

文章编号:1001-4179(2012)05-0064-04

# 落石冲击作用下公路破坏机理研究

王林峰,唐红梅,陈洪凯

(重庆交通大学 岩土工程研究所,重庆 400074)

**摘要:**现有的落石冲击计算公式主要适用于一种均质材料的路面,而公路是由路面和路基组成的二元体结构,基于此,考虑路面在受到落石冲击力后的变形特性,将落石冲击下路面的变形分为压缩变形和刺入变形两种模式。基于能量守恒原理和太沙基地基承载力理论,分别得到两种变形模式下的落石冲击力和由此引起的公路变形量计算公式;并据此导出判断公路安全状态的标准,且以工程实例说明了理论的可靠性。可为落石灾害区公路的设计和施工提供理论依据。

**关键词:**落石;冲击力;山区公路;破坏机理

**中图分类号:** P642.3;O346.5 **文献标志码:** A

我国 2/3 的国土面积为山区,而落石又是我国山区公路上常见的一种地质灾害。当公路旁陡崖上的岩体比较破碎时,容易出现崩塌落石灾害,导致道路被毁,交通中断甚至危及人们的生命财产安全。如 2010 年 10 月 21 日,台湾苏花公路发生落石灾害,致使多名人员死亡,274 人受困。

鉴于落石对公路安全的威胁如此巨大,展开落石对公路的损毁机理研究是很有必要的。P. Budetta 对如何评价公路沿线落石灾害的风险进行了研究<sup>[1]</sup>。I. Vilajosana 等通过一次现场试验对落石的冲击信号进行了研究<sup>[2]</sup>,B. Pichler 等通过室外试验,得到了通过落石冲击坑的深度、落石的几何尺寸和落石高度来计算落石冲击力和冲击时间的计算公式<sup>[3-4]</sup>。陈洪凯等对危岩主控结构面的研究得到了危岩破坏的断裂损伤模型和疲劳崩塌破坏的寿命预测模型<sup>[5-6]</sup>。Luuk K. A. Dorren 等用 GIS 技术对落石的致灾区范围进行了研究<sup>[7]</sup>。杨其新和关宝树通过室内实验提出了落石冲击力计算公式<sup>[8]</sup>。Wang B. L. 等通过研究,得到了确定落石灾害区地下管线合理埋深的简单计算公式<sup>[9]</sup>。黄润秋等对落石的运动特征和冲击力问题进行了研究<sup>[10-16]</sup>。以往研究仅考虑了路面为某种单一

材料时受落石冲击力的影响,而公路是由路基和路面组成的二元体结构,所以以往的落石冲击力研究对于实际公路来说有一定的局限性。

## 1 落石作用下公路的变形模式

公路在落石冲击作用下的变形主要有两种形态:一种是由于落石冲击力较小,公路没有破坏,此时公路主要发生压缩变形(图 1(a));另外一种是由于落石冲击力很大,公路发生破坏,此时落石与脱离路面主体的小块路面一起刺入路基内,即发生刺入变形(图 1(b))。对于中小型落石或道路等级比较高的路面,主要发生压缩变形,而对于大型落石或道路等级比较低甚至没有混凝土路面的道路,在落石冲击作用下容易发生刺入变形。此外,如果落石砸在没有混凝土保护的路肩或排水沟等地方也可能会发生刺入变形。

## 2 公路极限承载力

为了计算简便,将落石的形状简化为立方体。落石垂直冲击路面时的力学模型如图 2 所示。图 2 中  $h_1$  表示路面的厚度,  $m$ ;  $p_1$  表示落石冲击路面时路面受到的压力,  $kPa$ ;  $p_2$  表示落石冲击压力经路面扩散后作用

收稿日期:2011-10-12

基金项目:国家自然科学基金项目(50678182);重庆交通大学省部共建水利水运工程教育部重点实验室开放基金(SLK2009B04,SLK2008B03)

作者简介:王林峰,男,助理研究员,博士研究生,主要从事地表动力过程研究。E-mail:wanglinfeng715@163.com

在路基顶面的压力, kPa;  $b_1$  表示落石的宽度即压力  $p_1$  的作用宽度, m;  $b_2$  表示压力  $p_2$  作用宽度, m;  $l_1$  表示压力  $p_2$  左右两侧的影响长度, m;  $\theta$  为落石冲击压力在路面中的扩散角。

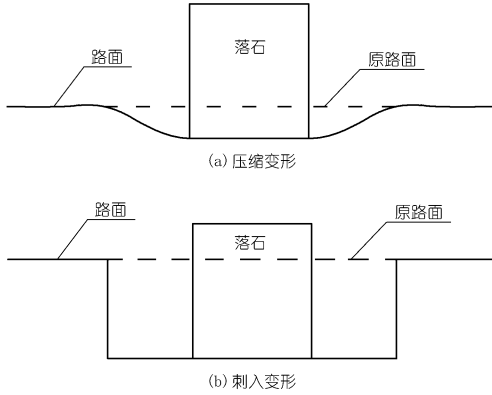


图 1 落石冲击时公路的变形模式

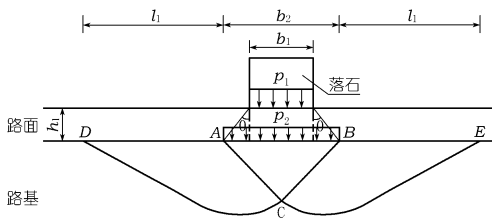


图 2 落石冲击路面的力学模型

根据扩散角与路面厚度可得到路基顶面的落石压力宽度为

$$b_2 = b_1 + 2h_1 \tan\theta \quad (1)$$

则路基顶面的落石压力为

$$p_2 = p_1 \frac{b_1}{b_2} \quad (2)$$

设路面的抗拉强度为  $\sigma_0$ , 路面 AD 段在极限平衡状态时其受力模式如图 3 所示。图中  $q_1$  表示由于路基受到落石冲击力后发生变形, 进而对路面 AD 段产生的压力;  $q_2$  表示路面的自重;  $q_3$  表示由路面抗拉力简化成的均布荷载。

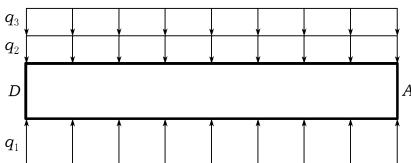


图 3 AD 段受力模式

$q_2$  的计算式为

$$q_2 = \gamma_1 h_1 \quad (3)$$

式中,  $\gamma_1$  为路面的容重,  $\text{kN}/\text{m}^3$ 。

$q_3$  对 A 点的弯矩为

$$M_{A1} = \frac{1}{2} q_3 l_1^2 \quad (4)$$

则  $q_3$  作用时 A 点产生的拉应力为

$$\sigma_{A1} = \frac{3q_3 l_1^2}{h_1^2} \quad (5)$$

因为路面处于极限状态, 所以

$$\sigma_{A1} = \sigma_0 \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)计算可得

$$q_3 = \frac{\sigma_0 h_1^2}{3l_1^2} \quad (7)$$

将荷载  $q_2, q_3$  和  $p_2$  布置在路基顶面(图 4), 此受力模式与太沙基的地基极限承载力计算模型相同, 所以在计算路基极限承载力时可采用太沙基地基极限承载力公式进行计算。因此, 路基在落石冲击力作用下的极限承载力为

$$p_u = 0.4\gamma_2 b_2 N_r + q N_q + 1.2c N_c \quad (8)$$

$$q = q_2 + q_3 \quad (9)$$

式中,  $\gamma_2$  为路基的容重,  $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $q$  为超载;  $c$  为路基的凝聚力, kPa;  $N_r, N_q, N_c$  为承载力系数, 其取值可以参考建筑地基基础设计规范(GB50007-2002)。

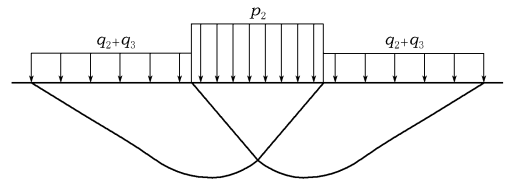


图 4 路基处于极限平衡状态时的受力模式

得到了路基极限承载力后, 可以判断出路基是否安全:  $p_2 < p_u$  时路基处于安全状态;  $p_2 = p_u$  时路基处于临界状态;  $p_2 > p_u$  时路基处于破坏状态。

### 3 落石冲击力与公路变形计算

(1) 当  $p_2 \leq p_u$  时路基未破坏, 路面和路基在落石冲击力的作用下主要是发生压缩变形而不会发生刺入变形。在冲击力的作用下路面的下沉量为

$$s = \frac{p_1}{E_s} H_0 + \frac{p_2}{E_m} h_1 \quad (10)$$

式中,  $E_s$  为路基的动压缩模量, kPa;  $E_m$  为路面的动压缩模量, kPa;  $H_0$  为路基的高度, m。

将(2)式代入(10)式变形可得

$$s = p_1 \left( \frac{1}{E_s} H_0 + \frac{b_1}{b_2 E_m} h_1 \right) \quad (11)$$

则  $p_1$  为

$$p_1 = \frac{s E_s E_m b_2}{b_2 E_m H_0 + b_1 E_s h_1} \quad (12)$$

设路基的最大下沉量为  $s_0$ , 则落石冲击力做的功

为

$$W_1 = \int_0^{s_0} p_1 ds \quad (13)$$

将式(12)带入式(13)得

$$W_1 = \frac{1}{2} \frac{E_s E_m b_2}{b_2 E_m H_0 + b_1 E_s h_1} s_0^2 \quad (14)$$

若落石刚接触路面时的速度为  $v$ , 则落石的动能为

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad (15)$$

式中,  $m$  为落石的质量, kg。

根据能量守恒定律得

$$W_1 = E \quad (16)$$

将式(14)和式(15)带入式(16)得

$$\frac{1}{2} \frac{E_s E_m b_2}{b_2 E_m H_0 + b_1 E_s h_1} s_0^2 = \frac{1}{2} m v^2 \quad (17)$$

则最大变形量为

$$s_0 = v \sqrt{\frac{m(b_2 E_m H_0 + b_1 E_s h_1)}{E_s E_m b_2}} \quad (18)$$

如果最大变形量超过了路面允许的变形量道路就会被折断, 反之则安全。所以落石最大冲击压力为

$$p_{1\max} = \frac{s_0 E_s E_m b_2}{b_2 E_m H_0 + b_1 E_s h_1} \quad (19)$$

若路面的抗剪强度为  $\sigma_1$ , 则当  $p_{1\max} > \sigma_1$  时路面破坏;  $p_{1\max} = \sigma_1$  时路面处于临界状态;  $p_{1\max} < \sigma_1$  时路面安全。

(2) 当  $p_2 > p_u$  时路基发生破坏, 落石刺入公路中, 若刺入的深度为  $h_2$ , 则此时的力学模型如图 5 所示。由于此时路面已被拉断, 所以不再需要考虑路面的抗拉力  $q_3$ 。

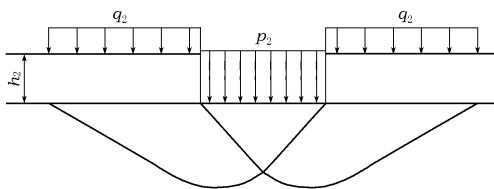


图 5 刺入变形后路基的力学模型

刺入深度范围内的土体容重为

$$q_4 = \gamma_2 h_2 \quad (20)$$

所以发生刺入变形时公式(8)中的超载变为

$$q = q_2 + q_4 \quad (21)$$

将式(21)带入公式(8)就可以得到刺入变形时的路基极限承载力  $p_{u2}$ 。由于处于极限承载力时, 路基顶面的落石冲击力呈一组作用力与反作用力, 所以  $p_2 = p_{u2}$ 。若落石刺入的最大深度为  $H$ , 则落石冲击力做的功为

$$W_2 = \int_0^H p_1 dh_2 \quad (22)$$

由式(8), 式(2)和式(21)得

$$p_1 = \frac{b_2}{b_1} [0.4 \gamma_2 b_2 N_\gamma + (q_2 + \gamma_2 h_2) N_q + 1.2 c N_c] \quad (23)$$

$$\text{令 } T_1 = \frac{b_2}{b_1} (0.4 \gamma_2 b_2 N_\gamma + 1.2 c N_c + q_2 N_q), T_2 = \frac{b_2}{2 b_1} \gamma_2 N_q$$

将式(23)带入式(22)得

$$W_2 = T_1 H + T_2 H^2 \quad (24)$$

当达到最大刺入深度时, 根据能量守恒得

$$W_2 = E \quad (25)$$

将式(15)和式(24)带入式(25)得

$$T_1 H + T_2 H^2 = \frac{1}{2} m v^2 \quad (26)$$

因此最大刺入深度为

$$H = \frac{-T_1 + \sqrt{T_1^2 + 2T_2 m v^2}}{2T_2} \quad (27)$$

计算结果是冲击坑的深度。将式(27)带入式(8)就可以计算出刺入变形时落石的最大冲击力  $p_{1\max}$ 。

## 4 算例

贵州赤水至十丈洞大瀑布的公路发生过一次大的崩塌, 落石的尺寸为  $0.3 \text{ m} \times 0.7 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$ , 与地面的接触面积为  $0.21 \text{ m}^2$ , 落石降落高度为  $4.0 \text{ m}$ , 落石质量为  $605 \text{ kg}$ 。路面混凝土厚  $0.25 \text{ m}$ , 混凝土的容重为  $25 \text{ kN/m}^3$ , 路面的应力扩散角为  $45^\circ$ 。路基的凝聚力取为  $32 \text{ kPa}$ , 内摩擦角取为  $25^\circ$ , 路基的容重为  $21 \text{ kN/m}^3$ 。路基高度为  $6 \text{ m}$ , 路基的静压缩模量为  $120 \text{ MPa}$ , 另根据文献[17]可知, 路基的动压缩模量约为静压缩模量的 9 倍。通过公式(19)计算得到落石的最大冲击力为  $2.19 \text{ MPa}$ , 由式(8)计算得到路基的极限承载力为  $3.06 \text{ MPa}$ , 所以公路未破坏。现场调查发现路面没有出现贯通的裂纹, 只有路面表层的混凝土有一点脱落。所以计算结果与现场情况基本一致。根据公式(18), 计算落石冲击路面的最大竖向变形量为  $8.3 \text{ mm}$ 。

## 5 结论

(1) 本文将落石冲击力作用下的公路变形分为压缩变形和刺入变形两种模式。高等级或承载力高的道路主要发生压缩变形, 而低等级道路和高等级公路的路肩或排水沟处易发生刺入变形。

(2) 由于路面层比较厚,所以不能忽略路面对落石冲击力的影响。本文不仅考虑了路基土体对落石的影响,而且还考虑了路面对落石冲击力的影响。

(3) 本文基于能量守恒原理和太沙基的极限承载力公式,得到了落石冲击道路时的最大冲击力和公路的最大变形量计算公式,为落石灾害区的道路设计和施工提供了理论依据。

(4) 本文只研究了落石垂直入射的情况,而对于落石以任意角度入射的情况需要在以后的工作中进行进一步深入的研究。

#### 参考文献:

- [1] Budetta P. Assessment of rockfall risk along roads[J]. Natural hazards and earth system sciences, 2004, (4): 71 - 81.
- [2] Vilajosana I, Surinach E, Abell' A, et al. Rockfall induced seismic signals: case study in Montserrat, Catalonia[J]. Natural hazards and earth system sciences, 2008, (8): 805 - 812.
- [3] 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.
- [4] S Kawahara, T Muro. Effects of dry density and thickness of sandy soil on impact response due to rockfall[J]. Journal of Terramechanics, 2006, (43): 329 - 340.
- [5] Chen H K, Tang H M. Method to calculation fatigue fracture life of control fissure[J]. Applied Mathematics and Mechanics: English Edition, 2007, 28(5): 643 - 649.
- [6] Chen H K, Tang H M, Ye S Q. Damage model of control fissure in perilous rock[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2006, 27(3): 967 - 974.
- [7] Luuk K A. Dorren, Arie C. Seijmonsbergen. Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale[J]. Geomorphology, 2003, (56): 49 - 64.
- [8] 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.
- [9] Wang B L, Drummond S C. A simplified approach for rockfall ground penetration and impact stress calculations[J]. Landslides, 2008, (5): 305 - 310.
- [10] 黄润秋, 刘卫华, 周江平, 等. 滚石运动特征试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(9): 1296 - 1302.
- [11] 黄润秋, 刘卫华. 滚石在平台上的运动特征分析[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 517 - 523.
- [12] 黄润秋, 刘卫华. 基于正交设计的滚石运动特征现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 882 - 891.
- [13] 黄润秋, 刘卫华. 平台对滚石停积作用试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 516 - 524.
- [14] 何思明, 吴永, 杨雪莲. 滚石冲击碰撞恢复系数研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 623 - 627.
- [15] 何思明, 吴永, 杨雪莲. 滚石坡面冲击回弹规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增1): 2793 - 2798.
- [16] 杨海清, 周小平. 边坡落石运动轨迹计算新方法[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3411 - 3416.
- [17] 徐平, 夏唐代, 薛威. 高速公路路基土动静压缩模量的关系[J]. 华东公路, 2005, (5): 7 - 9. (编辑: 郑毅)

## Study on damage mechanism of pavement slab under rockfall condition

WANG Linfeng, TANG Hongmei, CHEN Hongkai

(Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** The previous rockfall impact formulas are only suitable to homogeneous material, while the road structure is a dual system of road foundation and pavement slab. Considering the pavement slab's deformation characteristics, we divided the pavement slab's deformation into two modes: compress mode and penetrating mode. Based on the principles of energy conversation and the Terzaghi's bearing capacity of foundation, we deduce the formulas of rockfall's impact force and deformation of the pavement under the two modes. And the standard for judging safety of the road is deduced. The reliability of the theory is proved by several practical cases.

**Key words:** rockfall; impact force; highway in mountainous area; damage mechanism

#### · 简讯 ·

### 《洞庭湖区综合规划报告》通过审查

2012年2月17~19日,水利部水利水电规划设计总院在北京组织召开了《洞庭湖区综合规划》审查会议,会议邀请了韩其为院士、王浩院士等15位专家,水利部规划计划司、建设与管理司、水土保持司,国家防汛抗旱总指挥部办公室,水利部长江水利委员会及所属有关单位,湖南省发展和改革委员会、水利厅、洞庭湖水利工程管理局及常德市、益阳市、岳阳市水利(水务)局和水利水电勘测设计研究总院,湖北省发展和改革委员会、水利厅、荆州市长江河道管理局及水利水电规划勘测设计

院等单位的领导、专家和代表共90多人参加。长江委副主任兼总工程师马建华出席了会议。会议认为,报告基础资料翔实,工作基础雄厚,反映了江湖关系变化以及三峡工程建成投运后洞庭湖区面临的形势,以逐步建成防洪减灾、水资源综合利用、水生态与环境保护、水利管理等四大体系的总体思路明晰。会议分2个组进行了认真讨论,基本同意规划报告的主要内容,并要求根据审查会议意见对报告进行必要的修改补充。

(长江)