

Research on the Theory and Numerical Simulation of Rockfall Impact Force

Yu Liu^{1,2}, Peng Zhao^{1,2*}, Lingzhi Xie^{2,3}, Liangpu Li⁴

¹College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu Sichuan

²Key Laboratory Deep Underground Science and Engineering, Chengdu Sichuan

³College of Institute of New Energy and Low-Carbon Technology, Sichuan University, Chengdu Sichuan

⁴Sichuan Communication Surveying & Design Institute, Chengdu Sichuan

Email: *641728716@qq.com

Received: Feb. 16th, 2019; accepted: Mar. 5th, 2019; published: Mar. 12th, 2019

Abstract

The impact force of falling rock is one of the main loads to be considered in the design of tunnel structure. ANSYS/LS-DYNA numerical simulation was used to simulate the structure of concrete shed and cave impacted by falling rock. The numerical results were compared with the results of the existing theoretical calculation methods of rockfall impact. The results show that the recommended method for calculating rockfall impact force in China is seriously small, and the Japanese formula gives the largest result. The results of various theoretical calculation methods vary greatly. In order to ensure the partial safety design of the shed and cave structure, it is suggested to use the Japanese method to calculate the rockfall impact force.

Keywords

Rockfall Impact Force, Theoretical Calculation, Numerical Simulation, Shed Hole Structure

落石冲击力理论与数值模拟研究

刘雨^{1,2}, 赵鹏^{1,2*}, 谢凌志^{2,3}, 黎良仆⁴

¹四川大学建筑与环境学院, 四川 成都

²深地科学与工程教育部重点实验室, 四川 成都

³四川大学新能源与低碳技术研究院, 四川 成都

⁴四川省交通运输厅交通勘察设计院, 四川 成都

Email: *641728716@qq.com

收稿日期: 2019年2月16日; 录用日期: 2019年3月5日; 发布日期: 2019年3月12日

*通讯作者。

摘要

落石冲击力是棚洞结构设计时需要考虑的主要荷载之一。运用LS-DYNA数值模拟二十六面体落石冲击混凝土棚洞结构,并将数值结果与现有的落石冲击力理论计算方法的结果对比分析,结果表明:国内推荐使用的落石冲击力计算方法严重偏小,日本公式计算结果最大。各个理论计算方法的结果相差巨大,为保证棚洞结构的偏安全设计,建议使用日本公式计算落石冲击力。

关键词

落石冲击力, 理论计算, 数值模拟, 棚洞结构

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

落石是山区常见的灾害,对其危害范围内的公路、铁路等构筑物和人类活动构成了严重的威胁。棚洞作为一种有效的被动防护措施,目前已广泛地建造于落石易发处,来保护山区公路和铁路,防止交通堵塞。落石冲击力是棚洞结构设计时需要考虑的主要荷载之一。国内外学者对冲击力的研究主要基于四个理论:动量定理、弹性力学、接触力学和塑性变形[1]。

为了保护棚洞的下部结构,设计人员通常在棚洞上部铺置一定厚度的砂土垫层来缓冲落石对棚洞结构的冲击。落石冲击土层时包含了土层的弹性、塑性变形,也伴随着粘性、硬化和摩擦能量耗散等行为,导致冲击过程更加复杂。因此学者们对于落石冲击的研究大多基于冲击实验结果推导半经验半理论公式:日本道路公团[2]和 Labiouse 瑞士公式[3]基于 Hertz 弹性接触理论和室内落石冲击试验数据结果,提出计算落石冲击力的半经验半理论公式;Pichler [4]等结合室外实验,根据落石冲击深度、落石高度计算其冲击力及冲击时间;杨其新、关宝树教授[5]通过对室内落锤实验数据拟合,建立落石冲击力计算方法。另外,国内的《公路路基设计规范》(JTJ13-95) [6]和《铁路工程设计技术手册·隧道(修订版)》[7]也推荐了落石冲击力的近似算法。

然而实际工程中,山区落石的形状各异,冲击能量较大,当落石冲击砂石等缓冲层后,造成的压痕较深变形较大,Hertz 弹性理论的小应变假设已经不能应用于伴随着塑性变形的落石冲击力的理论研究。各个理论计算方法通常采用球形落石的形式,而忽略了落石形状对冲击力的影响。从理论上、数值上和实验上,对落石形状对冲击力和结构响应的影响研究较少。徐胜[8]通过数值模拟表明:在同等条件下,落石形状的不同会导致冲击力大小也不同,其中正方形时,落石冲击力最大。Peng Yan, Jinhua Zhang [9]等人通过数值模拟发现,与圆形落石相比,椭球体随着球体的增大,峰值冲击力和冲量增大。因此本文在考虑落石形状的情况下,通过数值模拟二十六面体落石冲击混凝土棚洞结构,来研究现今推荐使用的各个落石最大冲击力的计算方法是否依然适用。

2. 代表性的落石冲击力计算方法

2.1. 日本公式

Kawahara [2]等基于 Hertz 弹性理论和落石冲击试验数据,给出最大冲击力公式为:

$$F_{\max} = 2.108(mg)^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5} \quad (1)$$

式中: m 为落石质量(t); g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); λ 为拉梅常数(kPa), 且 $\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}$, ν, E 分别为缓冲层的泊松比和弹性模量; H 为落石下落高度。

2.2. 瑞士公式

Labiousse [3] 基于 Hertz 弹性理论和落石冲击试验数据, 给出最大冲击力公式为:

$$F_{\max} = 1.765 \times M_E^{2/5} \times R^{1/5} \times (QH)^{3/5} \quad (2)$$

式中: M_E 为缓冲层的弹性模量(kPa); R 为落石等效半径(m), $R = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\gamma}}$, m 为落石质量(kg), γ 为落石密度(kg/m^3); Q 为落石重量(kN); H 为落石下落高度(m)。

2.3. 隧道手册公式

《铁路工程设计技术手册 - 隧道》[7] 给出了冲击力近似计算方法:

$$F = \frac{Qv_0}{gt} \quad (3)$$

式中: Q 为落石重量(kN); v_0 为落石冲击速度(m/s); g 为重力加速度(m/s^2); t 为冲击持续时间, $t = \frac{2h}{c}$,

其中 $c = \sqrt{\frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} \times \frac{E}{\rho}$, ν, E 分别为缓冲层的泊松比和弹性模量, ρ 为回填土密度(kg/m^3)。

2.4. 杨其新算法

杨其新教授[5]等通过室内试验数据, 提出了一套经验公式:

$$F = ma \text{ 其中 } a = \frac{\sqrt{2gH}}{t}, t = \frac{\left(0.097mg + 2.21h + \frac{0.045}{H} + 1.2\right)}{100} \quad (4)$$

式中: m 为落石质量(t); a 为冲击过程中的平均加速度(m/s^2), g 为重力加速度(m/s^2); t 为冲击持续时间(s); H 为落石下落高度(m); h 为缓冲层厚度(m)。

3. 二十六面体落石冲击棚洞结构数值模拟

为了探究落石对落石最大冲击力的影响, 本文以 G245 线 乌斯河至甘洛县城段公路改建工程棚洞为背景[10], 结合 ANSYS/LS-DYNA 截取其中 $6 \text{ m} \times 12 \text{ m}$ 进行数值模拟, 重点研究在不同下落高度时, 棚洞结构的动力响应和最大落石冲击力。通过与各个落石冲击力理论计算结果对比, 以期工程实际中棚洞结构设计时落石冲击荷载的选取提出建议。

3.1. 落石与棚洞材料参数

本文棚洞结构主要分为上下两个部分, 上部为钢筋混凝土 T 型梁, 下部为混凝土顶端梁, 混凝土棚洞模型如图 1 所示。根据 JTG/TD70-2010《公路隧道设计细则》[11]规定, 当边坡有严重的危石、崩塌威胁时, 棚洞顶板的回填土厚度不宜小于 1.5 m, 因此在棚洞顶板上铺设 1.5 m 砂土缓冲层。

由于实际工程中, 落石的形状并非规则的球体, 为了使冲击结果与实际工程更相近, 因此落石采用

一个切角的二十六面体混凝土重锤，如图2，质量为316 kg，尺寸如图2所示。

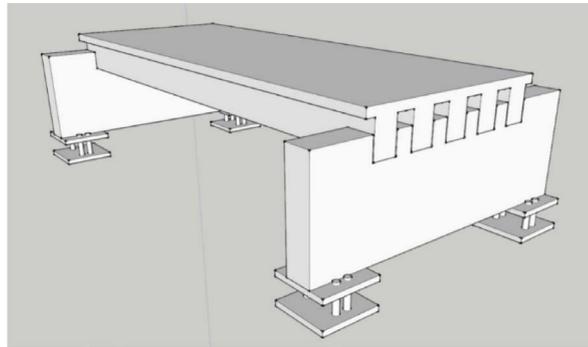


Figure 1. Structure model of shed
图1. 棚洞结构模型

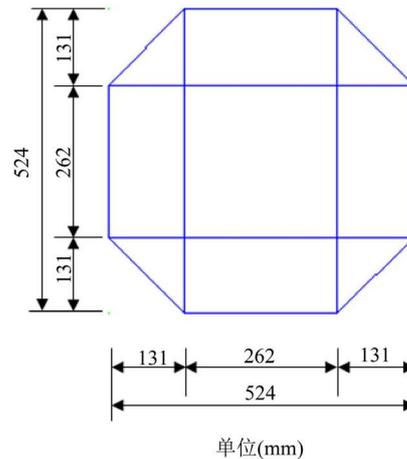


Figure 2. Rockfall model Figure 2 Rock fall size
图2. 落石模型图2 落石尺寸

主要材料参数如表1。

Table 1. The material parameters
表1. 材料参数

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹模/MPa	屈服极限/MPa	泊松比
混凝土	2400	3×10^4	38.3	0.2
钢筋	7800	2×10^5	400	0.3
砂土	2000	2.0	0.148	0.35

3.2. 落石冲击棚洞结构的数值模型

本文运用 ANSYS/LS-DYNA 软件，建立与实际工程一致的模型，通过显示动力算法模拟落石冲击混凝土棚洞的全过程。

材料模型：针对钢筋混凝土冲击过程中破坏大变形问题，选择合适的混凝土本构关系至关重要。混凝土标号为 C30，采用 HJC 材料模型，该模型因其简明合理的描述和计算程序的适应性，在混凝土强动载问题中获得了世界范围的广泛应用[12]。其材料参数见表2。

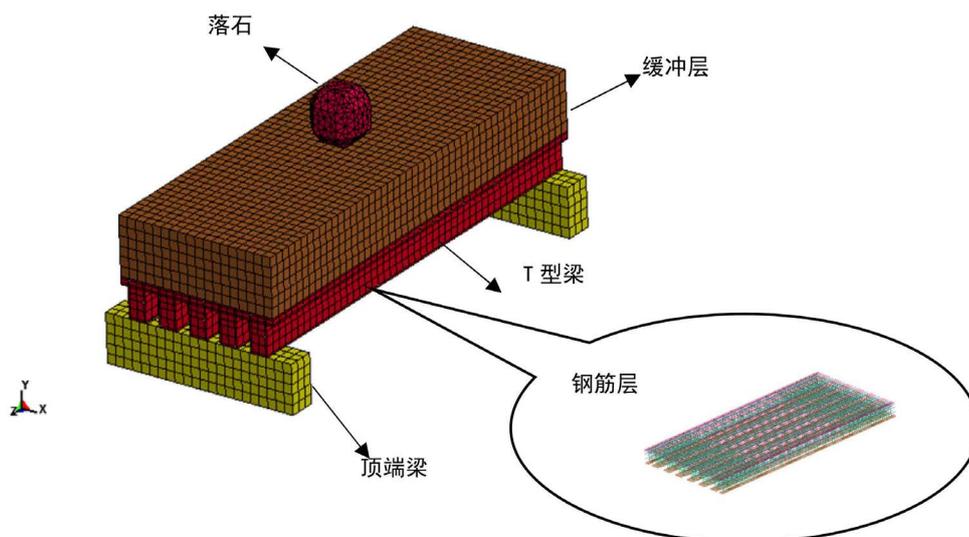
Table 2. Concrete material model of HJC**表 2.** HJC 混凝土材料模型

参数名	R_0 (g/cm ³)	F_c /MPa	T /MPa	G /GPa	D_1	D_2	ε_f^{\min}
参数值	2.4	33.67	2.4	12.53	0.04	1.0	0.01
参数名	C	A	B	N	S_{\max}	P_c /MPa	U_c
参数值	0.007	0.27	1.86	0.84	11	162.0	0.009
参数名	P_L /MPa	U_L	K_1 /GPa	K_2 /GPa	K_3 /GPa		
参数值	950	0.1	62	-40	26		

对于纵向钢筋、板受力筋和箍筋用弹塑性模型下的各向同性硬化材料模型 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 来模拟，塑性硬化模量假设为钢筋弹性模量 E_S 的 1%，屈服条件基于 Von Mises 准则。忽略砂体的破坏，使用 MAT_CRUSHABLE_FOAM 材料模型进行模拟，砂垫层应力应变关系采用 Tam SyHO 等人室内实验测得的以二阶抛物线关系表示[13]，其应力应变本构关系为 $\sigma_{sand} = 50\varepsilon_{sand}^2$ 。不考虑冲击过程中落石的分解、和土层飞溅的现象，将落石定义为刚性材料模型，并限制除垂直方向平动外的所有自由度。

接触设置：落石与砂土垫层采用面面普通接触，落石的刚度大设为目标面，垫层设为接触面。砂垫层与棚洞顶板之间采用面面自动接触，上部 T 型梁与下部顶端梁之间采用面面普通设置。荷载条件设置：落石垂直自由落体，对整个模型全部施加重力荷载，去加速度为 9.8 m/s^2 。边界及约束条件设置：顶端梁下部节点全部约束，并固定所有的自由度。

数值分析中的单元(落石、混凝土、泡沫、砂)均采用 SOLID 164 单元，T 型梁各钢筋采用 BEAM 161 单元。以此建立的整体模型共有 28,617 个节点，8300 个 Beam 单元，17,195 个 Solid 单元，整个模型共有 25,495 个单元，如图 3。

**Figure 3.** The element model**图 3.** 有限元模型

3.3. 数值模拟结果与理论计算结果对比分析

通过数值模拟给出二十面体落石在下落高度分别为 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m、6 m 时，落石的最大冲击力。现将不同落石高度下各个公式冲击力计算结果与数值模拟结果作比较，如图 4。

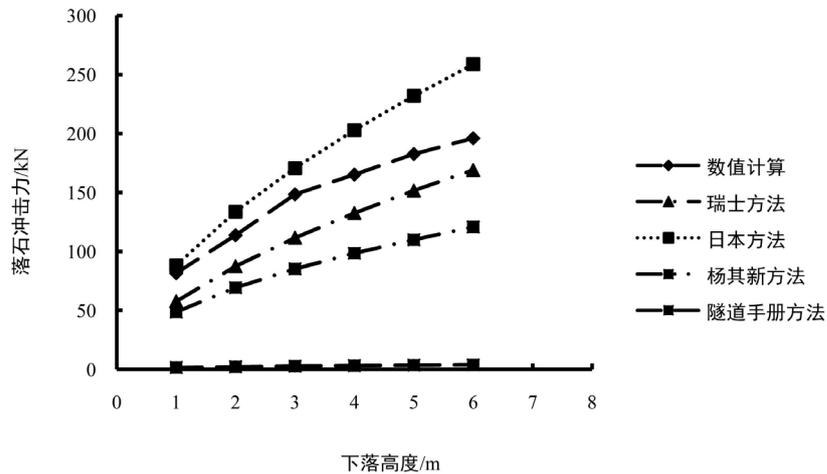


Figure 4. The results of various theoretical algorithms are compared with those of numerical simulation
图 4. 各个计算结果与数值模拟结果对比

由图 4 可以看出，随着落石高度的增加，隧道手册方法的计算结果几乎没有增加外，各个算法的冲击力结算结果都在增加。可以明显看出针对同一种工况，不同的冲击力计算方法所得的结果却相差甚大。其中隧道手册方法计算结果最小，且随着高度的增加，冲击力却几乎没有变化。通过表 3 的误差分析可以看出，隧道手册误差几乎达到百分之百，对落石冲击力的估算严重不足。这是由于隧道手册方法是基于冲量定理，因而求得的冲击力是整个冲击过程中的平均值，但是落石冲击棚洞缓冲层是一个脉冲式的过程，冲击力变化极大，显然隧道手册方法求得的平均冲击力是远远小于最大冲击力的。杨其新方法是基于室内试验数据和牛顿第二定律，求得的加速度是平均加速度，因此冲击力也远小于最大冲击力，且室内试验冲击能量较小，而本文冲击能量较大，这也是造成其冲击力结果偏小的原因。日本和瑞士方法二者均为基于落石现场试验实测冲击力结果所建立，因此都与数值模拟结果较为接近，两种方法计算结果的高低，前者取决于拉梅常数，后者取决于垫层变形模量参数的大小。瑞士公式中将落石简单的简化成球体，并未考虑落石形状对冲击力的影响，所求得的落石半径小于二十六面体真实半径，这也是瑞士公式冲击力小于数值模拟结果的原因。而日本方法是基于赫兹接触理论，其初始接触为点接触，且其弹性变形的小应变假设与实际不符，未考虑缓冲层的塑性变形，而本文模拟工程中，落石与缓冲层初始接触是平面接触，由于平面接触接触面较大，塑性变形吸收较大能量，致使日本方法得到的冲击力较大于数值模拟结果；且日本公式计算结果较大的依赖于拉梅常数的取值，一旦选取较小则远小于实际工程中的冲击力，因此往往选取偏大的拉梅常数，这也是日本方法结果大于数值模拟的一个原因。

Table 3. The results of various theoretical algorithms are compared with those of numerical simulation

表 3. 各个理论算法结果与数值模拟结果对比

下落高度 (m)	落石冲击力(kN)					误差分析(%)			
	隧道手册 F ₁	杨其新方法 F ₂	日本方法 F ₃	瑞士方法 F ₄	数值方法 F ₅	ζ ₁	ζ ₂	ζ ₃	ζ ₄
1	1.7	48.7	88.3	57.7	81.6	98.1	44.0	1.5	33.7
2	2.3	69.4	133.9	87.5	113.8	98.0	39.0	17.7	23.1
3	2.9	85.3	170.7	111.6	148.4	98.1	42.5	15.0	24.8
4	3.3	98.6	202.9	132.6	165.2	98.0	40.3	22.8	19.7
5	3.7	110	231.9	151.6	182.6	98.0	39.8	27.0	17.0
6	4	120.9	258.7	169.1	196	98.0	38.3	32.0	13.7

注: $\zeta_1 = |F_1 - F_5|/F_5$; $\zeta_2 = |F_2 - F_5|/F_5$; $\zeta_3 = |F_3 - F_5|/F_5$; $\zeta_4 = |F_4 - F_5|/F_5$ 。

由于没有完善的落石冲击力理论, 中国实际工程中落石冲击力的选取都是参照隧道手册计算。而隧道手册方法计算所得冲击力严重偏小, 造成实际工程中棚洞结构极易失效破坏, 不仅极大的增大了后期维护成本, 也对行驶在该路段的车辆安全具有较大威胁。

因此在没有最接近落石冲击棚洞结构的力学模型时, 推荐使用日本公式计算落石冲击力, 对棚洞进行偏安全设计。在今后的落石冲击力理论研究中, 应该将落石冲击理论的研究中应考虑落石形状对冲击力的影响。

4. 结论

本文以 G245 线乌斯河至甘洛县城段公路改建工程棚洞为背景, 结合数值模拟, 对比研究当落石形状为二十六面体时, 现今推荐使用的落石冲击力计算方法的结果的优劣, 结果表明:

1) 由于日本公式的计算结果是最大的, 因此在我国工程实践中, 对于棚洞结构设计时, 出于偏安全的考虑, 推荐使用日本公式计算落石的最大冲击力, 并选取偏大的拉梅常数。

2) 现有落石冲击力计算方法都是基于实验结果的拟合公式, 公式中的参数大多没有物理意义, 因此导致各个公式计算结果相差千百倍, 在今后的研究中, 应该提出更为合理的力学模型, 建立完善的冲击力理论体系。

3) 现有的落石冲击力计算方法都未考虑落石形状对冲击力的影响, 在今后的冲击力理论计算方法研究中, 应当考虑落石形状这一重要影响因素。

参考文献

- [1] Guangcheng, Z., Huiming, T., Xin, X., *et al.* (2015) Theoretical Study of Rockfall Impacts Based on Logistic Curves. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **78**, 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.06.001>
- [2] Kawahara, S. and Muro, T. (2006) Effects of Dry Density and Thickness of Sandy Soil on Impact Response Due to Rockfall. *Journal of Terramechanics*, **43**, 329-340. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2005.05.009>
- [3] Montani, S., Descoedres, F.O. and Labiouse, V. (1996) Experimental Study of Rock Sheds Impacted by Rock Blocks. *Structural Engineering International*, **6**, 171-175. <https://doi.org/10.2749/101686696780495536>
- [4] Pichler, B., Hellmich, C. and Mang, H.A. (2005) Impact of Rocks onto Gravel Design and Evaluation of Experiments. *International Journal of Impact Engineering*, **31**, 559-578. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2004.01.007>
- [5] 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(1): 101-106.
- [6] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路隧道设计细则: JTG/T D70-2010 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [7] 铁道部第一勘测设计院. 铁路工程设计技术手册[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999.
- [8] 徐胜. 落石冲击力计算方法研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆交通大学, 2016.
- [9] Yan, P., Zhang, J., Fang, Q., *et al.* (2018) Numerical Simulation of the Effects of Falling Rock's Shape and Impact Pose on Impact Force and Response of RC Slabs. *Construction and Building Materials*, **160**, 497-504. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.087>
- [10] 黎良仆, 袁松, 谢凌志, 等. 落石冲击荷载作用下 EPE 垫层棚洞缓冲作用研究[J]. 四川建筑科学研究, 2016, 42(3): 46-49.
- [11] 中交第二公路勘察设计研究院. 公路隧道设计细则: JTG/TD70-2010 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2010: 130-131.
- [12] 熊益波, 陈剑杰, 胡永乐, 王万鹏. 混凝土 Johnson-Holmquist 本构模型关键参数研究[J]. 工程力学, 2012(1): 121-127.
- [13] Bhatti, A.Q. and Kishi, N. (2010) Impact Response of RC Rock-Shed Girder with Sand Cushion under Falling Load. *Nuclear Engineering and Design*, **240**, 2626-2632. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.07.029>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org