

# 常用模型沙

## 基本特性研究

CHANGYONG MOXINGSHA JIBEN TEXING YANJIU

陈俊杰 任艳粉 郭慧敏 宋莉萱 朱 超  
吴国英 李远发 汪雪英 刘书昌 黄晓林

编著

CHANGYONG MOXINGSHA  
JIBEN TEXING YANJIU



黄河水利出版社

# 常用模型沙基本特性研究

陈俊杰 任艳粉 郭慧敏 宋莉莹 朱超 编著  
吴国英 李远发 汪雪英 刘书昌 黄晓林

黄河水利出版社  
· 郑州 ·

## 内 容 提 要

本书共分3篇26章,第一篇介绍了动床模型试验及模型相似律研究发展概况,并对国内外一些模型相似律特点做了简单评述。第二篇包括11章,分别对模型沙容重、干容重、颗粒级配等土力学特性和水下休止角、起动流速、阻力、沉速、黏度、挟沙力等水力特性测量的方法、原理及试验步骤进行了总结。第三篇包括15章,收集整理了天然沙、木屑、煤屑、粉煤灰、拟焦沙、塑料沙、塑料合成沙、BZY、PS、沥青沙、阳离子树脂、酸性白土粉、电木粉、核桃壳等常用模型沙以及半焦、沥青陶粒、滑石粉、港泥等模型沙的基本特性资料,对常用模型沙的优缺点、使用时的注意事项及模型沙选配、制作等相关的技术资料进行了简要分析,并列举了我国应用这些模型沙进行动床模型试验研究的部分科研项目实例。

本书可供河工模型试验研究的科研人员及高等院校相关专业有关师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

常用模型沙基本特性研究/陈俊杰等编著. —郑州:黄河水利出版社,2009.7

ISBN 978-7-80734-684-5

I. 常… II. 陈… III. 动床模型-模型沙-特性-研究 IV. TV131.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第121799号

组稿编辑:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:hhsllwp@126.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼14层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940,66020550,66028024,66022620(传真)

E-mail:hhsllcbs@126.com

承印单位:河南省瑞光印务股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:15.75

字数:360千字

版次:2009年7月第1版

印数:1—1 000

印次:2009年7月第1次印刷

定价:45.00元

# 前 言

模型试验是解决工程疑难课题的重要手段,几十年来,人们进行了大量的模型试验研究,在河道、库区及河口的实体模型有关的模拟技术方面,取得了巨大成就。如水利水电枢纽坝区、水库上游回水变动区、河道、潮汐河口模型等泥沙模型则应运而生。

模型试验可重现历史状况、弥补和扩充测验资料、进行多方案对比、细化局部问题和预测未来问题。人们常常利用模型试验研究水库与河道的水流泥沙运动、排沙特性、冲淤形态、河势变化等。模型试验是研究河床演变、河道整治及洪水预测预演和水库运用方式等边界条件复杂、三维性较强问题的重要手段,对某些问题的研究,模型试验甚至是唯一的手段。就实际作用和发展趋势而言,模型试验也许永远是解决重大工程泥沙问题的主要手段。

然而,由于泥沙问题的复杂性,具有的自然属性极为特殊,使得十分准确的实体模拟,尤其是实体动床模拟还相当困难,仍有一些关键技术及基础理论方面的问题未能解决。目前,实体模型试验,试验要求越来越高,内容也越来越广泛。在现阶段的模型试验中,又暴露出了一些新的技术问题,譬如:不同河型对水流挟沙能力及其比尺设计的影响问题;不同河型河道模型床沙的适配问题;现行河道模型相似率对大尺度、长模型的适应性问题;大尺度、长模型的水沙运动,河床变形等相似性和稳定性问题及其累积误差的评估问题;不同河段模型冲泻质与床沙质的分界问题等。含沙水流模型相似律的研究已引起较广泛的重视,有些学者开展了一些理论分析和试验观测,并取得了一定的进展。但在泥沙悬移相似条件、水流挟沙力比尺的确定、对流态的相似要求等方面,分歧很大。至于模型设计具体的处理手法差异更大,因此很有必要开展深入研究。

保证模型和原型泥沙运动及河床变形相似的关键,是选择合适的模型沙。而选择合适的模型沙是一个比较困难的问题,因此全面了解模型沙性质是非常必要的,是提高泥沙实体模型试验技术的关键之一。因此,对模型沙性质的全面研究是提高实体模型试验技术的关键。国内外专家大多是从各自研究问题的特殊性出发对模型试验技术进行研究的。进行系统的基础性的实体模型模拟技术研究相对较少。然而,往往在讨论评价实体模型试验成果时,就模型沙性质对模型试验成果的影响提出疑问的,已经屡见不鲜。

选择模型沙,是指综合考虑研究问题性质、原型已知条件、模型几何比尺,以满足模型与原型的水沙运动相似为目的,选定模型沙的材料、容重和颗粒级配。因此,进行实体模型模拟技术研究,首先需要收集、分析国内外模型沙研究应用资料,筛选、对比可用于不同河流模型的模型沙选取方法,需要分析一下常用模型沙材料的一般性质,及其适用的场合,进而提出在模型上适宜采用的模型沙。

本书收集整理了大量的模型沙特性方面的相关研究资料。全书共分3篇26章。第一篇,概括介绍了模型试验基本理论、模型相似律研究发展简况;第二篇共11章,即第一章至第十一章,介绍了常用模型沙基本特性的试验测量方法;第三篇共15章,即第十二章

至第二十六章,分类介绍了模型试验中常用模型沙的基本特性。全书由陈俊杰、任艳粉、郭慧敏、宋莉萱、朱超、吴国英、李远发、汪雪英、刘书昌、黄晓林编著。

本书出版得到了水利部黄河泥沙重点实验室水工研究室的大力资助;黄河水利科学研究院从事实体模型试验的专家王德昌教授从全书内容到表达方式都提出了不少宝贵意见,在此谨致感谢。

限于作者水平,本书错误之处在所难免,极有可能挂一漏万,热忱欢迎读者提出宝贵意见。

作者  
2009年3月

# 目 录

## 前 言

### 第一篇 动床模型试验及模型沙研究现状综述

参考文献 ..... (10)

### 第二篇 模型沙特性及测量方法

第一章 绪 论 ..... (12)

第二章 模型沙土力学特征指标简介 ..... (13)

参考文献 ..... (19)

第三章 模型沙容重试验 ..... (20)

第一节 概 述 ..... (20)

第二节 比重测量方法 ..... (21)

第三节 常用模型沙容重 ..... (26)

参考文献 ..... (27)

第四章 模型沙干容重试验 ..... (28)

第一节 概 述 ..... (28)

第二节 干容重测量方法 ..... (29)

第三节 常用模型沙干容重 ..... (31)

参考文献 ..... (33)

第五章 模型沙颗粒分析试验 ..... (34)

第一节 颗粒分析常规方法概述 ..... (34)

第二节 光电法 ..... (35)

第三节 激光法 ..... (36)

第四节 颗粒图像分析技术 ..... (38)

第五节 颗粒分析土工试验 ..... (38)

参考文献 ..... (44)

第六章 模型沙水下休止角试验 ..... (45)

第一节 概 述 ..... (45)

第二节 水下休止角测量 ..... (46)

第三节 常用模型沙的水下休止角 ..... (48)

参考文献 ..... (50)

第七章 模型沙起动流速试验 ..... (52)

第一节 概 述 ..... (52)

第二节	启动流速测量 .....	(52)
第三节	常用模型沙启动流速 .....	(54)
	参考文献 .....	(58)
<b>第八章</b>	<b>模型沙阻力特性试验 .....</b>	<b>(59)</b>
第一节	概 述 .....	(59)
第二节	模型沙阻力特性试验 .....	(59)
第三节	常用模型沙阻力 .....	(64)
	参考文献 .....	(65)
<b>第九章</b>	<b>模型沙沉降特性试验 .....</b>	<b>(66)</b>
第一节	概 述 .....	(66)
第二节	模型沙群体沉速试验方法 .....	(69)
	参考文献 .....	(71)
<b>第十章</b>	<b>模型沙流变特性试验 .....</b>	<b>(72)</b>
第一节	概 述 .....	(72)
第二节	流变特性测量方法 .....	(72)
	参考文献 .....	(80)
<b>第十一章</b>	<b>模型沙水流挟沙力试验 .....</b>	<b>(81)</b>
第一节	概 述 .....	(81)
第二节	水流挟沙力公式 .....	(82)
第三节	挟沙力水槽试验 .....	(89)
第四节	几种模型沙的挟沙力研究 .....	(90)
	参考文献 .....	(92)

### 第三篇 常用模型沙基本特性

<b>第十二章</b>	<b>天然沙模型沙 .....</b>	<b>(93)</b>
第一节	天然沙的物理化学特性和力学特性 .....	(93)
第二节	天然沙的水下休止角 .....	(95)
第三节	天然沙的沉速 .....	(96)
第四节	天然沙的阻力特性和启动流速 .....	(100)
第五节	天然沙浑水的流变特性 .....	(104)
第六节	结 语 .....	(107)
	参考文献 .....	(108)
<b>第十三章</b>	<b>木屑模型沙 .....</b>	<b>(109)</b>
第一节	概 述 .....	(109)
第二节	木屑模型沙的力学特性 .....	(110)
第三节	木屑模型沙的沉降特性 .....	(112)
第四节	木屑的阻力特性和启动速度 .....	(113)
第五节	木粉模型沙 .....	(115)

第六节 结 语 .....	(117)
参考文献 .....	(117)
<b>第十四章 煤屑模型沙 .....</b>	<b>(118)</b>
第一节 煤屑的物理化学特性 .....	(118)
第二节 煤屑的力学特性 .....	(120)
第三节 煤屑的沉降特性 .....	(124)
第四节 煤屑的阻力特性和起动流速 .....	(125)
第五节 煤屑浑水的流变特性 .....	(130)
第六节 结 语 .....	(131)
参考文献 .....	(132)
<b>第十五章 粉煤灰模型沙 .....</b>	<b>(133)</b>
第一节 粉煤灰模型沙物理化学特性和力学特性 .....	(133)
第二节 粉煤灰模型沙的沉降特性 .....	(138)
第三节 粉煤灰模型沙的阻力特性及起动流速 .....	(138)
第四节 粉煤灰模型沙的流变特性 .....	(142)
第五节 粉煤灰模型沙的验证试验 .....	(145)
第六节 粉煤灰模型沙细颗粒制备及其特性变化 .....	(146)
第七节 结 语 .....	(147)
参考文献 .....	(149)
<b>第十六章 拟焦沙模型沙 .....</b>	<b>(150)</b>
第一节 概 述 .....	(150)
第二节 拟焦沙物理化学特性 .....	(150)
第三节 拟焦沙起动流速和糙率试验 .....	(156)
第四节 拟焦沙流变特性 .....	(163)
第五节 结 语 .....	(163)
参考文献 .....	(164)
<b>第十七章 塑料模型沙 .....</b>	<b>(165)</b>
第一节 塑料模型沙物理化学特性和力学特性 .....	(165)
第二节 塑料模型沙沉降 .....	(167)
第三节 塑料模型沙的起动流速 .....	(170)
第四节 塑料沙的糙率试验 .....	(174)
第五节 塑料模型沙的流变试验 .....	(176)
第六节 结 语 .....	(178)
参考文献 .....	(179)
<b>第十八章 塑料合成模型沙 .....</b>	<b>(180)</b>
第一节 塑料合成模型沙物理化学特性和力学特性 .....	(180)
第二节 塑料合成模型沙运动特性试验 .....	(182)
第三节 结 语 .....	(185)



参考文献 .....	(186)
<b>第十九章 BZY 模型沙 .....</b>	<b>(187)</b>
第一节 概 述 .....	(187)
第二节 BZY 模型沙研制概况 .....	(187)
第三节 BZY 模型沙特性试验 .....	(188)
第四节 结 语 .....	(194)
参考文献 .....	(194)
<b>第二十章 PS 模型沙 .....</b>	<b>(195)</b>
第一节 概 述 .....	(195)
第二节 PS 模型沙物理化学特性和力学特性 .....	(197)
第三节 PS 模型沙沉降试验 .....	(199)
第四节 PS 模型沙起动流速和糙率 .....	(201)
第五节 结 语 .....	(205)
参考文献 .....	(205)
<b>第二十一章 沥青模型沙 .....</b>	<b>(206)</b>
第一节 沥青模型沙的物理特性和力学特性 .....	(206)
第二节 沥青模型沙沉速 .....	(206)
第三节 沥青模型沙的起动流速试验 .....	(207)
第四节 结 语 .....	(210)
参考文献 .....	(210)
<b>第二十二章 阳离子树脂模型沙 .....</b>	<b>(211)</b>
第一节 阳离子树脂模型沙的物理特性 .....	(211)
第二节 阳离子树脂模型沙的运动特性 .....	(212)
第三节 结 语 .....	(216)
参考文献 .....	(216)
<b>第二十三章 酸性白土粉模型沙 .....</b>	<b>(217)</b>
第一节 酸性白土粉模型沙物理化学特性和力学特性 .....	(217)
第二节 酸性白土粉模型沙的起动流速及糙率 .....	(220)
第三节 结 语 .....	(221)
参考文献 .....	(221)
<b>第二十四章 电木粉模型沙 .....</b>	<b>(222)</b>
第一节 电木粉模型沙物理化学特性和力学特性 .....	(222)
第二节 电木粉模型沙的起动流速及糙率试验 .....	(224)
第三节 结 语 .....	(230)
参考文献 .....	(231)
<b>第二十五章 核桃壳模型沙 .....</b>	<b>(232)</b>
第一节 核桃壳模型沙基本特性 .....	(232)
第二节 核桃壳模型沙起动流速试验 .....	(233)

第三节	核桃壳模型沙糙率试验 .....	(235)
第四节	结    语 .....	(236)
	参考文献 .....	(236)
第二十六章	其他模型沙 .....	(237)
第一节	半焦模型沙 .....	(237)
第二节	沥青陶粒模型沙 .....	(238)
第三节	滑石粉模型沙 .....	(238)
第四节	港泥模型沙 .....	(240)
	参考文献 .....	(241)

# 第一篇 动床模型试验及 模型沙研究现状综述

1875年法国学者 Fargue 为改进 Bordeaux 商港航务而进行的第一个河工模型试验以来,河工模型试验技术得到了飞速的发展,不仅在水利工程建设方面发挥了巨大的作用,而且还大大推动了河流动力学及河床演变学等学科的发展。

在1885年雷诺进行了英格兰马尔赛河河口的动床模型试验。1888年佛尔朗-哈尔特对“新河”的河口进行了试验研究工作。当时的动床模型试验没有准确的选沙方法,模型沙没有按原型特征模拟,模型试验结果与原型有一些差别。

1930~1935年,H. Engels 教授在德国的 Overmatch 水工实验室进行了黄河模型试验。当时,受原型资料及基础理论知识所限,模型试验在水文、泥沙、边界条件和模型缩尺方面与黄河并不严格相似,仅是一种定性的试验探讨。尽管如此,H. Engels 还是取得了重要的试验成果,提出了对治河有指导意义的著名的“固定中水河槽”的治河方略。试验者本人指出:这不是具体河段的模拟,在水平比尺选定后,计算出满足水流泥沙运动相似所需的其他比尺与模型采用比尺都相当偏离。

1942~1945年,我国著名水工试验专家谭葆泰主持了黄河花园口堵口模型试验,在模型设计上考虑了几何相似和水流动力相似,但因当时条件所限,尚难进行动床模型设计。

早期的动床模型试验缺乏泥沙运动理论的指导,动床模型试验的各项比尺的确定与泥沙运动规律没有发生联系。因此,早期的动床模型试验完全靠验证试验来检验模型的可靠性,模型试验能够重演原型过去的演变过程(如河床冲淤过程、洪水演进过程……),就认为该模型与原型是相似的,就可以利用该模型来预报原型未来的变化。这个方法到目前为止仍有实际意义。

随着人们对河道演变规律认识的深化,动床模型被广泛采用,作为其理论指导的相似理论和设计方法也有了较大发展,悬沙模型除了必须满足水流运动相似外,还必须满足泥沙运动相似。

1950年苏联的 Ф. И. 皮卡洛夫提出了悬沙模型相似条件:

(1) 流速比尺与沉速比尺相等;

(2) 含沙量比尺为1。

对于变态模型,Ф. И. 皮卡洛夫认为,流速比尺与沉速比尺的比值等于变率,这与其相似条件(1)无法同时满足。因此,他的模型相似律实际上仅适合正态模型的情况。

Ф. И. 皮卡洛夫模型相似律基本相似条件为

$$\lambda_v = \lambda_\omega \quad (0-1)$$

$$\lambda_s = 1 \quad (0-2)$$

对于变态模型,有

$$\lambda_L = \frac{\lambda_v \lambda_H}{\lambda_\omega} \quad (0-3)$$

式中:  $\lambda_L$  为长度比尺;  $\lambda_v$  为流速比尺;  $\lambda_\omega$  为沉速比尺;  $\lambda_s$  为含沙量比尺;  $\lambda_H$  为垂向比尺。

20 世纪 50 年代初,在苏联列宁格勒还开展了黄河三门峡水库淤积及排沙模型试验,为多沙河流水库泥沙模型试验方法积累了经验。

在泥沙模型理论和大量实践的基础上,我国的泥沙科研工作者相继提出了悬沙动床模型相似律和全沙模型相似律理论。

1953 年,留德学者郑兆珍将西方近代的河工模型相似理论引进来,从天津大学来到黄河水利科学研究所,潜心研究,提出了较系统的悬移质泥沙模型相似律。

郑兆珍提出的相似律中,悬沙运动相似条件为

$$\lambda_\omega = \lambda_{u_*} = \lambda_v \sqrt{\frac{\lambda_H}{\lambda_L}} \quad (0-4)$$

式中:  $\lambda_{u_*}$  为摩阻流速比尺;其他符号含义同前。

其相似律中,考虑了泥沙的竖向交换而没有考虑泥沙沿水平方向的变化,其悬沙运动相似条件与 1957 年钱宁根据悬沙扩散理论含沙量垂线分布公式得出的含沙量垂线分布条件类同。

应当指出,河工模型变态后,流速分布的相似性在不同程度上受到影响,因而即使按其相似条件选取悬沙,也不能保证含沙量垂线分布与原型相似。

屈孟浩对从西方引入或改进的河工模型相似条件,特别是对郑兆珍的动床模型相似律也进行了试验检验,认为还不能适应于黄河。不过,屈孟浩在 20 世纪 70 年代的模型相似条件中引入了郑兆珍的悬移相似条件式(0-4)并成为他的模型相似律最突出的特点之一。

1957 年钱宁把爱因斯坦和他在 1954 年共同提出的动床模型相似律做了更详尽的说明,提出了爱因斯坦-钱宁河工模型相似律,其要点为:在水流运动方面必须满足福氏数相等及阻力相似,在推移质运动相似方面必须满足输沙量及河床冲刷相似的条件。

爱因斯坦-钱宁动床泥沙相似律相似条件为

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_H} \quad (0-5)$$

$$\lambda_v = \frac{1}{\lambda_n} \lambda_H^y \sqrt{\lambda_H \lambda_J} \quad (0-6)$$

$$\frac{\lambda_{\tau'}}{\lambda_{\tau'_0}} = \frac{\lambda_\rho \lambda_{R'_0} \lambda_J}{\lambda_{\rho_s - \rho} \lambda_d} = 1 \quad (0-7)$$

$$\lambda_p = \lambda_{\rho_s - \rho}^{3/2} \lambda_d^{3/2} \quad (0-8)$$

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\rho_s - \rho} \lambda_H \lambda_L}{\lambda_p} \quad (0-9)$$

对于细颗粒泥沙还需要满足下列相似条件

$$\frac{\lambda_{u_*} \lambda_d}{\lambda_v} = 1 \quad (0-10)$$

或

$$\lambda_d = \frac{1}{\lambda_{\rho_s - \rho}^{1/3}} \quad (0-11)$$

以上式中:  $\lambda_n$  为综合糙率比尺;  $y$  为指数, 与糙率  $n$  和水力半径  $R$  有关;  $\lambda_j$  为水流比降比尺;  $\lambda_{\tau}$  为与沙粒阻力相关的水流切应力比尺;  $\lambda_{\tau_0}$  为与沙粒阻力有关的泥沙开动切应力比尺;  $\lambda_\rho$  为试验介质密度比尺;  $\lambda_{R_H}$  为与沙粒阻力有关的水力半径比尺;  $\lambda_d$  为泥沙粒径比尺;  $\lambda_{\rho_s - \rho}$  为泥沙与水密度差比尺;  $\lambda_p$  为单宽输沙率比尺;  $\lambda_{t_2}$  为冲淤时间比尺;  $\lambda_{u_*}$  为沙粒阻力切应力流速比尺;  $\lambda_\nu$  为液体运动黏滞系数比尺; 其他符号含义同前。

其模型相似律中, 对模型沙选择提出了很严格的限制。另外, 应用爱因斯坦-钱宁的这个模型相似律进行模型设计时, 阻力相似关系式中谢才系数按巴普洛夫斯基公式确定, 这就需要采用一套比较复杂的水流阻力计算方法和输沙计算方法。爱因斯坦-钱宁模型相似律是包括了悬移质泥沙的床沙质部分在内的, 但由于他们实际上并没有详细研究悬移质的沉降及悬浮过程, 因此只能看做是推移质运动模型相似律。

1964~1977年李昌华总结国内外经验提出了一套泥沙模型律。他从理论上证明了悬沙运动相似要求满足泥沙沉降特性相似条件, 同时还要满足悬浮相似条件。另外, 该模型律还认为, 由于推移质输送与悬移质输送各自遵循不同的规律, 因此他们所要求的输沙率比尺及河床变形时间比尺一般是不可能相同的, 在这种情况下, 就只能服从主要, 牺牲次要。

李昌华的动床泥沙相似律相似条件为

$$\lambda_\nu = \sqrt{\lambda_H} \quad (0-12)$$

$$\lambda_\nu = \frac{1}{\lambda_\rho} \lambda_H^y \sqrt{\lambda_H \lambda_j} \quad (0-13)$$

$$\lambda_\nu = \lambda_{\nu_0} \quad (0-14)$$

$$\lambda_p = \lambda_{p_*} \quad (0-15)$$

或

$$\lambda_s = \lambda_{s_*} \quad (0-16)$$

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_L \lambda_H}{\lambda_p} \quad (0-17)$$

或

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_L}{\lambda_s \lambda_\nu} \quad (0-18)$$

对于悬移质模型, 还需要满足下列相似条件

$$\lambda_\omega = \lambda_\nu \sqrt{\frac{\lambda_H}{\lambda_L}} \quad (0-19)$$

$$\lambda_\omega = \lambda_\kappa \lambda_{u_*} \quad (0-20)$$

$$\lambda_\lambda = 1 \quad (0-21)$$

对于不稳定流要求满足

$$\lambda_{t_1} = \frac{\lambda_L}{\lambda_v} \quad (0-22)$$

异重流发生条件相似,需要满足

$$\lambda_s = \frac{\lambda_{\gamma_s}}{\lambda_{\gamma_s-\gamma}} \quad (0-23)$$

当有异重流存在时,还要满足下列条件

$$\lambda_{ve} = \sqrt{\frac{\lambda_{\gamma_s-\gamma} \lambda_R \lambda_H \lambda_s}{\lambda_\gamma \lambda_{\gamma_s}}} \quad (0-24)$$

$$\lambda_{ve} = \sqrt{\frac{\lambda_{\gamma_s-\gamma} \lambda_R \lambda_H \lambda_J \lambda_s}{\lambda_{\lambda_m} \lambda_\gamma \lambda_{\gamma_s}}} \quad (0-25)$$

$$\lambda_{ve} = \lambda_v \quad (0-26)$$

以上式中: $\lambda_{v_0}$ 为起动流速比尺; $\lambda_{p_s}$ 为单宽输沙能力比尺; $\lambda_{s_s}$ 为冲淤平衡含沙量比尺; $\lambda_{t_2}$ 为冲淤时间比尺; $\lambda_{\gamma_0}$ 为河床淤积泥沙干容重比尺; $\lambda_\kappa$ 为卡门常数比尺; $\lambda_\lambda$ 为水流阻力系数比尺,其中 $\lambda = \frac{8gRJ}{v^2}$ ; $\lambda_{t_1}$ 为水流运动时间比尺; $\lambda_\gamma$ 为水容重比尺; $\lambda_{\gamma_s}$ 为泥沙容重比尺; $\lambda_{ve}$ 为异重流流速比尺; $\lambda_{\gamma_s-\gamma}$ 为泥沙浮容重比尺; $\lambda_R$ 为水力半径比尺; $\lambda_{\lambda_m}$ 为异重流综合阻力系数比尺;其他符号含义同前。

1978年屈孟浩根据黄河模型试验的经验提出了一套动床泥沙模型律。从其相似准则可以看出,屈孟浩的悬沙模型律特点是考虑了泥沙悬浮相似条件,而忽略了泥沙沉降相似条件。这种方法在黄河模型试验中成功的原因可能是黄河模型变率较大,而对于较大变率的模型,根据悬浮条件来设计模型沙比用沉降相似条件更正确一些。

屈孟浩模型相似律的相似条件为:

泥沙运动相似条件

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_H} \quad (0-27)$$

$$\lambda_v = \lambda_c \sqrt{\lambda_H \lambda_J} \quad (0-28)$$

$$\lambda_{\gamma_s-\gamma} \lambda_d = \lambda_H \lambda_J \quad (0-29)$$

悬沙运动相似条件

$$\lambda_\omega = \lambda_{u_*} = \lambda_v \lambda_J^{0.5} \quad (0-30)$$

水流挟沙能力相似条件

$$\lambda_s = \lambda_{s_s} \quad (0-31)$$

河床冲淤过程相似条件

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0}}{\lambda_s} \lambda_{t_1} \quad (0-32)$$

以上式中: $\lambda_c$ 为谢才系数比尺; $\lambda_{t_1}$ 为动床模型试验水流运动时间; $\lambda_{\gamma_0}$ 为动床模型河床淤积物淤积干容重比尺; $\lambda_s$ 为动床模型试验含沙量比尺;其他符号含义同前。

对于异重流运动相似条件,有

$$\lambda_{F'} = \frac{\lambda_v}{\sqrt{\lambda_{\Delta\gamma} \lambda_H}} = \frac{\lambda_v}{\sqrt{\lambda_{\gamma_s - \gamma} \lambda_{\gamma'} \lambda_{\gamma_s} \lambda_H}} \quad (0-33)$$

式中:  $F'$  为修正佛氏数;  $v$  为异重流潜入点处水流平均流速;  $H$  为异重流潜入点处平均水深;  $\Delta\gamma$  为异重流浮容重,  $\Delta\gamma = \gamma' - \gamma$ ;  $\gamma$  为清水容重;  $\gamma'$  为浑水容重。

含沙量很低时,  $\lambda_{\gamma'} = \lambda_{\gamma}$ , 而且  $\lambda_{\gamma} = 1$ ,  $\lambda_v = \lambda_H^{1/2}$ , 所以式(0-33)的模型试验异重流运动相似条件可简化为

$$\lambda_s = \frac{\lambda_{\gamma_s}}{\lambda_{\gamma_s - \gamma}} \quad (0-34)$$

窦国仁研究多种运动形式的泥沙相似律, 提出了在一个模型中同时进行推移质、悬移质和异重流试验的相似准则——全沙模型相似律。

水流相似条件

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_H} \quad (0-35)$$

$$\lambda_C = \left( \frac{\lambda_L}{\lambda_H} \right)^{0.5} \quad (0-36)$$

悬沙相似条件

$$\lambda_{\omega} = \frac{\lambda_v \lambda_H}{\lambda_a \lambda_L} \quad (0-37)$$

$$\lambda_s = \frac{\lambda_{\gamma_s}}{\lambda_{\gamma_s - \gamma}} \quad (0-38)$$

扬动相似条件

$$\lambda_v = \lambda_{v_0} = \lambda_{v_f} \quad (0-39)$$

$$\lambda_{P_b} = \frac{\lambda_{\gamma_s} \lambda_v^4}{\lambda_{\gamma_s - \gamma} \lambda_C^2 \lambda_{\omega}} \quad (0-40)$$

悬沙冲淤时间相似

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_L \lambda_H}{\lambda_P} \quad (0-41)$$

以上式中:  $\lambda_{v_f}$  为扬动流速比尺;  $\lambda_a$  为沉降几率比尺;  $\lambda_C$  为谢才系数比尺, 谢才系数按照公式  $C = 2.5 \ln \left( 11 \frac{H}{\Delta} \right)$  计算,  $\Delta$  为床面糙率高度, 对于平整河床当底沙粒径  $> 0.5 \text{ mm}$  时,  $\Delta = d_{50}$ , 当底沙粒径  $< 0.5 \text{ mm}$  时,  $\Delta \approx 0.5 \text{ mm}$ 。在已知糙率系数  $n$  的情况下, 也可以用曼宁公式予以确定, 即  $C = \frac{1}{\sqrt{gn}} H^{1/6}$ ;  $\lambda_{P_b}$  为底沙单宽输沙率比尺; 其他符号含义同前。

这个模型相似律是要采用一种模型沙模拟悬移质泥沙和推移质泥沙以及异重流现象。该模型律关键是必须采用式(0-40)计算推移质输沙量比尺, 才能使得悬移质及推移质的冲淤时间比尺达到一致。

窦国仁模型相似律称为全沙模型相似律, 但所采用的推移质输沙量比尺关系式的形

式有很大的争议,显然还值得进一步研究。近年来,通过实践,特别是通过黄河小浪底水利枢纽泥沙模型试验,窦国仁、王国兵对全沙模型律又做了较大的改进。

武汉水利电力学院提出的模型相似律的特点是:既有悬浮相似条件,又有沉降相似条件,由于紊动扩散及重力作用是决定悬移质运动的一对主要矛盾,在变态模型内当悬浮相似条件及沉降相似条件不能同时满足时,则以满足悬浮相似条件为宜。

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda_H} \quad (0-42)$$

$$\lambda_v = \lambda_C \sqrt{\lambda_H \lambda_J} \quad (0-43)$$

$$\lambda_\omega = \frac{\lambda_v \lambda_H}{\lambda_L} \quad (0-44)$$

$$\lambda_\omega = \lambda_{\omega_*} \quad (0-45)$$

$$\lambda_v = \lambda_{v_0} \quad (0-46)$$

$$\lambda_s = \lambda_{s_*} \quad (0-47)$$

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_L \lambda_H}{\lambda_P} \quad (0-48)$$

在前人研究的基础上,张红武自1988年以来系统开展了动床河工模型相似条件的研究,提出了针对多沙河流动床河工模型的设计方法。张红武整理大量资料后,得出沉速及包括全部悬沙的水流挟沙力公式,即

$$\omega_s = 2.05 \omega_{cp} \left[ \left( 1 - \frac{S_V}{2.25 \sqrt{d_{50}}} \right)^{3.5} (1 - 1.25 S_V) \sqrt{\frac{d_{25}}{d_{75}}} \left( \frac{100}{50 + \eta} \right)^3 \right] \quad (0-49)$$

$$S = 2.5 \left[ \frac{(0.0022 + S_V) v^3 \ln \left( \frac{h}{6d_{50}} \right)}{\kappa \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m} g h \omega_s} \right]^{0.62} \quad (0-50)$$

根据以上研究成果,提出的黄河河道模型相似律如下:

水流重力相似条件

$$\lambda_v = \lambda_H^{0.5} \quad (0-51)$$

水流阻力相似条件

$$\lambda_v = \frac{\lambda_R^{2/3} \left( \frac{\lambda_H}{\lambda_L} \right)^{0.5}}{\lambda_n} \quad (0-52)$$

泥沙起动及扬动相似条件

$$\lambda_v = \lambda_{vc} = \lambda_{vf} \quad (0-53)$$

水流输沙相似条件

$$\lambda_{G_s} = \lambda_{G_{s_*}} \quad (0-54)$$

悬移质悬移相似条件

$$\lambda_\omega = \lambda_v \left( \frac{\lambda_H}{\lambda_L} \right)^{0.75} \quad (0-55)$$

河床冲淤变形相似条件



$$\lambda_{r_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_L^2 \lambda_H}{\lambda_{G_s}} \quad (0-56)$$

河型相似条件

$$\left[ \frac{\left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d_{50} H \right)^{\frac{1}{3}}}{iB^{\frac{2}{3}}} \right]_m = \left[ \frac{\left( \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d_{50} H \right)^{\frac{1}{3}}}{iB^{\frac{2}{3}}} \right]_p \quad (0-57)$$

以上式中:  $\lambda_{G_s}$  为输沙率比尺;  $\lambda_{G_{s*}}$  为水流输沙能力比尺;  $\lambda_{v_c}$  为泥沙起动流速比尺;  $\lambda_{v_f}$  为泥沙扬动流速比尺;  $i$  为河床比降;  $B$  为造床流量下的河宽;  $H$  为造床流量下的水深;  $d_{50}$  为河床中值粒径;  $m$  为模型;  $p$  为原型; 其他符号含义同前。

上述模型律既适用于推移质泥沙模型, 又适用于悬移质泥沙模型。在模型试验中, 尤其是在黄河等多沙河流的动床模型试验中得到了广泛应用。

长期以来模型试验一直是解决工程疑难课题的重要手段, 几十年来, 人们进行了大量的实体模型试验研究。在河道、库区及河口与实体模型有关的模拟技术方面, 取得了巨大成就。如水利水电枢纽坝区、水库上游回水变动区、河道、潮汐河口模型等泥沙模型则应运而生。

河工模型试验的主要优点在于可重现历史状况、弥补和扩充测验资料、进行多方案对比、细化局部问题和预测未来问题, 因此可通过河工模型试验预测水库与河道的水流泥沙运动规律、排沙特性、冲淤形态、河势变化等, 也可以说, 河工模型试验是研究河床演变、河道整治及洪水预测预演和水库运用方式等边界条件复杂、三维性较强问题的重要手段。

就目前的学科发展状况而言, 对某些问题的研究, 河工模型试验甚至是唯一的手段; 就实际作用和发展趋势而言, 模型试验也许永远是解决重大工程泥沙问题的主要手段。

然而, 由于泥沙问题的复杂性, 其具有的自然属性极为特殊, 使得十分准确的实体模拟, 尤其是实体动床模拟还相当困难, 仍有一些关键技术及基础理论方面的问题未能解决。目前, 实体模型试验, 试验要求越来越高, 内容也越来越广泛。在现阶段的模型试验中, 又暴露出了一些新的技术问题, 譬如: 不同河型对水流挟沙能力及其比尺设计的影响问题; 不同河型河道模型床沙的适配问题; 现形河道模型相似率对大尺度、长模型的适应性问题; 大尺度、长模型的水沙运动、河床变形等相似性和稳定性问题及其累积误差的评估问题; 不同河段模型冲泻质与床沙质的分界问题等。

含沙水流模型相似律的研究已引起较广泛的重视, 有些学者开展了一些理论分析和试验观测, 并取得了一定的进展。但在泥沙悬移相似条件、水流挟沙力比尺的确定、对流态的相似要求等方面, 分歧很大。至于模型设计具体的处理手法差异更大, 因此很有必要开展深入研究。

经验与分析表明, 保证模型和原型泥沙运动及河床变形相似的关键, 是选择合适的模型沙, 而选择适宜的模型沙是一个比较困难的问题, 因此全面了解模型沙性质是非常必要的, 是提高泥沙实体模型试验技术的关键之一。因此, 对模型沙性质全面研究是提高实体模型试验技术的关键。

目前, 国内外专家大多是从各自研究问题的特殊性出发对模型试验技术进行研究的。而进行系统的基础性的实体模型模拟技术研究相对较少。往往在讨论评价实体模型试验