

文章编号: 1008-2786-(2016)3-310-07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000133

# 滚石冲击力计算方法研究

易伟, 余斌, 刘秧, 刘强, 黄鹏

(成都理工大学/地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

**摘 要:** 通过量纲分析方法理论推导出滚石冲击力的影响因素有撞击物体的质量、撞击速度、撞击物体与被撞物体的弹性模量和撞击方向与平面的夹角, 并得到了各影响因素之间的关系。为了验证理论推导的正确性, 实验选用不同冲击速度、质量和不同的撞击物体与被撞物体的弹性模量以及不同的夹角, 通过多组实验, 确定了各个关系式的系数。最终得到滚石冲击力的计算公式为  $F = 0.261 (E_1 * E_2 / (E_1 + 2E_2) V^4 M^2)^{1/3} \sin^{1/2} \alpha$ , 该公式符合量纲和谐原理。通过对比国内外滚石冲击力实验数据和野外观测数据, 结果吻合度很好, 因此计算公式不受尺度的影响, 可适用于野外实际情况。

**关键词:** 滚石; 冲击力; 量纲分析

**中图分类号:** P642.21

**文献标志码:** A

崩塌、落石发生后, 巨大的石块滚落到山坡下或路边, 对附近的居民住房、工厂等基础设施都会造成极大的破坏。滚石灾害逐渐受到了人们的重视<sup>[1]</sup>, 目前国内外学者已经对滚石冲击力进行了大量的实验研究, 其对滚石的冲击力计算研究, 主要有3种方法: 1) 以 Hertz 弹性碰撞理论和冲量定理理论<sup>[2-3]</sup>为基础的计算模型主要以滚石的能量计算其冲击力, 而该方法没有考虑冲击物与被冲击物的材料特性, 对于不同材料的冲击力计算缺乏准确性; 2) 国外常用的半经验半理论算法<sup>[4-8]</sup>, 包括瑞士学者 Labiouse 等<sup>[9]</sup>推荐的算法及国内提出的滚石冲击力算法及改进算法<sup>[10-12]</sup>都是以缓冲层的弹性模量等为主要考虑因素, 考虑滚石速度、质量等参数计算冲击力, 但没有考虑冲击物的材料特性, 以及其他被冲击物的材料特性, 其计算局限性很大; 3) 日本学者 Kawahara 等<sup>[5]</sup>、杨其新等<sup>[13]</sup>都考虑了冲击物与被冲击物的材料特性(弹性模量等), 但因计算公式的物理量纲不和谐, 其计算结果在不同的尺度下, 会有较大的偏差。由于室内实验研究采用的模型的结果比野外情况小 2~4 个数量级, 且野外数据实际很难

获得, 因此本文通过量纲分析方法理论推导得到了一个量纲和谐的公式, 通过多组实验验证各个关系式的系数, 最终得到一个不受尺度影响的滚石冲击力计算模型。

## 1 量纲分析方法

国内外研究<sup>[1-8]</sup>中滚石冲击力的计算一般与动量定理和能量公式有关, 但是其中动量定理的冲击时间和能量定理中的做功位移都无法准确获取。时间或位移是通过撞击物体与被撞物体相互作用的结果, 由撞击物体与被撞物体的物理特性决定<sup>[2]</sup>, 因此可以用撞击物体与被撞物体的弹性模量和泊松比表示时间或位移。

本文采用 Buckingham 原理<sup>[14]</sup>可以确定冲击力的计算模型。首先选出 8 个与冲击力有关的变量因素:  $F$  = 冲击力,  $M$  = 撞击物体质量,  $V$  = 撞击速度,  $E_1$  = 撞击物体弹性模量,  $\mu_1$  = 撞击物体泊松比,  $E_2$  = 被撞物体弹性模量,  $\mu_2$  = 被撞物体泊松比,  $\alpha$  = 撞击方向与平面的夹角。Hertz<sup>[2]</sup>弹性碰撞公式如下

收稿日期(Received date): 2015-06-03; 改回日期(Accepted): 2015-08-25。

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金(编号 41372366)。[National Natural Science Foundation (No. 41372366).]

作者简介(Biography): 易伟(1988-), 男(汉族), 四川西昌人, 硕士研究生, 主要从事地质灾害防治及相关工作。[Yi Wei(1988-), male, Han nationality, born in Xichang Sichuan, master candidate, undertaking research on geological disasters.] E-mail: 578161927@qq.com

$$F_{\max} = \left( \frac{4}{3} \sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \left( \frac{E_1 E_2}{(1 - \mu_2^2) E_1 + E_2 (1 - \mu_1^2)} \right) \right)^{\frac{2}{5}} \left( \frac{5 M V^2}{4} \right) \quad (1)$$

其中  $R_1, R_2$  为两球体的半径。

通过式(1)可将撞击物体和被撞击物体的相互左右的物理特性用  $E$  统一表示

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

由式(2)可知撞击物体和被撞物体的弹性模量和泊松比对冲击力都有影响,但由于一般常见材料的泊松比都在 0.1~0.4 之间,由式(1)可知,  $1 - \mu_2$  在 0.84 和 1 之间,接近于 1,因此为简化研究,本文省去对泊松比的研究。

本文中的  $E$  是撞击物体与被撞物体弹性模量共同作用的结果。但是撞击物体与被撞物体的弹性模量贡献有所不同,因此可以将  $E$  表示成以下

$$E = E_1 \times E_2 / (E_1 + K E_2) \quad (3)$$

其中  $K$  为待定系数。当  $K=1$  时撞击物体与被撞物体弹性模量贡献相同,当  $K>1$  时被撞物体贡献多,反之贡献少。

所以此时只有 5 个变量,可以将其定义为主要量纲长度  $\{M\}$ 、 $\{L\}$  和时间  $\{T\}$  的函数:

$$\{F\} = \{ML/T_2\}, \{V\} = \{L/T\}, \{M\} = \{M\}, \{E\} = \{M/L/T_2\}, \{\sin \alpha\} = \{0\} \quad (4)$$

在这 5 个重要参数中 4 个都是有量纲参数,与这些量纲有关的主要量纲有 3 个:  $M, L$  和  $T$ , 根据 Buckingham 原理<sup>[14]</sup>,可以减少总的无量纲参数到  $5 - 3 = 2$ 。因此 2 个无量纲参数就包括了所有这些与冲击力有关的变量。滚石冲击力的关系式可以表达为公式

$$F = C (E M^2 V^4)^{1/3} f(\sin \alpha) \quad (5)$$

在当两物体发生正碰时  $\alpha$  为直角,  $\sin \alpha = 1$  为常数,因此正碰条件下冲击力的表达为:

$$F = C (E M^2 V^4)^{1/3} \quad (6)$$

为了验证上述推论,设计了一套冲击力测试系统,通过多组实验验证公式 5 和 6 并确定其相关的系数,最后得到滚石冲击力的计算公式。

## 2 试验方法

### 2.1 试验装置

为了验证理论公式的准确性,本文设计了一套试验装置,该装置主要由滚石运动系统、拦挡系统和数据采集系统 3 部分组成(图 1)。滚石的运动系统是可升降的水槽结构,水槽底部作为滚石的滑动面,该水槽长 8 m,宽 0.5 m,下面由一根钢架和一个可升降的液压柱支撑,液压柱主要用来调节坡度,从而可加大滚石的运动速度,运动系统前端离地面 1.5 m,末端离地面 3.5 m。运动系统前端和被撞物体 1 相互垂直。正碰条件下,试验被撞物体选 1。

滚石的拦挡系统是冲击力测试的核心部分。此系统由被撞物体、钢板和传感器组成。钢板长 40 cm,宽 28 cm,厚 2 cm。钢板主要的作用是固定传感器,此系统钢板上固定有 4 个大小一样的传感器,分布在钢板的 4 个方位,传感器之间的间距分别为 22 cm 和 21 cm,调整轨道与传感器的位置,使撞击区域尽量在 4 个传感器中间,其作用为均匀分配 4 个传感器的受力情况,防止某个传感器因受力过大导致超量程损坏传感器。被撞物体通过螺栓和钢板、传感器相连并固定,当滚石撞击被撞物体有效区域时,系统能及时读取冲击力数据。

数据采集系统(图 2)主要是用由传感器、变荷

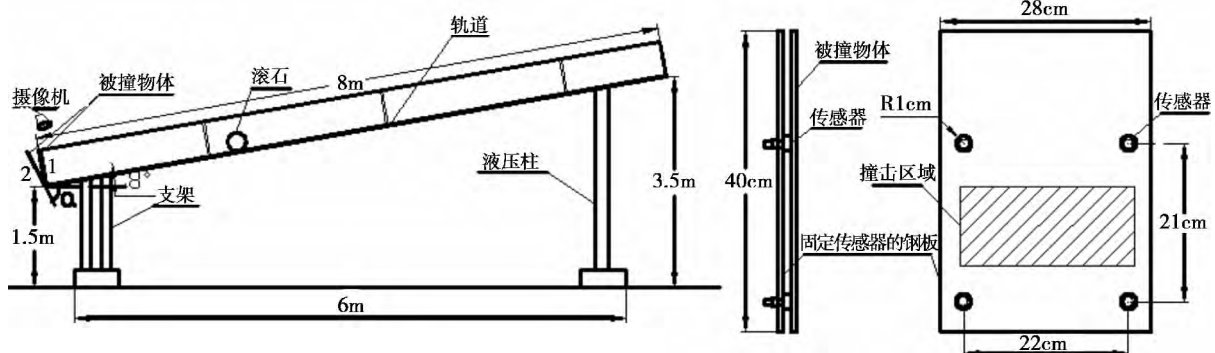


图1 实验装置详图

Fig. 1 Detail drawing of experimental device

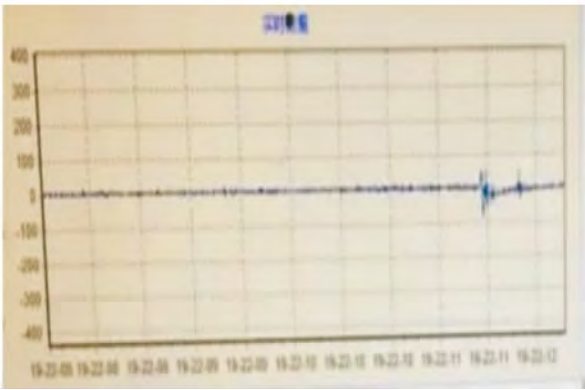
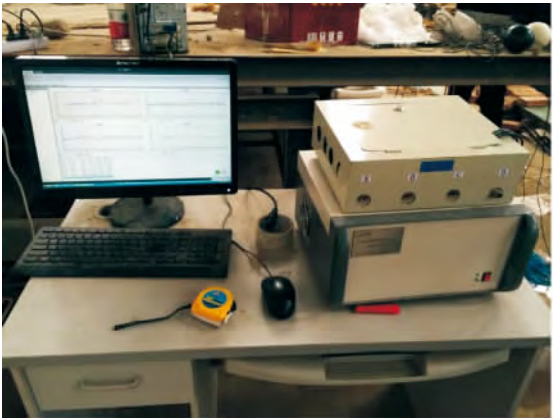


图2 数据采集系统详图

Fig.2 Detail drawing of Data acquisition system

放大器、采集箱和电脑组成,每个传感器量程为0~5 000 N,当滚石撞击被撞物体瞬间,被撞物体挤压传感器,传感器将信号通过放大器输入到采集箱,采集箱将电信号换算成冲击力信号通过电脑显示出来。如图2右图,横坐标为时间,频率为5 000。纵坐标为冲击力,单位N,每次撞击时取波峰值为此次撞击的冲击力。且每次接收到的总冲击力为4个传感器所受冲击力之和。

2.2 试验组合和步骤

2.2.1 对速度验证试验

本实验滚石选用质量为1.56 kg,直径为10.3 cm的大理岩圆球,被撞物体用自制C20混凝土板,其长为35 cm,宽28 cm,厚5 cm。将大理石从装置上不同位置滚下,用摄像机记录下大理石撞击混凝土的过程,最后通过其运动的帧数与撞击前运动的距离计算出滚石的运动速度。为了得到不同速度条件下的冲击力,故在不同位置静止放下圆球,用摄像机记录下每次撞击过程,试验后计算出各个位置的撞击速度的大小,记录好每次撞击混凝土板各个传感器的冲击力大小。

2.2.2 对质量验证试验

本实验选用三种不同质量的大理石圆球,被撞物体选用新的混凝土板。实验开始时将三个滚石从滑道相同位置释放分别撞击相同的混凝土板。再在轨道上选择三个不同位置重复上述过程。实验参数见表1。

2.2.3 对弹性模量验证试验

由上文量纲分析法可得到撞击物体 $E_1$ 和被撞物体 $E_2$ 的关系式为 $E = E_1 * E_2 / (E_1 + KE_2)$ ,为了确定整体弹性模量与冲击力关系以及K值得大小

设计了以下试验:

实验选用木球、砂岩、大理岩、花岗岩和铁球为撞击物体,被撞物体则选用木板、混凝土板和钢板三种。砂岩、大理岩、花岗岩和混凝土的弹性模量都是由单轴压缩试验获得,其他材料采用查表法获取其弹性模量。所有材料的试验参数见表1。

表1 实验参数

Tab.1 Parameters in the experiments

材料	质量/kg	直径/cm	弹性模量/Gpa
铁球	5.02	10.7	155
花岗岩圆球	1.64	10.2	83.34
大理岩圆球	1.56	10.3	47.38
大理岩圆球	3.56	13.6	47.38
大理岩圆球	11.86	20.3	47.38
砂岩圆球	1.26	19.8	26.45
木球	1.32	18.5	11
钢板	-	-	175
混凝土板	-	-	19.66
木板	-	-	11

2.2.4 对夹角验证

为研究非正碰情况下撞击物体与被撞物体夹角对冲击力的影响,实验将试验装置做了一些调整,如图1被撞物体2所示,被撞物体2与轨道的夹角即为撞击物体与被撞物体的夹角,这样试验变为简单快捷。试验还是选取1.58 kg、直径为10 cm的大理岩圆球,被撞物体选用钢板。该实验系统和正碰时的测试系统原理都是一样的,唯一的不同就是通过调节被撞物体与轨道之间的夹角,在不同角度 $\alpha$ 下

测得各个传感器的冲击力大小。

### 3 冲击力相关数据的验证与模型建立

#### 3.1 冲击力与冲击速度关系的验证

由图3分析可知在正碰条件下,相同的滚石撞击同一个被撞物体时,其所受冲击力是随着撞击速度的增大不断增大的,实验最小值在速度为0.36 m/s时,冲击力为210 N,最大值为速度在1.79 m/s时冲击力大小为1734 N。而且图中所有点都非常靠近理论推导趋势线  $F = 780V^{4/3}$ ,即冲击力与速度的  $4/3$  次方有关。

因此验证了理论推导的冲击力与冲击速度的关系。

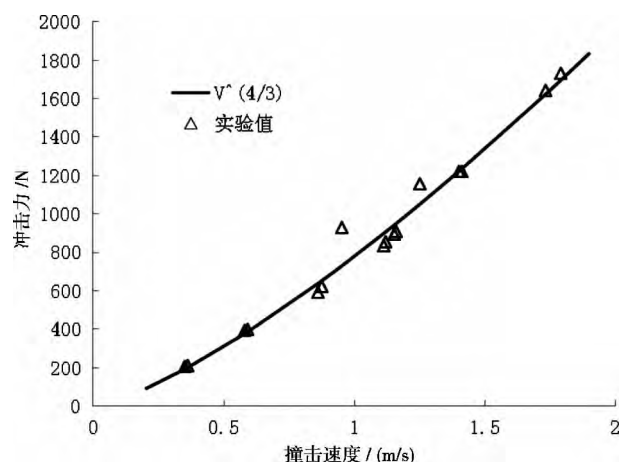


图3 滚石速度对冲击力的影响

Fig.3 Effect of speed on impact force

#### 3.2 冲击力与撞击物体质量关系的验证

由于量纲分析法不受尺度影响,为了更好的研究撞击物体质量与冲击力的关系,本文将消除3个不同质量的撞击速度的影响。3.1实验结果表明,冲击力与速度的  $4/3$  次方存在关系,而且本实验用的是同一种材料的撞击物体和被撞物体,所以弹性模量是相同的,可以不用考虑。由图4分析可知,图中所有的点都很靠近趋势线  $F/V^{4/3} = 360 M^{2/3}$ ,这说明滚石冲击力与质量的  $2/3$  次方有关,这与日本 Kawahara 等<sup>[5]</sup>的公式中质量的关系式相符。因此验证了理论推导的冲击力与撞击物体质量的关系。

#### 3.3 冲击力与弹性模量关系的验证

为了更好的研究出弹性模量与冲击力关系,运用4.1和4.2方法去除质量和速度的影响,由公

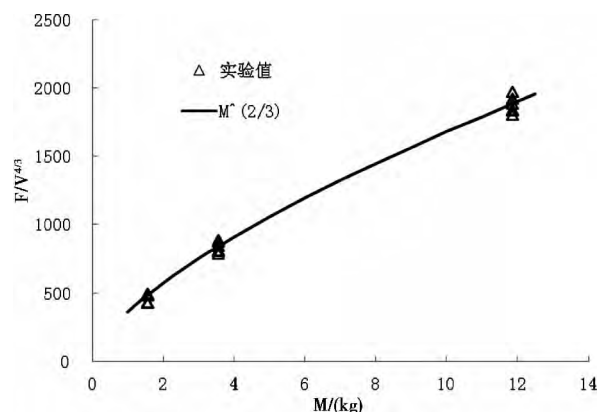


图4 滚石质量对冲击力的影响

Fig.4 Effect of weight on impact force

式3可知,只需通过实验确定出K值得大小。由图5试验分析可知当  $K = 2$  时  $F/(V^{4/3} * M^{2/3}) = 0.261E^{1/3}$ ,试验数据都能非常靠近理论的趋势线,因此也验证了理论推导的冲击力与弹性模量的关系。从另一方面来说,被撞物体对弹性模量的贡献要大一些。

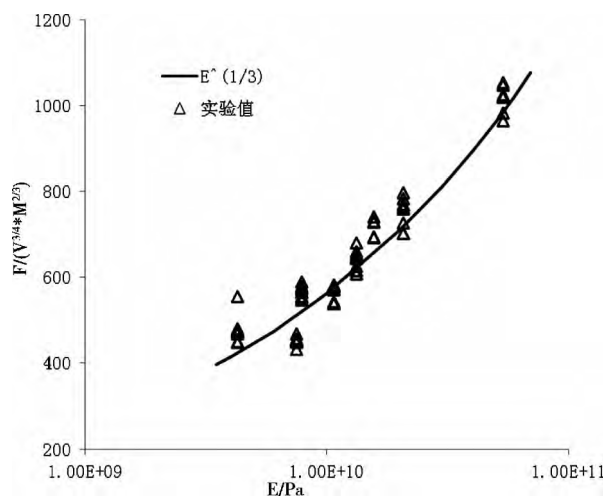


图5 滚石弹性模量对冲击力的影响

Fig.5 Effect of modulus of elasticity on impact force

#### 3.4 冲击力与角度关系的建立

本实验选择了撞击方向与平面的夹角为  $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 。运用4.1和4.2方法去除质量、速度和弹性模量的影响,由图6分析可知,  $F/(V^{3/4} * M^{2/3} * E^{1/3}) = 0.25 \sin^{1/2} \alpha$ ,试验数据都能非常靠近理论的趋势线,夹角与冲击力的大小的关系是成  $1/2$  次方。因此也推导出了滚石冲击力与平面夹角的关系。

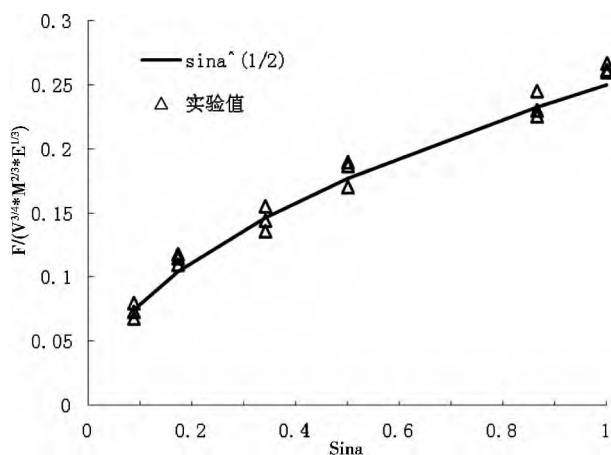


图6 不同角度入射下滚石对冲击力的影响

Fig.6 Effect of rockfall on impact force with different incident angle

### 3.5 滚石冲击力模型的建立

由于速度、质量、弹性模量和夹角实验的验证都非常好,如图7所示,本文通过数据处理最终确定出滚石冲击力模型为

$$F = 0.261 \left( \left( E_1 * E_2 / (E_1 + 2E_2) \right) M^2 V^4 \right)^{1/3} \sin^{1/2} a \quad (7)$$

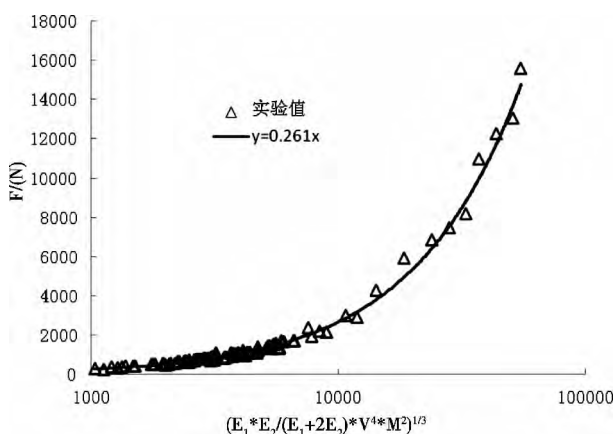


图7 冲击力系数的选择

Fig.7 Impact force factor selection

## 4 与国内外实验及野外数据对比

### 4.1 与国内外实验对比

为验证本文实验模型的合理性和实用性,选用杨其新等<sup>[13]</sup>实验和 PichlerB 等<sup>[16]</sup>实验数据予以说明。

杨其新<sup>[13]</sup>分别选用重量为 5 N 和 8 N 两种落锤,分别从不同高度落在不同厚度的黏土层上。其用的是石英砂、350 目重晶石粉、工业凡士林配合的

软弱黏土,由表 2<sup>[17]</sup>可得其弹性模量为 2 ~ 5 Mpa,本计算取其中间值  $E_2 = 3.5$  Mpa。由于在不同厚度下其弹性模量不同,当填土到达 5 cm 时其冲击力不再变化,弹性模量贡献最多最稳定。故选用 5 cm 时的冲击力。其计算结果与实测值对比见图 7。

PichlerB<sup>[16]</sup>实验,分别用质量为 10 160 kg 和 18 260 的花岗岩,从不同高度撞击由体积分数为 60% 的直径为 2 ~ 63 mm 的粗砂砾和体积分数为 40% 的直径为 63 ~ 200mm 砾石组成的 25 cm 厚的缓冲层。经查土的弹性模量,可得紧密砂、卵石的弹性模量为 100 ~ 200 Mpa。梁伟等<sup>[18]</sup>对压实度对级配碎石弹性模量影响的试验研究表明,压实度越高,其弹性模量越大,其 95% 压实度的碎石土为 581 Mpa,比 75% 压实度 144 Mpa 大 4 倍多。因为 PichlerB 实验已经将压实到 1 800 kg/m<sup>3</sup>,由乔兰等<sup>[19]</sup>研究可知,在砾石粒径大于 120 mm 时的最大干密度为 2 060 kg/m<sup>3</sup>,结合表 2 和梁伟等研究,本文土体弹性模量取  $E_2 = 600$  Mpa。再者, PichlerB 测了不考虑自重和考虑自重两种情况的冲击力,但两者误差在 10% 内,为了更符合实际,本文选择考虑自重的冲击力,其计算结果与实测值对比见图 8。

图 8 中,将袁进科、杨其新和 PichlerB 实验数据都与计算结果做了对比,由图分析可知,本模型计算的结果与国内外学者的研究结果相符,而且数据从杨其新的数 10 N 到袁进科的数 10 kN 再到 PichlerB 的数 10 MN。这也进一步验证了量纲分析不受尺度的限制,符合实际情况。

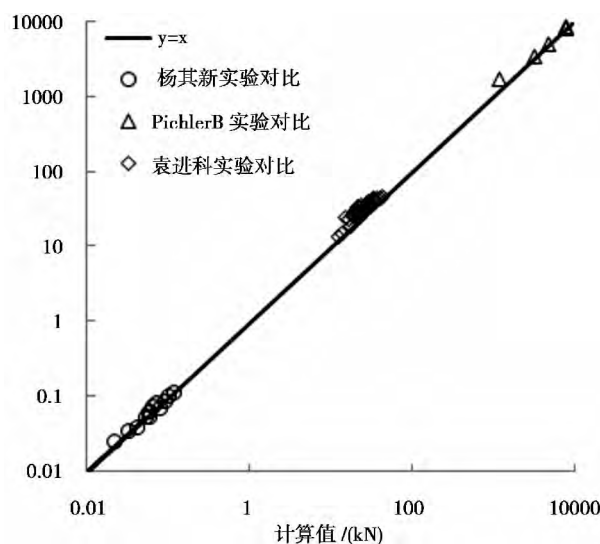


图8 本模型与国内外研究验证对比

Fig.8 Model comparison with the results of the study both at home and abroad

表 2 土的弹性模量参考

Tab.2 Referred elasticmodulus value of soil

土类	弹性模量/( MN/m <sup>2</sup> )	土类	弹性模量/( MN/m <sup>2</sup> )
很软的黏土	0.35 ~0.30	粉质砂土	7 ~20
软黏土	2 ~ 5	松砂	10 ~25
中硬黏土	4 ~8	紧砂	50 ~80
硬黏土	7 ~18	紧密砂、卵石	100 ~200
砂质黏土	30 ~40		

4.2 与野外数据对比

彻底关大桥位于四川省汶川县彻底关附近,从左岸横跨岷江并在右岸直接进入彻底关隧洞。在右岸隧洞的下游是一大型崩塌体。2009-07-25 发生崩塌,巨石滚下山坡直接冲击彻底关大桥的桥墩,将桥墩砸断,造成桥梁垮塌。裴向军等<sup>[20]</sup>根据现场勘察,分别估量得到相关参数为:撞击物体质量  $M = 148\,000\text{ kg}$ ,运动速度  $V = 11.5\text{ m/s}$ ,运动方向与被冲击物的平面夹角为  $90^\circ$ ,撞击物体弹性模量  $E_1 = 83 \times 10^9\text{ Pa}$ ,被冲击物的弹性模量  $E_2 = 20 \times 10^9\text{ Pa}$ 。桥墩的抗断强度约为  $2\,500\text{ t}$ 。

将数据带入本模型可得到崩塌的滚石冲击力  $F = 4\,514\text{ t}$ 。该冲击力大于桥墩的抗断强度,故计算值符合实际情况,可用于野外。

5 结论

1) 本文通过量纲分析方法得到一个量纲和谐的滚石冲击力公式。该公式与撞击物体的质量、撞击速度、撞击与被撞物体的弹性模量及撞击方向与平面的夹角有关。

2) 通过实验最终确定滚石的冲击力公式为  $F = 0.261(E_1 * E_2 / (E_1 + 2E_2) V^4 M^2)^{1/3} \sin^{1/2} \alpha$ 。

3) 将本模型与国内外实验数据和野外数据结果对比,公式吻合度很好,并且该模型不受大尺度限制,可用于野外实际情况。

参考文献(References)

[1] 张路青,杨志法,许兵,等. 滚石与滚石灾害[J]. 工程地质学报, 2004, 12(3): 225-231 [Zhang Luqing, Yang Zhifa, Xu Bing, et al. Rock falls and rock fall hazards[J]. Journal of Engineering Geology, 2004, 12(3): 225-231]

[2] Jonas A zukas. 碰撞动力学[M]. 北京: 北方工业出版社, 1989. [Jonas A zukas. Collision dynamics[M]. Beijing: Northern Industrial Press. 1989. ]

[3] Johnson K. Contact mechanics [M]. Cambridge : Cambridge University Press ,1985.

[4] Cagnoli B ,Manga M. Pumice-pumice collisions and the effect of the impact angle [ J ]. Geophysical Research Letters ,2003 ,30( 12) : 381-384

[5] 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: 329-340

[6] Labiouse V ,Descoeudres F ,Montani S. Experimental study of rock sheds impacted by rock blocks [J]. StructEng Int , 1996 ,3( 1) : 171-175

[7] Pichler B ,Hellmich C ,Scheiner S ,et al. Assessment of protection systems for gravel-buried pipelines considering impact and recurrent shear loading caused by thermal deformations of the pipe [G ] // 8th International Conference on computational plasticity ,Ed. By E. Onate ,D. R. J. Owen. Barcelona ,Spain 2005.

[8] Dussauge C. Statistical analysis of rockfall volume distributions: Implications for rockfall dynamics [J]. Journal of Geophysical Research ,2003 ,108( B6) :2. 1-2. 11

[9] Labiouse V. Experimental study of rock sheds impacted by rock blocks [J]. Structural Engineering International Journal , 1996 ,3( 1) :171-175

[10] Song Shuzhi ,Kong Jiming ,Wang Chenhua ,et al. Analysis of rockfall and its impact on the Cut-and-Cover tunnel in dynamics [J]. Wuhan University Journal of Nature Sciences , 2006 ,11( 4) :905-909

[11] 叶四桥,陈洪凯,唐红梅. 基于落石计算的半刚性拦石墙设计 [J]. 中国铁道科学, 2008 ,29( 2) : 17-22 [Ye Siqiao, Chen Hongkai, Tang Hongmei. Design of semi-rigid rockfall barrier wall based on rockfall simulation [J]. China Railway Science , 2008 ,29( 2) :17-22 ]

[12] 唐红梅. 危岩拦石墙计算方法研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005 ,16( 3) :12-15 [Tang Hongmei. Research on calculation method of volley-unstable rock retaining wall [J]. China and Control of Geological Disasters , 2005 ,16( 3) :12-15]

[13] 杨其新,关宝树. 落石冲击力计算方法的试验研究 [J]. 铁道学报, 1996 ,18( 1) :101-106 [Yang Qixin; Guan Baoshu. Test and research on calculating method of falling stone impulsive force [J]. Railway Society , 1996 ,18( 1) :101-106]

[14] Buckingham E. Model experiments and the form of empirical equations: American Society of Mechanical Engineers [J]. Transactions , 1915 ,37: 263-296

[15] 袁进科,黄润秋,裴向军,等. 滚石冲击力测试研究 [J]. 岩土力学学报, 2014 ,35( 1) : 48-54 [Yuan Jinke, Hhang Runqiu, Pei Xiangjun, et al. Test research on rockfall impact force [J]. Rock and Soil Mechanics 2014 ,35( 1) : 48-54]

[16] Pichler B ,Hellmich Ch ,Mang H A. Impact of rocks onto gravel Design and evaluation of experiments [J]. International Journal of Impact Engineering , 2005 ,31: 559-578

[17] 李广信. 高等土力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 19, 174-189 [Li Guangxin. Advanced soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press 2004: 19, 174-189]

- [18] 梁伟 杨斌 肇云亮 等. 压实度对级配碎石弹性模量影响的试验研究[J]. 西部交通科技 2011 47(6) : 10 – 15 [Liang Wei , Yang Bin Zhao Yunliang et al. Study on the degree of compaction on the modulus of elasticity of unbound aggregate [J]. Western China Communications Science & Technology 2011 47(6) : 10 – 15]
- [19] 乔兰 庞林祥 李远 等. 超大粒径人工砾石土的击实特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2014 33(3) : 484 – 492 [Qiao Lan Pang Linxiang Li Yuan et al. Experimental study of compaction characteristics of oversized clay mixed with gravels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2014 33(3) : 484 – 492]
- [20] 裴向军. 危岩体勘察关键技术研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015: 145 – 166 [Pei Xiangjun. Key technology research dangerous rock mass survey [M]. Beijing: China Water Power Press 2015: 145 – 166]

## Research on Calculation Method of Rockfall Impact Force

YI Wei , YU Bing , LIU Yang , LIU Qiang , HUANG Peng

( State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection , Chengdu University of Technology , Chengdu 610059 , China )

**Abstract:** Through the theory of dimensional analysis method it derived the influence factors of rockfall impact force. It has the quality of the impact object , impact velocity , elastic modulus and angle between the impact object and the object to be impacted , and it has been the relationship between the various factors. To verify the correctness of the theoretical derivation , impact and to be impacted object with different elastic modulus , quality and impact velocity were selected , the law of change of rockfall impact force was obtained by many times of experiment , eventually determine rockfall impact force formula for  $F = 0.266 (E_1 * E_2 / (E_d + 2E_2) V^4 M^2)^{1/3} \sin^{1/2} a$  , the formula in line with the principle of harmonious dimension. By comparing the domestic and foreign existing impact force formula calculation results and field observations are in good agreement. This model is not affected by the impact of large scale , applicable to actual situation , providing a reference for rockfall hazards prevention design.

**Key words:** rockfall; impact force; dimensional analysis