

水流中石块对墩柱的撞击分析

杨 洁

河北华威交通科技咨询有限公司 河北 邯郸 056000

摘 要: 随着近年山区桥梁因洪水的冲击而造成多座桥梁冲塌,给社会带来了严重后果。结合《公路桥涵设计通用规范》JTGD60-2015、《泥石流灾害防治工程设计规范》DZ/T0239-2004和《铁路桥涵设计规范》TB10002-2017,发现水流中的石块三个规范计算的冲击力差别较大,同时对AI智能体在撞击中的应用作一简单论述,分析论述如下:

关键词: 水流;石块;撞击

洪水中的石块对墩柱的撞击力比水流的动水压力和静水压力要大,分析水流中的石块对墩柱的撞击力非常必要,翻阅计算比较《公路桥涵设计通用规范》JTGD60-2015条文4.4.2漂流物的撞击力计算公式、《泥石流灾害防治工程设计规范》DZ/T0239-2004条文3.1(3.1-9条)泥石流中石块撞击力计算公式和《铁路桥涵设计规范》TB10002-2017条文4.4.6三者计算结果差别较大。现分别进行推导比较如下。

1 《公路桥涵设计通用规范》JTGD60-2015条文4.4.2^[1]

1.1 原理推导

有漂流物的水域中的桥梁墩台,设计时应考虑漂流物的撞击作用,其横桥向撞击力设计值采用公式, $F = \frac{Wv}{gT}$, 此公式采用刚体动量定理。漂流物撞击桥墩的过程,模拟为一个动量变化过程。根据牛顿第二定律的冲量形式(动量定理):

合外力的冲量 = 动量的变化量

即: $F \cdot \Delta t = m \cdot \Delta v$;

其中: F : 平均撞击力

Δt : 作用时间→对应公式中的 T ;

m : 漂流物质量, $m = W/g$;

Δv : 漂流物速度变化量→假设撞击后速度降为0,则 $\Delta v = v - 0 = v$;

因此,动量定理可写为:

$F \cdot T = m \cdot v$;解得: $F = (m \cdot v)/T = (W \cdot v)/(g \cdot T)$;

2 《泥石流防治工程设计规范》DZ/T0239-2004公式3.1-9^[2]

当泥石流中的大块石以速度 V 撞击桥梁墩台时,构件发生弹性变形,冲击能量部分被构件吸收(转化为应变能),部分耗散。冲击瞬间构件表面承受的最大压应力(即 F_b , 单位 kPa),它与构件刚度、石块动能、撞击角度相关。

假设撞击过程为完全弹性碰撞(保守估计,实际有能量损失,此处取理想化模型),石块动能转化为构件的

弹性应变能。

2.1 石块动能计算

石块动能: $E_k = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{1}{2}(W/g)V^2$

2.2 构件弹性应变能计算

悬臂梁(一端固定,一端自由),自由端受集中力 F , 梁长 L , 弯曲刚度 EJ (E 为弹性模量, J 为截面惯性矩)

以固定端为坐标原点 $x = 0$, 沿梁轴向自由端为 $x = L$ 。

在距固定端 x 处取截面,该截面的弯矩 $M(x)$ 为: $M(x) = -F(L-x)$ (负号:按材料力学常用符号规则,使梁上侧受拉的弯矩为正,这里下侧受拉,故为负)

梁的近似微分方程为:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EJ}$$

代入 $M(x) = -F(L-x)$:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{F}{EJ}(L-x)$$

第一次积分:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= -\frac{F}{EJ} \int (L-x) dx \\ \frac{dy}{dx} &= -\frac{F}{EJ} \left(Lx - \frac{x^2}{2} \right) + C_1 \end{aligned}$$

边界条件:在固定端 $x = 0$ 处,转角为零, $dx/dy = 0$

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{F}{EJ}(0-0) + C_1 \Rightarrow C_1 = 0 \\ \theta(x) = \frac{dy}{dx} &= -\frac{F}{EJ} \left(Lx - \frac{x^2}{2} \right) \end{aligned}$$

第二次积分:

$$\begin{aligned} y(x) &= -\frac{F}{EJ} \int \left(Lx - \frac{x^2}{2} \right) dx \\ y(x) &= -\frac{F}{EJ} \left(\frac{Lx^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) + C_2 \end{aligned}$$

边界条件:在固定端 $x = 0$ 处,挠度为零 $y = 0$:

$$\begin{aligned} 0 &= 0 + C_2 \Rightarrow C_2 = 0 \\ y(x) &= -\frac{F}{EJ} \left(\frac{Lx^2}{2} - \frac{x^3}{6} \right) \end{aligned}$$

自由挠度计算:

$$\begin{aligned}\delta &= y(L) = -\frac{F}{EJ} \left(\frac{L \cdot L^2}{2} - \frac{L^3}{6} \right) \\ \delta &= -\frac{F}{EJ} \left(\frac{L^3}{2} - \frac{L^3}{6} \right) \\ \delta &= -\frac{F}{EJ} \frac{L^3}{3}\end{aligned}$$

悬臂梁自由端受集中力F时的挠度公式:

$$\delta = \frac{FL^3}{3EJ}$$

构件弹性应变能(梁端受集中冲击,简化为悬臂梁或简支梁受冲击):

$$U = \frac{1}{2} F_b L^3 / (3EJ);$$

2.3 墩柱有效冲击力计算

令动能 = 应变能(能量守恒)

$$\frac{1}{2} (W/g) V^2 = \frac{1}{2} F_b L^3 / (3EJ)$$

$$(W/g) V^2 = F_b L^3 / (3EJ)$$

整理得:

$$F_b^2 = (3EJWV^2)/(gL^3)$$

$$F_b = \sqrt{[(3EJV^2W)/(gL^3)]}$$

假设冲击方向垂直于构件表面($\alpha = 90^\circ$),实际中石块以角度 α 斜向撞击,只有垂直于表面的分速度产生有效冲击应力。

$$F_b = \sqrt{[(3EJV^2W)/(gL^3)]} \cdot \sin \alpha$$

式中: F_b 为泥石流流大块石冲击力(kPa); E 为工程构件弹性模量(kPa); J 为工程构件截面中心轴的惯性矩(m^4); L 为构件长度(m); V 为石块运动速度(m/s); W 为石块重量(kN); g 为重力加速度(取 $g = 9.8 m/s^2$); α 为块石运动方向与构件受力面的夹角。

3 《铁路桥涵设计规范》TB10002-2017条文4.4.6^[3]

条文4.4.6位于通航河流中的桥梁墩台,设计时应考虑船舶的撞击作用,其撞击作用力可按式4.4.6计算,撞击力的作用高度,应根据具体情况确定,缺乏资料时可采用通航水位的高度^[3]。

$$F = \gamma v \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{c_1 + c_2}}$$

3.1 原理推导

此公式是基于动量守恒、能量吸收与结构柔度匹配的简化力学模型,并结合大量实测与模型试验数据校准得出的半经验半理论公式。

船舶以一定速度 v 撞击桥墩,属于非弹性碰撞过程,动能部分转化为结构变形能、船体变形能、摩擦耗能等。由于碰撞时间极短,无法用静力学处理,需从“动量-能量”角度建模。

设船舶质量为 m ,撞击速度为 v ,撞击后速度降为0(完全非弹性),则动量变化 $\Delta p = mv$ 。

若撞击时间为 Δt ,则平均撞击力 $F_v \approx \Delta p / \Delta t = mv / \Delta t$ 。

但 Δt 难以直接测量或计算,于是引入“等效弹簧模型”或“柔度模型”将力与变形联系起来。

在碰撞过程中,船体和桥墩都会发生弹性或塑性变形,相当于两个“弹簧”串联(船体柔度 c_1 +桥墩柔度 c_2)。

根据能量守恒:

船舶初始动能 = 结构吸收能量

$\rightarrow (1/2)mv^2 = (1/2)F^2(c_1 + c_2)$ (弹性碰撞假设下,力-变形关系 $F = \delta/c$,能量 $= 1/2F\delta = 1/2F^2c$)

$\rightarrow$ 解得: $F = v\sqrt{(m/(c_1 + c_2))}$

因 $w = mg \rightarrow m = w/g$,代入上式:

$$F = v\sqrt{(w/[g(c_1 + c_2)])}$$

但规范中未出现 g ,而是用 γ —这里 γ 是综合系数,包含:

单位换算(如从公制单位调整)

碰撞效率系数(非完全能量吸收)

船舶质量与排水量的关系修正

撞击角度修正 $\sin \alpha$ (实际撞击方向非正向,正向最不安全)

所以,规范将 g 吸收进 γ ,或 $\gamma = k \cdot \sqrt{g}$ (k 为经验系数),最终写为:

$$F = \gamma v \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{c_1 + c_2}}$$

其中:

γ : 综合影响系数(包含重力加速度、碰撞效率、单位换算等);

v : 船舶撞击速度(m/s);

α : 船舶航向与墩台法线方向夹角(若正撞, $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$);

w : 船舶排水量或等效重量(kN);

c_1 : 船体结构柔度(m/kN);

c_2 : 桥墩结构柔度(m/kN)。

实际计算时应完善 γ 和 $c_1 + c_2$ 的取值。

4 三本规范公式的区别分析

4.1 主要区别

这三条公式虽然都用于计算“撞击力”,但它们分属完全不同的物理模型和工程场景。JTGD604.4.2是刚体动量模型,而泥石流规范3.1-9是弹性体系能量模型,通航河流中船舶撞击桥墩。这种差异直接导致了公式结构、计算目标和适用边界的巨大不同。

JTGD604.4.2: 基于“动量定理”的简化估算,时间 T 极难准确获取,规范建议取1s。这导致该公式虽然计算简单,

但主观性较强,主要适用于对一般漂浮物的保守估算。

泥石流规范3.1-9:基于“能量守恒”的结构响应,它认为撞击力不仅取决于石头,还取决于桥墩有多“硬”(刚度EJ)。桥墩越柔(或越长L),冲击力被吸收得越多,计算出的应力越小。它输出的是kPa(压应力),更适合用于验算墩柱的局部抗压强度或配筋,而非直接用于整体倾覆验算。

TB10002-2017条文4.4.6:力学原理为柔度法/弹簧模型,它将船舶看作一个弹簧(柔度 c_1),将桥墩看作一个弹簧(柔度 c_2)。撞击力取决于这两个弹簧串联后的总柔度,不仅考虑桥墩软硬(c_2),还考虑船舶本身的软硬(c_1)。 c_2 (桥墩柔度)需要根据截面算,不如前两个公式直观。 c_1 很难准确获取,通常需要查表或经验估算。系数 γ :规范中的 γ 是一个综合经验系数,不同地区规范取值可能不同,带有一定经验性。

4.2 具体区别

(1)物理量纲:集中力和分布应力

JTGD60:结果是力 $F(kN)$,设计时直接作为水平荷载施加在桥墩上,计算整体弯矩和剪力。

泥石流规范:结果是应力 $F_b(kPa)$ 。设计时需将此应力与混凝土抗压强度对比,或换算为局部集中力。

(2)结构刚度:核心计算参数

JTGD60:公式中没有桥墩的尺寸和材料参数,它隐含假设桥墩无限刚性,所有动能完全由撞击力承担。

泥石流规范:公式中包含了弹性模量 E 和惯性矩 J ,“软”桥墩受到的冲击峰值会更低(能量被变形吸收)。

(3)速度敏感性:线性和非线性

JTGD60:力与速度 v 呈线性关系。

泥石流规范:力与速度 v 呈平方非线性关系(因为源于动能 v^2)。

意味着:在高速泥石流场景下(v 很大),3.1-9公式计算出的荷载会急剧增加,比4.4.2公式更敏感、更保守。

(4)角度修正:方向性差异

JTGD60:原公式无角度项,默认正撞($\alpha = 90^\circ$)。实际应用时若考虑角度,需自行分解。

泥石流规范:直接内置了 $\sin\alpha$ 项,明确考虑了斜向撞击的有效分量。

5 智能化AI辅助撞击力检测

智能化技术可以改变传统的撞击力测试模式,将其从“事后测量”升级为“全过程感知+预测”。在桥梁防撞、

泥石流防护等领域,这不仅仅是换几个传感器,而是从数据采集、模型识别、AI分析到预警决策的全链条重构。

智能阈值触发:利用高频加速度计或应变片,结合边缘计算算法,自动过滤掉环境振动,只捕捉真实的撞击事件,避免数据冗余。

多源数据融合:同步采集冲击力(应变)+结构响应(加速度)+视频(AI视觉)。例如,通过摄像头确认撞击物是船舶、漂流木还是石块,并与力学数据关联。

定位与溯源:通过布置在桥墩不同高度的传感器阵列,利用信号到达时间差算法,反算出撞击发生的具体位置。

反演真实撞击力:很多时候直接测力很难(如泥石流中的石块),但测桥墩的振动响应很容易。通过机器学习(如神经网络)或遗传算法,建立“输入力-输出响应”的逆模型,从振动数据中反推出真实的冲击力时程。

修正理论公式:将大量实测数据(F, v, m)输入数据库,通过回归分析或深度学习,自动修正规范中公式的参数(如修正系数 γ),使其更符合当地实际情况。

6 最后总结

普通河流桥梁:遇到浮木、小型漂浮物,优先用JTGD604.4.2,计算快,偏保守。

地质灾害区桥梁(如山区桥、泥石流沟道):遇到巨石冲击,必须用3.1-9。因为它考虑了巨石动能和墩柱刚度的耦合效应,结果更符合力学实际。

如果用3.1-9算出了应力 $F_b(kPa)$,想和JTGD60、TB10002-2017条文4.4.6的力进行比较,需要乘以墩柱的等效受压面积进行换算。

这三个公式并非“谁更准确”,而是适用维度不同。JTGD60是宏观的动量模型,泥石流规范是微观的结构响应能量模型,TB10002-2017条文4.4.6更使用与船体撞击。在泥石流这种高动能、高破坏性场景下,3.1-9的力学完备性显然更高。

因为我们的规范公式都是在假设模型下得出,很多时候和实际的环境情况不一样,涉及到的参数不够,所以我们可以借助智能化技术通过在桥墩上安装设备,现场测量撞击力,再和规范公式进行比对,修正规范中的经验参数。

参考文献:

- [1]《公路桥涵设计通用规范》JTGD60-2015
- [2]《泥石流灾害防治工程设计规范》DZ/T0239-2004
- [3]《铁路桥涵设计规范》TB10002-2017