

稀性泥石流冲刷规律的试验研究

朱兴华^{1,2}, 崔鹏¹, 周公旦¹, 陈华勇¹

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所/中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘要:稀性泥石流具有很强的输沙能力,可在运动过程中强烈刷深泥石流沟道。以理论分析和野外水槽试验相结合,对稀性泥石流的冲刷规律进行了初步的探讨研究。沟床物质的初次冲刷应该考虑非均匀床沙是否会发生粗化,因此根据沟床物质在稀性泥石流的冲刷作用下形成粗化层的临界判别条件,将稀性泥石流的冲刷归纳成3种不同的模式,并分别推导了这3种不同冲刷条件下,床面冲刷深度的计算方法。然后进一步通过野外水槽试验探讨了床沙全沙输移情况下,沟床冲刷系数的取值。稀性泥石流累次冲刷问题的关键是前一次冲刷形成的床面结构是否会破坏或再生,本文最后结合野外水槽试验中累次冲刷的试验结果,分析了沟床累次冲刷深度的计算方法。

关键词:稀性泥石流;冲刷;野外水槽试验;冲刷深度

中图分类号:P642.23

文献标识码:A

1 研究背景

根据泥石流物质结构和流态特点,可将泥石流分为黏性泥石流和稀性泥石流。稀性泥石流中水及固体物质不稠结成一体,而是两相分离的,固-液两相流体有垂直交换现象,其与含沙量大的洪流在动力学特点上差别不大^[1]。由于稀性泥石流具有很强的输沙能力,在运动过程中向下游输移大量的固体物质,刷深泥石流沟道,从而严重威胁穿越沟道的油气管道、通讯线路、公路等基础设施以及沟道两岸居民的生命财产安全。因此研究稀性泥石流的冲刷规律,对泥石流的防灾减灾具有重要意义。

目前,国内外学者对稀性泥石流冲刷的规律鲜有研究,但稀性泥石流与含沙量大的洪流的动力特征差别不大,对稀性泥石流输沙及冲刷规律的研究可以借鉴挟沙水流的相关研究成果。有关冲刷规律的研究成果,可归纳为3种类型:经验模型、概念模型与理论模型。经验模型通过分析冲刷深度与若干重要的相关因子之间的关系(如流量,床沙中值粒径等),然后提出经验性的算法,如《堤岸工程设计规范》中推荐公式^[2]、Lacey公式和谢鉴衡公式等^[3];概念模型是在经验模型的基础上,罗列出较为全面的相关影响因素,然后通过量纲分析,提出若干具有明确意义的无量纲参数,并分析冲刷深度与这些无量纲参数之间的关系^[4-6],与经验模型相比,概念模型有了更为明晰的物理解释;理论模型则是在准确计算床沙冲刷率的基础上,通过单位时间内的输沙量来计算冲刷深度^[7-8]或者通过分析非均匀沙输移过程中的床沙粗化程度计算冲刷深度^[9-11],理论模型物理推导严谨,计算结果可靠,是这方面研究的未来发展方向。

稀性泥石流对沟床物质的冲刷率取决于稀性泥石流的挟沙量以及稀性泥石流自身的输沙能力。沟床物质的初次冲刷应该考虑非均匀床沙是否会发生粗化;而稀性泥石流累次冲刷问题的实质则是前一次冲刷形成的沟床粗化层是否会破坏或再生。本文首先以沟床物质是否会发生粗化为标准,将稀性泥石流的冲刷区分成了3种模式;然后提出了各种模式下的泥石流冲刷深度计算方法,并以能量

收稿日期:2012-11-27

基金项目:国家973计划资助项目(2011CB409902);国家科技支撑计划项目(2012BAC06B02)

作者简介:朱兴华(1984-),男,博士生,主要从事泥石流输沙及山区河流演化研究。E-mail:zhuxinghua09@163.com

方程为基础，推导了在沟床物质全沙输移模式下的冲刷深度表达式；然后通过野外模型试验相关数据，对冲刷系数的取值进行了分析和率定；最后在上述研究的基础上，分析了沟床累次冲刷深度的确定方法。

2 稀性泥石流冲刷规律分析

2.1 泥石流沟床粗化对输沙的影响 稀性泥石流对沟道的初次冲刷是指泥石流对还未粗化的沟床堆积物质的输移搬运过程。当上游来沙量小于水流挟沙能力而水流强度不足以使床沙所有粒径启动时，床面泥沙将发生分选输移。分选的结果是细颗粒被冲刷输移，而粗颗粒则基本不动；致使床面在总体下切的同时，其物质组成不断变粗，最终形成以粗颗粒为主体的稳定粗化结构，即所谓的粗化层^[9]。粗化层形成后将保护下层床沙不被冲刷输移，从而使泥石流的输沙率大大的降低。

由此可见，稀性泥石流的初次冲刷过程中，能否形成稳定的粗化层对稀性泥石流输沙率影响深远。在此，需要明确两个重要的水动力条件，即粗化层形成及破坏的临界水动力条件。国内外专家学者们^[9,12-13]通过分析大量的水槽试验及野外观测资料发现，粗化层形成的临界水力条件大致相当于 D_{35} 的启动条件，也即当床面泥沙大约有65%为不动颗粒时，粗化层便告形成，此时的水动力条件记为 U_{*d35} 。粗化层完全破坏则是在粗化层级配条件下，水动力条件恰好能使床沙全动输移；因此，粗化层破坏的临界水力条件应相当于粗化级配条件下最大颗粒的启动条件，此时的水动力条件记为 U_{*dmax} 。孙志林等^[9]通过整理水槽试验资料，提出了粗化层形成及破坏的临界水力条件，具体如式(1)和式(2)所示：

$$U_{*d35} = \sqrt{0.032 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) g D_{35} \left(\frac{D_m}{D_{35}} \right)^{0.25}} \sigma^{-0.125} \quad (1)$$

$$U_{*dmax} = \sqrt{0.032 \left(\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} \right) g D_{max} \left(\frac{D_m}{D_{35}} \right)^{0.25}} \sigma^{-0.125} \quad (2)$$

式中： D_m 为平均粒径(m)； σ 为泥沙级配的标准差； U_{*d35} 为启动摩阻流速(m/s)； γ_s 为泥沙容重(N/m^3)； γ 为水流容重(N/m^3)； g 为重力加速度(m/s^2)； D_{max} 为最大粒径(m)； U_{*dmax} 为最大粒径启动时的摩阻流速。

上述两个临界水动力条件将稀性泥石流对沟床固体物质的输移划分成了3种模式：当 $U_* > U_{*dmax}$ 时，沟床物质全动输移；当 $U_{*d35} < U_* < U_{*dmax}$ ，将形成稳固的粗化层，床面活动层内 d_{35} 以下的颗粒被输移； $U_* < U_{*d35}$ ，非均匀床沙被分选输移。下面将分别分析上述3种模式下的泥石流冲刷规律。

2.2 泥石流冲刷深度计算方法 泥石流对沟床的冲刷取决于上游泥石流的挟沙量，泥石流本身的挟沙能力以及沟床物质的供给。根据床面是否会被粗化，已将泥石流对沟床固体物质的冲刷划分成3种模式：

(1)当 $U_* < U_{*d35}$ 时，非均匀床沙分选输移。在此引入张瑞瑾提出的黏性非均匀颗粒的临界启动流速公式：

$$U_c = 1.34 \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma} g D} \left(\frac{h}{D} \right)^{0.14} \quad (3)$$

式中： D 为颗粒粒径(m)； h 为断面平均水深(m)； γ_s 为泥沙容重(N/m^3)； γ 为水流容重(N/m^3)； g 为重力加速度(m/s^2)。

由泥石流流速反算可以起动的颗粒最大粒径，然后根据床沙的颗分曲线，确定能够被输移走的床沙物质所占的比例。

假定床面活动层的厚度为 E (m)，在实际计算中，其取值一般为床沙最大粒径的1.5倍，冲刷面积为 S (m^2)，被输移走的床沙占床面活动层泥沙总量的比例为 χ ，床面活动层的孔隙率为 η_1 ，床沙的密度 ρ_s 为泥沙容重(kg/m^3)，细颗粒被充分输移后床沙孔隙率为 η_2 ，则床面活动层泥沙总量为：

$$W = \rho_s \cdot (1 - \eta_1) \cdot E \cdot S \quad (4)$$

床面被充分冲刷之后，床面的极限冲刷深度为：

$$h_{\max} = E - \frac{(1 - \chi) \cdot W}{\rho_s \cdot (1 - \eta_2) \cdot S} \quad (5)$$

联立式(4)和式(5)即可求解出稀性泥石流在 $U_* < U_{*d35}$ 条件下的最大冲刷深度。

(2) 当 $U_{*d35} \leq U_* \leq U_{*dmax}$ 时，若沟床固体物质被充分冲刷，粗化层便可逐渐形成但不被破坏， d_{35} 以下的颗粒被输移。当床面被充分粗化后，泥石流对床面的冲刷率将急剧下降，此时冲刷率与时间无关。因此，该动力条件下，床面冲刷率随时间的变化规律较复杂，但若从床面结构出发，计算泥石流的极限冲刷深度将使问题大大的简化。这种情况实质是条件(1)的一种特例，在式(5)的基础上取 $\chi=0.35$ 即可。

(3) 当 $U_* > U_{*dmax}$ 时，此时泥石流的动力条件足以输移所有的床沙颗粒，这也是自然界较为普遍的冲刷模式(少数巨石无法输移除外)。此时，泥石流对沟床的冲刷率与冲刷时间密切相关。而有关冲刷率的确定方法，部分学者认为与相对剩余切应力^[14-15]或者剩余水流功^[7]有关，并提出了若干计算方法。梁志勇等^[16]则以动量定理为基础，推导了冲刷率的计算表达式。笔者认为泥沙颗粒的连续运动必然将克服运动过程中的阻力而消耗能量，而这部分能量由水流功来提供；一场泥石流爆发过程中的流量变化将使其在前一个冲淤状态下或冲刷加剧，或冲刷减少甚至发生淤积；而泥石流流量的变化势必会影响其在运动过程中，对床面耗能的变化，最终使输沙率发生变化。流量变化过程如图1所示，图中的②表示在流量①的基础上有所变化(流量增加或者减小)，而变化前后的能量方程如式(6)和式(7)所示。

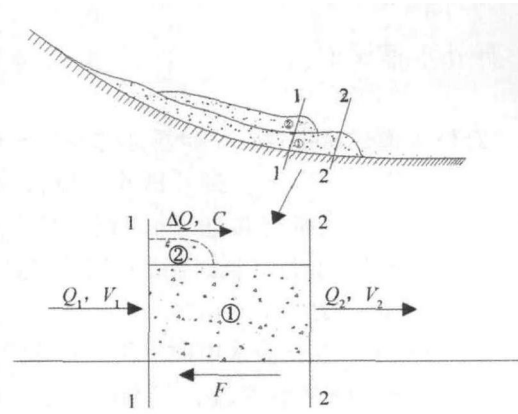


图1 泥石流冲刷示意

流量变化前，1和2两断面间的能量方程如式(6)所示：

$$\frac{1}{2} \rho_s' (Q_2 V_2^2 - Q_1 V_1^2) \Delta t = \left[\gamma_s' \frac{Q_1 + Q_2}{2} J \Delta t - F_1 \right] \frac{V_1 + V_2}{2} \Delta t \quad (6)$$

流量变化后的能量方程如式(7)所示：

$$\frac{1}{2} \rho_s' (Q_2 V_2^2 - Q_1 V_1^2 - \Delta Q C^2) \Delta t = \left[\gamma_s' \frac{Q_1 + Q_2 + \Delta Q}{2} J \Delta t - F_2 \right] \frac{V_1 + V_2}{2} \Delta t \quad (7)$$

式中： Q_1 、 V_1 和 Q_2 、 V_2 分别是1和2两断面的流量(m^3/s)和流速(m/s)； ΔQ 为流量变化量(m^3/s)，当流量减小时，取负值； C 为泥石流流量变化部分的流速(m/s)； J 为沟床比降； F_1 和 F_2 为流量变化前后，底床对泥石流等值反向的运动阻力(N)； β_s 和 γ_s 分别为泥石流密度(kg/m^3)和容重(N/m^3)。

将上述两式做差可得：

$$\frac{1}{2} \rho_s' \Delta Q C^2 = \frac{1}{2} (F_1 - F_2) \cdot (V_1 + V_2) - \frac{1}{4} \gamma_s' \Delta Q \cdot J \cdot \Delta t \cdot (V_1 + V_2) \quad (8)$$

等式(8)的左边项为泥石流自身动能的变化，右边项为泥石流的耗能变化。右边的重力沿流向的作用与第一项相比，可以忽略。引入 $V_1 + V_2 = k_1 C$ ，将式(8)可以进一步简化：

$$\Delta F = \frac{1}{k_1} \rho_s' \cdot \Delta Q \cdot C \quad (9)$$

这样，泥石流对沟床的冲刷必然与泥石流对沟床作用力的变化值 $\Delta F / \Delta t$ 呈正比。若进一步假定沟道的宽度 B 近似不变，则泥石流对沟床的冲刷深度如下所示：

$$\frac{dh}{dt} = k \frac{\rho_s' \cdot C}{B} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (10)$$

式中： k 为冲刷系数($m \cdot s/kg$)。

对式(10)进行积分，则一场泥石流的累积冲刷深度如式(11)所示：

$$h_{\max} = k \frac{\rho_s \cdot C}{B} \cdot \int_0^{t_0} Q(t) dt \quad (11)$$

因此，泥石流的冲刷过程与泥石流自身的容重、流速以及流量相关，而等式右边的积分项即为一场泥石流过程中通过某冲刷断面的总方量。对于某具体流域内的泥石流累计冲刷深度，泥石流的流量过程可以通过雨洪法进行确定，如式(12)所示^[17]：

$$Q(t) = (1 + \phi) Q_f(t) \times D_c \quad (12)$$

式中： $Q(t)$ 为频率为 P 的泥石流流量时变函数(m^3/t)； $Q_f(t)$ 为频率为 P 的暴雨洪水流量的时变函数(m^3/t)； ϕ 为泥石流的泥沙修正系数， $\phi = (\gamma_c - \gamma_w) / (\gamma_H - \gamma_c)$ ；其中 γ_c 为泥石流的重度(kN/m^3)； γ_w 为清水的重度(kN/m^3)； γ_H 为泥石流中固体物质的比重(kN/m^3)； D_c 为泥石流的堵塞系数。

本文进一步通过野外水槽试验对稀性泥石流的冲刷系数进行了率定。

3 野外水槽试验

3.1 野外水槽试验搭建 试验场地选在中科院东川泥石流观测站的查菁沟泥石流堆积扇上。野外试验水槽长70m，宽0.5m，深0.7m，比降为98‰。本次研究共进行了4组试验，每组试验均累次冲刷3次。以第一组试验为例，通过图2对试验布置以及试验过程中的测试系统进行详细的介绍：

如图2所示，在试验水槽的上段，布置两道全堵型的堵塞体；紧接着是一段长19m的顺直段；下游铺设了一段总长13m，厚度0.3m的松散土体，将13m长的松散土体段划分成了6个观测断面，断面之间的间距如图2所示，试验用土样的颗粒曲线如图3所示，土体的含水量为6.2%。试验过程中，上游清水首先经过两道全堵型堵塞体及下游19m长的顺直加速段，从而形成具有一定流速和挟沙量的稀性泥石流(或高含沙水流)，然后冲刷下游总长13m的沟床物质；试验过程中在各断面取样标定泥石流容重，并通过浮标法测定泥石流的横断面平均流速，冲刷一定时间之后停止冲刷并通过全转仪记录断面的冲淤情况。

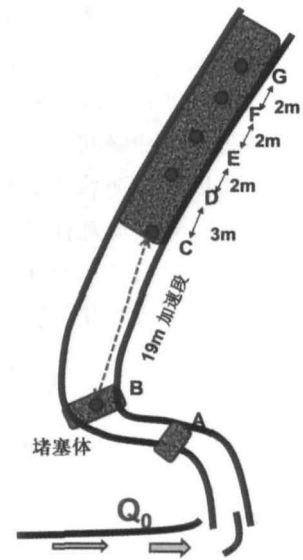


图2 野外试验布置

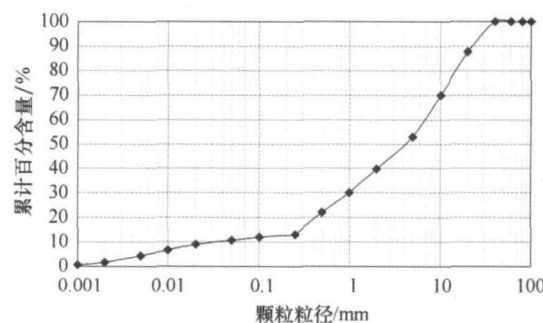


图3 试验土样颗粒曲线

3.2 稀性泥石流初次冲刷深度 本文共进行了4组试验，每组试验在初次充分冲刷之后，再继续冲刷两次。通过4组试验发现：稀性泥石流初次冲刷沟床固体物质，床面总体呈冲刷；经过初次冲刷以后，床面经过第2次或第3次冲刷时，床面下切幅度很小甚至发生淤积。本次试验之目的是通过稀性泥石流在一定水动力条件下对沟床冲刷数据，率定出式(11)的冲刷系数，同时分析稀性泥石流的累

表1 野外水槽实验水力条件及冲刷深度

实验场次	断面	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C/(\text{m}/\text{s})$	h/m	$Q/(\text{m}^3/\text{s})$	t/s	h_{max}/m	k
1-1	C	1 160.8	0.893	0.08	0.042 864	235	0.04	0.000 002 3
	D	1 204.3	0.852	0.08	0.040 896	235	0.05	0.000 003 0
	E	1 247.8	0.875	0.08	0.042	235	0.052	0.000 002 9
	F	1 241.9	1.136	0.08	0.054 528	235	0.094	0.000 003 1
	G	1 236	1.098	0.08	0.052 704	235	0.082	0.000 002 9
	H	1 473.6	1.093	0.08	0.052 464	235	0.064	0.000 001 9
2-1	C	1 207.7	1.053	0.1	0.063 18	116	0.055	0.000 003 5
	D	1 237.2	1.051	0.1	0.063 06	116	0.065	0.000 004 1
	E	1 266.7	0.928	0.1	0.055 68	116	0.093	0.000 007 3
	F	1 296.2	0.983	0.09	0.053 082	116	0.038	0.000 002 9
	G	1 325.7	0.94	0.07	0.039 48	116	0.015	0.000 001 6
	H	1 355.2	0.986	0.07	0.041 412	116	0.03	0.000 002 8
3-1	C	1 158.4	0.983	0.07	0.041 286	300	0.049	0.000 002 1
	D	1 238.4	0.914	0.07	0.038 388	300	0.042	0.000 001 9
	E	1 278.4	0.967	0.07	0.040 614	300	0.097	0.000 003 9
	F	1 318.4	0.946	0.06	0.034 056	300	0.068	0.000 003 2
	G	1 358.4	0.953	0.06	0.034 308	300	0.068	0.000 003 1
	H	1 438.6	0.843	0.06	0.030 348	300	0.083	0.000 004 5
4-1	C	1 017.2	0.913	0.06	0.032 868	194	0.061	0.000 006 2
	D	1 097.8	0.903	0.06	0.032 508	194	0.039	0.000 003 7
	E	1 138.1	0.864	0.06	0.031 104	194	0.062	0.000 006 3
	F	1 178.3	0.858	0.05	0.025 74	194	0.051	0.000 006 1
	G	1 218.6	0.929	0.07	0.039 018	194	0.101	0.000 007 1
	H	1 299.2	0.816	0.05	0.024 48	194	0.03	0.000 003 6

次冲刷问题。表1列出了4组试验中初次冲刷的测量数据。

本次野外水槽试验过程中，上游来流几乎恒定。因此，可以假定式(11)中的上游来流不变。通过上述24组冲刷数据反算稀性泥石流的冲刷系数 k ，计算结果如表1所示：冲刷系数的取值范围在 $1.6 \times 10^{-6} \sim 7.3 \times 10^{-6}$ 之间，本次24组试验所得冲刷系数均值为 3.7×10^{-6} 。

3.3 稀性泥石流累次冲刷分析 由图3所示本次试验所用土体的颗分曲线可以看出，沟床固体物质的最大粒径为4cm；对照式(3)计算最大颗粒的临界起动流速，并与表1所列的试验过程中的稀性泥石流断面平均流速相比较可以发现两者大致相等。图4所示为第二组试验过程中，泥石流初次冲刷前后的床面结构变化，由图4(b)可以明显的看出，随着初次冲刷结束，泥石流沟床物质结构发生了明显的变化，床面上局部发生了粗化。因此，在初次冲刷之后，沟床固体物质可能在局部床面形成粗化层，从而使得沟床堆积物质在经过初次冲刷之后，冲刷率大大降低。

关于稀性泥石流累次冲刷的计算方法应该注意两个问题：(1)床面是否会发生粗化。计算稀性泥石流的动力条件，并与式(1)和式(2)的计算结果进行比较，若 $U_{*d35} \leq U_* \leq U_{*dmax}$ 或者 $U_* < U_{*d35}$ 时，则泥石流冲刷是床面固体物质的分选输移过程，后一次冲刷过程中均受到前一次冲刷的影响；若 $U_{*dmax} \leq U_*$ ，则泥石流冲刷过程为床面物质全沙输移，后一次冲刷不受前一次冲刷结果的影响。(2)稀性泥石流的冲刷历时的影响。若 $U_{*d35} \leq U_* \leq U_{*dmax}$ 或者 $U_* < U_{*d35}$ 时，则当冲刷进行到一定的阶段，床面形成了稳固的保护层之后，沟床固体物质的冲刷率将与时间无关，沟床将发生的极限冲刷深度即为式(5)所计算的极限冲刷深度与沟床已经下切的深度做差；若 $U_{*dmax} \leq U_*$ ，累次冲刷过程中，泥石流对沟床物质的冲刷深度与时间成正比，可根据式(11)进行进一步的计算。



(a) 初次冲刷前的泥石流床面 (b) 初次冲刷后的泥石流床面

图4 稀性泥石流初次冲刷前后的床面结构变化

4 结论及讨论

4.1 结论 以理论分析和野外水槽模型试验相结合,对稀性泥石流的冲刷规律进行了初步的试验探讨,并取得了以下初步结论:(1)以沟床物质在稀性泥石流的冲刷作用下是否会形成稳固的粗化层,将稀性泥石流对沟床的冲刷划分成3个区间: $U_* < U_{*d35}$, $U_{*d35} \leq U_* \leq U_{*dmax}$ 以及 $U_* > U_{*dmax}$ 。并进一步指出,当 $U_* < U_{*d35}$ 以及 $U_{*d35} \leq U_* \leq U_{*dmax}$ 时,床面会形成粗化层且粗化层形成之后,冲刷率将与时间无关;而当 $U_* > U_{*dmax}$,床面全沙起动,冲刷率与时间关系密切。(2)理论推导了3种不同冲刷条件下,床面冲刷深度的计算方法,并进一步通过野外水槽试验探讨了当床沙全沙可被输移的情况下,床面冲刷系数的取值。本次24组试验所得冲刷系数的取值范围在 $1.6 \times 10^{-6} \sim 7.3 \times 10^{-6}$ 之间,均值为 3.7×10^{-6} 。(3)结合野外水槽试验现象,与稀性泥石流初次冲刷相比较,分析了沟床累次冲刷深度的计算方法。

4.2 讨论 目前有关稀性泥石流的冲刷规律研究较少。本文提出了冲刷系数的概念并对其取值范围进行了率定。分析冲刷系数发现其量纲为 $m \cdot s/kg$,刚好是泥石流动力黏滞系数的倒数,由此可见冲刷系数受泥石流自身的动力条件影响较大;另一方面,松散土体的冲刷系数取值较宽,说明冲刷系数受沟床土体的松散程度影响,也即受到土体自身的抗冲刷能力的影响。因此,冲刷系数是一个能够反映床面土体抗冲能力及泥石流动力条件的综合参数。

本文研究的试验土体均为松散土体,仅能代表地震灾区震后若干年内的稀性泥石流的冲刷能力。今后将进一步通过模型试验,率定出松散程度不同的土体冲刷系数,从而完善稀性泥石流的冲刷规律。

参 考 文 献:

- [1] 周富春,黄本生,杨钢,等.稀性泥石流对排导槽的冲磨破坏机理[J].山地学报,2001,19(5):470-473.
- [2] 李晓庆,唐新军.对《堤防工程设计规范》推荐冲刷深度公式的探析[J].水资源与水工程学报,2006,17(2):50-52
- [3] 常怀民,詹胜文.经验公式计算某管道长江穿越冲刷深度的分析[J].石油工程建设,2007,33(5):16-18.
- [4] Faraci C, Foti E, Baglio S. Measurements of sandy bed scour processes in an oscillating flow by using structured

- light[J]. Measurement, 2000, 28: 159-174.
- [5] Wang C Y, Cheng J H, Shin H P, Chang J W. Ring columns as pier scour countermeasures[J]. International Journal of Sediment Research, 2011, 26: 353-363.
- [6] Bruce W M, Chiew Y M. Time scale for local scour at bridge piers[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(1): 59-65.
- [7] 王兆印, 黄金池, 苏德惠. 河道冲刷和清水水流河床冲刷率[J]. 泥沙研究, 1998(1): 1-11.
- [8] 王兆印, 徐永年, 苏晓波. 挟沙水流的冲刷率及河床惯性的研究[J]. 泥沙研究, 1998(2): 1-9.
- [9] 孙志林, 孙志锋. 粗化层试验与预报[J]. 水力发电学报, 2000, 71: 40-48.
- [10] 许全喜, 张小峰, 谈广鸣. 河床冲刷粗化多步预报模式研究[J]. 水科学进展, 1999, 10(1): 42-47.
- [11] 胡海明, 李义天. 河床冲刷粗化计算[J]. 泥沙研究, 1996(4): 69-76.
- [12] Shen H W, Lu J Y. Development and prediction of bed armoring[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1983, 109(4): 611-629.
- [13] Sutherland A J. Static armor layers by selective erosion[M]//In: Sediment transport in gravel-bed rivers, edited by C. R. Thorne, John Wiley & Sons, 1987: 243-267.
- [14] 王军, 谈广鸣, 舒彩文. 淤积固结条件下粘性细沙起动冲刷研究综述[J]. 泥沙研究, 2008(3): 75-80.
- [15] 孙志林, 张翀超, 黄赛花, 等. 黏性非均匀沙的冲刷[J]. 泥沙研究, 2011(6): 44-48.
- [16] 梁志勇, 匡尚富, 王兆印, 等. 高含沙洪水冲刷规律的探索[J]. 泥沙研究, 1999(12): 68-73.
- [17] 游勇, 陈兴长, 柳金峰. 汶川地震后四川安县甘沟堵溃泥石流及其对策[J]. 山地学报, 2011, 29(3): 320-327.

Experimental study on the erosion law of diluted debris flow

ZHU Xing-hua^{1,2}, CUI Peng¹, ZHOU Gong-dan¹, CHEN Hua-yong¹

(1. Chinese Academy of Sciences (CAS) Key Laboratory for Mountain Hazards and Earth Surface Process, Institute for Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. Graduate School, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Diluted debris flow has a strong capacity of sediment delivery, which may erode debris flow channel significantly during the movement from upstream to downstream. In this paper, the theoretical analysis combined with field flume experiments, a preliminary study on the erosion law of diluted debris flow has been conducted. The process of armoring should be considered in the initial erosion of non-uniform channel bed material. Therefore, the erosion process of non-uniform channel bed material scoured by diluted debris flow can be classified as three modes according to critical criterion of armoring layer. In addition, the calculation methods of bed scour depth of three erosion modes mentioned above were presented. The value of erosion coefficient was also explored according to field flume experiments. The key issue of repeated erosion of diluted debris flow is whether the bed surface structure formed during the last process of scouring can be damaged or regenerated. At last, the calculation method of scour depth after repeated erosion was analyzed according to the experimental results from the field flume experiments.

Key words: diluted debris flows; erosion; field flume experiments; scour depth

(责任编辑: 王成丽)