

公路梁式桥上部结构洪水作用 机理及抗洪性能研究

李鹏飞, 毛 燕, 董振华, 韦 韩

(交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘 要: 洪水灾害是影响桥梁结构安全运行的严重威胁, 洪水发生时流水冲击力直接作用于桥梁结构, 以往桥梁设计中対水位线以上的桥梁上部结构可能遭受的洪水作用缺乏考虑, 造成桥梁上部结构抗洪能力不足。该文以洪水的力学性能为基础, 研究了洪水对桥梁上部结构的作用机理, 提出了洪水破坏力计算公式及相关参数的确定方法, 分析了桥梁上部结构在洪水作用下的主要失效模式及对应的力学平衡方程。研究表明, 洪水对桥梁上部结构的主要作用力包括水平冲击力、竖向上浮力、上托力。相应的桥梁上部结构的破坏模式主要有支座滑动、支座剪切、整体倾覆等。在此基础上, 针对桥梁上部结构的主要薄弱点, 遵循洪水破坏力与结构抗力之间的平衡关系, 提出了桥梁上部结构发生支座滑动破坏、支座剪切破坏、整体倾覆破坏模式下的抗洪性能分析思路及计算公式, 对公路桥梁的抗洪设计及安全性评估具有指导意义。

关键词: 桥梁工程; 梁式桥; 上部结构; 洪水作用; 抗洪性能; 稳定性; 理论分析

中图分类号: U442.58 文献标志码: A doi: [10.6052/j.issn.1000-4750.2019.05.S038](https://doi.org/10.6052/j.issn.1000-4750.2019.05.S038)

STUDY ON FLOOD ACTION MECHANISM AND FLOOD RESISTANCE OF HIGHWAY GIRDER BRIDGE SUPERSTRUCTURE

LI Peng-fei, MAO Yan, DONG Zhen-hua, WEI Han

(Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: Flood is a serious threat to the bridge across the river, the direct acting force of flood on a bridge is the impact of water. In the past, the flood action on bridge superstructure above water level was neglected in bridge design, which results in the insufficient flood resistance of bridge superstructure. Based on mechanical properties of flood water, it studies the action mechanism of flood on bridge superstructure and puts forward the calculation formula of flood damage force and the determination method of related parameters; and then analyzes the main failure mode of superstructure under the action of flood. The results show that the bridge superstructure is mainly affected by horizontal impact force, vertical buoyancy force and uplift force under the action of flood; the failure modes of the superstructure include sliding of bearing, shear of bearing and overall overturning. On this basis, according to the balance and stability theory between the flood damage and structural resistance, the design method and calculation formula of the bridge superstructure subjected to failure modes of bearing sliding failure, bearing shear failure and overall overturning are proposed. The results can be used for the flood prevention design and safety assessment of highway bridges.

Key words: bridge engineering; girder bridge; superstructure; flood action; flood resistance; stability; theoretical analysis

收稿日期: 2019-05-21; 修改日期: 2019-11-06

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2018-9019)

通讯作者: 毛 燕 (1981—), 女, 山东蓬莱人, 副研究员, 工学硕士, 主要从事交通工程及桥梁工程研究 (E-mail: 17526927@qq.com).

作者简介: 李鹏飞 (1981—), 男, 河北任丘人, 助理研究员, 工学博士, 主要从事交通工程及桥梁工程研究 (E-mail: lpf.china@163.com);

董振华 (1984—), 女, 山东菏泽人, 副研究员, 工学博士, 主要从事交通工程及桥梁工程研究 (E-mail: dongzhenhua2009@126.com);

韦 韩 (1982—), 男, 广西河池人, 副研究员, 工学硕士, 主要从事交通工程及桥梁工程研究 (E-mail: h.wei@rioh.cn).

洪灾属于突发性自然灾害,洪灾发生的同时一般伴有滑坡、泥石流、落石、淤积等次生灾害,对桥梁的安全运行构成巨大威胁^[1]。一旦公路桥梁在洪水作用下发生破坏,将严重阻碍交通运行,给紧急救援和安全疏散工作带来巨大的困难。2007年7月,暴雨引起的洪水使西汉高速多处桥梁与隧道受损,造成直接经济损失超过5000万元。2013年7月,四川盆地西部发生强降雨,各地接连发生多起桥梁垮塌、堤坝冲毁的严重灾情,仅桥梁因水毁造成的经济损失就高达7000多万元。文献[2]通过不完全统计得出,2007—2015年间,国内共有102座运营桥梁垮塌,其中因洪水造成的有44座,占总数的43.1%。Wardhana和Hadipriono^[3]研究发现,1989—2000年间,美国运营桥梁垮塌事故中有52.88%与水力因素有关,其中洪水直接造成的垮塌事故占32.80%。

洪水的发生具有高度不确定性,其对桥梁的作用机理复杂。首先,洪水对桥梁的基础造成冲刷,若桥墩基础被冲刷掏空,桥墩可能发生整体倾斜失稳,进而引起上部结构垮塌^[4]。其次,洪水发生时桥下水位升高,有时会直接冲击上部结构,导致桥梁上部结构被冲走。再次,由于桥墩的阻挡,洪水带来的漂浮物会在桥墩处聚集,进一步压缩了桥位处的河床断面,加剧了洪水的冲击力;另外,一些质量较大的漂浮物还可能直接撞击桥梁,造成结构损坏。

桥梁工程作为公路交通系统的重要组成部分,其安全运行对保障交通网络的畅通至关重要。本文着重研究洪水冲击力对桥梁上部结构的作用机理,在分析桥梁上部结构失效模式的基础上,提出梁式桥上部结构抗洪性能分析方法,对保证桥梁在洪水作用下的安全服役、改进桥梁抗洪设计、维护生命线工程的畅通具有重要意义。

1 桥梁抗洪研究现状

桥梁作为跨越河谷的人工建筑,如何抵御洪水作用是首先要考虑的问题,国外很早便开始了对桥梁抗洪问题的研究。1975年美国联邦公路局在全美和加拿大地区开展了桥梁水毁问题的调查研究,美国交通运输部出台了《水力桥梁安全设计手册》,其中,主要包括桥梁抗洪分析的具体建模方法、水力模型选择、考虑冲刷和水流不稳定性的桥梁设计方法等,为桥梁水力设计提

供了指导;20世纪90年代初英国也对其国内桥梁的水毁情况进行了统计分析,并对桥梁抗洪问题进行了系统研究^[5]。

20世纪50年代,中国就开始了桥涵水文方面的研究,取得了大量研究成果,提出了桥前壅水计算、桥墩冲刷计算方法,为公路桥梁抗洪设计提供了科学依据。我国《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2004)指出桥梁应根据公路功能、等级、通行能力及抗洪要求,结合水文、地质、通航、环境等条件进行综合设计,提出了桥涵布置、桥涵孔径、桥头引道等相应的防洪设计原则,并给出了桥墩流水压力计算公式。此外,我国《公路桥涵养护规范》(JTG H11—2004)给出了公路桥梁抗洪能力评估周期、评估内容和评估指标。

在洪水对桥梁上部结构的冲击作用方面,肖盛燮^[1]基于抗力与洪水作用效应的平衡关系,分析了洪水导致桥梁失效的机理,并通过试验研究了洪水对桥梁的水平及竖向作用力,提出了公路桥梁防洪对策。张辉^[4]基于洪水的力学特性及桥梁的结构特点,推导了桥梁在洪水冲击下水平、竖向作用力计算公式,并分别考虑了泥沙、河床坡度、山洪频率、山洪流向的影响对计算公式进行了修正。郭俊峰^[6]根据洪灾统计资料,总结了洪水作用下桥梁结构的主要破坏模式,并针对洪水对桥梁的水平作用力,提出了实用计算方法。王克成等^[7]分析了我国西南部山区山洪对公路桥梁的破坏机理,根据力学原理推导出洪水对桥梁的水平、竖向作用力计算公式。赵红^[8]从桥梁结构力学原理入手,提出了公路桥涵抗洪验算公式,建立了桥梁抗洪分析力学模型。邵鹏^[9]推导了洪水对简支箱型梁桥的水平与竖向作用力表达式,分析了简支箱型梁桥在洪水冲击下的破坏特征与失效机制,并对洪水作用力进行了不确定性分析,提出了基于可靠度的抗洪评估方法。

目前,我国桥梁设计中对于设计水位线以上的桥梁上部结构没有考虑流水冲击力的影响。实际水害表明,对于梁式桥特别是数量庞大的简支梁桥,这部分作用力不能忽视。多次洪水灾害中都发生了桥梁被洪水淹没,造成桥梁上部结构在洪水冲击力作用下发生落梁、梁体错位等破坏的情况,如图1所示。因此有必要开展洪水对桥梁上部结构作用机理的研究,明确梁式桥在洪水冲击力作用下的失效模式,提出相应的抗洪分析方

法,从而达到保障桥梁服役安全性、完善桥梁抗洪设计体系的目的。



图1 洪水作用下桥梁上部结构失效

Fig. 1 Failure of bridge superstructure under flood

2 洪水冲击力对桥梁的作用机理

洪水发生时,桥梁结构直接承受流水的冲击作用,一般认为流水冲击作用的大小与水流速度成正比^[10]。水力学研究表明,渠道中的水流流速分布受到渠道自身断面几何特性和洪水自身水力特性的影响,渠道中的水流流速横向分布呈现中部最大、向两岸逐渐减小的规律^[11],如图2所示。大量研究者通过水槽试验提出的断面明渠横向平均水流流速计算公式为:

$$\frac{v}{v_m} = n \left(\frac{x}{L/2} \right)^m \quad (1)$$

式中: v 为断面任意测线平均流速; v_m 为断面中垂线平均流速; L 为渠道宽度; x 为测线至河岸距离; m 、 n 为流速横向分布系数。相关试验表明,参数 m 、 n 受测线位置 x/L 、渠道宽深比 L/H (H 为渠道断面水深)、糙率 n_c 、水力坡度 J 等影响。文献[12]提出,系数 n 取值范围为 0.975~1.03, m 取值范围为 0.10~0.14。

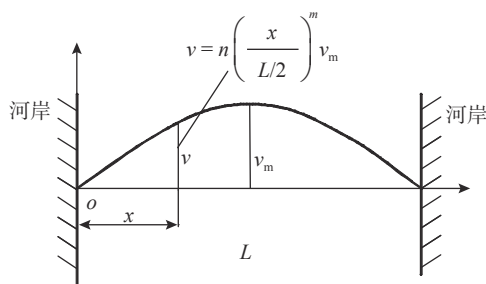


图2 河道断面流速横向分布

Fig. 2 Transverse distribution of channel velocity

此外,水槽试验结果和相关研究资料表明,同一测线上的水流在竖向的流速分布接近于二次

函数曲线特征^[13],如图3所示。引入相对流速 u/v 与相对水深 y/H ,则渠道中任意测点洪水竖向流速分布函数表达为:

$$\frac{u}{v} = a \left(\frac{y}{H} \right)^2 + b \left(\frac{y}{H} \right) + c \quad (2)$$

式中: u 为某断面任意深度的流速; v 为某断面测线平均流速; y 为流速测点至渠底高度; a 、 b 、 c 为流速垂向分布系数。文献[13]通过试验得出,沿渠道断面横向各测线位置的竖向水流流速分布规律一致,但不同横向位置处系数 a 、 b 、 c 却有所变化,其与水流的宽深比 L/H 、糙率 n_c 、水力半径 R 、水力坡度 J 、横向位置 x/L 、相对水深 y/H 、弗鲁德数 Fr 等因素有关,并给出了渠道断面不同区域垂向分布系数 a 、 b 、 c 的计算公式。

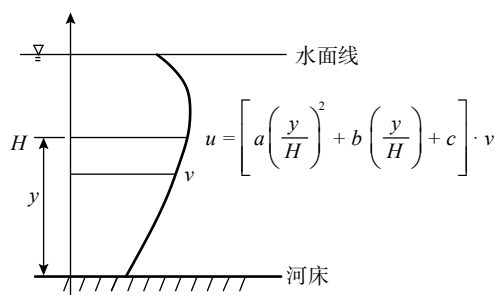


图3 河道断面流速竖向分布

Fig. 3 Vertical distribution of channel velocity

根据文献[13],在渠道中心区,当 $x/H \geq 2.5$, $Fr < 1$ 时:

$$a = 14Fr^3 - 26Fr^2 + 15Fr - 3,$$

$$b = -26Fr^3 + 46Fr^2 - 26Fr + 6,$$

$$c = 11Fr^3 - 19Fr^2 + 10Fr - 1.$$

由于洪水发生时,河道中部梁跨所受洪水冲击力较边跨更大,为简化计算,进行洪水作用力分析时,可假定河道中部某一梁跨范围内水流流速符合均匀分布。水流横向分布流速取为渠道中心平均流速,竖向分布流速取为桥梁迎水面中点处的流速。研究表明,当洪水水位刚好淹没桥面时,桥梁阻水面积、桥前水流流速均达到最大值,此时桥梁上部结构处于最不利受力状态,渠道中部梁体迎水面的水流平均流速可表示为:

$$V_m = u(L/2, H - h/2) = n \left[a \left(\frac{H - h/2}{H} \right)^2 + b \left(\frac{H - h/2}{H} \right) + c \right] \cdot v_m \quad (3)$$

式中: V_m 为渠道中部梁体迎水面水流平均流速;

h 为梁体截面高度。

2.1 洪水对桥梁结构的水平作用力

实际洪水灾害分析表明,洪水淹没桥面后,梁体和支座直接承受洪水冲击力作用。Malavasi 和 Guadagnin^[14]通过桥梁部分或完全淹没时的水流荷载试验,根据流水具有的动能平衡原理,提出水流对桥梁的水平作用力计算公式:

$$F = \frac{1}{2}KA\rho u^2 \quad (4)$$

式中: K 为桥梁阻水系数, $2.0 \leq K \leq 2.2$; A 为桥梁在垂直于水流方向的投影面积; ρ 为水流密度; u 为断面平均流速。

参考式(4),则洪水期间,当梁体被洪水完全淹没时,渠道中部桥梁上部结构所受洪水水平作用力 F_L 如图4所示,其计算公式为:

$$F_L = \frac{1}{2}KA\rho V_m^2 \quad (5)$$

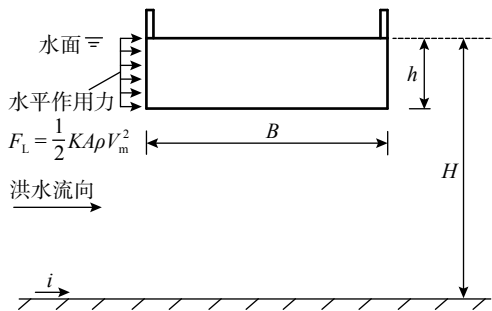


图4 洪水对桥梁的水平作用力示意图
Fig. 4 Horizontal force of flood on bridge

2.2 洪水对桥梁结构的竖向作用力

当桥梁被洪水淹没时,流水除对桥梁上部结构产生水平冲击作用外,还对梁体产生一定竖向作用力,主要由净水浮力 F_f 和竖向上托力 F_t 组成。

根据阿基米德定律,洪水对桥梁的静水浮力为:

$$F_f = \rho g W \quad (6)$$

式中, W 为桥梁排开水的体积。

由于洪水不是稳定的层流,存在着一定的波动,洪水中任一点的瞬时流速 v 均可视为由时均流速 $\bar{v}$ 和脉动流速 v_a 组成,时均流速为稳定的层流,其方向平行于桥梁底面,不对桥梁产生竖向上托力。而由于波动引起的脉动流速 v_a 方向是不确定的,具有水平和竖向分量,梁体底部的上托力主要由脉动流速竖向分量 v_{ay} 产生。

桥梁底面水流的脉动流速竖向分量 v_{ay} 在实际中表现为竖向流速水头 Δh , 如果将桥前最大壅水

高度 h^* 看作梁体上游处水波的波峰,在梁体截面高度远小于河道水深的前提下,可以认为 h^* 等于 Δh 。

研究表明,梁体底面竖向流速水压的分布呈直线衰减,在迎水面底部水压为 $\rho g \Delta h$, 在背水面底部水压为 0, 其分布如图5所示。则渠道中部桥梁上部结构梁体底部的竖向上托力为:

$$F_t = \frac{1}{2}Bd\rho gh^* \quad (7)$$

式中: h^* 为桥前壅水高度;文献[1]建议 $h^* = \eta \frac{1}{2g} \left(\frac{q}{H} \right)^2 = \eta \frac{1}{2g} v^2$, 其中 η 为壅水系数, v 为断面平均流速; B 为桥梁底面宽度; d 为垂直于洪水作用方向的梁长。

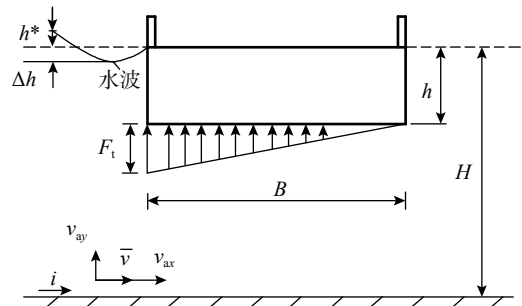


图5 洪水波动对桥梁上托力示意图
Fig. 5 Schematics of the uplift forces caused by flood wave

因此,式(7)可以表示成:

$$F_t = \frac{1}{4}\eta B d \rho V_m^2 \quad (8)$$

通过以上分析可知,当洪水淹没桥面的最不利状况时,桥梁所承受的洪水荷载主要为:水平静水压力、水平冲击力 F_L 、净水浮力 F_f 和竖向上托力 F_t , 洪水作用力及分布形式如图6所示。

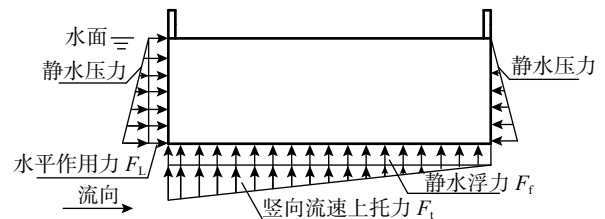


图6 桥梁洪水作用力计算示意图
Fig. 6 Calculation diagram of flood force on bridge

3 梁式桥上部结构抗洪性能分析

桥梁上部结构抗洪分析的总体思路是:结构对洪水某种作用的抗力大于或等于洪水破坏力,则结构处于安全状态,反之,则将导致结构破坏^[15]。

国内外大量桥梁水毁资料表明,梁式桥特别是简支梁桥在洪水作用下的上部结构破坏形式主

要有支座滑动破坏、支座剪切破坏、上部结构倾覆三种^[16]。本文主要针对以上三种失效模式,提出梁式桥抗洪性能分析思路。

假定桥梁上部结构被洪水淹没的条件下,梁体及支座受到的作用力主要包括各项洪水作用力及梁体自身重量。将渠道中部某一淹没跨梁端支座截面所受的各种外力向支座中心 O 平移,如图 7 所示,则支座截面总荷载效应为:

水平力:

$$F_H = F_L/2$$

竖向力:

$$F_V = \frac{G - F_f - F_t}{2}$$

扭矩:

$$M_O = \frac{F_t B}{2 \cdot 6} + \frac{F_L h}{2 \cdot 2}$$

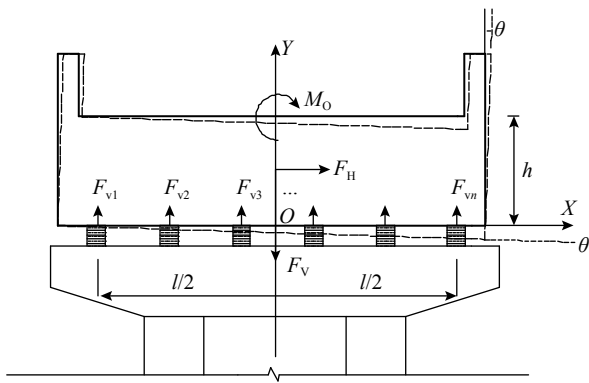


图 7 梁式桥上部结构抗洪计算示意图
Fig. 7 Flood resistance calculation diagram for the superstructure of girder bridge

假定桥面板是刚体,刚性桥面在竖向力和扭矩作用下会产生下沉和转动,由扭矩引起的转动造成梁底各支座不均匀受压,根据力学平衡关系,可计算各支座的竖向反力 F_{vi} 。

在竖向力 F_V 作用下,梁体发生下沉,各支座竖向反力 F'_{vi} 为:

$$F'_{vi} = F_V/k \quad (9)$$

式中, k 为梁端支座数量。

在扭矩 M_O 作用下,假定桥面板转动角度为 θ ,则各支座竖向变形为:

$$W_i = X_i \tan \theta \quad (10)$$

各支座由梁体转动引起的竖向反力为:

$$F''_{vi} = W_i EA_e = EA_e X_i \tan \theta \quad (11)$$

式中: X_i 为支座与迎水面支座的距离; EA_e 为支座抗压截面模量。

根据静力平衡条件:

$$M_O = \sum_{j=1}^n F''_{vi} X_j = EA_e \tan \theta \sum_{i,j=1}^n X_i X_j \quad (12)$$

式中, X_j 为支座距 O 点的距离。

由式 (11) 和式 (12) 可得:

$$F''_{vi} = \frac{X_i M_O}{\sum_{i,j=1}^n X_i X_j} \quad (13)$$

在 F_V 和 M_O 共同作用下各支座竖向反力为:

$$F_{vi} = F'_{vi} + F''_{vi} = \frac{F_V}{n} + \frac{X_i M_O}{\sum_{i,j=1}^n X_i X_j} \quad (14)$$

式中: F_{vi} 为单个支座的竖向反力; F'_{vi} 为梁体下沉引起的支座反力; F''_{vi} 为梁体转动引起的支座反力。

3.1 支座滑动破坏

板式橡胶支座是我国公路简支梁桥的主要支座型式,其在传递竖向荷载作用的同时通过与梁体之间的摩擦力传递水平荷载。当洪水将桥梁上部结构淹没时,洪水浮力 F_f 及上托力 F_t 使得上部结构有效重量减小,因此,支座与梁体之间的摩阻力也相应减小,而此时,梁体还承受洪水的水平冲击作用。当洪水作用在梁端支座上的总水平力 F_H 大于梁底全部支座的摩阻力,梁体与支座之间将发生滑动,引起梁体漂移错位。

洪水作用下,梁端各支座提供的摩擦力可表示为:

$$F_{si} = \mu F_{vi} \quad (15)$$

要避免支座发生滑动破坏,需保证支座的总摩阻力 F_s 大于洪水总水平作用力 F_H ,即:

$$F_s = \sum_{i=1}^n F_{si} = \mu \sum_{i=1}^n F_{vi} \geq F_H \quad (16)$$

式中, μ 为支座与桥梁底面的摩擦系数。

3.2 支座剪切破坏

正常工作条件下,板式橡胶支座主要通过橡胶层的剪切变形来适应上部梁体的水平位移,当水平力足够大时,支座的剪切变形可能超过其容许值,导致支座发生剪切破坏,如图 8 所示。

在洪水水平力 F_H 作用下,若支座与梁体之间

未产生滑移, 可认为各支座具有相同的剪切位移量 ΔS , 根据支座承压面积和剪切变形的关系:

$$\frac{\tau}{G_e} = \frac{F_H}{nG_e A_e} = \frac{\Delta S}{\sum t_e} \quad (17)$$

式中: G_e 为支座的剪切模量; A_e 为单个支座的承压面积; ΔS 为橡胶支座的剪切变形; $\sum t_e$ 为单个支座橡胶总厚度。

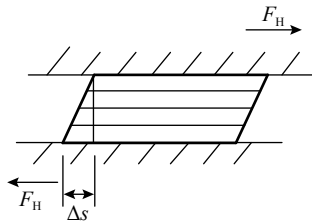


图8 支座剪切破坏计算图

Fig. 8 Calculation diagram of bearing shear failure

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[17], 板式橡胶支座的剪切位移量 ΔS 应满足:

$$\Delta S \leq \sum t_e \cdot [\tan \theta] \quad (18)$$

式中, $[\tan \theta]$ 为支座容许剪切角正切, 当不计制动力时可取 0.5。

为防止支座发生剪切破坏, 需保证支座承受的洪水水平作用力 F_H 小于支座水平极限承载力即:

$$F_H \leq nG_e A_e [\tan \theta] = 0.5nG_e A_e \quad (19)$$

3.3 上部结构倾覆

大量桥梁水毁事故分析表明, 洪水作用下, 桥梁上部结构可能发生整体倾覆破坏。分析其破坏机理可见, 对处在洪水中的桥梁, 静水浮力使上部结构的有效重量减小, 直接导致梁体抗倾覆力矩减小; 而与此同时洪水对桥梁的水平冲击力产生很大的横向倾覆力矩。在这种情况下, 桥梁上部结构易被翻动、推移, 从而产生梁体错位甚至被冲走。

洪水作用下简支梁桥倾覆计算受力如图9所示。为保证桥梁上部结构不发生倾覆破坏, 梁体倾覆稳定系数应满足式(20):

$$K_1 = \frac{M_W}{M_Q} \geq 1 \quad (20)$$

式中: K_1 为倾覆稳定系数; M_W 为结构稳定力矩; M_Q 为结构倾覆力矩。

根据图9所示, 以背水边支座为旋转中心可得:

$$M_W = (G - F_f) \cdot \frac{l}{2} \quad (21)$$

$$M_Q = F_t \left(\frac{l}{2} + \frac{B}{6} \right) + F_H \frac{h}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} F_{vi} X_i \quad (22)$$

式中, l 为迎水面与背水面支座之间的距离。

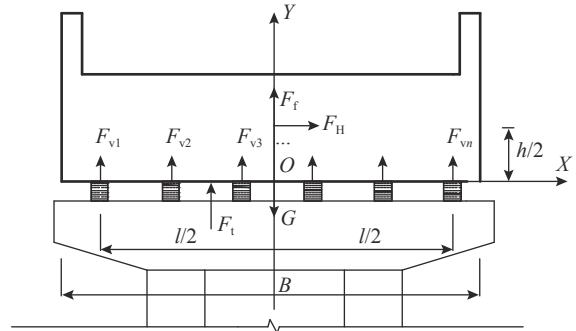


图9 上部结构倾覆破坏计算图

Fig. 9 Calculation diagram of superstructure overturning failure

4 结论

本文从洪水的水力特性出发, 分析了洪水对桥梁上部结构的作用机理, 明确了洪水作用下桥梁上部结构的主要失效模式, 提出了桥梁上部结构抗洪验算公式, 主要结论如下:

(1) 桥梁上部结构部分或全部被洪水淹没的情况下, 洪水对梁体的作用主要表现为水平冲击力、水流浮力及由水头差引起的上托力。其中水平冲击力主要受水流流速影响, 上托力主要受桥前壅水高度影响。

(2) 梁式桥在洪水作用下的上部结构破坏形式主要有支座滑动破坏、支座剪切破坏、上部结构倾覆三种。其中影响支座滑动破坏的主要是洪水浮力, 影响支座剪切破坏的主要是水平冲击力, 影响梁体倾覆破坏的主要是水平冲击力和上托力。

(3) 在洪水作用机理分析的基础上, 提出了梁式桥上部结构抗洪性能分析的思路, 将导致桥梁结构产生破坏作用的洪水作用力称为破坏力, 将桥梁结构维持自身平衡稳定的力称为结构抗力。通过建立力学平衡方程, 给出了洪水作用下简支梁桥支座滑动破坏、支座剪切破坏、上部结构倾覆三种破坏模式的计算公式。

由于洪水作用具有高度不确定性, 目前, 关于洪水对桥梁上部结构的水平及竖向作用力实测数据较为匮乏, 计算理论上还没有形成统一的作

用力计算公式, 本文研究多基于经验公式, 相关工作还有待进一步验证与完善。

参考文献:

- [1] 肖盛燮. 公路与桥梁抗洪分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 1999: 1—2.
Xiao Shengxie. Analysis of flood resistance of highway and bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 1999: 1—2. (in Chinese)
- [2] 刘亢, 刘均利, 余文成. 2007—2015年洪水导致垮塌桥梁的统计分析[J]. 城市道桥与防洪, 2017(1): 90—92.
Liu Kang, Liu Junli, Yu Wencheng. Statistical analysis of bridge collapse caused by flood from 2007 to 2015 [J]. Urban Roads and Bridges and Flood Control, 2017(1): 90—92. (in Chinese)
- [3] Wardhana K, Hadipriono F C. Analysis of recent bridge failures in the United States [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2003, 17(3): 144—150.
- [4] 张辉. 山洪、流冰对桥梁的破坏机理及计算模式研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2001.
Zhang Hui. Study on failure mechanism and calculation model of mountain torrents and ice flow on bridges [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2001. (in Chinese)
- [5] Reed D W. A review of British railway bridge flood failures [C]// *Hydrology: Science and Practice for the 21st Century*. 2004, 1: 210—216.
- [6] 郭俊峰. 凌汛期大跨径桥梁的安全性评价 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
Guo Junfeng. Safety evaluation of long span bridges during the flood season [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [7] 王克成, 郑雪, 夏玉荣. 西南地区公路桥梁山洪灾害破坏机理研究[J]. *公路交通技术*, 2010(6): 88—93.
Wang Kecheng, Zheng Xue, Xia Yurong. Research on damage mechanism of mountain flood disasters to highway bridges in the southwest [J]. *Technology of Highway and Transport*, 2010(6): 88—93. (in Chinese)
- [8] 赵红. 秦巴山区公路桥涵抗水毁计算理论研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
Zhao Hong. Study on the calculation theory of water damage resistance of highway bridges and culverts in qinba mountain [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [9] 邵鹏. 洪水作用下简支箱型梁桥结构安全性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
Shao Peng. Study on safety of simply supported box girder bridge structure Under the action of flood [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015. (in Chinese)
- [10] 肖诗云, 王晓庆. 洪水演进模型及冲击荷载数值分析[J]. *工程力学*, 2010, 27(9): 35—40.
Xiao Shiyun, Wang Xiaoqing. Study on routing model and impact loading of flood [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(9): 35—40. (in Chinese)
- [11] 胡运进, 万五一, 蔡甫款, 等. 窄深矩形断面明渠流速分布的研究[J]. *浙江大学学报 (工学版)*, 2008, 42(1): 183—187.
Hu Yunjin, Wan Wuyi, Cai Fukuan, et al. Velocity distribution in narrow and deep rectangular open channels [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2008, 42(1): 183—187. (in Chinese)
- [12] 尹进高. 梯形渠道断面流速分布规律及测流技术试验研究 [D]. 西安: 西北农林科技大学, 2009.
Yin Jingao. Experimental study on velocity distribution rule of trapezoidal channel section and flow measurement technology [D]. Xi'an: Northwest Agriculture & Forestry University, 2009. (in Chinese)
- [13] 严军, 王二平, 孙东坡, 等. 矩形断面明渠流速分布特性的试验研究[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2005, 38(5): 57—62.
Yan Jun, Wang Erping, Sun Dongpo, et al. Experimental study on distribution properties of velocity in rectangular open channel [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2005, 38(5): 57—62. (in Chinese)
- [14] Malavasi S, Guadagnin A. Hydrodynamic loading on river bridges [J]. *Hydraulic Engineering*, 2003, 129(11): 854—861.
- [15] Witzany J, Cejka T, Zigler R. Failure resistance of historic stone bridge structure of Charles Bridge. II: Susceptibility to floods [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2008, 22(2): 83—91.
- [16] Hung C C, Yau W G. Behavior of scoured bridge piers subjected to flood-induced loads [J]. *Engineering Structures*, 2014, 80: 241—250.
- [17] JTG D62—2015, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
JTG D62—2015, Code for design of highway reinforcedconcrete and prestressed concrete bridges and culverts [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese)