

王璐, 王五星, 王颖蛟. 洪水冲击下桥梁抗毁性受力分析实验研究[J]. 灾害学, 2018, 33(2): 27-30. [WANG Lu, WANG Wuxing and WANG Yingjiao. Force analysis experiment of bridge invulnerability under flood impact[J]. Journal of Catastrophology, 2018, 33(2): 27-30. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.007.]

洪水冲击下桥梁抗毁性受力分析实验研究^{*}

王璐¹, 王五星², 王颖蛟³

(1. 西安工业大学, 北方信息工程学院, 陕西西安 710034; 2. 陕西中交华诚工程设计咨询有限公司, 陕西西安 710032; 3. 西安工业大学, 北方信息工程学院, 陕西西安 10034)

摘要: 目前对于洪水冲击下桥梁抗毁性受力分析的研究, 是通过对桥梁整体结构的稳定性做受力分析, 没有考虑到桥梁各个部位受力情况对桥梁损毁的影响, 无法对桥梁抗洪性能的改进给出合理化建议。该文提出一种新的洪水冲击下桥梁抗毁性受力分析方法, 通过考虑洪水漫过桥面和桥面以下两种情况, 分析桥梁在各关键部位的受力情况计算出相应的力矩和位移, 进一步求得正应力与剪应力, 通过与最大正应力和剪应力的比较分析, 实现对洪水冲击下桥梁抗毁性受力分析的研究, 并建立洪水冲击下桥梁抗毁性受力分析实验模型来验证方法有效性。实验结果表明, 桥梁各个部位的受力情况不同, 会对桥梁整体的抗毁性产生不同程度影响, 并给出了提高桥梁抗毁性能的建议, 证明该方法对洪水冲击下桥梁抗毁性受力分析的结果有效。

关键词: 桥梁; 抗毁性; 受力分析; 正应力; 剪应力;

中图分类号: U443.2; X43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2018)02-0027-04

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2018.02.007

洪水的发生具有周期性和循环性, 并且具有流速大、历时短、测量困难等特点, 使研究桥梁受洪水冲击的影响有一定困难^[1-2]。洪水灾害是桥梁损毁的重要原因之一, 会造成严重的经济损失和其它附加损害^[3-4]。因此洪水冲击对桥梁损毁性的受力分析, 成为业内人士重点关注的问题。目前已有一些学者对桥梁的抗毁性受力分析做了一定的研究工作, 文献[5]提出一种基于桥墩、支座和梁箱部位之间的受力的关系, 建立抗损毁洪水力计算方法, 利用接触非线性模型得到抗损毁的有限元模型, 完成对洪水冲击下桥梁抗毁性的分析。文献[6]提出一种借助 Opensees 分析平台研究洪水的水位和桩基深度影响, 运用可靠性分析的数学方法, 得到不同洪水状况下受力概率分布情况, 绘制桥梁损毁曲线, 分析桥梁抗毁性能, 完成对洪水冲击下桥梁抗毁性的分析。但是这些分析方法没有考虑桥梁各个部位的受力情况对桥梁损毁的影响, 无法对桥梁抗洪性能改进给出合理化建议^[7]。本文提出一种新的洪水冲击下桥梁抗毁性受力分析方法, 通过考虑洪水漫过桥面和桥面以下两种情况, 分析桥梁在各关键部位的受力, 根据受力分析的结果, 计算各方向对应的力矩和位移, 进一步求得正应

力和剪应力, 通过与最大正应力和剪应力的比较分析, 实现对洪水冲击下桥梁抗毁性受力分析的研究, 并建立洪水冲击下桥梁抗毁性受力分析实验模型来验证方法有效性。

1 洪水冲击下桥梁抗毁性受力分析

应用物理方法, 分析桥梁在各关键部位的受力情况, 计算出相应的力矩和位移, 进一步求得正应力与剪应力, 与桥梁最大承受力进行比较分析, 来判断桥梁对洪水的抗毁性能。

1.1 洪水冲击下桥梁受力分析

当洪水漫过桥梁表面时的压力值使用如下公式表示:

$$P(t) = \bar{P}(t) + P'(t) \quad (1)$$

式中: $P(t)$ 表示洪水漫过桥梁表面在 t 时刻的洪水压力, $\bar{P}(t)$ 表示测试时间段内的平均洪水压力, $P'(t)$ 代表测试时点的压力波动值。使用样本出现各种数据时间的平均值表示总体时均值^[8], 设测试样本的洪水总历时为 T , 取最大周期的多倍时间, 洪水测试样本的间隔时间为 Δt 可表示为:

* 收稿日期: 2017-10-13

修回日期: 2017-12-19

基金项目: 西安工业大学北方信息工程学院基金资助项目“应力状态对结构钢断裂的实验分析及有限元分析”(YZ1512)

第一作者简介: 王璐(1981-), 女, 汉族, 河北石家庄人, 硕士, 讲师, 研究方向为结构工程. E-mail: 563833813@qq.com

$$\Delta t = \frac{1}{2f_c} \quad (2)$$

式中: f_c 表示洪水波动的频率, 可得洪水的时均值 P 为:

$$P = \frac{1}{N}(P_1 + P_2 + \cdots + P_N) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i \quad (3)$$

式中: N 表示测试洪水样本总数, P_i 表示测试洪水样本的瞬间压力。在桥梁表面竖直方向受到洪水的压力为 F_L , 桥梁表面上和桥梁表面下两部分洪水压力之和, 可表示为:

$$F_L = \iint_A (\tau_{yx})_b \cos \alpha dA + \iint_A P_b \sin \alpha dA \quad (4)$$

式中: $(\tau_{yx})_b$ 表示洪水在桥梁面竖直方向的流速, P_b 表示洪水对桥梁表面产生的压力, α 表示洪水水流方向与桥梁的夹角度数。考虑桥体竖直面面积较小且水流在竖直方向流速较小, 式(4)可简化为:

$$F_L = \iint_A P_b \sin \alpha dA \quad (5)$$

当桥体处于被洪水完全淹没的状态时, 桥梁在竖直方向的受力与桥体排水质量相同, 依据阿基米德定律^[9]可表示为:

$$F_L = r \cdot w \quad (6)$$

式中: r 表示洪水的密度; w 表示桥体上部结构排开洪水的体积。通过能量原理可得洪水中的波浪对桥梁的上浮力为:

$$F_p = \xi A_r r \Delta h \quad (7)$$

式中: Δh 为洪水到桥梁前波浪的高度; A_r 为桥梁的底面面积; ξ 为桥梁面积效应系数。通过静力分析, 洪水波浪形成的桥梁力矩:

$$M_\xi = 0.5 F_p (1 - \xi) B \quad (8)$$

式中: F_p 为洪水波浪对桥梁的上浮力; B 表示桥梁底面宽度; ξ 为桥梁面效应系数。利用桥梁在横向受重力、力矩以及洪水力的分布情况分析可得:

$$R_i = \frac{T}{n} + \frac{M_o \cdot X_i}{\sum_{i=1}^n X_i^2} \quad (9)$$

式中: R_i 代表 n 个桥梁支柱的第 i 个桥梁支柱反力; X_i 表示各支柱的中心所对应的坐标; M_o 代表各个桥梁受力转移至中心支柱 O' 的力矩之和; T 代表桥梁竖直方向所受力的合力。当洪水初始冲击桥体时按照物理动力学, 洪水对桥体的冲击力由下面公式计算:

$$R_{\text{冲}} = Q \lambda (v_1 - v_2) \quad (10)$$

式中: γ 为洪水的密度; v_1 洪水冲击桥体的初始速度; v_2 洪水冲击桥体的最后速度; Q 为洪水流量, 计算公式为:

$$Q = B v_1 \quad (11)$$

式中: B 为洪水冲击桥梁面积。桥梁对洪水产生的摩擦力使用兹万科夫公式^[10]可得:

$$R_{\text{摩擦}} = f \Omega v^n + \xi \delta A v^m \quad (12)$$

式中: Ω 为桥梁在水里的总面积; m 、 n 为桥梁摩擦阻力系数。考虑天气原因由空气动力学可知, 在空气经过桥梁时也会产生一定的空气阻力:

$$R_{\text{空}} = Q \lambda (v_1 - v_2) \quad (13)$$

式中: v_1 为空气经过桥梁之前的速度; v_2 为空气经过桥梁之后的速度; Q 为空气流通量, 可表示为:

$$Q = (F_1 + F_2) \times v_1 \quad (14)$$

式中: F_1 为上部分桥梁结构的风阻面积; F_2 为下部分结构桥梁的风阻面积。洪水完全没过桥梁时, 由水体动量方程可知, 桥梁的上部结构平均水平力可表示为:

$$R = \frac{1}{2} r \Delta H \left(\Delta H + 2h - \frac{2q^2}{gh^2} \right) \quad (15)$$

式中: ΔH 表示洪水的涨水高度, h 表示桥梁原来水位, q 表示单位宽度桥梁通过的洪水流量。考虑其他因素影响修正后的桥梁所受水平力为:

$$F = k_1 k_2 \cdots k_n R_o \quad (16)$$

式中: $k_1 k_2 k_3 \cdots k_n$ 表示 n 种水平力影响因素的修正系数。当漂浮物撞击桥体也会产生水平的撞击力, 通过动能守恒可知:

$$F_{\text{浮}} = \frac{m}{\Delta t} \sin \theta \quad (17)$$

式中: $F_{\text{浮}}$ 表示洪水中漂浮物的撞击力平均值; v 为洪水中漂浮物的速度; m 为洪水中漂浮物的质量; θ 为桥梁纵轴线与洪水中漂浮物撞击方向的夹角; Δt 为漂浮物撞击桥梁的时间。

1.2 洪水冲击下桥梁抗毁性分析

根据以上洪水对桥梁各个部位的整体受力情况进行桥梁抗毁稳定性分析。洪水冲击的力矩为:

$$M_{\text{水流}} = F_1 \times L_1 + F_2 \times L_2 \quad (18)$$

式中: F_1 、 F_2 分别为桥梁上部结构与下部结构所受的洪水力; L_1 、 L_2 分别为中部的力臂与整体力臂。桥梁自重对中心产生的力矩为:

$$M_{\text{桥梁}} = Q \times L_3 \quad (19)$$

式中: L_3 为桥身水平力臂, Q 为桥体自重。若 $M_{\text{桥梁}} > M_{\text{水流}}$, 则桥体整体稳定, 不会损毁。桥梁整体稳定的前提是桥梁的局部也稳定, 有局部位移公式求出各个方位的位移如下:

$$\Delta_{ip} = \sum \int \frac{\bar{M}_i M_p}{EI_j} \quad (20)$$

式中: \bar{M}_i 表示单位洪水力对桥梁支柱的弯矩; M_p 表示其他外力对桥梁支柱产生的弯矩; E 表示桥梁构成材料的弹性; I_j 表示桥梁构成材料的截面惯性矩。正应力和剪应力应满足, 则桥梁不会损毁:

$$\Gamma = \frac{VS}{Id} < [\Gamma] \quad (21)$$

$$\sigma = \frac{N_c}{A} + \frac{M_c}{W} < [\sigma] \quad (22)$$

式中: Γ 表示剪应力; V 表示洪水体积; d 表示桥

梁截面腹板厚度; S 表示桥梁截面面积; $[\tau]$ 代表桥梁可承受的最大剪应力; σ 表示正应力; N_c 表示桥梁支柱的轴力; M_c 表示桥梁支柱底部的弯矩; A 为桥梁支柱面积; $[\sigma]$ 桥梁可承受的最大正应力; W 为桥梁截面抵抗系数。

2 实验结果分析

建立洪水冲击桥梁受力分析模拟实验平台, 制作桥梁模型按照 1:20 的大小比例, 设计不同种类的拱桥和板桥, 桥梁采用不同材料并仿真桥梁结构, 实验环境为一个工厂的干枯排水水泥沟壑, 长 25 m, 宽 1.2 m, 实验中在沟壑的 2/3 处放置桥梁模型, 在沟壑的首端放置多块不同高度可控制的玻璃挡板, 并在首端安放四条自来水管和控制水压仪器, 准备不同体积、质量的漂浮物在首端备用, 首端还按有横向和纵向波浪制造仪器, 沟壑两端按有水位测量仪器, 本次实验用到的仪器设备还有压力传感仪、水流速度测定仪器、动态应变仪等安置在桥梁模型各个测试点, 分别进行 30 组实验。

通过对洪水冲击桥梁的受力分析可知, 主要有水平方向和竖直方向两个方向的作用力对桥体损坏产生影响, 其中包括两种情况, 即洪水漫过桥梁表面和洪水在桥梁表面之下, 在水平方向主要研究水流的冲击力对桥梁的影响, 由公式可知在洪水强度一定的情况下, 桥体的横截面积对水平冲击力的大小具有重要影响。通过改变桥梁模型的结构来改变桥梁模型的横截阻水面积, 调节桥梁横截面积从 1.5 m^2 增加至 4.5 m^2 , 共做 7 组实验, 每组实验 5 次, 取所有 5 次实验结果的平均值, 并保证其他变量不变的情况下, 进行洪水水平力的计算, 得到的各个测试点的受力情况如下所示。

表 1 不同桥体横截面积的洪水水平力

横截面 积/ m^2	洪水浮 力/ kN	支柱水平 力/ kN	波浪浮 力/ kN	水平力/ kN
1.5	41	25	22	25
2	41	25	22	29
2.5	41	25	22	34
3	41	25	22	42
3.5	41	25	22	53
4	41	25	22	69
4.5	41	25	22	82

由表 1 可知在横截面积由 1.5 m^2 逐渐增加至 4.5 m^2 的过程中, 桥梁所受到洪水浮力、支柱所受水平力和波浪浮力都是固定不变的, 而整体的水平力随着桥梁横截面积的增大而增大, 说明了在其他条件不变的情况下, 桥梁的横截面积越大则所受的水平力越大。

将水位高度调至漫过桥面, 分析横截面积对桥梁面和桥梁支柱的水平力产生的位移, 进行 7

组, 每组 5 次实验取平均值, 得到的实验结果如图 1 所示。

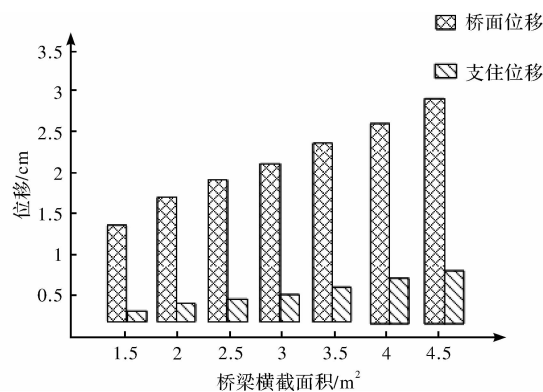


图1 横截面积对桥梁位移影响

由图 1 可知, 当水位漫过桥面时, 随着桥梁横截面积的增大, 桥梁的上下结构部位的位移增加, 使桥梁重心趋于不稳定状态, 容易致使桥梁发生倒塌损毁情况。

实验中通过改变桥梁模型的跨数, 分析桥梁跨数对桥梁各个测点的压力情况, 当桥梁从独柱变化到 6 跨过程中, 随着桥梁跨数发生变化, 桥梁的洪水冲击面压力、水柱背水面压力和剪应力的变化如图 2 所示。分析图 2 可知, 当跨数小于或等于 3 时, 剪应力随着跨数的增加而增加, 其他压力随桥梁跨数变化不明显, 当桥梁的跨数大于 3 时, 这些洪水压力不受桥梁跨数变化的影响。这是由于桥梁的跨数少时, 桥体两端对洪水的抗击能力较大, 当桥梁的跨数超过一定范围, 桥梁的跨数对洪水抗击能力影响较小。

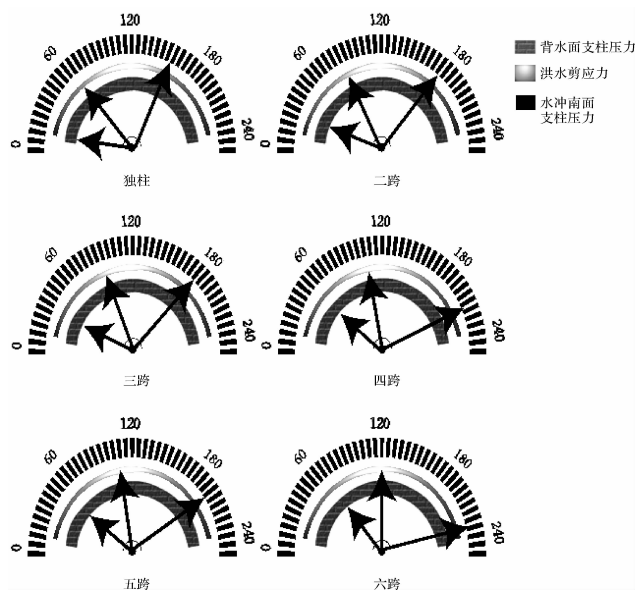


图2 桥梁跨数对桥梁抗毁性的影响

实验中, 变换桥梁模型材质由粉砂材质至砾砂材质, 通过图 3 可知, 不同种类的桥墩砂土对桥梁抗毁效果有很大区别, 洪水冲击面支柱压力受

洪水的影响程度由粉砂至砾砂逐渐变小,洪水剪应力受洪水的影响逐渐变大,背水面支柱压力受桥梁材质影响较小。这是由于从桥梁材料由粉砂材料变至砾砂材料桥墩的强度逐渐增大,使得桥墩的抗毁受力逐渐增大,说明对洪水的抗击能力越来越强。

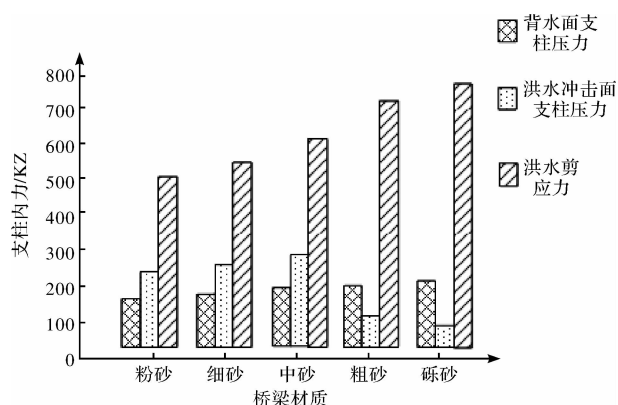


图3 桥梁材质对支柱内力的影响

3 结语

对于目前的洪水冲击下桥梁抗毁性的受力分析研究,没有考虑到桥梁各个部位受力情况对桥梁损毁的影响,给出了一种各部位受力分析方法,分析桥梁在各关键部位的水平方向及竖直方向的受力情况,通过计算出相应的力矩和位移,与桥梁最大承受力进行比较分析,来判断桥梁对洪水的抗毁性能,建立仿真试验模型进行多组实验,验

证方法有效性,通过实验得知桥梁横截面积、桥梁支柱数以及桥梁材质不同都会造成桥梁各部位的受力情况不同,对桥梁整体的抗毁性产生影响,可根据实验结果分析给出合理化的受力操作组合,提高桥梁在洪水冲击下的抗毁性。

参考文献:

- [1] 张玲,赵明华,赵衡. 倾斜荷载下桩柱式桥墩受力变形分析传递矩阵法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(2): 69-76.
- [2] 万鹏. 大跨双层复合桁架桥施工阶段受力分析[J]. 世界桥梁, 2016, 44(5): 53-56.
- [3] 强宝民,吴侠,吴鹏,等. 桥式起重机桥梁结构载荷强度优化设计研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(7): 178-183.
- [4] 杨根杰. 单拱肋预应力混凝土梁拱组合桥受力性能分析[J]. 铁道工程学报, 2017, 34(6): 37-42.
- [5] 欧健,李国维,仇红超,等. 高填方盖板涵受力特性的原位试验及数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(16): 128-138.
- [6] 何凌坚,刘湘江,高燕梅,等. L形拱肋加固拱桥受力机理研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(6): 270-275.
- [7] 蔺鹏臻,武发辉,杨子江. 考虑边坡效应的桥梁桩基受力分析[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(4): 54-60.
- [8] 康崇杰,戴公连,栗森,等. 斜交薄壁连续钢箱梁桥设计与受力特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015(1): 119-126.
- [9] 陈康明,吴庆雄,黄宛昆,等. 结合面底部带门式钢筋的铰接空心板桥受力性能参数分析[J]. 公路交通科技, 2016, 33(8): 65-75.
- [10] 胡丹,张开银,董晨. 加固混凝土桥梁桥面铺装层受力特性研究[J]. 公路, 2016, 15(1): 122-125.

Force Analysis Experiment of Bridge Invulnerability under Flood Impact

WANG Lu¹, WANG Wuxing² and WANG Yingjiao³

(1. North Institute of Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710034, China;

2. Shanxi Hua Chen Civil Engineering Design Consulting co., LTD, Xi'an 710032, China ;

3. North Institute of Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710034, China)

Abstract: The present study for flood impact of bridge survivability stress analysis, through the stability of the overall structure of the bridge's stress analysis, without taking into account the various parts of the bridge impact force on the bridge damage, can not improve the performance of the bridge is given to flood rationalization proposals. Put forward a new analysis method for bridge under flood invulnerability, by considering the floods over the deck and deck in either of the following circumstances, the force analysis of the bridge in the horizontal direction and the vertical direction of the key parts of the calculated torque and the corresponding displacement, further for normal and shear stresses and, by the maximum normal stress and shear stress of the comparative analysis on the flood impact under the bridge survivability stress analysis, and the establishment of flood impact analysis to verify the effectiveness of the method of experimental model of bridge survivability by. The experimental results show that the various parts of the bridge force situation is different, have different degree of influence on the survivability of the whole bridge, and is given to improve the survivability of bridge, proved that the method is effective to flood bridge survivability stress analysis results.

Key words: Bridge; destruction resistance; stress analysis; positive stress; shear stress