

地震引起的飞石运动过程初步分析*

叶天立¹ 鲁晓兵¹ 崔鹏² 张旭辉¹

(1. 水动力学与海洋工程重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘要: 地震可能引发大量的飞石, 对生命财产造成严重威胁。针对地震飞石问题进行了初步研究。首先基于刚体运动理论和空气运动学理论建立了飞石的运动模型, 考虑了空气阻力、地震加速度等参数的影响; 然后通过理论分析获得了地震纵横波同时作用和只有横波作用时的飞石的起动速度、最大运动距离、飞行时间等参数的解析方法。分析结果与汶川映秀镇飞石的实测数据吻合良好。这些研究为今后地震中的飞石危害的预测和防范提供了依据。

关键词: 地震; 飞石; 横波; 纵波

中图分类号: P642.2 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2011)增2-1780-04

Initial Study on the Movement of Flying Rock during Earthquake

Ye Tianli¹, Lu Xiaobing¹, Cui Peng², Zhang Xuhui²

(1. Key Laboratory for Hydraulic and Ocean Engineering, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 100190, China)

Abstract: A lot of flying rock can be induced by earthquake, which can cause severe harm to people and property. A study on this problem was carried out. First, a model of flying rock for analyzing the flying distance and velocity was presented based on the rigid body kinematics and aerodynamics, in which the effects of air drag and acceleration of earthquake are considered; secondly, the initial velocity and maximum flying distance and flying duration under S-wave coupling P-wave and under just S-wave were obtained based on the presented model. The analytical solution agreed well with the in-situ data in the Yingxiu county, Wenchuan City, Sichuan Province. This study provided a reference for the forecast and prevention of flying rock damage in the future.

Keywords: earthquake; flying rock; P-wave; S-wave

1 引言

汶川大地震引发了大量的滑坡、崩塌、泥石流、碎屑流等地质灾害。初步统计, 地质灾害多达 12 000 多处, 潜在隐患点近 8 700 处, 有危险的堰塞湖 30 多座^[1~3]。除了这些灾害, 另一种灾害, 飞石, 在汶川特大地震中也造成了非常严重的危害^[4, 5]。不仅在在在地震期间, 飞石带来了巨大的人

员伤亡, 而且在震后对救援的人员和车辆造成严重的威胁和伤害, 如在 2009 年 7 月 25 日, 国道 213 线汶川段彻底关大桥桥墩被巨石砸断, 造成桥面捣毁, 213 线中断, 3 人死亡, 12 人受伤, 7 辆车损毁的惨剧。

根据现场调查, 在汶川地震中, 多处重达数十、数百吨的岩块被临空抛射达数十米甚至数百米。最具代表性的是汶川地震震中区映秀镇, 一重约

* 收稿日期: 2011-07-15(修改稿)

作者简介: 叶天立(1986-) 男, 河南人, 硕士, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的教学与科研工作。

E-mail: yetl@sina.com

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)(2008CB425802)

300 t 的块石, 从都汶公路内侧坡体陡壁顶部, 直接凌空抛射到公路外侧(图 1), 其水平抛射距离 $s = 61.9 \text{ m}$, 竖直下落高度 $Hv = 64.4 \text{ m}$ (图 2) [6, 7]。

地震飞石的飞行轨迹和冲击力是其造成的破坏程度的主要因素, 这两个因素又决定于地震特性, 如地震加速度大小、频率, 同时也决定于空气阻力。地震按传播方式分为三种类型: 纵波、横波和面波。纵波是推进波, 在地壳中的传播速度为 $5.5 \sim 7 \text{ km/s}$, 最先到达震中, 又称 P 波, 它使地面发生上下振动, 破坏性较弱。纵波可以使山体上的石块松动, 不会使其飞起。横波是剪切波, 在地壳中的传播速度为 $3.2 \sim 4.0 \text{ km/s}$, 第二个到达震中, 又称 S 波, 它使地面发生前后、左右抖动, 破坏性较强, 是飞石的主要动力。面波又称 L 波, 是由纵波与横波在地表相遇后激发产生的混合波。其波长长、振幅强, 只能沿地表面传播, 是造成飞石的另一主要因素。

本文针对地震中飞石的运动特性(运动轨迹和触地速度)进行分析, 获得地震飞石的起因和运动过程, 为相关的减灾防灾服务。



图 1 汶川映秀镇飞石

Fig. 1 Flying rock at Yingxiu county, Wenchuan city



图 2 飞石在坡体上的位置

Fig. 2 Position of flying rock on the slope

2 模型和分析

考虑一个山上一定高度处有一个石块, 石块可以是任意形状。当地震波传播到该处, 石块受到垂向作用和水平作用力, 如图 3 所示。根据傅立叶分析, 地震波可分解为系列的正弦波, 其产生的飞石效应也为系列的正弦波的效应叠加。因此本文假设纵波和横波均为正弦波(如图 4)进行探讨。假设 t_1 时刻纵波来临开始作用于石头(A), A 随地运动(上下), A 与坡体分离前以地震加速度 a 运动, 与坡体分离后以重力加速度 g 运动。纵向地震波为 $a_1 = A_1 \sin \omega t$, 横向地震波为 $a_2 = A_2 \sin \omega t$ 。

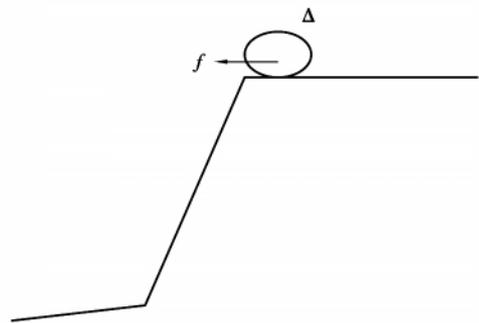


图 3 问题示意

Fig. 3 Sketch of the problem

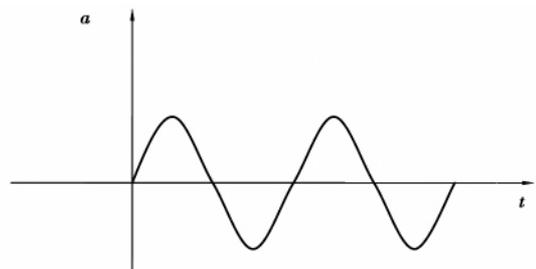


图 4 地震波示意

Fig. 4 Sketch of seismic wave

假设加速度的幅值为 a 。只有当 $a > g$ 时才有可能发生分离。若横波传来时已经发生分离, 则横波对 A 不会发生作用, 所以应当考虑在分离之前横波已经传到地面。

2.1 纵横波均对飞石初始速度产生影响

(1) 起动速度: 横波传到时, 纵波引起的 A 的垂向速度 v_1 为:

$$v_1 = \int_{t_1}^t A_1 \sin \omega t dt = A_1 \left(\frac{\cos \omega t_1}{\omega} - \frac{\cos \omega t}{\omega} \right) \quad (1)$$

最大值为:

$$v_{1m} = \frac{2A_1}{\omega} \quad (2)$$

t_2 时刻横波传来, A 开始随地做水平运动

$$v_2 = \int_{t_2}^t A_2 \sin \omega t dt = A_2 \left(\frac{\cos \omega t_2}{\omega} - \frac{\cos \omega t}{\omega} \right) \quad (3)$$

最大值为:

$$v_{2m} = \frac{2A_2}{\omega} \quad (4)$$

设 t_3 时刻, 水平向速度和垂向速度均最大时 A 脱离地面, 此时飞出距离最远。如果不考虑空气阻力, 则飞石到达的最大距离可求解得到。

飞石落地时的垂向速度为:

$$V_f = \sqrt{V_{1m}^2 + 2gH} = \sqrt{(2 \times 9.7)^2 + 2 \times 10 \times 64.4} \\ = 40.7 \frac{m}{s} \quad (5)$$

时间为:

$$t = \frac{40.7 + 19.4}{10} = 6.01 \quad (6)$$

则飞石的水平运动距离为:

$$H = \frac{2A_2}{\omega} t = 19.4 \times 6.01 = 116.6 \text{ m} \quad (7)$$

如果初始是水平抛出, 飞石落地时的垂向速度为:

$$V_f = \sqrt{2gH} = \sqrt{2 \times 10 \times 64.4} = 35.9 \frac{m}{s} \quad (8)$$

时间为:

$$t = \frac{35.9}{10} = 3.59 \quad (9)$$

则飞石的水平运动距离为:

$$H = \frac{2A_2}{\omega} t = 19.4 \times 3.59 = 69.6 \text{ m} \quad (10)$$

这个数值与汶川映秀镇的飞石情况接近^[6,7]。文献[6,7]中数据, 计算参数为: $m = 300T$, $a = 9.7 \text{ m/s}^2$, $H = 64.4 \text{ m}$, $S = 61.9 \text{ m}$, $g = 10 \text{ m/s}^2$ 。

飞石脱离后, A 具有水平和垂向加速度, 考虑空气阻力 f 与 v 方向相反, 且有线性关系 $f = kv$ ^[8]。可将 f 沿水平和纵向进行分解, 即:

$$f_1 = -kv_1 \quad (11)$$

$$f_2 = -kv_2 \quad (12)$$

上述空气阻力产生的加速度分别为 $a_1 = -\frac{kv_1}{m}$;

$a_2 = -\frac{kv_2}{m}$ 。考虑石头的不规则, 可设 $k = 0.5$ 。

(2) 运动过程中的速度分析

沿水平方向为:

$$\frac{dv_2}{dt} = -\frac{kv_2}{m} \quad (13)$$

由积分得到沿水平方向的速度为:

$$v_2 = C_1 \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) \quad (14)$$

由 $t = t_3$ 时 $v_2 = \frac{2A_2}{\omega}$ 得到:

$$C_1 = \frac{2A_2}{\omega} \exp\left(\frac{kt_3}{m}\right) \quad (15)$$

故水平速度为:

$$v_2 = \frac{2A_2}{\omega} \exp\left(\frac{kt_3}{m}\right) \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) \quad (16)$$

垂向速度为:

$$\frac{dv_1}{dt} = -\frac{f_1}{m} - g \quad (17)$$

求得:

$$v_1 = C_2 \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) - \frac{mg}{k} \quad (18)$$

由 $t = t_3$ 时 $v_1 = \frac{2A_1}{\omega}$ 得到

$$C_2 = \left(\frac{mg}{k} + \frac{2A_1}{\omega}\right) \exp\left(\frac{kt_3}{m}\right) \quad (19)$$

故垂向速度为:

$$v_1 = \left(\frac{mg}{k} + \frac{2A_1}{\omega}\right) \exp\left(\frac{kt_3}{m}\right) \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) - \frac{mg}{k} \quad (20)$$

(3) 位移分析

沿水平方向:

由 $\frac{ds_2}{dt} = v_2$ 得到

$$s_2 = \int v_2 dt = -\frac{mC_1}{k} \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) + C_3 \quad (21)$$

代入初值 $s_2(t=0) = 0$, 可以求得 $C_3 = \frac{mC_1}{k}$

即水平位移为:

$$s_2 = \int v_2 dt = \left(\frac{m}{k} \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) + \frac{m}{k}\right) \frac{2A_2}{\omega} \exp\left(\frac{kt_3}{m}\right) \quad (22)$$

沿垂直方向:

由 $\frac{ds_1}{dt} = v_1$ 得到

$$s_1 = \int v_1 dt = -\frac{mC_2}{k} \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) - \frac{mgt}{k} + C_4 \quad (23)$$

代入初值 $s_1(t=0) = 0$, 可以求得 $C_4 = \frac{mC_2}{k}$

$$s_1 = \left(-\frac{m}{k} \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) - \frac{mgt}{k} + \frac{m}{k}\right)$$

$$\left(\frac{mg}{k} + \frac{A_1}{\omega}\right) \exp\left(-\frac{kt_3}{m}\right) \quad (24)$$

令 $s_1 = H$, 可得 A 飞出到第一次着地所经历时间 Δt 将 Δt 代入下式:

$$s_2 = \int v_2 dt = \left(-\frac{m}{k} \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) + \frac{m}{k}\right) \frac{2A_2}{\omega} \exp\left(-\frac{kt_3}{m}\right) \quad (25)$$

即可得第一次着地时的水平位移。

A 飞出水平距离的大小受地震加速度大小和频率影响比较显著, 图 5 给出了加速度幅值对 A 飞出的水平距离的影响。从图 5 中可以看出, 当频率大于 7 Hz 时, 岩石飞出水平距离迅速增加, 且随着频率的增大, 岩石飞出水平距离增加的速率也不断增大。图 6 给出了加速度频率对 A 飞出的水平距离的影响。从图 6 中可以看出, 岩石飞出水平距离随幅值的增加不断增大, 且随着幅值的增加, 岩石飞出水平距离增大的速率也不断增大。当然, 实际地震频率是有限的, 主频一般在 $1 \sim 5 \text{ Hz}$; 同时岩石初始的垂直高度是有限的, 因此岩石飞出的水平距离不是无限的。

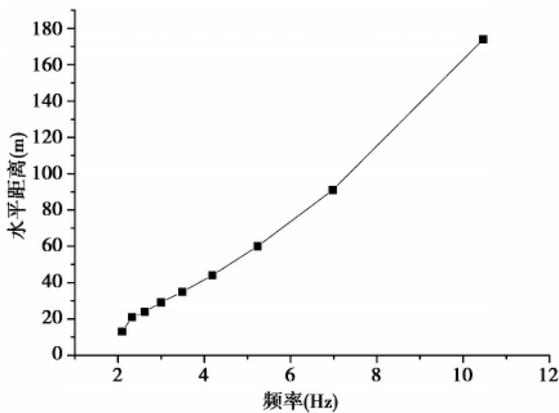


图 5 地震频率对飞出水平距离的影响

Fig. 5 Earthquake frequency versus horizontal flying distance

2.2 只有横波对飞石初速度产生影响

这时的起动速度为:

$$v_2 = \int_{t_2}^t A_2 \sin \omega t dt \quad (26)$$

最大起动速度为:

$$v_{2m} = \frac{2A_2}{\omega} \quad (27)$$

石块与坡体脱离后, 飞石 A 水平向的空气阻力 f 设为:

$$f_2 = -kv_2 \quad (28)$$

由牛顿第二定律得到:

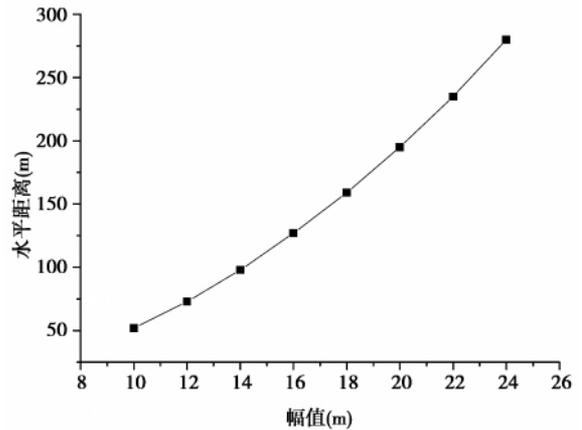


图 6 地震加速度幅值对飞出水平距离的影响

Fig. 6 Effects of the amplitude of earthquake acceleration on the horizontal flying distance

$$\frac{dv_2}{dt} = -\frac{f_2}{m} \quad (29)$$

求得速度为:

$$v_2 = C_1 \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) \quad (30)$$

由 $t = t_3$ 时 $v_2 = \frac{A_2}{\omega}$, 可得:

$$C_1 = \frac{A_2}{\omega} \exp\left(\frac{kt_3}{m}\right) \quad (31)$$

沿水平方向的位移和时间的关系为:

$$\frac{ds_2}{dt} = v_2 \quad (32)$$

于是得到:

$$s_2 = \int v_2 dt = \frac{mC_1}{k} \exp\left(-\frac{kt}{m}\right) + C_3 \quad (33)$$

代入初值 $s_2(t=0) = 0$, 可以求得 $C_3 = -\frac{k}{mC_2}$

3 结 语

针对 2008 年 5.12 汶川特大地震引发的地震飞石问题进行了研究。主要有如下结果:

(1) 基于牛顿第二定律建立了飞石的运动模型, 在模型中考虑了纵横波的作用。

(2) 在上述模型基础上, 根据问题的边界条件和初始条件, 通过分析获得了纵横波同时作用和只有横波作用时的飞石的起动速度、最大运动距离、飞行时间等参数的解析分析方法。结果表明, 地震引起的飞石的最大运动距离主要取决于块体质量、空气阻力、地震加速度和频率等因素。

(下转第 1791 页)

从对实际沉降曲线的分析与拟合曲线和实际沉降曲线的比较情况来看,可以得到以下结论:路基剖面沉降量由路基外坡向路基中央逐渐增加,中部沉降量最大,剖面沉降曲线分为两段:快速增长段和缓慢增长段,从边坡处到进深 10m 的位置,沉降量急速增加,之后沉降量增加速度减缓。这对路基施工具有较大指导意义。由于路基边上一定范围内的沉降速率很快,为了避免由于沉降不均导致的裂缝,因此,该范围为压实重点关注部位。路基中部沉降最大,这要求在施工中考虑中部填土的压实度问题,即在路基中部采用更高的压实标准,避免由于中部沉降过大出现裂缝。

5 结 论

通过对本路基沉降的观测与分析,可以得到以下结论:

(1) 在撇除过程影响因素的基础上,从宏观上研究路基的剖面沉降,得到了该路基剖面沉降的对

数变化规律。当然,其他路基是否也符合本规律,还需要进一步验证。

(2) 路肩的沉降为重点关注部位,为了预防路肩纵向裂缝的开展,应该在施工与设计时对该部位压实度做必要考虑。

(3) 路基中部的沉降量最大,为了避免由于过大的沉降导致的路基路面病害,应提高该部位的压实度。

参考文献(References)

- [1] 谢文红. 路基横向不均匀沉降的原因分析与预防措施[J]. 才智 2008 (14): 57.
- [2] 陈浩. 路基不均匀沉降产生的原因及防治[J]. 硅谷 2008 (5): 39-51.
- [3] 刘忠,潘雪艳. 山区公路填方路基不均匀沉降特征及其表现形式研究[J]. 公路交通技术 2008 (2): 5-8.
- [4] 王胜涛,杨广庆,薛晓辉. 高速公路路基沉降监测技术研究[J]. 铁道建筑 2008 (2): 76-78.

(上接第 1783 页)

(3) 将分析结果与汶川映秀镇飞石的实测数据进行了对比,二者吻合良好。这些研究为今后地震中的飞石危害的预测和防范提供了依据。

参考文献(References)

- [1] 崔鹏,韦方强,何思明,等. 5.12 汶川地震诱发的山地灾害及减灾措施[J]. 山地学报,2008,26(3): 280-282.
- [2] 鲁晓兵,张旭辉,崔鹏. 碎屑流沿坡面运动的数值模拟[J]. 岩土力学 2009,30(增2): 524-527.
- [3] 鲁晓兵,张旭辉,崔鹏. 饱和砂层中水层的演化分析[J]. 工程地质学报 2008,16(增1): 193-196.

- [4] 黄河清,赵其华. 汶川地震诱发文家沟巨型滑坡-碎屑流基本特征及成因机制初步分析[J]. 工程地质学报 2010,18(2): 168-176.
- [5] 田小甫,孙进忠,陈奇,等. 汶川地震后四川省巴州县地质灾害特征研究[J]. 工程地质学报,2009,17(3): 301-307.
- [6] 殷跃平. 汶川八级地震地质灾害研究[J]. 工程地质学报 2008,16(4): 433-444.
- [7] 许强,黄润秋. 5.12 汶川地震诱发大型崩滑动力灾害特征初探[J]. 工程地质学报 2008,16(6): 721-729.
- [8] 熊炎飞,董正才,王辛. 爆破飞石飞散距离计算公式浅析[J]. 工程爆破 2009,15(3): 31-34.