

第二届全国泥石流学术会议 论文集

中国科学院 成都山地灾害与环境研究所 编辑
水利部

科学出版社

第二届全国泥石流学术会议 论文集

中国科学院
水利部 成都山地灾害与环境研究所 编辑

科学出版社

1991

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书收入论文 49 篇, 这些论文全面反映了我国在泥石流研究方面的最新进展。全书论述了泥石流的运动力学和观测试验技术; 阐明了泥石流的形成机制及沉积特征; 描述了泥石流区域防治规划及各种工程措施; 并重点介绍了泥石流综合研究的最新成果。这标志着具有中国特色的泥石流研究体系(包括理论体系和防治体系)已经基本形成。

本书可供从事地理、地质、水利、交通方面工作的科技人员、干部和大专院校有关专业师生参考。

第二届全国泥石流学术会议 论文集

中国科学院 成都山地灾害与环境研究所 编辑
水 利 部

责任编辑 吴三保 李 红

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100707

北京怀柔县黄坎印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1991 年 12 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/16
1991 年 12 月 第一次印刷 印张: 19 1/2 插页: 5
印数: 001—600 字数: 452 000

ISBN 7-03-002672-1/P·535

定价: 19.10 元

前 言

第二届全国泥石流学术会议是继1980年在成都召开的第一届全国泥石流学术会议之后,又一次规模宏大的泥石流专业盛会。来自全国科研、教学、勘测、设计、管理和泥石流防治实践第一线的80多个单位的188名代表(其中正式代表128人、列席代表50人、特邀代表10人)欢聚一堂,交流了近年来我国泥石流研究和防治方面的丰硕成果,总结了经验教训,提出了今后研究工作的重点和发展方向。进一步明确了泥石流工作要紧紧密结合山区环境保护、资源开发和国土整治等任务,面向四化建设,为防灾除害服务的方针。这次会议为我国泥石流研究和防治谱写了新的篇章,把我国泥石流工作推向了一个新的发展阶段。应邀与会的日本、美国的几位泥石流学者,也与我国泥石流学者进行了学术交流。

本届学术会议是由中国科学院地学部主持召开的。中国科学院-水利部成都山地灾害与环境研究所负责会议的筹备与组织工作,并与铁道科学研究院西南研究所、甘肃省科学院地质自然灾害研究协调中心和成都科技大学水利水电学院等单位联合举办这次会议。

自1980年召开第一届全国泥石流学术会议以来,我国各方面都发生了巨大的变化,呈现出蓬勃发展的大好形势,特别是山区四化建设的突飞猛进,极大地推动了我国泥石流研究和防治工作的发展。长期以来,我国泥石流工作者深入西南、西北、华北、东北和青藏高原等泥石流发育的山区,对泥石流进行了科学考察、观测实验和防治研究。在区域泥石流形成发育规律和防治规划研究方面,泥石流形成机制与堆积规律、冲淤特点研究方面,泥石流运动过程和力学特征研究方面,泥石流综合防治研究方面,泥石流观测方法、模型试验和测试技术的应用研究方面,以及泥石流预测、预报和报警系统研究等多个领域中,都取得了较大的进展,有些方面达到了世界先进水平。

这次会议收到了129篇学术论文和9部泥石流录像片,这是我国泥石流工作者多年来科技成果的一个缩影。这些论文内容丰富,涉及到泥石流理论研究和防治实践的各个领域,对我国山区泥石流防灾工作具有重要的参考价值。这些成果标志着中国泥石流的理论体系和防治体系已基本形成。

根据我国山区建设发展的需要和与会代表的建议,大会决定出版这次会议论文集,并委托举办单位中国科学院-水利部成都山地灾害与环境研究所组成论文集编辑委员会。收入本文集的论文,大体归纳为四部分:第一部分,着重论述了泥石流的运动力学和观测试验技术;第二部分,主要介绍了我国泥石流学者在泥石流形成机理和沉积特征方面的成果;第三部分,侧重论述了泥石流区域防治规划的原则、内容和方法,以及各种工程、生物治理措施的特点;第四部分,重点介绍了泥石流综述和区域泥石流研究方面的研究成果。

中国科学院-水利部成都山地灾害与环境研究所承担了本文集的编辑工作,并提供了出版经费;兰州大学张林源教授参加了部分审稿工作,在此谨表示由衷的谢忱。

杜榕桓 唐邦兴 谭炳炎 章书成

1989年12月

《第二届全国泥石流学术会议论文集》

编辑委员会

主 编 唐邦兴

副 主 编 杜榕桓 谭炳炎

常务编辑 章书成

编 辑 钟学正 李德基 黄文俊

目 录

水沙宾汉流体的流型划分和相似律.....	华国祥	(1)
试论泥石流冲击力的基本特征及测量方法.....	章书成 陈精日 叶明富	(10)
变坡度流路中的泥石流之形成机理.....	高桥 保 匡尚富	(17)
泥石流运动特征剖析.....	周必凡	(27)
泥石流地声特性及 NJ-2 型无线遥测泥石流报警器的研制.....陈精日 章书成 叶明富	(36)
泥石流泥位报警原理及仪器.....	康志成 胡平华	(42)
减轻美国西部特殊洪水灾害——泥石流、泥流、高含沙水流的综合途径.....道格拉斯·汉弥尔顿	(47)
地貌营力系统及模型.....	钱小蓉 顾恒岳	(53)
泥石流堵江形态的数学模型.....	曾思伟	(58)
紊动对泥石流浆体流变特性的影响.....	杨美卿	(63)
泥石流静力学的基本特征.....	王裕宜	(70)
泥浆体流变参数试验资料综合分析.....	谢慎良	(76)
降雨预报泥石流的原理及方法.....	陈景武	(84)
NSZ ₁₀ 型泥石流粘度计及其测试原理.....	赵惠林 温贵勤	(91)
东川地区泥石流沟的遥感图像解译.....	严璧玉 李成玉	(97)
MDR-Z80 微型计算机在泥石流观测实验中的应用.....	叶明富 章书成 陈精日	(104)
动态摄影测量及其在泥石流观测中的应用.....	孙恩智 张松林 胡 兵	(109)
应力侵蚀和泥石流.....	艾南山	(114)
河流地貌过程与耗散结构.....	钱小荣 顾恒岳 艾南山 陈山林	(120)
模糊数学在确定泥石流沟临界雨量区上的应用.....	姚令侃	(127)
降雨泥石流的临界雨量研究.....	谭万沛	(136)
泥石流的发生和降雨.....	孟河清	(143)
山区散流坡泥石流的形成过程.....	田连权	(149)
庐山地区的古泥石流.....	邓养鑫 张林源	(154)
第四纪古泥石流的鉴别与陆相混杂堆积物的类型.....	张林源	(161)
三峡库区环境变化对泥石流的影响.....	程昌炳 罗鸿禧	(168)
云南小江泥石流防治规划的探讨.....	杜榕桓 康志成 朱平一 陈循谦	(173)
用于泥石流防治的拱基组合式圪工重力坝.....	李德基 陈发全	(180)
格栏坝的设计和试验.....	范子炎 陈有民 管敏鑫 朱天镛	(187)
三角形泥石流排导槽的设计与工程效益.....	王继康	(196)
北京山区泥石流流量变化的特征及其设计流量的计算.....	刘德昭	(200)

对泥石流水文计算标准问题的初探·····	陈英燕 李 斌	(206)
固液两相体分离试验系统在泥石流河道模型试验中的应用·····		
·····	谢修齐 王文俊 李良勋	(210)
用研究树木根系固结力的方法探讨泥石流生物治理的机理·····	柳素清 崔 鹏	(217)
再论泥石流的整体观和铁路泥石流防治的总体性·····	陈光曦	(222)
我国山区近期泥石流灾害及其预防·····	唐邦兴 康志成	(225)
东川市区泥石流活动特点及防治对策·····	杜榕桓	(232)
分析黄河中游干支流实测资料对高含沙量水流机理的认识·····	朱鹏程	(238)
陕北高含沙浑水输送问题·····	杨廷瑞	(245)
川藏公路迫龙沟特大泥石流灾害纪实·····	杨宗辉	(252)
孙水河流域泥石流·····	姚一江 徐永良	(255)
成昆铁路乌斯河站至甘洛站沿线泥石流发展趋势及灾害形势探讨·····	黄正维	(261)
西安市秦岭北坡泥石流初步分析·····	李昭淑	(267)
陕南山地泥石流初探·····	齐鑫华 惠振德 甘枝茂	(274)
甘肃榆中碱沟泥流调查·····	王得楷 曾思伟 张又安	(280)
试论泥石流动力作用对河床地貌的影响——以云南小江流域为例·····	刘希林	(284)
青藏高原及邻区泥石流分布特征·····	吕儒仁 冯清华	(290)
泥石流地貌要素的统计分析·····	崔 鹏	(296)
落戈沟泥石流调查和规划设计·····	黄文俊 姚一江 殷崇庆 杨文科	(303)

水沙宾汉流体的流型划分和相似律

华 国 祥

(成都科技大学)

一、宾汉流体的流型

高含沙水流和泥石流大都是宾汉流体。它们的流动形态和规律和牛顿流体是不同的。对于宾汉流体的物理、力学特性和运动规律已进行过不少研究,但用什么指标来区分同属宾汉体的不同流型,迄今未能解决。本文的第一部分就想探求一个能划分流型的指标。影响宾汉流体流型的有泥沙因素和水力因素。前者指的是颗粒的体积浓度 S_V , 颗粒的粒径、形状和级配,具体反映在流变参数即屈服应力 τ_B 和刚度系数 η 上。后者指的是水力半径 R 和断面平均流速 V 。现在来讨论为什么 τ_B/η 能反映泥沙的形状和级配的影响,而能用无因次数 $Y = \frac{\tau_B(4R)}{\eta V}$ 区分宾汉流体的不同流型。

研究屈服应力 τ_B 和刚度系数 η 随体积浓度 S_V 的变化规律的学者很多,得出了不同的公式,我国万兆惠^[1]得到:

$$\begin{aligned}\tau_B &= k S_V^3 \\ \eta &= 0.01 + 2.06 S_V^{1.68}\end{aligned}$$

从这两个方程式可以看出:

- (1) 在高浓度区, τ_B 随浓度的增加而加大得很快;
- (2) η 随浓度的变化小于 τ_B 。

托马斯^[2]认为影响 τ_B 和 η 的因素除体积浓度外,还应考虑颗粒的形状系数 ψ_1 和 ψ_2 , 而 ψ_1 和 ψ_2 与单位体积内泥沙颗粒的表面积有关,他提出了下列表达式:

$$\begin{aligned}\tau_B &= k_1 S_V^3 \\ \eta &= \mu \exp(k_2 S_V) \\ k_1 &= 100500 \frac{\psi_1}{d^3} \\ k_2 &= 2.5 + \frac{14}{\sqrt{d}} \psi_2 \\ \psi_1 &= \exp\left[0.7\left(\frac{S_p}{S_o} - 1\right)\right] \\ \psi_2 &= \left(\frac{S_p}{S_o}\right)^{1/2}\end{aligned}$$

式中, S_V 是颗粒的体积浓度; μ 是基础溶液的粘度 (一般取小于 10 微米颗粒的溶液);

d 为颗粒粒径 (微米); k_1 为常数, 单位为达因¹⁾/厘米²; k_2 为常数; ψ_1 和 ψ_2 为形状系数; S_0 为单位体积球体或同体积立方体的表面积; S_p 为单位体积实际泥沙的表面积。

如果颗粒形状很不规则且颗粒很细时, S_0 和 S_p 是很难测定的, 如已测得流变曲线得到 τ_B 和 η 后, 就可以用托马斯公式求出 k_1, k_2 , 然后标出 ψ_1 和 ψ_2 , 可得出 S_p/S_0 。Govier 和 Aziz^[3] 曾做了仔细测定, 如表 1 所示。

表 1 系数 S_p/S_0 计算表

形状	球度	S_p/S_0	形状	球度	S_p/S_0
球体	1.000	1.000	圆柱体		
八面体	0.847	1.14	$h=3r^{**}$	0.860	1.52
立方体	0.806	1.54	$h=10r$	0.691	2.84
棱柱体			$h=30r$	0.580	4.44
$a \times a \times 2a^*$	0.767	2.04	圆盘		
$a \times 2a \times 2a$	0.761	1.29	$h=r^{**}$	0.827	1.10
$a \times 2a \times 3a$	0.725	1.55	$h=r/3$	0.594	1.06
			$h=r/10$	0.323	1.31

* a 为底边长; ** r 为半径。

S_p/S_0 反映了颗粒形状的影响。由于测量困难, 还测不到各种级配情况下的值。Naik^[4] 把非牛顿流体分为小于 10 微米的基础溶液, 然后在此基础溶液中加入各种体积浓度 S_0 的颗粒, 并求出这种溶液的极限浓度 S_m 。一定颗粒组成的悬浮液, 具有相应的最大浓度, 算为极限浓度, 它与颗粒级配有关, 可写成:

$$S_{v_m} = a - \frac{b}{\sigma_s}$$

σ_s 为几何均方差, 与不均匀系数 C_u ($= \frac{d_{60}}{d_{10}}$) 有关:

$$C_u = \sigma_s^{1.5348}$$

若沙的球度在 0.78 至 0.85 之间, 则 $a = 0.807$, $b = 0.274$ 。

曾推得加入粗颗粒后悬液的 τ_{BD} 与 J_0 与基础悬液的 τ_B 与 η 之比为:

$$\tau_r = \frac{\tau_{BD}}{\tau_B} = \frac{c_1 k_1}{c_2} + k_2$$

$$\eta_r = \frac{\eta_0}{\eta} = c_1 k_1 + k_2$$

式中
$$c_1 = \left(\frac{1}{\beta^2 - 1} \right) \left[1 + \frac{2}{(\beta^2 - 1)^{1/2}} \tan^{-1} \left(\frac{\beta + 1}{\beta - 1} \right)^{1/2} \right]$$

$$c_2 = \left[\frac{2\beta^2}{(\beta^2 - 1)^{1/2}} \tan^{-1} \left(\frac{\beta + 1}{\beta - 1} \right) \right] - \frac{\pi}{2}\beta$$

$$k_1 = \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{6\beta}$$

$$k_2 = 1 - \frac{\pi}{4\beta^2}$$

1) 1 达因 = 10^{-5} 牛顿。

$$\beta = \left(-\frac{S_{V_m}}{S_V} \right)^{1/3}$$

这样测定了基础溶液的 τ_B 与 η 就可以根据泥沙的级配算出极限浓度 S_{V_m} 和实测溶液浓度 S_v 求得该悬浮溶液的 τ_{BD} 和 η_D 。 τ_{BD} 和 η_D 都是 β ，即 S_{V_m}/S_V 的函数，两者之比：

$$\frac{\tau_{BD}}{\eta_D} = \frac{\tau_B \left(\frac{c_1 k_1}{c_2} + k_2 \right)}{\eta (c_1 k_1 + k_2)}$$

显然，这个比值决定于 c_2 的大小，若 $c_2 = 1$ ，则 $\tau_{BD}/\eta_D = \frac{\tau_B}{\eta}$ ， c_2 是 β 的函数。

粗颗粒的存在，会改变悬浮液的流变特性，现有的粘度仪都不能测定存在粗颗粒的悬浮液的 τ_{BD} 和 η_D ，如果用这个公式，就可以根据基础溶液的测定值 τ_B 和 η 算出存在粗颗粒时的 τ_{BD} 和 η_D 了。为了简化，以后用 τ_B 和 η 代替 τ_{BD} 和 η_D 。

至于宾汉体的流动，假定仍可用下列公式：

$$V = \sqrt{\frac{89}{\lambda}} \sqrt{RJ}$$

λ 为宾汉体的阻力系数，根据流体特性和边壁阻力而变，则

$$\frac{V^2}{R} = \frac{89}{\lambda} J$$

说明可以用 V/R 反映阻力和比降等（表 2）。

表 2 各类流体 Y 值计算表

名称	τ_c	s	τ_B	η	R	V	τ_B/η	R/V	Y
高 含 沙 水 流									
任增海水 槽试验		298	0.013	8.0×10^{-5}	6.48	100.4	394	0.065	98*
		400	0.021	4.9×10^{-5}	6.45	100.5	429	0.064	110*
		418	0.0227	5.2×10^{-4}	6.45	105.5	437	0.06	86*
		497	0.034	8.0×10^{-5}	6.77	80.2	425	0.084	144
		505	0.034	8.0×10^{-5}	6.84	81.9	425	0.08	141
		638	0.05	1.6×10^{-4}	6.98	42.2	313	0.17	207
王明甫 水槽试验 (花园 口淤泥 d_{50} 为 0.021—0.027 毫米)		129.3	0.0032	1.64×10^{-5}	16.4	93.18	208	0.18	138
		309	0.011	3.05×10^{-5}	16.1	93.97	361	0.17	248
		334.4	0.0103	3.45×10^{-5}	15.3	107.4	329	0.27	237
		414	0.016	3.55×10^{-5}	20.0	73.67	450	0.27	489
		429.5	0.0123	3.19×10^{-5}	15.2	97.29	386	0.16	241
		471.5	0.0127	2.83×10^{-5}	120	95.6	448	0.18	319
		529.01	0.0167	3.74×10^{-5}	20.4	65.22	500	0.32	625
		613.8	0.0397	6.35×10^{-5}	20.2	51.00	626	0.40	991
		616.5	0.0639	6.75×10^{-5}	12.7	122.33	948	0.10	394
		619	0.014	7.45×10^{-5}	18.2	63.26	189	0.28	218
	666	0.676	3.65×10^{-5}	18.1	85.7	378	0.21	741	

续表 2

名称	r_c	s	τ_B	η	R	V	τ_B/η	R/V	Y
高 含 沙 水 流									
巴家咀 实测 资料		463	0.012	4.6×10^{-5}	45	103	261	0.44	457
		468	0.023	5.6×10^{-5}	42	86	411	0.49	800
		483	0.013	4.0×10^{-5}	94	160	325	0.59	749
		486	0.017	4.9×10^{-5}	63	135	347	0.47	648
		604	0.025	6.2×10^{-5}	159	179	403	0.89	1437
	638	0.083	8.0×10^{-5}	881	246	288	0.94	1072	
稀 性 连 续 流									
蒋家沟(9)	1.417		0.0999	9.0×10^{-4}			111	0.15	66
	1.523		0.158	9.0×10^{-4}			168	0.15	101
	1.523		0.162	8.9×10^{-4}			182	0.15	109
	1.587		0.315	3.7×10^{-3}			85	0.15	85
	1.686		0.342	2.5×10^{-3}			139	0.15	83
查菁沟	1.597		0.329	1.7×10^{-3}			193	0.12	93
大凹子沟	1.705		0.767	2.8×10^{-3}			273	0.12	131**
	1.705		0.661	4.9×10^{-3}			135	0.12	65**
粘 性 连 续 流									
蒋家沟	2.089		0.459	0.014			32.8	0.18	24
	2.165		0.619	0.017			36.4	0.18	26
	2.252		0.793	0.017	150	850	46.7	0.176	33
	2.247		1.389	0.02	120	950	69.5	0.126	35
达德沟	1.662		0.309	0.005			618	0.12	30
	1.662		0.340	0.0039			87.0	0.12	41
	1.668		0.390	0.0039			100.0	0.12	48
	1.668		0.395	0.004			99.0	0.12	47
	1.827		1.790	0.021			85.0	0.12	41
	2.019		1.649	0.024			69.0	0.12	33
粘 性 阵 流									
蒋家沟	1.488		0.021	0.00081	114	763	30.0	0.15	16
	1.690		0.198	0.0084	54	351	23.6	0.15	17
	1.701		0.194	0.0059	47	348	32.9	0.14	18
	1.724		0.044	0.0012	114	763	36.7	0.15	22
	1.828		0.101	0.0031	66	663	32.5	0.10	14
	1.83		0.095	0.004	17	361	24.0	0.05	4.6
	1.995		0.249	0.009	45	750	27.6	0.06	6.7
	2.077		0.352	0.0097	170	890	36.0	0.19	28
	2.204		0.486	0.0148	150	884	33.0	0.17	22
	2.250		0.433	0.016	200	789	27.0	0.25	28

* 急流资料;

** 同一 r_c 流变参数 τ_B 和 η 相差甚远, 分析时取其平均值。为了判别宾汉流体的流型, 把 τ_{BD}/η_D 与 V/R 一并考虑, 组成一个无因次数:

$$Y = \frac{\tau_B(4R)}{\eta V}$$

现在把蒋家沟^[5]、达德沟、查菁沟的泥石流实测资料和任增海¹⁾、王明甫^[6]及巴家嘴高含沙水流资料列如附表，考虑到实测资料中有全套 τ_B , η , R, V 的观测成果的资料不多，且测粘度的方法不同，精度有限，表中数据，尚待进一步根据实测资料修正。

从表 2 可得出：

(1) 同一条泥石流沟，容重 γ_c 相同，级配和颗粒形状相差不远，给出接近的 τ_B/η ，但不同的泥石流沟，虽然 γ_c 相同，因颗粒形状和级配不同，会得出不同的 τ_B/η ，如表 3 所示。

表 3 各类流体 τ_B/η 值表

类 型	γ_c (克/立方厘米)	τ_B/η		s (千克/立方米)	τ_B/η
蒋家沟	1.523	168	巴家嘴	483	325
(稀性连续流)	1.523	182		486	347
达得沟	1.668	100	任增海	499	425
(粘性连续流)	1.668	99		505	425
蒋家沟	2.089	32.8			
(粘性连续流)					
达德沟	2.019	69			
蒋家沟(粘性阵流)	2.077	36			

所以 τ_B/η 能反映颗粒形状和级配的影响。

(2) 流型的分界值

- $Y > 130$ 高含沙水流(缓流)；
 $60 < Y < 130$ 稀性连续泥石流；
 $30 < Y < 60$ 粘性连续泥石流；
 $Y < 30$ 粘性阵状泥石流；

(3) 如果原型和模型中的 Y 值相等，就可在模型中重演原型中的流型。

(4) 由于测量 τ_B 和 η 的精度有限，在实际泥石流沟中测深度 H 和流速 V 亦比较困难，上面提到的分界值尚待根据资料逐步修正。

(5) 本文的流型没有考虑补给条件，即来水条件的变化。

二、相 似 律

宾汉流体的流动非常复杂，如高含沙水流有揭底和浆河等特殊现象，泥石流又有连续流和阵性流等不同的流型，不可能全靠理论来解决，必须用实验方法来揭示运动的内在规律和解决实际问题。实验研究通常是在比原型为小的模型上进行的。先在模型上观测流态和测定各种水力要素，然后把资料引伸到原型上去。研究相似律，首先要弄清相似的条件，使能设计出与原型流动相似的模型，然后推导出相似准则，使能把模型上实测的数据换算到原型上去。

相似系统的流动，必须满足几何相似、运动相似和动力相似。几何相似是指原型与

1) 任增海, 1981, 明渠高含沙水流阻力规律探讨, 西北水利科学研究所(油印本)。

模型保持几何形状的相似，运动相似要求原型与模型中任何对应点的速度或加速度互相平行且具有同一比值。动力相似必须保证原型和模型中任何对应点上作用着同名的力，各同名力互相平行且具有同一比值。这三个条件是互相联系和互相制约的。这个制约关系就是原型和模型中的流动必须为同一方程所描述。所以必须从可变形物体的运动方程式出发，根据相似的要求，推导出相似准则，从而得出各种物理量的比例关系。相似准则为：

$$\left. \begin{aligned} X - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) &= \frac{\partial V_x}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial z} \\ Y - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) &= \frac{\partial V_y}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_y}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial z} \\ Z - \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial P_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} \right) &= \frac{\partial V_z}{\partial t} + V_x \frac{\partial V_z}{\partial x} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中， x, y, z 为单位质量力。 ρ 为宾汉流体的密度。 P_{xx}, P_{yy}, P_{zz} 为动水压强在相应方向的分量，第一个脚标表示应力作用于与该坐标轴垂直的平面，第二个脚标代表应力的方向。在相似流动中对应点的动水压强和单位质量力，以及各种几何量及运动量应该有固定的比值，今以 λ 表示比尺，则

$$\begin{aligned} \lambda_L &= \frac{L_P}{L_M}, & \lambda_V &= \frac{V_P}{V_M}, & \lambda_\rho &= \frac{\rho_P}{\rho_M} \\ \lambda_\tau &= \frac{\tau_P}{\tau_M}, & \lambda_P &= \frac{P_P}{P_M}, & \lambda_t &= \frac{t_P}{t_M} \\ \frac{X_P}{X_M} &= \frac{Y_P}{Y_M} = \frac{Z_P}{Z_M} = \lambda_s \end{aligned}$$

若质量力为重力，则 $\lambda_s = \lambda_z$ 。注脚 P 代表原型的物理量， M 代表模型的物理量。把上述比尺关系代入 (1) 式，即得以模型物理量表示的原型运动方程式 (2)。下面以 X 方向为例进行讨论，而在 Y, Z 方向可用同样方法推导。

$$\begin{aligned} \lambda_s X_M - \frac{1}{\lambda_\rho \rho_M} \left[\frac{\lambda_P \partial P_M}{\lambda_L \partial x_M} + \frac{\lambda_\tau \partial \tau_{yx}}{\lambda_L \partial y_M} + \frac{\lambda_\tau \partial \tau_{zx}}{\lambda_s \partial z_M} \right] \\ = \frac{\lambda_V \partial V_x}{\lambda_t \partial t} + \frac{\lambda^2 V}{\lambda_L} \left[V_x \frac{\partial V_{xM}}{\partial x_M} + V_y \frac{\partial V_{xM}}{\partial y_M} + V_z \frac{\partial V_{xM}}{\partial z_M} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

比较 (1), (2) 两式，只是系数上有差别。按照相似条件，在相似的流动中，对应点同名力比值应该相等。因此要使 (2) 和 (1) 式所描述的流动相似，(2) 式与 (1) 式的同名项相比的结果必须相等，也就是说，只有满足下式，原型与模型才由同一方程所描述，从而两水流才得相似。

所以
$$\lambda_g = \frac{\lambda_P}{\lambda_P \lambda_L} = \frac{\lambda_g}{\lambda_P \lambda_L} = \frac{\lambda_V}{\lambda_t} = \frac{\lambda^2 V}{\lambda_L} \quad (3)$$

由此可见，方程式 (2) 的两个系数表示作用在原型和模型对应点上同名力之间的比值。

(3) 式中各项均以位移惯性力的比值 $\frac{\lambda_P^2}{\lambda_L}$ 除之，

则
$$\frac{\lambda_g \lambda_L}{\lambda_v^2} = \frac{\lambda_p}{\lambda_\rho \lambda_v^2} = \frac{\lambda_\tau}{\lambda_\rho \lambda_v^2} = \frac{\lambda_L}{\lambda_v \lambda_s} = 1$$

由此得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\lambda_v^2}{\lambda_\rho \lambda_L} &= 1 \quad \text{①} \\ \frac{\lambda_p^2}{\lambda_\rho \lambda_v^2} &= 1 \quad \text{②} \\ \frac{\lambda_s}{\lambda_\rho \lambda_v^2} &= 1 \quad \text{③} \\ \frac{\lambda_v \lambda_s}{\lambda_L} &= 1 \quad \text{④} \end{aligned} \right\} \text{或} \left. \begin{aligned} \frac{V_p^2}{g_p L_p} &= \frac{V_M^2}{g_M L_M} \quad \text{①} \\ \frac{P_p}{\rho_p V_p^2} &= \frac{P_M}{\rho_M V_M^2} \quad \text{②} \\ \frac{\tau_p}{\rho_p V_p^2} &= \frac{\tau_M}{\rho_M V_M^2} \quad \text{③} \\ \frac{V_p l_p}{L_p} &= \frac{V_M l_M}{L_M} \quad \text{④} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

这样我们就得到四个无因次数。第一个表征重力和位移惯性力的比值,称弗汝德数;第二个表征动水压力与位移惯性力的比值,称欧拉数;第三个表征剪应力与位移惯性力的比值;第四个表征当地惯性力与位移惯性力的比值,称线时数。如果几何相似宾汉流体的流动系统要完全动力相似,必须使上述四个比值相等,这就是相似准则。在前述四个相似准则中 λ_p 应等于 λ_τ ,所以②③两个准则是相同的。对于不随时间而变的稳定流,第④个准则可不考虑,因此在一般模型设计时只须考虑①③两个准则,即重力和阻力相似准则(此时②准则会自动满足)。

对于宾汉流体:

$$\tau = \tau_B + \eta \frac{dV}{dy}$$

τ_B 称为流体的屈服应力, η 为刚度系数。对于这种流体,剪应力就由两部分组成。一部分是与流体物理特性有关的屈服应力,而另一部分则与流动的流速分布有关的剪应力。原型和模型中两流体运动相似,该两种剪应力都应满足剪应力的比尺关系。

即

$$\lambda_\tau = \lambda_{\tau_B} = \lambda_\eta \frac{dV}{dy} \quad (5)$$

代入(4)式中的第③准则,得:

$$\frac{\lambda_{\tau_B}}{\lambda_\rho \lambda_v^2} = 1 \quad (6)$$

和

$$\frac{\lambda_\eta \frac{dV}{dy}}{\lambda_\rho \lambda_v^2} = 1 \quad (7)$$

公式(6)为屈服应力相似的条件;公式(7)为流速分布引起的剪应力相似的条件。两者必须同时满足。

由式(6)
$$\frac{\lambda_{\tau_B}}{\lambda_\rho \lambda_v^2} = \frac{\lambda_{\tau_B}}{\frac{\lambda_v^2 \lambda_L^2 \lambda_\rho}{\lambda_\eta^2} \frac{\lambda_\eta^2}{\lambda_\rho \lambda_L^2}} = \frac{\lambda_{\tau_B} \lambda_\rho \lambda_L^2}{\lambda_{\rho,1} \lambda_\eta^2} = 1$$

因为赫氏数
$$H_s = \frac{\tau_B \rho L^2}{\eta^2}$$

雷诺数

$$Re_1 = \frac{\rho V l}{\eta}$$

故

$$\frac{\lambda \tau_B}{\lambda \rho \lambda v^2} = \frac{\lambda He}{\lambda Re_1^2} = 1 \quad (8)$$

即

$$\frac{He}{Re_1^2} = 1 \quad (9)$$

我们暂定名 He/Re_1^2 为塑性数。要求原型与模型中的屈服应力相似, 必须使两流体的塑性数相等, 即必须满足 $(He/Re_1^2)_p = (He/Re_1^2)_m$ 。

由式 (7) 可得到:

$$\frac{\lambda \eta \frac{du}{dy}}{\lambda \rho \lambda v^2} = \frac{\lambda \eta \lambda v}{\lambda \rho \lambda v^2 \lambda L} = \frac{1}{\lambda \rho \lambda v \lambda L} = \frac{1}{\lambda Re_1} = 1 \quad (10)$$

即 $\lambda Re_1 = 1$

也就是说, 原型与模型中流体的雷诺数应相等, 此即雷诺准则。在宾汉流体中, 存在着屈服应力和流速分布引起的剪应力, 所以宾汉流体的流动相似, 必须同时满足塑性数和雷诺数相等。剪应力的大小表征着流动时阻力的大小, 在流体力学中常用阻力系数 f 来度量阻力。图1^[7]表示宾汉体的 f 与 Re_1 , He 的关系曲线, 有了原型的 Re_1 和 He , 就可由图上找到一个 f 值, 原型与模型的 f 值应相等, 所以可以根据这个 f 值找出模型中宾汉流体的 Re_1 和 He 数。例如原型的 $Re_1 = 10^4$, $He = 4.2 \times 10^6$, 由图查得 $f = 10^{-1}$, 由此可得几个不同的模型流体的 Re_1 和 He , 如 $Re_1 = 10^3$, $He = 10^{4.5}$ 等, 供模型中选用。 D 为管径, ΔP 为压差。在宾汉体流动中, 既有阻力作用又有重力作用, 因此还须满足弗罗德准则, 即满足 (1) 中的相似准则

$$\lambda Fr = 1 \quad (11)$$

由此得

$$\lambda u = \lambda l^{0.5} \quad (12)$$

$$\lambda g = \lambda l^{2.5} \quad (13)$$

把雷诺准则 (10) 式写成比尺形式:

$$\lambda Re_1 = \frac{\lambda \rho \lambda u \lambda l}{\lambda \eta} = 1$$

则

$$\lambda \eta = \lambda \rho \lambda l^{1.5} \quad (14)$$

把塑性数相等式 (9) 写成比尺形式:

$$\frac{\lambda He}{\lambda Re_1^2} = \frac{\lambda \tau_B \lambda \rho \lambda l^2}{\eta^2} \times \frac{\lambda \eta^2}{\lambda \rho^2 \lambda u^2 \lambda l^2} = \frac{\lambda \tau_B}{\lambda \rho \lambda u^2} = 1$$

得

$$\lambda \tau_B = \lambda \rho \lambda u^2 = \lambda \rho \lambda l \quad (15)$$

以 (14) 式除 (15) 式, 得

$$\frac{\lambda \tau_B}{\lambda \eta} = \frac{\lambda \rho \lambda l}{\lambda \rho \lambda l^{1.5}} = \lambda l^{-0.5} \quad (16)$$

原型和模型的流型相同, 必须满足原型和模型中流动的 Y 值相等, 即

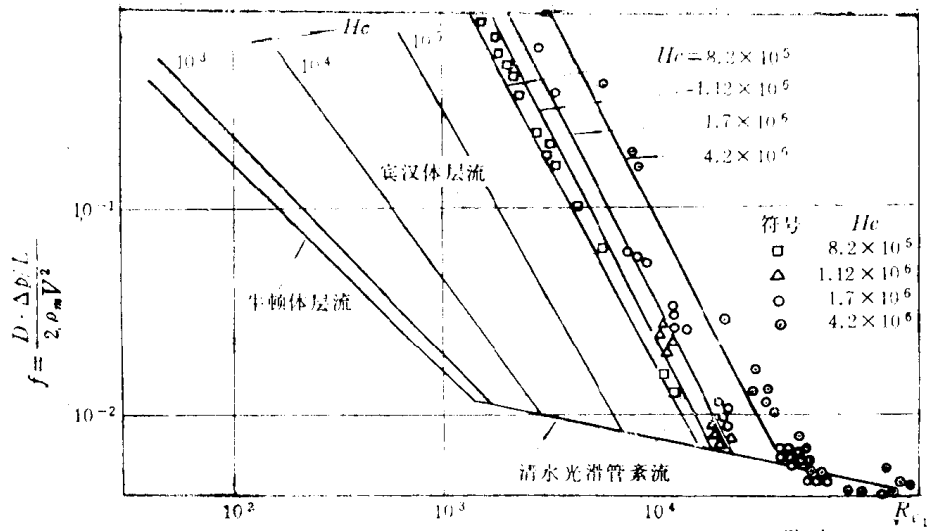


图1 宾汉体的 $f = f(Re_1, He)$ 关系曲线

$$\lambda_y = \frac{\lambda_{\tau_B} \lambda_R}{\lambda_\eta \lambda_u} = 1$$

$$\lambda_{\tau_B} = \frac{\lambda_\eta \lambda_l^{0.5}}{\lambda_l} = \lambda_y \lambda_l^{-0.5} \quad (17)$$

(16)式与(17)式相同,说明满足(11)(10)(9)式的条件后,流型的相似自动满足。因此宾汉体的相似准则为:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_u &= \lambda_l^{0.5} \\ \lambda_Q &= \lambda_l^2 \lambda_u = \lambda_l^{2.5} \\ \lambda_{\tau_B} &= \lambda_\rho \lambda_l \\ \lambda_\eta &= \lambda_\rho \lambda_l^{1.5} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

河床变形时间比尺可由河床变形方程确定:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial z}{\partial t_2} = 0$$

Q 为宾汉流体的流量, B 为渠宽, Z 为河床高程, t_2 为变形时间,写成比尺形式:

$$\lambda_{t_2} = \frac{\lambda_l^2}{\lambda_Q} = \frac{\lambda_l^2}{\lambda_l^{2.5}} = \lambda_l^{-0.5} \quad (18)$$

参 考 文 献

- [1] Wan Zhaohui, 1982, Bed Material Movement in Hyperconcentrated Flow, Technical Univ. of Denmark.
- [2] Thomas, B. G., 1963, Laminar Flow Properties of Flocculated Suspensions, American Institute of Chemical Engineers Journal, 7(3): 431-437.
- [3] Govier, G. W. and K. Aziz, 1970, The Flow of Complex Mixtures in Pipes, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- [4] Naik, B., 1983, Mechanics of Mudflows Treated as the Flow of a Bingham Fluid, Ph. D. Dissertation, Department of Civil and Environmental Engineering, Washington State University, Pullman, Washington.
- [5] 康志成, 1985, 云南东川蒋家沟泥石流流态特征, 中国科学院兰州冰川冻土研究所集刊4号, 科学出版社.
- [6] 王明甫等, 1983, 高含沙水流紊动特性的试验研究, 第二次河流泥沙国际学术会议论文集, 水利电力出版社.
- [7] 戴继岚、万北惠等, 1980, 泥浆管路输送的试验研究, 河流泥沙国际学术讨论会论文集, 光华出版社.

试论泥石流冲击力的基本特征 及测量方法*

章书成 陈精日 叶明富

(中国科学院-水利部成都山地灾害与环境研究所)
中国科学院东川泥石流观测研究站

泥石流是发生在山区小流域的一种自然灾害,这种两相的陡坡急流具有很大的动能,它是由一定浓度的浆体混杂着大大小小的石块组成,因而泥石流的冲击力也应由浆体的动压力和石块的集中力这两部分组成。这两部分不可能是简单的叠加,会对建筑物产生一种综合的作用。由经验得知,泥石流流体大石块的集中力的破坏作用往往远大于流体本身的动压力。泥石流冲击力的力源又有随机特点,它并不与运动要素呈现很好的线性关系。因此,必须率先采用实测的方法来揭示其冲击力的特点。

一、泥石流冲击力的测量方法

自1982年以来,在我们过去工作的基础上于云南东川市蒋家沟泥石流观测实验站开展了电阻应变法和压电晶体法两种方法进行测试,现分述如下。

(一) 电阻应变法

该法工作框图如图1所示,其核心部分为BHR-4型电阻应变式荷重传感器。该传感器为一圆桶形弹性元件,上面粘贴有八片电阻应变片组成的平衡桥路。该传感器弹性好,并具有良好的抗振、抗冲、防潮性能。我们根据需要选择3吨、5吨和7吨共三种量程使用。

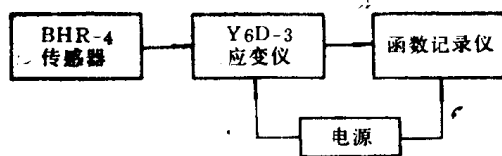


图1 电阻法工作框图

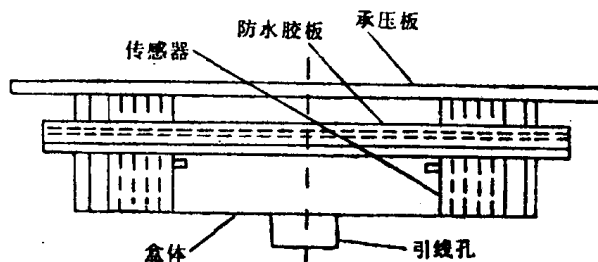


图2 钢盒装配图

为了适应野外测试条件,我们将两只BHR-4型传感器对称地装进一只特制的钢盒,

* 参加现场测试安装工作的还有刘世仲等同志; 本项工作协作单位有中国科学院力学研究所、成都电讯工程学院等。