水　利　学　报
2019年6月　SHUILI　XUEBAO　第50卷　第6期

文章编号:0559-9350(2019)06-0661-09

溃坝泥石流起动过程及其动力学特征

舒安平[1]，朱福杨[1]，王　澍[1]，沈真全[2]
（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. 北京大学 工学院，北京　100871）

摘要：溃坝泥石流是由于滑坡、地震等自然灾害或不当的人为堆土弃渣产生大量固体物质淤堵沟道或河流后，在遭遇暴雨或汇流冲刷作用下致使淤堵体突然溃决而形成的一种特殊固液两相流。本文采用自制泥石流模拟变坡水槽，实施了24组溃坝泥石流模拟实验，按照溃决方式和相对剪切力将溃坝泥石流划分为局部型和整体型两类，并分析了这两类溃坝型泥石流的成因，揭示其在起动过程中孔隙水压和水沙因子动力学特征。结果表明，小流量、小坡度下更容易形成局部溃坝型泥石流，否则更容易形成整体溃坝型泥石流，而且后者相对剪切驱动力大于前者，研究成果对于溃坝泥石流防治工程的规划设计以及提高泥石流防灾减灾水平具有重要意义。

关键词：溃坝泥石流；起动过程；剪切力；动力学特征
中图分类号：P642.23；TV144　　**文献标示码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20190139

1　研究背景

中国是世界上泥石流分布最广、致灾影响最为严重的国家之一。据不完全统计，仅在2005—2015年间，全国有23个省市共发生泥石流灾害10 927起，直接经济损失142亿元[1-3]。泥石流作为我国一种常见的山地灾害，按照形成条件以及起动方式可分为常遇型、溃坝型和滑坡型三种[4]，溃坝泥石流是由于滑坡、地震或者火山熔岩等因素产生大量固体物质淤堵沟道形成堵塞体，或淤堵河道后形成堰塞湖，在降雨或汇流冲刷下溃决形成[5-6]。然而，堰塞湖的形成会对上游造成淹没灾害，天然形成的巨大水库还将对下游河道的水利设施以及沿岸的人民生命财产安全构成巨大威胁，一旦坝体发生溃决，形成溃坝泥石流或洪水，将对下游造成不可估量的巨大损失[7]。因此，对溃坝泥石流起动过程的动力学特征进行研究，从而为我国溃坝泥石流灾害的防治提供技术支持，具有重要理论价值和现实意义。

前人对溃坝问题的研究主要集中在溃坝后洪峰流量、水位过程线和下游演进过程的预测[8]。从1871年圣维南方程组的提出，到1892年Ritter首次得到矩形断面溃坝流量计算公式，之后Stoker在前人研究的基础上，将Ritter公式扩展到下游有水的情况，随后很多外国学者继续深入研究，考虑非矩形断面和摩阻作用获得了丰硕成果[9-12]。在理论研究的基础上，外国学者也进行了大量的溃坝冲刷室内模拟实验，来模拟土石坝体溃口冲刷和洪水的演变过程[13-15]，有的研究者甚至进行了野外溃口冲刷实验[16]，美国也曾在现场做过1∶2的大型模拟实验[12]。1950年代后，随着我国水利事业的兴起，我国研究者也逐渐开始关注溃坝及其所产生的洪水泥石流灾害问题，并针对长江和黄河流域进行了大量溃坝模型实验，从而得到溃坝流量过程线经验公式、下游淹没范围、灾害损失以及防护措施等宝贵成果[1,17-18]。然而，溃坝泥石流相比于溃坝洪水，具有更加复杂的形成机制和流动特性，它由固、液两相物质在流动过程中相互作用形成，并受地形地质条件的影响，具有颗粒级配广、流速分布不

收稿日期：2019-03-06；网络首发时间：2019-06-20
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20190619.1555.005.html
项目资助：国家重点研发计划(2018YFC1406400)；国家自然科学基金项目(11372048)
作者简介：舒安平(1965-)，博士，教授，主要从事河流动力学、泥石流及水土保持等研究。E-mail：shuap@bnu.edu.cn

均和容重大等特点，因此它的冲击力更强，成灾毁灭性更大，值得深入研究。

目前，专门针对溃坝泥石流的研究相对较少，很多学者在研究泥石流形成过程中会发现和注意到溃坝泥石流的现象，并取得了一些初步成果，如庄建琦等[19]在实验中发现的堵溃式泥石流，容重达到1.7～1.9 g/cm^3；舒安平等[4]在实验中发现，溃坝型泥石流在相同条件下的水流强度最大；还有学者曾对尾矿库溃坝泥石流的淹没范围、冲击力、速度、堆积深度以及防护措施等特征进行过研究[20-21]。尽管如此，迄今尚缺乏对溃坝泥石流形成条件和过程的系统研究，其形成动力学机制也不清楚。

特别值得说明的是，无论是由于地震及其崩塌、滑坡等二次灾害形成堰塞湖，在汇流渗透和水流冲刷动力作用下引发自然溃坝灾害，还是由于洪水渗流和冲刷动力作用下会形成人工堤坝溃决灾害，二者尽管在土壤颗粒组成、坝体结构和初始上下游水力条件等方面不同，但其共同的特点都是在上游来水汇流冲刷下发生天然或人工坝体的溃决，因此很有必要对因天然堰塞湖溃坝和人工堤坝溃决诱发泥石流形成过程进行概化和系统研究。

鉴于此，本文专门以非均质溃坝泥石流为研究对象，根据泥石流形成的物源、水源和地形条件这三大要素，设计了24组溃坝泥石流模拟实验。非均质泥石流的形成过程可分为三个阶段，即固体泥沙颗粒起动、加速混掺和两相流形成，本次研究重点关注泥石流在形成区的起动过程。首先根据溃坝泥石流的起动方式和实验现象对其起动模式进行概括，阐明其形成特点，并分析不同实验条件对起动模式的影响，再根据孔隙水压和相对剪切力等动力学指标的变化特征，对比分析不同起动模式下溃坝泥石流的动力学特征。研究成果对泥石流灾害治理工程的规划设计以及提高溃坝泥石流监测预警水平具有重要指导意义。

2　实验概述

本次实验是在中国科学院东川泥石流观测研究站的自制泥石流模拟变坡水槽中进行，实验中采用不同方式铺设的土砂砾层作为物源条件，以控制水箱的出水流量作为水源条件，以改变水槽坡度作为地形条件，用来模拟不同形成条件下的溃坝泥石流运动过程，并运用MEAS-KPSI-735(USA)孔隙水压力计和SONY-ILCE-5100(JPN)高速摄像机进行辅助测量，并拍摄泥石流运动过程。

2.1　实验装置　泥石流模拟变坡水槽及其结构示意图见图1所示。该实验装置由水箱、形成区、流通区和堆积区4个部分构成。水槽侧壁钢化玻璃上绘制有10 cm×5 cm的网格线。水箱底面为1m×1m的正方形，高1.1 m，总容积1.1 m^3，进水口装有自动抽水泵，出水口装有可调节流量大小的阀门；形成区由两段组成，上段连接水箱出水口，水槽长2 m×宽1 m×深0.5 m，下段与流通区相连接，水槽底面为斜长1 m，上底宽0.3 m，下底宽1 m的等边梯形，水槽深度从0.5 m逐渐过渡至0.4 m，形成区的变坡范围为0～10°；流通区水槽长6 m×宽0.3 m×深0.4 m，变坡范围为15°～35°；堆积区水槽长3 m×宽

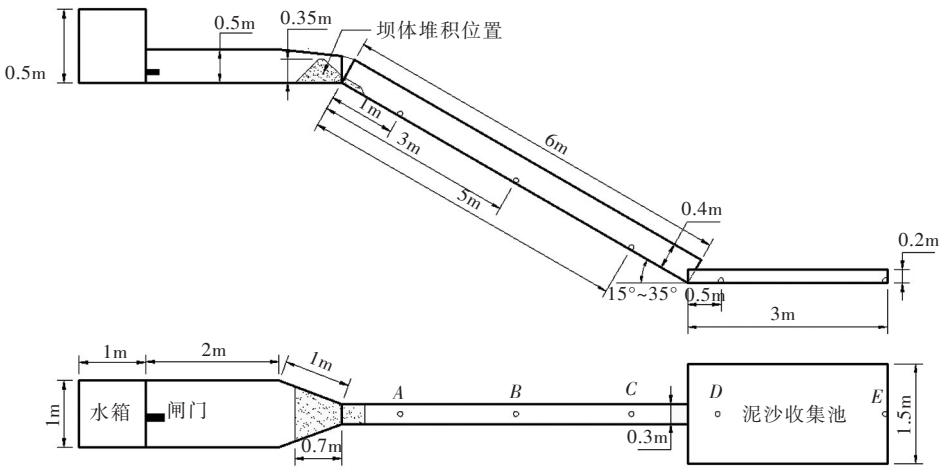


图1　泥石流模拟变坡水槽结构

1.5 m×深 0.2 m。

2.2 实验条件 实验用沙采用东川蒋家沟泥石流沟道堆积物料，以原状沙为基料，再通过配制形成粗颗粒和细颗粒两种物料，共计3种实验用沙，它们中值粒径分别为3.96、4.88和2.24 mm，颗粒级配曲线如图2所示。

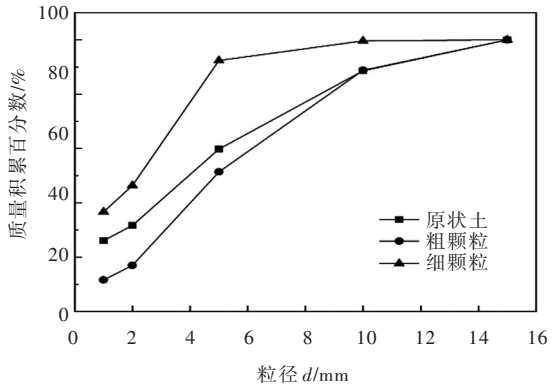


图2 实验土体颗粒粒径累积曲线

为了模拟不同影响因子组合条件下溃坝泥石流的形成动力过程，基于泥石流形成的三大要素物源、水源和地形，结合溃坝泥石流的特点，综合确定模拟实验的主要因子为流量Q、坝体堆积高度H、粗细颗粒的铺设方式(非均质系数Ψ)和流通区水槽坡度S 4种，各因子设计的实验条件如下：(1)水箱出水流量(2种)：2.4 m^3/h和13.1 m^3/h；(2)坝体堆积高度(2种)：25 cm和35 cm；(3)底沙铺设方式(3种)：均匀混合(Ψ=1.0)、上粗下细(Ψ=2.18)和上细下粗(Ψ=0.46)；(4)流通区水槽坡度(2种)：25°和35°。

将上述4种实验因子进行组合，共得出24组实验条件，并可分为局部型和整体型两种泥石流溃决方式(详见3.1节)。在24组实验中前者共有11组，后者共有13组，实验所依据的水沙条件见表1。

表1 实验所依据的水沙条件

泥石流分类	实验编号	流量 Q/(m^3/h)	坝高 H/cm	非均质系数Ψ	坡度 S/(°)	泥石流分类	实验编号	流量 Q/(m^3/h)	坝高 H/cm	非均质系数Ψ	坡度 S/(°)
局部溃坝型泥石流	No.1	2.4	35	1.00	35	整体溃坝型泥石流	No.2	13.1	35	1.00	35
	No.3	2.4	25	1.00	35		No.4	13.1	25	1.00	35
	No.5	2.4	35	2.18	35		No.6	13.1	35	2.18	35
	No.7	2.4	25	2.18	35		No.8	13.1	25	2.18	35
	No.13	2.4	35	1.00	25		No.9	2.4	35	0.46	35
	No.15	2.4	25	1.00	25		No.10	13.1	35	0.46	35
	No.17	2.4	35	2.18	25		No.11	2.4	25	0.46	35
	No.18	13.1	35	2.18	25		No.12	13.1	25	0.46	35
	No.19	2.4	25	2.18	25		No.14	13.1	35	1.00	25
	No.20	13.1	25	2.18	25		No.16	13.1	25	1.00	25
	No.21	2.4	35	0.46	25		No.22	13.1	35	0.46	25
							No.23	2.4	25	0.46	25
							No.24	13.1	25	0.46	25

2.3 实验方法及流程 在实验前期准备工作中，首先需将准备好的实验原材料按照不同的坝体堆积高度和铺设方式，在固定位置进行土体铺设，并将孔隙水压力计埋设在坝高10 cm(探头3)、20 cm(探头2)和30 cm(探头1)处(针对35 cm的高坝才设置探头1)，并进行相应调试。坝体堆积工作结束后，将两台高速摄像机分别架设于水槽侧面和正面，确保画面清晰，视野范围覆盖泥石流运动全过程。每组实验前，打开水箱进水泵，将水箱注满。

实验正式开始，打开水箱阀门至恒定流量2.4 m^3/h或13.1 m^3/h，与此同时开启孔隙水压力计和两台高速摄像机进行观测。在水位逐渐上涨的过程中，于坝前放置塑料球以及泡沫浮标作为示踪标志物，便于泥石流流速的测量。在溃坝泥石流大规模形成的瞬间，分别在流通区A、B、C三点处进行采样。待坝体局部或整体冲毁后，剩余坝体达到稳定状态，不再随水流的冲刷而形成泥石流，此时停止实验，关闭水箱出水阀、孔隙水压力计和高速摄像机。当形成区滞留水量全部流下后，在泥石流堆积区中线上D、E处进行采样，并对溃坝泥石流发生后的坝体形态以及堆积区形态进行拍摄和记录。实验结束后，对实验样品进行称重、烘干处理，并完成颗粒分析试验，最终对全部实验资料进

行整理分析，此次溃坝泥石流容重范围在1.45 ~ 1.85 t/m^{3}之间。实验流程如图3所示。

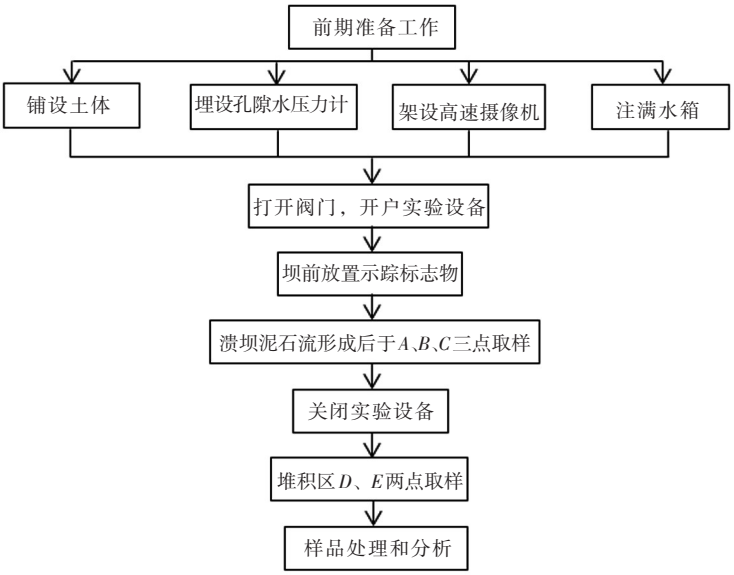


图3　溃坝泥石流实验流程图

3　溃坝泥石流起动特点及其动力学特征

3.1　溃坝泥石流概化模式及起动特点

3.1.1　概化模式　根据溃坝泥石流实验观测到两种实验现象，一种为水流切沟侵蚀→岸坡崩塌→堵塞水流→局部溃决→泥石流；另一种为水流全面漫顶→溯源侵蚀→坝体坦化→整体溃决→泥石流。据此按照泥石流的溃决模式，可将溃坝泥石流分为局部溃坝型和整体溃坝型两类泥石流，图4显示了这两种模式溃坝泥石流的实验特征。



（a）局部溃坝型　　（b）整体溃坝型

图5　溃坝泥石流两种概化模式

3.1.2　起动特点

（1）局部溃坝型泥石流。由于水流切沟侵蚀造成局部溃坝型泥石流发生的过程可以概括为水流切沟侵蚀–岸坡崩塌–堵塞水流–局部溃决形成泥石流。切沟侵蚀形成局部溃坝型泥石流，主要是依靠水流的剪切作用，对坝体顶端局部形成下切侵蚀，切沟逐渐加深、加宽，土体含水率和孔隙水压力持续上升，最终导致坝体切口两侧或单侧的边壁土体失稳，崩塌后土体滑落堵塞水流，随着水量增加，净水压力逐渐升高，超出坝体局部所能承受的阈值时，瞬时溃决，形成溃坝泥石流[22]。

（2）整体溃坝型泥石流。水流全面漫顶后对坝体背部造成溯源侵蚀并发生整体溃坝型泥石流的现象可以概括为水流全面漫顶–溯源侵蚀–坝体坦化–整体溃决形成泥石流。坝体背部整体发生溯源侵蚀

形成溃坝泥石流，主要是依靠水流漫顶后对坝体背部的冲刷作用，水流携带大量泥沙，使坝体厚度急剧减小，坝体高度也有所下降，逐渐坦化，土体含水率和孔隙水压力持续上升，坝体所能承受住的水力压强减小，最终整体失稳，瞬间溃决，形成溃坝泥石流。

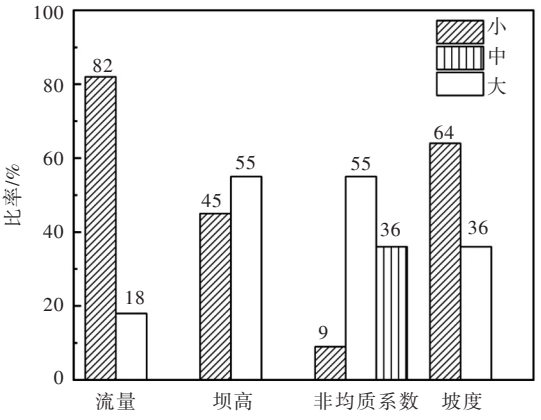


图5　局部溃坝型泥石流工况统计

综上所述，坝体堆积物质在水流作用下形成溃坝泥石流，主要是由于土体含水量和孔隙水压力快速升高，再加上水流的剪切作用和自身重力作用，导致土体颗粒起动，坝体溃决并最终形成泥石流[19]。因此，在溃坝泥石流实验研究中，需要通过分析孔隙水压力、流速等水动力因子，重点阐述溃坝泥石流在起动过程中的动力学机理，并通过改变溃坝泥石流发生的物源（坝体高度H和铺设方式Ψ）、水源（流量Q）和地形条件（坡度S），揭示溃坝泥石流的动力学变化特征。

3.2　局部溃坝型泥石流动力学特征

3.2.1　*成因分析*　11组局部溃坝型泥石流实验工况统计结果，如图5和表2所示。图5中图例小、中、大分别代表各实验参数的数值大小。统计结果表明，11组局部溃坝型泥石流在实验参数坝高下分布情况并无明显差异性，十分均衡。然而，在11组实验中，只有2组实验是在大流量条件下形成，其余9组全部为小流量，所占比例高达82%，这充分说明坝体上游来水流量小是形成局部溃坝型泥石流的重要条件。因为，当坝体上游来水流量较小时，水流在逐渐漫顶的过程中，不会瞬间形成全面漫顶，因此水流对坝体顶端局部有较为充分的时间产生下切侵蚀，当切沟逐渐形成，过水流量逐渐增大，直至来水流量与过水流量相等，此时坝前水位不再继续上升，因此无法形成全面漫顶，最终随着切沟的逐渐加深、加宽，水位会开始下降，切沟两侧或单侧的边壁土体由于长时间与水流相接触，土体含水量急剧升高，且边壁陡峭，最终失稳崩塌堵塞沟道。当水槽坡度较小时，减小了土体自重沿水槽坡面的下滑力，坝体不易于发生整体失稳。所以，小流量、小坡度下更容易形成局部溃坝型泥石流。

表2　局部溃坝型泥石流工况统计

工况	流量 Q/(m³/h)		坝高 H/cm		非均质系数Ψ			坡度 S/(°)	
	13.1	2.4	35	25	2.18	1	0.46	35	25
数量	2	9	6	5	6	4	1	4	7
比率/%	18	82	55	45	55	36	9	36	64

在11组实验中，非均质系数Ψ=2.18的有6组，而Ψ=0.46只有1组，两者比例相差6倍。这说明在上粗下细铺设方式下容易形成局部溃坝型泥石流。因为当粗颗粒在上时，土体孔隙率较大，水位上涨的过程中土体含水率和孔隙水压快速升高，渗流作用的存在加剧了土体颗粒的运动，当水流漫顶后，上层土体已充分浸润，部分粗颗粒便随之起动，进而引发大量固体颗粒联动，水流迅速下切，切沟逐渐加深、加宽，边壁上部湿润的粗颗粒土体易于失稳崩塌堵塞水流；下部细颗粒土体不易于水流渗透，当坡度较小时，不容易发生整体失稳。

3.2.2　*动力学特征*　突发性强是泥石流灾害往往造成重大损失的主要原因之一[23]，因此泥石流的起动力学机制和起动时间一直是泥石流研究的重点和热点。舒安平等[24]从土体颗粒的受力出发，以水流剪切力与颗粒起动临界剪切力的比值，作为起动判别式，当比值大于1时判定泥石流颗粒处于起动状态。

水流剪切力计算公式：

$$\tau = \gamma h J \tag{1}$$

式中：τ为水流剪切力；γ为水体容重；h为平均水深；J为水力坡降。

颗粒起动临界剪切力拟合公式：

$$\tau_c = 0.054\frac{(\gamma_s - \gamma)d}{Re_*}\left(\frac{8.8 + Re_*^{1.6}}{3.6 + Re_*^{1.6}}\right) \tag{2}$$

式中：τ_c为颗粒起动临界剪切力；d为土体中值粒径d_{50}；Re_*表示沙粒雷诺数，即

$$Re_* = \frac{u_* d}{\nu} \tag{3}$$

式中：$u_* = \sqrt{gRJ}$为摩阻流速；R为水力半径；g为重力加速度。

因此，起动判别式：

$$\frac{\tau}{\tau_c} = 18.52\frac{\gamma h J}{(\gamma_s - \gamma)d}\frac{Re_*\left(Re_*^{0.6} + 3.6\right)}{Re_*^{1.6} + 8.8} \tag{4}$$

在泥石流起动判别式中，水流剪切力τ的计算用的是平均水深，计算结果为水流对床面的剪切力，并不是对表层泥沙颗粒的剪切力。因此，在局部溃坝泥石流起动过程中，它是对溃口处底部土体整体的剪切力，这正好能够充分反映溃坝泥石流的起动特征。对11组局部溃坝型泥石流进行起动判别计算分析，如表3所示。结果表明，局部溃坝型泥石流相对剪切力（水流剪切力与起动临界剪切力比值）τ/τ_c的范围在12.525～17.237之间，平均值为14.70，比值结果远远大于1。

表3　局部溃坝型泥石流起动判别计算结果

实验编号	τ_c	τ	τ/τ_c	实验编号	τ_c	τ	τ/τ_c
No.1	3.255	50.589	15.542	No.17	4.041	53.842	13.324
No.3	3.261	56.210	17.237	No.18	4.053	66.267	16.350
No.5	4.039	50.589	12.525	No.19	4.046	57.983	14.331
No.7	4.045	56.210	13.896	No.20	4.049	62.125	15.343
No.13	3.248	45.558	14.026	No.21	1.774	28.992	16.343
No.15	3.243	41.417	12.771				

3.3　整体溃坝型泥石流动力学特征

3.3.1　成因分析　13组整体溃坝型泥石流实验工况统计结果，如图6和表4所示，图6中图例小、中、大分别代表各实验参数的数值大小。统计结果表明，13组整体溃坝型泥石流在实验参数坝高下分布情况并无明显差异性，十分均衡。13组实验中，大流量有10组，所占比例高达77%。因为，当坝体上游来水流量较大时，水流会在很短的时间内形成全面漫顶，并不只是在坝体顶端局部形成切沟侵蚀，因此短时间的全面漫顶，保证了水流对坝体背部的全面侵蚀和冲刷，而坡度较大时，增加了土体自重沿水槽坡面的下滑力，坝体更容易整体失稳。所以，在大流量、大坡度下更容易形成整体溃坝型泥石流。

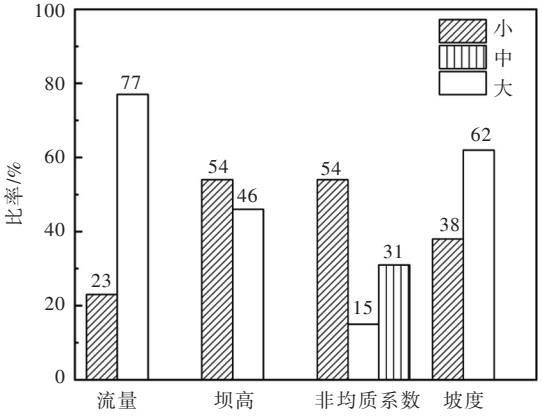


图6　整体溃坝型泥石流工况统计

表4　整体溃坝型泥石流工况统计

工况	流量 Q/(m³/h)		坝高 H/cm		非均质系数 Ψ			坡度 S/(°)	
	13.1	2.4	35	25	2.18	1	0.46	35	25
数量	10	3	6	7	2	4	7	8	5
比率/%	77	23	46	54	15	31	54	62	38

在13组实验中，非均质系数Ψ=0.46的有7组，而Ψ=2.18只有2组，两者比例相差3.5倍。这说明在上细下粗铺设方式下容易形成整体溃坝型泥石流。原因在于当细颗粒在上时，孔隙率较小，土体不易于渗透，水流全面漫顶后，土体颗粒才开始起动，此时背部大量土体迅速被水流冲刷带走，坝体厚度迅速减小，并逐渐坦化；又由于底部粗颗粒易于水流渗透，底部土体被充分浸润，摩擦力减小，在大坡度下易于发生整体失稳，并最终形成泥石流。

3.3.2　*动力学特征*　对13组整体溃坝型泥石流进行起动判别计算分析，如表5所示。结果表明，整体溃坝型泥石流相对剪切力τ/τ_c的比值范围在16.635～46.378之间，平均值为26.59，比值结果远远大于1。

表5　整体溃坝型泥石流起动判别计算结果

实验编号	τ_c	τ	τ/τ_c				
No.2	3.270	67.453	20.628	No.12	1.818	84.316	46.378
No.4	3.280	84.316	25.706	No.14	3.261	57.983	17.781
No.6	4.055	67.453	16.635	No.16	3.264	62.125	19.033
No.8	4.067	84.316	20.732	No.22	1.797	49.700	27.657
No.9	1.794	44.968	25.066	No.23	1.789	41.417	23.151
No.10	1.810	67.453	37.267	No.24	1.806	62.125	34.399
No.11	1.803	56.210	31.176				

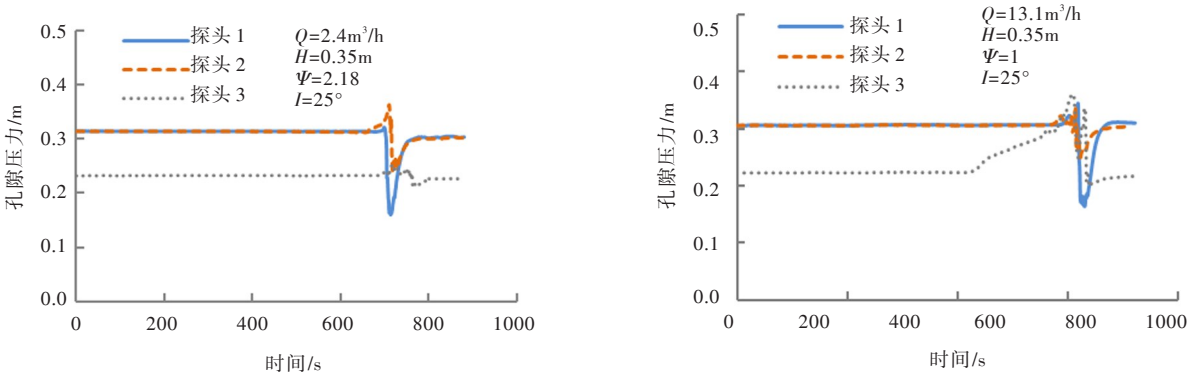
4　不同类型溃坝泥石流的对比分析

上述24组溃坝泥石流实验相对剪切力τ/τ_c的比值范围在12.525～46.378之间，平均值为21.14，比值结果远远大于1。泥石流相对剪切力越大，表明泥沙颗粒越易于起动。田露[25]在研究中发现常遇型泥石流的相对剪切力一般介于4.1～13.8之间。通过对比分析，溃坝泥石流的相对剪切力远远大于常遇型泥石流，两种不同类型泥石流相对剪切力大小的分界也较为明显，大体介于12.5～13.8之间，小于12.5基本可以判定为常遇型泥石流，这说明溃坝泥石流在起动的瞬间往往需要更大的相对剪切力。两类泥石流在起动的过程中，都受到水流的冲刷作用，主要差别在于渗流作用的影响，渗流的存在会加剧泥沙颗粒的运动，而常遇型泥石流受渗流作用更为明显。

局部与整体溃坝型泥石流相对剪切力的对比分析表明，整体溃决形成泥石流往往需要更大的相对剪切力，其平均值是局部溃决的1.8倍，两者相对剪切力大小的分界也较为明显，大体介于16.6～17.2之间，大于17.2基本可以判定为整体溃坝型泥石流，这是由于整体溃决所需要的侵蚀驱动力更大，相较于局部溃决更难于起动形成溃坝泥石流。

从上游来水，到溃坝泥石流的形成，整个过程的历时是泥石流灾害防治和预警研究的重点。前人研究成果表明，埋设在土体中的孔隙水压力计，其读数变化可以很好的反映土体颗粒的起动情况[4,26]。如图7所示，为两种不同类型溃坝泥石流孔隙水压力变化曲线图，分别以No.14组实验和No.17组实验为例进行说明。图7(a)中，由于Ψ=2.18，下部细颗粒不易于水流渗透，初始阶段探头3并未有明显升高，当最上处探头1急速下降时，此时探头2还处于上升阶段，随着切沟逐渐加深，探头2急速降落，伴随有边壁土体崩塌，此时探头3迅速上升，伴随有一小段时间的稳定波动后，迅速下降，最终形成局部溃坝型泥石流，这与切沟逐渐加深、加宽，边壁土体失稳，堵塞水流的物理过程相符合。图7(b)中，实验开始后，上游来水量增加，水位上涨，水流不断渗入土体，孔隙水压力升高，探头3读数最先开始增加，随着水位的进一步升高，探头2和探头1读数开始逐渐升高，各探头在到达峰值后，几乎同一时间瞬间断崖式下降。这与整体溃坝型泥石流的实际情况相符合，瞬间的整体溃决，孔隙水压迅速减小，3个探头的监测变化具有很强的一致性。

因此，综合上述对两种不同类型溃坝泥石流孔隙水压测量曲线的分析表明，局部溃坝型泥石流起动的时间是图中最后一个孔隙水压急速下降的时刻，而整体溃坝型泥石流起动的时间则较为统



（a）局部溃坝型泥石流（No.17）　　（b）整体溃坝型泥石流（No.14）

图 7　孔隙水压随时间变化过程曲线

一，为各探头同时下降的时刻，这对确定溃坝泥石流的起动时间具有重大的意义。

5　结论

（1）通过实施溃坝泥石流模拟实验和成果分析，提出了溃坝泥石流的发生存在两种模式，即局部型和整体型，其中局部溃坝型泥石流的发生模式可概括为切沟侵蚀→岸坡崩塌→堵塞水流→局部溃决→泥石流；整体溃坝型泥石流的发生模式可概括为全面漫顶→溯源侵蚀→坝体坦化→整体溃决→泥石流，两者溃坝方式存在明显差异性。

（2）实验结果表明，小流量、小坡度下更容易形成局部溃坝型泥石流，大流量、大坡度下更容易形成整体溃坝型泥石流，而且后者突发性更强，形成规模与冲击破坏力也更大，从水动学角度揭示了两类溃坝泥石流的特性。

（3）通过对两类溃坝泥石流相对剪切力 τ/τ_c 进行比较，得出整体溃坝型泥石流往往需要更大的相对剪切力，当 τ/τ_c 大于 17.2 时，容易发生整体溃坝型泥石流，否则容易发生局部溃坝型泥石流。由此表明整体溃决往往需要更大的侵蚀驱动力，相较于局部溃坝而言，整体溃坝更难起动形成溃坝泥石流。

需要说明的是，由于溃坝泥石流问题本身的复杂性，加之实验存在一定局限性，下一步有必要深入开展溃坝泥石流发生时间和规模的研究，便于成果的实践应用。

参　考　文　献：

[1] 康志成，李焯芬，马蔼乃，等．中国泥石流研究[M]．北京：科学出版社，2004．

[2] 方海燕，蔡强国，李秋艳，等．甘肃舟曲“8·7”特大山洪泥石流灾害原因及防治对策[J]．中国水土保持科学，2010，8(6)：14-18．

[3] 张楠，方志伟，韩笑，等．近年来我国泥石流灾害时空分布规律及成因分析[J]．地学前缘，2018，25(2)：299-308．

[4] 舒安平，孙江涛，张欣，等．非均质泥石流形成过程动力学特征[J]．水利学报，2016，47(7)：850-857．

[5] 倪化勇，唐川．中国泥石流起动物理模拟试验研究进展[J]．水科学进展，2014，25(4)：606-613．

[6] 牛志攀，许唯临，张建民，等．堰塞湖冲刷及溃决试验研究[J]．工程科学与技术，2009，41(3)：90-95．

[7] 赵鑫，向晓华．泥石流堵坝及溃决分析研究[J]．四川水利，2016，37(4)：61-64．

[8] 谢任之．溃坝水力学[M]．济南：山东科学技术出版社，1993．

[9] LI Y，SU P C，CUI P，et al．A probabilistic view of debris flow[J]．Journal of Mountain Science，2008，5(2)：91-97．

[10] STOKER J J．Water Wave[M]．New York：Interscience Publishers，1957：334-341．

[11] DRESSLER R F．Unsteady non-linear waves in sloping channels[J]．Proceedings of the Royal Society of London，1958，247(1249)：186-198．

[12] 王立辉，胡四一．溃坝问题研究综述[J]．水利水电科技进展，2007，27(1)：80-85．
[13] SOARES-FRAZÃO S，GRELLE N L，SPINEWINE B，et al．Dam-break induced morphological changes in a channel with uniform sediments：measurements by a laser-sheet imaging technique[J]．Journal of Hydraulic Research，2007，45：87-95．
[14] BROOKS G R，LAWRENCE D E．The drainage of the Lake Ha!Ha! reservoir and downstream geomorphic impacts along Ha!Ha! River，Saguenay Area，Quebec，Canada[J]．Geomorphology，1999，28(1/2)：141-167．
[15] SPINEWINE B，ZECH Y．Small-scale laboratory dam-break waves on movable beds[J]．Journal of Hydraulic Research，2007，45：73-86．
[16] GARDNER T W．Experimental study of knickpoint and longitudinal profile evolution in cohesive，homogeneous material[J]．Geological Society of America Bulletin，1983，94(5)：664-672．
[17] 林秉南．明渠不恒定流研究的现状与发展[M]//林秉南论文集．北京：中国水利水电出版社，2001：340-373．
[18] 戴荣尧，王群，罗昶，等．溃坝模型试验及最大流量的研究[J]．铁道工程学报，1984，1(2)：23-28．
[19] 庄建琦，崔鹏，胡凯衡，等．沟道松散物质起动形成泥石流实验研究[J]．四川大学学报(工程科学版)，2010，42(5)：230-236．
[20] 刘洋，齐清兰，张力霆．尾矿库溃坝泥石流的演进过程及防护措施研究[J]．金属矿山，2015，474(12)：139-143．
[21] 敬小非，潘昌树，谢丹，等．尾矿库溃坝泥石流相似模拟试验台设计及验证[J]．中国安全生产科学技术，2017，13(7)：24-29．
[22] GAO Y L，ZHOU S Q．Influence of ultra-fine fly ash on hydration shrinkage of cement paste[J]．Journal of Central South University of Technology，2005，12(5)：596-600．
[23] 费祥俊，舒安平．泥石流运动机理与灾害防治[M]．北京：清华大学出版社，2004．
[24] 舒安平，张欣，段国胜，等．非均质泥石流起动判别关系式[J]．水利学报，2017，48(7)：757-764．
[25] 田露．不同类型非均质泥石流启动累积过程及能量转化机理研究[D]．北京：北京师范大学，2018．
[26] SHU A P，TIAN L，WANG S，et al．Hydrodynamical characteristics of formation processes for non-homogeneous debris-flow[J]．Water，2018，10(4)：452-467．

Starting processes and dynamic characteristics of dam-break debris flow

SHU Anping[1]，ZHU Fuyang[1]，WANG Shu[1]，SHEN Zhenquan[2]
(1. *KeyLab of Water and Sediment Sciences of MOE*，*Beijing Normal University*，*Beijing* 100875，*China*；
2. *College of Engineering*，*Peking University*，*Beijing* 100871，*China*)

Abstract：Dam-break debris flow is a special solid-liquid two-phase flow formed when a large amount of collapsed materials generated by landslides or earthquakes，etc. fill up the valley or river and then suddenly break out under the scouring action of rainfall runoff. In this paper，twenty-four groups of dam-break debris flow simulation experiments were carried out by using the self-made multi-functional flume at Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station of the Chinese Academy of Sciences in Yunnan Province. According to the patterns of dam-break and relative shear force，the dam-break debris flow is divided into two types：part-type and integral-type. Firstly，the formation reasons of these two types of dam-break debris flows are analyzed，and the dynamical characteristics of pore water pressure and water-sediment factors during the starting processes of them are revealed. The results show that the part-type dam-break debris flow is easier to form under small flow and small slope；otherwise it is easier to form a kind of integral-type dam-break debris flow. And the shear driving force of the integral-type is greater than that of the part-type. The research results are of great significance for the planning and design of prevention and control projects of the dam-break debris flow and the improvement of the level of debris flow disaster prevention and mitigation.

Keywords：dam-break debris flow；starting processes；shear stress；dynamic characteristics

(责任编辑：耿庆斋)