

# 桥梁在洪水状态下的失效形式分析

何明星,苑晓锋

(上海市建筑科学研究院有限公司,上海市 200032)

**摘要:**对于跨河桥梁,桥梁结构安全风险因素除了超载外,超标洪水对桥梁冲刷是跨河桥另一重大隐患。大量桥梁水毁实例资料显示,跨河桥在超标洪水作用下易出现基础冲刷掏空导致桩基承载力不足、板式橡胶支座滑移导致桥梁错位、上部结构直接漂浮滑移、上部结构直接横移倾覆等桥梁失效形式。因此,以合肥市南淝河上4座重点跨河桥为例,对桥梁在超标洪水下的失效形式进行分析,以为同类型桥梁在洪水状态下的失效形式分析提供参考。

**关键词:**桥梁;洪水状态;失效形式;漂浮失稳;横移倾覆

**中图分类号:** U442.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2023)09-0130-03

## 0 引言

跨河桥梁常年遭受河流冲刷,洪水期更甚,超标洪水(重现期大于等于100 a的洪水)严重威胁着桥梁的安全运营。为此,对桥梁结构在洪水状态下的失效形式进行研究是非常有必要的。通过计算机有限元软件模拟远期超标洪水状态下桥梁结构的失效形式和失效概率,从而保证预报的超标洪水到来前可以及时进行相应的临时加固措施,以保证桥梁在洪水期安全。

## 1 桥梁洪水状态下主要失效形式

大量桥梁水毁实例资料显示,跨河桥在超标洪水作业下易出现基础冲刷掏空导致桩基承载力不足、板式橡胶支座滑移导致桥梁错位、上部结构直接漂浮滑移、上部结构直接横移倾覆等桥梁失效形式。其中最常见的是超标洪水导致上部结构直接倾覆。

### 1.1 基础冲刷引起桩基承载力不足

对于部分地区跨河桥梁,由于桩基深度达到基岩难度较大,大部分桩基采取的是摩擦桩。摩擦桩桩基承载力主要由桩侧阻力和小部分桩端阻力构成。当遇到超标洪水时,桥墩基础处有效过水断面面积变小,水流流速急剧增大,此时洪水将带走桥墩处的大量泥砂,桩基外露长度慢慢变大,最终桩侧阻力减小,桩基承载力不足以支撑上部结构荷载,桥梁将出

现倾斜甚至坍塌。

### 1.2 上部结构漂浮滑移

在跨河桥中,大部分简支梁桥普遍采用板式橡胶支座,作为连接空心板梁与桥墩结构,传递上部结构荷载,满足板梁纵、横向变形要求。当遇到超标洪水时,桥梁空心板梁部分或完全被淹没,水流浮力使板式橡胶支座承受的荷载减小,从而导致板式橡胶支座与空心板梁的摩擦力减弱。当超标洪水作用在空心板梁的水平力大于该摩擦力时,空心板梁和橡胶支座将发生错位,甚至出现板梁漂移。

桥梁上部结构在超标洪水的水平力作用下,板式橡胶支座将承担上部传来的水平作用力,并产生一定的剪切变形。对于上部结构的水平位移,主要通过支座橡胶的剪切变形来完成,这时作用在橡胶支座上下承压面的水平反力不受橡胶支座的平面形状和加劲钢板的影响<sup>[1]</sup>。

若使板式橡胶支座在水平力作用下能够正常工作,则要保证支座与墩台接触面和梁体接触面上不出现相对滑动现象。根据参考文献[2],洪水条件下的桥梁需满足以下条件:

$$\mu R_{ck} \geq K_{\text{滑移}} \sqrt{(1.4G_e A_e \frac{\Delta l}{l_e} + F_{lk})^2 + (1.4F_D)^2} \quad (1)$$

式中: $R_{ck}$ 为结构自重标准值、0.5倍汽车荷载标准值(计入冲击系数)、1.4倍平均水动升力和静水浮力引起的支座竖向反力; $K_{\text{滑移}}$ 为横向抗滑移安全系数; $F_D$ 为平均水动阻力。因为桥梁滑移破坏具有瞬时脆性破坏的特性,必须考虑水动力的脉动,即采用水动力的瞬时最大值进行验算,瞬时最大水动力取时均值的1.4倍。

收稿日期:2023-01-03

基金项目:2020年上海市科委优秀技术带头人计划项目(20XD1432400)

作者简介:何明星(1989—),男,本科,工程师,从事桥梁隧道的检测监测及评估工作。

### 1.3 上部结构横移倾覆

大量桥梁被洪水冲垮实例表明, 超标洪水作用下, 桥梁上部结构横移倾覆也是一种较为常见的破坏形式。对于被洪水淹没的跨河桥梁, 洪水浮力与上部结构的部分荷载抵消, 有效重量减小, 桥梁上部结构的抗倾覆力矩减小。随着桥梁部分淹没后阻水面积的变大, 其横向倾覆力矩增大, 在洪水水平冲力作用下, 桥梁易被翻动推移, 即倾覆破坏。若洪水水平作用力足够大, 甚至能将上部结构主梁漂走。

梁桥在洪水作用下, 上部结构变形很小, 一般只可能出现刚体失衡破坏。因此, 模拟桥梁在洪水作用下计算时不考虑上部结构截面内力, 按刚体静力平衡条件, 对上部结构进行稳定性验算。水流作用下, 桥梁上部结构倾覆计算受力简图如图 1 所示。

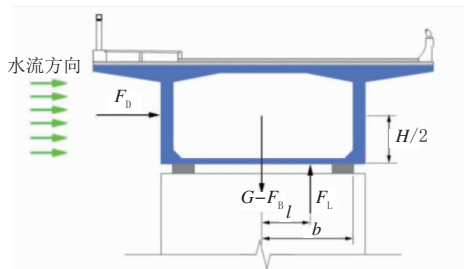


图 1 洪水状态下上部结构倾覆破坏受力

根据参考文献[2], 若要保证上部结构不发生倾覆破坏, 则倾覆稳定系数应满足下式要求:

$$K = \frac{M_{\text{稳}}}{M_{\text{倾}}} \geq K_{\text{倾}} \quad (2)$$

$$M_{\text{稳}} = (G - F_B)b \quad (3)$$

$$M_{\text{倾}} = \frac{F_D H}{2} + F_L (b - l) \quad (4)$$

式中:  $K$  为倾覆稳定系数;  $K_{\text{倾}}$  为抗倾覆安全系数;  $M_{\text{稳}}$  为结构稳定力矩, 由结构上部结构有效重量以支座背水边为旋转轴所求的力矩;  $M_{\text{倾}}$  为结构倾覆力矩, 由水流阻力和升力以支座背水边为旋转轴所求的力矩;  $b$  为箱梁中心距支座背水边距离;  $F_D$  为平均水动力阻力;  $F_L$  为流速竖向升力合力;  $l$  为升力合力点偏心距(考虑水动力情况下, 洪水对桥梁上部结构的升力各处均不同, 需通过 CFD 技术模拟得到的桥梁不同位置的升力系数, 便可计算得到升力合力的偏心距)。

根据桥梁不同位置的水动力参数, 便可计算得到不同水流速度下结构的倾覆力矩, 从而评估桥梁在洪水状态下的抗倾覆稳定性。此外, 因为桥梁倾覆破坏具有瞬时脆性破坏的特性, 必须考虑水动力的脉动, 即采用水动力的瞬时最大值进行验算。因此,

瞬时最大水动力取时均值的 1.4 倍。

## 2 重点跨河桥梁洪水状态下失效形式分析

本文对合肥市南淝河上 25 座桥梁中 4 座重点跨河桥梁进行洪水状态下失效形式进行分析, 主要内容包括桥梁基础冲刷检测分析、上部结构漂浮滑移分析、上部结构横移倾覆分析 3 种失效形式安全分析, 各破坏模式均考虑安全系数。其中, 横向滑移安全系数按《铁路桥涵设计规范》(TB 10002—2017)<sup>[3]</sup>取 1.3, 抗浮稳定性安全系数按《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)<sup>[4]</sup>取 1.05, 横向抗倾覆安全系数按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)<sup>[5]</sup>要求应大于 2.5。基于“结构倾覆破坏不先于构件承载力破坏”的原则, 本次研究基于安全考虑, 将桥梁上部结构横向抗倾覆安全系数取 4.0。

### 2.1 桥梁基础冲刷检测分析

为了解洪水对桩基冲刷引起的桥墩基础承载力的损失程度, 采用水下机器人和多波速无人船对桥墩桩基冲刷进行探测分析。实际探测的桩基的覆土高程和桩径与竣工时桩基埋深和桩径进行比对, 可计算分析桩基的承载力损失情况和后期可能的超标洪水对桥墩基础冲刷提供安全富余量。本次检测发现 4 座重点跨河桥梁基础未见明显冲刷。

### 2.2 上部结构漂浮滑移分析

通过对比分析 4 座重点桥梁上部结构最低点高程与 100 a 一遇洪水位, 在不考虑桥址处雍水高度情况下, 只有宋斗湾桥满足 100 a 一遇防洪设计标准。4 座重点桥梁防洪状态对比分析见表 1。

表 1 4 座重点跨河桥梁防洪状态对比分析

桥名	上部结构形式	梁底高程/m	100 a 一遇洪水位/m	最高洪水位时梁底净空/m	备注
淮河路桥	悬臂 T 梁	14.77	15.05	-0.28	淹至上部结构
铜陵路桥	钢箱梁	13.09	14.04	-0.95	淹至上部结构
宋斗湾桥	系杆拱桥	14.60	14.07	0.53	未到上部结构
孝肃桥	空心板梁	14.39	14.63	-0.24	淹至上部结构

由表 1 可知, 除宋斗湾桥在 100 a 一遇洪水位时未被淹没外, 其余桥梁在 100 a 一遇洪水位时均淹没至上部结构。考虑到桥梁结构形式和边界条件等因素, 计算其在横向滑移和漂浮失稳的失效形式下的稳定系数, 具体计算结果详见表 2。

表2 横向滑移和漂浮失稳稳定系数计算结果

桥名	横向滑移		漂浮失稳	
	抗滑移安全系数	滑移稳定系数	抗浮稳定性安全系数	漂浮稳定系数
淮河路桥	1.3	2.1	1.05	5.9
铜陵路桥	1.3	4.4	1.05	2.2
宋斗湾桥	1.3	—	1.05	—
孝肃桥	1.3	4.0	1.05	3.9

由表2分析可知,由于宋斗湾桥梁底高程较高,不存在淹没风险,故无横向滑移和漂浮失稳的可能。而另外3座重点跨河桥在横向滑移和漂浮失稳的失效形式下的稳定系数计算结果均大于安全系数,故可判断4座重点跨河桥在超标洪水作用下不会出现上部结构漂移滑移的失效形式。

### 2.3 上部结构横移倾覆分析

通过查询4座重点跨河桥梁的水文设计资料可知:桥址处洪水重现期为100a时的洪水流速计算值范围为1.67~2.48 m/s。为偏于安全考虑,上部结构横向倾覆破坏计算时,计算流速统一按照上述桥址处最大计算流速的乘以2倍安全系数,即4.96 m/s。此外,因为桥梁横向滑移和倾覆破坏具有瞬时脆性破坏的特性,必须考虑水动力的脉动,即采用水动力的瞬时最大值进行验算。因此,瞬时最大水动力取时均值的1.4倍。

考虑水动力下的上部结构横向倾覆破坏的稳定系数见表3。

表3 横向倾覆稳定系数

桥名	横向倾覆	
	抗倾覆安全系数	倾覆稳定系数
淮河路桥	4.0	2.8
铜陵路桥	4.0	9.0
宋斗湾桥	4.0	—
孝肃桥	4.0	2.6

根据计算结果,淮河路桥和孝肃桥在100a一遇的超标洪水水位下的倾覆稳定系数小于抗倾覆安全系数,即在100a一遇洪水的超标洪水下,淮河路桥和孝肃桥易发生上部结构整体横向倾覆破坏。铜陵路桥在100a一遇的超标洪水水位下的倾覆稳定系数远大于抗倾覆安全系数,即在100a一遇的超标洪

水下,铜陵路桥不易发生上部结构整体横向倾覆破坏。宋斗湾桥由于梁底高程较高,不存在淹没风险,故在100a一遇超标洪水水位下不会产生横向倾覆破坏。

### 3 结语

通过跨河桥梁在超标洪水状态下主要失效形式总结,结合合肥市南淝河25座桥梁中上4座重点跨河桥进行分析,确定了目标计算模式,同时确定了各失效形式的安全系数参考值。然后对4座桥进行了风险排查和各种失效形式下的计算分析,具体结果如下:

(1)桥梁在洪水状态下的失效形式主要考虑基础冲刷引起桩基承载力不足、上部结构漂浮滑移和上部结构倾覆破坏3种失效形式。

(2)南淝河上4座重点跨河桥梁洪水状态下安全性分析主要进行桥梁基础冲刷检测、漂浮滑移计算分析和倾覆破坏计算分析,并确定各破坏模式的安全系数。

(3)南淝河上4座重点跨河桥桥梁在100a一遇超标洪水作用下均不会产生横向滑移破坏和漂浮失稳破坏。其中,淮河路桥和孝肃桥在100a一遇的超标洪水下的倾覆稳定系数小于抗倾覆安全系数,即在100a一遇的超标洪水下,淮河路桥和孝肃桥可能发生上部结构整体横向倾覆破坏。

对跨河桥梁在超标洪水下进行失效形式分析,能有效识别桥梁防洪风险,及时进行桥梁防洪保护措施,降低超标洪水对桥梁产生破坏的概率。今后需进一步采用洪水期实测数据进行必要的验证分析,从而为类似的跨河桥梁的防洪安全设计提供防范思路。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 南京市市管城市桥梁漫水状态下安全性及应急措施研究报告[R].2021.
- [3] TB 10002—2017,铁路桥涵设计规范[S].
- [4] GB 50007—2011,建筑地基基础设计规范[S].
- [5] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].