

GONGCHENG
NISHA
YANJIU
YU
SHIJIAN

张红武 张俊华 江恩惠 李远发
赵业安 曹丰生 赵新建 王国栋 等著

工程泥沙研究与实践

黄河水利出版社

工程泥沙研究与实践

张红武 张俊华 江恩惠 李远发 赵业安
曹丰生 赵新建 王国栋等著

黄河水利出版社

内容提要

本书为张红武教授等所著的《河流力学研究》一书的姊妹篇,是有关工程泥沙方面的科研成果选集。内容涉及大型跨河工程对河床演变及行洪影响研究、游荡性堆积河道治理及洪水规律研究、河道工程冲刷与防护、水库对下游河道的影响研究、取水工程泥沙问题(包括泥沙处理)等内容。这些科研成果已在实际工程中得到应用,产生了巨大的社会效益和经济效益,且在学术上也颇有价值。

本书可供广大水利、水电、桥渡设计以及相关专业的科技工作者和高等院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

工程泥沙研究与实践/张红武等著. — 郑州:黄河水利出版社,1999.12
ISBN 7-80621-362-7

I. 泥… II. ①张… III. 工程泥沙学 IV. TV-14

中国版本图书馆(CIP)数据核定(1999)第 76809 号

责任编辑:胡志扬
责任校对:周宏

封面设计:郭琦
责任印制:温红建

出版发行:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路11号 邮编:450003

发行部电话:(0371)6302620 传真:6302219

E-mail:yrep@public2.zz.ha.cn

印刷:黄委会设计院印刷厂

开本:787mm×1092mm 1/16

印张:25.125

版别:1999年12月第1版

印数:1—2 000

印次:1999年12月郑州第1次印刷

字数:580千字

定 价:52.00 元

序

河流由于水流挟带泥沙,因此常造成河床发生冲淤变化,特别是在像黄河这样的多沙河流上,问题更加复杂。本书作者经过长期的探索与实践,成功地解决了许多工程泥沙问题。作者将有关成果整理成书,在国家自然科学基金及水利部联合资助下(项目编号:59890200),由黄河水利出版社正式出版。本书是已出版的《河流力学研究》一书的姊妹篇。其中,《河流力学研究》一书着重于基础理论研究成果,而本书则着重于工程实践研究成果,两者是理论与应用的有机结合。

全书遴选了作者在1989年至1999年期间撰写完成的有关工程泥沙方面的生产研究成果和论文19篇,内容涉及大型跨河工程、游荡性堆积河道治理和洪水规律研究、取水工程、河道工程冲刷与防护,以及工程对所在河段河势及行洪的影响等。本书的研究是以野外观测及现场调查资料为基础,运用河流水力学、泥沙运动力学、河床演变学原理,采取作者在河工动床模型设计和数学模型计算方面的研究成果,在综合河工模型试验、资料分析、数学模型计算及局部模型试验成果的基础上,得出了可靠的结果。这些研究成果,均已作为设计、施工部门的科学依据,在实际工程中得到应用,产生了巨大的社会效益和经济效益。这些成果的取得,充分说明了经作者提高和发展的河工动床模型设计理论和数学模拟方法已趋成熟。本书的特点是内容详细、具体,不但有大量的第一手材料,而且还能看出作者处理具体工程泥沙问题的技术诀窍,确是一种十分难得的文献资料。顺便指出,目前科学技术界有不引用或故意回避非正式出版的科技报告作为参考文献的倾向,而实际上,这类报告多是向委托机构汇报研究成果而写成的,含有大量的原始试验数据,条件交代也十分清楚,为独具一格的一级文献,颇受治学严谨的科技人员重视。

除收入本书《工程泥沙研究与实践》的有关生产科研成果外,作者还将把其他方面的研究内容,如南水北调中线穿黄问题研究、水库泥沙研究、黄河花园口至东坝头河道整治模型试验研究及小浪底水库下游游荡性河段模型试验研究等,另册出版。这些书籍的公开出版,不但反映了目前工程泥沙研究的水平,而且对从事水利、水电,特别是工程泥沙研究的科技工作者具有重要的借鉴意义和参考价值。

李保如 林斌文

1999年12月于郑州

目 录

山西阳城电厂至江苏淮阴输电线路黄河大跨越工程东明河段概化模型及塔基冲刷试验研究	(1)
一、研究的意义及目的	(1)
二、河段概化模型设计	(1)
三、概化试验概况	(7)
四、概化模型试验结果	(10)
五、跨河线路的进一步比选	(18)
六、塔基局部冲刷试验及冲深计算	(20)
七、结论	(26)
山西阳城电厂至江苏淮阴 500kV 输电线路黄河跨越工程塔基冲刷研究	(28)
一、模型设计及试验概况	(28)
二、局部冲刷试验结果	(30)
三、塔基冲刷深度计算与分析	(31)
四、结论	(35)
京沪高速铁路济南黄河大桥河工模型设计与验证试验研究	(37)
一、概述	(37)
二、桥位河段基本概况	(37)
三、模型设计	(37)
四、验证试验结果	(49)
五、结语	(57)
京沪高速铁路济南黄河大桥河工模型试验研究	(58)
一、概述	(58)
二、桥位河段概况及预测	(60)
三、试验条件及试验概况	(63)
四、设计洪水试验结果	(70)
五、排冰试验及河槽稳定性补充分析	(102)
六、结论	(105)
焦作黄河大桥项目伊洛河大桥河势及行洪影响研究	(108)
一、前言	(108)
二、流域及桥位河段概况	(108)
三、桥位河段河势演变分析	(111)
四、建桥对洪水的影响计算	(118)

五、桥位河段动床模型试验	(124)
六、结论	(133)
焦作黄河大桥项目伊洛河大桥桥渡壅水计算补充研究	(136)
一、二十年一遇洪水流量及伊洛河口水位的确定	(136)
二、壅水高度与范围计算	(137)
三、动床模型试验的检验	(138)
四、结论	(138)
郑州黄河公路二桥北岸路堤对行洪影响的研究	(140)
一、前言	(140)
二、建桥对防洪影响分析	(140)
三、行洪影响准二维数学模型计算	(151)
四、桥位河段动床模型试验	(156)
五、结论	(165)
新菏铁路复线长东黄河二桥河工模型试验研究	(168)
一、引言	(168)
二、新菏复线长东二桥概化模型试验结果	(168)
三、数学模型计算结果	(173)
四、结语	(174)
黄河丁坝网罩护根模型试验研究	(176)
一、引言	(176)
二、试验概况	(176)
三、模型试验结果	(179)
四、结语	(186)
洛河故县水库工程寻峪沟物理模型试验研究	(189)
一、概况	(189)
二、模型设计依据	(191)
三、模型比尺确定及模型沙选择	(194)
四、预备试验及验证试验	(197)
五、试验结果	(202)
六、结论	(213)
黄河花园口至东坝头河段洪水预演及“92·8”洪水模拟试验	(215)
一、引言	(215)
二、模型及试验概况	(215)
三、洪水预演试验结果	(218)
四、花园口“92·8”洪水模拟试验	(227)
五、高含沙洪水异常现象成因分析	(231)
六、结论	(234)
土工织物防护控导工程联坝过水的试验研究	(236)

一、问题的提出	(236)
二、模型设计	(236)
三、试验概况	(238)
四、试验成果分析	(238)
五、结论	(243)
黄河武庄控导工程布局的模型试验研究	(244)
一、试验目的及技术要求	(244)
二、模型设计及试验概况	(245)
三、试验结果	(248)
四、结论	(263)
三门峡水库汛初排沙对下游河道影响问题的研究	(264)
一、汛初排沙对下游水沙及河床条件的影响	(264)
二、汛初排沙对下游河道影响的试验结果	(265)
三、汛初排沙对下游河道影响的数值模拟	(266)
四、结语	(267)
小浪底水库拦沙期下游游荡性河段演变趋势研究	(268)
一、模型试验结果	(268)
二、数学模型计算结果	(271)
三、结论	(271)
畛河河道淤积形态预估及对新安县提水工程站址影响研究	(273)
一、问题的提出	(273)
二、畛河河口滩面高程变化过程的数值模拟	(273)
三、小浪底水库运用初期畛河河道淤积形态预估	(276)
四、小浪底水库运用后期畛河河道淤积形态预估	(278)
五、畛河口至提水站站址含沙量变化计算	(283)
六、结论	(284)
禹州电厂白沙水库取水泥沙模型试验研究	(287)
一、概述	(287)
二、水库库区及流域概况	(288)
三、水沙条件设计	(296)
四、水库模型设计	(304)
五、水库模型率定	(311)
六、水库库区模型试验及结果	(317)
七、水库数学模型计算结果	(326)
八、局部模型试验及引水管泥沙淤积分析	(337)
九、结论	(341)
白沙水库禹州电厂不同取水方案比选研究	(343)
一、概述	(343)

二、设计水沙条件	(344)
三、库区模型试验及结果	(345)
四、数学模型计算结果	(358)
五、局部模型试验结果	(367)
六、结论	(369)
黄河小沙湾取水头部改建工程斜板预沉池模型试验研究	(371)
一、概述	(371)
二、模型设计	(374)
三、试验概况	(380)
四、试验结果	(382)
五、结论	(391)

山西阳城电厂至江苏淮阴输电线路 黄河大跨越工程东明河段概化模型 及塔基冲刷试验研究*

一、研究的意义及目的

山西是我国主要能源基地之一,煤炭储量十分丰富,但由于运输能力不足,煤炭外运受到制约。江苏是我国经济发达地区之一,但省内能源供应不足,电力供应紧张,“九五”初期,缺发电装机将达到 300 万 kW 左右。建设山西阳城电厂向江苏送电工程,接入华东电网,既可以缓解铁路运输紧张状况,充分发挥山西能源基地优势,也可以缓解江苏电力供应紧张局面,对促进山西、江苏两省经济发展有重大意义,是落实国家关于更好地建设山西能源基地,变输煤为输电,支援华东电网建设的一项重大举措。

该工程跨越山西省、河南省、山东省,在安徽和江苏两省交界处入江苏,终止于淮阴变电所,连接长度 760km。建成以后,将成为我国又一条跨地区的能源动脉。

该输电线路如何跨越黄河的问题是本送电工程的一个至关重要的问题,直接决定整个工程的工期和线路走向。选好跨越黄河的位置及跨越方式并研究塔基冲刷深度,是黄河大跨越工程勘测设计的关键。此大跨越工程是沿线投资最为集中、工期最长的控制性工程,其投资约占总工程造价的一半以上。黄河跨越工程所处的东明河段属游荡性河段,河床演变情况极其复杂,相应河床条件下的塔基冲刷计算模式也不成熟。为此,须通过概化模型及局部模型试验,研究东明河段的河势变化、洪水水位变化、河床冲淤变形、塔基局部冲刷变形等问题,对初选跨越点位置的优缺点提出意见,为黄河大跨越工程的设计提供依据。

二、河段概化模型设计

(一)模型设计的相似条件

输电线路黄河大跨越工程所在河段是典型的游荡性河段。该河段河床宽浅,泥沙细,含沙量高,水流散乱,主流位置迁徙不定,且变化速度很快,边界条件复杂,因此,本模型试验难度很大。李保如^[1,2]、屈孟浩^[3]及彭瑞善^①等学者曾对黄河动床模型律进行过研究。以此为基础,20 世纪 80 年代末,黄科院又对黄河下游的动床模型相似条件进行了更深入的探讨和研究^[4]^②,目前已趋于完善,其模型相似律主要由如下几方面组成:

* 本项研究得到了李保如、赵业安、屈孟浩教授级高工的指导。

① 彭瑞善,周文浩,蔡今,杨小庆,李惠梅等. 黄河下游花园口至黑岗口河段河道整治模型试验报告. 水利水电科学研究院泥沙所研究报告,1988

② 张红武,赵新建,刘建生. 黄河柳园口至曹岗河道模型的设计与验证. 黄科所首届青年科技学术讨论会论文集,1988

水流重力相似条件

$$\lambda_V = \sqrt{\lambda_H} \quad (1)$$

水流阻力相似条件

$$\lambda_n = \frac{1}{\lambda_V} \cdot \lambda_H^{2/3} \cdot \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_L}\right)^{1/2} \quad (2)$$

水流输沙能力相似条件

$$\lambda_{G_s} = \lambda_{G_{s*}} \quad (3)$$

对于悬移质泥沙模型,式(3)变为 $\lambda_{G_s} = \lambda_s \cdot \lambda_Q, \lambda_{G_{s*}} = \lambda_{s*} \cdot \lambda_Q$

则

$$\lambda_s = \lambda_{s*} \quad (4)$$

泥沙悬移相似条件

$$\lambda_\omega = \lambda_V \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_L}\right)^{0.75} \quad (5)$$

河床变形相似条件

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0} \lambda_L^2 \lambda_H}{\lambda_{G_s}} \quad (6)$$

对于悬移质泥沙模型,上式则变为

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0}}{\lambda_s} \cdot \frac{\lambda_L}{\lambda_V} = \frac{\lambda_{\gamma_0}}{\lambda_s} \lambda_{t_1} \quad (7)$$

泥沙起动及扬动相似

$$\lambda_{V_c} = \lambda_V = \lambda_{V_f} \quad (8)$$

河型相似条件

$$\left[\frac{(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} D_{50} H)^{1/3}}{i B^{2/3}} \right]_{\text{模型}} \approx \left[\frac{(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} D_{50} H)^{1/3}}{i B^{2/3}} \right]_{\text{原型}} \quad (9)$$

由于模型及原型悬沙粒径较细,一般满足 G. G. Stokes 定律,因而可确定悬沙粒径比尺

$$\lambda_d = \left[\frac{\lambda_\omega \lambda_V}{\lambda_{\gamma_s - \gamma}} \right]^{1/2} \quad (10)$$

以上各式中: λ_L 为水平比尺; λ_H 为垂直比尺; λ_V 为水流流速比尺; λ_n 为糙率比尺; λ_ω 为悬沙沉速比尺; λ_{G_s} 为水流输沙率比尺; $\lambda_{G_{s*}}$ 为水流输沙能力比尺; λ_s 为水流含沙量比尺; λ_{s*} 为水流挟沙能力比尺; λ_{t_1} 为水流运动时间比尺; λ_{t_2} 为河床冲淤变形时间比尺; λ_{γ_0} 为淤积物干容重比尺; λ_{V_c} 为泥沙起动流速比尺; λ_ν 为水流运动粘滞性系数比尺; $\lambda_{\gamma_s - \gamma}$ 为泥沙与水的容重差比尺; λ_D 为床沙粒径比尺; λ_d 为悬沙粒径比尺; B 为造床流量下河宽; H 为造床流量下的平均水深; i 为河床比降; γ_s, γ 分别为泥沙、水流容重; D_{50} 为床沙中值粒径。

此外,为保证模型与原型水流流态相似,还需满足如下两个限制条件^[5,6]:

- (1) 模型水流必须是紊流,故要求模型水流雷诺数 $Re_m > 1\,000 \sim 2\,000$ 中的某一值;
- (2) 模型水流运动不受表面张力干扰,故模型水深:

$$h_m > 1.5 \text{ cm} \quad (11)$$

按上述模型相似准则设计黄河动床模型,不仅能满足一般的水沙运动相似条件,而且能较好地复演原型宽、浅、散乱的演变特性。

(二) 比尺确定及模型沙选择

1. 几何比尺的确定及模型变率论证

根据场地条件及试验要求,经过比选后,取模型水平比尺 $\lambda_L = 1\,000$,垂直比尺 $\lambda_H = 80$ 。

对于模型变率的限制条件,国内外不少学者对此都有专门的研究,提出了不同的限制条件。由原型中近几年平滩流量($5\,000 \text{ m}^3/\text{s}$)的过水断面资料,可取宽深比较小且距跨河工程较近的过水断面为代表(河宽 $B = 1\,800 \text{ m}$,平均水深 $H = 2.80 \text{ m}$),以此可依各家公式论证所取变率的合理性。

张瑞瑾等学者认为水力半径 R 对模型变态十分敏感,提出了一个表达河道水流二度性的模型变态指标 D_R ,假定过水断面为矩形,视 $D_R = 0.95 \sim 1.0$ 为理想区,并以 $D_R \geq 0.95$ 为条件,导出如下变率限制式^[7]:

$$D_t \leq \left(\frac{1}{38} \frac{B}{H} + \frac{20}{19} \right) \quad (12)$$

将 $B = 1\,800 \text{ m}$, $H = 2.8 \text{ m}$ 代入式(12),得 $D_t \leq 17.97$,表明本模型取 $D_t = 12.5$ 可保证二度流场相似程度在理想区的范围内。

窦国仁从控制变态模型边壁阻力与河底阻力的比值,以保证模型水流与原型相似的概念出发,提出了如下模型变率限制关系式:^①

$$D_t \leq \left(1 + \frac{1}{20} \frac{B}{H} \right) \quad (13)$$

将上述原型资料代入式(13),求得 $D_t \leq 33.14$,显然,本模型所取变率满足式(13)。

张红武提出相对保证率的概念,以不小于 90% 作为模型与原型相似良好的标准,提出如下变率限制式^[2]:

$$D_t \leq 0.0213 \frac{B}{H} + 0.9 \quad (14)$$

将原型宽深比资料代入,得 $D_t \leq 14.59$,故所取 $D_t = 12.5$ 亦满足上式。

文献[6]根据冈恰洛夫、坎鲁根及洛西耶夫斯基等人的研究成果,综合提出了模型水流的宽深关系应满足 $B_m/H_m > 5 \sim 10$ 的某一值。

由模型的代表断面 $B_m = 1.80 \text{ m}$, $H_m = 0.035 \text{ m}$, $B_m/H_m = 51.43$,显然满足上式。

此外,由表 1 中的河宽与水深值,按上述各家公式计算的结果表明,本模型所取 $D_t = 12.5$ 也都在各家公式的允许范围内,变态影响较小,可满足工程实际需要。

① 窦国仁,柴挺生. 丁坝回流及其相似律的研究. 南科所研究报告,1958

2. 模型沙的选择

根据以往的经验^①及黄科院对于模型沙的试验分析^②,作为黄河游荡型河段的模型床沙不宜太细,悬移质泥沙也应选容重不大的模型沙。本模型参考一些黄河模型试验的成功经验^③,选取郑州热电厂煤灰作为模型沙。

郑州热电厂煤灰(模型沙),容重 $\gamma_s = 20.58 \text{ kN/m}^3$,由此可求得 $\lambda_{\gamma_s} = \frac{25.97}{20.58} = 1.26$, $\lambda_{\gamma_s - \gamma} = \frac{16.17}{10.78} = 1.5$ 。由式(1)、式(5)可算得 $\lambda_{\omega} = 1.34$ 。

根据原型及模型的水流温差分析结果,若取 $\lambda_v = 0.718$,则由式(10)求得 $\lambda_d = 0.8$ 。则所选模型悬移质泥沙中径 $d_{50m} = \frac{0.015 \sim 0.025}{0.8} = 0.0188 \sim 0.031 \text{ mm}$ 。

试验时,可根据原型情况及模型水温高低,由式(10)计算调整,控制悬移质泥沙加沙粒径。

模型床沙既要考虑满足相似条件式(8),又要考虑满足河型相似条件式(9),通过比较和试算,最后选定 $D_{50m} = 0.023 \sim 0.030 \text{ mm}$,其床沙粒径比尺 $\lambda_D \approx 4.0$ 。

我们在黄河下游游荡型河道模型设计时,曾采用天然河床不冲流速与床沙质含沙量的关系曲线确定原型沙的起动流速^④。认为可视该曲线上含沙量等于零对应的流速为起动流速,由此查得 $V_{cp} = 0.74 \sim 0.84 \text{ m/s}$ ($h \approx 1.1 \sim 2 \text{ m}$),实际上,这与以往确定清水时轻壤土(有的称亚沙土)土质渠槽不冲流速的数值基本相同^[8]^⑤,文献[8]给出的壤土及粘土不冲流速可表示为

$$V_B = \lambda_{c_1} R^{1/4} \quad (15)$$

式中: V_{c_1} 为水力半径 $R = 1 \text{ m}$ 时的不冲流速,对于轻壤土(粒径大于 0.05 mm 的沙粒含量约 65% , $0.005 \sim 0.05 \text{ mm}$ 的粉粒含量为 23% ,小于 0.005 mm 的粘粒含量为 12% ,与黄河下游河床床沙级配接近), $V_{c_1} = 0.7 \sim 0.8 \text{ m/s}$,若取 $V_{c_1} \approx 0.75 \text{ m/s}$,并取 $R \approx h$,则当 $h = 2 \sim 3 \text{ m}$ 时,其不冲流速 $V_B = 0.89 \sim 0.99 \text{ m/s}$ 。一般认为,由于清水时河床不冲流速就等于起动流速,因此可根据上述分析结果,将原型床沙起动流速定为 $0.89 \sim 0.99 \text{ m/s}$ 。另一方面,预备试验得出的模型床沙起动流速 $V_{cm} \approx 11 \text{ cm/s}$,与用李保如起动流速公式计算的结果接近。于是 $\lambda_{V_c} = (0.89 \sim 0.99)/0.11 = 8.09 \sim 9.00$,与流速比尺 $\lambda_V = \sqrt{80} = 8.94$ 接近,表明所选模型床沙可以满足起动相似条件。

由窦国仁^⑥及我们的水槽试验结果^⑦可知,与原型情况接近的天然沙的扬动流速一般为起动流速的 $1.54 \sim 1.75$ 倍。若取原型扬动流速 $V_f = 1.65 V_c$,则得原型床沙的扬动

① 张红武. 黄河花园口至东坝头河道整治模型验证试验报告. 黄委会水科院, 1991

② 张红武, 江恩惠, 白咏梅等. 黄河高含沙洪水模型相似律的研究. 黄委会水科院黄科技第 94013 号, 1993

③ 张红武, 赵新建, 刘建生. 黄河柳园口至曹岗河道模型的设计与验证. 黄科所首届青年科技学术讨论会论文集, 1988

④ 张红武等. 黄河花园口至东坝头河道整治模型的设计. 黄委会水科院黄科技第 91018 号, 1990

⑤ 罗国芳等. 黄河下游不冲流速的初步分析. 黄委会水科所, 1958

⑥ 窦国仁. 泥沙运动理论. 南京水利科学研究所研究报告, 1964

⑦ 张红武, 江恩惠, 白咏梅等. 黄河高含沙洪水模型相似律的研究. 黄委会水科院黄科技第 94013 号, 1993

流速为 $1.47 \sim 1.63 \text{ m/s}$ 。参阅文献^①中的资料,取模型床沙扬动流速 $V_{fm} = 0.187 \text{ m/s}$, 则 $\lambda_{V_f} = (1.47 \sim 1.63)/0.187 = 7.86 \sim 8.72$, 与 λ_V 接近,模型设计所选床沙也可近似满足扬动相似条件。

对于悬移质泥沙中那部分与床沙有一定交换几率的泥沙,可采用唐存本^[6]及文献^①提出的计算公式计算其起动流速。这两个公式的形式分别为

$$V_c = \left(\frac{h}{d}\right)^{0.14} \left(17.6 \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} d + 0.000\ 000\ 605 \frac{10 + h}{d^{0.72}}\right)^{1/2} \quad (16)$$

$$V_c = 3.5 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g\right)^{2/9} \frac{\nu^{5/9}}{\sqrt{d_{50}}} h^{1/6} \quad (17)$$

式(16)采用 $\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ 单位制,式(17)适用于 $d_{50} = 0.15 \text{ mm}$ 的细沙。 $d_{50} \leq 0.015 \text{ mm}$ 的原型沙,由式(16)可求得 $h = 2 \sim 3 \text{ m}$ 时的起动流速 $V_c = 77.43 \sim 85.23 \text{ cm/s}$ 。而按式(17)相应可求得 $V_c = 87.39 \sim 93.50 \text{ cm/s}$ (取水温为 20°C)。由土力学对粘性土的分类方法,原型悬沙一般可划归到重壤土或沙质粘土一类,从文献[8]可查得清水时 $V_{c1} \approx 0.85 \text{ m/s}$,由式(15)求得 $h = 2 \sim 3 \text{ m}$ 时的不冲流速 $V_B = 101.1 \sim 111.9 \text{ cm/s}$ 。综合来看,原型的起动流速可以取 $90 \sim 110 \text{ cm/s}$ 。对于 $d_{50m} = 0.015/\lambda_d = 0.018 \text{ mm}$ 的模型沙,屈孟浩曾专门进行过起动试验,这种粗度的电厂粉煤灰起动流速 $V_{cm} \approx 12 \text{ cm/s}$ 。于是 $\lambda_{V_c} = (90 \sim 110)/12 = 7.5 \sim 9.17$,与流速比尺相差不多,表明即使悬移质泥沙落淤床面后,也能近似满足起动相似条件。

上述选沙情况能否满足水流阻力相似条件,是本模型设计成败的关键问题之一。由式(2)可求出 $\lambda_n = 0.587$,模型糙率 $n_m = (0.01 \sim 0.015)/\lambda_n = 0.017 \sim 0.0255$,与预备试验结果接近。

为进一步论证模型小河动床阻力的相似性,可采用如下公式进行分析^[6]

$$n = \frac{\kappa h^{1/6}}{2.3 \sqrt{g} \lg \left(\frac{12.27 h \chi}{0.7 h_s - 0.05 h} \right)} \quad (18)$$

式中: κ 为卡门常数,为简便计,取 $\kappa = 0.4$; h 为水深,由 $\lambda_h = 80$,得 $h = 0.03125 \text{ m}$; χ 为校正参数,对于床面较为粗糙的模型小河,取 $\chi = 1$; h_s 为模型的沙波高度,根据预备试验, $h_s = 0.01 \sim 0.0275 \text{ m}$ 。

由式(18)可得模型小河的糙率值 $n = 0.0169 \sim 0.0233$,该值与设计值相当,这说明所选床沙可以满足河床阻力相似条件。

3. 挟沙力比尺、含沙量比尺及河床变形时间比尺的确定

由于目前尚没有同时应用于原型与模型的挟沙能力计算公式,所以很难用挟沙力公式导出比尺的方法来计算挟沙力比尺。为解决本模型的设计问题,我们采用计算原型挟沙力及结合模型预试验结果的途径来确定挟沙力比尺,即首先由适合原型的水流挟沙力公式计算原型水流挟沙力,再由模型预备试验得出模型的水流挟沙力,两者之比即为水流挟沙力比尺。

① 张红武. 河流力学选讲. 黄科所讲义. 黄委会水科院黄科技第 88013 号, 1987

张红武、张清^[9]提出了如下形式的水流挟沙力统一公式:

$$S_* = 2.5 \left[\frac{(0.0022 + S_V) V^3}{\kappa \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma} g H \omega} \ln \left(\frac{H}{6D_{50}} \right) \right]^{0.62} \quad (19)$$

式中: γ_m 为浑水容重; H 为水深; V 为流速; D_{50} 为床沙中径; S_V 为以体积百分数表示的含沙量; κ 、 ω 为浑水卡门常数及泥沙群体沉速, 分别由下式计算

$$\kappa = 0.4 - 1.68(0.365 - S_V) \sqrt{S_V} \quad (20)$$

$$\omega = \omega_0 (1 - 1.25 S_V) \left[1 - \frac{S_V}{2.25 \sqrt{d_{50}}} \right]^{3.5} \quad (21)$$

式中: ω_0 为泥沙在清水时的沉速; d_{50} 为悬移质泥沙中径, mm。

经舒安平^[10]等人通过实测资料检验, 证实式(19)是现有公式中最适用于黄河的水流挟沙力公式, 目前已得到较广泛的应用。

根据上述分析, 取本河段高村水文站及河段上游夹河滩水文站的水文资料, 按照式(19)计算原型的水流挟沙力 S_{*p} 列于表1。

模型的水流挟沙力 S_{*m} 系根据本模型预备试验及花园口至东坝头河段模型试验得出的, 也列于表1, 从而求出 $\lambda_{s*} = S_{*p} / S_{*m} = 1.65 \sim 2.29$, 平均值约等于2。

表1 水流挟沙力比尺分析计算

水文站名	原型测验时间 (年·月·日)	Q (m ³ /s)	V (m/s)	H (m)	S_p (kg/m ³)	S_{*p} (kg/m ³)	S_{*m} (kg/m ³)	λ_{s*}
夹河滩	1973.9.3	4 520	2.64	1.83	327.0	216.75	120.0	2.18
	1977.8.9	6 120	1.50	2.66	328.0	133.00	75.0	1.77
	1982.6.28	1 280	0.96	0.92	5.5	4.70	2.5	1.88
	1982.7.31	3 560	1.57	1.16	30.20	29.0	16.5	1.76
	1982.8.7	4 520	2.58	1.75	27.9	46.69	21.0	2.22
	1982.8.15	5 360	2.12	2.56	46.0	50.15	24.0	2.09
	1988.8.10	5 720	1.65	1.28	87.5	103.00	53.0	1.94
1988.8.18	5 980	3.07	3.09	73.6	108.90	55.0	1.98	
高村	1963.9.6	2 800	2.03	1.65	42.1	52.29	27.0	1.94
	1964.7.26	4 900	2.20	1.80	39.4	57.95	30.0	1.93
	1977.8.8	3 100	2.72	1.90	136.0	140.30	72.0	1.95
	1979.8.4	2 740	2.06	3.17	104.0	81.10	40.0	2.03

根据文献^①的试验成果,作为模型设计,可取模型沙干容重 $\gamma_{0m} = 7.26 \text{ kN/m}^2$, 原型沙干容重 $\gamma_{0p} = 14.22 \text{ kN/m}^2$, 则 $\lambda_{\gamma_0} = 1.96$, 由此可求得河床变形时间比尺 $\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_{\gamma_0}}{\lambda_s}$. $\frac{\lambda_L}{\lambda_V} \approx \frac{1.96}{1.65 \sim 2.29} \times \frac{1000}{\sqrt{80}} = 95.67 \sim 132.8$. 由此可见, λ_{t_2} 与水流运动时间比尺 λ_{t_1} ($= \lambda_L/\lambda_V = 111.8$) 接近, 这样, 对于非恒定流河道动床模型试验, 可以避免常遇到的两个时间比尺相差甚远所带来的时间变态问题。

4. 比尺汇总

表 2 为上述模型设计得到的各比尺汇总结果。

表 2 各比尺汇总

比尺名称	比尺数值	依 据	说 明
水平比尺 λ_L	1 000	根据场地条件	
垂直比尺 λ_H	80	根据试验需要	
流速比尺 λ_V	8.94	式(1)	
流量比尺 λ_Q	715 542	$\lambda_Q = \lambda_L \lambda_H \lambda_V$	
糙率比尺 λ_n	0.587	式(2)	
沉速比尺 λ_w	1.34	式(5)	
容重差比尺 $\lambda_{\gamma_s - \gamma}$	1.5	模型沙为郑州热电厂煤灰	$\gamma_{sm} = 20.58 \text{ kN/m}^3$
悬移质泥沙粒径比尺 λ_d	0.80	式(10)	取 $\lambda_v = 0.718$
床沙粒径比尺 λ_D	4.0	满足式(9)相似要求	
起动流速比尺 λ_{V_c}	8.09 ~ 9.00	基本满足式(8)	
扬动流速比尺 λ_{V_f}	7.86 ~ 8.72		
含沙量比尺 λ_s	2.0	$\lambda_s = \lambda_{s_*} = S_{*p}/S_{*m}$	已经过试验率定
干容重比尺 λ_{γ_0}	1.96	$\lambda_{\gamma_0} = \gamma_{0p}/\gamma_{0m}$	
水流运动时间比尺 λ_{t_1}	111.8	$\lambda_{t_1} = \lambda_L/\lambda_V$	时间不变态
河床变形时间比尺 λ_{t_2}	110	式(7)	已经过试验率定

三、概化试验概况

(一) 模型制做及测验手段

因受场地限制,模型中缺少堡城北岸对大河河势等方面影响较小的部分滩地,加上时间限制,在模型上尚难开展系统的验证试验,因此我们称本试验为概化试验。图 1 为概化试验模型平面布置图。在堡城及高村工程附近,初选 4 条线路进行比选,即图中所标 A、B、C、D 线路。为提高模型地形制做精度,在原型已有的 4 个实测大断面基础上,又内插了

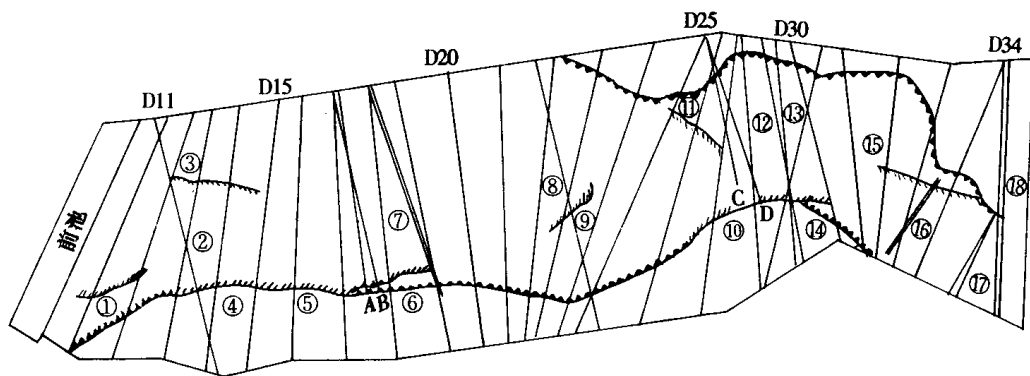
① 张洪武,江恩惠,白咏梅等. 黄河高含沙洪水模型相似律的研究. 黄委会水科院黄科技第 94013 号,1993

一些断面。内插断面所依据的资料有汛前大断面、河势图(包括主流线及水边线)和沿程水位等。按实测流量对应大断面上的过水面积控制调整内插断面的大小,由河势图确定内插断面河槽位置与宽度,使得拟做的模型小河的水面线与原型相应。概化试验初始地形采用 1995 年汛前测验的断面资料制做,床沙亦按相应的河床观测资料来选铺。

本模型采用电磁流量计及 HKS 流量自动控制器测验和控制进口流量过程;沿程水位用 12 台水位测针,进行人工测读。尾门水位则通过插板式尾门调节。模型进口采用浑水系统搭配。进口断面含沙量大小主要通过加沙管道调节阀控制,可以满足含沙量变幅很大的需要。

模型悬移质泥沙级配采用河海大学生产的光电宽域颗分仪测量,对于床沙,粒径大于 0.1 mm 部分的沙样,采用筛分与光电颗分相配合进行量测。水样的含沙量用比重瓶法测验,模型中含沙量沿河宽及沿垂线分布的测验,主要是采用自制的简易吸管测沙仪取样,再采用比重瓶和光电天平测算出含沙量。模型表面流速采用了浮标测量,流速分布测验采用浑水流速仪测量,该仪器具有探头小及灵敏度高的优点。模型地形采用了地形仪量测,停水后的地形由自动水准仪测量及测针探测两种办法分别完成。为描绘河势变化,在模型中沿断面密布了标有起点距的测线。试验时采用人工描绘、照相机拍照、摄像机录制相结合的方法观测。

正式试验前,首先开展了预备试验,对本模型的河床变形、水流摩阻特性及输沙特性等进行了预演,初步看出,含沙量比尺在 2 附近,相应的河床变形时间比尺与水流运动时间的比尺也较为接近。



- ①老君堂险工 ②杨小寨断面 ③于林险工 ④黄寨险工 ⑤霍寨险工 ⑥堡城险工 ⑦长东铁路桥
⑧河道断面 ⑨河道工程 ⑩高村险工 ⑪青庄险工 ⑫高村水文断面 ⑬高村断面 ⑭桥口险工
⑮南小堤上延工程 ⑯东明桥 ⑰南小堤断面 ⑱尾门

图 1 概化模型平面布置

(二) 主要试验组次及水沙条件

在河段概化模型上开展的主要试验组次,见表 3。

根据试验目的,模型进口采用的水沙条件见表 4、表 5。这些水沙过程的确定,参考了黄河“82.8”型洪水资料,并适当兼顾模型实际进口加沙设备状况。为了反映河段的其他演变规律,我们在泥沙粗度方面还进行了一定的改变。

表 3

概化模型主要试验组次

试验组次编号	洪水频率	初始地形条件	试 验 目 的
G-1	中小水	1995年汛前地形	验证水位、河势的相似性
G-2	百年一遇	1995年汛前地形	对模型进一步率定并研究河势变化
G-3	百年一遇	1995年汛前地形	修建跨河工程后的预备试验
G-4	三百年一遇	在上一组次试验地形上	修建跨河工程后的预备试验
G-5	百年一遇	1995年汛前地形	全面观测试验
G-6	三百年一遇	在上一组次试验地形上	全面观测试验

表 4

百年一遇洪水试验进口水沙过程

洪水历时 (h)	Q (m ³ /s)	S _p (kg/m ³)	G-5实际进口含沙量 S _m (kg/m ³)	说 明
32	3 283	12.2	6.25	1. 取 $\lambda_s = 2, \lambda_Q = 715 542$ 2. 洪水水沙过程参考“82.8”型洪水定出,并适当兼顾模型进口加沙设备状况
16	4 550	16.0	8.65	
24	6 883	26.0	13.74	
16	7 850	22.0	10.20	
16	10 850	26.0	12.45	
8	13 300	28.0	13.40	
16	14 400	30.0	15.20	
16	11 300	30.0	15.20	
24	9 267	29.0	12.80	
24	10 183	31.0	15.40	
48	9 817	30.0	13.30	
40	8 900	29.0	14.50	

表 5

三百年一遇洪水试验进口水沙过程

洪水历时 (h)	Q (m ³ /s)	S _p (kg/m ³)	G-6实际进口含沙量 S _m (kg/m ³)	说 明
11	3 685	13	6.6	1. 取 $\lambda_s = 2, \lambda_Q = 715 542$
20	5 917	20	9.6	
18	8 275	30	16.2	2. 洪水水沙过程参考“82.8”型洪水定出,并适当兼顾模型进口加沙设备状况
11	12 450	70	35.7	
24	17 150	25	12.1	3. 洪水历时及峰前含沙量的确定,适当考虑了前期洪水的影响
16	12 975	25	12.4	
24	9 275	26	12.8	