

文章编号 0559-9350(2017)07-0757-08

非均质泥石流起动判别关系式

舒安平¹, 张欣^{1,2}, 段国胜¹, 王澍¹, 师哲³

(1. 北京师范大学 环境学院 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 水利部国际经济技术合作交流中心, 北京 100053; 3. 长江科学院 水土保持研究所, 湖北 武汉 430000)

摘要: 在我国西部山区每年汛期发生不同程度的泥石流灾害, 认识非均质泥石流(又称黏性泥石流)的形成机理, 判别泥石流的发生条件是准确预测预报泥石流的基础。本文通过48组正交的水槽实验, 模拟非均质泥石流形成的动力过程, 分析相关起动因子的量化关系。基于泥沙运动力学理论, 将Shields数(又称希尔兹数)列为判别泥石流固体颗粒起动的重要参数, 分析非均质系数(颗粒铺设方式)、水流量等水沙因子对泥石流起动的响应关系。进一步从泥沙颗粒的受力角度, 以水流剪切力与颗粒起动临界剪切力的比值(即起动判别式)作为表征泥石流颗粒起动的参数(其值大于1时表示泥石流颗粒处于起动状态), 分别应用Shields起动拖曳力曲线的整体拟合公式和分段拟合公式两种形式, 初步建立了非均质泥石流颗粒起动判别式。通过应用蒋家沟实测资料进行验证, 表明以Shields起动拖曳力曲线的整体拟合公式得出的起动判别式误差较小, 可以应用于泥石流起动条件与致灾临界条件的判别, 对我国泥石流防灾减灾具有重要参考价值。

关键词: 非均质泥石流; 起动过程; Shields数; 起动判别关系式

中图分类号: TV144

文献标识码: A

doi: 10.13243/j.cnki.slxb.20170109

1 研究背景

泥石流是广泛发生在世界各地的一种常见的自然灾害。一般来说, 陡峻山坡、大量松散固体物质和强降雨构成了泥石流形成的三要素。暴雨泥石流以其突发性强、毁灭性大、致灾范围广、影响深远而给当地人民的生命和财产安全构成严重的威胁, 也成为制约山区经济发展的重要因素。我国泥石流大多具有颗粒级配宽、容重大、流速分布不均匀等特征, 表现出明显的非均质性。短历时、局部集中的强降雨所致的泥石流灾害占据了相当的比例, 因此系统研究这种非均质泥石流形成过程及灾变机制, 建立泥石流起动的指标判别式, 为我国泥石流灾害防治提供一定的参考。

我们曾对非均质泥石流形成过程的动力学特征进行分析^[1], 表明非均质泥石流可按起动方式将泥石流起动类型划分为常遇型、溃坝型及滑坡型三种, 并进一步认为泥石流形成过程的固体颗粒起动、固体颗粒加速混掺及固液两相流形成的三个阶段均与水流强度密切相关, 以此揭示泥石流形成三阶段的水动力学特征。

对于泥石流固体颗粒起动标准, 可以借鉴泥沙运动力学中泥沙起动标准方法。在水流的作用下, 如何判断泥沙起动状态, 这是一个非常重要的临界条件。泥沙的起动是泥沙研究中最基本的问题, 它是指泥沙由静止状态转化为运动临界状态条件。泥沙的起动具有随机性, 而对于非均匀沙, 由于组分泥沙特性的不同, 其起动过程更为复杂。由于对起动临界条件的判定标准不唯一, 各式各样的标准之间存在较大差别。大致可分为定性和定量两种方法。在定性标准中, 尤以Kramer在1935

收稿日期: 2017-02-11; 网络出版日期: 2017-07-13

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20170713.0910.001.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372048); 长江科学院开放研究基金项目(CKWV2015225/KY)

作者简介: 舒安平(1965-), 男, 湖北鄂州人, 博士、教授, 主要从事河流动力学、泥石流及水土保持研究等研究。

E-mail: shuap@bnu.edu.cn

年提出的标准最为经典。他针对非均匀沙,把推移质运动分为4个阶段,即无泥沙运动阶段、弱动阶段、中动阶段及普动阶段。但定性标准的主观性强,可操作性弱,因此实用性受到了限制。而定量方法包括概率标准、颗粒数标准及输沙率标准可动层标准,判断启动的方式包括了启动拖曳力、启动流速及启动功率等三种。相比于定性标准,其适用性更强,以往学者对其的研究成果较多。

还有学者以启动流量作为标准,对于天然泥沙进行了研究,Schoklitsch(1934)曾根据水槽试验资料得出泥沙的启动条件^[2],得出下式:

$$q_c = K \frac{d^{3/2}}{J} \quad (1)$$

式中: q_c 为泥沙启动时的单宽流量; K 为阻力校正系数。

窦国仁^[3]在原Kramer提出的启动四阶段基础上考虑了水流的脉动,提出了与之相应的泥沙启动概率:即个别启动、少量启动及大量启动,其相应的启动概率分别为0.00135、0.0227和0.159。故可以取某一定常的启动概率作为判断泥沙启动的标准。但此标准未考虑泥沙颗粒在床面的不同位置对启动标准的影响。何文社等^[4]采用力学原理与概率论相结合的方法,推导了泥沙颗粒滚动启动模式的临界条件,得到了相应启动状态下的临界切应力系数取值,即对个别启动状态为0.021~0.042,少量启动状态为0.041~0.062。

本文以我国普遍存在的非均质泥石流(固体颗粒粒径 $d > 0.005$ mm)为研究对象,通过实施非均质泥石流形成过程模拟实验,分析非均质泥石流形成水沙因子变化阶段特征及其对泥石流启动的影响机制。进而建立非均质泥石流形成启动判别式,并结合野外观测实验的数据加以验证和应用,从而为解决实际泥石流灾害预测问题提供参考,对丰富泥石流学科内容及提高泥石流防灾减灾水平具有一定的实际指导意义。

2 泥石流模拟实验概况

云南省北部的东川蒋家沟素有“泥石流博物馆”之称,本次泥石流实验是在此处的中国科学院东川泥石流观测研究站分段变坡水槽中进行的(如图1)。实验中以水管冲水作为水源条件,改变土体特性、沟道坡度以及水流量,来现场模拟不同固体物质组成、不同水源条件、不同地形条件下泥石流形成的动力过程,运用美国产的PSI Pressure System系统孔隙水压计和730-13E-00005型传感器探头辅助观测。

2.1 实验参数 实验参数的选取以泥石流形成的水源、物源和地形三大条件为依据,同时反映非均质的泥石流特点,综合确定本次实验研究的影响因素即实验参数选定为粗细颗粒的铺设方式(非均质系数)、形成区水槽坡度、土体初始含水量和放水流量四种。

实验参数如下:

(1)粗细颗粒的铺设方式3种:按图2所示的颗粒级配曲线分别铺设为上粗下细(非均质系数 $\phi =$



图1 蒋家沟及泥石流模拟实验水槽设备

2.33)、均匀混合型($\phi=1.0$)、上细下粗($\phi=0.43$)3种方式;

(2)形成区水槽坡度3种: 25°, 30°, 35°;

(3)实验用沙初始含水量3种: 4%、10%、20%;

(4)冲水流量4个等级: 0.83L/s(1 m³/h)、1.39 L/s(5 m³/h)、2.78 L/s(10 m³/h)。

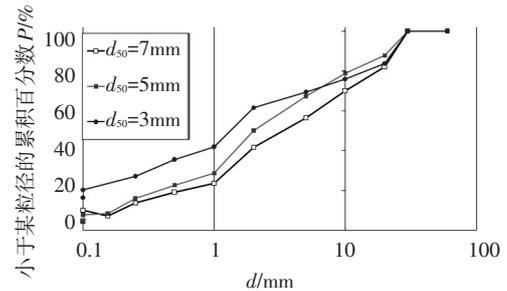


图2 3种实验用沙的颗粒累积曲线

实验材料以蒋家沟天然泥石流沟道的土体为实

验用沙,并取自东川泥石流站附近的蒋家沟沟道的同一位置,以此为原料配制而成的中值粒径分别为 $d_{50}=7\text{mm}$, $d_{50}=5\text{mm}$, $d_{50}=3\text{mm}$ 的3种不同级配颗粒组成的实验用料级配曲线如图2所示。

2.2 实验方法与数据采集 通过冲水,使玻璃水槽内的土体发生起动,进而产生剧烈的冲刷侵蚀过程而形成泥石流。通过变化沟道中形成区部分固体物质中细颗粒含量以及粗细颗粒的分布位置来改变其土力学特性,通过人工调整水量改变泥石流水源条件,通过调节水槽设备的各部分坡度来改变沟道的地形,现场模拟不同固体物质组成、不同水源条件、不同地形条件下泥石流形成的动力过程。每次实验中尽量保持其他变量不变,冲水贯穿整个形成过程。形成区固体物质会从个别起动到半数起动一直到正式大规模形成,需界定泥石流正式起动的变量因子临界值,记录水管出流时长,从而记录整个水量;记录此时在形成区自行装配的孔隙水压计的读数即土体孔隙水压力;用照相机记录此时形成区形态及颗粒分布情况,用高速数码相机实时记录泥石流全过程,并建立相应的泥石流模拟实验的数据资料库。

2.3 实验组别和数据 根据4类实验参数,若进行全部条件的组合实验,需要108组实验,实验工作量太大。为了保证实验数据的完整性及提起关键因子,本研究采用正交分析方法对实验条件进行优化成48组实验,但这48组实验中有36组为常遇型泥石流,有8组为溃坝型泥石流,4组为滑坡型泥石流^[1],表1给出了36组常遇型泥石流实验所依据实验条件和数据。

3 非均质泥石流起动对水沙因子的响应关系

3.1 泥石流颗粒起动的受力分析 目前有学者根据泥石流形成的动力条件将其划分为土力类泥石流和水力类泥石流,水力类泥石流的起动是受到越来越大的水流强度作用,而土力类泥石流的起动是由于高位坡体上的泥沙含水率逐渐增大而滑落,并液流化,带动沿途更多松散土体而形成的。归纳起来,泥石流要想起动,必须有力的作用。泥石流形成的过程中,泥沙土体依次受到的力的作用可以分别概括为:渗流作用、地表径流作用、堆积体几何形态改变作用、土体间相互作用等,最后土体像滚雪球一样,浓度越来越大,形成高浓度黏性泥石流^[5-6]。

鉴于土体的滑动是在沿切面方向进行的,绘制如图3所示的土体受力分析图,图中 H_c 为水深,假设深色方块为水下坡体上的一块土体,当没有水流时,土体在坡面上受到重力沿坡面的分力和坡面对其的摩擦阻力而保持静止状态,而当降雨或者地表径流经过此处,土体同时受到水流的剪切力 τ_0 与坡体的反向阻力 τ_c 。这时土体能否运动,就取决于两力的关系。其中对 τ_c 的计算则需要引入Shields数(希尔兹数)这一重要参数。

3.2 Shields数与相对水流剪切力 泥沙起动的概念虽然非常明确的,但由于水流和泥沙颗粒的位置都具有随机性,所以分析起来困难仍然很大,特别是非均匀沙。对泥沙起动问题的研究一直是泥沙理论研究领域的一项难点和前沿课题,而对这一问题的最具代表性研究成果的是Shields(希尔兹,1936)把当时流行的量纲分析方法应用到研究中,提出了希尔兹曲线^[7]。

本次完成的48级泥石流实验并非严格定义下的非均质泥石流,只有36组常遇型泥石流(表1)才如此。据此我们基于实验结果分析,Shields数是河流动力学中常用的一个无量纲数,它是根据水流

表1 泥石流实验所依据实验条件和数据

No.	流量/(L/s)	非均质系数 φ	初始含水量/%	水槽坡度/ $^\circ$	流速/(m/s)	No.	流量/(L/s)	非均质系数 φ	初始含水量/%	水槽坡度/ $^\circ$	流速/(m/s)
1	1.39	1.00	0.10	25	2.77	19	0.83	0.43	0.20	30	2.75
2	0.83	1.00	0.04	25	2.82	20	1.39	0.43	0.20	35	2.87
3	1.39	0.43	0.10	25	4.38	21	1.39	2.33	0.20	35	2.53
4	2.78	1.00	0.20	25	2.33	22	1.39	1.00	0.20	35	2.66
5	2.78	2.33	0.20	25	2.93	23	1.39	0.43	0.04	35	2.88
6	0.28	1.00	0.20	25	3.10	24	0.83	1.00	0.10	35	2.83
7	0.83	0.43	0.04	25	2.05	25	0.83	0.43	0.10	35	3.17
8	2.78	0.43	0.20	25	3.09	26	0.83	2.33	0.10	35	2.73
9	0.28	1.00	0.20	30	2.92	27	0.83	2.33	0.20	35	3.30
10	2.78	2.33	0.04	30	3.17	28	0.83	0.43	0.20	35	2.80
11	0.83	0.43	0.20	30	2.32	29	0.83	1.00	0.20	35	2.41
12	0.83	2.33	0.20	30	3.43	30	2.78	0.43	0.20	35	3.96
13	1.39	0.43	0.10	30	2.90	31	2.78	2.33	0.10	35	3.53
14	1.39	0.43	0.10	30	3.08	32	2.78	0.43	0.10	35	3.58
15	0.83	0.43	0.20	30	2.50	33	2.78	1.00	0.10	35	3.67
16	0.83	2.33	0.20	30	2.73	34	1.39	2.33	0.04	35	3.47
17	0.83	1.00	0.20	30	2.42	35	1.39	1.00	0.04	35	2.94
18	2.78	2.33	0.04	30	3.18	36	2.78	1.00	0.20	35	2.85

作用在床面上的剪切应力与床沙水下重力的比值推导而得的，Shields数的大小决定了泥沙起动的状态，是推移质运动的强度，适用于粗细颗粒($d > 0.005 \text{ mm}$)兼具的泥石流，因此又被称为水流强度、剪切强度等，其起动时水流强度参数为：

$$\Theta = \frac{\tau_0}{(\gamma_s - \gamma)d} = f\left(\frac{u_* d}{v}\right) \quad (2)$$

将该式表达成图，即著名的Shields关系曲线(图4)， Θ 即为Shields数。其中等号最右侧的括号内物理量为沙粒雷诺数，即 $Re_* = \frac{u_* d}{v}$ ，其中 $u_* = \sqrt{gRJ}$ ，为摩阻流速， R 为水力半径， J 为水力坡降， g 为重力加速度。

从受力角度分析，泥沙受到的拖曳力来自水流运动，水流作用在床面的拖曳力为 $\tau = \gamma h J$ 。当 $\tau \geq \tau_c$ 这一起动拖曳力临界值时，泥沙颗粒才会起动，反之不会起动。因此泥沙起动的判别可以以 τ/τ_c 与1的差值关系来判定。 $\tau/\tau_c \geq 1$ ，则颗粒起动； $\tau/\tau_c < 1$ ，则颗粒不起动。

3.3 泥石流起动对水沙因子的响应关系 本文选取了泥石流起动的中间阶段进行颗粒起动的分析，因此 Re_* 均在10以上，起动拖曳力随粒径 d 的增大而增大。以此标准来计算No.21组次的实验情况，可以得出图5的结果。图中显示的每个点代表了对应的泥石流实验的某个时刻，从前面实验步骤可知，泥石流实验以开闸门放水作为起点，水流不断浸润土体，浸润曲线上升，水位增高，因此图中的这些时刻可以以水深来表示。可以看出，在水深达到 H_c 之前， τ/τ_c 始终小于1，颗粒不起动，而水深超过 H_c 之后，颗粒起动。

泥沙的起动与泥石流颗粒的粒径分布和水流强度密切相关，通过建立非均质系数 ψ (即土体铺设方式)和水流量 Q 与泥石流起动因子 τ/τ_c 之间关系(图6)，可见，随着水流量 Q 的增大，呈增大趋势，而 ψ 与 τ/τ_c 呈负相关性，这种关系在下一节中建立起动判别式得到了应用。根据希尔兹数的计算

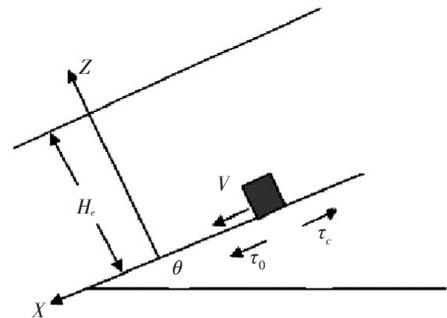


图3 土体受力分析(切面方向)

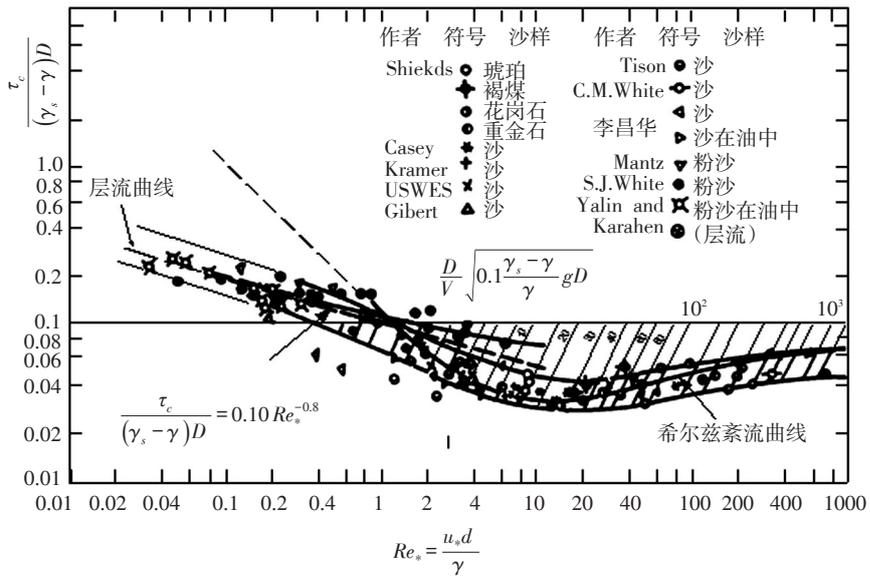


图4 Shields启动拖曳力曲线

公式可以验证这一实验结果分析，即随着 d_{50} 的增大，希尔兹数增大，临界切应力增大，启动难度加大；而颗粒铺设方式反映了土体的非均匀性以及启动颗粒的先后顺序，当铺设方式为上粗下细时，希尔兹数最大，表明启动所需要的剪切力最大。流量 Q 对泥石流启动提供动力，流量越大，越容易启动。

4 非均质泥石流启动的判别关系式

如前所述，从受力分析的角度研究泥石流启动因子 τ/τ_c 变化特点，可以全面考虑各因子对泥石流启动的综合影响和合理评估泥石流的形成条件，因此可将水流剪切力与颗粒启动临界剪切力的比值 τ/τ_c 作为表征泥石流颗粒启动的定量参数。

4.1 基于Shields启动曲线整体拟合方法的泥石流启动判别式

在根据实验数据计算了 τ/τ_c 的数值之后，为了更为准确地用物理量表述泥石流启动的条件，以利于推广应用。为此，我们首先分析 τ/τ_c 的影响因子及其量化关系，水流剪切力及启动时剪切力可分别表示为^[8]：

$$\tau = \gamma h J \quad (3)$$

$$\tau_c = (\gamma_s - \gamma) d_* f(Re_*) = (\gamma_s - \gamma) d_* f\left(\frac{u_* d}{\nu}\right) \quad (4)$$

其中， h 为平均水深，与流量 Q 直接相关，可以结合公式计算得出，

$$h = \frac{Q}{V_* b} \quad (5)$$

式中： b 为水槽宽度，本实验的水槽宽度为 30cm； J 为水力坡降； γ 为清水容重，认为是一常数； γ_s 为泥沙颗粒的固体容重，也是常数；而在 $f(Re_*)$ 曲线中，本实验数据得到的 Re_* 均在右侧上升区段，因此函数值与摩阻流速 u_* 以及粒径 d 的乘积的关系是正相关的。

由此得出 τ/τ_c 的表达式

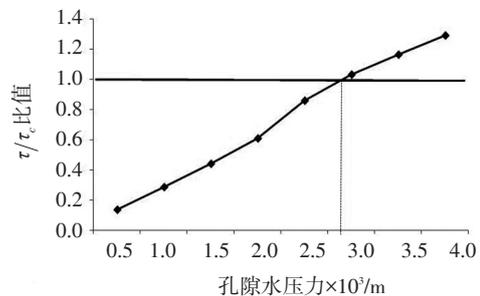


图5 泥石流实验颗粒启动随水深变化(以 No.21 实验为例)

水流剪切力及启动时剪切力可分别表示为^[8]：

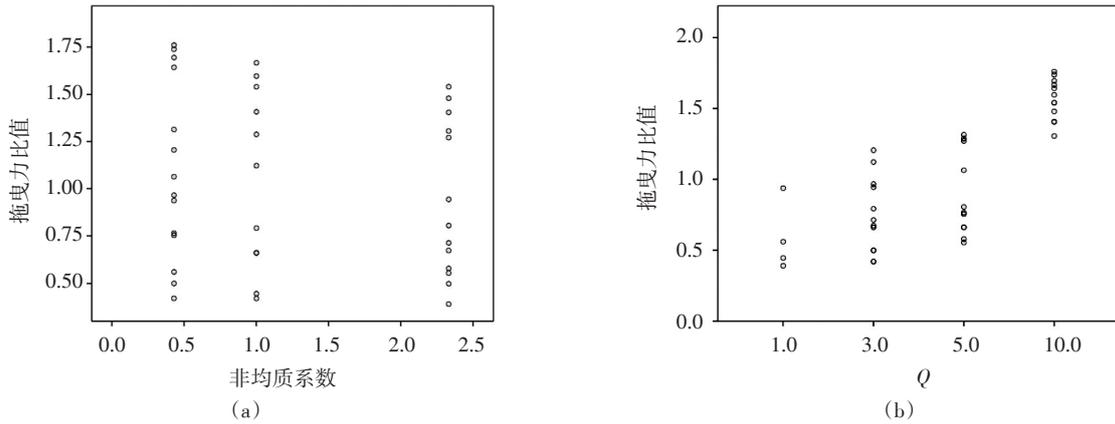


图6 判别因子与单因素和之间关系图

$$\frac{\tau}{\tau_c} = \frac{\gamma h J}{(\gamma_s - \gamma) d f(Re_*)} \quad (6)$$

式中 u_{*c} 可根据实验条件计算得到, 结合粒径可计算出 Re_* , 对 $f\left(\frac{u_{*c} d}{v}\right)$ 进行分析便可得出两力比值。

τ/τ_c 与1的差值关系决定了泥石流颗粒是否起动。

由于希尔兹曲线是研究泥沙起动的重要途径, 而在本次泥石流实验中, 其雷诺数的数值均在10以上, 因此在希尔兹曲线的上升区段。经过对相关文献资料的查阅和分析, 目前拟合程度最高的以沙粒雷诺数为自变量的曲线拟合式如下式(7)所示^[9]

$$\Theta = f(Re_*) = \frac{0.054}{Re_*} \left(\frac{8.8 + Re_*^{1.6}}{3.6 + Re_*^{0.6}} \right) \quad (7)$$

如已知雷诺数, 即可求出希尔兹数, 从而得到剪切力比值。

$$\frac{\tau}{\tau_c} = 18.52 \frac{\gamma h J}{(\gamma_s - \gamma) d} = \frac{Re_* (Re_*^{0.6} + 3.6)}{Re_*^{1.6} + 8.8} \quad (8)$$

该式即为基于Shields起动曲线整体拟合方法得出的泥石流颗粒起动判别式。但是这是一个隐式形式的拟合曲线, 因为要计算雷诺数必须先计算摩阻流速。

4.2 基于Shields起动曲线分段拟合方法的泥石流起动判别式 有学者进行了进一步的研究, 引入了中间参数, 直接探究其与希尔兹数的关系, 避开摩阻流速, 提出无量纲粒径 d_* , 其计算公式为

$$d_* = d \sqrt[3]{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \frac{g}{v^2}} = Re_*^{2/3}, \text{ 进而得到 } \Theta \sim d_* \text{ 的关系, 并分段拟合, 得出在水温 } 25^\circ\text{C} \text{ 下的分段拟合}$$

公式^[10-11], 其中 $\Theta = f(Re_*)$ 。

$$\Theta = 0.120 d_*^{-\frac{1}{2}}, d_* \leq 10; \Theta = 0.026 d_*^{-\frac{1}{6}}, 10 < d_* < 150; \Theta = 0.060, d_* \geq 150 \quad (9)$$

将式(9)代入式(6), 即得:

$$\begin{aligned} \frac{\tau}{\tau_c} &= 8.33 \frac{\gamma h J Re_*^{1/3}}{(\gamma_s - \gamma) d} d_*^{-\frac{1}{2}}, Re_* < 10; \frac{\tau}{\tau_c} = 38.462 \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} \frac{h J}{d Re_*^{1/9}}, 10 < Re_* < 1000; \\ \frac{\tau}{\tau_c} &= 16.67 \frac{\gamma h J}{(\gamma_s - \gamma) d}, Re_* \geq 1000 \end{aligned} \quad (10)$$

其中 $Re_* = d \sqrt[3]{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right) \frac{g}{v^2}}$ 。

式(10)是基于Shields起动曲线分段拟合方法而得到的泥石流起动判别式, 该式中的自变量不仅包括需要计算得出的沙粒雷诺数, 还包括了直接的实验条件, 即水力坡降、水流平均深度以及颗粒

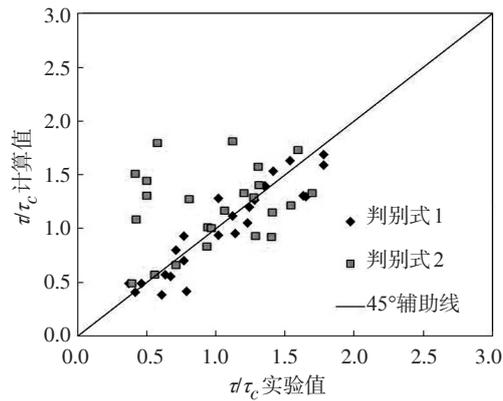


图7 计算值与实测值的对比

粒径等。其中沙粒雷诺数还可以进一步被替换成与粒径有关的计算式。因此本式为显性表达式。

4.3 泥石流起动判别式的验证分析 通过应用云南省蒋家沟23组实测资料对以上两个泥石流起动判别式进行验证和对比分析(图7), 结果表明整体拟合的泥石流判别式1(式(8))计算值与分段拟合的泥石流判别式2(式(10))计算值相比更加接近45°直线, 前者相关性系数为0.908, 后者为相关性系数为0.489, 充分说明判别式1比判别式2具有更高的计算精度。

综上分析, 泥石流起动判别式1可以较为准确计算得出Shields数, 从而合理地计算出 τ/τ_c 的值, 再根据 τ/τ_c 是否大于1来判断泥石流是否处在起动状态, 具有较高的实用价值。

5 结论与讨论

(1)根据泥沙运动力学理论, 将Shields数列为判断泥石流固体颗粒起动的重要参数, 根据实验结果建立Shields数与以水流量、颗粒中值粒径 d_{50} 和非均质系数(颗粒铺设方式)之间关系。结果表明: 随着 d_{50} 的增大, 希尔兹数增大, 临界切应力增大, 起动难度加大; 而颗粒铺设方式反映了土体的非均匀性以及起动颗粒的先后顺序, 当铺设方式为上粗下细时, 希尔兹数最大, 表明起动所需要的剪切力最大。水流量 Q 对泥石流起动提供动力, 流量越大, 越容易起动。

(2)基于泥沙颗粒的受力分析, 以水流剪切力与颗粒起动临界剪切力的比值(即起动判别关系式)作为表征泥石流颗粒起动的参数, 分别利用Shields起动拖曳力曲线的整体拟合公式以及分段拟合公式初步建立了泥石流颗粒起动判别式, 通过应用实验数据对两种判别式进行校验, 表明以Shields起动拖曳力曲线的整体拟合公式得出的起动判别式误差较小, 适用性更强。当起动判别式的值大于1, 泥石流固体颗粒处于起动状态。

(3)基于受力分析及对希尔兹曲线的拟合方程提出的泥石流起动判别式, 与泥石流颗粒的粒径组成、水流量、深度和水力坡降等水流泥沙因子关系密切, 是一个反映泥石流起动的综合判别式, 实测资料验证结果表明, 该判别式具有较强的实用价值。

鉴于实验条件和测量手段的局限性以及问题本身的复杂性, 研究中难免存在不足。此外, 本文只是对非均质泥石流的形成过程第一阶段的颗粒起动进行分析, 对泥石流形成过程的颗粒加速混掺和固液两相流形成的二个阶段尚有待于以后深入研究。

参 考 文 献:

- [1] 舒安平, 孙江涛, 张欣, 等. 非均质泥石流形成过程的动力学特征[J]. 水利学报, 2016, 47(7): 850-857.
- [2] SCHOKLITSCH R A. Der Geschiebetrieb und die Geschie befracht [J]. Wasserkraft und Wasserwirtschaft. 1934, 29(4): 37-43.

- [3] 窦国仁.再论泥沙起动流速[J].泥沙研究,1999(6):1-9.
- [4] 何文社,方铎,等.泥沙起动判别标准探讨[J].水科学进展,2003(2):143-146.
- [5] 陈晓清,崔鹏,冯自立,等.滑坡转化泥石流起动的人工降雨试验研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(1):106-116.
- [6] 魏厚振.蒋家沟泥石流砾石土力学性状与起动过程分析研究[D].武汉:中国科学院武汉岩土力学研究所,2008.
- [7] SHIELDS A. Anwendung der Aechlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung[M]. Mitt. Preussische Versuchsanstalt fur Wasserbau und Schiffbau. Berlin. 1936.
- [8] 王兴奎,邵学军,李丹勋.河流动力学基础[M].北京:中国水利水电出版社,2002.
- [9] MICHEL C. The legend of A. F. Shields, discussion[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 126(9): 721.
- [10] HAGER W H, OLIVETO G. Simplified Shields condition for sediment transport inception[C]//Proc. 29th IAHR Congress, Theme D, Beijing, Tsinghua University Press, 2001, 2: 265-269.
- [11] 戴清,刘春晶,胡健,等.希尔兹曲线的拟合及不确定性研究[J].泥沙研究,2014(6):19-24.

Distinguish relations for the critical intitation of non-homogeneous debris flow

SHU Anping¹, ZHANG Xin^{1, 2}, DUAN Guosheng¹, WANG Shu¹, SHI Zhe³

(1. Key Lab. of Water and Sediment Sciences of MOE, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. Centre of International economics and Cooperation-Exchange of Ministry of water Resources, Beijing 100053, China;

3. Institute of Water and Soil Conservation, Changjiang Academy, Wuhan 430000, China)

Abstract : As one of natural disasters, non-homogeneous debris flow is common in nature, occurring widely throughout the world in flood seasons especially in the southwest China. The formation mechanism of debris flow is highly concerned by scholars around the world. Studying the formation mechanism of debris flow and occurrence conditions is the basis for debris flow forecast and prevention. With 48 flume simulation experiments, the mechanism of debris flow and the quantitative relations of factors related to debris flow formation are revealed. According to sediment movement mechanics, Shields number is important to determine solid particle starting of debris flow. With the Shields number results classified by water quantity, vertical distribution of solid particle (non-homogeneous coefficient Ψ) and d_{50} , the Shields number shows positive relations with particle median diameter d_{50} and water discharge Q with analysis. The vertical distribution of solid particle reflects the non-homogeneous properties and the starting order of particles. When particles at the upper layer are much coarser than those at the lower layer, the Shields number is the largest. In the aspect of the particle shear stress, the critical expression of particle starting (the ratio of water shear stress to critical particle starting stress, if the calculation value of the discriminant is larger than 1.0, then particles start.) are preliminarily established separately based on the overall fitting formula and break fitting formula of Shields starting drag curve. Through verification with the field data from Jiangjia Gully, the critical expression of the particle initiation based on the overall fitting formula has a smaller deviation, having the better applicability. These results above is very significant for both preventing and reducing debris flow disasters.

Keywords : non-homogeneous debris flow; initiation processes; Shields number; critical expression of initiation

(责任编辑:李福田)