

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.231



桥涵水文 2020 年度研究进展

张明金, 姜徐磊, 张金翔, 魏凯, 迺子龙

(西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031)

摘要:桥涵水文主要是依据河流和水文环境等各项因素进行桥梁设计,是桥位环境设计的一项重要基础工作。通过梳理近年来桥涵水文的发展状况,从桥涵水文的一些关键问题,如桥涵水文研究方法、设计洪水流量、桥梁基础冲刷的成因、影响因素和桥梁墩台冲刷深度的计算等方面阐述桥涵水文的发展成就,对当前的研究难点和未来的研究热点进行了简要的概括。

关键词:桥涵水文;设计洪水流量;桥梁基础;桥梁冲刷

中图分类号:U445.55; U442.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)01-0280-08

State-of-the-art review of hydrology for bridges and culverts in 2020

ZHANG Mingjin, JIANG Xulei, ZHANG Jinxiang, WEI Kai, NI Zilong

(School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China)

Abstract: Hydrology for bridges and culverts is mainly based on the river and hydrological environment and other factors for bridge design, which is an important basic work of bridge site environmental design. By reviewing the development of hydrology for bridges and culverts in recent years, some key issues from hydrology of bridges and culverts, such as research methods, design flood discharge, causes of bridge foundation scour and influencing factors, and calculation of the scour depth of bridge piers and abutments, elaborated the development achievements of hydrology for bridges and culverts and briefly summarized the current difficulties and future hotspots.

Keywords: hydrology for bridges and culverts; design flood discharge; bridge foundation; bridge scour

桥涵水文主要是指根据河流和海洋水文环境等各项因素进行桥梁设计。从考虑桥梁与周围河、海及山区等自然环境的相互影响出发,选定桥位、拟定桥长和桥型、布设孔径、计算桥面高程和墩台冲刷深度等,提出初步设计方案;同时,根据“顺应水势,因势利导”的原则,拟定相应的桥位河段或海域的桥梁引道、导流堤、护岸等附属设施的布设方案,进行桥梁与河流、海域及山区友好共处的环境设计。

笔者围绕桥涵水文的一些关键问题,如桥涵水文研究方法、设计洪水流量、桥梁基础冲刷的成因、影响因素和桥梁墩台冲刷深度的计算等,对 2020 年及之前桥涵水文方面学者们的研究成果进行了简要回顾与梳理。

1 桥涵水文研究方法

目前桥涵水文的分析研究方法大体可分为 4 类:成因分析法、地区经验公式法、数理统计法和其他方法。

1.1 成因分析法

陈中月等^[1]介绍了公路中小桥涵水文分析计算的内容和方法,并通过介绍具体的工程实例,对公路中小桥涵水文分析计算起到一定的借鉴作用。屈建增^[2]介绍了洪水调查的内容、依据,根据历史洪水分析了洪水重现期的确定和推求设计洪水的方法,并列出了具体实例,以使水文资料收集更加完整。高智萍等^[3]收集了大通水文站历年水文特征值(断面、水位、流速、流量、含沙量、潮汐特征),提供了桥梁设计中所需相关水动力条件参数,为控制桥梁建设规模、确保桥梁本身安全及大桥设计提供了科学依据。

1.2 地区经验公式法

徐兴峰^[4]阐述了北安至五大连池铁路桥涵小流域暴雨径流的计算过程,验证了该线小流域暴雨径流的理论公式。陈刚^[5]结合宝兰客专山区段大中河流流量分析,以渭河支流藉河为例,运用经验公式法、形态调查法等推求河流流量,并

收稿日期:2021-07-16

基金项目:国家重点研发计划(2018YFC1507800)

作者简介:张明金(1984-),男,博士,教授级高工,主要从事大跨度桥梁设计理论、桥梁风工程、桥梁水动力学研究,
E-mail:zhang108119@163.com。

分析比较其适用性和合理性,最终确定了桥址处合理的计算流量,为其他相近地形地貌的地区进行洪水的分析计算提供了参考。

1.3 数理统计法

牛铁汉^[6]采用数理统计法,建立了水流通过段在造床流量下的水文水力学特征值与河床几何形态之间的数值关系,并提出了各类河段桥孔长度的计算公式。方辉兵^[7]系统论述了桥涵水文的测量方法,如水位及比降水位观测,浮标流向测量,船舶航迹线测量,水文断面流速、流向及流量测量等,为桥梁勘测设计在水文测量方面的研究提供了重要依据。陆娟等^[8]通过对沿线河流、沟、渠等流域的设计洪水流量、洪水位及桥涵水文进行分析计算,为公路路线、路基和桥涵设计提供了依据。

1.4 其他方法

Khandel 等^[9]提出了一个计算效率高的概率框架来量化气候变化下的洪水事件造成桥梁破坏的风险。陈愚等^[10]针对野外河流水文监测的恶劣工作环境,提出了一种基于嵌入式 Linux 的水文监测系统。用户可依据需求定时通过无线网络采集视频图像数据,直观地得到现场视频图像和数据,还缩短了河道突发事件发现和排除的时间。

除了上述研究方法,遥感技术也广泛应用到水文现象监测之中,范永贵^[11]采用遥感技术论证了铜九线湖口特大桥梁桥区的水文及地形条件,为桥涵方案比选提供了依据。曹林英等^[12]通过运用不同种类和不同时相的遥感图像获取了大量的水文环境信息及动态变化规律,为桥涵方案比选提供了依据,也可在营业铁路桥涵洪水灾害成因分析和综合整治中发挥重要作用。赵希^[13]优化了水文资源领域的遥感技术,并在小流域洪水监测研究中得到广泛应用,具体为遥感技术监测和遥感资源整理分析等。

2 设计洪水流量

在设计洪水流量方面,参考刘应红^[14]对我国现行桥梁设计流量计算方法的汇总,将其分为 5 类:推理公式法、单位线法、面积比拟法、综合运用法和其他方法。

2.1 推理公式法

吴雪峰等^[15]提出一种用历史桥墩水痕推求换算流域面积的新方法,进而用推理公式法预测降雨形成的桥位断面洪峰流量。崔瑞红^[16]分析了 3 座水库与后大成水文站的实测洪水系列,得出其洪水之间的关系,认为上游其中两座水库对下游断面洪水的影响因素可相互抵消,从而简化了洪水的地区组合,使得在上游水库缺乏入、出库资料的条件下,设计断面洪水分析计算得以进行。

2.2 单位线法

崔阳华^[17]在传统单位线法的基础上,提出了曲线拟合水位单位线法,利用实测历史洪水水位和雨量拟合出更加精确的以水位和时间记录对象的水位单位线,借助实时雨量推求出洪峰水位和洪峰到达时间。李整^[18]融合瞬时单位线法和结构力学中的影响线法,提出了一种基于流域历史洪水水

痕标定的中小流域水文计算方法——流量影响线法,用以解决中小流域桥梁水文计算问题。

2.3 面积比拟法

李琳^[19]通过对不同编制单位偏关站设计洪水计算结果进行比较分析后,采用面积比拟法对关河桥桥址断面处设计洪水进行了计算。董霞^[20]通过桑干河干流上设立的 4 座水文站,即罗庄、西朱庄、固定桥和册田水库,阐述了桑干河干流各段设计洪水的计算方法及计算成果,为桑干河干流河道治理提供了参考依据。

2.4 综合运用法

莫远筠^[21]采用《湖南省暴雨洪水查算手册》中的推理公式法以及面积比拟法对怀邵衡铁路店上特大桥的设计洪水进行了分析计算。陈林^[22]通过对小凌河流域的调查分析,对小凌河干流汇流处设计流量采用数理统计法,对女儿河汇流口处设计流量采用面积比拟法,对百股河汇流口处流量采用全国水文分区法计算了设计水位。锦州站年最大洪峰流量 P-III 型曲线适线图如图 1 所示。任友山^[23]采用水文图集法、简化径流公式法、推理公式法和全国水文分区经验公式法计算了漠河伴行路桥址处设计洪水流量。张卫华等^[24]分析了临江河高桥—烽火庙河段的洪水特性,分别应用水文比拟法和推理公式法计算出了该河段相应频率($P=1\%, 2\%, 5\%$)的设计洪峰流量及设计洪水位。结果表明,在该河段,洪峰流量采用推理公式法更符合实际情况,而洪水位采用水力学公式比较合理。

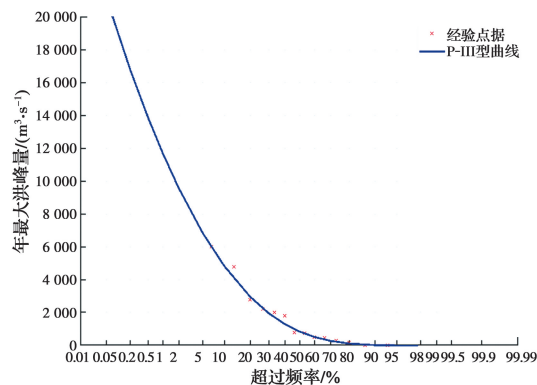


图 1 锦州站年最大洪峰流量 P-III 型曲线适线图

2.5 其他方法

董继振等^[25]根据平原地区水田对桥涵流量的调洪作用,提出了平原水田地区桥涵设计流量及桥长确定的意见。乔雷涛^[26]以黔张常铁路途经的水沙坪洼地为例,归纳了岩溶洼地洪水位计算原理,详细介绍了较大流域面积洼地区域内的桥址洪水位的计算过程。温得平等^[27]以湟水大通河干流为研究对象,在对流域暴雨洪水特性、地区组成分析的基础上,对大通河干流天然设计洪水进行了分析计算,并用同频率地区组法定量评估了受石头峡水库调蓄的设计洪水,水位、面积和库容三者之间的关系如图 2。此外,孙秀玲等^[28]针对两河流或多河流的洪水过程相遇具有模糊性的特点,应用模糊数学及河槽汇流的基本原理,提出了交汇河段上无水文资

料时求桥位断面设计流量的隶属度函数法。Han 等^[29]在陇海铁路渭河咸阳段三座铁路桥上建立了水平二维数值模型,用来评估三个不同的洪水频率对洪水流量的影响。

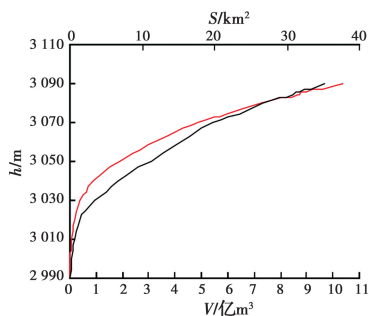


图 2 水位-面积-库容关系图

3 桥梁基础冲刷

跨江跨河的桥梁因常年处于复杂的水环境中,使得桥梁墩台时刻面临着因冲刷而失稳破坏的威胁。桥梁墩台的冲刷可分为 3 部分:因河床自然演变而引起的河床自然演变冲刷、因建桥压缩水流而引起桥下整个河床断面普遍存在的一般冲刷、由于桥梁墩台阻水而引起的河床局部冲刷。桥梁冲刷类型如图 3 所示。

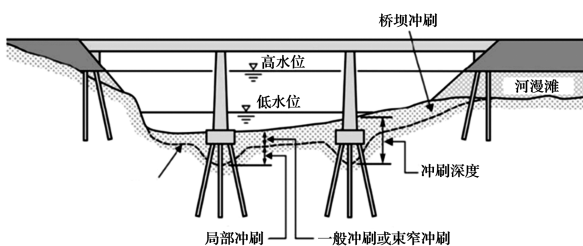


图 3 桥梁冲刷类型

3.1 桥梁基础周围流场作用机理

桥墩周围水流结构属于典型的桥梁水力学问题,经过数年来众多研究者的不懈努力,对水流结构已经具有较为成熟的认识,单桩基础附近的流场大致可以分为 3 类,如图 4 所示。主要包括:墩前壅水、马蹄形漩涡向下射流和尾迹涡流。

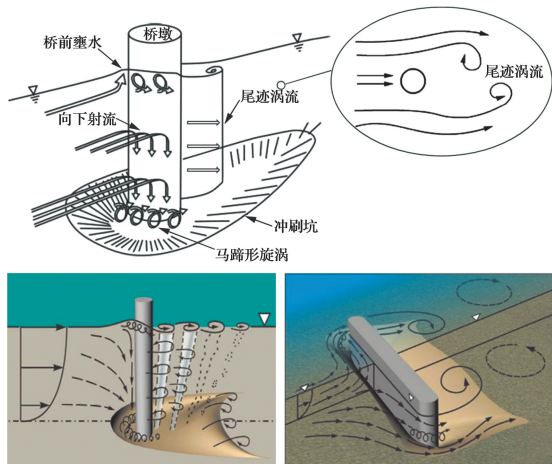
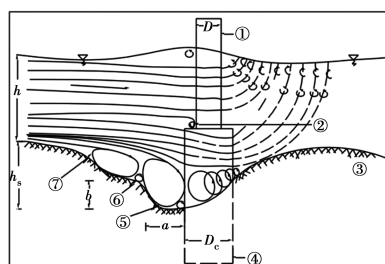


图 4 桥墩附近扰动流场及冲刷形态示意

水流受到桥墩的阻挡作用,水面部分会向上涌起,形成墩前壅水;被桥墩分离的水流在桥墩下游汇聚,形成马蹄形漩涡向下射流和尾迹涡流^[30-32]。

关于引起桥墩局部冲刷的原因,目前还没有统一的结论。但大多数的研究成果表明,主要为以下 3 种:1)受到桥墩前面的下降水流的冲击作用;2)桥墩附近存在马蹄形漩涡,An^[33]、Melville^[34]曾对此进行过研究;3)桥墩对桥下水流的压缩作用,Dargahi^[35]和张显辉^[36]曾对此进行过研究。

此外,Veerappadevaru 等^[37]提出在带有沉井基础的桥墩冲刷过程中,桥墩基础上游存在两个主要的马蹄漩涡,即主漩涡和次漩涡,如图 5 所示。Wang 等^[38]通过试验和数值模拟的方法,研究了在加固地面上沉井周围局部冲刷的侵蚀机理。



注:①圆柱墩;②墩与沉井间的旋涡;③砂床,④沉;⑤主漩涡;⑥脊;⑦次漩涡

图 5 沉井基础附近涡流区和脊的细节

根据现阶段的冲刷研究来看,关于桥梁基础发生清水冲刷的研究较多,但冲刷过程中悬移质浓度因素或悬移质运输与推移质运输的耦合机理,以及由此所引起的局部冲刷特有性质还有待进一步深入研究,即动床冲刷机理研究还有待深入。此外,单根圆柱形桥墩或矩形沉井基础的周围流场和冲刷机理研究较多,但针对群桩基础、带承台的群桩基础等复杂桥梁基础的研究还比较匮乏。目前,局部冲刷是桥墩基础冲刷研究的重点。由于局部冲刷坑深度和大小直接关系到桥梁基础的安全,因此,预测计算桥梁基础局部冲刷深度对工程实际应用具有重要的意义^[32]。

3.2 桥梁墩台局部冲刷主要影响因素

如图 6 所示,影响桥墩局部冲刷的因素非常多,主要包括水流因素、泥沙因素和桥墩因素。其中,水流因素为流体密度、行近流速、行近水深、弗汝德数等;泥沙因素为泥沙容重、泥沙粒径、粒径级配、泥沙粘性等;桥墩因素为桥墩形状、桥墩宽度、桥墩长度、水流冲击角等^[39-40]。

3.2.1 水流因素 桥墩局部冲刷中的行近流速是指桥墩上游来流断面的平均流速^[41]。针对行近流速对桥墩局部冲刷的影响,国内外学者普遍认同的观点是:局部冲刷的深度随着流速增加而增加^[42]。当墩前行近流速 v 小于某一流速 v_0 时,处于迎水面的桥墩不会发生冲刷;当流速增大到 V_0 时,桥墩附近的泥沙逐渐流动,发生冲刷作用,冲刷坑的深度与行近流速 v 呈线性函数增加;直到行近流速 v 达到桥墩底部泥

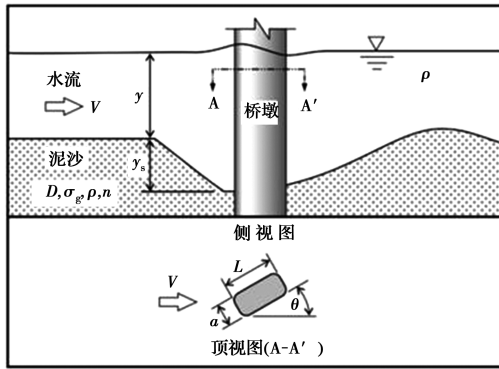


图 6 影响圆柱形桥墩局部冲刷的变量

沙的启动流速 v_0 时,泥沙逐渐被冲入冲刷坑。

Froehlich^[43], Liang 等^[44]对大量文献进行了研究,发现水流强度越大,冲刷深度越深,在第一个临界峰值出现之前, U/U_c 与相对冲刷深度 d_s/D 几乎呈线性关系。均匀沉积物中 U/U_c 大于 1 时,河床处于活床冲刷状态。随着水流强度的增大,相对冲刷深度减小到最小值。之后,它增加到第二个峰值,称为活床峰值,如图 7 所示。当水流强度小于 1 时,冲刷深度随水流强度的增加而迅速增加。在相对较弱的活床冲刷条件下 ($1 < U/U_c < 1.23$),输入冲刷坑的泥沙颗粒数量大于移出冲刷坑的泥沙颗粒数量。当流动强度超过 2.1 时,包络线呈水平分布。而且前者的增长速度比后者快,因此,最大冲刷深度减小。当水流强度足够大时,冲坑内的泥沙颗粒数量将比上游的泥沙颗粒数量多,导致冲刷深度达到活床峰值。

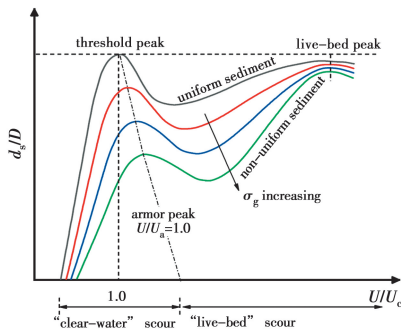


图 7 局部冲刷深度随流速的变化

对于桥墩局部冲刷受行近水深的作用有多大,目前还没有统一的定论。Gill^[45], Wong^[46]和 Kandasamy 等^[47]通过试验证明,行近水深增大时,最大冲刷深度也增大。而王顺意等^[42]、Raudkivi 等^[48]的试验研究表明,局部冲刷最大深度随行近水深的增大而增大。Dey 等^[49]则认为,当行近水深不大时,桥墩的最大冲刷深度随着行近水深的增大而明显增大;如果行近水深比较大时,桥墩的最大冲刷深度与行近水深没有太大关系。Liang 等^[44]也通过试验数据进行了研究,发现相对冲刷深度随着相对水深 h/D 的增加而增加,直至达到各自的临界值,如图 8 所示。

3.2.2 泥沙因素 Ahmad 等^[50]、Santos 等^[51]、Laursen^[52]

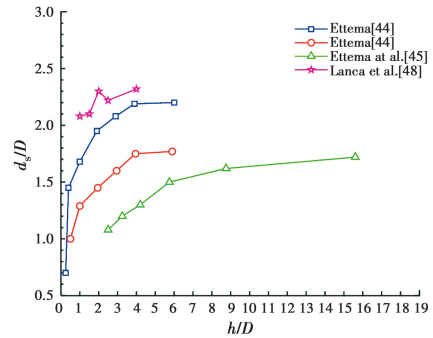


图 8 最大冲刷深度的水深趋势

通过研究认为,在一定范围内泥沙的颗粒粒径大小与桥墩局部冲刷最大深度没有关系,而 Garde 等^[53]、Gill 等^[45]则认为桥墩最大冲深与泥沙的颗粒粒径大小存在相关性。Laursen^[54]研究认为:在清水冲刷的环境下,泥沙颗粒的粒径对桥墩的最大局部冲刷深度有影响;而在动床冲刷的环境下对最大局部冲刷深度的影响不大。这是由于在动床环境下上游来沙补充了冲刷坑中被冲走的泥沙,使冲刷处于平衡状态,而这个过程泥沙颗粒粒径的大小对冲刷平衡并没有影响。

但在天然河道中泥沙往往是不均匀的,因此开展泥沙非均匀程度对桥墩局部冲刷的影响研究更具有实际意义。王思莹等^[55]对均匀沙、连续和不连续宽级配非均匀沙的局部冲刷试验结果进行对比分析,发现连续宽级配非均匀沙一旦启动,较均匀沙更易形成冲刷,冲刷程度也越严重,而不连续宽级配非均匀沙冲刷较前两者则更难形成和发展。众多研究表明,不均匀沙相较均匀沙能够起到削弱冲刷的作用,且床沙越不均匀,冲刷程度也越弱。

3.2.3 桥墩因素 研究表明,桥墩因素如墩长、墩宽(或直径)是研究桥墩局部冲刷的一个重要影响因素。在存在水流冲击角的前提下,桥墩越长、桥墩越宽,在墩头处产生的局部冲刷就会越大^[56]。韩敏^[57]在冲刷试验中改变圆柱桥墩直径,结果表明,在流量一定的情况下,直径越大,其冲刷坑的范围也就越大。在清水冲刷条件下,最大冲刷坑深度随桥墩直径的增大呈先增大后减小的趋势,而在动床冲刷条件下冲刷坑的最大深度随直径的增大而增大。负鹏^[58]利用 FLOW-3D 软件对不同直径的桥墩进行了数值模拟,模拟结果表明,在动床条件下桥墩的局部冲刷深度随直径的增大而增大,并且其增长速率逐渐变小。

在工程上,桥墩形状对桥墩局部冲刷深度的影响常常用墩型系数来表示,从 20 世纪 70 年代以来,我国铁道部进行多次试验后,提出了适合于我国水文地质条件的墩型系数^[59-60]。

此外,俞艳等^[61]、陈稳^[62]分别从墩形、水流速度及水流方向与墩轴交角对局部冲刷的影响进行了探讨,对冲刷影响因素进行了概括总结,并对一般冲刷和局部冲刷深度计算公式的实际应用条件及范围进行了分析说明。

3.3 桥梁墩台冲刷深度计算

3.3.1 一般冲刷深度计算 实际设计计算时通常认为,河道经过历史的演变,基本达到冲淤平衡,即认为河床自然演变冲刷为零,因此,桥涵一般冲刷主要指收缩断面的冲刷计算^[63]。当前,非粘性土一般冲刷深度的计算公式推导主要依据 3 种原则:Bereliubsky 假定;冲止流速原理;断面输沙平衡原理。而粘性土一般冲刷深度相比于非粘性土的冲刷深度更加复杂,研究有限,所推导的公式也较少。

1) 非粘性土河床的一般冲刷公式

基于 Bereliubsky 假定:

Bereliubsky 假定是指当桥下的水流断面面积与河床的天然流速相等时,没有冲刷作用。包尔达柯夫根据 Bereliubsky 假定,建立了桥墩一般冲刷的经验公式,称为包尔达柯夫公式:

$$h_p = ph = \frac{F_N}{F_S} h \quad (1)$$

式中: h_p 为一般冲刷深度,m; p 为冲刷系数; h 为冲刷前垂线水深,m; F_N 为桥下过水面积,m²; F_S 为桥下供水面积,m²。

我国《公路工程水文勘测设计规范》(JTJ C30—2015)、《铁路工程水文勘测设计规范》(TB 10017—1999)和《桥涵水文》推荐非粘性土河槽的一般冲刷计算公式都采用包尔达柯夫公式。

基于冲止流速原理:

冲止流速是指当桥下一般冲刷停止时的垂线平均流速,当桥下断面内任意垂线的平均流速达到该垂线的平均流速时,一般冲刷深度最大^[64-65]。根据冲止流速概念得出一般冲刷公式为:

$$h_p = \left[\frac{A Q_s \left(\frac{h_{\max}}{h_j} \right)^{\frac{5}{3}}}{\mu L_j \frac{E d^{\frac{1}{5}}}} \right]^{\frac{3}{5}} \quad (2)$$

式中: h_p 为一般冲刷深度,m; A 为单宽流量集中系数; Q_s 为设计流量,m³/s; μ 为水流压缩系数; L_j 为桥孔净跨,m; h_{\max} 为设计断面桥孔最大水深,m; h_j 为设计断面桥孔平均水深,m; E 为与汛期含沙量有关的参数; d 为泥沙平均粒径,mm。

基于断面输沙平衡原理:

在 1964 年的全国桥墩学术会议上,交通部提出了基于输沙平衡原理的一般冲刷公式^[64]:

$$h_p = K \left(A \frac{Q_2}{Q_1} \right)^{4m_1} \left[\frac{B_1}{\mu(1-\lambda)B_2} \right]^{3m_1} h_{\max} \quad (3)$$

式中: h_p 为一般冲刷深度,m; K 为综合系数; A 为单宽流量集中系数; Q_1 为计算断面的天然河槽流量,m³/s; Q_2 为桥下断面的河槽流量,m³/s; B_1 为计算断面的天然河槽宽度,m; B_2 为桥下断面的河槽宽度,m; μ 为桥墩水流侧向压缩系数; m_1 为与相对糙率 h_{\max}/d_{95} 有关的指数。

2) 粘性土河床的一般冲刷公式

从上个世纪 70 年代开始,我国铁道部通过对粘性土地区桥涵冲刷的调查提出了以粘性土液性指数为主要变量的一般冲刷计算公式:

$$h_p = q_m / v_s, v_s = 0.33(1/I_L)h_p^{3/5} \quad (4)$$

式中: h_p 为一般冲刷深度,m; q_m 为一般冲刷停止时垂线最大单宽流量,m³/s; v_s 为冲刷停止时垂线流速,m³/s; I_L 为液性指数。

吴雪茹^[65]根据桥位河床的一般冲刷计算成果,分析计算公式中主要参数对一般冲刷的影响,指出公式的适用范围和不足。张佰战等^[66]通过对桥墩局部冲刷的影响因素和有关参变量进行分析,并借鉴国内外现有公式使用经验,从能量平衡理论出发,用量纲平衡方法导出了桥墩局部冲刷新公式。根据天然实测资料引入了泥沙不均匀系数,并通过大量室内试验和天然实测资料对新公式进行系数和指数调整,对现行规范中斜交时墩型系数及桩基承台计算公式进行了改进。

3.3.2 桥梁墩台局部冲刷深度计算 在过去几十年里,学者们对于桥梁墩台的局部冲刷深度计算研究十分广泛,主要通过两种方法:经验公式法和半经验半理论公式法。

1) 经验公式

经验公式法是通过试验数据分析得到相关系数的方法。较为常用是美国水利工程通报推导出的公式^[32,39,67]:

$$\frac{h_s}{b} = 2.0k_1k_2k_3k_4 \left(\frac{h}{b} \right)^{0.35} F_r^{0.43} \quad (5)$$

式中: h_s 为桥台冲刷深度,m; b 为墩宽,m; h 为行进水深,m; $F_r = V/(gh)^{0.5}$, V 为墩前行近流速,m/s。

此外,Strurm 等^[68]通过量纲分析和最小二乘法推算出了在清水冲刷的滩涂环境下桥墩最大局部冲刷深度无量纲化的计算公式。Melville 等^[69]利用前人的经验关系式构建出包含所有系数的桥墩最大局部冲刷深度的通用公式。

早期的经验公式比较简洁,但对影响桥墩冲刷的因素考虑不充分,针对一些特定问题的计算精度较高,但不具有普遍性。后期的经验公式对桥墩局部冲刷深度的影响因素考虑比较全面,对各类环境的适用性较强,但同时公式相对比较繁琐,因为其系数和参数的不确定性,往往要依据桥墩的现场环境而决定。

2) 半经验半理论公式

半经验半理论公式法是指依据某种假设或者理论得出关系式,然后利用试验数据确定相关参数的方法。和张佰战^[66]和惠晓晓^[67]根据能量平衡与转化理论建立起桥墩局部冲刷深度公式。Melville^[70]和朱炳祥^[71]认为是因为桥墩挤压水流导致墩两侧的流速增大从而引起冲刷,并结合泥沙启动流速建立了桥墩局部冲刷深度公式。此外,Baker^[72-73]通过桥墩周围清水环流切线流速理论来推导桥墩局部冲刷深度公式。

3.3.3 其他计算公式 Lim 等^[74]根据水流连续方程和冲刷结构、冲积河道指数型水流阻力普适公式推导出了在清水冲刷环境下的桥墩最大平衡局部冲刷深度半经验计算公式。李奇等^[75]总结了国内外桥墩局部冲刷的研究成果,分类列举了单向流情况下非粘性土桥墩的局部冲刷公式。梁利博

等^[76]在中国规范 65-1 修正式的基础上增加了桥墩布置影响系数,得到新的桥墩局部冲刷深度计算公式。除此之外,还有一些其他常用的计算公式,例如 Shen 公式^[77], Sheppard 公式^[78]等。梁发云等^[79]针对粘性土桥墩基础局部冲刷深度的计算方法,对比分析了中国规范和美国 SRICOS-EFA 方法的特点,并根据典型算例的结果,对中国规范方法提出了一些改进和建议。

4 结语

通过总结过去几十年桥涵水文在研究方法、设计洪水流量、桥梁基础冲刷的成因、影响因素和桥梁墩台冲刷深度的计算等方面的进展,可以得到如下结论:

1)当前的桥涵水文大都依据单一水文要素的重现期进行设计,在多变量环境下尚缺乏深入分析。

2)对桥梁墩台周围流场的作用机理的认识还有待进一步完善,针对突发暴雨及洪水作用下基础冲刷的研究亦有待深入。

3)桥梁墩台冲刷深度的计算公式多采用半经验半理论公式,使用时需要根据具体情况而定,缺乏普适性的公式。

参考文献:

- [1] 陈中月,朱俊,朱永红. 公路中小桥涵水文分析计算[J]. 安徽建筑, 2009, 16(6): 87-88, 92.
- [2] 屈建增. 谈桥渡勘设中的洪水调查[J]. 山西建筑, 2004, 30(9): 121-122.
- [3] 高智萍,胡勇. 南京大胜关长江大桥桥渡水文分析[J]. 船海工程, 2009, 38(6): 116-119.
- [4] 徐兴峰. 北安至五大连池铁路桥涵小流域暴雨径流验证计算浅析[J]. 黑龙江科技信息, 2010(12): 224.
- [5] 陈刚. 山区大中河流水文分析方法[J]. 中国铁路, 2014(12): 48-50.
- [6] 牛铁汉. 大中桥桥孔长度计算公式的探讨[J]. 中国公路学报, 1990, 3(3): 44-54.
- [7] 方辉兵. 桥渡水文测量[J]. 湖南水利水电, 2007(4): 37-39.
- [8] 陆娟,孙飞. 广东省高速公路洪水水位及桥涵水文分析实例研究[J]. 市政技术, 2015, 33(1): 30-32, 36.
- [9] KHANDEL O, SOLIMAN M. Integrated framework for quantifying the effect of climate change on the risk of bridge failure due to floods and flood-induced scour [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(9): 04019090.
- [10] 陈愚,冷建伟,沈芳婷. 基于无线网桥的“枪球联动”水文监测系统[J]. 电子设计工程, 2016, 24(18): 79-81.
- [11] 范永贵. 遥感技术在铜九铁路湖口特大桥水文条件评价中的应用[J]. 北京测绘, 1994(4): 16-18.
- [12] 曹林英,范永贵. 铁路桥渡水文及环境遥感评价[J]. 环境遥感, 1995(4): 241-249.
- [13] 赵希. 遥感技术在水文水资源领域中的应用分析[J]. 环境与发展, 2020, 32(12): 62-63, 66.
- [14] 刘应红. 现行桥梁设计流量计算方法[J]. 黑龙江交通科技, 2011, 34(10): 287-288.
- [15] 吴雪峰,李秀娟. 基于桥墩水痕与推理公式法的桥梁水害预测[J]. 四川建筑, 2012, 32(1): 172-174.
- [16] 崔瑞红. 中南部铁路通道吕梁段青龙河特大桥洪水分析[J]. 水科学与工程学报, 2015(3): 10-12.
- [17] 崔阳华. 基于曲线拟合单位线法的既有中小桥水文检算[D]. 长沙:中南大学, 2010.
- [18] 李整. 流量影响线法及其在中小流域桥梁水文中的应用[D]. 长沙:中南大学, 2011.
- [19] 李琳. 关河桥洪水计算[J]. 水科学与工程学报, 2014(6): 41-43.
- [20] 董霞. 桑干河干流河道治理水文分析[J]. 水科学与工程学报, 2015(1): 30-33.
- [21] 莫远筠. 怀邵衡铁路店上特大桥设计洪水计算[J]. 湖南水利水电, 2011(1): 42-43.
- [22] 陈林. 锦州机场路小凌河特大桥水文计算分析[J]. 黑龙江交通科技, 2015, 38(4): 136-137.
- [23] 任友山. 漠河伴行路桥址设计洪水计算与推荐成果[J]. 黑龙江水利科技, 2008, 36(6): 108-110.
- [24] 张卫华,余艳红,魏朝富. 临江河高桥:烽火庙河段洪水分析[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2010, 32(3): 109-115.
- [25] 董继振,张建军,姜燕辉. 平原水田地区河流桥涵水文计算及桥长设计的探讨[J]. 东北公路, 1999(2): 85-86.
- [26] 乔雷涛. 黔张常铁路岩溶洼地桥址洪水位的分析研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(7): 94-98.
- [27] 温得平,赵兴明,伍云华,等. 大通河干流设计洪水分析[J]. 宁夏大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 424-428.
- [28] 孙秀玲,曹升乐,员汝安. 大中桥设计流量计算的隶属度函数法[J]. 华东公路, 1997(3): 36-39.
- [29] HAN J Q, WANG H L, LUO H, et al. Numerical simulation on the influence of bridge construction on river flood control in a bottleneck reach [J]. Journal of Engineering and Technological Sciences, 2018, 50(4): 451.
- [30] MELVILLE B W. Local scour at bridge sites [EB/OL]. 1975.
- [31] CHIEW Y-M. Scour at bridge piers [J]. 1986: 57-64.
- [32] 向琪芪,李亚东,魏凯,等. 桥梁基础冲刷研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 235-248.
- [33] AN R T F K, MELVILLE B W. Local scour and flow

- measurements at bridge abutments [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1994, 32(5): 661-673.
- [34] MELVILLE B W, CHIEW Y M. Time scale for local scour at bridge piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(1): 59-65.
- [35] DARGAHI B. Controlling mechanism of local scouring [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990, 116(10): 1197-1214.
- [36] 张显辉. 双排圆柱桥墩绕流脉动特性试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [37] VEERAPPADEVARU G, GANGADHARAI AH T, JAGADEESH T R. Temporal variation of vortex scour process around caisson piers [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2012, 50(2): 200-207.
- [38] WANG C, YU X, LIANG F Y. Erosion mechanism of local scour around cushioned caisson on reinforced ground [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017, 35(7): 1028-1036.
- [39] 赵凯. 桥墩局部冲刷模拟试验研究[D]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009.
- [40] 产华东, 魏松, 张英杰, 等. 桥墩局部冲刷机理研究进展综述[J]. *安徽建筑*, 2020, 27(7): 168-169.
- [41] 张新燕, 吕宏兴, 沈波. 圆柱桥墩局部冲刷机理试验研究[J]. *水利水运工程学报*, 2012(2): 34-41.
- [42] 王顺意, 牟力, 魏凯, 等. 不同水力条件下圆柱桥墩局部冲刷试验研究[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(3): 425-431.
- [43] FROEHLICH D C. Local Scour at bridge abutments [J]. *Hydraulic Engineering*, 1989: 13-18.
- [44] LIANG B C, DU S T, PAN X Y, et al. Local scour for vertical piles in steady currents: Review of mechanisms, influencing factors and empirical equations [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(1): 4.
- [45] GILL M A. Erosion of sand beds around spur dikes [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1972, 98(9): 1587-1602.
- [46] WONG W H. Scour at bridge crossings [J]. *School of Engineering Report*, 1982.
- [47] KANDASAMY J K, MELVILLE B W. Maximum local scour depth at bridge piers and abutments [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 1998, 36(2): 183-198.
- [48] RAUDKIVI A J, ETTEMA R. Clear-water scour at cylindrical piers [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1983, 109(3): 338-350.
- [49] DEY S, BARBHUIYA A K. Clear-water scour at abutments in thinly armored beds [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 130(7): 622-634.
- [50] AHMED F, RAJARATNAM N. Observations on flow around bridge abutment [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 2000, 126(1): 51-59.
- [51] SANTOS, CARDOSO A. Time evolution of local scour at obstacles protruding from channel side walls [J]. *International Journal on Sediment Research*, 2001(4): 460-472.
- [52] LAURSEN E, TOCH A. Scour around bridge piers and abutments [R]. *Bull No 4 Iowa Highway Res Board*, 1956.
- [53] GARDE R J, SUBRAMANYA K, NAMBU DRIPAD K D. Study of scour around spur-dikes [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1961, 87(6): 23-37.
- [54] LAURSEN E M. Scour at bridge crossings [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1960, 86(2): 39-54.
- [55] 王思莹, 段文刚, 李利. 宽级配非均匀沙运动特性研究[J]. *人民长江*, 2011, 42(13): 72-75, 105.
- [56] 李成才. 桥墩局部冲刷试验及计算理论研究[D]. 南京: 河海大学, 2007.
- [57] 韩敏. 单圆柱桥墩绕流紊动特性试验研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [58] 负鹏. 桥墩局部冲刷的数值模拟研究[D]. 山东 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [59] 铁道部科学研究院墩形系数专题组. 桥墩局部冲刷墩形系数[J]. *铁道工程学报*, 1984, 1(2): 103-107.
- [60] 齐梅兰, 王国华. 新型桥墩局部冲刷研究[J]. *中国铁道科学*, 2002, 23(3): 99-103.
- [61] 俞艳, 何思明. 河流桥墩冲刷分析[J]. *中国水运(下半年)*, 2014, 14(10): 227-229, 231.
- [62] 陈稳. 河流冲刷对既有桥梁墩台承载力影响的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [63] 刘哲. 斜交桥的冲刷计算研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- [64] 吴瑶. 大坝下游桥渡一般冲刷数值模拟研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [65] 吴雪茹. 桥墩一般冲刷计算研究[J]. *水运工程*, 2007(5): 27-30.
- [66] 张佰战, 李付军. 桥墩局部冲刷计算研究[J]. *中国铁道科学*, 2004, 25(2): 48-51.
- [67] 惠晓晓, 董耀华, 詹磊. 桥墩冲深计算公式[J]. *水利电力科技*, 2007(3): 14-22.
- [68] STURM T W, JANJUA N S. Clear-water scour around abutments in floodplains [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1994, 120(8): 956-972.
- [69] MELVILLE B W, SUTHERLAND A J. Design

- method for local scour at bridge piers [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 114(10): 1210-1226.
- [70] MELVILLE B W. Pier and abutment scour: Integrated approach [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 123(2): 125-136.
- [71] 朱炳祥. 国外桥墩局部冲刷计算研究的主要成果与进展[J]. 国外公路, 1985 (5): 49-57.
- [72] BAKER C J. Closure to “discussion of ‘the oscillation of horseshoe vortex systems’” (1991, ASME J. fluids eng. , 114, p. 134) [J]. Journal of Fluids Engineering, 1992, 114(1): 134.
- [73] BAKER C J. The laminar horseshoe vortex [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1979, 95(2): 347-367.
- [74] LIM S Y, CHENG N S. Prediction of live-bed scour at bridge abutments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(6): 635-638.
- [75] 李奇, 王义刚, 谢锐才. 桥墩局部冲刷公式研究进展 [J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(2): 85-88, 94.
- [76] 梁利博, 杨小亭, 张新燕. 圆柱桥墩局部冲刷的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2010(1): 104-106, 109.
- [77] SHEN H W, SCHNEIDER V R, KARAKI S. Local scour around bridge piers [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1969, 95(6): 1919-1940.
- [78] SHEPPARD D M, MILLER W J. Live-bed local pier scour experiments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132(7): 635-642.
- [79] 梁发云, 王玉, 贾承岳. 粘性土中桥墩基础局部冲刷计算方法对比分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41 (2): 37-43.

(编辑 颜永松)