DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260370

水流交汇区跨河桥梁墩形优化研究

陈　晖[1,2,3,4,5]

(1.广东省水利水电科学研究院,广东 广州 510635; 2.水利部粤港澳大湾区水网全域感知与智能调控技术创新中心,广东 广州 510635; 3.河口水利技术国家地方联合工程实验室,广东 广州 510635; 4.广东省水安全科技协同创新中心,广东 广州 510635; 5.广东省粤港澳大湾区水安全保障工程技术研究中心,广东 广州 510635)

摘　要: 跨河桥梁是综合交通体系中的关键组成部分,其涉水桥墩会占用河道过流断面,改变水动力条件与河床演变特征,并直接影响河道行洪安全与河势稳定。以水流交汇区跨河桥梁工程为研究对象,采用非结构网格和二维水流数学模型,对比分析了矩形桥墩(原设计方案)与圆端形桥墩(优化方案)对河道水位壅高、流速流态变化的影响。研究结果表明,墩形对河道壅水、流速流态影响显著,在阻水比不变的前提下,圆端形桥墩较矩形桥墩可降低水位壅高约55%、减小流速增幅约20%,能有效缩减壅水影响范围并降低近岸冲刷风险,满足相关技术规程要求。研究成果可为水流交汇区桥梁墩形选型、洪水影响评价及水行政主管部门的审批提供技术依据。

关键词: 跨河桥梁;水流交汇区;桥墩形状;壅水;流态;行洪安全;河势稳定

中图分类号: U442.5;TU997　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0068-05

Research on Optimization of Bridge Pier Shapes across Rivers in Water Flow Confluence Areas

CHEN Hui[1,2,3,4,5]

(1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. Technology Innovation Center for Basin-wide Perception and Intelligent Regulation of Water Networks in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area, Ministry of Water Resources, Guangzhou 510635, China; 3. State and Local Joint Engineering Laboratory of Estuarine Hydraulic Technology, Guangzhou 510635, China; 4. Guangdong Provincial Science and Technology Collaborative Innovation Center for Water Safety, Guangzhou 510635, China; 5. Technical Research Center of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area's Water Safety Guarantee, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Cross-river bridges are a key component of the integrated transportation system. Their water-crossing piers will occupy the flow section of the river, change the hydrodynamic conditions and the evolution characteristics of the riverbed, and directly affect the safety of flood discharge and the stability of the river. Taking a cross-river bridge project in a flow confluence area as the research object, the unstructured grids and a two-dimensional flow mathematical model are used to compare and analyze the influences of rectangular piers (original design) and round-ended piers (optimized scheme) on river backwater height, flow velocity and flow regime evolution. The results show that pier shape exerts a significant effect on river backwater, flow velocity and flow regime. Under the premise of the same water-blocking ratio, the round-ended piers can reduce the backwater height by approximately 55% and the flow velocity increase by about 20% compared with rectangular piers, which can effectively narrow the backwater influence range and lower the near-bank scouring risk, complying with relevant technical specifications. This research result can provide technical support for pier type selection, flood impact assessment and water administrative approval of bridges in flow confluence areas.

Keywords: river-crossing bridge; river confluence area; bridge pier shape; backwater; flow regime; flood discharge safety; river stability

0　引　言

随着工业化、城镇化进程持续推进,陆地交通空间资源日趋紧张,跨水域交通成为破解空间约束、完善区域路网的重要途径[1-2]。受河道宽度、施工工艺

收稿日期: 2026-04-08
基金项目: 广东省水利科技创新项目(2025-20);2026年省属科研机构稳定性支持项目(gdsky2026-01)
作者简介: 陈晖(1992—),男,硕士,工程师,从事水力学及河流动力学研究。

及工程经济性制约，多数跨河桥梁需在河道内布设桥墩以满足结构设计要求[3-4]。位于河道中的桥墩不可避免地侵占行洪断面，其绕流边界效应也将显著改变局部流速与流态分布，特别是在汛期大流量、高水位条件下，更易引发河道水位壅高、近岸流速陡增，从而削弱两岸防洪工程设防标准，加剧岸坡冲刷失稳风险，对河道行洪安全与堤防稳定构成直接威胁[5-6]。

《中华人民共和国水法》《中华人民共和国防洪法》等国家法律均要求在河道管理范围内建设桥梁等建构筑物应当符合国家规定的防洪标准和其他有关的技术要求，不得危害堤防安全、影响河势稳定、妨碍行洪畅通[7-8]。这为跨河桥梁的设计与建设划定了刚性底线，也对河道内桥墩布设与墩形设计提出了更高要求。《中华人民共和国河道管理条例》要求桥梁等建设项目的建设单位必须按照河道管理权限，将工程建设方案报送河道主管机关审查同意，方可开工建设[9]。

我国桥梁水工水文的研究是随着建国后众多桥梁工程的修建而兴起的[10]。早期研究者主要关注桥梁本身的安全性，因此对桥梁的研究主要集中在河道内桥墩的冲刷上[11-12]。至 20 世纪 70 年代后期，交通系统与铁路系统逐渐意识到桥梁壅水高度及其影响范围会对城市、企业和农田造成严重威胁，桥墩壅水问题随之成为桥梁建设领域的研究热点[13-14]，其间众多研究者开展了大量试验与理论研究，提出了一系列桥墩壅水计算方法与相关公式，为后续桥梁水工水文研究奠定了坚实基础[15]。

桥墩形状作为影响壅水的重要参数，一般在计算过程中采用流量系数、侧收缩系数或桥墩形状系数来概化其影响[15]。何贞俊等[16]采用物理模型试验研究了方墩、流线墩和双圆墩的墩前壅水，指出不同优势夹角条件下桥墩壅水存在差异；马剑波等[17]研究表明，在垂直水流方向截面面积相同的条件下，壅水高度表现为矩形墩＞圆形墩＞圆端形墩。

本文利用二维水动力模型，开展复杂水流动力条件下的桥梁工程墩形优化研究，从水位壅高、流速流态变化等方面综合评估墩形对河道水动力条件的影响，并提出优化方案，为本工程的建设提供依据，同时为河道主管机关审批提供技术依据。

1　工程概况

广昌涌是中山市与珠海市的界河，地处珠江河口西岸，是典型的珠江河网内河涌[18-19]。广昌涌作为前山河水道支流，上接沙心涌，下游经广昌水闸排入磨刀门水道，旁侧有广生围排洪渠及挂定角排洪渠汇入，两条排洪渠河口处分别建有其昌水闸和同昌水闸并配备泵站用于排涝。广昌涌全长 5.8 km，河宽 60 ~ 150 m，工程所在河段河宽约 70 m，深泓高程约−2 m。工程局部河道如图 1 所示。



图 1　工程河段平面图

某拟建桥梁工程全长 606.5 m，跨径组合为（4×31.5+42+80+42+3×31.5+7×31）m，横跨广昌涌及广生围排洪渠河口，洪水期间广生围排洪渠通过其昌水闸排水进入广昌涌，水流交汇区水动力条件复杂。拟建桥梁工程有一组桥墩位于广昌涌主槽中，如图 2 所示。初步设计方案中，广昌涌主槽中桥墩顺水流方向布置，桥墩断面为矩形。根据初步计算结果，建议对广昌涌主槽中桥墩进行优化，桥墩形状由矩形调整为圆端形，桥墩垂直于水流方向横截断面长度不变，即阻水断面面积保持不变，根据统计阻水比均为 3.45%，如图 3 所示。

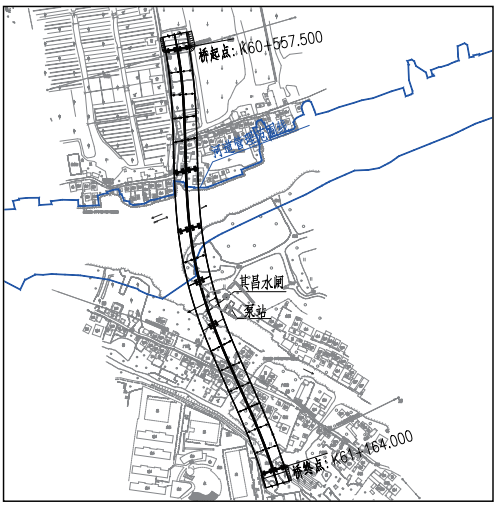


图 2　工程平面布置图

2　模型构建

2.1　模型控制方程

本次数值模型计算采用二维水动力模型。该模

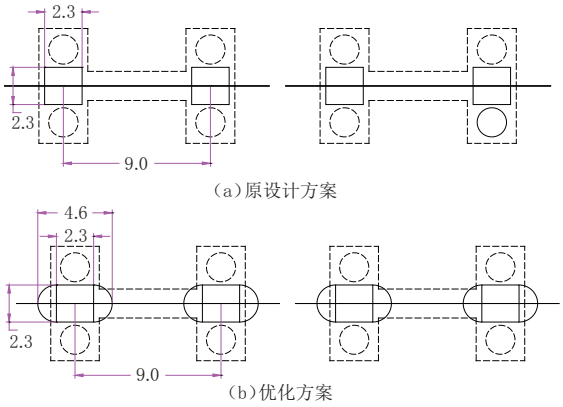


图3　桥墩断面优化(单位:m)

型采用笛卡尔坐标系,在该坐标系统下,模型控制方程如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}}{\partial x}+\frac{\partial h\bar{v}}{\partial y}=hS$$

$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x}+\frac{\partial h\overline{vu}}{\partial y}=f\overline{vh}-gh\frac{\partial \eta}{\partial x}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial x}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial x}+\frac{\tau_{sx}}{\partial \rho_0}-\frac{\tau_{bx}}{\partial \rho_0}-\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(hT_{xx}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hT_{xy}\right)+hu_sS$$

$$\frac{\partial h\bar{v}}{\partial t}+\frac{\partial h\bar{v}^2}{\partial x}+\frac{\partial h\overline{vu}}{\partial y}=f\overline{uh}-gh\frac{\partial \eta}{\partial y}-\frac{h}{\rho_0}\frac{\partial P_a}{\partial y}-\frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial \rho}{\partial y}+\frac{\tau_{sy}}{\partial \rho_0}-\frac{\tau_{by}}{\partial \rho_0}-\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x}+\frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial x}\left(hT_{yx}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(hT_{yy}\right)+hv_sS$$

式中:横线表示深度的平均值;(u_s,v_s)为源汇项水流流速;S为源汇项;T_{xx}、T_{xy}、T_{yx}、T_{yy}为水平粘滞应力项;s_{xx}、s_{xy}、s_{yx}、s_{yy}为辐射应力分量;$f\bar{v}$和$f\bar{u}$为地球自转引起的加速度;$f=2\Omega\sin\Phi$为科氏力参数,Ω为地球自转角速率,Φ为地理纬度;P_a为当地的大气压;ρ为水的密度,ρ_0为参考水密度;u,v,w分别为流速在x,y,z方向上的分量;$h=\eta+d$为总水深,η为水位,d为静止水深;x,y,z为右手Cartesian坐标系;t为时间。

2.2　模型求解方法

数值模型计算采用非结构网格,能够很好地贴合岸线以及工程轮廓。非结构网格数值方法为单元中心型有限体积法,在控制方程离散时,结果变量位于网格单元中心并正交分解为东向分量和北向分量,而跨边界的通量则垂直于网格边。在有限体积法计算中,通过求解一维Riemann问题得到垂直于网格边的法向通量,保证计算的稳定性和精度[5]。

2.3　地形及边界

二维水动力模型上游边界选取工程上游约1.2 km处的顺直段,下边界选取距离工程下游约2.0 km处的广昌水闸,侧边界考虑广生围排洪渠及挂定角排洪渠汇入,边界分别设置于其昌水闸和同昌水闸处,模型计算范围如图4所示。模型地形采用实测地形资料,模型糙率根据《水力计算手册(第二版)》,取天然河道平均糙率为0.03。

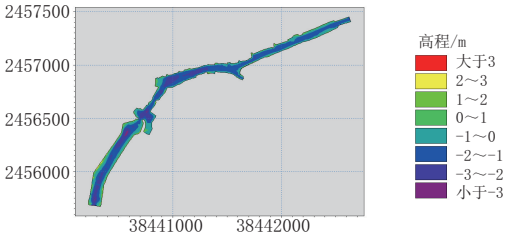


图4　模型计算范围

100年一遇洪水条件下,模型边界设计水文特征如表1所示。

表1　模型边界情况

断面位置	计算边界	项目	洪水频率P=1%
广昌涌上游小桥	上边界	流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	269.50
广昌水闸	下边界	水位/m	2.15
其昌水闸	旁侧汇入	流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	6.21
同昌水闸	旁侧汇入	流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	6.17

2.4　模型概化

在二维水动力模拟中,新建工程概化主要分为2种形式,即直接模拟法和局部阻力修正法[5]。直接模拟法通过精确概化新建工程的边界并修正边界上实际网格高程,所得流场较为真实可靠,因此本研究采用直接模拟法,原设计方案与优化方案局部网格概化如图5所示。

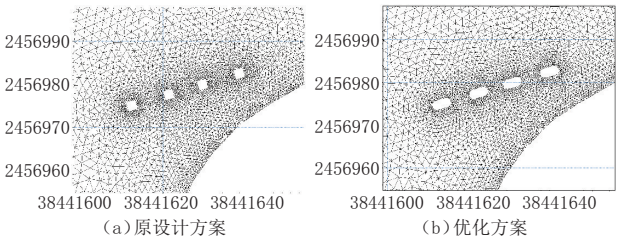


图5　工程局部网格概化

3　结果与分析

在河道中设置了50个采样点,如图6所示。用以统计分析桥墩建设对河道水动力条件的影响。

100年一遇设计洪水条件下,采样点统计成果如表2所示。工程前后水位差、流速差及流场如图7至图9所示。

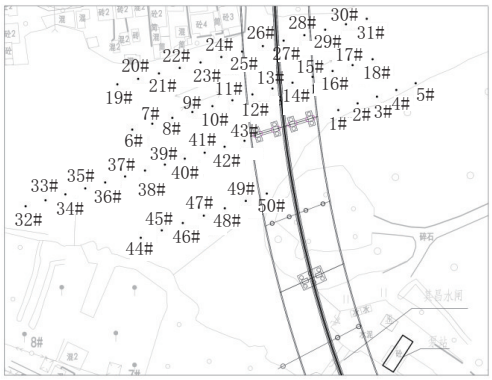


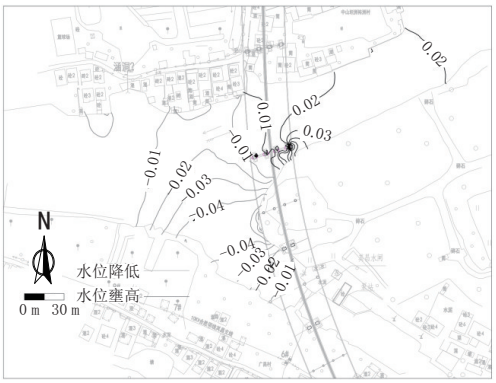
图6　采样点布置示意图

表2　二维模型采样点水位、流速流向统计成果

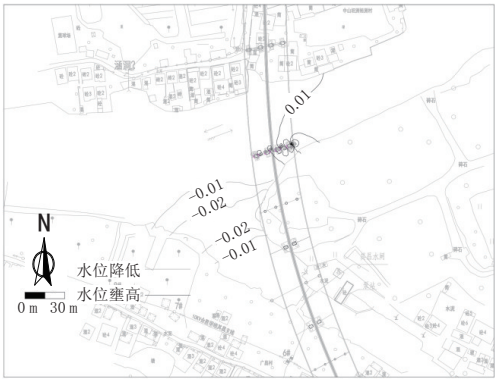
工况计算	P=1%	
	原设计方案	优化方案
最大壅水值/m	0.040	0.022
最大降低值/m	−0.043	−0.022
流速增加最大值/(m·s^{-1})	0.51	0.41
流速减小最大值/(m·s^{-1})	−0.84	−0.53
流向变化最大值/(°)	−223.3	−208.3

3.1　河道行洪影响分析

由采样点统计结果可知,不同桥墩形状对河道行洪影响差异显著。原设计方案中,桥墩断面为矩形,工程后采样点水位壅高最大值为0.040 m;优化方案中,在不减小桥墩垂直于水流方向横截面积的前提下,将桥墩断面调整为圆端形,工程后采样点水位壅高最大值为0.022 m,壅水仅为优化前的55%。从工程前后水位差等值线可以看出,原设计方案中,近岸水位壅高最大值可达0.05 m,水位壅高0.02 m的范围向河道上游延伸约130 m;而在优化方案中,水位壅高的量值和影响范围均明显减小,近岸水位壅高最大值仅为0.02 m,水位壅高0.02 m的范围向河道上游延伸最大距离不超过15 m,桥墩优化能够有效降低水位壅高量值,从而减小本项目建设对广昌涌行洪的不利影响。现行的广东省地方标准《河道管理范围内建设项目技术规程》明确要求“对于平原河道,新建桥梁与上、下游各50 m范围(以桥面边线计)已建桥梁等建筑物沿程叠加的最大壅水高度宜控制在不允许越浪堤防安全加高值的5%以内;对于山区河道,宜控制在10%以内”[20],按照该条件,广昌涌现状两岸无堤防,安全加高值按不允许越浪的5级堤防考虑取0.5 m,则水位壅高值应该控制在0.025 m以内,可见采取矩形桥墩的原设计方案不能满足该技术规程的要求,而采用圆端形桥墩的优化方案中,采样点水位壅高最大值仅为0.022 m,近岸水位壅高值为0.02 m,满足技术规程的要求。



(a)原设计方案



(b)优化方案

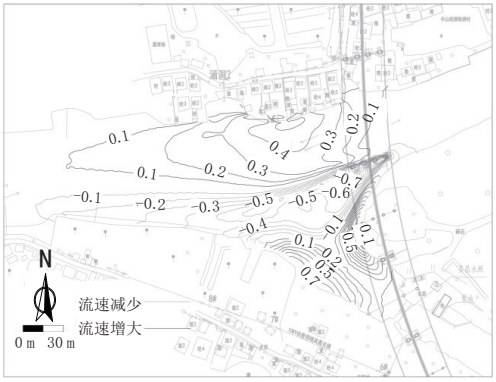
图7　工程前后水位差等值线图

3.2　河势稳定影响分析

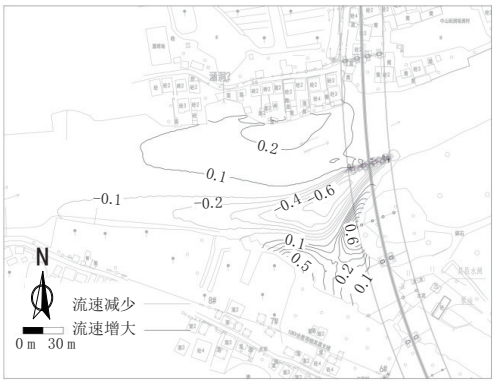
河势稳定也是涉水工程洪水影响评价的重要内容。工程建设实施后将占用河道行洪断面,受桥墩建设对水流的挤压作用,可能会导致局部冲刷加剧,从而危及河道安全[20]。根据采样点统计成果,原设计方案中,采样点流速增加最大值为0.51 m/s,流速减小最大值为−0.84 m/s;优化方案中,采样点流速增加最大值为0.41 m/s,流速减小最大值为−0.53 m/s,流速变化幅度较原设计方案明显减小。

拟建工程处于广生围排洪渠汇入口,水动力条件复杂,既有上游的洪水来流,又有广生围排洪渠经其昌泵站排入的来流。但由于其昌泵站排水量远小于广昌涌上游来流量,因此在工程前广生围排洪渠河口处流速很小,水动力条件较弱。从工程前后流速差等值线图可以看出,受桥墩建设影响,桥墩下游为遮蔽区域,因此流速呈减小趋势,流速减小区域呈三角形向广生围排洪渠河口凸入。而在桥墩与两岸之间,流速呈增大趋势,并且由于桥墩靠近河道左岸,因此桥墩与左岸之间的流速增加值更为明显。水流沿着左岸流入广生围排洪渠河口,受河口水闸边界阻挡,流出河口后向广昌涌下游行进,因此工程后在广生围排洪渠河口区域流速明显增加,流速增加最大值超过1.0 m/s,可能会对近岸产生一定的冲

刷。桥墩墩形优化后，流态总体趋势与优化前基本一致，但流速较工程前增减的量值明显减小，其中右岸近岸流速增加值由优化前的0.5 m/s减小至优化后0.2 m/s，左岸近岸流速增加值由优化前的约1.2 m/s减小至优化后0.9 m/s，减轻了工程建设后水流对近岸的冲刷。



（a）原设计方案



（b）优化方案

图8　工程前后流速差等值线图

4　结　语

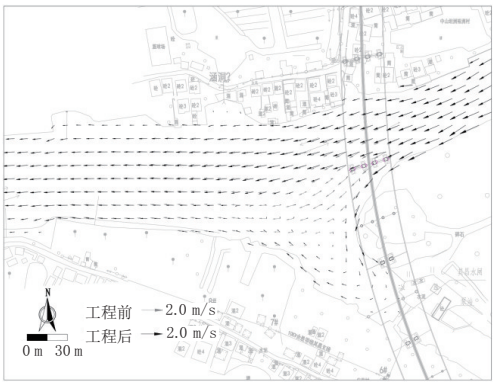
本研究采用二维水流数学模型，开展了水流交汇区桥墩形状优化研究，从工程建设对河道行洪、河势稳定等方面的影响对比分析了矩形桥墩和圆端形桥墩方案的差异，主要研究结论如下：

（1）拟建工程位于广昌涌及其支流广生围排洪渠汇入口，洪水期间水流交汇区域水动力条件复杂。

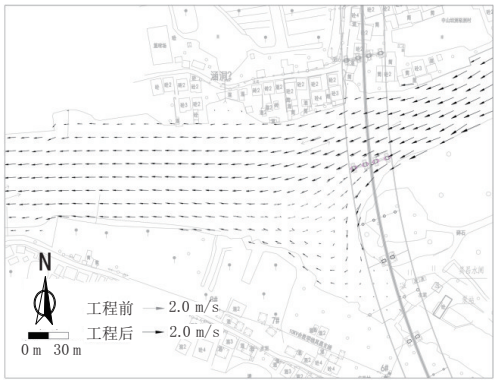
（2）在保持阻水比不变的前提下，将矩形墩优化为圆端形墩，可降低水位壅高约55%，减小流速增幅约20%，壅水影响范围和流速影响范围大幅收缩。

（3）优化墩形可有效缓解近岸流速激增，降低岸坡冲刷风险，满足河道防洪与河势稳定要求，适用于水流交汇区工程建设需求。

（4）复杂水动力条件下，桥梁设计应结合洪水影响评价开展墩形优化，优先选用流线型、圆端形等平顺墩形，保障河道行洪安全。



（a）原设计方案



（b）优化方案

图9　工程前后流场图

参考文献：

[1] 张学良，李晨．桥梁建设与国家经济发展[J]．重庆大学学报（社会科学版），2026，32（1）：41-59.

[2] 项海帆．21世纪世界桥梁工程的展望[J]．土木工程学报，2000，33（3）：1-6.

[3] 《中国公路学报》编辑部．中国桥梁工程学术研究综述·2024[J]．中国公路学报，2024，37（12）：1-160.

[4] 毛伟琦，胡雄伟．中国大跨度桥梁最新进展与展望[J]．桥梁建设，2020，50（1）：13-19.

[5] 张铄涵，陈晖，张安琪．不同桥墩概化方法在防洪评价中的应用研究[J]．广东水利水电，2023（7）：34-39；44.

[6] 杨文海，路志强，刘涛．跨河桥梁防洪影响评价研究[J]．水资源与水工程学报，2013，24（2）：163-165；169.

[7] 中华人民共和国水利部．中华人民共和国水法[EB/OL]．（2016-07-04）[2026-04-06]. http://www. mwr. gov. cn/zw/zcfg/fl/202510/t20251001_2065828.html.

[8] 中华人民共和国水利部．中华人民共和国防洪法[EB/OL]．（2016-07-04）[2026-04-06]. http://www. mwr. gov. cn/zw/zcfg/fl/202510/t20251001_2065827.html.

[9] 中华人民共和国水利部．河道管理范围内建设项目管理的有关规定[EB/OL]．（1992-04-03）[2026-04-06]. https://www. gov. cn/zhengce/1992-04/03/content_5712335.htm.

[10] 阚译．桥渡水工水文工作的回顾[J]．铁道工程学报，1984（1）：110-115.

[11] 王知刚．桥位设计冲刷计算的新发展[J]．公路，1957（12）：1-7.

[12] O·B·安德烈耶夫，熊哲清．确定中间桥墩处的局部冲刷[J]．公路，1957（5）：33-34.

[13] 陆浩．桥梁壅水研究综述（上）[J]．铁道建筑，1980（3）：9-13.

[14] 陆浩．桥梁壅水研究综述（下）[J]．铁道建筑，1980（4）：9-12；19.

（下转第128页）