

对 2020 年四川汛情下涪江大桥“重车压梁”式保护法中 力学原理的探析

许广达 李琰东

大连理工大学 建设工程学部

摘要：汛情下，大桥受到水流及其中漂浮物的水平冲击荷载以及水的竖向浮力作用，容易发生桥墩破坏、桥面侧翻等事故。“重车压梁”是通过重载货物列车增加桥梁自重，以提高桥梁稳定性的一种有效方式。被保证在桥梁设计荷载的范围之内的“重车”荷载可以有效减小桥墩受水流冲击面的拉应力并增加桥墩与基础和河床的摩阻力，以起到“抗洪护桥”的作用。

Abstract: Under flood conditions, the bridge is exposed to the horizontal impact load of the water flow and floating objects and the vertical buoyancy of the water, which is prone to causing accidents such as pier damage and bridge deck rollover. The ‘heavy vehicle pressure beam’ is a method to increase the self-weight of the bridge by heavy cargo train, which is an effective way to improve the stability of the bridge. The heavy vehicle load that is guaranteed to be within the design load range of the bridge can effectively reduce the tensile stress of the pier's impact surface and increase the Friction between the pier and the foundation and river bed, so that it can play the role of flood resistance and bridge protection.

受季风影响，我国西南地区夏季降雨偏多，连年汛情对桥梁安全也提出极高挑战——2014年5月23日，广东增城市遭遇罕见特大暴雨，暴雨导致增江水位急剧上涨，致使横跨增江的增城东门桥在暴雨中被洪水冲塌；2016年7月9日，台风“尼伯特”致使福州闽清县普降特大暴雨，造成梅溪流域洪水急剧暴发引发了316国道福建闽清县溪口大桥的冲塌……桥梁是道路跨越河流的最主要形式，对保障公路畅通和运输安全起着至关重要的作用，因此，此类事故是国内外共同关注的问题。而在今年牵动人心的四川汛情当中，一种“重车压梁”式抗洪措施对桥梁的稳固发挥了显著作用。

2020年7月中旬，四川地区持续强降雨，绵阳市境内涪江流域洪水超出警戒水位，对宝成铁路涪江大桥的安全稳定造成极大威胁。8月起，当地相关部门开始通过“重车压梁”的方式增强桥梁自重，有效地保障了桥梁的安全。实际上，“重车压梁”在我国已经过多次成功实践^[1]，成为“抗洪护桥”的功臣，但国内外对其具体作用机理研究成果尚较少。本课题组通过对相关力学现象的分析，给出洪水下桥梁破坏的机理以及“重车压梁”的保护机理，以期较为透彻地给出对该工程经验的总结，并期望能有助于后续国内外对于桥梁保养维护等方向的研究。

1 汛情下桥梁破坏因素分析

河流流域的洪水对桥梁的破坏主要体现在横向冲击荷载以及竖向浮力的作用。

1.1 横向冲击荷载

我们认为水流是稳定流，可得距桥墩底部高度为 h 的部位所受水平力是

$$F_h = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma}{g} \cdot C_D \cdot A_h \cdot u_h^2$$

其中， C_D 为阻力系数，与桥墩具体形状有关； A_h 为距桥墩底部高度为 h 处垂直流向的投影面积； u_h 为距桥墩底部高度为 h 处水流的流速。据文献资料， C_D 通常可按下表取值^[2]：

桥墩形状	C_D
方形桥墩	1.5
矩形桥墩 (长边平行于水流)	1.3
圆形桥墩	0.8

因此，在桥墩被淹没部分整体上作用的水平力 F 为

$$F = \int_0^z F_h dh$$

式中， z 是被淹没部分的高度。

根据安全性需要,按《公路桥涵施工技术规范》(JTG TF50-2011)要求,此处指定流水压力合力的着力点位于设计水位线以下三分之一水深处。

Malavasi 等进行了洪水淹没部分或者全部桥梁时的水流荷载实验^[3],设桥梁结构迎水区域阻碍面积是 A ,同时加以考虑桥梁形状阻力系数,提出了水流对桥梁的水平作用力公式是

$$F = \frac{1}{2} C_D \cdot A \cdot \rho \cdot u^2$$

此公式与上述结论形式基本一致。

综上所述,并比较国际上研究得出的水流水平作用力公式,可得桥梁水平作用力的重要影响因素有:水流密度 ρ 、桥梁断面水流平均流速 u 、桥梁断面在垂直于水流方向的面积 A 、水流阻力系数 C_D 。

此外,由动量定理,水中漂浮物也具有较大影响。漂浮物的撞击力虽属于偶然荷载,但对桥墩结构仍具有较大危害。漂浮物带来的额外冲击力

$$\overrightarrow{F_{float}} = m_{float} \cdot \overrightarrow{u_{water}} = \frac{Wv}{gT}$$

其中, W — 漂浮物重力(kN);

v — 撞击时水流瞬时速度,一般按照水流平均速度简化处理;

T — 撞击时间(s),若 v 简化处理, T 可取 1s。

1.2 竖向力作用

如果不考虑水流的振动、将其视为层流,直接认为桥梁顶端和水流速度方向基本平行,则此时洪水冲击对桥梁结构产生的竖直作用力主要为静水状态下的浮力。

$$F = \gamma V$$

其中, V 表示桥梁结构被洪水淹没时所排斥水的容积,即为桥梁被淹没结构段的容积。

而实际情况中,洪水并非不变的层流,水流的流向和流速都是不平稳的。假设洪水水流的任何一点的瞬时速率是由时均速率 v 与附加速率 v_0 构成的。时均速率 v 可以认为是与自由水面的层流流速相互平行,是常值;而实际情况下,水流由于受到外面多种多样的影响作用,比如河岸岩石沉降、大风、河底面不平整等,其形成的附加流速和方向都不固定^[4],其中的竖直分量便会对桥梁额外形成向上的托力。

1.3 洪水作用下桥梁的主要破坏形式概述

1.3.1 桥墩破坏

桥墩破坏是洪水水平作用力和水平弯矩、偏心力等外力共同作用的后果,其失稳形式主要包括:

- (1) 墩地发生较大水平位移,桥墩墩身倾斜;
- (2) 合力偏心距过大,桥墩倾覆;
- (3) 高墩承受弯矩和压力作用力,出现挠曲失稳;
- (4) 墩身出现裂缝等。

1.3.2 桥面侧翻

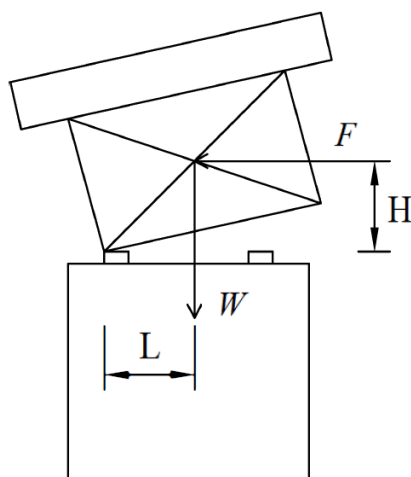


图 1 桥面侧翻示意图

由上图 1 易得，对受水平荷载一侧桥面与桥墩连接点取力矩平衡，当 F 满足 $F = \frac{WL}{H}$ 时，桥面就将发生破坏。

1.3.3 基础破坏

基础破坏，主要是在洪水的水平推力及水浮力的共同作用下，产生的桩基础的失稳倾覆。具体失稳形式包括：（1）桥梁基底出现滑移；（2）基底受偏心力作用，部分区域受压较大，基础底面出现塑性变形。一般地，打入桩基础有较好的抗震性能，深埋基础抗震性能又优于浅埋基础。^[5]由于本文主要探讨重车压梁的保护作用，因此下一部分中对于基础破坏形式不做详述。

2 汛情下桥梁破坏和“重车压梁”保护机理分析

本部分综合考虑前一部分所述各破坏因素，由点及面，具体分析汛情下桥梁的破坏机理和“重车压梁”的保护机理。

2.1 对于桥墩部分

2.1.1 破坏机理

汛情下桥墩受到的水平方向的力正如前文所说，主要是水流对桥墩产生的巨大冲击力 F_1 ，以及可能的一些漂浮物的撞击力 F_2 。分析桥墩的水平方向受力图可得桥墩产生的弯矩（竖直方向受力不会产生弯矩，因此在此不再进行详细分析）。

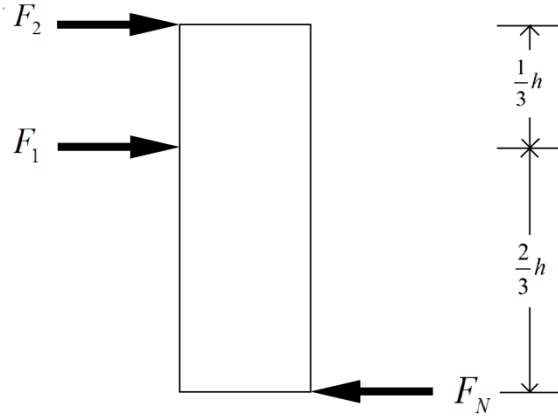


图2 桥墩水平方向受力简图

$$M = F_1 \cdot \frac{2}{3}h + F_2 \cdot h$$

$$\sigma_1 = \frac{M}{W_z}$$

显然，桥墩的受水流冲击面会产生拉应力，另一面会产生压应力，而混凝土桥墩的一个最显著特点就是抗压不抗拉，所以巨大的水流冲击力和漂浮物的撞击力很可能会使桥墩受水流冲击面产生过大的拉应力，从而产生裂缝，使桥墩发生严重破坏甚至倒塌。

桥墩的垂直方向受力如前文所述有：刚梁重量 G_1 、桥墩重量 G_2 。水对桥墩的上浮作用 F_v 和基础对桥墩的支持力 F_N 与 G_1 、 G_2 平衡，对桥墩产生的压应力：

$$\sigma_2 = \frac{G_1 + G_2}{S}$$

其中， S — 桥墩的横截面积。

桥墩受水流冲击面的应力

$$\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$$

若 $\sigma < 0$ ，表明桥墩受水流冲击面受压，这种情况我们可以不用考虑其会超过桥墩抗压强度的情况，因为设计环节会保证其桥墩承受压应力的设计值大于此处的压应力。

若 $\sigma > 0$ ，则表明桥墩受水流冲击面受拉。由于混凝土桥墩抗拉强度很低，若水平方向力较大，桥墩产生较大弯矩，很容易使得 $\sigma > \sigma_t$ （ σ_t 为桥墩的抗拉强度），这时桥墩就面临着破坏风险。

2.1.2 基于 ANSYS 的“重车压梁”对桥墩的保护机理分析

从上述分析我们很容易发现，增加桥墩竖直方向向下的力在上面 $\sigma > 0$ 的情况下可以减小 σ ，从而达到减小桥墩受水流冲击面的拉应力，达到保护桥墩的目的。

重车压梁就是应用了这一原理。重车压梁主要用在刚梁，这是因为钢梁本身重量较低，其在桥墩产生的压应力不大，不能抵消水平力产生的拉应力。如果在桥面上施加适当的荷载，

使 $\sigma < \sigma_t$ ，则可以达到保护桥墩的目的。

以下基于 ANSYS 对“重车”荷载对桥墩的保护作用原理进行仿真模拟。模型整体采用 C40 混凝土，弹性模量 $E = 3.25 \times 10^{10} \text{ Pa}$ ，密度 $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$ ，泊松比 $\mu = 0.3$ 。用块体单元建立单墩有限元模型^[6]，暂不考虑土与墩的相互作用，墩基础底部按固定端约束处理^[7]。采用如下模拟条件：假设 20 kg 的漂浮物以 6 m/s 的速度正面撞击方形桥墩顶部，撞击时间 0.1 s，则根据动量守恒可计算得到撞击力 $F_2 = 1200 \text{ N}$ ；按文中（1）式，并取桥墩阻力系数 C_D 为 1.5，水流流速 10 m/s，则单位宽度桥墩所受水流冲击力为

$$F_1 = 0.5 \times 1.5 \times \frac{2600}{1000} \times 30 \times 10^2 = 5850 \text{ N}$$

模型图见图 3，仿真得到沿水流方向的桥墩位移以应力状况如图 4、图 5 所示。

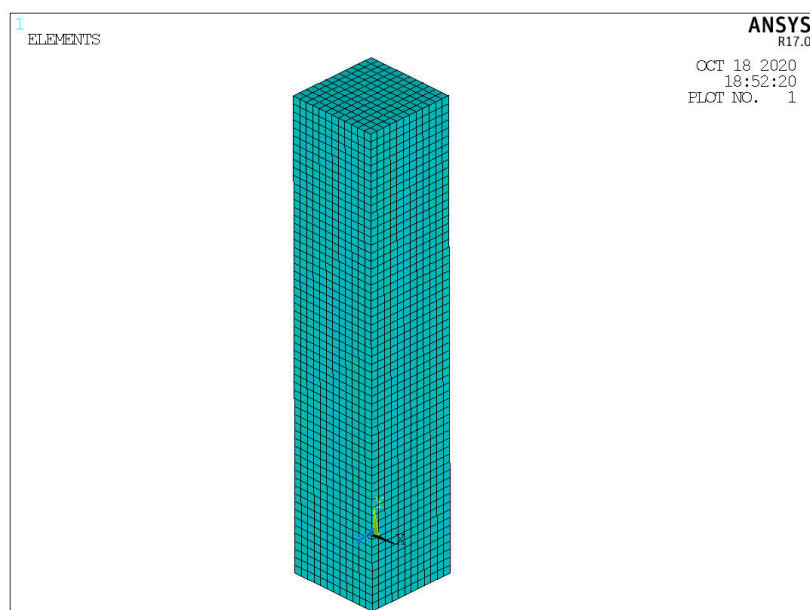


图 3 模型示意图

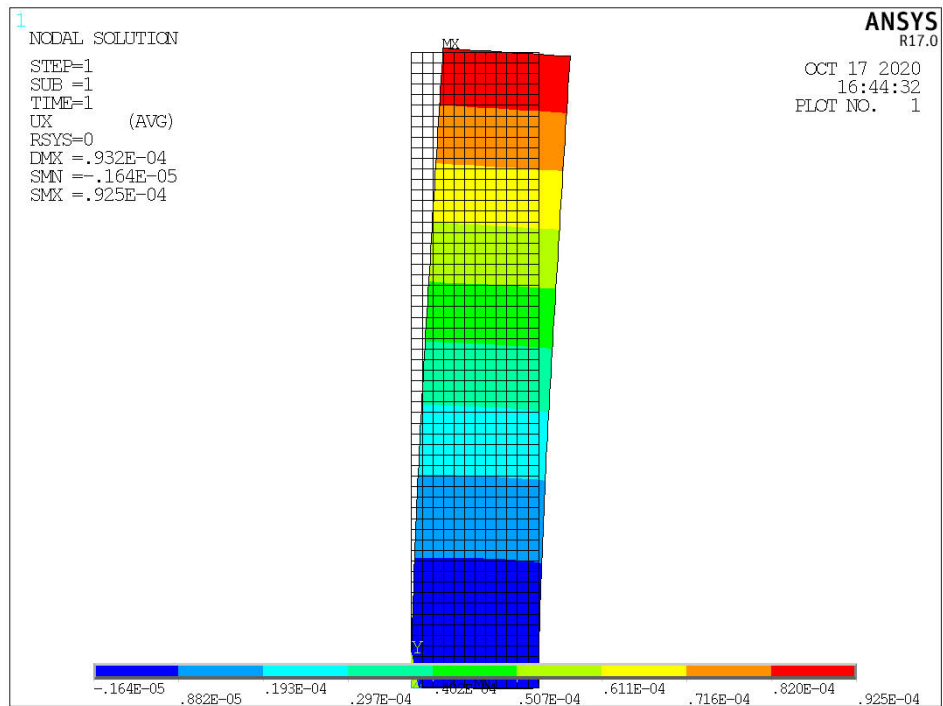


图 4 未加“重车”时桥墩沿水流方向位移示意

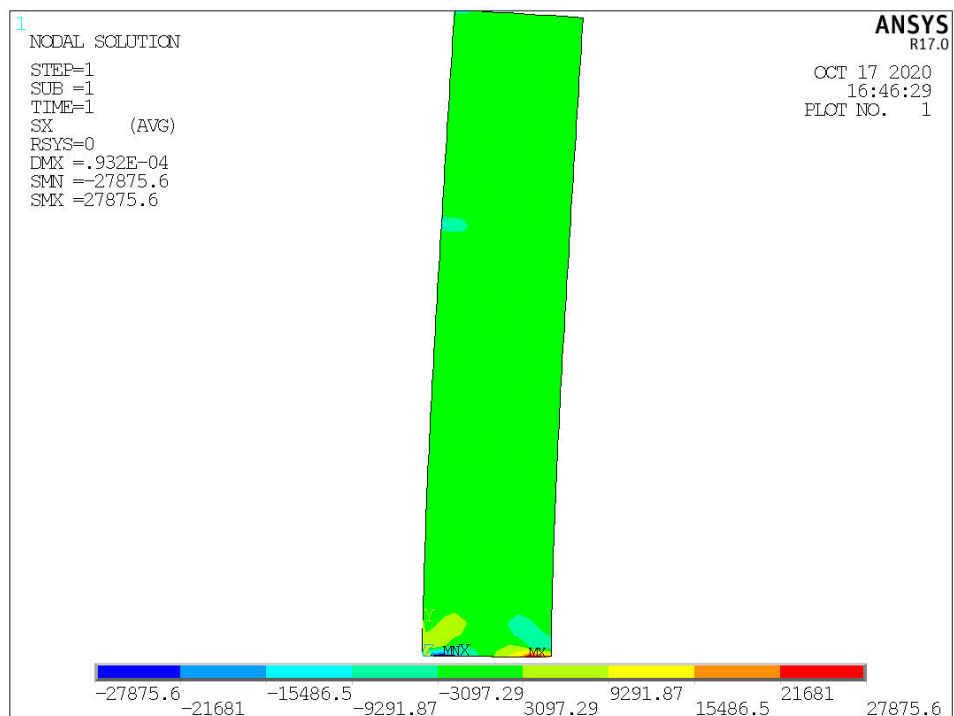


图 5 未加“重车”时桥墩沿水流方向应力示意

假设此桥墩上部承担 8000 吨重车荷载，折算为均布荷载，计算得到沿水流方向的桥墩位移如图 6 所示。

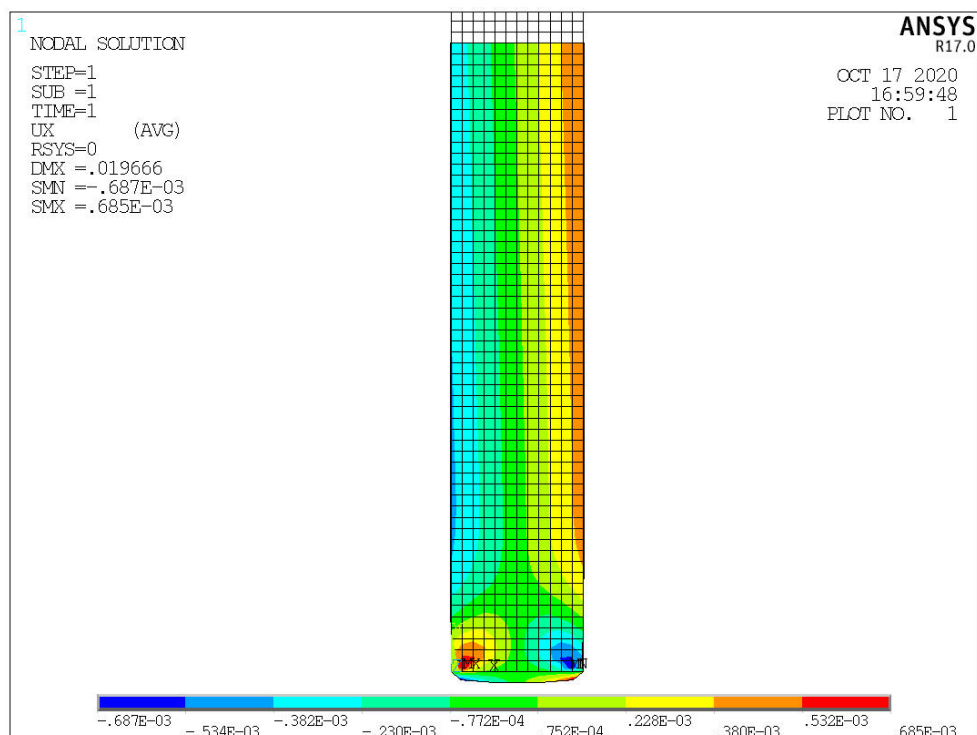


图 6 加“重车”后桥墩沿水流方向位移示意

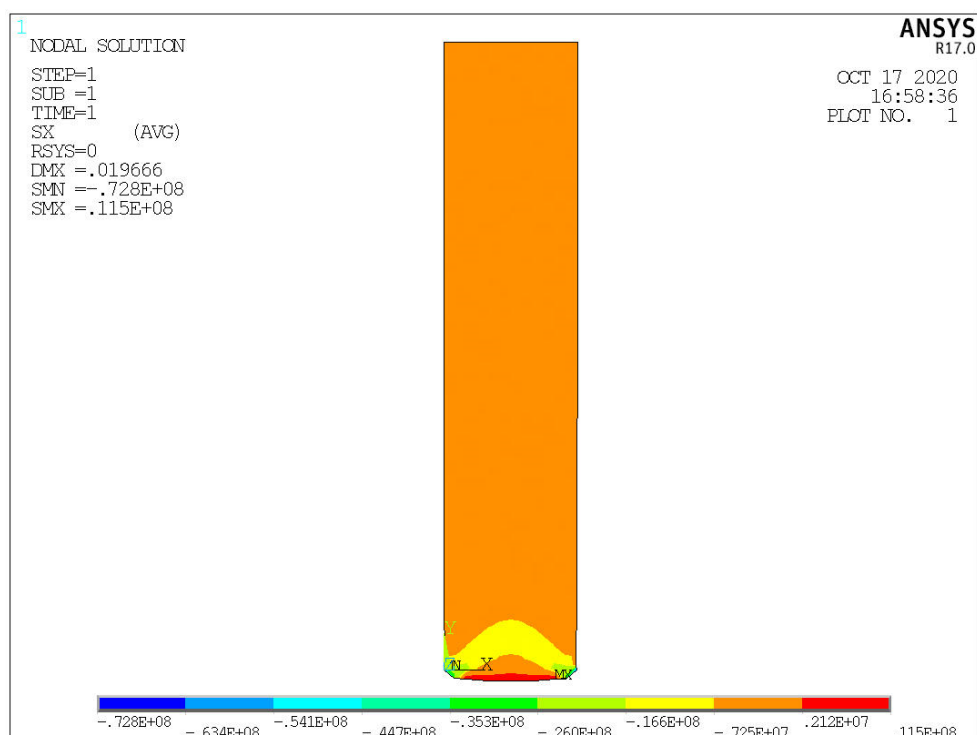


图 7 加“重车”时桥墩沿水流方向应力示意

基于材料力学理论，与上述计算结果结合可知，“重车压梁”的方法可以有效地降低桥墩受水流冲击面的拉应力的影响，起到保护桥墩的作用。

同时，合适的“重车”荷载还要考虑以下几点：

(1) 水平力也会对桥墩受水流冲击的背面产生较大压应力，加上竖直方向的合力产生的压应力为

$$\sigma' = \sigma_1 + \sigma_2$$

其中， σ' 的值不得超过混凝土桥墩的抗压强度 σ_c 。

(2) 不能超过梁的安全荷载，所施加荷载最好约等于正常状态下桥的允许荷载。

(3) 在满足前两个条件的前提下要确保“重车”产生足够的压应力来抵消拉应力。

2.2 对于桥面侧翻

若水面越过桥面，由于桥面与桥墩的连接较弱，可以简化为前文所述桥面侧翻的条件，因此桥面就很容易发生侧翻。

当在桥面上所加荷载满足 2.1 所述条件，则桥墩与基础、河床的摩阻力随之增加，显然可有效避免桥面侧翻。

3 结论与展望

3.1 结论

本文以 2020 年 8 月四川汛情下涪江大桥采用重载货物列车进行“重车压梁”式保护的成功经验为背景，针对其中的力学原理，从理论力学、材料力学的知识层面，对桥梁在汛情之下的破坏机理和“重车压梁”的保护机理进行了探析。得到的主要结论如下：

(1) 河流流域的洪水对桥梁的破坏主要体现在横向冲击荷载以及竖向浮力的作用。横向冲击荷载与桥墩具体形状、桥墩垂直流向的投影面积、水流的流速以及漂浮物重力等因素有关，其中同等条件下方形桥墩所受水平力明显高于其他形状桥墩。竖向浮力中，静水状态下的浮力占大部分，但不平稳的水流的流向和流速产生的额外向上的托力也不容忽视；

(2) 混凝土桥墩抗压不抗拉，一般桥梁的桥面与桥墩的连接较弱。由此，合理进行“重车压梁”可从防范桥墩破坏和桥面侧翻两方面有效减小大汛情之下桥梁的安全风险。

3.2 不足与展望

(1) 本文只从包括水流水平冲击荷载漂浮物冲击、竖直浮力等的主要因素出发，探析了桥梁在洪水作用下的稳定性，随着日后知识的拓展、加深，可以多加几个影响因素进行全方位的分析，比如考虑河床的形状、风力、桥墩的粗细尺寸等；

(2) 本文缺少实际试验模拟。若条件允许可进行现场模型搭建和实验，这样可提高课题组所作分析的准确性。

参考文献

- [1] 田享华.暴雨成灾后亟需另一重“重车压梁”[J].法律与生活,2018(15): 1.
- [2] 高冬光. 跨海桥梁和滨海公路水文与防腐[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
- [3] Malavasi S.,Guadagnin A . Hydrodynami c loading on river bridges[J] . Hydraulic Engineering, 2003, 129(11): 854-861.
- [4] 薛飞龙. 长江上游叙泸段非恒定流特性及对航道要素的影响研究[D].重庆交通大学, 2018.
- [5] 陈幼平,周宏业.斜拉桥地震破坏的计算研究[J].地震工程与工程振动,1995(03): 127-134.
- [6] Santhakumar R, Chandrasekaran E, Dhanara J R. Analysis of Retrofitted Reinforced Concrete Shear Beams Using Carbon Fiber Composites[J]. Electronic Journal of Structural Engineering, 2004, (4): 66-74.
- [7] 陈梁擎,袁沛,章立,王海.组合式防洪挡板系统抗冲击能力分析[J].中国防汛抗旱,2018,28(12): 70-73.