

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.10.014

跨度不等并行桥梁壅水规律试验研究

陈 猷¹, 陈启刚^{*1}, 张 汁², 王志华², 王 振²

(1. 北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044;

2. 青海省交通工程技术服务中心, 青海 西宁 810000)

摘要: 为优化跨度不等并行桥梁的设计, 降低桥孔布置方式对防洪及桥下净空的不利影响, 利用明渠水槽开展概化模型试验, 研究了并行桥梁的多种跨径组合及布置方式对桥前壅水的影响规律, 并基于量纲分析方法研究了影响并行桥桥前最大壅水高度的主要因素。结果表明: 桥前壅水高度沿桥梁上游方向先增大后减小或单调减小; 当并行桥梁之间的跨径比小于2时, 宜将大跨径桥梁布置于上游, 而当跨径比大于等于2时, 宜将小跨径桥布置于上游, 有利于减少壅水高度; 对于跨径比不为整数的并行桥梁, 将大跨径桥和小跨径桥的一组桥墩沿流向共线布置时的壅水高度小于将两桥桥孔沿河道中心对称布置; 并行桥的桥前最大壅水高度受明渠流态影响较大, 随弗劳德数的增大近似呈线性增加, 同时, 最大壅水高度还随着相对水深和阻水比的增加而变大; 并行桥阻水比对壅水的影响机制与单一桥梁有差异, 当下游桥墩位于上游桥墩的尾流区时, 下游桥墩产生的附加阻水效应极小, 因此, 并行桥阻水比的计算应考虑上游桥墩对下游桥墩的遮蔽效应。最后, 根据试验数据和前人多桥壅水高度研究成果, 提出了通过叠加上下游桥梁各自壅水高度计算跨度不等并行桥最大壅水高度的计算方法。

关键词: 桥梁工程; 壅水; 模型试验; 并行桥; 不同跨度

中图分类号: U442.3⁺3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 10-0116-10

Experimental Study on Backwater Rules for Parallel Bridges with Unequal Spans

CHEN Xiao¹, CHEN Qi-gang^{*1}, ZHANG Zhi², WANG Zhi-hua², WANG Zhen²

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Qinghai Traffic Engineering Technical Service Center, Xining Qinghai 810000, China)

Abstract: In order to optimize the design of parallel bridges with unequal spans and reduce the adverse effects of bridge opening arrangement on flood control and clearance under the bridge, a generalized model experiment is conducted by using an open channel flume to study the influence of various span combinations and arrangement methods of parallel bridges on the backwater in front of the bridge. The main factors affecting the maximum backwater height in front of the parallel bridge are studied based on dimensional analysis method. The result shows that (1) the height of the backwater in front of the bridge first increases and then decreases or monotonically decreases along the upstream direction of the bridge; (2) when the span ratio between parallel bridges is less than 2, it is advisable to arrange large span bridges upstream, while when the span ratio is greater than or equal to 2, small span bridges should be arranged upstream to reduce the height of backwater; (3) for parallel bridges with non integer span ratios, the backwater height when a group of piers of large and small span bridges are arranged along the same line in the flow direction is smaller than when the two bridge openings are symmetrically arranged along the center of the river; (4) the

收稿日期: 2021-10-21

基金项目: 青海省交通运输厅科技项目 (2021-02); 青海省重点研发与转化计划科技成果转化专项项目 (2021-SF-161)

作者简介: 陈猷 (1995-), 男, 湖北宜昌人, 硕士. (zgchenxiao822@163.com)

* 通讯作者: 陈启刚 (1987-), 男, 四川宜宾人, 博士, 副教授. (chengq@bjtu.edu.cn)

maximum backwater height in front of the parallel bridge is greatly influenced by the flow pattern of the open channel, and increases approximately linearly with the increase of Froude number, and the maximum backwater height also increases with the increase of relative water depth and water resistance ratio at the same time; (5) the mechanism of the influence of parallel bridge water resistance ratio on backwater is different from that of a single bridge, when the downstream bridge pier is located in the wake area of the upstream bridge pier, the additional water resistance effect generated by the downstream bridge pier is minimal, therefore, the calculation of parallel bridge water resistance ratio should consider the shielding effect of the upstream bridge pier on the downstream bridge pier. Finally, based on experimental data and previous study on the backwater height of multiple bridges, a calculation method for calculating the maximum backwater height of parallel bridges with unequal spans by overlaying the respective backwater heights of upstream and downstream bridges is proposed. The study result can provide reference for flood control optimization design of highway bridge expansion projects.

Key words: bridge engineering; backwater; model test; parallel bridges; unequal spans

0 引言

天然河道在建桥后, 桥墩、桥台等水中构筑物产生阻水效果, 上游来流受到挤压后流速减小, 水流的动能转化为势能, 相同断面的水位在建桥后抬升, 即为桥前壅水。桥梁壅水高度的设计影响着桥梁的防洪功能以及安全使用。随着我国经济社会的快速发展, 许多道路亟需通过扩建以提升通行能力^[1-2]。在公路扩建工程中, 常需要在旧桥的上游或下游并行修建新桥, 当新旧桥梁采用不同技术标准时, 将出现跨度不等桥梁并行问题。此外, 公路与铁路并行区段、施工栈桥与新建桥梁之间也可能形成跨度不等桥梁并行现象。因此, 开展跨度不等并行桥梁壅水高度的研究具有重要工程实用价值。

关于桥梁壅水的早期研究主要关注单座桥梁壅水高度的计算。典型计算方法如 D' Aubuisson 公式、Yarnell 公式、陆浩公式等^[3-4]。近年来, 交通路网的大规模建设使得桥群壅水规律被研究较多。研究表明, 当河道中存在多座桥梁时, 各座桥梁产生的壅水之间具有叠加效应, 桥群产生的壅水高度大于单座桥梁^[5-6]。郑仰奇等^[7]研究表明, 桥群上游任意断面在一定条件下的壅水高度约为下游桥梁在这个断面产生的壅水高度之和, 而吴泽宇等^[8]在南水北调工程中发现多桥引起的累计水头损失不能简单地用单桥的水头损失进行累加。与桥群相比, 新旧并行桥梁之间因间距极小而更接近群墩工况, 但并行桥跨度不等时的群墩与已有研究^[9-10]关注的串列墩群有显著差异, 上下游桥墩沿流向相互错位使桥墩阻水规律更为复杂。因此, 目前对于跨度不等并行桥壅水规律的认识还较少。

本研究采用概化物理模型试验开展跨度不等并行桥梁壅水规律研究, 研究不同跨度组合、不同布置方式下的桥前壅水特性, 分析桥前壅水高度的主要影响因素, 探索跨度不等并行桥梁壅水高度计算方法, 以期为跨度不等并行桥梁的工程优化设计提供理论依据。

1 桥前壅水模型试验

1.1 试验设备

模型试验在长 3 m, 宽 40 cm, 高 25 cm 的自循环顺直明渠水槽中开展。水槽底板及边壁均为玻璃, 底坡可调范围为 0~10%。水槽采用变频水泵供水, 通过调节水泵转速实现流量控制, 流量大小由电磁流量计实时记录。水槽进口布置蜂窝器以引导水流均匀流入槽体, 出口设置活页尾门以调节槽内水面线, 距水槽入口 0.5 m 和 2.5 m 处分别安装一套超声水位计进行水位自动测量。

本研究以双车道公路增幅扩建为双向四车道高速公路作为工程背景, 根据扩建后新旧桥梁近距离并行的一般特征设计概化模型试验, 探讨并行桥壅水的一般性规律, 工况设计不针对具体桥梁。考虑试验水槽的尺寸, 按 1:100 几何比尺进行模型桥梁跨径设计, 采用外径为 2 cm 的有机玻璃圆柱作为模型桥墩以增强壅水效果, 桥墩结构形式采用双柱式圆形墩, 柱间距参考实际工程数据取为 7 cm, 两桥相邻桥墩间距取为 6.5 cm。模型桥墩按拟定试验方案布置于水槽中后段并固定于水槽上部避免倾覆。试验时先通过调节流量和尾门开度以形成预定水深的明渠均匀流, 利用水位测针沿流向每隔 4 cm 记录天然水面线, 放置模型桥墩后再次测量桥前壅高

的水面线,进而得到各断面的壅水高度。为了减小水位测针读数误差,在同一断面沿河宽方向多次读数,并取各次读数的平均值作为该断面的实际水位。

1.2 试验工况

根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[11],现有公路桥梁常用标准跨径有 8, 10,

16, 20, 25, 30, 35, 40 m 等,因此,并行桥的标准跨径组合形式多种多样。本研究考虑实际工程中方案的可行性、不同组合之间的相似性以及水槽规模,采用 8~20, 10~20, 16~20, 20~35 m 这 4 种组合模式进行并行桥壅水试验,不同跨径比并行桥的典型布置方案如图 1 和 2 所示。

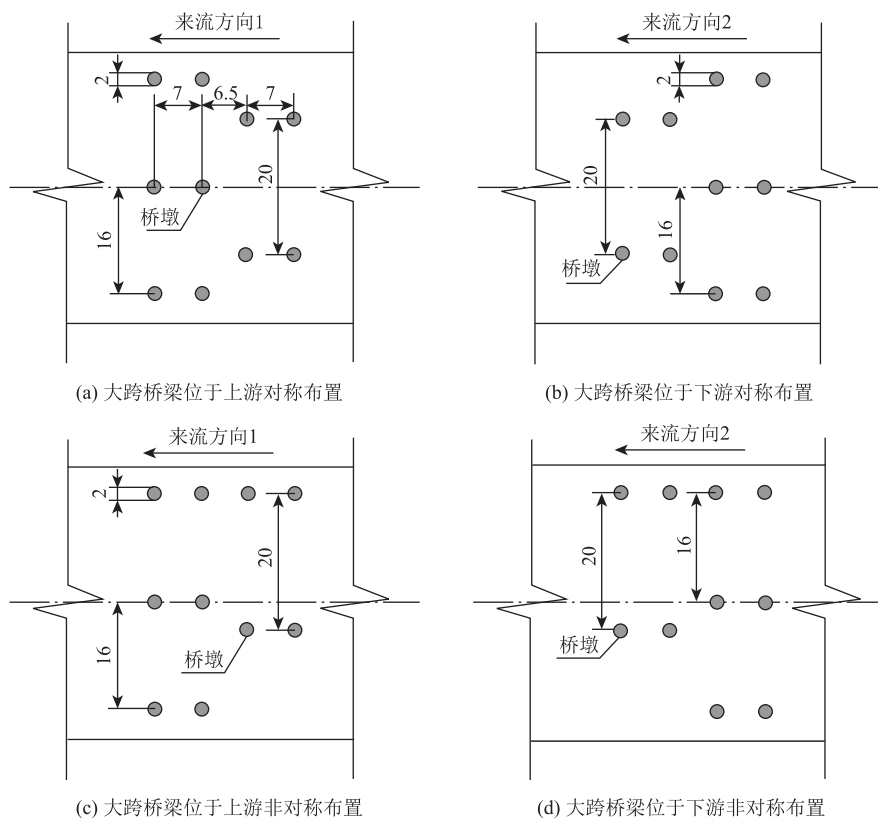


图 1 16~20 m 桥跨组合下的并行桥梁布置方式 (单位: m)

Fig. 1 Layouts of 16~20 m bridge-span combination (unit: m)

在每种跨径组合中分别考虑较大跨径的桥梁(即新桥)布置在上游或下游、小跨桥孔相对于大跨桥孔对称与非对称布置共 4 种布置方式。对于各种跨径组合,分别在不同坡度和水深条件下开展试验,试验工况见表 1,其中弗劳德数 $Fr = V/\sqrt{gH}$,雷诺数 $Re = RV/\nu$,式中, V 为断面平均流速; R 为水力半径; ν 为水的运动黏度系数。为探讨跨度不等并行桥壅水的一般规律,本研究进行概化模型设计时未严格考虑水流的动力相似条件。为便于叙述,各工况以“C 上游跨径-下游跨径_对称 S/非对称 US_弗劳德数”形式进行命名,如 C8-20_ S_ 0.60 表示上游桥的跨径为 8 m,下游桥的跨径为 20 m,且小跨桥孔相对于大跨桥孔对称布置,试验水流的弗劳德数为 0.60。为叙述方便,本研究定义沿水流流动方向为流向,沿水槽(河流)宽度方向为横向。

2 结果与分析

2.1 桥前壅水曲线特征

对于每一组试验工况,定义壅高后的水面线与天然水面线之差 ΔZ 为壅水曲线,图 3 展示了试验中观测到的不同跨径组合和布置方式条件下的壅水曲线。在各壅水曲线近桥端可明显观察到桥墩涌浪,但这一现象只出现在桥墩正前方且范围较小,不会引起整个断面水位壅高而威胁河流堤防安全,故本研究仅关注桥前各断面的整体壅高情况。沿桥梁上缘往上游方向,各工况观测到的壅水曲线大致可分为 2 种类别:第 1 类曲线的壅水高度先增大后减小,最大壅水高度出现在距桥前大约一倍桥长左右;第 2 类曲线的壅水高度单调减小,最大壅水高度出现在桥梁上缘附近。上述 2 类壅水曲线符合桥前壅水的理论规律以及已有试验观察结果^[12-13]。

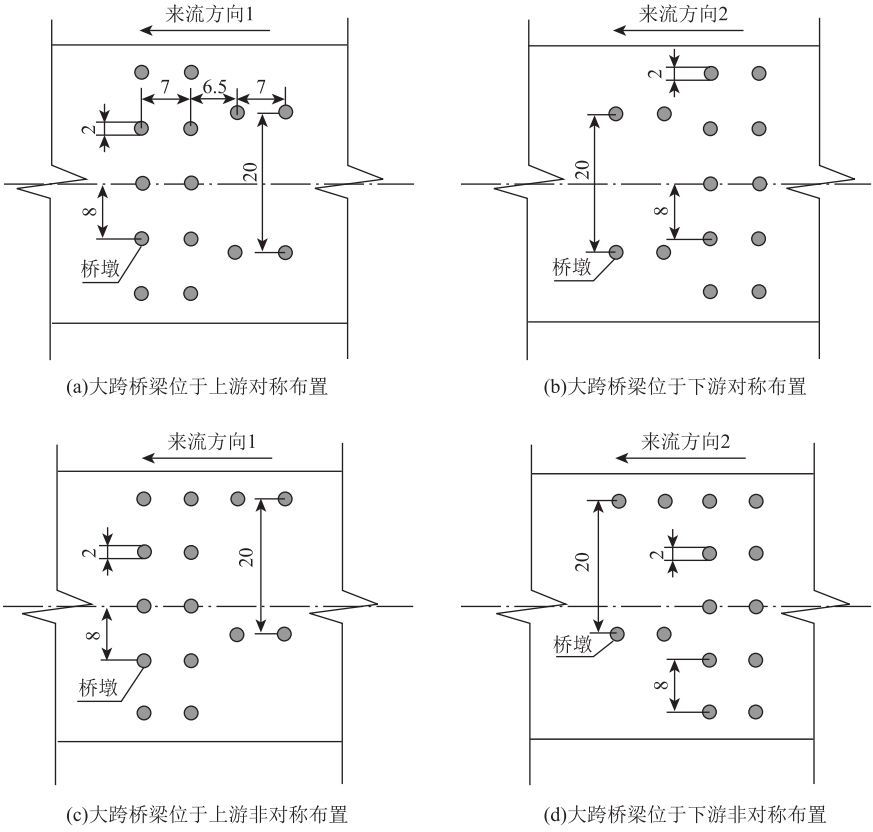


图 2 8~20 m 桥跨组合下的并行桥梁布置方式 (单位: m)
Fig. 2 Layouts of 8~20 m bridge-span combination (unit: m)

表 1 桥前壅水试验工况

Tab. 1 Experimental conditions of backwater at bridge crossings

工况编号	坡度/ ‰	水深/ cm	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	雷诺数	工况编号	坡度/ ‰	水深/ cm	流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	雷诺数
C8-20_ S_ 0.60/ C8-20_ US_ 0.60	1	3.50	0.35	10 320	C16-20_ S_ 0.60/ C16-20_ US_ 0.60	1	3.49	0.35	10 260
C20-8_ S_ 0.60/ C20-8_ US_ 0.60	1	3.50	0.35	10 320	C20-16_ S_ 0.60/ C20-16_ US_ 0.60	1	3.49	0.35	10 260
C8-20_ S_ 0.66/ C8-20_ US_ 0.66	1	4.06	0.42	14 010	C16-20_ S_ 0.60/ C16-20_ US_ 0.60	1	3.99	0.37	12 270
C20-8_ S_ 0.66/ C20-8_ US_ 0.66	1	4.06	0.42	14 010	C20-16_ S_ 0.60/ C20-16_ US_ 0.60	1	3.99	0.37	12 270
C8-20_ S_ 0.75/ C8-20_ US_ 0.75	1	5.00	0.52	20 690	C16-20_ S_ 0.84/ C16-20_ US_ 0.84	2	3.46	0.49	14 220
C20-8_ S_ 0.75/ C20-8_ US_ 0.75	1	5.00	0.52	20 690	C20-16_ S_ 0.84/ C20-16_ US_ 0.84	2	3.46	0.49	14 220
C8-20_ S_ 0.68/ C8-20_ US_ 0.68	2	3.50	0.40	11 670	C16-20_ S_ 0.80/ C16-20_ US_ 0.80	2	4.01	0.50	16 530
C20-8_ S_ 0.68/ C20-8_ US_ 0.68	2	3.50	0.40	11 670	C20-16_ S_ 0.80/ C20-16_ US_ 0.80	2	4.01	0.50	16 530
C8-20_ S_ 0.75/ C8-20_ US_ 0.75	2	4.00	0.47	15 550	C20-35_ S_ 0.59/ C20-35_ US_ 0.59	1	3.54	0.35	10 430
C20-8_ S_ 0.75/ C20-8_ US_ 0.75	2	4.00	0.47	15 550	C35-20_ S_ 0.59/ C35-20_ US_ 0.59	1	3.54	0.35	10 430
C8-20_ S_ 0.81/ C8-20_ US_ 0.81	2	5.00	0.56	22 330	C20-35_ S_ 0.61/ C20-35_ US_ 0.61	1	3.99	0.38	12 480
C20-8_ S_ 0.81/ C20-8_ US_ 0.81	2	5.00	0.56	22 330	C35-20_ S_ 0.61/ C35-20_ US_ 0.61	1	3.99	0.38	12 480
C10-20_ S_ 0.64/ C20-10_ S_ 0.64	1	3.95	0.40	13 020	C20-35_ S_ 0.75/ C20-35_ US_ 0.75	2	3.49	0.44	12 960
C10-20_ S_ 0.68/ C20-10_ S_ 0.68	1	4.99	0.47	18 770	C35-20_ S_ 0.75/ C35-20_ US_ 0.75	2	3.49	0.44	12 960
C10-20_ S_ 0.78/ C20-10_ S_ 0.78	2	3.99	0.48	15 970	C20-35_ S_ 0.79/ C20-35_ US_ 0.79	2	3.97	0.49	16 210
C10-20_ S_ 0.76/ C20-10_ S_ 0.76	2	4.99	0.53	20 930	C35-20_ S_ 0.79/ C35-20_ US_ 0.79	2	3.97	0.49	16 210

对比图3中不同工况的壅水曲线可知,并行桥梁的跨径组合及布置方式对壅水规律具有明显影响。例如,同为8 m和20 m跨径组合并行桥梁,将20 m跨径布置在上游时的壅水高度显著大于8 m跨径布置在上游时的情形,而当20 m跨径布置在上游时,8 m跨径桥孔相对于20 m跨径桥孔非对称布置时的壅水高度小于对称布置。为了具体分析不同跨径组合和布置方式对桥前壅水高度的影响,考虑桥前壅水对防洪的最不利影响和消除水位测量误差的可能干扰,本研究取距桥上缘0.5倍桥长到1.5倍桥长之间的平均壅水高度表征该组工况的最大壅水高度。

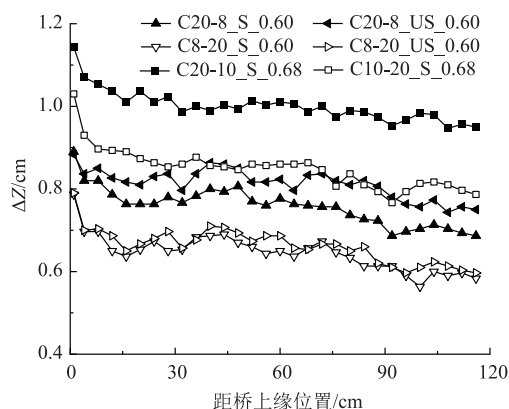


图3 典型桥跨组合及布置方式下的桥前壅水曲线
Fig. 3 Backwater curves with typical bridge-span combinations and layouts

2.2 沿流向布置方式对壅水的影响

当并行桥梁跨径不同时,存在分别将大跨桥和小跨桥布置在上游这2种不同的沿水流方向布置方式。为分析新老桥沿流向布置方式对壅水高度的影响规律,定义其他条件相同时大跨桥在上游时的壅水高度与小跨桥在上游时的壅水高度之差为流向布置壅水高差 ΔZ_{l-s} ,并分析其随着跨径比 M 、横向布置方式及水流条件的变化规律。根据上述计算方法, ΔZ_{l-s} 为正和负分别对应大跨径桥梁布置在上游时较为不利和有利2种情形。

图4为流向布置壅水高差 ΔZ_{l-s} 随跨径比的变化规律,同时,图中还分别以实心圆和空心圆对小跨桥孔相对于大跨桥孔是否对称的结果进行了区分。由图可见,在本研究模型试验方案中,当跨径比 <2 ,即新旧桥跨径较为接近时,无论两桥桥孔是否对称布置,大跨桥布置在上游时桥前壅水低于小跨桥布置在上游的情形出现更为普遍,表明这种布置方式更有利于降低桥前壅水高度,最大降幅可达 $0.18D$, D 为墩径。反之当跨径比 ≥ 2 ,即新旧桥跨径差距较

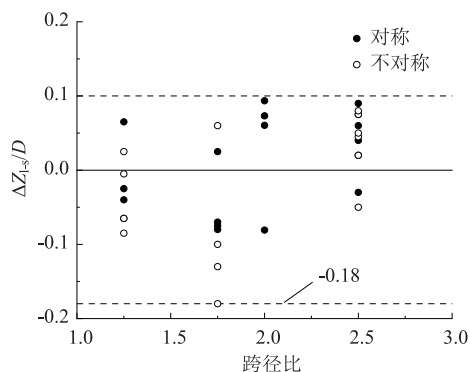


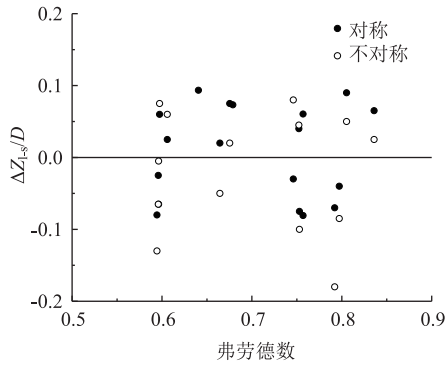
图4 不同跨径比条件下两种流向布置方式的壅水高度差值
Fig. 4 Backwater height difference between two streamwise direction layouts with different span ratios

大时,宜将小跨桥布置在上游,此时最大可降低壅水高度 $0.1D$ 。并行桥壅水高度取决于两座桥阻水作用的叠加,当跨径比小于2且大跨桥布置在上游时,位于下游的小跨桥桥墩大多处在上游桥桥孔的尾流区或主流区边缘,产生的附加阻水作用较小。反之将小跨桥布置在上游时,下游部分桥墩位于上游桥桥孔的主流区中部,进一步增强桥梁整体阻水作用,而当跨径比 ≥ 2 且大跨桥布置于上游时,两桥尾流区相互叠加形成的阻水面积显著大于将大跨桥布置于下游时的工况。

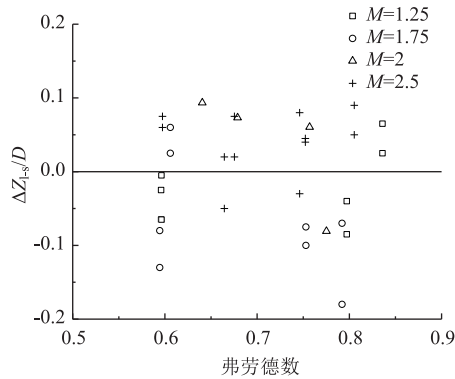
根据弗劳德相似准则^[14],弗劳德数是保持原型与模型动力相似的相似准数,模型与原型流动的弗劳德数相等时满足流动相似。因此,分析并行桥壅水随弗劳德数的变化规律具有实际意义。图5展示了不同桥孔布置方式及跨径组合下,桥前壅水高度随弗劳德数的变化规律。图5(a)表明,无论桥孔沿河宽方向是否对称布置,不同弗劳德数下将大跨桥布置在上游或下游对壅水并无明显影响。图5(b)同样表明,无论并行桥梁的跨径是否接近,弗劳德数不会改变桥梁沿流向布置方式对壅水的影响规律。

2.3 沿河宽布置方式对壅水的影响

当并行桥梁的跨径比例为非整数时,两桥的桥孔沿河宽方向一般有2种可能的布置方式:一种是使小跨径桥的一组桥墩与大跨径桥沿水流纵向共线以减小阻水面积;二是使小跨桥孔相对于大跨桥孔对称布置以避免大幅改变水流流向,本研究将上述2种沿河宽布置方式分别简称为非对称和对称布置。为分析并行桥沿河宽布置方式对壅水高度的影响,定义其他条件相同时,对称布置下的壅水高度与非对称布置下的壅水高度之差为横向布置壅水高差 ΔZ_{s-us} ,进一步分析其随跨径比 M 和水流条件的变化



(a) 区分不同横向布置形式



(b) 区分不同跨径比

图5 不同弗劳德数下两种流向布置方式的壅水高度差值

Fig.5 Backwater height difference between two streamwise direction layouts with different Froude numbers

规律。根据上述计算方法, ΔZ_{s-us} 为正和负分别表示并行桥沿河宽对称布置时不利和有利。

图6展示了沿河宽方向壅水高差 ΔZ_{s-us} 随跨径比的变化, 同样, 图中也分别以实心圆和空心圆对大跨桥位于上游和小跨桥位于上游的结果进行了区分。根据第2.2节分析可知, 在本研究模型试验方案中, 当跨径比较小时, 将大跨桥布置在上游更有利于壅水设计。图6进一步表明, 此时若将下游小跨桥的桥孔相对于大跨桥非对称布置时产生的壅水更小, 最大可进一步降低壅水高度 $0.025D$ 。反之, 当两桥跨径相差较大时, 在将小跨桥梁布置于上游的同时, 图7结果表明将小跨桥孔相对于下游大跨桥孔进行非对称布置时最大能降低壅水高度 $0.05D$ 。以上结果表明, 当两座并行桥梁的桥孔采用非对称布置方式时, 由于下游桥墩位于上游桥墩尾流区的比例最高, 下游墩产生的附加阻水作用最小, 桥墩的叠加阻水作用引起的桥前壅水最低。丁伟等^[15]进行数值模拟时也指出串列桥墩的轴线尽可能顺应水流流向是减少壅水的有效措施。

图7进一步展示了横向壅水高差 ΔZ_{s-us} 随弗劳德数的变化规律。由图7(a)~(b)可知, 弗劳德

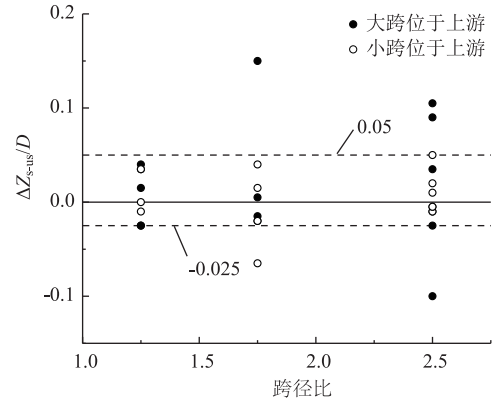
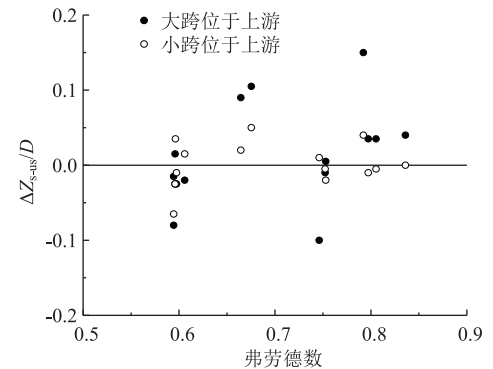
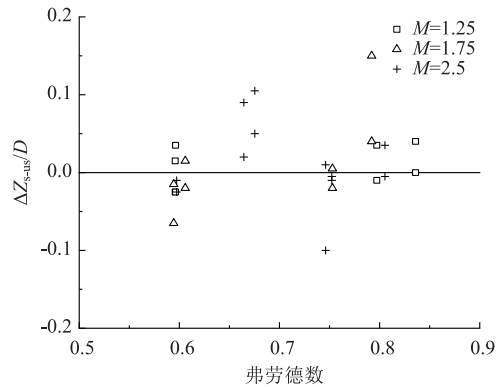


图6 不同跨径比条件下两种横向布置方式的壅水高度差值

Fig.6 Backwater height difference between two horizontal layouts with different span ratios



(a) 区分不同流向布置形式



(b) 区分不同跨径比

图7 不同弗劳德数条件下两种横向布置方式的壅水高度差值

Fig.7 Backwater height difference between two horizontal layouts with different Froude numbers

数的不同并不会改变桥梁布置方式对桥前壅水的影响规律, 即无论水流为缓流或急流, 非对称形式布置对减小桥梁壅水均更为有利。在实际工程中, 河流中下游因水深流缓而具有较小的弗劳德数, 而河流上游及山区河流则因坡度较大而往往具有较大的弗劳德数, 因此, 本研究关于桥梁布置形式对壅水设计的影响规律对于不同规模的桥梁具有普适意义。

2.4 桥前壅水高度的主要影响因素

在不考虑河床冲淤的条件下, 并行桥梁桥前壅水高度的影响因素包括水流参数、桥墩参数以及反映桥梁并行关系的参数。对于本研究中的固定间距并行桥, 采用 π 定理量纲分析方法^[14]可建立桥前壅水高度的无量纲表达式为:

$$\frac{\Delta Z}{D} = f\left(Re, Fr, \frac{H}{D}, B, M\right), \quad (1)$$

式中, D 为墩径; H 为天然水深; B 为阻水比(并行桥梁的所有桥墩在垂直于水流方向的投影总宽度与天然河宽之比)。进一步利用试验得出的桥前壅水高度分析上述无量纲变量对壅水高度的影响规律。图8为桥前相对壅水高度 $\Delta Z/D$ 随来流雷诺数的变化趋势, 在本研究试验范围内, 壅水高度介于 $0.2D \sim 0.84D$ 之间且随着雷诺数增大而逐渐增加, 但增长速度逐渐变缓。由于天然河流的水流雷诺数远大于本研究试验中采用的雷诺数, 可认为此时雷诺数对并行桥壅水高度的影响可以忽略, 这与Ettema等^[16]关于墩柱绕流规律的理论分析结果一致。

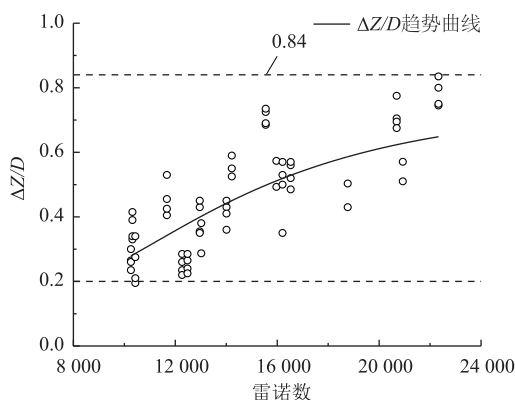


图8 不同雷诺数条件下的最大壅水高度

Fig. 8 Maximum backwater height with different Reynolds numbers

图9展示了相对最大壅水高度 $\Delta Z/D$ 随弗劳德数的变化趋势。在本研究试验所涉及的亚临界缓流条件下, 相对壅水高度随弗劳德数近似呈线性增加, 表明明渠流态对桥前壅水影响较大。Seekin等^[17]在复式河道水槽模型试验中也证实弗劳德数是影响壅水高度的重要正相关因子。

图10所示是相对最大壅水高度 ΔZ 随相对水深的变化关系, 在不同流量条件下, 墩前水深对并行桥的壅水高度造成直接影响。当水深增加时, 相应壅水高度明显也有升高趋势, 这与天然河道中的自

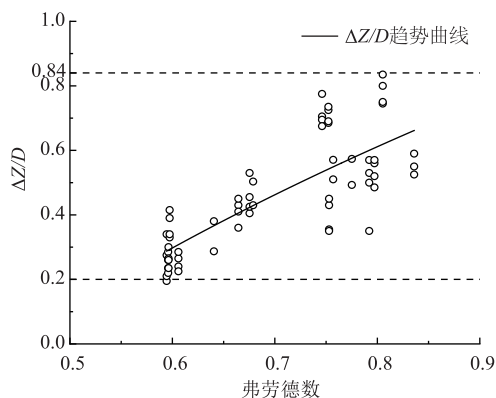


图9 不同弗劳德数条件下的最大壅水高度

Fig. 9 Maximum backwater height with different Froude numbers

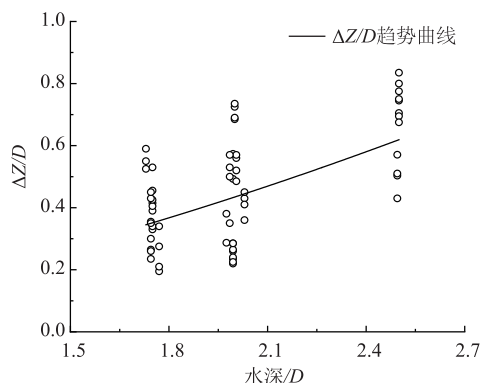


图10 不同相对水深条件下的最大壅水高度

Fig. 10 Maximum backwater height with different relative water depths

然流动现象以及已有研究相符合。严建科等^[18]通过桥梁壅水高度影响因素试验发现当水位随流量增加而抬升时桥梁壅水高度也随之增加。

图11为桥墩阻水比与相对最大壅水高度 ΔZ 的关系。随着阻水比的增加, 并行桥的壅水高度尽管有缓慢增加的趋势, 但变化规律不够显著。王玲玲等^[13]、严军等^[19]在群墩壅水特性数值模拟及试验研究中均发现最大壅水高度会随着阻水比的变大而明显增长, 张金明等^[20]在概化模型试验中也指出阻水比是影响壅水高度的关键因素之一。分析本研究试验与已有研究之间的细微规律差异, 主要在于阻水比定义不同, 本研究中并行桥阻水比定义为并行桥桥墩在河宽方向上的总投影宽度与河宽之比。但是, 当下游桥墩处于上游桥墩尾流区时, 由于上游桥墩的遮蔽效应, 下游桥墩并不会显著增加阻水效果, 使得这些工况的计算阻水比大于实际阻水比。关于并行桥实际阻水比的合理计算方法, 还有待进一步研究。

相对最大壅水高度 ΔZ 随跨径比的变化趋势如图

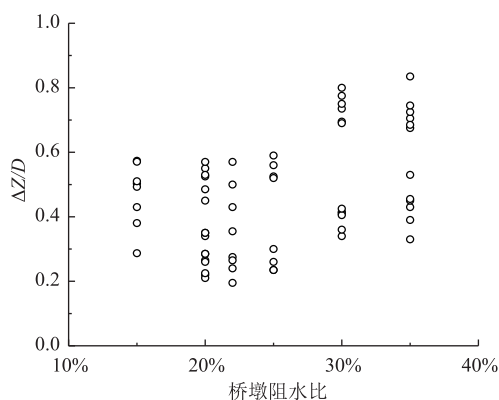


图 11 不同阻水比条件下的最大壅水高度

Fig. 11 Maximum backwater height with different blockage ratios

12. 当 $M < 2$ 时相对壅水高度不随跨径比发生明显变化, 而当 $M \geq 2$ 时相对壅水高度随跨径比增加而变大。由于跨径比变化可能改变桥梁阻水比 B , 图 12 中进一步用不同符号区分了各数据点对应的阻水比, 根据阻水比为 20% 的数据点分布可见跨径比 B 的变化未导致壅水发生明显变化。而当跨径比大于等于 2 时, 桥梁阻水比随跨径比增大而有所增加, 导致桥梁壅水高度随之提高。因此, 跨径比对桥梁壅水的影响可以通过阻水比进行表征。

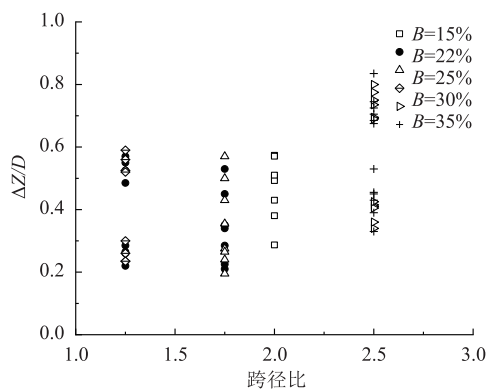


图 12 不同跨径比条件下的最大壅水高度

Fig. 12 Maximum backwater height with different span ratios

2.5 并行桥桥前壅水高度计算方法

对于本研究所关注的等跨并行桥, 我国现行设计规范中尚无具体壅水高度计算方法。郑仰奇等^[7]、高旭艳等^[21]的研究表明, 位于多座桥梁壅水范围内的断面壅水高度可表示为各桥梁在该断面产生的壅水高度的叠加。本节基于上述研究结果, 进一步研究跨度不等并行桥的壅水高度计算方法。对于跨度不等的近距并行桥, 定义并行桥中第 1 座迎水桥梁为上游桥梁, 第 2 座迎水桥梁为下游桥梁,

假定桥前壅水为并行的两座桥梁引起的壅水高度的叠加:

$$\Delta Z_s = \Delta Z_u + \Delta Z_d, \quad (2)$$

式中, ΔZ_s 为并行桥桥前最大壅水高度; ΔZ_u 为上游单座桥梁产生的最大壅水高度, 可按我国《公路桥位勘测设计规范》(JTJ062—91) 中推荐的 D' Aubuisson 公式计算如下:

$$\Delta Z_u = \eta (V_M^2 - V^2), \quad (3)$$

式中, V_M 为建桥后桥下断面平均流速; V 为建桥前桥址处断面平均流速; η 为与河段特征及河滩路堤阻挡流量和设计流量的比值有关的系数, 可依照规范选取; ΔZ_d 为下游桥梁引起的壅水高度, 可按式 (4) 计算:

$$\Delta Z_d = \left(1 - \frac{I_0 L}{2 \Delta Z_M}\right) \Delta Z_M, \quad (4)$$

式中, I_0 为河段天然水面坡度; L 为下游桥梁最大壅水断面至并行桥桥前最大壅水断面距离, 基于本研究试验数据, L 可取为两座并行桥迎水墩所在断面的间距; ΔZ_M 为下游单座桥梁的最大壅水高度, 同样按 D' Aubuisson 式计算。

图 13 为利用并行桥壅水高度计算式 (2) 得到的桥前总壅水高度计算值与试验结果的对比, 图中虚线代表 $\pm 30\%$ 误差范围。图中结果表明, 本研究提出的跨度不等近距并行桥壅水高度计算方法的计算值与试验值相关性较好, 且计算值总体上略高于试验值, 符合工程设计中偏安全的设计理念, 可用于本研究的跨度不等近距并行桥的壅水高度计算。

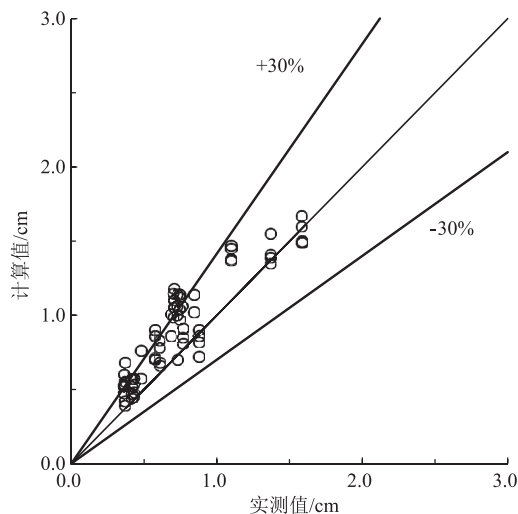


图 13 并行桥桥前壅水计算值与试验结果比较

Fig. 13 Comparison of calculation and test results for backwater in front of parallel bridges

3 结论

本研究利用水槽试验对跨度不等并行桥梁的跨径组合及布置方式对桥前壅水的影响规律以及最大壅水高度的主要影响因素进行研究,得到以下主要结论:

(1) 从减小桥前壅水高度的角度看,本研究试验方案的结果表明,当并行桥梁的跨径比小于 2 时,宜将大跨径桥布置于上游,此时桥前壅水高度最大降幅为 $0.18D$,而当跨径比大于等于 2 时,宜将小跨径桥布置于上游,此时桥前壅水高度最大可降低 $0.1D$ 。

(2) 对于跨径比不为整数的并行桥梁,宜将大跨径桥和小跨径桥的一组桥墩沿流向共线布置,此时相比将两桥桥孔沿河道中心对称布置,桥前壅水高度最大能减小 $0.05D$ 。

(3) 并行桥的最大壅水高度主要随弗劳德数、相对水深、阻水比的增加而变大,但计算阻水比时应进一步考虑上游桥墩对下游桥墩的遮蔽效应。并行桥跨径比对桥前壅水的影响可通过阻水比进行表征,水流雷诺数对壅水高度的影响在实际工程中可以忽略。

(4) 基于本研究试验数据和多桥壅水理论,提出了跨度不等近距并行桥壅水高度计算方法。

上述结论是基于本研究概化模型试验得出的,在实际桥梁中的适用性还需进一步验证。

参考文献:

References:

- [1] 中国公路编辑部. 安徽未来十五年——《安徽省高速公路网规划修编(2020—2035年)》解读[J]. 中国公路, 2021(14): 24-25.
Editorial Department of China Highway. Next Fifteen Years of Anhui Province: Interpretation of 'Anhui Provincial Expressway Network Planning and Revision (2020—2035)' [J]. China Highway, 2021(14): 24-25.
- [2] 河南省人民政府. 《河南省高速公路网规划(2021—2035年)》政策解读[J]. 河南省人民政府公报, 2020(19): 2-18.
The People's Government of Henan Province. Policy Interpretation of 'Henan Provincial Expressway Network Planning (2021—2035)' [J]. Bulletin of the People's Government of Henan Province, 2020(19): 2-18.
- [3] 王开, 傅旭东, 王光谦. 桥墩壅水的计算方法比较[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(6): 53-55.
- WANG Kai, FU Xu-dong, WANG Guang-qian. Comparison of Existing Backwater Models for Bridge Piers in Subcritical Flows [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2006, 4(6): 53-55.
- [4] 陈海健. 桥梁防洪评价中壅水计算方法浅析[J]. 广东水利水电, 2019(7): 60-65.
CHEN Hai-jian. Brief Analysis of Backwater Calculating Method in Bridge Evaluation of Flood Control [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2019(7): 60-65.
- [5] 王恒山. 沙河密集桥梁群对河道行洪累积效应研究[J]. 人民长江, 2016, 47(21): 4-8.
WANG Heng-shan. Study on Accumulated Effect of High Density Bridges on Flood Discharge of Shahe River [J]. Yangtze River, 2016, 47(21): 4-8.
- [6] 吴时强, 薛万云, 吴修锋, 等. 城市行洪河道桥群阻水叠加效应量化研究[J]. 人民黄河, 2019, 41(10): 96-102.
WU Shi-qiang, XUE Wan-yun, WU Xiu-feng, et al. Study on Quantitative Water Blocking Superposition Effect of Bridge Group on Urban Flood Channel [J]. Yellow River, 2019, 41(10): 96-102.
- [7] 郑仰奇, 李怀恩, 张强, 等. 河道多桥连续壅水分析[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(3): 37-39.
ZHENG Yang-qi, LI Huai-en, ZHANG Qiang, et al. Analysis of Backwater on Multi-successive Bridges in River Course [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2005, 16(3): 37-39.
- [8] 吴泽宇, 蒋为群. 南水北调中线工程输水渠道桥梁水头损失影响分析[J]. 水利水电快报, 1997(15): 1-4.
WU Ze-yu, JIANG Wei-qun. Analysis on Impact of Bridge Head Loss in Water Conveyance Channel of Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 1997(15): 1-4.
- [9] 薛旂云. 桥墩密布的城市河道壅水高度及防洪对策研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
XUE Yi-yun. Study on Backwater Height and Flood Control Countermeasures in Urban Rivers with Dense Bridge Piers [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.
- [10] 邓绍云. 圆柱桩群绕流特性试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(4): 740-742, 842.
DENG Shao-yun. Study on Characteristics of Circumferential Motion of Cylinder Pile Cluster [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2011, 30(4): 740-742, 842.

- [11] JTG D60—2015, 公路桥涵设计通用规范 [S].
JTG D60—2015, General Specification for Design of Highway Bridges and Culverts [S].
- [12] 张佰战, 黄美兰, 孟军涛. 桥梁壅水曲线长度的计算 [J]. 铁道建筑, 2005 (5): 12–14.
ZHANG Bai-zhan, HUANG Mei-lan, MENG Jun-tao. Calculation of Curve Length for Bridge Backwater [J]. Railway Engineering, 2005 (5): 12–14.
- [13] 王玲玲, 张凤山, 唐洪武. 平原河道桥墩阻水比与壅水特性关系 [J]. 河海大学学报 (自然科学版), 2016, 44 (5): 386–392.
WANG Ling-ling, ZHANG Feng-shan, TANG Hong-wu. Relationship between Water-blocking Ratio and Backwater for Bridge Piers on Plain Rivers [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2016, 44 (5): 386–392.
- [14] 罗惕乾. 流体力学 [M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
LUO Ti-qian. Fluid Mechanics [M]. 4th edi. Beijing: Mechanical Industry Press, 2017.
- [15] 丁伟, 唐洪武, 戴文鸿, 等. 涉河桥梁阻水影响因素研究 [J]. 水利水运工程学报, 2011 (4): 52–56.
DING Wei, TANG Hong-wu, DAI Wen-hong, et al. On Resistance Factors of River Bridges [J]. Hydro-science and Engineering, 2011 (4): 52–56.
- [16] ETTEMA R, KIRKIL G, MUSTE M. Similitude of Large-scale Turbulence in Experiments on Local Scour at Cylinders [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 132 (1): 33–40.
- [17] SECKIN G, KNIGHT D W, ATABAY S, et al. Effect of the Froude Number on Assessment of the Bridge Afflux [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-water Management, 2008, 161 (2): 97–104.
- [18] 严建科, 焦臣, 沈波, 等. 顺水桥梁壅水影响因素试验研究 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2020, 37 (6): 44–48.
YAN Jian-ke, JIAO Chen, SHEN Bo, et al. Experimental Research on Influencing Factors of Backwater of Downstream Bridge [J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2020, 37 (6): 44–48.
- [19] 严军, 蔡显赫, 卢鹏, 等. 涉河正交桥墩壅水模型试验研究 [J]. 华北水利水电大学学报 (自然科学版), 2021, 42 (1): 60–67.
YAN Jun, CAI Xian-he, LU Peng, et al. Experimental Study on Backwater Model Test of Orthogonal Bridge Piers Wading River [J]. Journal of North China University of Water Resources and Hydro Power (Natural Science), 2021, 42 (1): 60–67.
- [20] 张金明, 何用, 何贞俊, 等. 涉水桥梁阻水比与上游水位壅高相关性研究 [J]. 人民珠江, 2015, 36 (1): 58–60.
ZHANG Jin-ming, HE Yong, HE Zhen-jun, et al. Study on Correlation between Water Resistance Ratio of Wading Bridges and High Upstream Water Level [J]. Pearl River, 2015, 36 (1): 58–60.
- [21] 高旭艳. 河道桥梁壅水的几种常见形式分析 [J]. 陕西水利水电技术, 2008 (1): 24–28.
GAO Xu-yan. Analysis on Several Common Forms of River Bridge Backwater [J]. Shaanxi Shuili Shuidian Jishu, 2008 (1): 24–28.