

桥梁桥墩汛期碰撞风险与碰撞理论分析研究

谭 译

重庆工业职业技术学院 重庆 401120

【摘 要】桥梁基础汛期施工面临碰撞风险，一旦发生事故将造成巨大的经济损失和社会影响。偶发的碰撞区域损伤导致钢围堰等结构继续使用存在安全隐患，钢围堰已有相应分析方法，但主要是基于静力等效分析研究，而对动力响应研究较少，特别是在受撞击方面的研究更少。为完善桥墩钢围堰碰撞理论，本文分析了钢围堰渡洪技术以及碰撞理论中的经验算法、解析算法和有限元算法。

【关键词】桥梁桥墩；碰撞分析；碰撞理论

1 汛期施工阶段碰撞风险分析

作为修建桥梁基础的涉水工程，钢围堰属于施工阶段的挡水结构并与地基河床接触，形成隔水区域，以便浇筑桥墩承台，同时面临湍急的水流冲击与复杂的地质条件。桥梁基础的施工牵动着整桥修建的工期与施工质量，在深水基础搭建时会面临很多问题。以长江上游的跨江大桥为例，汛期深水基础施工阶段最为重要的是安全渡洪问题。在长江流域的众多自然灾害中，洪水的危害最大，也是造成桥梁工程破坏最为严重的灾害，其发生时间频率不可估计和涉及范围面广等特点，导致了桥梁垮塌、基础位移和桥体振动等事故。洪水来临时，携带了诸多次生灾害，洪水中时常会夹带大型漂浮物和脱缰船舶，其破坏性加剧。江面漂浮的树木和小船等漂浮物与流水共同作用，对桥墩基础设施发生剧烈的碰撞，受损部位涉及整桥的梁、栏杆及水下基础^[1]。

钢围堰是应对水流湍急和桥墩复杂形式的外围结构，利用其双壁结构，以及调整围堰内水头差和灌注混凝土等手段，应对流水的冲击而保障围堰结构稳定、安装下沉和抵抗倾覆等问题。钢围堰结构设计及施工阶段安全渡洪的措施，其中考虑了结构自重、静水压力、水浮力、土压力等永久荷载作用，以及流水压力、风荷载和波浪效应等可变荷载作用，并以实际风险大小考虑了船舶撞击力和漂流物撞击力等偶然荷载作用。钢围堰在脱缰船舶撞击力或漂流物撞击力的偶然作用下，认定超过承载能力极限状态的情况为局部结构刚体失去平衡，结构构件或连接因其应力超过材料强度而破坏或因过度的塑性变形而不适于继续承载。

2 桥墩碰撞问题分析

2.1 桥墩-漂流物冲击

我国长江流域水系繁多，众多公路桥梁修建于水文条件复杂的河流区域，桥梁基础设施面临着水毁风险。诸多研究学者开展了公路桥涵水灾损伤的调查与研究。景旭斌^[2]基

于LS-DYNA程序对流体产生的波浪及夹带的大型漂流物对防波堤的影响，以ALE算法求解漂流物对防波堤冲击碰撞过程的影响规律。研究得出ALE算法可以有效解决三维模型的冲击动力响应，结果推出单纯的波浪效应比夹带漂浮物出现的波浪力损伤效果更明显，结构稳定性危险系数更高。提出漂流物的重量以及碰撞位置是主要损伤参数。

2.2 桥墩-船舶冲击

碰撞问题是由一场偶然的撞击事故出现在人们的意识中，自撞击事故频繁出现后，多数学者对碰撞进行了理论研究，并融入了众多科学领域。从力学方面看，碰撞属于能量交互和传递的过程，也是应力波耦合与扩散的过程，解决碰撞问题需要从极短时间的动力响应入手。

在经验方法研究的历程中，人们在谋求碰撞问题快速高效的计算的同时，也相应在准确精细层面的探索上砥砺前行。到了解析方法的基础理论涉及碰撞问题的运动过程。在船舶碰撞研究方面，解析理论设定桥梁为刚性墙，刚度远大于船舶。解析理论分为外部、内部机理，且区分出了船舶碰撞的滞后效应。解析法将桥梁桥墩视为杆系结构，以结构力学得出碰撞的碰撞力、位移。此研究脱离了单纯的统计法，为往后的结构解析简化指明了方向。经验公式与解析简化的研究欠缺对环境因素、结构形状、材料特性方面的考虑，这些影响会导致结果的差异，而并不能准确地反应出碰撞过程与碰撞结果。随着有限元算法的革新，现已成为研究碰撞问题的主要方法。通过有限元软件，高效准确地复刻出碰撞体的结构、材料、接触和边界条件，并以多种参数背景求解出碰撞动力响应与撞击力的时程曲线。

2.3 钢围堰渡洪技术

钢围堰渡洪技术主要针对洪水冲刷和流水压力的整体稳定性影响方面进行计算，以及相关联的洪水漂流物或小型船舶的碰撞风险因素。桥梁深水基础的结构特点和施工环

境较复杂，由流水带来的风险因素众多，施工阶段的安全性至关重要。钢围堰结构作为桥梁深水基础修建时的重要结构，其主要功能为挡水、负荷以及防撞，但深水下施工条件苛刻，较浅水环境难度更大，在汛期时其处于流水冲击、洪水冲刷和洪水夹带的大型漂流物撞击的复杂环境。洪水流速的加快影响着流水压力，桥墩基础的修建面临挡水结构的稳定性、整体结构的抗倾覆和局部结构的防碰撞等难题。

钢围堰基础施工阶段渡汛措施：（1）设计钢围堰快速拼装，确保拼装时效。壁板焊接导向架（限位工字钢）以限制结构整体平移，横桥向迎水面设计钢管连接钢护筒，使钢围堰迎水面的钢护筒共同受力。（2）围堰施工时效未能完成钻孔平台时，钢护筒安装后暂不与围堰固结，此时钢围堰能向上浮动，流水压力和风荷载对水平环板、导向架和钢护筒的作用力由锚碇系统承担，当水位上升过快时可以通过上浮围堰减少水压力。（3）围堰施工时效能完成钻孔平台时，设计螺旋状钢筋环放置于封底混凝土，以提高钢护筒与封底混凝土的粘结力。钢护筒内灌砂，并与围堰固结，此时利用钢护筒承担流水压力和风荷载对围堰的作用力。此方法保证了围堰结构能够抵御深水急流的流水冲击力，并在安全渡汛的前提下，完成钻孔平台的施工。

3 桥梁桥墩碰撞理论分析

3.1 经验算法

作为解决碰撞问题最早的理论依据，经验公式法也在不断的发展，随着时间的推移，国内外提出了很多的经验理论，针对物体碰撞产生的撞击力，经验公式是快速计算得到结果最有效的方式^[3]。很多国家在参考了数值模拟分析结果后，又对经验公式进行了修正。

（1）美国“AASHTO”规范，美国公路协会AASHTO通过对Worsin碰撞理论分析研究，总结出船舶正向碰撞的撞击力公式：

$$P=0.98\sqrt{DWT}\left(\frac{v}{8}\right) \quad (1)$$

其中，P为等效静态碰撞力（MN）；V—船舶撞击速度（m/s）；DWT—船舶实际重量（t）。“AASHTO”公式被沿用至今，其计算的可靠性被众多实验所证明，但计算局限于船舶的正面碰撞。

（2）Woisin公式，以能量守恒原理推出船舶撞击的损伤程度与能量传递的关系，引入进碰撞动力学中，将船舶碰撞理论进行了修正，修正后的船舶碰撞经验公式加入了船舶的实际重量：

$$F=0.88\sqrt{DWT}(1\pm 50\%) \quad (2)$$

随后工程界改进了上式，将船舶的质量和速度共同纳入撞击力的计算之中，结果可靠性更强，一直被沿用至今。

（3）欧洲规范

欧洲研究学者将船桥碰撞问题以解析法的方式，简化桥墩为单自由度体系的弹簧-质量系统，也简化了船桥碰撞时船舶的撞击动能，假设其动能转化率为100%，同时考虑船舶与桥墩之间的动力刚度。

$$F_{\max}=v\sqrt{Km} \quad (3)$$

其中， $F_{\max}$ 为船舶撞击力最大值（MN）；v为船舶撞击速度（m/s）；K为船体等效刚度（内河船舶K=5MN/m，海运船舶K=15MN/m）；m为船舶重量（10⁶kg）。

（4）《公路桥涵设计通用规范》

JTG公式中船桥碰撞被设为偶然作用，规定桥墩设计须考虑船舶的撞击力。在有漂浮物水域中的桥墩，须考虑漂浮物的撞击情况，按照偶然作用施加给桥墩。拟定漂浮物的计算撞击点位于通航水位线桥墩宽度的中心。

公式如下：

$$F=\frac{Wv}{gT} \quad (4)$$

其中，F为撞击力（KN）；W为漂流物重力（KN），应根据河流中漂流物情况，按实际调查确定；v为水流速度（m/s）；T为撞击时间（s），根据实际资料估计，无实际资料时，可用1s；g为重力加速度，g=9.8 m/s²。

（5）《铁路桥涵设计规范》

TB公式(TB 10002-2007)定义的船舶撞击力为：

$$F=\gamma v \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{C_1+C_2}} \quad (5)$$

其中，F为船舶撞击力（KN）；γ为等效动能系数（s/m^{0.5}），船舶正撞时γ取0.3，斜撞时γ取0.2；v为船舶撞击速度（m/s）；α为船舶撞击角度；W为船舶重量（KN）；C₁、C₂分别表示船舶及墩台的变形系数。

国内外修正经验公式的方法普遍采用动量定理推导、实验验证以及有限元数值模拟。规范中的经验公式对船舶的碰撞局限于初始动能和撞击角度，对于撞击面积以及桥墩结构形状并未考虑。

3.2 解析算法

解析法是以简化目标为数学模型的一种分析方法，在碰撞问题中，忽略碰撞过程的变形，以动量守恒和结构力学为理论基础。

洪水漂流物撞击桥墩钢围堰，其碰撞原理与船桥碰撞一致，以船桥碰撞解析算法经验为指导，碰撞简化分析模型。建立漂流物xy坐标系、钢围堰mn坐标系和碰撞点ηξ坐标系，其中，mn轴为钢围堰对称轴，x轴为漂流物的中心线，y轴为中心线的法线，ηξ坐标系为漂流物撞击和钢围堰的接触点，η轴为撞击接触时的切线方向，ξ轴为撞击接触时的法线方向。

漂流物撞击力分为切向撞击力 η 方向和径向撞击力 ξ 方向。设漂流物撞击力为 F ，由牛顿第二定律和动力学理论推出。

解析算法可以求解不同质量、速度和撞击角度的碰撞问题，应用范围广泛，但局限于变形与碰撞接触面积都较小的情况。漂流物和钢围堰碰撞的情况，解析算法的适用性高于碰撞变形较大的船桥碰撞。但解析法是以静力学为基础的求解过程，常用于分析撞击后的碰撞状态，无法计算其碰撞时程的撞击力，有限元算法可以很好的解决解析法无法涉足的多参数化碰撞问题。

3.3 有限元算法

有限元算法主要以Hypermesh、LS-DYNA等有限元软件为实现，其求解算法基础，涵盖百种材料本构模型、几十项接触类型，适用于碰撞、爆破、冲压、流固耦合、切割等非线性动力分析。它的动态分析以Lagrange算法为主，ALE、欧拉算法为辅，其准静态分析模式兼有隐式求解功能。

3.3.1 碰撞接触理论

(1) 单面接触。碰撞模型中结构的表面会存在自身的接触，这种情况会采用单面接触类型，结构之间的表面接触也可以采用单面接触形式。单面接触会使求解器运行结构外表面检查，查看结构表面是否发生了穿透。单面接触是节约设置时间的一种接触方式，在未知接触表面状况或结构表面变形的情况下，无须设置其他接触方式，系统会默认其为接触主面或接触从面。

(2) 点面接触。碰撞模型中，一个节点与目标面的接触，属于点面接触，常应用于实体表面的接触方式。点面接触主要针对可预知的接触面，它必须指定接触主面和从面。点面接触的运算效率极高，它可以克服接触从主面的非对称表面接触。

(3) 面面接触。碰撞模型中，若一个结构部件预知有可能会出现穿透其他结构表面的情况，就应当使用面面接触类型。而面面接触，指的是两个相接触的表面呈现出完全对称的状态，从而使得目标面和接触面不区分主从面。面面接触，既可以运用于任意的形态，或者运用于有较大面积的接触，又可用运于解决两个结构部件之间，有可能存在比较大的滑动或移动。

3.3.2 动态接触理论

(1) 动力约束接触法为最基础的接触算法，广泛应用于有限元软件。关于动力约束接触法的原理，可以作以下解释：修正一个时间步长 ΔT ，系统将未附于目标面的节点检索出来，发生穿透的目标面，会将此节点的时间步长 ΔT 减少，从而达到还未发生穿透的目的，对于已经发生穿透的节点，程序会给予约束，最后目标面与节点既作用且未发生穿透。不仅如此，程序还会时刻检测各节点的拉应

力，确保完全释放且不受影响。采用动力约束接触法时，如果目标面网格的划分细致于接触面，就有可能出现部分节点搜索不到目标面而呈现出穿透的状况。

(2) 分配参数法分配参数法将参与接触的单元质量划分为二，分配至被接触的主面上，与此同时，控制目标面的压力分布，且将其质量以接触面的应力确定，并施加约束给从节点的加速度与速度，从而确保从节点滑动于主面，从而节点将无法穿透主表面，就回避了反弹现象。分配参数法被运用于处理接触界面相对滑移而不可分开的问题。

(3) 罚函数法是一种默认的接触计算方法。系统会最优先检验每个从节点是否已经穿透主面，系统会跳过未穿透界面。在穿透界面与作用节点出现界面反力时，此反力会关联其主面的刚度，以及穿透的深度并呈线性比例。在物理的层面上，就如同为了防止从节点穿透主面，而于两者间放置一法向弹簧，这个接触力就被称为罚函数值。“对称罚函数法”的定义则不同，它是同时将上述的操作放置于每一个主节点。对称罚函数法具有对称性，它的动量守恒原则把握精准，不会出现撞击以及需要释放条件，且引发网格出现零能模式的情况较少。

3.3.3 沙漏控制理论

沙漏会产生于单元刚度矩阵中，发生在四边形和六面体单元上，单点积分造成矩阵秩的缺失，并因单元缩减积分问题而产生沙漏。沙漏不由应力应变导致，它属于稳定的数学模态，但出现了物理原则上不应该发生的零能模式，物理层面上的不符，会导致运算错误。那么沙漏控制则是必要的，将沙漏能降低于系统总能量的10%以内，以保障运算结果的正确性。

4 总结

桥梁桥墩在汛期的碰撞风险主要集中在钢围堰施工阶段，在同时满足阻水工况下，极限碰撞撞击力 F 需要围绕碰撞动力学讨论。其中包括算法理论与钢围堰碰撞问题相关的计算公式、能量守恒定理、数值仿真模拟等。研究汛期施工阶段碰撞损伤分析和撞击力算法，除了传统的经验与解析手段，还有有限元程序为碰撞问题相关的算法、碰撞接触理论和沙漏控制等提供模型运算的关键基础。

参考文献：

- [1] 曾宪柳, 潘文铭. 深水急流海峡桥梁桩基础群施工关键技术[J]. 公路, 2020, 65(10): 118-22.
- [2] 景旭斌, 王欢欢, 王洪良, 等. 海啸作用下漂浮物行为及对陆上建筑作用力研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 41-46.
- [3] 吴永固, 耿波, 汪宏. 桥梁船撞动力有限元数值模拟分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2010, 29(5): 681-4.

作者简介：

谭译 (1991.5-), 男, 汉族, 重庆人, 助教, 硕士, 研究方向: 道路与桥梁工程技术、结构工程研究。