

DISASTER MITIGATION PRINCIPLE FOR ROADBED EROSION AND DEPOSITION

路基冲蚀淤埋水毁 减灾原理

陈洪凯 唐红梅 崔志波 李海湛 著



清华大学出版社



路基冲蚀淤埋水毁 减灾原理

陈洪凯 唐红梅 崔志波 李海湛 著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书针对路基冲失、路基缺口、路基沉陷、钢筋混凝土路面板悬空、泥石流淤埋道路等路基水毁灾害的工程治理需求,从泥石流流速、冲击、磨蚀三方面建立了泥石流冲磨计算理论。着眼于路基冲蚀槽的形成过程,给出了路基水毁灾害的地貌学描述,构建了每种灾害的力学模型,研发了曲面路基防护结构、病损路基拓宽修复方法等路基水毁灾害常态修复新技术。针对路基冲失段锚拉框架结构、钢筋混凝土路面板悬空段锚拉结构、泥石流淤埋路段战备浮桥等路基水毁灾害应急抢修新技术建立了防治结构的工程计算方法和设计方法,并给出了工程算例。本书是一本具有较高理论水平和重要工程实用性的公路水毁灾害治理理论著。

本书可作为从事公路水毁灾害勘察、设计、施工、养护、应急救援和管理科技人员的专业用书,对从事公路水毁灾害研究的科技人员具有一定参考借鉴作用。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

路基冲蚀淤埋水毁减灾原理/陈洪凯等著. —北京:清华大学出版社,2016
ISBN 978-7-302-42384-3

I. ①路… II. ①陈… III. ①路基—灾害—防治 IV. ①U416

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 296358 号

责任编辑:张占奎
封面设计:陈国熙
责任校对:赵丽敏
责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市中晟雅豪印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:11.5 字 数:277 千字

版 次:2016 年 3 月第 1 版 印 次:2016 年 3 月第 1 次印刷

定 价:50.00 元

产品编号:067386-01

截至2014年底,我国公路总里程达到450万km,其中约24%位于泥石流灾害高易发区。我国公路水毁灾害以路基缺口、路基冲失、路面板悬空、路基沉陷、桥梁墩台变形破坏等类型为主,分布范围广,出现频率高,灾情严重,其防灾减灾长期得到公路管理部门与科技工作者的高度重视但却从未得到有效解决。尤其是近十年来,在全球性地质活动程度加剧、极端气象条件频繁出现的宏观地质背景下,我国公路水毁灾害直接经济损失每年超过30亿元。如2004年汛期,湖北省十堰市连续遭遇暴雨袭击,国道G209、G316和襄关路、兴界路、鲍竹路、郢漫路、十两路等省道水毁损失十分严重,被冲毁挡墙261处计93415m³,路基沉陷82处,水毁路面16×10⁴m²,公路临时中断交通31条,乡村公路路基水毁达2000km;2009年4月至7月,贵州省大部分地区遭受到强降雨袭击,造成国道、省道和县乡道近80余条公路交通中断,山洪泥石流毁损路基、路面、桥梁和涵洞,仅黔东南地区国、省干线公路共冲毁路基3.5km、冲毁防护工程83处计11505m³、路基塌方133处计117009m³;2012年四川省凉山彝族自治州喜德县“8.13”洪灾,全县累计冲毁县道32.1km、乡道44km、通村公路272km、桥梁16座,交通基础设施损毁估算达到2.7亿元。

从1998年开始,本书作者团队立足四川、重庆、贵州、新疆、云南、河南、陕西等省市区的公路交通防灾减灾,对路基水毁灾害进行了深入、系统、持续研究,本书即是基于系列研究成果整理提炼而成,解决了路基冲蚀淤埋水毁灾害减灾系列基础理论问题,构建了路基水毁灾害常态修复和应急抢修成套技术,具有较高理论水平和重要工程实用性。

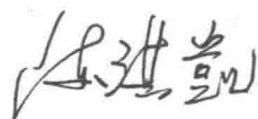
本书包括6章,第1章由陈洪凯、崔志波和唐红梅编写;第2章由陈洪凯、崔志波、李海湛、刘国礼、杨玉平和唐兰编写;第3章由唐红梅、李海湛、刘国礼、吴国勤、王德新和周福川编写;第4章由梁丹、杨玉平、刘书萍和陈玉红编写;第5章由陈洪凯、姜会玲、张中义和钟盈编写;第6章由陈洪凯、唐红梅、崔志波、何晓英、李海湛、刘国礼、吴国勤、刘燕和李小明编写。全书由陈洪凯统稿,李小明和梁丹负责图文校对。

本书在编撰过程中,得到兰州大学李吉均院士,重庆大学鲜学福院士,中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所崔鹏院士、韦方强教授、陈宁生教授和王全才教授,解放军后勤工程学院郑颖人院士和刘元雪教授,三峡大学李建林教授,中山大学刘希林教授,清华大学孙其诚教授,中南大学徐林荣教授,重庆师范大学赵纯勇教授,华东交通大学郑明新教授,重庆市地质矿产开发局总工程师刘东升教授,重庆交通科研设计院柴贺军教授和邓卫东教授,西南大学王建力教授,重庆大学阴可教授,重庆交通大学唐伯明教授、梁乃兴教授、王平

义教授、周华君教授、王多垠教授、梁波教授、吴国雄教授等专家学者的大力支持和热忱关怀,在此一并致以诚挚的谢意!

本书的出版得到重庆交通大学地质资源与地质工程重点学科、西部交通地质减灾创新团队和重庆市两江学者特聘教授专项经费资助。

虽然本书团队竭尽全力编撰本书,但是书中难免错漏,敬请各位同行批评指正。



2015 年 12 月

第 1 章 泥石流冲磨作用	1
1.1 泥石流流速	1
1.1.1 稀性泥石流流速	1
1.1.2 黏性泥石流流速	3
1.1.3 水石流流速	7
1.2 泥石流冲击力	8
1.2.1 流体动压法	9
1.2.2 船筏撞击法	9
1.2.3 地貌形迹法	9
1.3 泥石流磨蚀作用	11
1.3.1 泥石流磨蚀力	12
1.3.2 防治结构磨蚀速度与磨蚀量	14
第 2 章 路基缺口形成机制	15
2.1 路基缺口类型	15
2.2 路基缺口力学机制	16
2.2.1 滑动型路基缺口力学机制	16
2.2.2 坠落型路基缺口力学机制	23
2.2.3 泥石流冲击型路基缺口力学机制	27
2.3 路基缺口演化模式	29
2.3.1 滑动型路基缺口演化模型	29
2.3.2 坠落型路基缺口演化模式	31
2.3.3 泥石流冲击型路基缺口演化模式	33
第 3 章 悬空钢筋混凝土路面板破坏机制	35
3.1 悬空钢筋混凝土路面板等效	35
3.1.1 复合材料方法	36

3.1.2	混凝土弹性模量预测模型	36
3.1.3	算例	40
3.1.4	等效弹性模量变化规律	41
3.2	平行悬空钢筋混凝土路面板断裂破坏模型	43
3.2.1	水泥混凝土路面有限元模型	43
3.2.2	平行悬空路面板有限元分析	45
3.2.3	基于断裂力学的平行悬空混凝土路面板极限承载力	51
3.3	角部悬空钢筋混凝土路面板断裂破坏模型	66
3.3.1	角部悬空钢筋混凝土路面板数值分析	66
3.3.2	基于断裂力学的角部悬空混凝土路面板极限承载力	71
第4章	路基沉陷形成机制	78
4.1	路基吸水渗透—浸泡软化机理	78
4.2	路基吸水渗透计算	78
4.2.1	路基简化模型	78
4.2.2	基本假设	79
4.2.3	非饱和路基吸水渗透浸润锋面	79
4.3	路基稳定性计算	80
4.4	算例分析	82
第5章	泥石流沉积物淤埋固结作用	84
5.1	泥石流沉积物相变特性研究	84
5.1.1	泥石流沉积物两相划分	84
5.1.2	泥石流沉积物固相转变	85
5.1.3	泥石流沉积物液相转变	87
5.1.4	泥石流沉积物相变规律	89
5.2	泥石流沉积物淤埋试验	90
5.2.1	模型试验相似比	90
5.2.2	桥梁淤埋受荷验算	92
5.2.3	泥石流淤埋桥梁试验模型	94
5.2.4	泥石流淤埋结构物试验结果分析	96
5.3	泥石流沉积物固结力学机理	104
5.3.1	泥石流两相流模型	104
5.3.2	泥石流沉积物固结机理	105
5.3.3	泥石流沉积物的固结力学关系	106
5.3.4	泥石流沉积物固结试验验证	116
5.4	泥石流沉积物承载力变化特性	122
5.4.1	泥石流沉积物承载力变化特性试验	122
5.4.2	泥石流沉积物承载力变化特性试验结果	124

第 6 章 路基冲蚀淤埋水毁减灾技术	131
6.1 曲面路基防护结构	131
6.1.1 砌块结构设计	131
6.1.2 施工步骤	132
6.2 桩—墙复合抗滑支挡技术	133
6.2.1 结构设计	133
6.2.2 施工步骤	136
6.2.3 适用条件	136
6.3 病损路基拓宽修复方法	136
6.3.1 结构设计	137
6.3.2 施工步骤	139
6.4 路基冲失段锚拉框架结构	140
6.4.1 结构设计	140
6.4.2 施工步骤	147
6.5 路基缺口组合式桥梁	148
6.5.1 结构设计	148
6.5.2 施工步骤	155
6.6 路基沉陷段组合式聚酯砌筑块	156
6.6.1 结构设计	156
6.6.2 施工步骤	157
6.7 钢筋混凝土路面板悬空段锚拉结构	157
6.7.1 结构设计	157
6.7.2 施工步骤	162
6.8 泥石流淤埋路段战备浮桥	163
6.8.1 结构设计	163
6.8.2 施工步骤	166
6.9 泥石流淤埋路段承载伞通行结构	166
6.9.1 结构设计	166
6.9.2 施工步骤	169
6.10 泥石流沉积体注氮快速凝固技术	169
参考文献	174

泥石流冲磨作用

1.1 泥石流流速

1.1.1 稀性泥石流流速

泥石流流速是确定泥石流冲击、磨蚀荷载的重要依据,国内外在该方面做了大量研究,建立了多个经验、半定量的泥石流流速计算公式,本书从稀性泥石流、黏性泥石流和水石流三方面介绍经典且具有较强工程实用价值的泥石流流速计算公式。

1. 斯里勃内依公式

基于水力学谢才公式,苏联学者 M. Φ. 斯里勃内依提出的稀性泥石流流速公式为

$$v_c = \frac{v_b}{a} = \frac{m_0}{a} R_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{4}} \quad (1.1)$$

式中: v_c 为泥石流流速(m/s); v_b 为清水流速(m/s); a 为修正系数; m_0 为清水阻力系数的倒数; R_c 为水力半径(m); I_c 为泥石流沟床比降。

式(1.1)也可表示为下列形式:

$$v_c = H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{4}} \quad (1.2)$$

式中: H_c 为泥石流流体平均泥深度(m)。

费祥俊等推导了修正系数 a 的表达式:

$$a = \sqrt{\frac{\gamma_c}{\gamma_w} \cdot \frac{1}{1 - S_v}} \quad (1.3)$$

式中: S_v 为泥石流固相体积比浓度; γ_w 为清水容重(kN/m³); γ_c 为泥石流流体平均容重(kN/m³)。

2. 动力平衡公式

假定清水动能与挟沙水流(泥石流)动能相等,按恒定均匀流理论建立的泥石流动力平衡流速公式为

$$v_c = \frac{1}{a} \cdot \frac{1}{n} R_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (1.4)$$

式中： $\frac{1}{n}$ 为清水河床糙率。

3. 铁道部第一勘测设计院西北公式

铁道部第一勘测设计院根据对青海扎麻隆峡内纵坡为 70‰~130‰的稀性泥石流沟调查资料,基于谢才公式建立的稀性泥石流流速计算公式为

$$v_c = \frac{M_0}{a} H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{3}{8}} \tag{1.5}$$

式中： M_0 为未考虑泥石流特征的沟床糙率,铁道部第一勘测设计院建议取 15.5；修正系数 a 可按式(1.6)和式(1.7)计算确定：

$$a = \sqrt{1 + \varphi_c \gamma_s} \tag{1.6}$$

$$\varphi_c = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_s - \gamma_c} \tag{1.7}$$

式中： γ_s 为泥石流流体中固相颗粒容重(kN/m³)。

4. 铁道部第三勘测设计院泥石流公式

$$v_c = \frac{15.5}{a} H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \tag{1.8}$$

该公式仍然是基于谢才公式建立的。

5. 云南东川泥石流流速改进公式

中国科学院成都山地灾害与环境研究所基于云南东川大量的泥石流现场观测资料,按照谢才公式提出了泥石流流速计算公式(又称西南地区现行公式)：

$$v_c = \frac{m_c}{a} R_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \tag{1.9}$$

式中： m_c 为 Л. В. 巴克诺夫斯基糙率系数,按表 1.1 参考取值。

表 1.1 Л. В. 巴克诺夫斯基糙率系数

类型	沟槽特征	m_c 值		坡度/‰
		极限值	平均值	
1	糙率最大的泥石流沟槽。沟槽中堆积有难以滚动的棱石或稍能滚动的大石块。沟槽被树木(树干、树枝及树根)严重阻塞,无水生植物。沟底以阶梯式急剧降落	3.9~4.9	4.5	375~174
2	糙率较大的不平整的泥石流沟槽。沟槽无急剧突起,沟槽内堆积大小不等的石块,沟槽被树木所阻塞,沟槽内两侧有草本植物,沟床不平整,有坑洼,沟底呈阶梯式降落	4.5~7.9	5.5	199~67
3	较弱的泥石流沟槽,但有大的阻力。沟槽由滚动的砾石和卵石组成。沟槽常因稠密的灌丛而被严重阻塞,沟槽凹凸不平,表面因大石而突起	5.4~7.0	6.6	187~116
4	流域在山区中、下游的泥石流沟槽。沟槽经过光滑的岩面,有时经过具有大小不等的阶梯跌水的沟床。在开阔河床有树枝,砂石停积阻塞,无水生植物	7.7~10.0	8.8	220~112
5	流域在山区或近山区河槽。河槽经过砾石、卵石河床,由中、小粒径与能完全滚动的物质所组成,河槽阻塞轻微,河岸有草本及木本植物,河底降落较均匀	9.8~17.5	12.9	90~22

6. 北京市政设计院泥石流公式

$$v_c = \frac{M_w R_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{10}}}{a} \tag{1.10}$$

式中： M_w 为河床的外阻力系数，按表 1.2 参考取值。

表 1.2 河床外阻力系数

分类	河 床 特 征	M_w 值	
		$I_c > 0.015$	$I_c \leq 0.015$
1	河段顺直，河床平整，断面为矩形或抛物线形的漂石、砂卵石或黄土质河床，平均粒径 0.01~0.08m	7.5	40
2	河段较顺直，由漂石、碎石组成的单式河床，河床质较均匀，大石块直径为 0.4~0.8m，平均粒径 0.2~0.4m，或河段较弯曲、不太平整的 1 类河床	6.0	32
3	河段较顺直，由巨石、漂石、卵石组成的单式河床，大石块平均直径 0.1~1.4m，平均粒径为 0.1~0.4m，或较为弯曲、不太平整的 2 类河床	4.8	25
4	河段较顺直，河槽不平整，由巨石、漂石组成的单式河床，河床大石块直径为 1.2~2.0m，平均粒径 0.2~0.6m，或较为弯曲不平整的 3 类河床	4.8	20
5	河段严重弯曲，断面很不规则，有树木、植被、巨石严重阻塞河床	2.4	12.5

7. 清水动能推理公式

基于泥石流与清水动能相等，建立的清水动能泥石流流速推理公式为

$$v_c = \frac{1}{a} \frac{1}{n_w} H_w^{\frac{2}{3}} I_w^{\frac{1}{2}} \tag{1.11}$$

式中： n_w 为清水河床糙率(‰)； H_w 为清水水深(m)； I_w 为清水沟床比降(‰)。

8. 洪正修稀性泥石流流速修正公式

洪正修基于谢才公式并通过在西南地区铁路沿线的泥石流资料修正，提出的稀性泥石流流速计算公式为

$$v_c = 0.7284 H_c^{0.446} I_c^{0.309} \tag{1.12}$$

1.1.2 黏性泥石流流速

1. 莫斯特科夫公式

$$v_c = \varphi \left(\frac{d_{cp}}{H} \right) \sqrt{gH(I - I_0)} \tag{1.13}$$

式中： d_{cp} 为泥石流固体颗粒的平均粒径(m)； H 为泥深(m)； I 为河床纵比降(用小数表示)； I_0 为泥石流沟床的临界坡降(小数点表示)； φ 为函数。

2. 歇普公式

$$v_c = \frac{\sqrt{I_c}}{2} Re \sqrt{g H_c I_c} \quad (1.14)$$

式中: Re 为泥石流体的雷诺数。

3. 泥石流指数流速公式

$$v_c = \alpha_0 \left(\frac{d_{cp}}{H_c} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{1}{Re} \right)^{\alpha_2} \sqrt{g H_c I_c} \quad (1.15)$$

$$Re = \frac{\eta}{\gamma_c \sqrt{g H_c^3}} \quad (1.16)$$

根据云南东川蒋家沟泥石流 1974—1975 年的观测资料,拟合系数 $\alpha_0 = 25.38$, $\alpha_1 = 0.127$, $\alpha_2 = 0.057$ 。式中物理量同前。当忽略黏度项后,泥石流流速公式为

$$v_c = 27.57 \left(\frac{d_{cp}}{H_c} \right)^{0.245} \sqrt{g H_c I_c} \quad (1.17)$$

4. 东川蒋家沟泥石流流速公式

根据 1965—1967 年、1973—1975 年共 101 次泥石流 3000 多阵流的观测资料,中国科学院成都山地灾害与环境研究所提出了云南东川蒋家沟泥石流公式

$$v_c = \frac{1}{n_c} H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (1.18)$$

$$\frac{1}{n_c} = 28.5 H_c^{-0.34} \quad (1.19)$$

5. 东川大白泥沟、蒋家沟泥石流流速公式

$$v_c = K H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (1.20)$$

式中: K 为黏性泥石流流速系数(表 1.3)。

表 1.3 黏性泥石流流速系数 K 值表

H_c/m	<2.5	3	4	5
K	10	9	7	5

6. 四川西昌黑马沙河、马颈沟公式

$$v_c = 2.77 \left(\frac{R_c}{d_{85}} \right)^{0.737} \left(\frac{\eta_{eb}}{\eta_e} \right)^{0.42} \sqrt{R_c I_c} \quad (1.21)$$

式中: d_{85} 为占固体总重量 85% 的固体颗粒粒径(m); η_{eb} 为清水有效黏度(Pa·s); η_e 为泥石流浆体的有效黏度(Pa·s)。

7. 西藏古乡沟、东川蒋家沟、武都火烧沟公式

$$v_c = \frac{1}{n_c} H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (1.22)$$

式中: n_c 为黏性泥石流沟床糙率,按照表 1.4 参考取值。

表 1.4 黏性泥石流糙率表

序号	泥石流流体特征	沟床特征	糙率值	
			n_c	$1/n_c$
1	流体呈整体运动；石块粒径大小悬殊，一般在 30~50cm,2~5m 粒径的石块约占 20%；龙头由大石块组成，在弯道或河床展宽处易停积，后续流可超越而过，龙头流速小于龙身流速，堆积呈龙岗状	沟床极粗糙，沟内有巨石和挟带的树木堆积，多弯道和大跌水，沟内不能通行，人迹罕见，沟床流通段纵坡在 10%~15%，阻力特征属高阻型	平均 0.270 $H_c>2m$ 时，为 0.445	4.57 2.25
2	流体呈整体运动；石块较大，一般石块粒径 20~30cm,含少量粒径 2~3m 的大石块；流体搅拌较为均匀；龙头紊动强烈，有黑色烟雾及火花，龙头和龙身流速基本一致；停积后有龙岗状堆积	沟床比较粗糙，凹凸不平，石块较多，有弯道、跌水；沟床流通段纵坡 7.0%~10.0%，阻力特征高阻型	$H_c\leq 1.5m$ 时为 0.05~0.033 平均 0.04 $H_c>1.5m$ 时为 0.05~0.100 平均 0.067	20~30 25 10~20 15
3	流体搅拌十分均匀；石块粒径一般在 10cm 左右，挟有个别 2~3m 的大石块；龙头和龙身物质组成差别不大；在运动过程中龙头紊动十分强烈，浪花飞溅；停积后浆体与石块不分离，向四周扩散呈叶片状	沟床较稳定，河床质较均匀，粒径 10cm 左右；受洪水冲刷沟底不平而且粗糙，流水沟两侧较平顺，但干而粗糙；流通段沟底纵坡 5.5%~7.0%，阻力特征属中阻型或高阻型	$0.1m<H_c<0.5m$ 0.043 $0.5m<H_c<2.0m$ 0.077 $2.0m<H_c<4.0m$ 0.100	23 13 10
4		泥石流铺床后原河床粘附一层泥浆体，使干而粗糙河床变得光滑平顺，利于泥石流流体运动，阻力特征属低阻型	$0.1m<H_c<0.5m$ 0.022 $0.5m<H_c<2.0m$ 0.038 $2.0m<H_c<4.0m$ 0.050	46 26 20

8. 甘肃武都地区黏性泥石流流速公式

甘肃省交通科学研究所通过对陇南武都地区的泥石流调查,运用谢才公式,提出了适用于武都地区的黏性泥石流流速计算公式

$$v_c = M_c H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{2}}$$

(1.23)

式中： M_c 为泥石流沟床糙率系数,按表 1.5 参考取值。

表 1.5 泥石流沟糙率系数 M_c

类别	沟床特征	M_c			
		H_c/m			
		0.5	1.0	2.0	4.0
1	黄土地区泥石流或大型黏性泥石流沟,沟床平坦开阔,流体中有大石块很少,河床纵坡为 2%~6%,阻力特征属低阻型	—	29	22	16
2	中小型黏性泥石流沟,沟谷一般平顺,流体中含大石块较少,沟床纵坡为 3%~8%,阻力特征属于中阻型或高阻型	26	21	16	14

续表

类别	沟床特征	M_c			
		H_c/m			
		0.5	1.0	2.0	4.0
3	中小型黏性泥石流沟,沟床狭窄弯曲,有跌坎;或沟道虽顺直,但含大石块较多的大型稀性泥石流沟,沟床纵坡为4%~12%,阻力特征属高阻型	20	15	11	8
4	中小型稀性泥石流沟,碎石质河床,多石块,不平整,沟床纵坡为10%~18%	12	9	6.5	—
5	沟道弯曲,沟内多顽石、跌坎,床面极不平顺的稀性泥石流沟,河床纵坡为12%~25%	—	5.5	4.5	—

9. 西藏波密古乡沟公式

$$v_c = \frac{K_c}{n_c} H_c^{\frac{3}{4}} I_c^{\frac{1}{2}} \quad (1.24)$$

式中: n_c 为泥石流沟床糙率,一般黏性泥石流取 0.45,稀性泥石流取 0.25; K_c 为流速分布系数,一般取 0.45。

10. 云南大盈江浑水沟泥石流流速公式

$$v_c = \left(\frac{\gamma_w}{\gamma_c} \right)^{0.4} \left(\frac{\eta_{eb}}{\eta_e} \right)^{0.1} v_w \quad (1.25)$$

式中: v_w 为清水流速(m/s),按谢才公式计算。

11. 西北公式

$$v = 4.55 H_c^{\frac{1}{4}} I_c^{\frac{1}{5}} \quad (1.26)$$

12. 修正曼宁公式

$$v_c = 1.62 \left[\frac{S_v(1-S_v)}{\sqrt{H_c I_c} d_{10}} \right]^{\frac{2}{3}} H_c^{\frac{1}{3}} I_c^{\frac{1}{6}} \quad (1.27)$$

$$d_{10} = 0.165 \gamma_f^{-3.60} \quad (1.28)$$

式中: d_{10} 为泥石流固体颗粒级配曲线上累计频率小于 10% 的颗粒的平均粒径(m); γ_f 为泥浆容重(kN/m³)。该公式适用于曼宁糙率 $n=0.033$ 左右的情况。

13. 蒋家沟泥石流表面流速公式

$$v_c = \frac{1}{2.405} \gamma_y \gamma_c \sqrt{g H_c I_c} \quad (1.29)$$

$$\gamma_y = p_c \gamma_s + p_d \gamma_s + \gamma_f (1 - p_c - p_d) \quad (1.30)$$

式中: γ_y 为泥石流中土体的损失容重(kN/cm³); p_c 为黏粒和粉粒所占的重量百分比,可由泥石流体中的土体颗粒频率曲线查取; p_d 为粉粒(0.05mm)与最大悬浮颗粒所占的重量百分比,也可由土体颗粒频率曲线查得。

14. 洪正修黏性泥石流公式

$$v_c = 1.532 I_c^{0.301} H_c^{0.528} \quad (1.31)$$

式中相关物理量同前。

15. 王继康 82-1 公式

王继康基于对云南地区泥石流调查资料,提出了适用于黏性泥石流流速的计算公式

$$v_c = K_c H_c^{\frac{2}{3}} I_c^{\frac{1}{5}} \quad (1.32)$$

式中: K_c 为黏性泥石流流速系数,如表 1.6 所示。

表 1.6 黏性泥石流流速系数

H_c/m	<2.50	2.75	4.00	4.50	4.00	4.50	5.00	>5.50
K_c	10.0	9.5	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0

1.1.3 水石流流速

1. 日本高桥堡水石流流速公式

$$v_c = \frac{2}{5D_a} \left\{ \frac{g \sin \theta_f}{a_i \sin \varphi_m} \left[C_v + (1 - C_v) \frac{\rho_w}{\rho_s} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{C_s}{C_v} \right) H_c^{\frac{3}{2}} \right] \quad (1.33)$$

式中: θ_f 为泥石流表面纵坡角($^{\circ}$),一般可用河床纵坡角代替; D_a 为泥石流土体的平均粒径(m), $D_a = \sum_{i=1}^n P_i D_i$, i 为土体颗粒分组数; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 ; P_i 为第 i 组颗粒在级配曲线上所占的重量的最大粒径(m), D_m 为该组颗粒的最小粒径(m); a_i 为数字值,一般取 $0.013 \sim 0.042$ 。当 $\left(\frac{C_s}{C_v} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 > 0.071$ 时, $a_i = 0.042$; C_v 为水石流体积浓度; C_s 为水石流体的极限体积浓度; φ_m 为泥石流体内摩擦角($^{\circ}$)。

在完全惯性范围内,二维泥石流模型中流速分布为

$$v_s = \frac{2}{3d} \left\{ \frac{g \sin \theta}{a_i \sin \varphi_s} [C_d + (1 - C_d)] \frac{\rho_m}{\sigma} \right\}^{\frac{1}{2}} \left[\left(\frac{C_s}{C_d} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \left[h^{\frac{3}{2}} - (h - y)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (1.34)$$

式中: θ 为泥石流沟床坡角($^{\circ}$); φ_s 为动摩擦角($^{\circ}$); C_s 为最大的可能静止体积浓度; d 为固相颗粒直径(m); σ 为固相颗粒密度(g/m^3); ρ_m 为浆体的密度(g/m^3); C_d 为浆体中砂砾固相体积浓度。其中, C_d 由下式计算:

$$C_d = \frac{\rho_m \tan \theta}{(\sigma - \rho_m)(\tan \varphi - \tan \theta)} \quad (1.35)$$

式中: φ 为沟床内物质的内摩擦角($^{\circ}$)。

根据 Bagnold 实验,当 $C_d < 0.81 C_s$ 时, $a_i = 0.042$ 。较大的 a_i 值可解释沟床面沉积物的不同速度,尤其是床面粒径较大的砾石在上层泥石流体的作用下发生移动的现象,各种条件下精确的 a_i 值需依赖于大量的实验数据予以统计。式(1.34)可解释泥石流流体垂直断面上的流速分布,当 $h = y$ 时,退化为泥石流表面流速公式。

2. 钱宁水石流公式

钱宁教授认为,水石流粗大颗粒的运动阻力主要取决于颗粒离散力,介质的黏滞阻力相对很小,可以忽略不计。依据 Bagnold(1954)饱和条件下的颗粒离散剪切力 τ_p 表达式

$$\tau_p = K_1 \rho_s D^2 \left[\left(\frac{S_{vm}}{S_v} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^{-2} \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 \quad (1.36)$$

式中: K_1 为系数; $(S_{vm}/S_v)^{\frac{1}{3}} - 1 = 1/\lambda$, 即线性浓度 λ 的倒数。当颗粒间流体变形产生的阻力可以忽略不计时, τ_p 在恒定条件下与水流剪切力

$$\tau = [S_v(\gamma_s - \gamma) + \gamma](H_c - y) \sin \theta \quad (1.37)$$

保持平衡, 即

$$K_1 \rho_s (\lambda D)^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)^2 = [S_v(\gamma_s - \gamma) + \gamma](H_c - y) \sin \theta \quad (1.38)$$

积分式(1.38)取边界条件 $y=0$ 处, $v=0$, 并令 $\sin \theta = I_c$, 则得

$$v = \frac{2H_c}{3D\lambda} \sqrt{\frac{gH_c I_c}{K_1}} \left[S_v + \frac{\gamma}{\gamma_s}(1 - S_v) \right]^{\frac{1}{2}} \left[1 - \left(1 - \frac{y}{H_c} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \quad (1.39)$$

在 $y=H_c$ 处, $v=v_{\max}$, 故

$$v_{\max} = \frac{2H_c}{3D\lambda} \sqrt{\frac{gH_c I_c}{K_1}} \left[S_v + \frac{\gamma}{\gamma_s}(1 - S_v) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.40)$$

由式(1.39)和式(1.40), 可将流速分布以速度差的形式表达:

$$\frac{v_{\max} - v}{v_{\max}} = \left(1 - \frac{y}{H_c} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (1.41)$$

已知横断面平均流速

$$v_c = \frac{1}{H_c} \int_0^{H_c} v dy$$

则平均流速表达式为

$$v_c = \frac{2H_c}{5D\lambda} \sqrt{\frac{gH_c I_c}{K_1}} \left[S_v + \frac{\gamma}{\gamma_s}(1 - S_v) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1.42)$$

式中: S_v 为泥沙体积浓度。

3. 颗粒流公式

$$v_c = \frac{1}{n} \frac{1}{a_p} H_c^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (1.43)$$

$$a_p = \left(1 - \frac{XS_v}{S'_{vm}} \right)^{-\frac{2}{3}} \quad (1.44)$$

式中: a_p 为水石流内部阻力因子; X 为粗颗粒占总重的比例; S'_{vm} 为粗颗粒层平均浓度; 其余物理变量同前。

1.2 泥石流冲击力

实施泥石流治理工程以及预测泥石流沟岸在泥石流作用下的演化过程, 其关键环节是确定泥石流的冲击力。由于泥石流体物质成分的多相性、泥石流暴发时间的不确定性以及其强大的毁损性, 目前国内外在泥石流冲击力计算方面的研究进展缓慢, 现有泥石流冲击力计算方法中比较成熟的有 3 种, 即流体动压法、船筏撞击法和地貌形迹法。

1.2.1 流体动压法

根据流体力学,流体动压力公式一般表示为

$$P = \gamma_c v_c^2 \quad (1.45)$$

式中: γ_c 为泥石流体的平均容重(kN/m^3); v_c 为泥石流体平均流速(m/s); P 为单位面积上的流体压力(kPa)。

式(1.45)对于一般均匀流体比较适用,而对于泥石流,计算值偏小。康志成等根据云南蒋家沟 1974—1975 年冲击力测试资料对式(1.45)进行了修正,表达式为

$$P = k\gamma_c v_c^2 \quad (1.46)$$

式中: k 为泥石流不均匀系数, $k=2.5\sim4.0$; 其余物理量同前。

1.2.2 船筏撞击法

由于泥石流的冲击力比水流大得多,在成昆铁路、东川地区公路沿线,有多处桥梁墩台被冲击毁损乃至冲断。在泥石流沟中的桥梁墩台设计时,冲击力为主要横向设计荷载,在泥石流冲击力公式尚不完备之前,目前国内暂行采用船筏撞击力公式计算泥石流块石冲击力。冲击力公式为

$$P = \gamma_0 v_c \sin \alpha \sqrt{\frac{W_0}{c_1 + c_2}} \quad (1.47)$$

式中: P 为泥石流体中巨石的集中冲击力(N); γ_0 为动能折减系数,对圆端属正面撞击取 0.3; W 为单个块石的质量(kg); α 为桥墩受力面与泥石流冲击力方向所夹的角($^\circ$); c_1 和 c_2 为巨石及桥梁墩台圬工材料的弹性变形系数(m/kN),采用船筏与墩台撞击的经验取值, $c_1 + c_2 = 0.005 \text{m}/\text{kN}$ 。

1.2.3 地貌形迹法

大量调查显示,每次泥石流活动后均会在防治结构或泥石流沟岸坡出现大量的冲击形迹,如冲击坑、冲蚀槽等,也会在泥石流沟内残留大量的沉积物。因此,把泥石流体概化为固、液两相流体,根据泥石流分相流速计算理论建立泥石流两相冲击力计算方法,并由泥石流冲击形迹计算泥石流冲击时间,可以有效地弱化现有冲击力的不确定性,并且可以在泥石流暴发后根据现场调查、取样分析来估算泥石流活动期间的冲击力及冲击时间。

泥石流在冲击防治结构时,表层泥石流体具有壅高现象,一般壅高 0.8~1.0m。壅高流体内富含固相颗粒,颗粒近似呈抛物线向上游抛出而形成与拦挡结构垂直的近似纵向颗粒及浆体环流,泥石流体通常形成顺时针环流和逆时针环流,分界点一般在泥石流体深度的 2/3 处,其上为顺时针环流,其下为逆时针环流(图 1.1)。顺时针纵向环流从泥石流体表层向下逐渐减弱,逆时针环流内固相颗粒近似呈 S 形,沿着流体地层偏转进入速流槽。逆时针纵向环流对泥石流沟床具有较强的掏蚀作用,可视为局部侵蚀。每次泥石流后,在防治结构面墙或泥石流沟岸均会留下大量的冲击形迹,在防治结构面墙形成

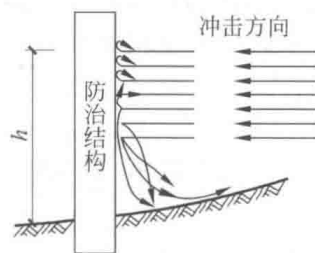


图 1.1 泥石流冲击模式