

西法城际铁路眉县跨渭河特大桥壅水分析

高原^{1,2}, 王文娥¹, 张维乐¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 宝鸡市河务管理处, 陕西 宝鸡 721008)

摘要: 渭河中游河道宽浅主槽窄深, 河床地形复杂, 防汛形势严峻, 修建跨河大桥会引起上游壅水, 加剧防汛安全隐患。通过拟建西法城际铁路眉县跨渭河特大桥工程实例, 针对区域新建、拟建桥梁多, 防洪评价内容混乱, 壅水分析方法各异的问题, 对物理模型试验、数值模拟和经验简化公式法分别进行了探讨分析, 确定采用简化公式法进行壅水计算。通过对4种常用桥梁壅水计算经验公式比选, 确定采用铁路和公路水文规范收录公式计算, 经过查阅资料, 根据桥址实际情况分析, 该大桥100年一遇洪水壅水高度可采用《公路工程水文勘测设计规范》推荐的曹瑞章公式计算, 壅水高度为0.27 m, 通过连续桥梁壅水计算及桥梁底高程复核, 确定了工程的安全性。本次研究可为渭河中游安全行洪时桥梁壅水计算提供可靠的方法和依据。

关键词: 桥梁; 壅水分析; 桥底高程; 渭河

中图分类号: TV135

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)04-0167-05

Backwater analysis of Mei County across Wei River Bridge of Xi'an to Famen Temple Inter-city Railway

GAO Yuan^{1,2}, WANG Wene¹, ZHANG Weile¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2. Baoji River Management Office, Baoji 721008, China)

Abstract: The middle reaches of Wei River are wide and main channel narrow deep which flood control situation is grim. Through the example of the proposed construction of the Xi'an to Famen Temple Inter-city Railway Bridge, the flood control evaluation content, backwater analysis of different problems, the physical model test, numerical simulation and simplified experience formula method, respectively, are discussed in this paper. In addition, simplified formula method was selected to calculate the backwater. The railway and highway hydrological specifications included in the formula was chosen after four empirical formulas are compared and proved. The height of backwater of this bridge due to flood once in a hundred years can be calculated by Cao Ruizhang formula recommended by "Code for hydrological survey and design of highway engineering" after consulting data and analyzes the actual situation of the bridge site, and the height is 0.27 m. The safety of the project is confirmed by the calculation of the backwater of the continuous bridge and the check of the bottom height of the bridge. This study provides a reliable method and basis for the calculation of backwater of Bridges in safe flood passage in the middle reaches of Wei River.

Key words: bridge; backwater analysis; bridge's bottom height; Weihe River

1 研究背景

汛期河道上游多水库同时开闸泄洪, 城市排水系统因容纳能力有限迅速将雨、污水排入河流, 这将加速河道水位的上升, 增加峰值流量, 加重沿城市河

流的防洪负担^[1]。北方地区平原的河流总体上具有宽、浅、缓坡的特点, 水力特征复杂^[2], 如渭河中游河道宽浅而主槽窄深, 河道比降略大于平原地区。修筑于渭河中下游的桥梁, 孔跨间距多为30~35 m, 桥墩密集, 束窄河道过流断面的现象在汛期尤为明

收稿日期: 2019-04-10; 修回日期: 2019-05-06

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503125); "十三五"国家重点研发计划项目(2016YFC0400203)

作者简介: 高原(1988-), 男, 陕西户县人, 硕士研究生, 主要从事水利工程施工工作。

通讯作者: 王文娥(1975-), 女, 河南孟州人, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事流体机械与流体力学、节水灌溉理论与技术方面的教学与研究工作。

显,导致洪峰来临时河道壅水影响较大^[3-4]。

随着陕西省全面建设小康社会和大力推进城市化进程,各地城市桥梁进入建设高潮。仅渭河中游宝鸡市段在原有 17 座桥梁的基础上新建、拟建桥梁 9 座,在大力发展交通网络的同时,桥梁的安全问题日益受到重视,桥梁工程防洪影响评价也成为桥梁建设不可缺少的一部分,桥前壅水分析评价是其中的主要内容之一^[5]。桥前壅水研究主要有简化公式法、数值模拟计算和水工模型试验 3 类方法^[6]。目前,物理模型能够模拟水流形态和桥前水面壅高,得到直观的模拟数据,但因工序复杂和经验性限制难以推广;简化公式法简便快捷,使用广泛,但对于实际工程中复杂的天然河道环境,不同桥梁应选用合适的公式计算,避免较大误差^[7-8];随着计算机技术的发展,学者们针对河道数值模拟计算^[9-10]进行了探讨研究,目前常用的模拟软件有 SMS、FLUENT、HEC-RAS、FLOW-3D 等,能够准确模拟出桥梁壅水、回水、冲刷等,但是程序开发因素和复杂的边界条件^[11]导致计算壅水高度均比实际偏小^[12-14],直接应用于工程将造成很大的安全隐患。

本文以西安至法门寺城际铁路眉县跨渭河特大桥

桥壅水为研究对象,探讨渭河中游的跨河桥梁壅水分析方法,为工程实际应用提供理论参考。

2 工程概况

拟建西安至法门寺城际铁路眉县跨渭河特大桥位于陕西省宝鸡市眉县县城东北 2 km 的渭河中游干流上,跨河左(北)岸位于眉县常兴镇河池村西南,跨河右(南)岸位于眉县县城(首善镇)铁家沟村。拟建大桥全长 3 701.43 m,轴线与河道主流线夹角约 80°,为减小阻水效应,桥墩轴线与水流流向呈 5°夹角,河道内布设桥墩 9 个,采用圆端形空心桥墩,桥墩底部宽 6.12~6.68 m,长 10.32~10.48 m。墩台基础均为钻孔灌注摩擦桩基础。桥梁与两岸堤顶道路采用立交方案。桥位选择从眉县滨河新区渭河大桥(上游)及西宝客专常兴渭河铁路桥(下游)中间穿过,距上桥 1.8 km,下桥 2 km。本桥被设计用来抵御 100 年一遇的洪水,并根据 300 年一遇的洪水进行校核检查,其洪水峰值流量分别为 7 530 和 9 650 m³/s。桥位处河道左岸堤防按 50 年一遇防洪标准设防,右岸堤防按 30 年一遇防洪标准设防。桥位纵向剖面布置图见图 1。

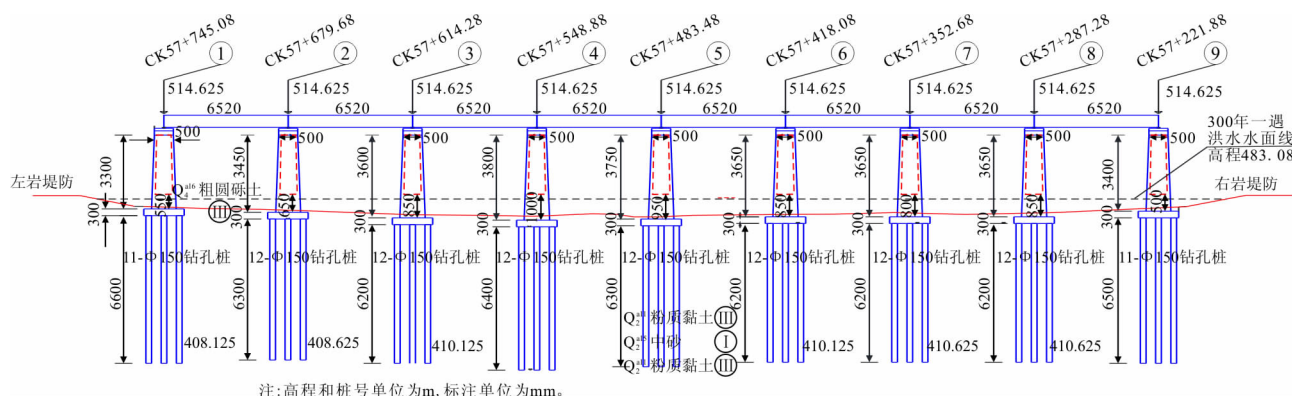


图 1 西法城际铁路眉县跨渭河特大桥桥位纵向剖面布置图

3 桥梁壅水分析

3.1 计算方法

基于能量守恒原理,简化公式法是在多年的野外勘测研究和大量实验数据的基础上建立的经验公式。其具有计算简单、资料易于取得、不同知识层次从业人员均易于掌握和应用的优点,在我国实际项目和各类野外勘测设计中得到广泛应用。但各种方法均有适用范围,针对眉县跨渭河特大桥建设造成的壅水高度需要分析比较这几种方法的适用性,确定较准确的计算方法。当前在防洪评价时桥梁常用的回水计算简化公式有以下几种:

(1) 实用水力学公式^[15]:

$$\Delta Z = \frac{\alpha v^2}{2g} \left[\left(\frac{B}{\xi \sum b} \right)^2 - \left(\frac{h}{h + \Delta Z} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: ΔZ 为桥前最大壅水高度,m; α 为动能校核系数; ξ 为过水断面收缩系数; v 为建桥前断面平均流速,m/s; h 为建桥前断面平均水深,m; $\sum b$ 为建桥后过水断面总宽,即河宽减去桥墩总宽,m。

该式运用迭代法计算壅水高度 ΔZ 。前苏联学者 B. B. Lebedev 于 1958 年编制的《桥涵设计中水文调查与计算》中引入了该公式的近似式。

(2) 无底坎宽顶堰公式:

$$Q = \sigma m b \sqrt{2g} H_0^{3/2} \quad (2)$$

式中: Q 为过桥流量, m^3/s ; σ 为淹没系数; m 为流量系数; b 为桥净长度, m ; H_0 为上游流速水头, m 。

在理想状况下,桥梁孔跨处底坎高度为零,桥孔溢流可视为无坎平底宽顶堰溢流。因此,采用无底坎宽顶堰的原理,可以计算桥梁过流能力和壅水高度。已知过桥流量,算出上游总水头,壅水高度可根据上游断面和水深求得。

(3)《铁路工程水文勘测设计规范》(TB10017-99)推荐的 DAubuioson 公式^[16]:

$$\Delta Z_M = \eta (\bar{V}_M^2 - \bar{V}_O^2) \quad (3)$$

式中: ΔZ_M 为桥前最大壅水高度, m ; η 为水流进入桥孔阻力系数,与河段特征有关; $\bar{V}_M$ 为桥下平均流速, m/s ,与设计流速和冲刷系数有关; $\bar{V}_O$ 为断面平均流速, m/s 。

该式来源于伯努利方程,即桥上游的壅水高度等于最大回水峰值所在区段的流速水头与正常水位以下水头的区间之差,忽略了摩擦能量损失,推导出的壅水计算简化公式。

(4)《公路工程水文勘测设计规范》(JTGC30-2015)中的曹瑞章公式:

$$\Delta Z = \frac{K}{2g} (\bar{V}_M^2 - \bar{V}_{OM}^2) \quad (4)$$

式中: ΔZ 为桥前最大壅水高度, m ; K 为壅水系数; $\bar{V}_M$ 为桥下水流平均流速, m/s ; $\bar{V}_{OM}$ 为天然状态下水流平均流速, m/s 。

除目前应用最多的简化公式法,国内学者在研究桥前壅水时尝试了不同的计算方法,如黄河水利科学研究院对郑西铁路客运专线渭南二跨渭河特大桥进行了模型试验^[13];朱龙等^[12]在大石河水系马刨泉河桥前壅水分析时采用美国陆军工程兵团开发的 HEC-RAS 对建桥前后的河道进行数值模拟计算;高幼华等^[14]在安乡河大桥桥前壅水计算时采用了数学模型法进行了计算。

3.2 方法比选

考虑到各公式的原理及侧重点,对上述公式(1)~(4)进行分析比较:

公式(1):面向应用于实际工程中桥梁洪水评价的壅高、回水计算,不同于理想状态下的模型试验,河底地形复杂,要求更高的精度级别,实用水力学公式只考虑了建桥后桥位横截面宽度的变化,但对桥梁修建后对自然河流地形的影响未做考虑。拟建桥梁地处渭河中游黄土台塬区,河槽地形复杂,河床桥梁阻水影响较大,造成误差增大,不适于本次计算。

公式(2):当水流通过桥孔时,由于桥柱和桥台等的横向约束,缩窄了过流断面,且桥梁孔跨处底坎高度为零,桥孔过流可视为宽顶堰溢流,壅水高度可根据无底坎宽顶堰的原理进行计算。该公式相较实用水力学公式,充分考虑了淹没系数、水流形态和桥墩横向收缩比,形式较为合理。缺点是该式使用条件苛刻,其桥宽与桥上游的水深之比须在 0.67~2.5 区间内,壅水位置须在 3~5 倍的上游水深之间^[17],在非矩形非平底的天然河床断面,计算过于复杂,不适用于特大桥的壅水计算,本次不予考虑。

公式(3):《铁路工程水文勘测设计规范》推荐的 DAubuioson 公式式样简单,参数少且易于选择,是一种适用于各种河流的重要分析方法。该公式缺点是系数 η 的值没有足够精确的确定方法,一般应在 0.05~0.15 之间取值,其上、下限相差 3 倍,桥梁壅水高度会随着 η 的不同取值而产生较大波动。 η 值选取详见表 1。本次计算根据桥位断面实际情况分析, η 取值为 0.12。

表 1 阻力系数 η 值(《铁路工程水文勘测设计规范》)^[16]

桥墩阻断流量与设计流量百分比/%	<10	11~30	31~50	>50
η 值	0.05	0.07	0.10	0.15

公式(4):《公路工程水文勘测设计规范》推荐的曹瑞章公式前身是铁道部科研院陆浩、曹瑞章等根据我国 40 多座桥梁实测资料结合模型试验不断探索改进而制定的,后于 2000 年经曹瑞章简化,得到曹瑞章公式^[18]。该公式考虑了桥梁施工前后的断面变化、冲淤对河床的影响,模型试验和天然壅水数据验证表明,该公式对各种条件下的河流具有良好的适应性。缺点是对桥墩形状影响考虑不足,河床质中值粒径取值主要凭借经验。

根据以上分析,对于拟建的西法城际铁路眉县跨渭河特大桥壅水分析可以采用《铁路工程水文勘测设计规范》及《公路工程水文勘测设计规范》推荐公式进行计算。

3.3 壅水计算结果分析

根据眉县跨渭河特大桥工程实际情况,确定相关参数,按《铁路工程水文勘测设计规范》及《公路工程水文勘测设计规范》推荐公式进行壅水计算,结果详见表 2。

从表 2 可以看出,100 年一遇洪水条件下铁路规范公式计算壅水高度为 0.19 m,公路规范公式计算壅水高度为 0.27 m。西安至法门寺城际铁路眉县跨渭河特大桥桥柱形状简单,为高低截面面积变

化较小的椭圆柱形,底墩全部位于深泓线以下,且位于泥沙含量较大的冲淤型河道,河床质组成较为单一,出于安全考虑,建议采用公路规范公式计算结果 0.27 m 作为最终结果。

表 2 桥位壅水高度计算表

设计洪水频率/%	设计洪水流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	建桥前过水面面积/ m^2	建桥后过水面面积/ m^2	铁路规范公式壅高/m	公路规范公式壅高/m
0.33	9650	3243	2944	0.23	0.29
1	7350	2781	2521	0.19	0.27
2	6560	2553	2315	0.17	0.25
3.33	5920	2398	2172	0.16	0.23

桥前壅水公式的经验因素较多,不同计算方法所得结果差异巨大,应根据现场实际选择使用。高幼华等^[14]在安乡河大桥桥前壅水计算时采用了数学模型法进行了计算,其结果比实际桥渡最大壅水高度小 4~5 倍;朱龙等^[12]在大石河水系马刨泉河桥前壅水分析时采用美国陆军工程兵团开发的 HEC-RAS 对建桥前后的河道进行数值模拟计算,其结果比实际桥渡最大壅水高度小 7 倍;黄河水利科学研究院对郑西铁路客运专线渭南二跨渭河特大桥壅水进行了模型试验,其垂直比例尺为 50,水平比例尺为 400,模型砂的选择与铺设难以与天然河道完全一致,其产生的误差就会在数十厘米,壅水高度只有 27 cm,试验结果难以让人信服。归根结底,以上方法或桥梁、桥墩实际尺寸相对于模型的计算网格来说偏小,或边界条件差异较大,要应用于实际工程仍需大量研究。

3.4 连续桥梁壅水分析

桥梁壅水计算一般是按照单个桥梁进行计算的,近年来随着涉河桥梁建设的增多,连续桥梁相互间壅水影响逐步受到重视。拟建的眉县跨渭河特大桥上游 1.8 km 处是滨河新区渭河大桥,距下游西宝客专常兴渭河铁路桥 2 km,拟建的跨渭河特大桥与常兴渭河铁路桥及滨河新区渭河大桥是否会发生壅水影响,需要进一步分析,避免连续多桥梁壅水叠加效应影响到上游桥的安全。

桥梁的回水由下游向上游推进,多座桥梁的壅水叠加计算应自下游向上游依次进行,依据两桥间距及下游桥壅水曲线之间的长度关系进行判断,并逐步向上游进行各个桥梁的壅水计算^[19]。壅水曲线长度公式^[20]计算如下:

$$L = \frac{2\Delta Z}{i} \quad (5)$$

式中: L 为壅水长度, m; ΔZ 为桥前最大壅水高度, m; i 为桥址河段天然水面比降,该河段天然水面比降取 1.12245‰。

最大壅水断面以上壅水区任一断面 1-1 的壅水高度 ΔZ_{1-1} 可以按下式计算:

$$\Delta Z_{1-1} = \left(1 - \frac{i \cdot l}{2\Delta Z}\right)^2 \cdot \Delta Z \quad (6)$$

式中: l 为断面 1-1 至最大壅水断面之间距离, m。

根据表 2 中公路规范公式求得壅水高度进行计算,该河段 100 年一遇洪水壅水长度为 444.28 m, 300 年一遇洪水壅水长度为 481.09 m。

西安至法门寺城际铁路眉县跨渭河特大桥距上游眉县滨河新区渭河大桥 1.8 km,距下游西宝客专常兴渭河铁路桥 2 km,壅水远不足以影响上游滨河新区渭河大桥,通过分析可知 3 座桥之间壅水无互相影响。

4 梁底高程复核

按照行洪要求,以设计洪水位确定桥梁底部高程,桥梁的最低下弦高程 $H_{\min}$ 可根据《公路桥涵设计手册·桥位设计》^[20] 规定,按不通航河流的桥面下弦高程公式计算,公式为:

$$H_{\min} = H_s + \sum \Delta h + \Delta h_s \quad (7)$$

式中: H_s 为桥位设计洪水位, m; $\sum \Delta h$ 为壅水高度、风壅增水高度、河湾超高、床面淤高、漂浮物高度总和, m; Δh_s 为桥下净空高度安全值, m。

$\sum \Delta h$ 中风壅增水高度参考《堤防工程设计规范》(GB50286-2013)附录 C 莆田实验站公式计算,公式为:

$$e = \frac{KV^2 F}{2gd} \cos \beta \quad (8)$$

式中: e 为风壅水面高度, m; K 为综合摩阻系数,取 3.6×10^{-6} ; V 为风速, m/s; F 为风区吹程长度, m; d 为水域平均深度, m; β 为风向与垂直体轴线夹角。

依据《宝鸡市实用水文手册》,桥位所在地区最大风速为 16.0 m/s;风向 ESE,法线夹角为 $45^\circ \sim 70^\circ$;风区吹程长度,经统计分析取 1 100 m。桥下壅水高度取桥前最大壅水高度的一半,冲淤平衡河段床面淤高取 0,波浪高度统一取 0.39 m,漂浮物高度取 0.2 m,桥下净空安全值根据规范取 0.5 m,按照不同频率设计洪水将有关参数带入计算,得到拟建桥梁梁底复核成果,见表 3。

由表 3 可知,300 年一遇洪水时梁底安全高差为 30.3 m,100 年一遇洪水时梁底安全高差为 30.99

m。由此可知,本次桥梁建设后,壅水等因素对桥梁安全无影响。

表 3 建桥梁梁底复核成果表

设计洪水 频率/%	设计 水位	桥下壅 水高度	风壅增 水高度	波浪 高度	漂浮物 高度	安全 超高	最低梁 底高程	设计梁 底高程	高差
0.33	483.08	0.150	0.01	0.39	0.2	0.5	484.33	514.625	30.30
1	482.40	0.140	0.01	0.39	0.2	0.5	483.64	514.625	30.99
2	482.04	0.127	0.01	0.39	0.2	0.5	483.27	514.625	31.36
3.33	481.75	0.123	0.01	0.39	0.2	0.5	482.97	514.625	31.65

5 结论与建议

(1)通过 4 种桥梁壅水计算方法分析,拟建的眉县跨渭河特大桥采用《公路工程水文勘测设计规范》推荐曹瑞章公式计算所得壅水较高,D'Aubuioson 公式计算结果中 300 年一遇洪水的壅水计算结果与之比较接近,从安全角度考度,渭河中游段桥梁桥墩构造单一,宜优先采用《公路工程水文勘测设计规范》推荐的曹瑞章公式进行壅水计算。《铁路工程水文勘测设计规范》中的 D'Aubuioson 公式在我国公路、铁路工程中先后使用 50 余年,计算结果一般尚能比较符合实际,在桥梁墩形复杂、河床组成多样的河段宜优先采用其进行初步计算。

(2)通过连续桥梁壅水分析,拟建的眉县跨渭河特大桥与上游 1.8 km 处的滨河新区渭河大桥、下游 2km 处的西宝客专常兴渭河铁路桥不会发生壅水叠加效应。

(3)通过梁底高程复核,300 年一遇洪水发生时,拟建桥梁梁底安全高差超过 30 m,本次桥梁建设后,壅水等因素对桥梁安全无影响。

近 5 年来,渭河中游涉河工程急剧增加,各类工程项目挤占河道,仅宝鸡市在堤防内修筑的大小公园有 10 余处,缩窄河道行洪断面宽度 40~350 m 不等,河道形态剧变,严重影响行洪安全。但相关部门在进行防洪评价计算时,仍采用旧有水文、气象资料,新老工程能否满足防洪需求,有待考证。建议复核 1 号、9 号桥墩开挖基坑与两岸堤防迎水面坡脚关系,避免对堤防造成破坏。建议加强监测研究,以适应目前高速发展的建设需求,进一步探索易于操作、符合国情的壅水计算方法,提高桥梁的安全性。

参考文献:

[1] 王虹,李昌志,程晓陶.流域城市化进程中中雨虹综合管理
量化关系分析[J].水利学报,2015,46(3):271-279.
[2] 许唯临.复式河道漫滩水流计算方法研究[J].水利学
报,2002,33(6):21-26+31.
[3] SECKIN G , YURTAL R , HAKTANIR T . Contraction

and expansion losses through bridge constrictions[J]. Jour-
nal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(5):546-549.
[4] WARDHANA K , HADIPRIONO F C . Analysis of recent
bridge failures in the United States[J]. Journal of Perform-
ance of Constructed Facilities, 2003, 17(3):144-150.
[5] 李淑惠,许艳杰.辽中县蒲河大桥防洪评价编制关键问
题[J].水利规划与设计,2017(7):6-8.
[6] HUNT J , BRUNNER G W , LAROCK B E . Flow transi-
tions in bridge backwater analysis[J]. Journal of Hydraulic
Engineering, 1997, 125(9):981-983.
[7] 郭晓晨,陈文学,穆祥鹏,等.南水北调中线干渠桥墩壅
水计算公式的选择[J].南水北调与水利科技,2009,7
(6):108-112.
[8] 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.
[9] 唐洪武,闫静,肖洋,等.含植物河道曼宁阻力系数的研
究[J].水利学报,2007,38(11):1347-1353.
[10] 曾玉红,槐文信,张健,等.非淹没刚性植被流动阻力
研究[J].水利学报,2011,42(7):834-838+847.
[11] 任梅芳,徐宗学,苏广新.基于二维水动力模型与经验
公式的桥梁壅水计算及其对比分析[J].水力发电学
报,2017,36(5):78-87.
[12] 朱龙,赵珊珊.桥前不同壅水计算方法的比较与分析
[J].北京水务,2017(5):52-54.
[13] 贺斌乐.关于郑西铁路客运专线渭南二跨渭河特大桥的
壅水分析[J].中国水运(学术版),2007(10):146-147.
[14] 高幼华,范北林.黄河桥前壅水公式在安乡河特大桥的
应用[J].人民黄河,2009,31(8):15-17.
[15] 陈稳科.清水塘水电站二期过水围堰的水力学设计
[C]// 高坝建设与运行管理的技术进展——中国大坝
协会 2014 学术年会,2014.
[16] 中华人民共和国铁道部.铁路工程水文勘测规范:TB
10017-99[S].北京:中国铁道出版社,1999.
[17] 李江海.桥梁防洪评价壅水计算方法浅析[J].山西水
利,2010,26(11):9-10.
[18] 梁小刚.关于桥梁壅水计算中几种经验公式应用的探
讨[J].治淮,2011(11):73-75.
[19] 赵琴,杨小林,严敬.工程流体力学(第2版)[M].
重庆:重庆大学出版社,2014.
[20] 高冬光.公路桥涵设计手册·桥位设计[M].北京:人
民交通出版社,2001.