名物理量之间具有固定的比数。如果我们找到这些体系中两个物理现象的同名物理量之间的固定比数,就可以用其中的一个物理现象去模拟另外一个物理现象。这个固定比数可以用相似系数(也称相似常数)、相似指标及相似判据(相似准数)三个概念来描述。

(1)相似系数。在模型与原型中,任一物理变化过程的同名物理量都保持着固定的比例关系,这种现象称为物理量相似;阐明这种比例关系的,叫做相似系数。在相似现象中,物理量相似的条件是相似系数为常数,因此,相似系数也叫相似常数。相似常数用 C 表示,同时右下角标明物理量类型,如几何尺寸 L 、正应力 σ 、容重 γ 等,式(1.1.1)中 C_L 即两个相似三角形的几何相似系数。

(2)相似指标。在模型与原型之间,若有关物理量的相似系数是互相制约的,则它们相互之间以某种形式保持着固有的关系,这种关系被称为相似指标,记为 C_i 。

(3)相似判据。既然相似指标是表示相似现象中各相似系数之间的关系,而相似系数代表了某个物理量之间所保持的比例关系,那么相似现象中各物理量之间应具有的比例关系就可由相似指标导出。这种比例关系是一个定数,称为相似判据或相似准数,通常写成 $K=idem$ 。

1.2 相似理论

相似理论揭示了相似的物理现象之间存在的固有关系。人们可以根据该理论找出同名物理量之间的固定比数,并将该理论应用在科学试验及工程技术实践中。

本书讨论的相似理论主要应用于实验力学中的水工模型试验。水工模型试验的任务是将作用在原型水工建筑物上的物理现象,在缩尺模型上重现,从模型上测出与原型相似的物理现象和数据,如应力、位移等,再通过模型相似关系推算到原型,从而达到用模型试验来研究原型的目的,以校核或改进设计方案。可见,相似理论是模型试验的基础,模型试验是用来预演和测定工程中物理现象的手段。因此,在模型试验研究中,应依照相似理论来进行模型设计,以及建立工程与模型之间物理量的换算关系。

1.2.1 相似第一定理——相似现象的性质

相似第一定理可表述为:“彼此相似的现象,以相同文字符号的方程所描述的相似指标为1,或相似判据为一不变量。”

相似指标等于1或相似判据相等是现象相似的必要条件。相似指标和相似判据所表达的意义是一致的,互相等价,仅表达式不同。

相似第一定理是由法国科学院院士贝特朗(J. Bertrand)于1848年确定的,其实早在1686年,牛顿(Isaac Newton)就发现了第一相似定理确定的相似现象的性质。现以牛顿

第二定律为例,说明相似指标和相似判据的相互关系。

设两个相似现象,它们的质点所受的力 F 的大小等于其质量 M 和其受力后产生的加速度 a 的乘积,质点所受力的方向与加速度的方向相同,则对第一个现象有

$$F_1 = M_1 a_1 \quad (1.2.1)$$

对第二个对象有

$$F_2 = M_2 a_2 \quad (1.2.2)$$

因为两现象相似,各物理量之间有下列关系:

$$C_F = \frac{F_2}{F_1}, C_M = \frac{M_2}{M_1}, C_a = \frac{a_2}{a_1} \quad (1.2.3)$$

式中, C_F 、 C_M 、 C_a 均为两相似现象的同名物理量之比,即相似系数。

将式(1.2.3)代入式(1.2.2),得

$$\begin{aligned} C_F F_1 &= C_M M_1 C_a a_1 \\ \frac{C_F}{C_M C_a} F_1 &= M_1 a_1 \end{aligned} \quad (1.2.4)$$

对比式(1.2.4)和式(1.2.1)可知,必须有下列关系才能成立:

$$\frac{C_F}{C_M C_a} = C_i = 1 \quad (1.2.5)$$

式中, C_i 为相似指标(或称相似指数),它是相似系数的特定关系式。

若将式(1.2.4)移项可得如下形式:

$$\frac{F_1}{M_1 a_1} = \frac{C_M C_a}{C_F} = \frac{1}{C_i} = 1 \quad (1.2.6)$$

同理由式(1.2.2)可得

$$\frac{F_2}{M_2 a_2} = 1 \quad (1.2.7)$$

则

$$\frac{F_1}{M_1 a_1} = \frac{F_2}{M_2 a_2} = \frac{F}{Ma} = K = idem \quad (1.2.8)$$

式中, K 为各物理量之间的常数,称为相似现象的“相似判据”或称“相似不变量”,它是相似物理体系的物理量的特定组合关系式; $idem$ 表示同一个数的意思。

由式(1.2.8)可知,两个相似现象中,它们对应的质点上的各物理量虽然是 $F_1 \neq F_2$, $m_1 \neq m_2$, $a_1 \neq a_2$, 但它们的组合量 $\frac{F}{ma}$ 的数值保持不变,这就是“两物理量相似其相似指标等于1”的等价条件。总之,以牛顿第二定律为例可得相似指标和相似判据的关系如下:

$$\left. \begin{array}{ll} \text{牛顿第二定律} & F = Ma \\ \text{相似系数} & C_F = \frac{F_2}{F_1}, C_M = \frac{M_2}{M_1}, C_a = \frac{a_2}{a_1} \\ \text{相似指标} & \frac{C_F}{C_M C_a} = 1 \\ \text{相似判据} & \frac{F}{Ma} = idem \end{array} \right\} \quad (1.2.9)$$

物理现象总是服从某一规律,这一规律可用相关物理量的数学方程式来表示。当现象相似时,各物理量的相似常数之间应该满足相似指标等于1的关系。应用相似常数的转换,由方程式转换所得相似判据的数值必然相同,即无量纲的相似判据在所有相似系统中都是相同的。

1.2.2 相似第二定理——相似判据的确定

相似第二定理,又称为 π 定理,可表述为:“表示一现象的各物理量之间的关系方程式,都可换算成无量纲的相似判据方程式。”

这样,在彼此相似的现象中,其相似判据可不必用相似常数导出,只要将各物理量之间的方程式转换成无量纲方程式的形式,其方程式的各项就是相似判据。例如,一条截面直杆,两端受有一偏心距为 L 的轴向力 F ,则其外侧面的最大应力 σ 可表示为

$$\sigma = \frac{F}{A} + \frac{FL}{W} \quad (1.2.10)$$

式中, A 为杆的截面积; W 为抗弯截面模量。

用 σ 除式(1.2.10)两端得

$$1 = \frac{F}{\sigma A} + \frac{FL}{W\sigma} \quad (1.2.11)$$

式(1.2.11)即为无量纲方程式,其中 $\frac{F}{\sigma A}$ 、 $\frac{FL}{W\sigma}$ 就是相似判据。

若有两个这种类型的相似现象,则它们的无量纲式分别如下:对第一个现象

$$\frac{F_1}{\sigma_1 A_1} + \frac{F_1 L_1}{W_1 \sigma_1} = 1 \quad (1.2.12a)$$

对第二个现象

$$\frac{F_2}{\sigma_2 A_2} + \frac{F_2 L_2}{W_2 \sigma_2} = 1 \quad (1.2.12b)$$

因为两现象相似,各物理量之间的相似关系式为

$$F_2 = C_F F_1, A_2 = C_A A_1, L_2 = C_L L_1, \sigma_2 = C_\sigma \sigma_1, W_2 = C_W W_1$$

将上述关系代入式(1.2.12b)得

$$\frac{C_F}{C_\sigma C_A} \cdot \frac{F_1}{\sigma_1 A_1} + \frac{C_F C_L}{C_\sigma C_W} \cdot \frac{F_1 L_1}{W_1 \sigma_1} = 1 \quad (1.2.12c)$$

对比式(1.2.12a)和式(1.2.12c)可知,要使两现象相似,则必须满足下列条件:

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{C_F}{C_\sigma C_A} = 1 \\ C_2 &= \frac{C_F C_L}{C_\sigma C_W} = 1 \end{aligned} \right\} \quad (1.2.12d)$$

根据相似的第一定律可知, C_1 、 C_2 都是彼此相似现象的相似指标,将各物理量及相似关系各代入式(1.2.12d)得

$$\frac{F_2}{F_1} \div \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \cdot \frac{A_2}{A_1} \right) = 1 \quad (1.2.13)$$

即

$$\frac{F_2}{\sigma_2 A_2} = \frac{F_1}{\sigma_1 A_1} = \frac{F}{\sigma A} = K_1 = idem \quad (1.2.14)$$

又

$$\frac{F_2 L_2}{F_1 L_1} \div \frac{\sigma_2 W_2}{\sigma_1 W_1} = 1 \quad (1.2.15)$$

即

$$\frac{F_2 L_2}{\sigma_2 W_2} = \frac{F_1 L_1}{\sigma_1 W_1} = \frac{FL}{\sigma W} = K_2 = idem \quad (1.2.16)$$

由上式可看出,无量纲方程中的各项就是相似判据。

如果用偏微分方程描述现象,则相似第二定理可将偏微分方程无量纲化,从而将有量纲的偏微分方程变换为无量纲的常微分方程,使之易于求解,这种方法被广泛用于数学方程式的理论分析中。常用 π 定理将各物理量之间的方程式转换成无量纲方程式的形式,之后将在1.3节详细介绍其应用。

1.2.3 相似第三定理——相似现象的必要和充分条件

相似第一定理阐述了相似现象的性质及各物理量之间存在的相似关系,相似第二定理证明了描述物理过程的方程经过转换后可由无量纲数群的关系式表示,相似现象的方程形式应相同,其无量纲数也应相同。第一、第二定理是在把物理相似作为已知条件的基础上,说明相似现象的性质,故称为相似正定理,是物理相似的必要条件。但如何判别两现象是否相似呢?1930年苏联科学家 M. B. 基尔皮契夫和 A. A. 古赫曼提出的相似第三定理补充了前面两个定理,是相似理论的逆定理。提出了判别物理相似的充分条件:“在几何相似系统中,具有相同文字符号的关系方程式,单值条件相似,且由单值条件组成的相似准数相等,则两物理现象是相似的。”简单地说,现象的单值量相似,则两物理现象相似。

单值条件是指从一群现象中把某一具体现象从中区分处理的条件,单值条件相似应包括:几何相似、物理相似、边界条件相似、力学相似、初始条件相似。所谓单值量,是指单值条件中所包含的各物理量,如力学现象中的尺寸、弹性模量、面积力、体积力等。因此,各单值量相似,当然包括各单值量的单值条件也就相似,则两现象自然相似。

综上所述,用以判断相似现象的是相似判据,它描述了相似现象的一般规律。所以,在进行模型试验之前,应先求得被研究对象的相似判据,然后按照相似判据确定的相似关系开展模型设计、试验测试和数据整理等工作。

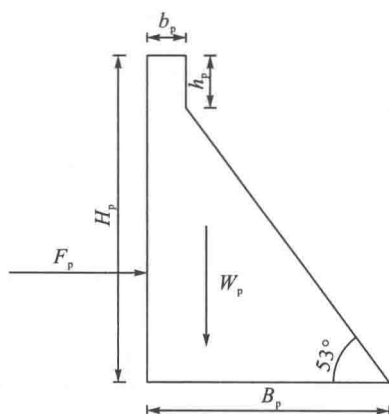
1.2.4 相似条件

不同的物理体系有着不同的变化过程,物理过程可用一定的物理量来描述。物理体系的相似是指在两个几何相似的物理体系中,进行着同一物理性质的变化过程,并且各体系中对应点上的同名物理量之间存在固定的相似常数。

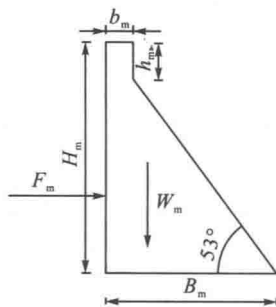
两个相似的物理体系之间一般存在以下 5 个方面的相似条件：几何相似、物理相似、力学相似、边界条件相似及初始条件相似。

1. 几何相似

几何相似是指原型和模型的外形相似，对应边边长成比例、对应角角度相等，如图 1.2.1 重力坝原型和模型剖面图所示。



(a) 原型剖面图



(b) 模型剖面图

图 1.2.1 重力坝原型和模型剖面图

两个重力坝剖面相似，则有

$$\frac{H_p}{H_m} = \frac{B_p}{B_m} = \frac{h_p}{h_m} = C_L, \quad \frac{\theta_p}{\theta_m} = C_\theta \quad (1.2.17)$$

两个几何相似的体系就是同一几何体系通过不同的比例放大或缩小而得，常见的相似常数有

$$\left. \begin{aligned} C_L &= \frac{L_p}{L_m} \\ C_\theta &= \frac{\theta_p}{\theta_m} \end{aligned} \right\} \quad (1.2.18)$$

式中， L_p 、 L_m 分别为原型、模型中某一线段的长度； θ_p 、 θ_m 分别为原型、模型中两条边的夹角； C_L 、 C_θ 分别为几何相似常数和几何比尺；下标 p 表示原型，m 表示模型(下同)。

2. 物理相似

物理相似是指原型和模型材料的物理力学性能参数相似, 常见的相似常数有

$$\left. \begin{aligned} \text{应力相似常数 } C_{\sigma} &= \frac{\sigma_p}{\sigma_m} \\ \text{应变相似常数 } C_{\epsilon} &= \frac{\epsilon_p}{\epsilon_m} \\ \text{位移相似常数 } C_{\delta} &= \frac{\delta_p}{\delta_m} \\ \text{弹性模量相似常数 } C_E &= \frac{E_p}{E_m} \\ \text{泊松比相似常数 } C_{\mu} &= \frac{\mu_p}{\mu_m} \\ \text{体积力相似常数 } C_X &= \frac{X_p}{X_m} \\ \text{密度相似常数 } C_{\rho} &= \frac{\rho_p}{\rho_m} \\ \text{容重相似常数 } C_{\gamma} &= \frac{\gamma_p}{\gamma_m} \end{aligned} \right\} \quad (1.2.19)$$

3. 力学相似

力学相似是指相似结构物对应点所受力的作用方向相同, 力的大小成比例。以图 1.2.1 中坝上作用的力为例, 则有

$$\frac{F_p}{F_m} = \frac{W_p}{W_m} = \dots = C_F \quad (1.2.20)$$

式中, F_p 、 F_m 分别为原型、模型的水推力, W_p 、 W_m 分别为原型、模型的坝体自重。

常见的力学相似常数有

$$\left. \begin{aligned} \text{重力 } F_{\gamma} &= \gamma L^3 \\ \text{重力相似常数 } C_{F_{\gamma}} &= C_{\gamma} C_L^3 \\ \text{惯性力 } F_a &= Ma = \frac{\rho L^4}{t^2} \\ \text{惯性力相似常数 } C_{F_a} &= C_{\rho} C_L^4 C_t^{-2} \\ \text{弹性力 } F_e &= E \epsilon A \\ \text{弹性力相似常数 } C_{F_e} &= C_E C_{\epsilon} C_L^2 \end{aligned} \right\} \quad (1.2.21)$$

4. 边界条件相似

边界条件相似即要求模型与原型在与外界接触区域内的各种条件(包括支撑条件、约束条件、边界荷载和周围介质等)保持相似。