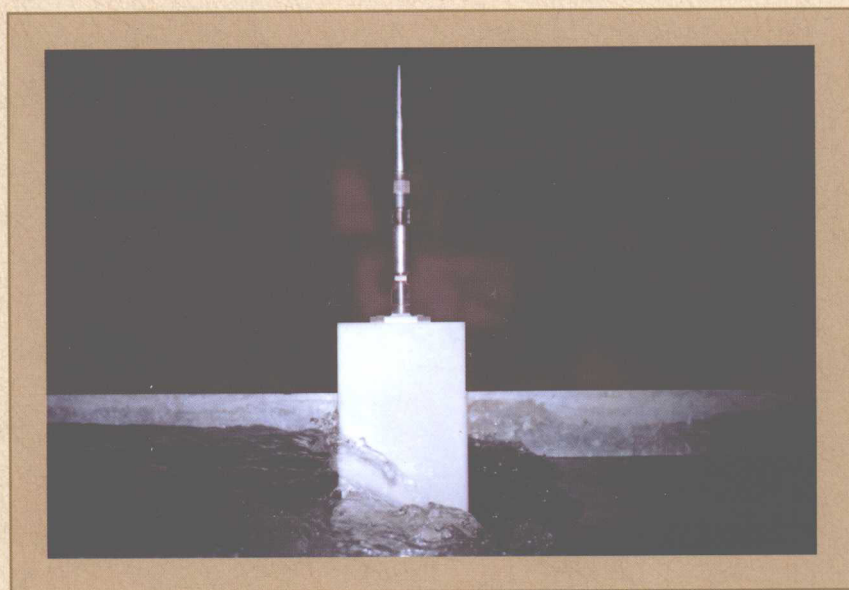




Study and Practice on Unsteady  
Flow in Bridge Crossing

# 桥渡非恒定流 研究与实践

戴荣尧 张佰战 李付军 著



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

## 内 容 简 介

本书系一部以著者完成的各项桥渡非恒定流试验研究成果为主线,全面系统地总结我国桥渡非恒定流模型试验研究发展历程的专著,扼要介绍非恒定流模型试验的相似理论,试验研究的基本条件,以及水库溃坝、潮汐冲刷、涌潮压力与冲刷、天然一般河道桥渡冲刷等等不同类型桥渡非恒定流试验研究的特点、关键难题的解决途径和科研成果。书中还列入了大量不同形式桥墩、不同水流条件和不同土壤条件下的桥墩局部冲刷与防护的试验资料,探讨了桥墩局部冲刷与防护的机理,并附录新中国成立以来 100 余座水库溃坝洪水造成铁路严重灾害的调查统计。本书可供铁路、公路、水利部门有关工程设计、施工、科研参考,或可作桥渡非恒定流试验研究继续发展的垫石。

## 图书在版编目(CIP)数据

桥渡非恒定流研究与实践/戴荣尧,张佰战,  
李付军著. —北京:中国铁道出版社,2012.2  
ISBN 978-7-113-13879-0

I. ①桥… II. ①戴… ②张… ③李… III. ①桥涵  
工程—流体力学—研究 IV. ①U441

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 238277 号

书 名:桥渡非恒定流研究与实践  
作 者:戴荣尧 张佰战 李付军

责任编辑:曹艳芳 陈小刚 编辑部电话:010-51873017 电子信箱:chengcheng0322@163.com  
封面设计:崔 欣  
责任校对:张玉华  
责任印制:陆 宁

出版发行:中国铁道出版社(100054,北京市西城区右安门西街8号)  
网 址: <http://www.tdpress.com>  
印 刷:中国铁道出版社印刷厂  
版 次:2012年2月第1版 2012年2月第1次印刷  
开 本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:17 字数:414 千  
书 号:ISBN 978-7-113-13879-0  
定 价:80.00 元

## 版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

电 话:市电(010) 51873170,路电(021) 73170(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010) 63549504,路电(021) 73187

# **Abstract**

Based on different experimental research projects completed by the authors, this monograph comprehensively and systematically summarizes the development and research achievements on bridge crossing unsteady flow. It also briefly introduces the similar theory on experimental model, its basic experimental research conditions, the peculiarities and related research achievements of different kinds of experimental research on bridge crossing unsteady flow including broken dams, tidal scour, tidal bore pressure and scour, scour at bridge crossing on natural river bed and so on. The book shows the resolving approaches of some key challenges on unsteady flow research. This book also lists a lot of experiment data on local scour and protection around bridge piers under the conditions of different form piers, different flows and different soils of river bed. The mechanism of local scour and protection around bridge piers is discussed. The appendix includes the statistics on the railway disasters of more than one hundred domestic broken dams since 1949. This book may provide references for engineering design, construction and scientific research of railway, road, and water conservancy departments. It may also perform as a stepping-stone for promoting the research and development on bridge crossing unsteady flow.

# 序 一

重要桥渡的设计,应依据水工模型试验的结果。一般情况下,模型试验多采用流量恒定的方法进行。20世纪70年代,河南省两座水库因暴雨发生溃坝,造成京广铁路严重破坏。随后,铁道部责成铁道科学研究院开展非恒定流桥渡模型试验研究,探索水库溃坝洪水对铁路安全运营的影响,为京广铁路修复提供科学依据。

戴荣尧先生于1955年武汉大学水利专业毕业后,一直在铁道科学研究院从事桥渡模型试验研究工作。主持并参与了非恒定流模型试验的筹建和发展完善,从开始用人工手动操纵进水阀门的简易方法,逐步发展到研制成功具有国际先进水平的全套多功能非恒定流试验设备。用以开展了模拟不同非恒定流,如潮汐水流、涌潮压力与冲刷、大坝溃坝等的模型试验,为京广铁路修复、缅甸仰光—丁茵大桥、钱塘江大桥和京沪高速铁路南京上元门大桥的设计提供了重要依据。

本书是戴先生近三十年在非恒定流模型试验研究领域工作的经验和科研成果的汇集,是一部专业著作。本书的特点是:著者以他亲身参与的非恒定流试验研究的实例为依据,着重介绍了各种不同类型桥渡非恒定流模型试验的特点,关键难题的解决途径及其科研成果。非恒定流模型试验使试验条件更接近实际情况,因而必将日益得到发展和重视。本书的出版,不仅可供从事本专业工作的设计、施工技术人员参考,也将有助于非恒定流试验研究的进一步发展和完善。

中国工程院院士 周 镜

2011年8月

## 序 二

《桥渡非恒定流研究与实践》一书的出版,将会受到科技界和世人的极大关注,它在溃坝水力学和潮汐动力学以及复杂的三维非恒定流对铁路桥渡的影响,对灾害防御研究均有重大的意义。例如 1975 年 8 月板桥、石漫滩水库垮坝影响,其造成的损失是十分巨大的,铁道科学研究院戴荣尧等教授能从理论上、测试技术上突破,模拟和复演溃坝水流对铁路的影响;并测得自溃坝的流量过程线和瞬间流速值,这是世界领先的科学试验水平。铁道科学研究院的科学家们,为了使自己的理论研究和试验研究成果符合天然条件,他们曾先后调查了我国 13 个省的 400 余座已溃水库的资料。他们认真地在板桥水库溃坝后,在大坝下游约 800 km<sup>2</sup> 内,调查测量了 52 个洪痕水位。使他们的溃坝模型的试验成果,得到天然实测资料的验证,这实在是世间罕见的。板桥水库溃坝后,位于其下游约 40 km 的遂平水文站的自计水位计记录了整个溃坝后的水位变化。他们试验的水位过程线与天然实测的水位过程线是基本相符的,真非常难得。

戴荣尧教授等铁科院的科学家们,对我国著名也是世界著名的强潮河口涌潮段的桥渡进行了难度极高的试验研究,在理论和试验技术上难度都很高,尤其在水工模型中能复演涌潮的过程,实为不易。由于他们的严谨认真、艰苦努力,终于得到我国横跨强潮河口桥梁设计的可靠而必不可少的科学数据。

本书还对桥墩冲刷、洪水灾害等对铁路的影响进行研究,得到很多宝贵的研究成果。本书的出版对桥渡乃至铁路建设的发展,将产生重大作用,会增强人们的防患意识,增强铁路建设中洪水灾害防治的研究工作,对国民经济的快速发展有极为重要的意义。

中国水利水电科学研究院原泥沙研究所所长 曾庆华

2011 年 8 月

# 前言

严格而言,除人为控制的水流条件以外,在自然状态中不存在恒定流。天然河道中水流的流量也都是随时间而变的非恒定流,只是不同类型河流的流量随时间的变化幅度不同而已。此外,诸如各种节流闸门的调节、船闸的引水和放水等等,都会引起非恒定流动,而水库大坝和河道堤防的突然溃决、入海河口的潮汐现象、各种类型的波浪水流以及举世闻名的钱塘江涌潮现象等,更是明显而复杂的非恒定流,绝不能以恒定流的理论计算和试验方法对其进行研究。以往由于水工模型试验的研究水平和试验设备仪器所限,常将流量随时间而变化的非恒定流简化为流量恒定不变的方法进行试验研究。

非恒定流在我国桥渡模型试验研究中的应用与发展是一个从无到有、从简到繁、从原始到先进的过程。中国铁道科学研究院\*于1957年开始进行第一项桥渡模型试验研究——京广铁路滹沱河大桥整体河工模型试验。自此以后,先后完成100余座大桥、特大桥桥渡模型试验研究。其中包括桥渡冲刷、壅水、冲刷防护、桥位及孔跨布设等等项目的整体模型和断面模型试验研究,但多数试验均假设河流中的流量为一恒定值,不随时间而变。1975年河南省板桥大型水库溃坝导致京广铁路严重破坏,要开展溃坝洪水模型试验研究,不可能再假定溃坝流量为恒定流,而必须采用非恒定流的试验手段。由此中国铁道科学研究院开展了一系列桥渡非恒定流试验研究。

我国幅员广阔河流众多,而且是一个农业大国,在既有铁路线的上游分布有数以万计的不同大小的水库,由于种种原因致使其中许多水库属于病险水库,从而也常有溃坝事故发生。长期以来,水库溃坝洪水冲毁铁路桥梁和线路的事件时有发生,严重威胁铁路行车安全。特别是1975年8月,在当年3号台风影响下,河南省境内出现远远超过原设计频率的特大暴雨,造成两座大型水库同时溃决的重大事故,使位于下游40 km的京广铁路干线在102 km的区间内遭到严重破坏。为了探索水库溃坝洪水对铁路安全运营的影响,并为京广铁路修复提供科学依据,铁道部责成中国铁道科学研究院首先进行板桥水库溃坝洪水波整体模型试验研究,然后依次开展了水库溃坝最大流量计算、潮汐冲刷、涌潮压力与冲刷等等多项桥渡非恒定流模型试验研究。

中国铁道科学研究院在开展非恒定流桥渡模型试验研究的初期,一方面着手研制开展非恒定流水工试验所必需的仪器设备;另一方面也曾采用最简单、最原始的用人工手动操纵进水阀门的试验方法:即按预先设定的要求,在不同时段内调节进水阀门手柄旋转圈数以反映流量变值的试验方法。其后则逐步发展到研制成功达到国际先进水平的全套多功能非恒定流试验设备,在这套设备上,能连续施放任何复杂的水位流量过程,或不同线型的潮汐两向水位流量

---

\* 中国铁道科学研究院原名铁道科学研究院及铁道部科学研究院,故本书中有此三种名称出现。

过程。在研究内容方面,中国铁道科学研究院完成的板桥水库溃坝整体模型试验,是国内唯一有天然资料验证并与其符合良好的大型溃坝模型试验。而且在溃坝模型上,首次模拟水库大坝至铁路 40 km 长度的区间降雨过程的影响,试验成果为京广铁路修复工程提供了科学依据。在水库溃坝最大流量计算的研究中,从理论上推导出能计算大坝全溃和横向局部溃决的计算公式。与此同时,通过约 600 次的水工试验,求得能计算大坝全溃、横向局部溃决、竖向局部溃决、横向竖向同时局部溃决等任何溃决情况的溃坝最大流量计算公式。通过天然水库溃坝资料、野外自溃坝试验资料、室内试验资料的验证,并与国内外其他计算公式对比,证明上述两项计算公式精度较高。在完成缅甸仰光大桥潮汐冲刷试验研究中,成功模拟了百年设计条件下的潮汐水流和大桥施工期间连续 100 个不同线型的潮汐水流过程,试验研究得出的冲刷深度为大桥设计提供了科学依据,并保障了大桥施工安全。根据模型试验资料分析研究提出仰光大桥施工期间沉井的冲刷深度为 10.5 m,天然实际冲刷值达 9 m 时,为了安全考虑,施工单位抛投了防护体,使已处于冲刷后期缓慢发展的冲刷深度不再继续增大,由此可在一定程度上验证模型试验的合理与精度。此外,为搜集非恒定流野外实测资料,考虑到非恒定流流速大、变化快的特点,探索了引用中国铁道科学研究院通信信号研究所研制的 TZ-103 型雷达装置的可能性,并在高速水槽上对其进行验证和率定。在先后参与浙江省水利科学研究所和河南省水利科学研究所主持的自溃坝野外试验研究中,实测了溃坝水流的全过程,取得实测最大流速达 10.88 m/s 的罕见资料。在完成钱塘江涌潮压力和冲刷试验研究中,首次成功模拟了复杂的涌潮现象,从而为开展此项试验研究提供了前提条件。在此基础上,以模型桥墩作为传感器测得百年设计条件下的涌潮压力以及相应的冲刷深度。在进行沉井吸泥下沉冲刷试验研究时,除引用一般常用的模型试验相似准则以外,还计入了沉井重力相似、吸泥(输沙率)相似、沉井外壁摩阻相似等相似准则,保证了模型与原型的相似。上述研究成果曾在国际或国内学术研讨会上交流。

国内桥渡非恒定流试验研究只是在近 30 年才从无到有,并逐步发展形成水利工程系统中的一个新的领域。随着我国铁路建设事业的快速发展,一些新的非恒定流问题,或以往即已存在而未有足够重视的非恒定流问题,势必提到亟待研究的日程。特别是沿海地区或跨海铁路建设日益增多,有关桥渡非恒定流的诸多问题将逐步涌现。因此桥渡非恒定流试验研究任重而道远。

本书系统总结了铁道科学研究院几十年来在桥渡非恒定流领域的试验研究成果,同时介绍了部分水利同行的研究成就,希藉此能有众多的专家、学者关注研究此类问题,为桥渡非恒定流试验研究的发展及铁路建设事业共同作出贡献。

全书共分十章,由戴荣尧、张佰战、李付军编著,戴荣尧统稿。戴荣尧编写第一、五、六、八、九章,张佰战编写第三、四、七章并完成全书文整,李付军编写第二、十章。

本书承中国工程院院士周镜先生和中国水利水电科学研究院原泥沙研究所所长曾庆华教授分别为本书作序,谨致衷心谢意!同时对所有为本书的完成和出版给予帮助和支持的同志表示诚挚的感谢。

著 者

2011 年 8 月

# 目 录

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| 第一章 非恒定流在桥渡试验研究中的应用与发展     | 1   |
| 第一节 非恒定流自动控制系统的研制          | 1   |
| 第二节 非恒定流科研难题的探索            | 3   |
| 第二章 非恒定流模型试验相似理论、基本条件及野外观测 | 11  |
| 第一节 模型试验相似理论               | 11  |
| 第二节 非恒定流模型试验基本条件           | 17  |
| 第三节 非恒定流野外观测(雷达测速)         | 24  |
| 第四节 钱塘江涌潮压力与冲刷天然观测研究       | 28  |
| 第三章 水库溃坝实例及模型试验研究          | 38  |
| 第一节 国外水库溃坝实例               | 38  |
| 第二节 国内水库溃坝实例               | 41  |
| 第三节 水库溃坝模型试验研究             | 46  |
| 第四节 溃坝模型试验研究发展方向           | 68  |
| 第四章 溃坝最大流量计算研究             | 71  |
| 第一节 国内外研究概况                | 71  |
| 第二节 溃坝最大流量理论计算公式的推导        | 74  |
| 第三节 溃坝最大流量经验计算公式的建立        | 80  |
| 第四节 溃坝口门宽度调查研究             | 95  |
| 第五章 缅甸仰光—丁茵大桥桥墩潮汐冲刷试验研究    | 104 |
| 第一节 试验任务与要求                | 104 |
| 第二节 试验方法与模型设计              | 107 |
| 第三节 试验设备与仪器                | 109 |
| 第四节 试验资料分析成果               | 110 |
| 第五节 结论与认识                  | 113 |
| 第六章 钱塘江涌潮压力及冲刷试验研究         | 115 |
| 第一节 钱塘江河口基本情况及涌潮的形成        | 115 |
| 第二节 钱塘江涌潮的模拟               | 118 |
| 第三节 钱塘江涌潮压力及冲刷试验研究         | 119 |



第七章 京沪高速铁路长江上元门桥位整体河工模型试验研究..... 143

第一节 模型设计..... 143

第二节 定床试验..... 148

第三节 动床试验..... 158

第四节 主要结论..... 177

第八章 沉井吸泥下沉冲刷试验研究..... 179

第一节 试验内容与要求..... 179

第二节 模型设计及试验方案..... 180

第三节 试验方法与仪器设备..... 184

第四节 资料分析与成果..... 186

第五节 结论..... 192

第九章 京广线郑州黄河大桥桥墩局部冲刷及防护工程措施试验研究..... 194

第一节 模型设计..... 195

第二节 试验方法与仪器设备..... 197

第三节 试验结果及资料分析..... 198

第四节 结语..... 210

第十章 其他桥墩冲刷非恒定流试验研究..... 212

第一节 不同结构形式桥墩局部冲刷试验研究..... 212

第二节 分层土壤桥墩局部冲刷..... 219

第三节 妈屿岛非恒定流桥墩局部冲刷试验研究..... 225

参考文献..... 233

附录一..... 239

附表一 历年水库大坝溃决、放水诱发的铁路灾害统计表 ..... 239

附表二 主要病险水库或失效水库对铁路影响统计表..... 249

附表三 水库溢洪道下泄流量对铁路影响统计表..... 251

附表四 铁路被水库淹没后造成的危害统计表..... 252

附录二 本书所列铁道科学研究院完成的桥渡非恒定流试验研究项目及主要成员..... 255

# Contents

|                    |                                                                                                  |     |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Chapter I</b>   | <b>Application and Development of Unsteady Flow on Bridge Crossing</b>                           |     |
|                    | <b>Experimental Research</b>                                                                     | 1   |
| § 1                | Development on Automatic Control System of Unsteady Flow                                         | 1   |
| § 2                | Exploration of Research Difficulty on Unsteady Flow                                              | 3   |
| <b>DChapter II</b> | <b>Similar Theory, Basic Conditions and Field Measurements of Model Tests with Unsteady Flow</b> | 11  |
| § 1                | Similar Theory of Model Tests                                                                    | 11  |
| § 2                | Basic Conditions of Model Tests with Unsteady Flow                                               | 17  |
| § 3                | Field Measurement of Unsteady Flow (Radar Measurement of Flow Velocity)                          | 24  |
| § 4                | Field Measurement of Tidal Bore Pressure and Scour on QianTang River Estuary                     | 28  |
| <b>Chapter III</b> | <b>Examples and Researches of Experimental Model of Dam-Breaking</b>                             | 38  |
| § 1                | Examples of Dam-Breaking Abroad                                                                  | 38  |
| § 2                | Examples of Dam-Breaking in China                                                                | 41  |
| § 3                | Experimental Model of Dam-Breaking                                                               | 46  |
| § 4                | Future Research of Model Tests of Dam-Breaking                                                   | 68  |
| <b>Chapter IV</b>  | <b>Research on the Calculation of Maximum Discharge of Dam-Breaking</b>                          | 71  |
| § 1                | Survey of Domestic and Foreign Research                                                          | 71  |
| § 2                | Deduction of the Theoretical Formula of the Maximum Discharge of Dam-Breaking                    | 74  |
| § 3                | Establishment of the Empirical Formula of the Maximum Discharge of Dam-Breaking                  | 80  |
| § 4                | Survey and Research of the Breach Width of Dam-Breaking                                          | 95  |
| <b>Chapter V</b>   | <b>Experimental Model Research of the Tide Scour of Yangon—DingYing Bridge Piers in Myanmar</b>  | 104 |
| § 1                | Tasks and Requirements of Experimental Model                                                     | 104 |

|                     |                                                                                                                                                                       |            |
|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| § 2                 | Method and Design of Experimental Model .....                                                                                                                         | 107        |
| § 3                 | Equipments and Instruments of Experimental Model .....                                                                                                                | 109        |
| § 4                 | Analysis and Results .....                                                                                                                                            | 110        |
| § 5                 | Conclusions .....                                                                                                                                                     | 113        |
| <b>Chapter VI</b>   | <b>Experimental Model Research of the Tidal Bore Pressure and Scour of QianTang River Bore .....</b>                                                                  | <b>115</b> |
| § 1                 | Introduction of QianTang River Estuary and the Formation of Tidal Bore .....                                                                                          | 115        |
| § 2                 | Simulation of the QianTang River Bore .....                                                                                                                           | 118        |
| § 3                 | Experimental Research of Bridge Pier Pressure and Scour of QianTang River Bore .....                                                                                  | 119        |
| <b>Chapter VII</b>  | <b>Experimental Modeling Research of the Nanjing ShangYuanMen Bridge Seat over the Yangtze River on the Beijing-Shanghai High-Speed Railway .....</b>                 | <b>143</b> |
| § 1                 | Model Design .....                                                                                                                                                    | 143        |
| § 2                 | Model Experiment with Fixed Bed .....                                                                                                                                 | 148        |
| § 3                 | Model Experiment with Movable Bed .....                                                                                                                               | 158        |
| § 4                 | Conclusions .....                                                                                                                                                     | 177        |
| <b>Chapter VIII</b> | <b>Experimental Research of Sinking Well Scoured by Suck Mud .....</b>                                                                                                | <b>179</b> |
| § 1                 | Experimental Tasks and Requirements .....                                                                                                                             | 179        |
| § 2                 | Model Design and Experimental Scheme .....                                                                                                                            | 180        |
| § 3                 | Instruments and Methods of Testing .....                                                                                                                              | 184        |
| § 4                 | Data Analysis and Results .....                                                                                                                                       | 186        |
| § 5                 | Conclusions .....                                                                                                                                                     | 192        |
| <b>Chapter IX</b>   | <b>Experimental Research of Local Scour Around Piers and Protecting Measurements of Zhengzhou Bridge over the Yellow River on the Beijing-Guangzhou Railway .....</b> | <b>194</b> |
| § 1                 | Model Design .....                                                                                                                                                    | 195        |
| § 2                 | Instruments and Methods of Testing .....                                                                                                                              | 197        |
| § 3                 | Data Analysis and Results .....                                                                                                                                       | 198        |
| § 4                 | Conclusions .....                                                                                                                                                     | 210        |
| <b>Chapter X</b>    | <b>Other Experimental Research of Local Scour Around Piers by Unsteady Flow .....</b>                                                                                 | <b>212</b> |
| § 1                 | Experimental Research on Local Scour Around Piers of Different Form Piers .....                                                                                       | 212        |

|                    |                                                                                                                                                          |            |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| § 2                | Research on Local Scour Around Piers of Layered Soils .....                                                                                              | 219        |
| § 3                | Experimental Research on Local Scour Around Piers of Mayu Island by<br>Unsteady Flow .....                                                               | 225        |
| <b>References</b>  | .....                                                                                                                                                    | 233        |
| <b>Appendix I</b>  | .....                                                                                                                                                    | 239        |
| § 1                | Statistics of Railway Disasters Introduced by Dam-Breaking .....                                                                                         | 239        |
| § 2                | Statistics of Influence of Dangerous Reservoirs on Railway .....                                                                                         | 249        |
| § 3                | Statistics of Influence of the Spillway Discharge of Reservoir on<br>Railway .....                                                                       | 251        |
| § 4                | Statistics of Damages Due to the Submergence of Railway .....                                                                                            | 252        |
| <b>Appendix II</b> | <b>The Research Items and Chiey Members of the Study of Unsteady Flow in<br/>Bridge Crossing by China Academy of Railway Sciences in This Book .....</b> | <b>255</b> |

# 第一章 非恒定流在桥渡试验研究中的应用与发展

## 第一节 非恒定流自动控制系统的研制

天然状态下的非恒定流,如水库溃坝水流或涌潮水流,是以溃坝洪水波或涌潮破碎波的形式传递。不可能以恒定流的试验模式开展此类问题的试验研究,必须采用与天然情况相似的非恒定流试验手段。而非恒定流试验研究最基本、也是最关键的前提,就是要在试验设备上能施放非恒定水流,并且其流态与准备研究的天然非恒定流的流态相似。我国自古以来就有一句至理名言:“工欲善其事,必先利其器。”它充分说明如果要在非恒定流试验研究领域取得优异成绩,必须具备与非恒定流相应的先进、完善、配套的仪器和设备。

国内外水利部门对非恒定流试验研究开展甚早,但有关桥渡非恒定流的试验研究以往尚属空白。我国第一项桥渡非恒定流的试验研究是铁道部科学研究院完成的板桥水库溃坝整体模型试验研究。该项试验是研究因水库溃坝而严重破坏的京广铁路的修复方案,由于京广铁路在板桥水库大坝下游 40 km,水库溃坝整体模型需模拟水库库区、溃坝洪水泛滥区、铁路下游尾水区,而且为保证试验精度,采用的模型缩尺不宜太大。于是按照模型相似原理设计为水平比尺  $\lambda_L=100$ ;垂直比尺  $\lambda_H=10$ 。溃坝整体模型长度为 60 m,最大宽度为 25 m。试验最开始是采用水库溃坝模型试验通常使用的模拟水库溃坝的方法:将水库溃决的坝体以一块木板或铁板来模拟,事先安放在库区坝址处阻水。当库区蓄水达到溃决水位时,突然将模拟溃决坝体的木板或铁板提起,由模型库区内的蓄水突然外泄而形成溃坝洪水。当天然水库溃坝没有任何实测资料或推算资料时,这是唯一的试验方法。但是这种试验方法存在一个严重的缺陷,那就是突出了模型变率对溃坝洪水波生成的影响。众所周知,国内外水库溃坝整体模型的变率  $\alpha$ (模型水平比尺  $\lambda_L$  与垂直比尺  $\lambda_H$  之比,即  $\alpha=\lambda_L/\lambda_H$ )通常选用 10~100。板桥水库溃坝模型选用模型变率  $\alpha=10$ ,就溃坝模型而论,变率  $\alpha=10$  算是比较小的,但从一般河工模型试验的角度而言,则可算相当大了。在这种情况下,要保证模型与天然两者阻力相似、水流流态相似是相当困难的。当水库库区模型地形的水平比尺  $\lambda_L$  与垂直比尺  $\lambda_H$  相差 10 倍时,在模拟水库溃决坝体的板块提起的瞬间,水库大坝溃决口门处能否形成与天然相似的溃坝流量向下游传递,是很值得怀疑的。正当考虑如何对待此难题时,原水利部治淮规划领导小组办公室提供了板桥水库溃坝流量变化过程资料,此项资料是依据天然水库溃坝库区水位变化而推算的。于是决定将此天然溃坝流量过程,按照模型相似流量比尺,换算成模型溃坝流量过程,直接在水库溃决口门处施放。决定取消提升模拟溃决坝体的试验方法,改用在溃决口门直接施放溃坝流量以后,接踵而至的问题就是如何在模型上施放溃坝流量过程。

在筹备开展板桥水库溃坝模型试验研究之初,就曾经考虑到其后要跨入非恒定流试验研究领域,必须建立一套能施放水位、流量变化过程的仪器设备,因此专门建立了仪器研制小组。仪器组的工作除保证模型试验常用的仪器设备外,重点是研制开展非恒定流试验研究所需的

仪器设备。另一方面,在模型设计时,考虑到在天然条件下,水库大坝与下游 40 km 的京广铁路之间存在非常大的平原泛滥区,当时的特大暴雨在洪泛区形成的区间径流达  $11\,000\text{ m}^3/\text{s}$  左右。如此大的区间径流量是不容忽视的。因此决定在模型的洪泛区采用人工降雨形成区间径流。人工降雨是采用在模型周边分散设置向上喷射的喷头来施放。人工降雨的雨量及其随时间的变化,都是按天然资料换算而成,施放雨量的变化过程本身就是一项小型非恒定流的形成过程,此项设计及施放溃坝流量过程的要求大大促进了仪器研制组针对非恒定流试验仪器设备研制工作的进展。但在水库溃坝整体模型制作完成以后,施放溃坝流量过程的仪器设备尚未研制成功。在此情况下,就试行了一种非常原始的试验方法:首先将溃坝流量分级并以量水堰校定,确定施放某一流量需旋转进水阀门手柄的圈数,并标记最后一圈的所在位置,以控制施放流量的精度。然后按照需在模型上施放的溃坝流量过程,用人工在不同时段内调节进水阀门手柄的圈数,以施放不同的流量,从而形成溃坝流量过程。这是一种最简单、最原始的施放非恒定流流量的试验方法。由于人工旋转阀门手柄的速度难以掌握,以及进水阀门的开启度与出口流量缺乏密切的关系等因素的影响,以致精度是较差的。但是用人工控制溃坝流量过程的试验方法应比用手提溃坝模板的试验方法更接近天然情况。当能施放非恒定流流量的流量自控系统研制成功后,就放弃了上述两种试验方法,在其后的试验中即采用由计算机控制进水阀门,施放模拟天然溃坝的流量过程。

为了模拟溃坝水流和洪泛区区间降雨径流,仪器研制组探索了两套流量自控系统:一套采用电磁流量计测量流量,模拟区间降雨;另一套为涡轮流量计测量流量,模拟溃坝流量。并立足于国内自动化仪表基础,采用 DDZ—II 型电动单元组合仪表,自行研制了程序给定器(流量过程给定器),使系统完全自动化。只需一人在系统控制中心集中操作,便可施放模拟溃坝流量和区间降雨径流的流量过程。

现将流量自控系统的仪器与设备简要介绍如下。

### 一、溃坝流量自控系统

此套系统包括调节阀、电动执行器、伺服放大器、操作器、调节器、涡轮流量变送器、程序给定器及监测指示仪表等。其工作原理详见本书第二章。

流量变送器及调节阀都装在进水管道上,程序给定器按要求的流量过程线换算成电流过程线指挥系统,由调节器按照 PID 规律进行调节。阀门开闭状态与给定曲线由监测仪表记录。

### 二、人工降雨

人工降雨装置的工作原理与流量自控系统相同。雨量喷洒部分是在模型上铺设架空的 H 型管路系统,在管路上每隔 1 m 接一呈弧面喷口的有机玻璃喷头的短管。模拟的降雨是先由喷头将水向上喷洒,此时水体已成雾状,然后雾状水珠成自由落体降至模型上,喷洒的水量及变化过程按照天然的降雨量换算而得。最大喷洒半径为 5~6 m。

### 三、测量记录仪器

水位测量除用水位测针外,自动记录采用型号为 3KGY—1 的水池浪高仪。其工作原理是通过传感器电容在不同水深变化时,以电流讯号输出,用光电示波仪记录。此种仪器受温度及水质等影响,稳定性及精度尚待提高。流速仪采用光电型、X 型及 S 型三种,通过光电信号

的改变,由光电示波仪连续记录。以光电流速仪较为稳定。

此项试验研究成果为京广铁路的修复提供了科学依据。

1986年铁道部科学研究院承接缅甸仰光—丁茵大桥桥墩冲刷试验研究,此项研究要求施放各种大小不同潮波重复组合的长系列潮汐水流过程,属双向往复非恒定流。特别是试验研究施工期潮汐冲刷时,要求连续施放100个不同潮波组合的潮汐过程。因此为了开展此项试验研究,必须研制一套既能自动控制流量变化过程,又能自动控制水位变化过程,且能形成连续往复水流的全新仪器设备。

首先,以往常规使用的单向水流的试验水槽已不能满足试验要求,而必须研制一套在两端都能进水和排水的试验水槽。为此设计了一座长30 m,宽1.5 m的玻璃试验水槽,在水槽两端各设计了一套与平水塔、蓄水池相连接的循环管道。

另一方面,还必须将原先研制的单向非恒定流试验装置研发提升为能施放任何线型的水位、流量往复过程的自控系统。

为保证试验流量及水位过程与天然流量、水位过程相似,采用了两套计算机控制系统。该系统包括:调节阀、电动执行器、液面仪、伺服放大器、操作器、调节器、肯特电磁流量计、程序给定器及计算机控制监视指示仪表等。其工作原理采用PID闭路调节。其供水流量大小是根据试验建筑物(桥墩)附近断面流量(包括流速及水位)过程,通过调试完成的潮波程序输入计算机来控制。同时将调试完成的水位程序输入另一计算机,用跟踪要求水位控制排水,即进水与排水均按照试验断面的实测水位、流速过程进行控制,并由流向时控器实现涨落潮自动转换流向。因此100个不同大小、不同线型的潮汐系列的水流过程可完全由计算机自动控制完成,从而使试验得以顺利完成,并保证了试验研究的精度。

经过反复调试,在试验中测到的桥墩附近的流速变化过程、水位变化过程,与天然条件按照模型相似比尺换算的流速变化过程、水位变化过程极为吻合。

## 第二节 非恒定流科研难题的探索

为承接铁路桥渡设计、施工及运营管理实践中提出的科研任务,多年来开展了一系列桥渡非恒定流的试验研究。这些研究几乎每项都是以往研究工作中未曾接触过的新课题,因此每项研究都具有较大的挑战性。每项研究都需探索新的研究手段、新的研究方法和新的研究途径,从而在完成科研任务提出相应科研成果的同时,也积累了一些新的认识和经验。现将以往完成的溃坝、潮汐、涌潮等各项非恒定流试验研究的特点,在研究过程中出现关键难题的解决方法和措施,以及反映桥渡非恒定流试验研究发展水平的主要成果简要归纳如下。

### 一、板桥水库溃坝模型试验研究

1975年8月我国河南省板桥水库(库容6亿 $\text{m}^3$ ,坝高25 m的大型水库)因遭遇特大暴雨而突然溃决,致使位于水库下游40 km处京广铁路在102 km范围内的线路和桥梁遭受严重破坏。为研究京广铁路的修复方案,1976年铁道部科学研究院开展了我国第一项桥渡非恒定流试验研究——板桥水库溃坝模型试验研究。

国内外虽有不少大型水库溃坝模型试验,但多缺乏天然验证资料。无论试验结果如何,无法检验其是否与原型相似,无法判断试验结果是否能真实反映天然情况。而板桥水库溃坝后,位于其下游约40 km的遂平水文站的自计水位计幸免冲毁。它记录下的水位变化过程,以及

水库溃坝后,由铁道部第四勘测设计院和铁道部科学研究院在大坝下游约 800 km<sup>2</sup> 范围内,调查测量了 52 个洪痕水位,这些都是调整模型阻力相似和验证模型溃坝洪水波向下游传播 40 km 后的水位变化过程是否与原型相似极为珍贵的资料。当然这也给模型试验研究本身带来极大的难度和挑战。对此,在研究过程中采取了以下几项关键措施。

(1)在当时试验设备条件容许范围内,尽可能加大模型尺寸,以减小模型缩尺带来的误差。通过模型相似设计,选用模型长 60 m,最大宽度 25 m。

(2)由于水库大坝至京广铁路的区间面积大,而且当时经历的特大暴雨历时长、强度大,不能对区间暴雨增加的径流略而不计,所以在模型上用铁道部科学研究院研制的流量自动控制装置,配合大量分散的喷头形成人工降雨,以模拟天然降雨量随时间的变化过程。从而保证了洪泛区总体径流流量及其变化过程的相似。

(3)考虑到水库溃坝模型不同一般水工或河工模型,在模型与原型阻力相似方面,其河道影响所占比重甚小。而水库溃坝洪泛区的阻力影响甚大,因此除在全部洪泛区的模型上采用水泥砂浆拉毛加糙外,并按地形图将稠密的村庄房屋、高于地面的渠道、堤坝、公路等均模拟在模型上。

采用了上述几项措施后,使模型溃坝洪水波经历 40 km 的传播后在京广铁路处的水位变化过程,与附近的遂平水文站实测的水位变化过程相当接近。

本项试验研究提出的京广铁路修复方案已为水害所在单位郑州铁路局采用。

## 二、水库溃坝最大流量理论计算与试验研究

20 世纪 70 年代,我国有各种类型水库超过 8.4 万座,“75.8”洪水(板桥水库溃坝)后,据水利部门检算,全国大部分大中型水库达不到保坝标准。水库溃坝对铁路干线造成严重破坏的事例屡见不鲜,诸如板桥水库溃坝和 12 次列车事件等等都曾震惊全国。因此研究水库溃坝流量计算成为铁路桥渡设计和运营管理的迫切需要,于是铁道部责成铁道部科学研究院在板桥水库溃坝模型试验研究的基础上,针对水库溃坝最大流量计算开展理论和试验研究。

### (一)理论计算

国外对溃坝流量计算研究较早,1892 年德国 Ritter. A 即建立了坝体突然全部溃决时最大流量的经典理论计算式:

$$Q_{\max} = \frac{8}{27} \sqrt{g} B H^{\frac{3}{2}} \quad (1-1)$$

鉴于我国以往修建的水库绝大多数皆为土坝,坝体全部溃决的情况甚少,较多的情况是坝体横向(沿坝长方向)局部溃决。因此,根据动量方程和能量方程的联解,推导出能计算坝体全部溃决及横向局部溃决时的溃坝最大流量理论公式。

根据动量方程可得溃坝最大流量计算式:

$$Q_{\max} = b(H - Z_0) \frac{\sqrt{gH}}{\sqrt{1 - \frac{b}{B}}} 2 \left[ \arcsin \sqrt{\frac{Z_0}{H} \left(1 - \frac{b}{B}\right) + \frac{b}{B}} - \arcsin \sqrt{\frac{b}{B}} \right] \quad (1-2)$$

又根据能量方程可得溃坝最大流量计算式:

$$Q_{\max} = \frac{2\sqrt{2}}{3\sqrt{3}} \sqrt{g} \left\{ 1 - \frac{Z_0}{H} + \frac{2}{\left(1 - \frac{b}{B}\right)} \left[ \arcsin \sqrt{\frac{Z_0}{H} \left(1 - \frac{b}{B}\right) + \frac{b}{B}} - \arcsin \sqrt{\frac{b}{B}} \right]^2 \right\}^{\frac{3}{2}} b H^{\frac{3}{2}} \quad (1-3)$$



联解式(1-2)及式(1-3)即可求出  $Q_{\max}$  ,因计算较为复杂,故已制成相应图表,如果计算坝体局部溃决,只需已知坝体溃决宽度即可非常简便地求出溃坝最大流量  $Q_{\max}$  。如坝体全溃即  $b=B$  ,则计算式可简化为式(1-1)。

## (二) 试验研究

为了制定能用于任何坝体溃决情况(包括坝体全溃、横向局部溃决、竖向局部溃决、横向与竖向同时局部溃决)的计算公式,针对影响  $Q_{\max}$  的各种参变量进行了系统的试验研究。鉴于国内外有关溃坝最大流量计算的公式甚多,各家公式计算结果差异甚大,尚缺乏一个建立在系统试验资料基础上精度较高的计算公式。为此,当决定开展此项试验研究时,就决心制定一个建立在系统、全面、大量试验资料基础上精度较高的计算公式。为使试验研究的各项参变量的变化幅度与天然实际情况相符,曾先后赴河南、辽宁等省搜集了 400 余座已溃水库的有关资料。在此基础上,安排了 7 种库长、5 种坝长、8 种坝高、15 种横向局部溃决、8 种竖向局部溃决、2 种溃决断面形状、9 种溃决时间等项影响因素的组合试验,共进行了约 600 次溃坝试验。试验在不同长度和不同宽度的试验水槽中进行,根据试验资料分析研究得出以下可计算任何坝体溃决情况(包括坝体全溃、横向局部溃决、竖向局部溃决、横向与竖向同时局部溃决)溃坝最大流量的计算公式:

$$Q_{\max} = 0.27\sqrt{g}\left(\frac{L}{B}\right)^{\frac{1}{10}}\left(\frac{B}{b}\right)^{\frac{1}{3}}b(H-kh)^{\frac{3}{2}} \quad (1-4)$$

上述理论公式和试验公式以本项研究的试验资料、奥地利试验资料、板桥水库溃坝资料、南山水库自溃坝试验资料进行验证,并将上述各项资料与国内外其他计算公式对比,本项研究提出的理论公式和经验公式精度较高。

## (三) 本项试验研究的难点及解决的方法

(1) 由于本项试验是研究溃坝最大流量的计算方法,因此在试验中如何测得溃坝最大流量值以及如何保证其测量精度,就是本项试验研究最为关键的问题,足以判定研究成果是否能成立。当时所有水利系统的科研单位均无直接量测溃坝口门处流量或流速变化的仪器。而且在开展此项试验研究时,尚未考虑和研究运用雷达装置测量非恒定流流速的途径。用雷达装置虽然可以测量溃坝口门处出流的流速变化过程,但是以雷达测得的流速变化过程来推算溃坝流量过程,尚存在另一难题,那就是雷达只能测到溃坝口门处舌状水流的表面流速,如何以此资料来推算溃坝流量仍然是一个难以解决的问题。因此当时放弃了在溃坝口门处直接测量溃坝流量的途径。而是采用计算水库库区瞬时水位差值来推算溃坝流量变化过程。试验时在模型库区内设置多座浪高仪,与光电示波仪连接同步测量库区水位变化。最多时(库区水面面积较大时)采用了 21 台浪高仪。通过这些数量众多的浪高仪记录了库区的水位变化过程,即可推算出库区的流量过程,从而保证了试验的精度。

(2) 开展溃坝流量试验研究的另一难题就是如何模拟水库大坝溃决。以往国内外的试验都是采用将溃决的坝体模型上提而形成溃坝洪水。由于考虑到将溃决坝体上提的方式,在直观上与天然溃坝情况不符,其所形成的水流类似闸下出流。起初曾采用将溃决坝体向下游翻倒的模式,溃坝模型制作完成后,在实际试验过程中,发现当模拟溃决坝体的挡板向下游翻倒而接触试验水槽的底面时,会出现瞬时反弹震动。这种反弹震动使溃决口门的出流产生波动,从而影响溃坝流量的数值。于是停止了这种试验方式,改而采用使溃决坝体垂直下滑的试验模式。虽然溃决坝体下滑需在水槽底部开凿凹槽,结构处理较为复杂,但却更接近天然情况。溃决坝体模型采用钢木结构,试验开始前以吊钩将其悬挂,使其处于溃坝前的挡水状态。当试