

综合治理 秦岭山地水石流特性及其起动力学分析*

刘 兴 昌

(西北大学城市与资源学系·西安市·710069)

摘 要 水石流是秦岭山地泥石流主要类型之一。分布广泛,发育典型,灾害严重。笔者通过实地考察资料,对秦岭山地水石流的运动特性进行了研究,并对其起动的力学性能作了初步分析。

关键词: 秦岭 水石流 起动力学

Characteristics of Water-rock Debris Flow and Its Movement Starting Mechanics in Qinling Mountain

Liu Xingchang

(Department of Urban and Resource, Northwest University, Xi'an 710069, PRC)

Abstract Water-rock debris flow is a main type of debris flow in Qinling mountain with a wide distribution, typical development and serious disaster. The movement characteristics of water-rock debris flow and its mechanics of movement starting in Qinling mountain have been analyzed through investigations on the spot.

Keywords: Qinling mountain; water-rock debris flow; movement starting mechanics

水石流是陕西秦岭山地泥石流的主要类型,分布面积约占秦岭山地的一半左右。山地主脊以南的中高山区和主脊以北的大部地区基本上皆属水石流分布区,且发育十分典型。因此,水石流就成为秦岭山地泥石流研究的主要内容。本文拟就该区水石流的特性及其起动力学作以初步分析。

1 秦岭山地水石流及其特性

水石流,又称石洪,石流,为典型的水动力类泥石流,主要发生在秦岭山脉的花岗岩、石英岩、变质岩等质地粗糙、岩性坚硬的岩类分布区。由于构造运动和流水作用,该区沟谷深切,沟床比降大,两岸山坡陡峭,风化、断裂发育,重力侵蚀强烈,块体运动活跃。由水石流堆积物结构分析可知,其组分主要以块、漂石为主,颗粒粗大,直径多在0.5m以上,大块石中间夹杂有碎石和砂砾,以及少量的粉砂和粘粒,其中大于2cm的颗粒占固体物质的70%~80%,小于2cm的颗粒仅占20%左右,小于0.5mm的成分不足7%。由其和水体组成的浑水浓度仅0.065左右,不足以形成浆体结构。因此,水石流为一种非宾汉体(浓度大于0.08后才呈现宾汉体),不

存在由屈服应力支撑的悬浮质,而属于牛顿体的范畴。

由于水石流搬运的物质主要为大块石,所以其产生的必要条件是稀遇洪水,以形成猛烈的冲力,且洪水的频率要比泥石流、泥流低得多。根据发生在秦岭山地水石流的洪水频率计算,多属百年一遇或 200 年一遇的洪水。

水石流是一种非饱和的固液两相剪切流。液相为水与细砂、粉粒等组成的浑水。固相则为大小石块,在固体径流中占有很大比例,所以水石流以推移质为主。绝大多数颗粒以滚动、滑动和跳动的形式前进,运动中需要水流提供大量的推动力,以及石块间相互碰撞产生的分散力来支撑,最后通过石块传递直接沿沟(河)床运移。而占总量不足 10% 的悬移质则主要承赖水流的紊动支持,随流体一道前进。

一般说来,堆积物的补充方式和数量是水石流发生的物质基础,而水石流中固体物质的组分同水石流发生源地物质积累区的物质组成是一致的。通常,水石流沟的沟床和岸壁极不平整,大块石突起,多跌水和弯道,运动中又无铺床作用,因而水石流的运动阻力要大于泥石流和泥流。据初步分析,河床糙率多在 0.08~0.14 之间,流体紊动强烈,其阻力主要由糙率、能坡和水深等因素决定,至于流体的粘滞性,可以忽略不计。

水石流沟道经过长时期的暴雨洪水之后,造床质不断粗化,大小石块遍布沟床并形成保护层,保护层的粒径一般较大,形如犬牙状突出河床。有的河段,大小块石聚积,横卧河床,,严重阻塞河道,影响流体通过。在稀遇洪水条件下,沟床中的大块石,是股流首当其冲的对象。当大块石一旦起动,床面铺石层的整体结构遂遭到瓦解,受其保护的下层和周围固相物质便会大规模下移,从而形成水石流。

秦岭为一经过多次构造运动形成的褶皱断块山脉,又处南北暖冷气流交绥地带,为水石流的发育提供了得天独厚的环境背景条件。第一,秦岭山地的岩性主要由花岗岩、变质岩和混合岩所组成,经多次褶皱运动,断裂发育,岩体破碎。又因山体高耸,风化强烈,加之地震的影响,崩塌、滑坡、坠石频繁,块体运动十分活跃,水石流的固体物质补给来源非常丰富。历史上形成的石头河、石砭峪、石堤河以及石海就是明证。因其岩性坚硬,崩落的块体体形颇为粗大。据发育在秦岭南坡略阳县石灰岩和混合岩区的焦岩子沟水石流实地调查,形成区地形陡峻,岩体断层(裂)相当发育,块体运动活跃,崩落块体直径为 5m,6m,7m,8m 或 10m 的巨大漂石比比皆是。发育在秦岭北坡东段花岗岩区的黄甫峪中的水石流堆积物,6m 左右的大漂石极为平常。华山峪(水石流沟)中的漂石块体更大,最大者直径竟达 22m 之巨。这些大小块石一般横置于河床或堆积于河道两侧,造成河流严重阻塞。这种态势亦常成为水石流沟的判别标志之一。第二,秦岭南坡沟(峪)道的中上游,一般位于高中山区,沟形狭窄,岸壁陡峭,沟床比降大,一般在 30% 以上;秦岭北坡的沟道,沟短坡陡比降大,为水石流的发育、形成提供了优越的地形基础条件。第三,秦岭山地是我国横贯东西的巨型纬向山系,平均海拔 2 000m 以上,成为北亚热带和暖温带地理自然景观的界山。由东南季风送来的暖湿海洋气流与西北季风吹来的干冷气流在此因山体阻隔抬升而相互交绥、切变,形成了暴雨、连阴雨的频发区,且多暴雨中心。暴雨是水石流重要的水源动力基础和激发因素,每年 7~9 月,高强度的暴雨常导致水石流发生。因此,发生在秦岭山地的水石流基本上都属于暴雨型。

和其它泥石流一样,水石流也是一种具有毁灭性的灾异现象,是水土流失达到极强度和区域自然生态环境遭到严重破坏的标志。它爆发突然,历时短暂,侵蚀、搬运、冲刷和堆积过程均十分迅速,搬运能力极强,往往很短时间内就可把数万吨、数十万吨,甚至数百万吨的固体物质

推出山外,能推动数百吨至上千吨的巨石。因水石流爆发的频率一般较低,设防措施往往不力,因而常造成的损失更大、更惨重。

水石流的形成亦然需要物质,地形和水源条件的最佳匹配。流域内储量丰富且疏松的固体物质与水流(源)相互作用是形成水石流的物质基础,陡峻的山坡和沟床比降是水石流发育的必备的地形条件,暴雨洪水,冰雪融水或库、湖、塘溃决等是水石流得以发生的动力基础。因此,水石流的形成与发育是区域地质、地貌、气候、水文等因素综合作用的产物,人类不合理的开发活动常是加剧水石流发生的重要因素。水石流的区域分布和发育程度常受控于地质地貌的组合特征,爆发的频率和活动强度,受控于水源动力激发因素的性质和特点。水石流的性质和规模受控于固体物质的数量、种类的多寡和补给方式。这就决定了水石流特定的地域分布特点与分布规律。在空间上,水石流主要发生在断裂,褶皱发育,新构造运动活跃,地震频繁而强烈,岩层破碎,风化严重,水土流失剧烈的石质(或土石)山区的地带。在时间上,水石流与降雨集中期,尤其是暴雨发生季节相关,其中7~9月份常为水石流的活动频发期。

应该指出,并不是所有的山区和山区中所有的沟道每年都会发生水石流,其发生的可能程度主要取决于水石流形成的三个基本条件同时满足的程度及其组合关系。水石流的固体物质积累往往有一个过程,于是就形成了水石流平时平静(间歇期),爆发突然(爆发期)的特点。

由于水石流流体所含的固体物质主要是大小不同的石块砂砾,不能形成均质流体,其运移的能量来源主要为重力和股流冲力的联合效应。在运动中,常表现为以重力作用为主和以集中股流冲力为主的不同阶段。在流路狭窄、平直、比降较大的河(沟)段,当固体物质丰富时,其块体运动以重力作用为主,体积较大的石块滚动在最前面。若遇到障碍时,则依惯性直线前进,表现出一定的爬坡能力,爬坡高度5 m~10 m不等。在流路弯曲、比降较平缓的河(沟)段,运动在最前边的巨大块石,因重力沿沟床的分力减小首先停积下来,流体下部携流推移的大小石块也随之停积于其后而形成地垒,实际上相当于一个壅水坝。径流中后继而来的小颗粒将大块石之间的通道充斥,当水体的压能、位能和动能大于地垒抵抗力时,地垒会突然溃垮,水石流便继续前进。这样,在重力和股流冲力相互交替和联合作用下,就形成了水石流的脉动性或地垒式运动的特点。秦岭北坡东段的石堤河、方山峪、仙峪、华山峪、皇甫峪等均十分典型。其结果,沟道不断受到剧烈冲蚀,沟床中又堆积大量石块,形成石洪沟道。当水石流进入平坦开阔地段,流体中大量的滚动、滑动和跃动的石块便发生沉积,于是形成最后一个地垒,即山麓混合堆积锥,大小石块混杂。堆积形态多为岗状、岛状(舌状)或片状,属山前洪积扇或冲积扇。秦岭北坡东段各峪道口处,大都形成了规模不等的山前洪积扇,呈现出洪积扇裙的态势。

2 水石流的起动力学性能分析

实质上,水石流是地表组成物质在内外营力作用下发生时空关系转换的自然地理过程,是搬运力与抵抗力这一对矛盾相互斗争的结果,是一种能量的积累与释放过程的体现。

由前文可知,水石流的爆发,首先必须起动沟床中的块体物质,因此,水流对块体的起动,应为水石流机理研究的重要内容。本文主要讨论单块体的起动力学性能。

2.1 干燥状态下下滑

如图1。设石质河床AB上有一块体K,在重力的作用下产生下滑力 T 。在K与AB之间,摩擦角为 φ ,摩擦阻力为 τ 。K能否下滑,主要取决于下滑力与抗滑力的对比关系。设K重为 G ,河床倾角为 θ ,根据图示,得

$$T = G \sin \theta \quad (1)$$

$$N = G \cos \theta \quad (2)$$

$$\tau = N \cdot \operatorname{tg} \varphi = G \cos \theta \operatorname{tg} \varphi \quad (3)$$

当河床倾角 θ 不断增大,直至与 φ 相等时, K 则处于极限平衡状态,即

$$T = \tau \quad (4)$$

若使 K 下滑,必须满足 $T > \tau$,即

$$G \cdot \sin \theta > G \cdot \cos \theta \cdot \operatorname{tg} \varphi \quad (5)$$

$$\operatorname{tg} \theta > \operatorname{tg} \varphi$$

$$\theta > \varphi \quad (6)$$

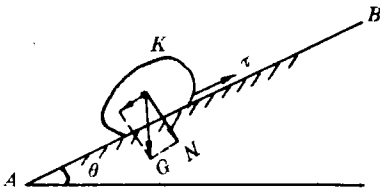


图 1 干燥状态下下滑

2.2 在静水作用下下滑

假定块体与河床均不透水,且上游水位与块体上顶齐平,如图 2 所示。于是有

$$\text{水压力 } P = \frac{1}{2} r h^2 \quad (7)$$

$$\text{下滑力 } T_1 = G \cdot \sin \theta + \frac{1}{2} r h^2 \quad (8)$$

设浮托力为 u ,则抗滑力 τ_1 ,为

$$\tau_1 = (G - u) \cos \theta \operatorname{tg} \varphi_1 \quad (9)$$

式中: φ_1 ——湿润时块体与河床摩擦角。

若要使 K 下滑,必须有

$$T_1 > \tau_1$$

$$\text{即 } G \sin \theta + \frac{1}{2} r h^2 > (G - u) \cos \theta \operatorname{tg} \varphi_1 \quad (10)$$

比较(10)式与(5)式,就可发现,(10)式中的滑动力增加了 $\frac{1}{2} r h^2$,而抗滑力却减少了 $u \cdot \cos \theta \operatorname{tg} \varphi_1$,且 $\varphi_1 > \varphi$ 。表明图 2 状态下 K 下滑可能性比图 1 状态要大得多,分析中还应考虑侧向绕流对块体运动的影响(此处从略)。自然界中,干燥时稳定的斜坡,遇水浸润后突然下滑,道理就在于此。

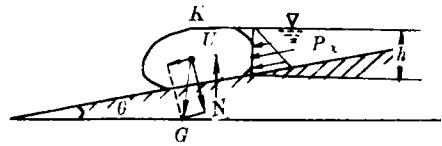


图 2 在静水作用下下滑

2.3 水流漫过块体,并以流速 V 下泄时 K 的下滑

此时,块体 K 上的力能情况较为复杂(图 3)。当水流在行进中遇到河床中的石块,其水流状态就要发生改变,并产生绕流运动。流线间距渐增,流速渐次降低。当水流质点沿中间的流线的流至 A 点时,流速减小为零,此时全部动能转化为压能,压能达到最大, A 称为驻点。后续而来的质点就须进行调整,将部分压能转化为动能,改变原来的水流方向,沿块体两侧继续前进。

实际上,流到 A 点的水流质点并非停滞不前,它将沿块体面两侧向 C 点移动,使液流挤压,流速沿程增加,压强沿程降低。 A 到 C 为增速降压区。由于沿程能量损失, C 点上的质点不可能恢复全部压能,仅能达到 D 点,动能就全部转为压能,压能达到最大。后续流来的质点就要改变流向,减缓液流扩散程度,使部分压能转化为动能,沿另一条流线方向流走。这样主流就脱离块体,块体后侧就形成空缺区。块体侧旁的液流将立即增补空缺,形成旋涡区。在旋涡区中,水流质点翻转分裂,调整流速,相对运动加强,能量消耗增大,常造成块体后部沟床的严重

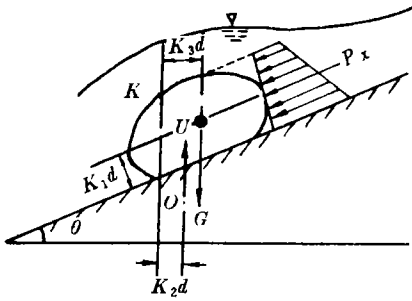


图3 水流漫过块体,并以流速 V 下泄时 K 的下滑

当 $K_1d \cdot P_x + K_2d \cdot P_x > K_3d \cdot G$ 时,块体必然滚动或滑动。 P_x, P_x 的计算可参考有关水力学书籍。

如果把作用于块体上推力综合效应用 F 表示,则

$$F = \lambda\gamma\left(\frac{\pi d^2}{4}\right) \frac{v^2}{2g} \quad (12)$$

式中: λ —— 块体粗糙度及形状系数,砾石: $\lambda = 1.0$;

棱形: $\lambda = 1.46$; 球形: $\lambda = 0.79$;

γ —— 水比重; d —— 块体平均直径。

块体对水流抵抗力为 R , 则

$$R = \frac{\pi d^2}{6} (\gamma' - \gamma) \mu \quad (13)$$

式中: γ' —— 块体比重; μ —— 摩擦系数。

若 $R < F$, 则块体就会起动离开原地滚动或滑动。开始起动时的动力平衡条件为

$$F = R \quad (14)$$

$$\text{即 } \lambda r \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) \frac{V^2}{2g} = \frac{\pi d^3}{6} (\gamma' - \gamma) \mu \quad (15)$$

简化得:

$$V = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3\mu}{\lambda} \left(\frac{\gamma'}{\gamma} - 1\right) gd} \quad (16)$$

(16)式即为直径为 d 的块体的起动流速,或始动流速。

至于块石群的起动,力学关系更为复杂,其原因在于沟床中块石群大小混杂,其缝隙中常留积有细小砂粒及粘土等物质,往往形成一个相对稳定的整体,整体运动的力学特征以及单块体与整体运动的力学关系均不易用简单的公式推导来解决,必须通过模型试验确定。

参 考 文 献

- 1 康志成. 泥石流产生的力学分析. 山地研究, 1987, 5(5)
- 2 张宝信, 何淑芬. 浑水沟泥石流组成的初步研究, 泥石流论文集(1), 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1980
- 3 刘兴昌, 张友顺. 水土保持原理与规划. 西安: 西北大学出版社, 1989

掏刷,致块体悬空而失去支撑下滑或滚动(图4)。

作用在块体 K 的作用力,可分为推力 P_x (沿河床方向)和上举力 P_z , 二者均有助于块体的起动。

当块体滚动时, P_x 和 P_z 就构成块体的起动力矩,而重力 G 则构成抵抗起动力矩,设 O 为转动中心,则块体起动的临界条件的动力平衡式为

$$K_1d \cdot P_x + K_2d \cdot P_z = K_3d \cdot G \quad (11)$$

式中: K_1d, K_2d, K_3d —— 分别为 P_x, P_z, G 到 O 点的力臂

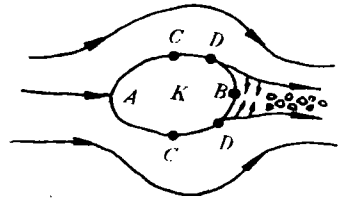


图4 块体悬空失去支撑 下滑或滚动