

基于 Hertz 理论的落石撞击桥墩冲击力计算 公式及参数研究

钟汉清, 吕梁, 辜友平, 赵雷

(西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 落石撞击棚洞的冲击力公式已较为成熟,但落石撞击桥墩的冲击力公式研究较少。基于 Hertz 弹性碰撞理论和 Thornton 弹塑性假设,通过速度恢复系数引入落石反弹计算项,建立了落石撞击桥墩的力学计算模型,推导了落石撞击桥墩的弹性和弹塑性冲击力表达式,并讨论了落石的冲击速度、冲击角度及半径对冲击力的影响;建立落石-桥墩有限元模型,将数值模拟得到的弹性与弹塑性冲击力与理论值进行对比。结果表明:落石弹性冲击力结果偏大,考虑材料弹塑性的冲击力表达式更符合工程实际。实例结果显示弹塑性冲击力仅为 Hertz 弹性冲击力的 21.58%;落石冲击力随着冲击速度和半径的增大而递增,随着冲击角度的增加而递减;在进行桥墩防撞设计时,应充分调研落石等效半径的分布情况,可在碰撞区铺设一定厚度的低强度混凝土;用弹塑性冲击力理论公式进行设防时,建议引入落石弹塑性冲击力折减系数,其值可取 0.6~0.8。

关键词: 桥梁工程; 落石; 桥墩; Hertz 弹性理论; Thornton 弹塑性理论; 冲击力

1 前言

中国西部山区地势险要,易发生滑坡、泥石流、崩塌等地质灾害,山区桥梁时常遭受落石撞击,特别是大块石的冲击,对桥梁承载能力和正常使用造成严重影响,危及人身及财产安全。因此桥墩防撞设计是山区桥梁设计中需要重点考虑的环节,而中国现行桥梁规范尚未对落石冲击桥墩的计算方法作出规定,因此落石撞击桥墩的冲击力计算研究对于山区桥梁具有重要的现实意义。

目前落石冲击力计算多采用 Hertz 弹性碰撞理论、基于动量定理的计算方法和几种经验公式。如日本道路公团以及瑞士公式。罗征等以矩形桥墩为对象,进行矩形墩柱冲击试验,从动态损伤拓展、撞击力及墩顶动力响应等方面研究矩形墩柱的冲击响应过程和破坏机理;叶四桥等提出应考虑落石冲击过程中落石重量和反弹效应对落石的影响,并基于冲量定理推导了落石冲击力计算方法;陈驰等以冲量定理为基础,

推导了落石最大冲击力的近似计算方法,该公式考虑了落石形状、质量、冲击速度等影响因素;陈世刚对几种半经验半理论的落石冲击力计算方法进行了探讨分析;刘茂以弹塑性修正的 Hertz 接触理论为基础,考虑落石冲击缓冲层的复杂过程和缓冲层厚度的影响,结合路基规范方法的落石冲击深度公式,得出落石最大冲击力计算方法;郭绍平等对现有落石计算方法进行了对比研究,针对其中存在的问题,将可以反映落石质量、缓冲土层厚度及冲击速度影响的冲击历时公式引入隧道计算方法,同时引入放大系数 k ,形成改进的隧道公式;聂洪琳等基于动力学原理,利用钢结构柔性吸能,提出了一种桥墩防落石碰撞柔性设计,并利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件模拟验证了所提出的防撞设计思路的合理性和优越性;余志祥等针对外套钢板筒与加厚素混凝土保护层两种防护措施展开数值模拟;顾乡等研究落石冲击双柱式桥墩的损伤,对比分析落石冲击高度、速度、偏心距、冲击角度等因素对墩柱的损伤程度。

关于落石冲击力的已有文献主要针对明洞、棚洞、

收稿日期:2019-02-15(修改稿)

基金项目:国家科技支撑计划项目(编号:2009BAJ28B01);四川省交通运输厅科研项目(编号:川交勘设-2011-035)

作者简介:钟汉清,男,博士研究生.E-mail:2300349356@qq.com

* 通信作者:赵雷,男,教授,博士生导师.E-mail:zlswtuzl@163.com

拦石墙及柔性网等主动防护结构,而针对落石冲击桥梁的相关文献则较少。该文基于 Hertz 弹性接触理论和 Thornton 弹塑性接触理论,建立落石冲击桥墩的理论计算模型,推导落石对桥墩的弹性和弹塑性冲击力表达式,并且讨论落石冲击速度、角度及落石半径对冲击力的影响;建立落石—桥墩有限元模型,将数值模拟得到的弹性与弹塑性冲击力与理论值进行对比,在此基础上引入折减系数对理论公式进行优化与修正,以期对山区桥墩防撞设计提供一定的依据。

2 落石碰撞接触理论

2.1 Hertz 接触理论

Hertz 假设两球相撞,且其接触面为半径为 a 的圆,给出了两球在压力 P 作用下接触问题的完备解,对应的接触面压应力分布公式为:

$$p(r) = \frac{3P [1 - r^2/a^2]^{1/2}}{2\pi a^2} \quad (1)$$

式中: $p(r)$ 为接触面压应力; P 为接触压力; a 为接触面半径; r 为接触面半径变量,取值范围 $0 \sim a$ 。

从式(1)可以看出,当 $r=0$ 时,有:

$$p_{\max} = p(0) = \frac{3P}{2\pi a^2} \quad (2)$$

接触面半径与接触面变形量之间的关系:

$$a^2 = R\delta \quad (3)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (4)$$

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad (5)$$

式中: R 为等效半径; R_1 和 R_2 分别为两个碰撞球体的半径; δ 为总变形量; δ_1 和 δ_2 分别为两球体的变形量。

两球碰撞的接触力与变形量之间的关系:

$$P = \frac{4ER^{1/2}\delta^{3/2}}{3} \quad (6)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2} \quad (7)$$

式中: E 为等效弹性模量; μ_1 、 μ_2 分别为两个碰撞球体的泊松比; E_1 、 E_2 分别为两个碰撞球体的弹性模量。

2.2 Thornton 弹塑性接触理论

当最大压应力 p_{\max} 达到材料屈服强度时,就会在接触面上产生塑性变形区,初始屈服接触压应力 p_y 与初始屈服对应的接触半径 a_y 的关系为:

$$p_y = \frac{2Ea_y}{\pi R} \quad (8)$$

Thornton 假设碰撞系统为理想弹塑性材料,塑性区的接触压应力始终为 p_y ,如图 1 所示。

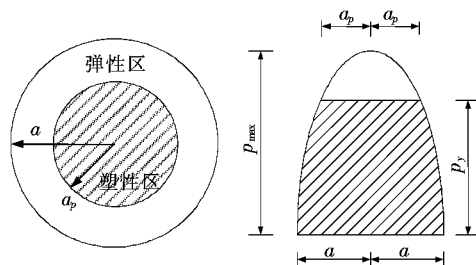


图 1 理想弹塑性材料压应力分布

在某荷载作用下,半径为 a_p 的接触面产生屈服,而在 $a \geq a_p$ 的区域仍然满足 Hertz 接触应力分布:

$$p_y = \frac{3P \left[1 - \frac{a_p^2}{a^2} \right]^{1/2}}{2\pi a^2} \quad (9)$$

联立式(8)、(9),可以得到:

$$a^2 = a_y^2 + a_p^2 \quad (10)$$

两接触物体间的接触压力为:

$$P = P_e - 2\pi \int_0^{a_p} [p(r) - p_y] r dr \quad (11)$$

式中: P_e 为等效弹性接触力。

3 落石撞击桥墩冲击力

3.1 落石冲击力的弹性解

根据 Hertz 弹性碰撞理论,质量 m_1 、速度 v_1 的球体与质量 m_2 、速度 $v=0$ 的球体发生对心碰撞,假定冲击球体的半径远小于被冲击球体,即 $r_2 \gg r_1$ 。故可将落石视为质量为 m_1 、撞击速度为 v_1 、回弹速度为 v_2 的冲击球体,将质量为 m_2 的桥墩视为被冲击球体。基于上述假设,该文推导的理论公式主要适用于圆形截面的桥墩。落石对桥梁墩柱的冲击模型见图 2。

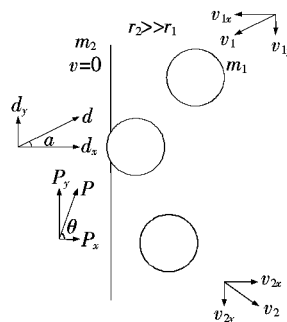


图 2 落石对桥墩的冲击模型

落石撞击桥梁墩柱可分为两个过程:① 压缩阶

段:从落石接触桥墩表面到接触变形量达到最大值,此时落石处于静止状态,桥墩所受冲击力最大;② 反弹阶段:桥墩所受冲击力逐渐减小,直至落石脱离接触面。因落石的速度、所受冲击力的方向及接触变形量的方向在不断改变,导致整个碰撞过程较为复杂,为方便计算,可设冲击力方向与水平线成 θ 角,接触变形量方向与水平线成 α 角,冲击角度为 γ 角。

根据牛顿第二定律可知:

$$P_x = m_1 d(v_{1x} + v_{2x})/dt \quad (12)$$

$$P_y = m_1 d(v_{1y} - v_{2y})/dt \quad (13)$$

采用 Hertz 弹性接触理论可得:

$$P_x = P \cos \theta = \frac{4 \cos \theta E R^{1/2} \delta^{3/2}}{3} \quad (14)$$

$$P_y = P \sin \theta = \frac{4 \sin \theta E R^{1/2} \delta^{3/2}}{3} \quad (15)$$

其中 $\delta_x = \delta \cos \alpha$, $\delta_y = \delta \sin \alpha$, 代入式(14)和(15)并与式(12)和(13)联立可得 P_x 与 δ_x 、 P_y 与 δ_y 的关系式:

$$P_x = \frac{4 \cos \theta E R^{1/2} \delta_x^{3/2}}{3 \cos^{3/2} \alpha} = \frac{m_1 d^2 \delta_x}{dt^2} \quad (16)$$

$$P_y = \frac{4 \sin \theta E R^{1/2} \delta_y^{3/2}}{3 \sin^{3/2} \alpha} = \frac{m_1 d^2 \delta_y}{dt^2} \quad (17)$$

化简可得:

$$\delta_x = \left[\frac{15 \cos^{3/2} \alpha}{16 \cos \theta} \cdot \frac{m_1 (v_{1x} + v_{2x})^2}{ER^{1/2}} \right]^{2/5} \quad (18)$$

$$\delta_y = \left[\frac{15 \sin^{3/2} \alpha}{16 \sin \theta} \cdot \frac{m_1 (v_{1y} - v_{2y})^2}{ER^{1/2}} \right]^{2/5} \quad (19)$$

综合式(16)、(17)、(18)和(19)可求得弹性冲击力 P_e 。

$$P_x = \frac{4}{3} ER^{1/2} \frac{\cos^{2/5} \theta}{\cos^{3/5} \alpha} \left[\frac{15 m_1 (1 + e_x)^2 v_{1x}^2}{16 ER^{1/2}} \right]^{3/5} \quad (20)$$

$$P_y = \frac{4}{3} ER^{1/2} \frac{\sin^{2/5} \theta}{\sin^{3/5} \alpha} \left[\frac{15 m_1 (1 - e_y)^2 v_{1y}^2}{16 ER^{1/2}} \right]^{3/5} \quad (21)$$

$$P_e^2 = P_x^2 + P_y^2 \quad (22)$$

式中: e_x 、 e_y 为横向和竖向速度恢复系数, $e_x = v_{2x}/v_{1x}$, $e_y = v_{2y}/v_{1y}$ 。

3.2 落石冲击力的弹塑性解

在落石冲击桥墩过程中,当速度较小时,落石冲击接触为弹性接触,可直接用上述公式求解弹性冲击力。而随着速度的增加,当最大接触应力 p_{\max} 达到接触屈服应力 p_y ,碰撞接触面开始出现塑性区,此时对应的落石速度称为临界速度 v_c ,初始屈服状态对应的接触面半径记作 a_y ,此时 Hertz 弹性理论还适用,临界接触屈服压力 P_e 可由式(22)得到。

Vu—Quoc 以 Hertz 接触理论推导了接触屈服压

力与材料屈服强度之间的关系式:

$$P_e = [\eta(\mu) \sigma_y]^3 \frac{\pi^3 R^2 (1 - \mu^2)^2}{6 E^2} \quad (23)$$

式中: μ 为落石的泊松比; $\eta(\mu)$ 为 μ 的函数, $\eta(0.3) = 1.613$, $\eta(0.4) = 1.738$, 当 μ 为其他值时,作线性插值处理; σ_y 为桥墩的屈服强度。

将式(20)、(21)与式(23)联立可求得临界速度分量 v_{cx} 和 v_{cy} , 从而求得临界速度 v_c 。

在实际工程运用中,当落石速度小于临界速度时,可按式(22)求解碰撞接触力,当落石速度大于临界速度时,接触面上会产生塑性区,还需要考虑塑性区的拓展对落石冲击力的影响。将式(1)代入式(11),并对式(11)进行积分得:

$$P_{ep} = \frac{4}{3} ER^{1/2} \delta^{3/2} \left(\frac{a_y}{a} \right)^3 + \pi p_y a_p^2 \quad (24)$$

4 实例研究与分析

4.1 实例研究

为验证该文所推导公式的合理性,与文献[18]的泥石流大块冲击拦挡坝实例进行对比,冲击物为落石和泥石流大块,被冲击物为桥墩和拦挡坝,落石与桥墩分别采用与泥石流大块和拦挡坝相同的材料参数,如表 1 所示,将文献[18]计算所得结果与该文推导的落石冲击力理论公式进行对比,结果如表 2 所示。由于整个碰撞过程在极短的时间内完成,为方便计算在此假定 θ 和 α 与速度的水平夹角近似相等。

式(22)、(23)中 e_x 、 e_y 为速度恢复系数,若落石撞击为完全弹性碰撞,则恢复系数为 1,即落石反弹速度等于入射速度,若落石撞击不发生反弹,则恢复系数为 0,而实际中落石撞击桥墩的速度恢复系数为 0~1。恢复系数在落石冲击力计算中是一个非常关键的参数,可通过开展野外试验,利用高速摄像系统及配套软件解析落石碰撞前后的速度,从而求得法向和切向的恢复系数,该文参考文献[20]中的碰撞恢复系数取值 $e_x = 0.453$, $e_y = 0.737$ 。

表 2 表明:当碰撞区不考虑弹塑性时,根据式(22)求得的落石弹性冲击力为 30 703.8 kN,若采用这么高的冲击荷载进行桥墩防撞设计是很不经济的。求解弹塑性冲击力时,首先根据式(24)求得的接触屈服压力 $P_e = 56.9$ kN,当碰撞接触力达到接触屈服压力时,根据式(22)、(23)及(24)联立可得临界横向速度 v_{cx} 为 0.023 m/s,临界竖向速度 v_{cy} 为 0.07 m/s,这是因为落

石竖向冲击力较小,其达到临界屈服力所需的速度就更大,但此时落石横向冲击力已达到临界屈服力,所以该文以临界横向速度为标准求得其临界速度为 0.026 m/s。根据式(6)求得临界状态下的接触变形量 δ_y ,再代入式(3)和(8)联立可得临界状态下的屈服压应力 $p_y=25.75\text{ MPa}$ 和初始屈服状态下的接触半径 $a_y=$

10.3 mm。通过式(20)和(21)可求得总接触变形量 $\delta=10.3\text{ mm}$,从而得出接触半径 $a=90.7\text{ mm}$,该文落石采用速度为 5.6 m/s,远大于临界速度,在接触区内将产生大范围的塑性区,其塑性区接触半径 a_p 为 90.1 mm。将上述所求参数代入式(24),其弹塑性冲击力为 6.61 MN,仅为弹性冲击力的 21.58%。

表 1 落石冲击力计算参数

落石						桥墩		
$E_1/$ GPa	μ_1	$R/$ m	$\rho/$ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	$v_1/$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	$\gamma/$ ($^\circ$)	$E_2/$ GPa	μ_2	$\sigma_y/$ MPa
40	0.3	0.8	2 700	5.6	30	31.5	0.2	170

表 2 文献[18]与该文推导公式计算结果对比

计算方法	e_x	e_y	临界冲击速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	弹性冲击力 P/MN	弹塑性冲击力 P_{ep}/MN	修正系数 $k=P_{ep}/P$
文献[18]	0	0	0.020	22.58	3.52	0.16
该文推导公式	0.453	0.737	0.026	30.70	6.61	0.22

该文推导公式计算所得的落石冲击力比文献[18]计算得到的冲击力大,这是因为文献[18]中泥石流大块不发生回弹,即 e_x 与 e_y 为 0,而该文恢复系数取值均大于 0,因此该文计算所得落石冲击力较大是合理的。

4.2 落石冲击参数分析

为研究落石冲击参数对落石冲击力的影响,保持落石其他参数不变,改变其冲击速度,得到弹性和弹塑性冲击力与冲击速度的关系如表 3 所示。保持落石其他参数不变,改变落石冲击角度,得到落石冲击力与冲击速度夹角的关系如表 4 所示。落石冲击力与落石半

径的关系如表 5 所示。图 3 为落石冲击力与落石半径、落石冲击速度之间的关系。表 3~5 中修正系数 k 为弹塑性冲击力 P_{ep} 与弹性冲击力的 P 的比值。

表 4 落石冲击力与冲击速度夹角的关系

冲击力与 冲击速度 夹角/ $^\circ$	P 弹性冲 击力/MN	P_{ep} 弹塑性 冲击力/MN	修正系 数 k	塑性区 半径/m
1	35.35	7.085	0.200	0.093 4
15	34.17	6.980	0.204	0.092 7
30	30.70	6.608	0.215	0.090 1
45	25.20	5.940	0.236	0.085 4
60	18.11	4.970	0.274	0.077 9
75	10.15	3.650	0.345	0.066 2
89	4.59	2.097	0.457	0.047 7

注:落石半径为 0.8 m,落石冲击速度为 5.6 m/s。

表 3 落石冲击力与冲击速度的关系

冲击速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	P 弹性冲 击力/MN	P_{ep} 弹塑性 冲击力/MN	修正系 数 k	塑性区 半径/m
1	3.88	1.91	0.490	0.044
2	8.92	2.97	0.330	0.059
3	14.52	4.04	0.280	0.070
4	20.50	5.06	0.250	0.078
5	26.80	6.04	0.230	0.086
6	33.35	6.98	0.210	0.093
7	40.13	7.90	0.197	0.099
8	47.11	8.79	0.187	0.104
9	54.26	9.66	0.178	0.109
10	61.57	10.51	0.171	0.114

注:落石半径为 0.8 m,落石冲击速度夹角为 30° 。

表 5 落石冲击力与落石半径的关系

落石半 径/m	P 弹性冲 击力/MN	P_{ep} 弹塑性 冲击力/MN	修正系 数 k	塑性区 半径/m
0.50	11.99	2.580	0.215	0.056 3
0.75	26.99	5.808	0.215	0.084 5
1.00	47.97	10.320	0.215	0.113 0
1.25	74.96	16.130	0.215	0.141 0
1.50	107.94	23.230	0.215	0.169 0

注:落石冲击速度夹角为 30° ,落石冲击速度为 5.6 m/s。

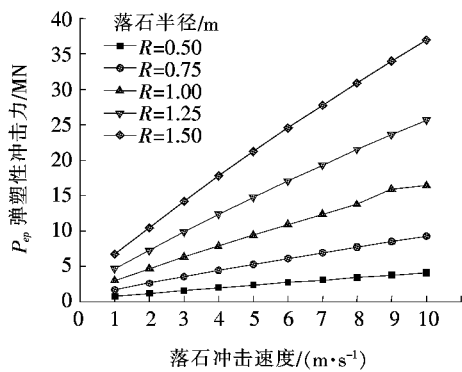


图 3 落石冲击力与落石半径的关系

从表 3~5、图 3 可知:

(1) 落石弹性冲击力随着落石冲击速度增加而急剧增大,而落石弹塑性冲击力则增加得较为缓慢;塑性区半径先是急剧增长,而后逐渐平稳;相应的修正系数 k 则是急剧下降,而后逐渐平稳。这是因为随着落石冲击速度的增加其碰撞接触面上的塑性区拓展的范围越来越大,而在塑性区内接触压应力保持不变,相应的落石冲击力因受到塑性区压应力的限制而增加平缓。因此在桥墩碰撞区表面,铺设适当厚度的低强度混凝土可以有效降低落石对桥墩的冲击力,从而达到一定的防撞效果。

(2) 随着冲击速度夹角的增加,落石的弹性冲击力和弹塑性冲击力均逐渐减小,说明落石对桥墩的冲击效应以横向冲击为主,水平运动速度分量越大,落石

冲击力越大。随着冲击角度的增加,塑性区半径缓慢减小,修正系数 k 则缓慢增加,而当冲击角度增加至 45° 时,塑性区半径开始急剧下降,修正系数 k 急剧增加,这是因为随着塑性区半径的减小,落石冲击力也随之减小。

(3) 随着落石半径的增大,修正系数 k 保持不变,而塑性区半径则一直增大。弹塑性冲击力随着落石半径增大而增加,当落石半径较小时,其弹塑性冲击力增幅较小,总体上较为平缓。随着落石半径的增加,在冲击速度较低时增幅较小,而在冲击速度较大时,特别地对于 $R > 1\text{ m}$ 的落石,其弹塑性冲击力随冲击速度的增加而急剧增长。因此设计桥墩防撞设施前应当对周边环境展开详细的调查,以确定落石的等效半径。

4.3 有限元数值模拟

该文推导公式中,假定被冲击物不产生刚体位移和变形,因此对于工程实际而言,该冲击力公式具有一定的局限性,因而当采用弹塑性冲击力作为设防依据时,为满足经济性宜考虑一定程度的折减。该节采用山区某半径为 0.9 和 2 m 的桥墩,分别建立弹性和考虑 HJC 本构的弹塑性模型,对比理论公式计算所得的落石冲击力,讨论弹塑性折减系数。弹塑性模型中,混凝土采用 HJC(Holmquist—Johnson—Cook)损伤本构模型,此模型可同时考虑高压、应变率及损伤,其材料参数如表 6 所示。

表 6 混凝土材料参数

MID	RO/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	G/ Pa	A	B	C	N	FC/ Pa
3	2 650	1.31×10^{10}	7.9	1.6	0.007	0.61	2.01×10^7
T/ Pa	ESP0	EFMIN	SFMAX	PC/ Pa	UC	PL/ Pa	UL
2.01×10^6	1×10^6	0.01	7	1.6×10^7	0.001	8×10^8	0.1
D1	D2	K1/Pa	K2/Pa	K3/Pa	FS		
0.04	1	8.5×10^{10}	-1.71×10^{11}	2.08×10^{11}	0		

注: MID 为材料编号; RO 为材料密度; G 为剪切模量; A 为规范化黏聚强度参数; B 为规范化压力硬化系数; C 为应变率敏感系数; N 为压力硬化指数; FC 为准静态单轴抗压强度; T 为最大拉伸静水压力; ESP0 为应变率; EFMIN 为断裂前塑性应变; SFMAX 为规范化应力最大值; PC 为压碎时静水压力; UC 为压碎时体积应变; PL 为体积闭锁时的压力; UL 为体积闭锁时的应变; D1、D2 为损伤参数; K1、K2、K3 为压力参数; FS 为失效类型。

桥墩模型按照《G213 线川主寺至汶川公路灾后复建工程两阶段施工图设计》中的小箱梁独柱式墩墩柱钢筋布置建立,直径 $D = 1.8\text{ m}$,墩高 $H = 10\text{ m}$,保护

层厚度为 40 mm。墩内纵筋采用 $36\phi 32$,螺旋箍筋采用 $1\phi 14$,箍筋加密区的箍筋间距取 60 mm,非加密区箍筋间距取 120 mm,墩柱上部和下部的加密区长度

分别为 1.8 和 3.6 m；纵筋伸入盖梁 1.2 m，该部分箍筋采用 $\phi 14$ ，间距为 100 mm。

通过大型显式通用有限元软件 LS-DYNA 建立落石—桥墩有限元模型，落石采用 Solid164 实体单元模拟，材料为刚性材料，其参数见表 1。桥墩和盖梁为钢筋混凝土实体模型，其中混凝土亦采用 Solid164 单

元，受力钢筋与螺旋箍筋采用 Link160 单元，其材料参数如表 7 所示；盖梁顶部施加 Mmass166 质量单元用于模拟上部结构对桥墩的压重，其重量为 400 t。落石冲击桥墩有限元模型如图 4 所示。落石冲击力理论与有限元值对比如表 8 所示。

表 7 钢筋材料参数

钢筋	MID	RO/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	E/ Pa	PR	SIGY/ Pa	ETAN/ Pa	BETA	SRC	SRP	FS
螺旋箍筋	1	7 850	2×10^{11}	0.3	3.35×10^8	0	0	0	0	0.2
受力钢筋	2	7850	2×10^{11}	0.3	4.00×10^8	0	0	0	0	0.2

注：E 为弹性模量；PR 为泊松比；SIGY 为屈服强度；ETAN 为切线模量；BETA 为硬化系数；SRC 为应变率系数；SRP 为应变率参数；FS 为失效应变。其他参数意义同前。

表 8 落石弹性冲击力、弹塑性冲击力对比

r/ m	弹性冲击力					弹塑性冲击力				
	理论值	有限元值	有限元值	(②/①)/	(③/①)/	理论值	有限元值	有限元值	(②/①)/	(③/①)/
	①/MN	(R=0.9 m) ②/MN	(R=2 m) ③/MN	%	%	①/MN	(R=0.9 m) ②/MN	(R=2 m) ③/MN	%	%
0.8	30.7	10.00	12.52	32.57	40.78	6.60	1.78	2.39	26.97	36.21
0.7	24.1	8.97	10.00	37.22	41.49	5.06	1.07	1.71	21.15	33.79
0.6	18.3	6.80	7.48	37.16	40.87	3.72	0.74	1.18	19.89	31.72
0.5	13.2	4.34	5.89	32.88	44.62	2.58	0.53	0.74	20.54	28.68
0.4	8.82	2.56	4.38	29.02	49.66	1.65	0.33	0.47	20.06	28.67
0.3	5.25	1.12	2.95	21.33	56.19	0.93	0.19	0.34	20.43	36.02

注：r 为落石半径；R 为桥墩半径；落石冲击速度为 5.6 m/s，落石冲击速度夹角为 30°。

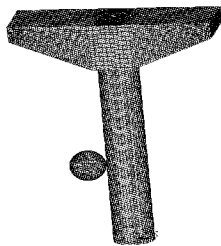


图 4 落石冲击桥墩有限元模型

从表 8 可以看出：

(1) 当桥墩半径为 0.9 m 时，落石弹性冲击力有限元值与理论值的比值为 0.2~0.4，落石弹塑性冲击力有限元值与理论值的比值为 0.2~0.3；当桥墩半径为 2 m 时，落石弹性冲击力有限元值与理论值的比值为 0.4~0.6，落石弹塑性冲击力有限元值与理论值的比值为 0.3~0.4。这是因为当落石半径为 0.8 m 时，

落石和桥墩的尺寸已处于同一维度，落石的冲击效应将会对桥墩产生较大影响。由于塑性区内应力保持不变，弹塑性冲击力受到塑性区发展的限制而远小于弹性冲击力。

(2) 该文公式旨在为桥墩防撞设计提供参考，当采用该文弹塑性冲击力公式进行设防时，可在式(24)中引入折减系数。根据上述计算得到的落石弹塑性冲击力比值，可取折减系数 0.3~0.4。对于铁路桥和高墩桥，因其墩柱刚度通常较大，可将折减系数在计算基础上适当放大。且落石冲击具有较强随机性，并易受地质影响，随着雨水冲刷和地震、泥石流等地质灾害的发生，斜坡等将发生较大的地质变形，有关落石尺寸及冲击速度的调研可靠性较低。综上所述对于各类山区桥型墩柱可偏于安全考虑，其落石弹塑性冲击力折减系数可取 0.6~0.8。

5 结论

基于 Hertz 接触理论和 Thornton 弹塑性假设,建立落石冲击桥墩的计算模型,导出了落石对桥墩的弹塑性冲击力表达式,并且讨论了落石冲击速度、角度及落石半径对落石冲击力的影响,得出以下结论:

(1) 混凝土材料是典型的弹塑性材料,碰撞区极易出现塑性区,不考虑弹塑性所求得的落石弹性冲击力偏大,考虑材料弹塑性的落石冲击力更为符合工程实际,该文求得的弹塑性冲击力仅为弹性冲击力的 21.58%。

(2) 落石弹性冲击力随着落石冲击速度的增加而急剧增大,而其弹塑性冲击力由于受到塑性区压应力的限制而增加得较为缓慢。在进行桥墩防撞设计时,在碰撞区铺设一定厚度的低强度混凝土可以有效降低落石对桥墩的冲击力,增强其抗冲击性能。

(3) 落石冲击力随着冲击角度的增加而逐渐减小,随着落石半径的增加而增大,在进行桥墩防撞设计前应当对周边环境展开详细的调查,充分了解落石的等效半径的分布情况,以便估计落石对结构的冲击力。

(4) 采用该文弹塑性冲击力公式进行设防时,建议引入弹塑性冲击力折减系数,且由于落石冲击具有较强随机性,偏于安全考虑其折减系数取 0.6~0.8。

参考文献:

- [1] Kawahara S, Muro T. Effects of Dry Density and Thickness of Sandy Soil on Impact Response Due to Rockfall[J]. Journal of Terramechanics, 2006, 43(3):329-340.
- [2] Labiouse V, Descoeurdes F, Montani S. Experimental Study of Rock Sheds Impacted by Rock Blocks[J]. Structural Engineering International, 1996, 6(3):171-175.
- [3] 罗征,王银辉.滚石撞击桥墩动力响应试验[J].中国公路学报,2017(9).
- [4] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅.落石冲击力计算方法[J].中国铁道科学,2010(6).
- [5] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅.落石冲击力计算方法的比较研究[J].水文地质工程地质,2010(2).
- [6] 陈驰,刘成清,陈林雅,等.落石作用于钢筋混凝土棚洞的冲击力研究[J].公路交通科技,2015(1).
- [7] 陈世刚.铁路隧道进出口段落石冲击力计算分析[J].铁道工程学报,2012(5).
- [8] 刘茂.基于弹塑性修正 Hertz 接触理论的落石冲击力计算方法[J].中国地质灾害与防治学报,2012(3).
- [9] 郭绍平,王全才,吴清,等.一种改进的落石冲击力计算方法[J].山地学报,2014(3).
- [10] 聂洪琳,熊文,曹毅,等.桥墩防落石碰撞柔性设计方法与分析[J].公路交通科技,2015(3).
- [11] 余志祥,杨畅,罗焱.山区桥梁墩柱抗落石冲击防护措施耐撞性[J].四川建筑科学研究,2013(5).
- [12] 顾乡,赵雷,余志祥,等.落石冲击对山区桥墩的损伤研究[J].铁道工程学报,2016(3).
- [13] Raous M, Jean M, Moreau J J. Contact Mechanics[J]. Springer Netherlands, 1995(4).
- [14] Raous M, Jean M, Moreau J J. Contact Mechanics[M]. Springer US, 1995.
- [15] Xiang Z, Vu-Quoc L. Modeling the Dependence of the Coefficient of Restitution on the Impact Velocity in Elastic-Plastic Collisions[J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27(3):317-341.
- [16] Vuquoc L, Zhang X, Lesburg L. A Normal Force-Displacement Model for Contacting Spheres Accounting for Plastic Deformation: Force-Driven Formulation[J]. Journal of Applied Mechanics, 2000, 67(2):363-371.
- [17] Zhang X, Vu-Quoc L. An Accurate Elastic-Plastic Frictional Tangential Force-Displacement Model for Granular-Flow Simulations: Displacement-Driven Formulation[J]. Journal of Computational Physics, 2007, 225(1):730-752.
- [18] 陈剑,王全才,王浩,等.基于 Hertz 理论的泥石流块石冲击力修正系数研究[J].振动与冲击,2017(16).
- [19] 章广成,向欣,唐辉明.落石碰撞恢复系数的现场试验与数值计算[J].岩石力学与工程学报,2011(6).
- [20] 叶四桥.隧道洞口段落石灾害研究与防治[D].西南交通大学博士学位论文,2008.