

溃坝洪水对下游高速铁路的影响计算

赵多海¹, 夏清炳², 杨双林², 廖志军¹, 李志彩³

¹湖北水神科技有限公司, 湖北 武汉

²湖北省水文水资源局, 湖北 武汉

³中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京

Email: zdh140127@outlook.com

收稿日期: 2021年3月18日; 录用日期: 2021年4月21日; 发布日期: 2021年4月30日

摘要

溃坝洪水对下游桥梁安全影响重大。本文以实际工程设计为案例, 以溃坝经验公式、曼宁公式和水位流量关系曲线为工具, 通过对经验公式有关参数及边界条件的分析和率定, 计算溃坝流量, 根据洪水演变规律, 采用两种方法推算下游桥址断面最高洪水位和洪峰传播时间, 为桥梁防洪安全设计提供重要依据。文中的思路和方法, 对缺乏水文资料地区溃坝洪水计算具有一定参考与借鉴价值。

关键词

溃坝洪水, 水文计算, 桥梁安全

Calculation of Influence of Dam-Break Flood on Downstream High-Speed Railway

Duohai Zhao¹, Qingbing Xia², Shuanglin Yang², Zhijun Liao¹, Zhicai Li³

¹Hubei Shuishen Technology Co., Ltd., Wuhan Hubei

²Hubei Hydrographic and Water Resources Bureau, Wuhan Hubei

³China Railway Engineering Design Consulting Group Co., Ltd., Beijing

Email: zdh140127@outlook.com

Received: Mar. 18th, 2021; accepted: Apr. 21st, 2021; published: Apr. 30th, 2021

Abstract

The dam break flood has a major impact on the safety of downstream bridges. This paper takes actual engineering design as a case, uses dam-break empirical formula, Manning's formula, and water level-discharge

作者简介: 赵多海(1992.6), 男, 毕业于三峡大学, 从事于水文与水资源相关工作。

文章引用: 赵多海, 夏清炳, 杨双林, 廖志军, 李志彩. 溃坝洪水对下游高速铁路的影响计算[J]. 水资源研究, 2021, 10(2): 213-218. DOI: 10.12677/jwrr.2021.102022

relationship curve as tools, and calculates the dam-break discharge by analyzing and calibrating the relevant parameters and boundary conditions of the empirical formula. According to the law of flood evolution, two methods are used to calculate the highest flood level and peak propagation time of the downstream bridge site section, and provide an important basis for the design of bridge flood control safety. This study has reference value for the calculation of dam-break flood in areas lacking hydrological data.

Keywords

Dam-Break Flood, Hydrological Calculations, Bridge Safety

Copyright © 2021 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

根据拟建沿江高速铁路线路设计, 荆门至宜昌段线路从马河水库下游 740 m 穿过, 由于该水库已达到使用年限, 出于安全考虑, 对该水库进行溃坝流量分析计算。通过对溃坝洪水的分析, 论证桥梁设计高程及桥墩承台掩埋深度等问题。采用河海大学编著的《水文水利计算》的溃坝流量经验公式[1], 计算溃坝洪水与桥址断面最大溃坝流量。由于该区域无实测流量、水位和河道断面等资料; 采用曼宁公式[2]推求桥址水位流量关系曲线, 计算溃坝洪水桥址的最高洪水位, 并采用黄河水利委员会黄河水利科学研究院的经验值与 1999 版《铁路工程水文勘测设计规范》(TB 10017-99) [3]的经验值进行验证, 为桥梁高程设计提供参考值。

2. 基本情况

2.1. 项目概况

沿江高铁的荆门至宜昌段线路途经荆门市漳河新区、宜昌市所辖当阳市、夷陵区。线路自荆门西站引出向西南, 跨漳河, 经庙前镇南侧, 跨沮漳河, 于上壕沟附近设当阳西站, 出站后向西南走行, 于小鸦路蔡家畈附近设宜昌北站, 出站后向西南至闵家冲线路所, 连接渝宜铁路, 正线全长 78.475 km。其中桥梁 49 座, 总长度 48.496 km; 隧道 19 座, 总长度 15.878 km; 桥隧比 82.03%。

2.2. 工程概况

马河水库位于湖北省宜昌市当阳市王店镇, 为小(1)型水库, 水库主要以供水灌溉为主, 所在河流为玛瑙河。马河水库大坝结构类型为心墙坝, 主坝最大坝高 16.1 m, 坝址控制流域面积 9 km², 坝顶高程为 285 m。马河水库设计洪水位 283.9 m, 以 100 年一遇洪水作为设计标准; 校核洪水位为 284.49 m, 以 300 年一遇洪水作为设计标准。马河水库总库容 337 万 m³, 调洪库容 50.2 万 m³, 兴利库容 272 万 m³, 死库容 13.8 万 m³。马河水库于 1990 年建成, 设计使用年限为 30 年, 现以达到最长使用年限。

沿江高速铁路荆门至宜昌段在马河水库下游 740 m 处采用(40 + 64 + 40) m 连续梁方式跨越马河水库泄洪道, 桥型如图 2。

2.3. 工程防洪标准

拟建沿江高速铁路等级为 I 级, 依据《防洪标准》(GB 50201-2014)、《铁路工程水文勘测设计规范》(TB 10017-99)和《铁路桥涵设计基本规范》(TB 10002.1-2005)等规范的要求, 特大桥和大桥按照 100 年一遇洪水标

准设计、300年一遇洪水标准校核。

马河水库设计洪水位 283.9 m (100年一遇), 校核洪水位为 284.49 m (300年一遇), 防洪标准为 300年一遇的洪水。

2.4. 水文数据

马河水库所在河流为玛瑙河, 根据湖北省河流水系划分, 该河流属于长江中游上段干流北岸水系。玛瑙河河长 63.7 km, 集水面积 776 km², 河道坡降 2.1‰, 流域平局海拔 140 m, 河流弯曲系数 1.3, 河网密度 0.4。该河流流域内无水文站、雨量站, 水文资料较为匮乏。

3. 溃坝洪水计算

3.1. 坝址处最大溃坝流量计算

溃坝过程可分为瞬时全溃, 部分溃坝和逐渐全溃三种。导致溃坝的因素非常复杂, 难于事先全面考虑, 预估溃坝洪水时应考虑最不利条件下造成的后果, 因此, 选取三种溃坝方式中后果最严重的瞬时全溃方式, 作为本文的溃坝方式。

溃坝洪水流量计算方式有很多种, 本文选用河海大学在《水文水利计算》(第2版)一书中使用的经验公式来计算溃坝时坝址处的洪水最大流量, 计算公式为:

$$Q_m = 0.27\sqrt{g} \left(\frac{L}{B}\right)^{\frac{1}{10}} \left(\frac{B}{b}\right)^{\frac{1}{3}} b(H - K'h)^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中: Q_m 表示坝址处溃坝最大流量, m³/s; B 表示坝址处的库面宽度, m; H 表示坝前水深, m; L 表示库区长度, m; h 表示溃口处残留坝体的平均高度, m; 出于安全考虑, 选取 $h = 0$; b 表示溃口的平均宽度, m; K' 为经验系数, 计算公式如下:

$$K' = 1.4 \left(\frac{bh}{BH}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

特别地, 当溃坝时水库蓄水量 $V \geq 100$ 万 m³时, b 采用如下公式计算:

$$b = k_1 V^{\frac{1}{4}} B^{\frac{1}{7}} H^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中: k_1 表示坝体的材质系数, 本文坝体为黏土心墙, 因此 k_1 取 1.19;

此外, 当溃坝时水库的蓄水量 $V < 100$ 万 m³时, b 采用如下公式计算:

$$b = k_2 (VH)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

式中: k_2 表征坝体施工和质量管理的的好坏程度, 施工和管理质量较好时 k_2 取 6.6, 较差时则取 9.1。

实验表明: 库区长度大于五倍的坝址处的库面宽度, 即 $L > 5B$ 后, 其影响不再增加, 故计算中 L/B 大于 5 时, 令 $L/B = 5$;

经过实地测量已知, 马河水库坝顶高程 285 m, 坝长 158 m, 坝前水深 14 m, 库区长度 1500 m, 出于安全考虑, 溃口处残留坝体平均高度 $h = 0$, 坝址处的库面宽度 $B = 158$ m, 经计算得, 溃口平均宽度 $b = 42.16$ m, 坝址处溃坝时最大流量 $Q_m = 3407.411$ m³/s。

3.2. 桥址处溃坝最大流量计算

溃坝后, 坝址洪水经过河道演进, 传播到桥址处, 洪水过程经过河道调蓄作用发生了变化, 水库坝址处的

洪峰与桥址处的洪峰并不一致。本文选取经验公式计算桥址处最大洪水流量：

$$Q_{m,l} = \frac{V}{\frac{V}{Q_m} + \frac{l}{k_v v}} \quad (5)$$

式中： Q_m 表示坝址处溃坝最大流量， m^3/s ； $Q_{m,l}$ 表示桥址处最大流量， m^3/s ； V 表示溃坝时水库有效蓄水容积， m^3 ；出于安全考虑，本文按照总库容计算； v 表示河道断面最大平均流速， m/s ； k_v 表示经验系数； $k_v v$ 表示洪水传播速度。根据黄河水利委员会黄河水利科学研究所提供的经验值， $k_v v$ 在不同地形中选取不同数值：山区河道 7.15 m/s ，半山区河道 4.76 m/s ，平原河道 3.13 m/s 。

桥址处距马河水库坝址处河道距离为 740 m ，使用上述公式计算溃坝时桥址处最大流量，经计算得，桥址处最大流量为 $Q_{m,l} = 3084.61 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

3.3. 溃坝洪水桥址处最高水位计算与验证

1) 曼宁公式

曼宁公式在计算山区性河流，尤其是在计算工程点位上下游一定范围内较为顺直的山区性河道的水位流量关系曲线中有较好的效果。曼宁公式计算公式如下：

$$Q = \frac{A}{n} R^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中： Q 为洪峰流量， m^3/s ； n 为河道糙率； I 为水面比降； A 为有效过水断面面积， m^2 ； R 为水力半径， m 。

此河段属于山区性天然河道，由于该河道处于无水状态，无法获取该河道水面比降特征值，因此本计算水面比降采取河道坡降值，从 1998 年湖北省水文水资源局编写的《湖北河流集》[4]一书中查得河道坡降为 2.1% 。根据现场勘测情况：该河段属于顺直，下游略有扩撒，水流通畅，河底较平顺，河床有稀疏杂草的状态。查阅 1999 年铁道部第三勘测设计院出版的中华人民共和国行业标准《铁路工程水文勘测设计规范》(TB 10017-99)中附录 D 天然河道洪水糙率系数表，得该河道糙率为 0.02 。

根据率定参数，用曼宁公式计算此断面水位流量关系曲线见图 1。水位 y 与流量 x 的关系可近似表示为 $y = 0.0021x + 248.72$ 。根据前文计算可知，溃坝时桥址处最大流量为 $Q_{m,l} = 3084.61 \text{ m}^3/\text{s}$ ，代入水位流量关系公式得出，最高水位为 255.36 m 。

2) 黄河水利委员会黄河水利科学研究所的经验值

马河水库下游河道类型属于山区河道，根据前文所述，故本文取 $v = 7.15 \text{ m/s}$ 。溃坝时桥址处最大流量发生时，桥址处过水断面面积为 431.41 m^2 。图 2 展示了桥址处河道断面的断面图，根据此断面图，计算得到水位 - 断面面积 - 流量关系表，如表 1 所示。

此外，点绘水位与流量关系散点图后，使用一次曲线拟合该关系，得到如图 1 所示曲线，水位 y 与流量 x 的关系可近似表示为 $y = 0.0019x + 248.88$ 。

根据前文计算可知，溃坝时桥址处最大流量为 $Q_{m,l} = 3084.61 \text{ m}^3/\text{s}$ ，可得溃坝时桥址处最高水位为 254.9 m 。

由于，桥址的最高洪水水位对桥梁高程设计至关重要，因此本文采用黄河水利委员会黄河水利科学研究所的经验值对曼宁公式进行验证，两种方法结果相差 0.46 m 。

误差分析：曼宁公式中河道糙率以偏安全的角度考虑采用最大值，以及河道水面比降参数采用河道坡降值，两者因素的原因造成了曼宁公式与黄河水利委员会黄河水利科学研究所的经验公式计算的结果有一定误差。

通过对曼宁公式计算得桥址最高水位 255.3 m ，反推得出流速 $v = 7.35 \text{ m/s}$ 。查阅 1999 年铁道部第三勘测设计院出版的中华人民共和国行业标准《铁路工程水文勘测设计规范》(TB 10017-99)中 $k_v v$ 值为 $3.3 \text{ m/s} \sim 7.5 \text{ m/s}$

之间。由此可知，曼宁公式计算结果合理。偏安全考虑，该桥梁底板高程采用曼宁公式计算得最高洪水水位 255.3 m 为参考值。

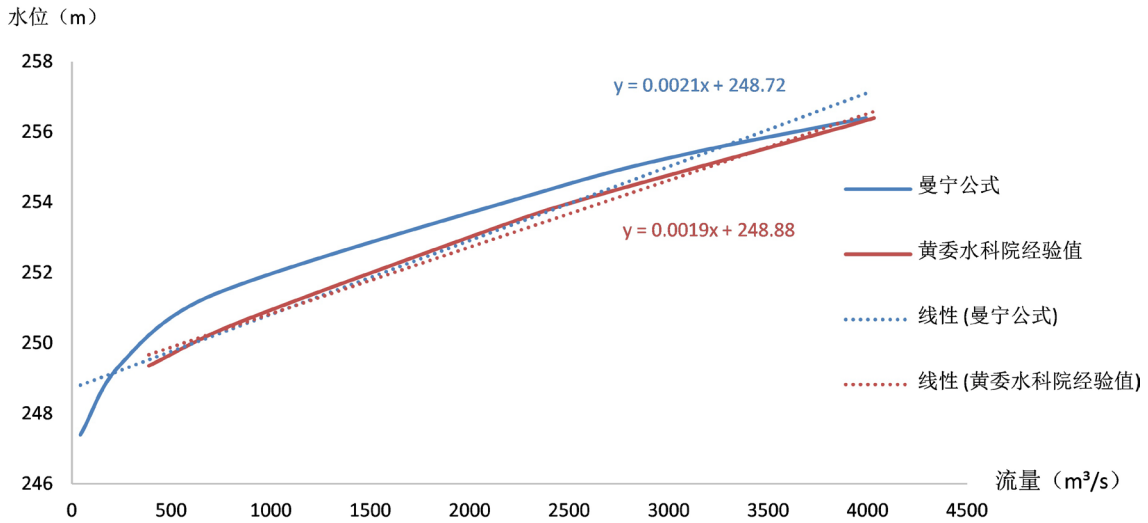


Figure 1. Water level-flow relationship curve
图 1. 水位 - 流量关系曲线

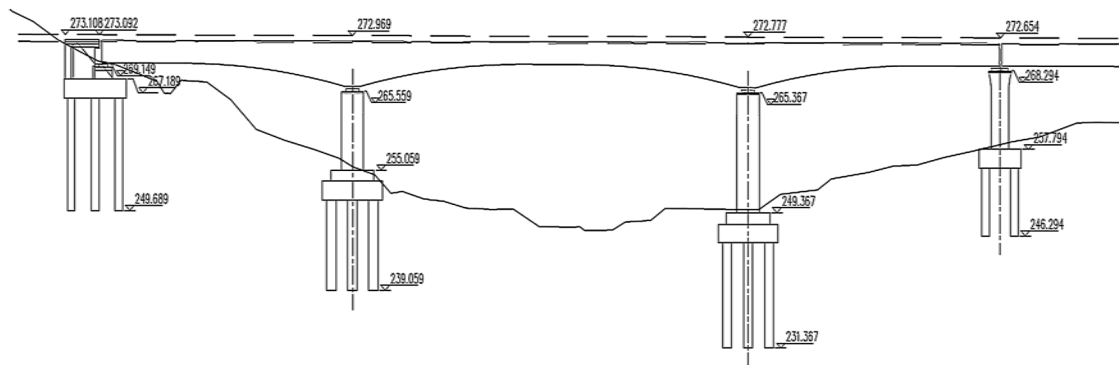


Figure 2. Cross-sectional view from the bridge site
图 2. 桥址处断面图

Table 1. Relationship between water level-section area-flow rate at the bridge site
表 1. 桥址处水位 - 断面面积 - 流量关系表

水位(m)	断面面积(m ²)	流量(m ³ /s)
249.36	54.06	386.52
250.60	117.69	841.48
253.24	295.07	2109.75
254.10	360.25	2575.78
256.08	536.91	3838.90

3.4. 溃坝最大流量到达桥址处所需时间的计算

溃坝后，大量洪水倾泄而下，溃坝洪水需经过一定时间的传播才会到达桥址处，从溃坝开始，到洪水演进到指定地点的时间与多种因素有关。本文选用黄河水利委员会黄河水利科学研究所提经验公式计算，传播时

间计算的经验公式为:

$$\tau = k_{\tau} \frac{l^{\frac{7}{5}}}{V^{\frac{1}{5}} H^{\frac{1}{2}} h_m^{\frac{1}{4}}} \quad (7)$$

式中: τ 表示溃坝最大流量从坝址到桥址处的传播时间; h_m 表示桥址处达到最大流量时的平均水深; k_{τ} 为经验系数, 取值范围一般介于 0.8 至 1.2 之间, 水深小时取小值, 大时取大值, 与 h_m 呈完全正相关, 经 3.3 计算得溃坝洪水桥址处最大水深为 8.9 m, 取 $k_{\tau} = 1.0$; H 表示溃坝时的坝前水深。

将前文计算得到的 h_m 、 H 代入公式(7)中, 计算得出溃坝后洪水洪峰最大流量到达桥址处所需时间 τ 为 80.53 s。

4. 结论

在水库大坝下游新建铁路桥梁时[5], 首先应考虑水库的防洪标准来决定是否需要考虑溃坝流量的影响, 若水库防洪标准与桥梁防洪标准相同或高于桥梁防洪标准, 则需考虑水库的下泄流量和溃坝流量; 否则只需考虑水库溃坝后桥址断面处的流量。沿江高铁跨越马河水库的桥梁位于马河水库下游 740 m, 由于马河水库使用年限为 30 年, 现已超出使用年限, 且水库设计标准与桥梁防洪标准相同, 出于桥梁安全考虑, 对马河水库溃坝洪水进行计算分析, 以此来确定桥梁的设计参数。使用经验公式计算得, 溃坝时坝址最大流量为 3407.411 m³/s, 桥址断面最大溃坝流量为 3084.61 m³/s, 桥址的最高洪水水位为 255.3 m。

通过对马河水库溃坝洪水分析计算可知, 溃坝洪水与溃坝时坝前水位、蓄水量和溃口宽度等有关; 桥址断面处溃坝最大流量与大坝溃坝最大流量、河道断面流速、水库库容和桥址至大坝的距离等有关; 通过对桥址断面最大流量与最高洪水水位计算结果, 可分析溃坝洪水对桥墩的影响, 由此为桥墩的冲刷深度、承台掩埋深度和桥梁设计安全高程等参考值提供重要依据。本文中的思路和方法, 对于类似缺乏水文资料情况下推求溃坝洪水具有参考和借鉴作用。

参考文献

- [1] 河海大学, 梁忠民, 钟平安, 华家鹏, 主编. 水文水利计算[M]. 第二版. 北京: 中国水利水电出版社, 2008: 364-366. Hohai University, LIANG Zhongmin, ZHONG Pingan, HUA Jiapeng, Editor-in-Chief. Hydrology and water conservancy calculation. Second Edition. Beijing: China Water Power Press, 2008: 364-366. (in Chinese)
- [2] 张发鸿, 岳青华, 郭靖. 缺乏水文资料的复杂天然河道断面水位流量关系曲线计算[J]. 水资源研究, 2020, 9(3): 320-328. ZHANG Fahong, YUE Qinghua, GUO Jing. Calculation of water level-discharge relationship curve of complex natural river section lacking hydrological data. Water Resources Research, 2020, 9(3): 320-328. (in Chinese)
- [3] 铁道部第三勘测设计院. TB10017-1999 铁路工程水文勘测设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1999. The Third Survey and Design Institute of the Ministry of Railways. TB10017-1999 code for hydrological survey and design of railway engineering. Beijing: China Railway Publishing House, 1999. (in Chinese)
- [4] 湖北省水文水资源局. 湖北河流集[M]. 武汉: 1998. Hubei Provincial Hydrology and Water Resources Bureau. Hubei river collection. Wuhan: 1998. (in Chinese)
- [5] 卢生亮, 罗放. 浅析溃坝流量对桥址断面洪水计算的影响[J]. 内蒙古水利, 2017(1): 14-15. LU Shengliang, LUO Fang. Analysis of the influence of dam-breaking flow on flood calculation of bridge site section. Inner Mongolia Water Resources, 2017(1): 14-15. (in Chinese)