

桥群叠加阻水效应对河道过流能力影响研究

吴时强¹, 郭 宁², 吴修锋¹, 周向华², 赵 勇², 薛万云¹

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029;

2. 江苏省水利厅, 江苏 南京 210029)

摘要:在桥墩概化、模型验证和参数分析率定基础上,建立秦淮新河涉水桥群二维整体数学模型,对秦淮新河不同水文条件下桥群叠加阻水对行洪能力的影响进行计算分析。结果表明:秦淮新河河道水流受桥群阻水叠加影响,尤其在中上游,桥墩布置密集,河道壅水明显,在一定程度上削弱了秦淮新河的行洪能力,对行洪安全造成一定影响。

关键词:桥群; 叠加阻水; 过流能力; 秦淮新河

中图分类号:TV131.4

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2019)06-0001-06

Study on the influence of water blocking effect of bridge group superimposed on river conveyance capability

Wu Shiqiang¹, Guo Ning², Wu Xiufeng¹, Zhou Xianghua², Zhao Yong², Xue Wanyun¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology – Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, Jiangsu;

2. Water Resources Department of Jiangsu Province, Nanjing 210029, Jiangsu)

Abstract:Based on the generalization of bridge piers, model verification and parameter analysis, the two-dimensional mathematical model of the new Qinhuai River wading bridge group was established, and the influence of water blocking superimposed on flood discharge capacity under different hydrological conditions was calculated. The results showed that the water flow was affected by the superimposed water blocking of the bridge group, especially in the middle and upper reaches. The piers were densely arranged and the rivers were drowning, to some extent, the flood control capacity of the new Qinhuai River was weakened, which had a certain impact on flood safety.

Key words:bridge group; superimposed water blocking; conveyance capability; the new Qinhuai River

1 概述

河道是行洪的主通道,承担着抵御洪涝灾害的重要作用。为了满足日益增长的生产生活需要,我国大部分河流尤其是在城市河流上,修建了大量的涉水建筑物和生态护岸工程(如码头、桥梁、植被护岸、临水景观平台等),这些建筑物和生态护岸工程为人类的生产、生活提供了便利和优美的环境,为

经济社会的健康、快速、文明发展起到了积极的作用。与此同时,其对河道自身的健康和安全却产生一些负面作用及相关衍生问题,如大量桥梁集中布置在河道上,虽然单个桥梁的桥墩所占过水面积不大,但当桥梁间距较近时,出现了桥群叠加阻水效应,河道水位壅高,降低河道过流能力,局部区域流速增大,冲刷桥墩墩基,危害桥梁安全。

对于单个涉水桥梁,国内外学者采用理论分

收稿日期:2019-11-23

基金项目:江苏省水利科技项目(2016019)

作者简介:吴时强(1964—),男,博士研究生,教授级高级工程师,主要从事水利工程相关研究工作。

析、模型试验和数值计算等手段对桥墩附近的壅水、流场结构及冲刷机理等进行过大量深入的研究,取得了丰硕的研究成果^[1-8],如 Jain、Fischer^[2]和 Hong 等^[3]基于大量试验,对桥墩附近的流场和冲刷机理进行了分析;Chrisohoides^[4]、Briaud^[5]和 Salaheldin^[6]等分别通过物理模型试验和理论分析对桥墩附近复杂的三维流场和河床冲刷过程进行过分析,并提出了相应的防护措施。这些研究发现,单个涉水桥梁对河道行洪的影响有限,但是如果一段河道内涉水建筑物较多或相距较近,形成工程群后会产生叠加阻水效应,会严重削弱河道行洪能力。因此,定量研究桥群叠加阻水对泄洪能力的影响,对多桥梁河道的行洪安全具有重要实践意义。

考虑到建筑物之间存在的相互影响,对其阻水效应进行理论分析较困难,另外,采用物理模型进行阻水效应评价时也存在一些亟待解决的问题,特别是对涉水桥梁墩、桩基,由于桩尺寸相对于整个模拟区域较小,桩基数目又大,建立模型存在一定的困难。因此本文以南京秦淮新河为例,建立河道整体二维水动力学模型,对桥群过流能力进行量化研究。

2 研究对象简介

秦淮新河位于江苏南京,是经人工开挖河道,全长 16.88 km,是南京城市行洪通道。沿线跨河桥梁达十余座((详见图 1 和表 1)。



图 1 秦淮新河沿岸涉水建筑物位置图

3 数学模型及定解条件

3.1 数学模型

针对秦淮新河河道形态及水流特征,采用沿水

深平均的平面二维浅水数学模型,其基本方程为:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial(Hu)}{\partial x} + \frac{\partial(Hv)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + \frac{gu(u^2 + v^2)^{1/2}}{HC^2} + g \frac{\partial \xi}{\partial x} - A_x \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + \frac{gv(u^2 + v^2)^{1/2}}{HC^2} + g \frac{\partial \xi}{\partial y} - A_y \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (3)$$

式中: ξ 为水位,即基面至水面的垂直距离; $H = \xi + h$, h 为基面下的水深; u 、 v 分别为 x 、 y 方向的水深平均流速分量; f 为柯氏力系数, $f = 2\omega \sin \varphi$; φ 为纬度; ω 为地球自转速度; C 为谢才系数, $C = 1/n(\xi + h)^{1/6}$, n 为糙率系数; A_x 、 A_y 为涡动黏性系数。

数值方法采用有限单元法离散控制方程。进口边界根据已知进口断面流量,给定入流单宽流量沿断面的横向分布,出口边界给定出口断面的水位值。岸边界采用非滑移边界,其流速赋为零。给定各网格点上的初始水位和流速值。

3.2 计算条件

综合考虑水文资料、地形及研究内容等因素,选取河定桥上游至秦淮新河闸河段作为数学模型计算范围,总长度约 14 km。根据地形特征对计算区域进行网格划分,计算网格为三角形六结点网格单元,具体网格划分情况见图 2 和图 3。单元网格在沿水流方向上长 15 m,在垂直水流方向上宽

10 m,为尽可能反映桥墩对水流的影响,在河岸边线及桥墩附近对网格适当加密,共划分网格节点约 90000 个,计算单元约 45000 个。对桥墩采用不过水边界进行处理。计算边界上游为流量边界,下游

表 1 秦淮新河涉水桥梁主要设计参数

编号	桥名称	桥型特征	桥墩形状	涉水桥墩数 (个)	桥墩 排列方式	桥梁与河 交叉方式	横截面尺寸 (m)
1	河定桥	拱形桥	扁长形	4	单排	正	10.0×4.0
		高架桥	方形	2	单排	正	6.0×2.5
2	秦淮河大桥	并排两座桥	扁长形	4	并排	正	6.0×2.5
3	老拱桥	拱形桥	扁长形	2	单排	正	6.0×3.0
4	机场高速桥群	桥群(4座)	长方形	8	不规则并排	正	8.0×3.0
5	秦淮新河桥	并排两座桥	扁长形	2	并排	斜	10.0×3.5
6	高速铁路桥群	桥群(4座)	扁长形	8	不规则并排	斜	12.0×6.0
7	铁心桥	并排两座桥	扁长形	4	并排	斜	8.0×2.5
8	西善桥		上圆下方	2方6圆	单排	正	2.0
9	铁路桥		圆形	4	单排	正	3.5
10	秦淮新河大桥	6排桥墩	圆形	36	并排	斜	1.5
11	格子桥	7排桥墩	圆形	14	并排	正	1.5

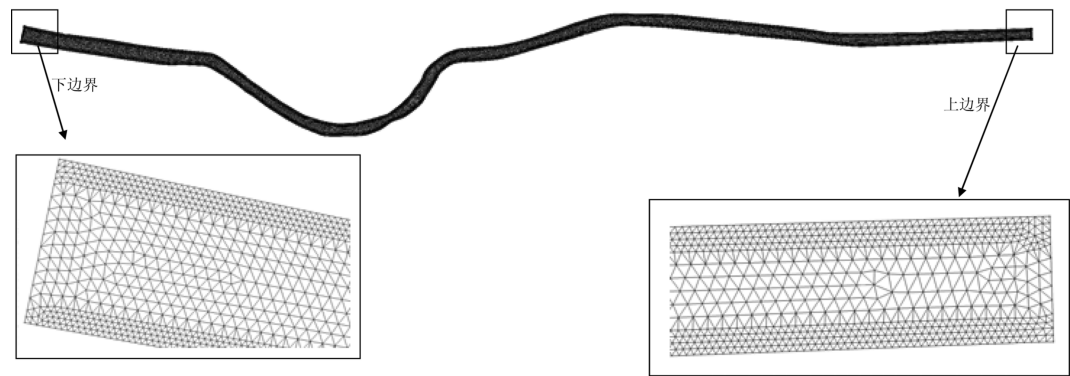


图 2 秦淮新河计算区域网格剖分图

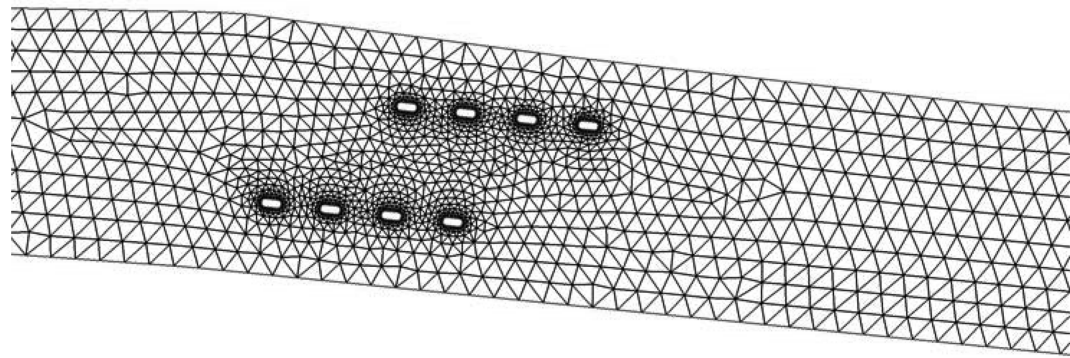


图 3 秦淮新河高速铁路桥墩群计算区域网格剖分图

为水位边界。

根据《秦淮河流域防洪规划》,将该流域 50 年一遇降雨遭遇长江 20 年一遇潮位(平均潮位 7.45 m)作为设计洪水,相当于 50 年一遇标准;流域 20 年一遇降雨遭遇长江干流 8.70 m(南京下关)潮位作为下游干流区域城市挡洪设计洪水,相当于

100 年一遇挡洪标准。

综合分析秦淮新河的防洪调度及引水条件,洪水期为不利水文条件,试验水文条件选取流域现状防洪特征水位及其相应流量,如表 2 所示。

表 2 秦淮新河桥群计算水文条件

站名	现状洪水位(m)	
	50 年一遇水位	100 年一遇水位
河定桥	9.390	9.780
秦淮新河桥	9.100	9.620
高速铁路桥群处	9.066	9.599
秦淮新河闸上	8.260	9.170
流量(m^3/s)	967.0	775.0

3.3 模型验证

分别选择 50 年一遇和 100 年一遇洪水位进行模型率定与验证,模型糙率采用上述计算值,得到验证结果如表 3 所示。由表可见,模型计算得到的水位误差在 ± 2.0 cm 以内,可以应用该数学模型进行桥墩阻水效应的二维计算研究。

表 3 秦淮新河桥群计算验证结果

桥名	50 年一遇			100 年一遇		
	实际 (m)	计算 (m)	差值 (cm)	实际 (m)	计算 (m)	差值 (cm)
秦淮新河桥	9.100	9.112	-1.2	9.620	9.633	-1.3
高速铁路桥群	9.066	9.080	-1.8	9.599	9.598	0.1
铁心桥	8.970	8.974	-0.9	9.550	9.533	1.7

4 计算结果分析

4.1 涉水桥梁水位影响分析

对秦淮新河 100 年一遇水文条件下有桥梁集群和不设桥梁两种工况进行二维水流数值计算,比较其水位变化情况。

图 4 为 100 年一遇水文条件下秦淮新河有、无桥梁集群工况下的水位沿程变化。当不考虑河道中的桥墩时(图 4(a)),河道水位自上游沿程变化均匀;而考虑桥梁后(图 4(b)),受桥梁集群阻水作用影响,河道水位壅高,壅水最高达 8.2 cm。尤其是秦淮河大桥至铁心桥区段形成了集群阻水效应现象,受其影响,在桥墩布置比较密集的秦淮新河上游区域,河道水位明显高于无桥墩时的水位。

表 4 为 100 年一遇水文条件下秦淮新河沿程各



图 4 秦淮新河沿程水位变化(100 年一遇洪水)

桥桥区在有、无桥梁时的水位值。由表可知,秦淮新河中上游区域(河定桥至铁心桥)受集群阻水效应明显,水位壅高,壅高值分别在 6 cm 以上;在下游区域(铁心桥下游),水位略高于无桥梁时的水位,且水位差沿程趋于零,这是由于上游区域桥梁布置密集,且河道相对下游窄,桥梁集群阻水效应明显,而下游桥梁布置相对较少,集群阻水效应较弱。

表 4 秦淮新河涉水桥梁桥区水位对比(100 年一遇洪水)

编号	桥名	100 年一遇洪水		
		有桥墩(m)	无桥墩(m)	差值(cm)
1	河定桥	9.793	9.711	8.2
2	秦淮河大桥	9.768	9.69	7.8
3	老拱桥	9.713	9.638	7.5
4	机场高速桥群	9.674	9.602	7.2
5	秦淮新河桥	9.633	9.564	6.9
6	高速铁路桥群	9.598	9.534	6.4
7	铁心桥	9.533	9.477	5.6
8	西善桥	9.289	9.246	4.3
9	秦淮新河大桥	9.251	9.232	1.9
10	格子桥	9.209	9.198	1.1

4.2 河道过水能力分析

河道受桥群叠加阻水效应影响,秦淮新河水位整体壅高,约束过水能力,影响汛期泄洪。改变来流流量 Q ,计算不同流量条件下有桥墩时的壅水高度 Δh 及壅水高度差对应的减损流量 ΔQ ,定义减损流量 ΔQ 为有、无桥墩条件下达到相同水位时的流量之差。

下游边界条件为 100 年一遇时的水位, 上游进口流量分别取 $Q = 550、650、775$ (100 年一遇流量)、 $850、950 \text{ m}^3/\text{s}$ 。表 5 是不同流量条件下的计算结果。图 5 是各桥墩处壅水高度 Δh 随流量的变化过程, 从图 5 中可以看到, 各桥梁处的壅水高度随流量的增大而略有增加, 且位于河道上游桥梁处的壅水高度相对较大。

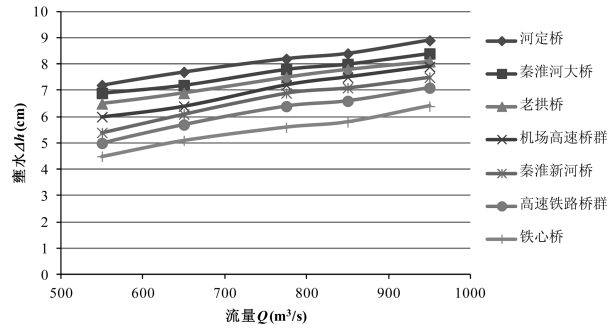


图 5 各桥墩处壅水高度 Δh 随流量 Q 的变化过程

由于河定桥和秦淮河大桥位于秦淮新河最上游, 其受桥墩群阻水效应影响程度相对较大, 因此选取这两座桥为典型代表, 对桥位处的水位流量关系进行分析。图 6 是河定桥和秦淮河大桥处水位流量关系图, 从图 6 中可以看到, 受到桥墩群阻水效应的影响, 桥梁处水位随流量增大而增加。秦淮新河上游河定桥、秦淮河大桥处的水位与流量成幂函数关系, 式(4)和式(5)表示河定桥和秦淮河大桥处水位随流量的变化关系。

$$Q_1 = m_1 (2g)^{0.5} B_1 h_1^{1.5} \tag{4}$$

$$Q_2 = m_2 (2g)^{0.5} B_2 h_2^{1.5} \tag{5}$$

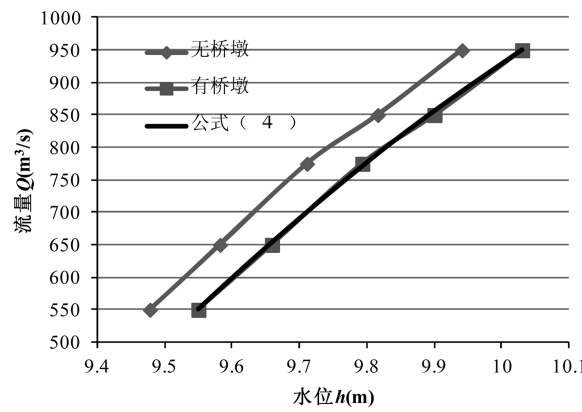
式中: 流量系数 m_1 和 m_2 分别为:

$$m_1 = -1959.9 \left(\frac{h}{B_1} \right)^2 + 290.6 \left(\frac{h}{B_1} \right) - 10.717$$

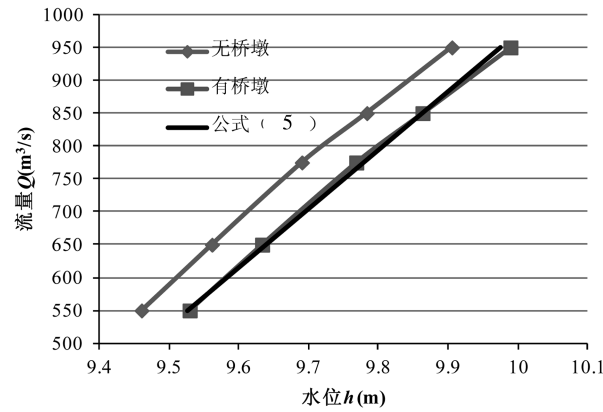
$$m_2 = -1923.3 \left(\frac{h}{B_2} \right)^2 + 285.5 \left(\frac{h}{B_2} \right) - 10.539$$

表 5 不同流量条件下涉水桥梁附近水位

流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$	550			650			775			850			950		
桥名 \ 水位	有桥墩	无桥墩	Δh	有桥墩	无桥墩	Δh	有桥墩	无桥墩	Δh	有桥墩	无桥墩	Δh	有桥墩	无桥墩	Δh
河定桥	9.550	9.478	7.2	9.659	9.582	7.7	9.793	9.711	8.2	9.900	9.816	8.4	10.030	9.941	8.9
秦淮河大桥	9.529	9.460	6.9	9.633	9.561	7.2	9.768	9.690	7.8	9.863	9.783	8.0	9.989	9.905	8.4
老拱桥	9.502	9.437	6.5	9.599	9.530	6.9	9.713	9.638	7.5	9.809	9.731	7.8	9.920	9.839	8.1
机场高速桥群	9.478	9.418	6.0	9.567	9.503	6.4	9.674	9.602	7.2	9.763	9.688	7.5	9.876	9.797	7.9
秦淮新河桥	9.445	9.391	5.4	9.524	9.463	6.1	9.633	9.564	6.9	9.706	9.635	7.1	9.802	9.727	7.5
高速铁路桥群	9.425	9.375	5.0	9.499	9.442	5.7	9.598	9.534	6.4	9.671	9.605	6.6	9.763	9.692	7.1
铁心桥	9.384	9.339	4.5	9.448	9.397	5.1	9.533	9.477	5.6	9.598	9.540	5.8	9.668	9.604	6.4



(a) 河定桥



(b) 秦淮河大桥

图 6 不同桥梁处水位流量关系图

其中, B_1 和 B_2 是河道宽。

从图 6 可知, 由于桥墩的阻水效应, 河道过水能力受到严重制约, 表 6 和表 7 列出了相同水位条件下桥墩阻水效应造成的河定桥区和秦淮河大桥区的减损流量 ΔQ 。从表中可以看到, 随着流量增大, 减损流量 ΔQ 基本不变, 河定桥区保持在 $61 \sim 71 \text{ m}^3/\text{s}$, 秦淮河大桥桥区保持在 $67 \sim 73 \text{ m}^3/\text{s}$, 而低水位时的减损流量较高水位时的减损流量略大。流量减损比随水位增大而减小(定义流量减损比为减损流量与有桥墩时的流量的比值), 说明随着水位增高, 桥墩对河道过流能力的制约相对减小, 这是由于水位越高, 河面越宽, 过水断面越大, 桥墩的阻水影响相对减少。

表 6 相同水位条件下河定桥减损流量

水位 (m)	流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$		减损流量 $\Delta Q(\text{m}^3/\text{s})$	减损比 (%)
	无桥墩	有桥墩		
9.60	666.68	595.49	71.19	11.96
9.70	763.82	693.72	70.10	10.10
9.80	839.27	776.10	63.17	8.14
9.90	920.65	859.34	61.31	7.13

表 7 相同水位条件下秦淮河大桥减损流量

水位 (m)	流量 $Q(\text{m}^3/\text{s})$		减损流量 $\Delta Q(\text{m}^3/\text{s})$	减损比 (%)
	无桥墩	有桥墩		
9.60	688.83	614.97	73.86	12.01
9.70	785.03	712.78	72.25	10.14
9.80	865.97	796.61	69.37	8.71
9.90	945.51	878.44	67.07	7.63

5 结论

(1) 相对于桥梁近区局部模型, 所建立的整体数学模型更好地反映了大范围、多桥墩的叠加效应, 为河道防洪论证提供了更为科学合理的依据。

(2) 秦淮新河受桥墩阻水作用影响, 河道水位壅高, 100 年一遇水文条件下壅水最高达 8.8 cm。尤其是秦淮河大桥至铁心桥区段形成了群墩阻水

效应现象, 受其影响, 在桥墩布置比较密集的秦淮新河上游区域, 河道水位明显高于无桥墩时的水位。

(3) 各桥墩处壅水高度 Δh 随流量的增大而略有增加, 且位于河道上游桥梁处的壅水高度相对较大。受到桥墩群阻水效应的影响, 桥梁处水位随流量增大而增加, 并可通过相应公式来表示河定桥和秦淮河大桥处水位随流量的变化关系。

(4) 随着流量增大, 减损流量 ΔQ 基本不变, 河定桥区保持在 $61 \sim 71 \text{ m}^3/\text{s}$, 秦淮河大桥桥区保持在 $67 \sim 73 \text{ m}^3/\text{s}$, 而低水位时的减损流量较高水位时的减损流量略大。流量减损比随水位增大而减小, 说明随着水位增高, 桥墩对河道过流能力的制约相对减小, 这是由于水位越高, 河面越宽, 过水断面越大, 桥墩的阻水影响相对减少。

参考文献:

- [1] 耿艳芬, 王志力. 桥渡对河道水流影响的二维无结构网格模型[J]. 水利水运工程学报, 2008, 4: 78-83.
- [2] JAIN S C, FISCHER E E. Scour around bridge piers at high flow velocities [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1980, 106(11): 1827-1842.
- [3] HONG Y M, CHANG M L, LIN H C, et al. Experimental Study on Clear Water Scour around Bridge Piers[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 121: 162-166.
- [4] CHRISOHOIDES A, SOTIROPOULOS F, STURM T W. Coherent structures in flat-bed aboutment flow: computational fluid dynamics simulations and experiments [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(3): 177-196.
- [5] BRIAUD J L, CHEN H C, WANG J. Pier and contraction scour in cohesive soils [M]. Washington D C: National Cooperative Highway Project: Transportation Research Board, 2004.
- [6] SALAHELDIN T M, IMRAN J, HANIF C M. Numerical modeling of three-dimensional Flow field around circular piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(2): 91-100.
- [7] 董胜男. 跨河桥梁对河道防洪影响评价问题的研究[D]. 2010.
- [8] 李付军, 张佰战, 戴荣尧. 桥下壅水高度计算方法的理论分析[J]. 铁道建筑, 2009(6): 31-33.