

文章编号: 1000-0887(2004)11-1150-07

泥石流对速流结构的磨损作用研究^{*}

陈洪凯^{1,2}, 唐红梅¹, 吴四飞¹

(1. 重庆交通学院 岩土工程研究所, 重庆 400074;

2. 重庆大学 西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 重庆 400044)

(戴世强推荐)

摘要: 泥石流对砼防治结构的磨损是泥石流研究极其薄弱的环节, 泥石流磨损大大缩短了防治结构的有效使用年限。作为大型特大型公路泥石流有效防治结构的速流结构, 因泥石流的磨损使其有效使用寿命缩短了近三分之一。基于泥石流两相流流速计算理论, 研究了泥石流对速流结构的磨损机理, 包括均质浆体对速流槽的磨蚀机理和固相颗粒对速流槽的切削机理; 基于牛顿运动原理建立了泥石流液相浆体及固相颗粒的磨损动力学方程; 运用量纲分析法构建了速流槽磨损量计算式, 计算结果与实际情况吻合。研究成果为速流结构的有效设计提供了理论依据。

关键词: 泥石流; 两相流; 速流结构; 磨损作用; 磨损量

中图分类号: P642. 23; U418. 5⁺ 4 文献标识码: A

引 言

近 20 年来, 在中国西部公路沿线已修建了数百个泥石流防治工程, 对于减轻泥石流对公路构筑物的毁损起到了显著作用^[1~7]。但是, 目前多数防治结构难于抵御泥石流的强烈冲击磨损, 如于 1999 年在川西西昌至木里干线公路平川沟修建的泥石泥防治工程(速流结构, 由汇流槽和速流槽组成), 经过 2000~ 2002 年雨季泥石流的检验, 其导排效果极其显著, 消除了 40 余年来每年雨季必发生的道路泥石流毁损及交通断道。但是, 速流结构的速流槽底部磨蚀显著, 磨蚀深度 3.5 cm 左右, 砼壁面出现典型的磨蚀沟槽、冲蚀坑及砼保护层脱落, 槽底部的钢筋局部外露, 使防治结构的有效使用年限缩短了近三分之一^[8]。云南东川大桥拦河坝过流断面的块石钢筋砼、钢轨拦砼等护面均只能使用 2~ 3 年, 最多不超过 5 年即被磨损, 坝体严重毁损^[9]。2001 年夏天在新疆 G217 线(天山公路)K631 和 K637 修建的速流结构, 速流槽经过 2002 年雨季后, 在速流槽壁面也发生了较显著的磨损痕迹。

迄今, 虽然水利水电部门在砼结构磨蚀方面的研究比较深入^[9~16], 但是这些研究均主要集中在高速含沙水流对砼结构及相关圬工的磨损方面, 难于直接应用在泥石流防治结构设计

* 收稿日期: 2003_10_21; 修订日期: 2004_07_31

基金项目: 交通部重点科技基金资助项目(95060233); 交通部跨世纪人才专项基金资助项目(95050508); 高等学校重点实验室访问学者基金资助项目; 国家十五科技攻关资助项目(2001BA604A023)

作者简介: 陈洪凯(1964—), 男, 教授, 博士, 博导, 交通部科技英才, 重庆市首批学术带头人(联系人。Tel: + 86_23_62652719; Fax: + 86_23_62652719; E_mail: Bialik@163.net)。

中,泥石流对砼结构的磨损研究尚处于起步阶段^[8]。本文基于泥石流两相流流速计算理论^[8],分别对均质泥石流浆体和固相颗粒对流速结构(high speed drain structure)(图1)的磨损机理进行分析,旨在建立各相介质对速流结构壁面混凝土材料的磨损动力学方程并计算磨损量,为速流结构的优化设计并提高其有效使用年限提供重要的理论依据。

1 速流结构磨损机理分析

泥石流是典型的固、液、气异变耦合的多相流^[9],可将其近似为由均质液相浆体和均质固相颗粒组成的两相流体^[8,17],这种流体流动对速流结构的磨损机理可近似为磨蚀机理和切削机理。

1.1 均质浆体对速流结构的磨蚀机理

泥石流浆体对速流结构的磨蚀作用是一个复杂的物理学过程,速流结构壁面混凝土材料的磨蚀性态是泥石流磨蚀力和材料抗磨力对抗作用的综合反映^[8]。速流结构壁面砼的磨蚀作用属于渐变过程,磨损首先从混凝土表面的砂浆部分开始,随着表面砂浆逐渐磨蚀掉,粗骨料不断露出表面,此时砂浆和粗骨料共同承担泥石流浆体的磨蚀作用(图2)。由于砂浆和骨料界面存在的耐磨性能差异,使得耐磨性能较好的粗骨料逐渐凸出,而水泥砂浆则不断磨蚀耗落而形成凹坑,进而使泥石流的磨蚀力主要由凸出的粗骨料承担。随着磨蚀过程的持续,当表面凹凸不平的粗糙度达到粗骨料难于与水泥砂浆连成一体时,粗骨料脱离基体而被冲走,直到下一层粗骨料露出表面而重新达到新的平衡。如此反复进行,使得壁面砼不断被磨蚀^[18]。泥石流均质浆体对速流结构壁面砼的磨蚀决定于浆体的运动速度,速流槽内同一个断面的磨蚀力较为均一,主要表现为浆体对砼的表面摩擦力。结构表面砼微观尺度的不均质性造就了泥石流体的微尺度紊流,则浆体的磨蚀力出现小尺度变异。

1.2 均质固相体对速流结构的切削机理

泥石流两相流体中固相颗粒对速流结构壁面砼主要产生切削作用,其原因是面对壁面砼的初始不均质性 or 砂浆被泥石流浆体磨蚀后出露的微凸起,在高速运动的泥石流颗粒冲击作用下发生切削(图3)。通常,泥石流固相颗粒随机地冲击壁面砼。对壁面而言,冲击力可分解为法向分力和切向分力。在法向分力作用下,颗粒的棱角刺入混凝土表面;在切向分力作用下,颗粒沿平行于混凝土表面滑动,带有锐利棱角并具有适合迎角的颗粒能切削混凝土表面而形成切屑,在切削过程中使砼表面材料产生一定程度的塑性变形和脆断。

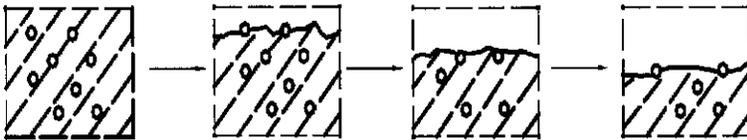


图2 泥石流浆体的磨蚀作用

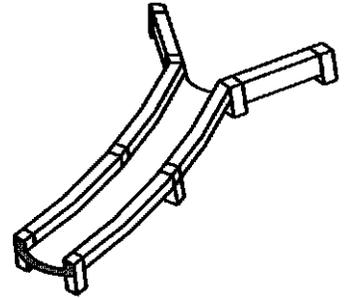


图1 速流结构外貌图

2 泥石流液相磨蚀动力学

2.1 泥石流液相磨蚀动力学方程

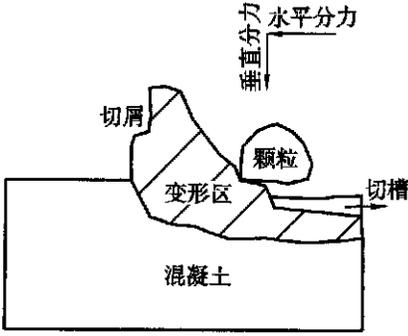


图3 泥石流固相颗粒的切削作用

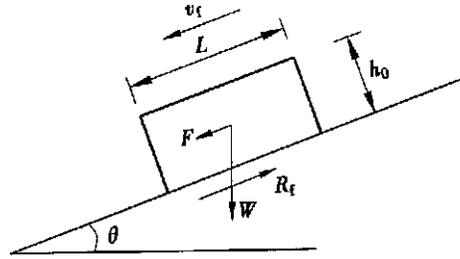


图4 泥石流浆体对速流槽底的作用力

沿速流槽取单位长度的泥石流浆体为分析对象(图4),假定同一横断面的泥石流流体流速分布均匀。根据牛顿运动定律,得

$$F + W \sin \theta - R_f - W \cos \theta \tan \varphi_s = \frac{W}{g} a, \quad (1)$$

式中, F 为泥石流浆体的冲击力(kN/m), R_f 为速流槽对泥石流浆体的摩阻力(即泥石流浆体对速流槽的磨蚀力)(kN/m), W 为速流槽内单位长度泥石流体的自重(kN/m), θ 为速流槽的倾角($^\circ$), φ_s 为泥石流浆体与砼壁面的动摩擦角($^\circ$)(一般为静摩擦角的0.4~0.5倍), a 为泥石流体的运动加速度(m/s^2), g 为重力加速度(为 $9.8m/s^2$)。其中, F 和 W 的计算式如下

$$W = bh_0 \gamma_c, \quad (2)$$

$$F = k_0 \gamma_c v_f^2, \quad (3)$$

式中, γ_c 为泥石流体的容重(kN/m^3), b 为速流槽宽度(m), h_0 为速流槽内泥石流流体最大设计深度(m), k_0 为泥石流冲击力实验系数(粘性泥石流取10~13,稀性泥石流取12~15)^{8]}, v_f 为泥石流浆体的运动速度(m/s)。

令 $A = bh_0 \gamma_c$, $B = -bh_0 \gamma_c \tan \varphi_s$, $C = k_0 \gamma_c$, $D = -bh_0 \gamma_c / g$,

则由(1)~(3)式可得泥石流浆体的磨蚀力

$$R_f = A \sin \theta + B \cos \theta + C v_f^2 + D a, \quad (4)$$

式中最关键的因子是速流槽内泥石流流体运动加速度的计算。

2.2 浆体运动加速度

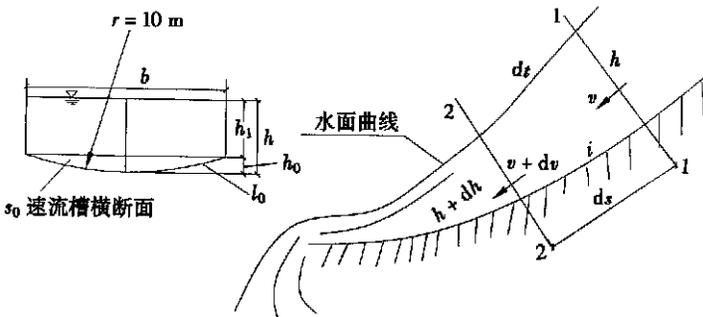


图5 泥石流浆体运动加速度分析模型

选取速流槽断面加速度计算模型如图5。已知明渠非均匀渐变流的微分方程

$$d \left[h + \alpha \frac{v^2}{2g} \right] = \left[i - \frac{KQ^2}{K^2} \right] ds, \quad (5)$$

其中, κ 为考虑泥石流流体与一般河渠道中的水体差异的修正系数; α 为动能修正系数, i 为槽底坡度, Q 为流量。(5)式可写成

$$\frac{d[h + \frac{\alpha v^2}{2g}]}{ds} = i - \frac{\kappa Q^2}{K^2}, \quad (6)$$

$$\frac{d[h + \frac{\alpha v^2}{2g}]}{v dt} = i - \frac{\kappa Q^2}{K^2}, \quad (7)$$

其中 $h = f(v) = h_1 + h_0 = Q/bv - s_0/b + h_0$, 则

$$\frac{dh}{dt} + \frac{d(\frac{\alpha v^2}{2g})}{v} = \frac{f'(v) \frac{dv}{dt} + \alpha \frac{v}{g} \frac{dv}{dt}}{v} = a \left[\frac{f'(v) + \alpha v/g}{v} \right] = i - \frac{\kappa Q^2}{K^2}, \quad (8)$$

则浆体运动加速度为

$$a = \frac{v(i - \kappa Q^2/K^2)}{f'(v) + \alpha v/g}, \quad (9)$$

式中 K 值的计算式为

$$K = g(v) = \frac{1}{n} AR^{2/3} = \frac{1}{n} \frac{Q}{v} \left[\frac{Q/v}{l_0 + 2/b(Q/v - s_0)} \right]^{2/3}, \quad f'(v) = -\frac{Q}{bv^2}.$$

3 泥石流流固相切削动力学

假定泥石流流固相颗粒的运动加速度与浆体相同, 泥石流两相流体中固相颗粒对速流槽壁面砣的切削分析模型见图 6。固相颗粒受到泥石流流体的冲击力及上覆泥石流流体的重力分别为

$$f = \frac{K_0 d_e}{M_0} (\gamma_c v_i^2 + \gamma_s v_s^2), \quad (10)$$

$$W_0 = \gamma_c h_0 / \cos \theta, \quad (11)$$

则根据牛顿运动定律, 得

$$(G + W_0) \sin \theta + f - r = \frac{G}{g} a, \quad (12)$$

整理得颗粒对速流槽壁砣的摩擦力 r 为

$$r = (G + W_0) \sin \theta + f - \frac{G}{g} a, \quad (13)$$

则单位长度的速流槽壁面砣受到泥石流流固相颗粒的切削力 R_s 为

$$R_s = \frac{b \lambda^2 r}{d_e^2}, \quad (14)$$

式中, d_e 为颗粒的直径(m), γ_s 为颗粒容重(kN/m³), λ 为颗粒的线浓度或体积浓度, v_s 为颗粒的运动速度(m/s), G 为颗粒的重量(kN), W_0 为受到的上覆泥石流流体重力(kN/m), f 为承受的泥石流浆体及固相颗粒的冲击力(kN/m), 其余符号同前。

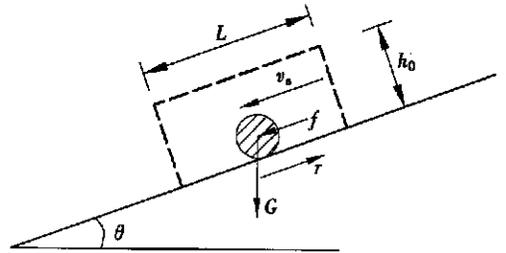


图 6 泥石流流固相颗粒对速流槽的作用力

4 速流结构磨蚀量

本文运用量纲分析法推导体积磨损量公式^[8]。由于对速流槽磨损影响最为突出的因素有: 作用在速流槽上某断面的磨损力(P , 且 $P = R_f + R_s$)、泥石流流体平均速度(v)和作用时间(t), 还有混凝土自身的强度(σ)、硬度(H), 则速流槽壁面砣磨损量 δ 状态方程为

$$\delta = f(P, v, t, \sigma, H), \quad (15)$$

式中共有物理量 6 个, 其中自变量为 5 ($k = 5$), 选择 P 、 v 和 H 三个物理量作为基本物理量, 则上式可用 3 个无量纲数组成的关系式来表达, 这些无量纲数 π 为

$$\pi = \frac{\delta}{tP^x v^y H^z}, \quad (16)$$

$$\pi_3 = \frac{t}{P^{x_3} v^{y_3} H^{z_3}}, \quad (17)$$

$$\pi_4 = \frac{\sigma}{P^{x_4} v^{y_4} H^{z_4}}. \quad (18)$$

因为由基本物理量所组成的无量纲数均等于1, 即 $\pi_1 = \pi_2 = \pi_5 = 1$, 并且 π 、 π_3 、 π_4 均为无量纲数, 则(16)式右端分子与分母的量纲应当相同, 可将(16)式写成

$$\delta J = P J^x v J^y H J^z. \quad (19)$$

用 FJ 、 LJ 和 TJ 来表示(19)式, 则有

$$L^3/TJ = FJ^x L/TJ^y F/L^2J^z = FJ^{x+z} LJ^{y-2z} TJ^{-y}. \quad (20)$$

(20)式两端相同量纲的指数应该相等

对 F 而言

$$x + z = 0. \quad (21)$$

对 L 而言

$$y - 2z = 3. \quad (22)$$

对 T 而言

$$-y = -1. \quad (23)$$

联解(21)~(23)式得

$$x = 1, y = 1, z = -1,$$

将其代入(16)式得

$$\pi = \frac{\delta}{tPvH^{-1}}, \quad (24)$$

同理可得到 π_3 和 π_4 表达式

$$\pi_3 = \frac{t}{P^{-1/2} v^{-1} H^{1/2}}, \quad (25)$$

$$\pi_4 = \frac{\sigma}{H}. \quad (26)$$

根据 π 定理, 可用 π 、 π_1 、 π_2 、 π_3 、 π_4 、 π_5 组成表征材料磨损的无量纲数得关系式

$$\pi = f(1, 1, \pi_3, \pi_4, 1) \quad (27)$$

即

$$\frac{\delta}{tPvH^{-1}} = f\left[\frac{1}{P^{-1/2} v^{-1} H^{1/2}}, \frac{\sigma}{H}\right], \quad (28)$$

进而可得

$$\delta = f\left[\frac{\sqrt{Pv}}{\sqrt{H}}, \frac{\sigma}{H}\right] \frac{tPv}{H}. \quad (29)$$

由(29)式可见, 速流槽底部壁面砟的体积磨损量与作用在其上的荷载、泥石流速度的大小成正比而与壁面砟的硬度成反比。定义速流槽壁面砟或圪工材料的抗磨损系数为 ζ , 且:

$$\zeta = \frac{1}{H} f\left[\frac{\sqrt{Pv}}{\sqrt{H}}, \frac{\sigma}{H}\right], \quad (30)$$

则(29)式变为

$$\delta = \zeta tPv. \quad (31)$$

(31) 式即为速流槽底部壁面砼的体积磨损量计算式, 磨损厚度及磨损速度分别由(32)和(33)式计算:

$$e = \frac{\delta}{b}, \quad (32)$$

$$v_0 = \frac{e}{t}, \quad (33)$$

式中, δ 为速流槽底部壁面砼的体积磨损量(m^3/s), e 为平均磨损厚度(m), b 为速流槽宽度(m), t 为速流槽发生磨损的累积时间(s), ζ 为速流槽砼或圬工材料的抗磨损系数(m^3/kN)。根据文献[8]的研究, 混凝土材料的抗磨损系数 $C15$ 、 $C25$ 、 $C30$ 和 $C40$ 分别为 $1.13 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kN}$ 、 $4.39 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{kN}$ 、 $2.74 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{kN}$ 和 $1.33 \times 10^{-12} \text{ m}^3/\text{kN}$ 。

5 工程应用

位于四川西南西昌至木里干线公路的平川泥石流, 1999 实施了速流结构示范工程, 速流结构用 $C30$ 现场浇筑, 从 1999 至 2002 年共发生 3 次泥石流, 每次持续时间 6~8 小时, 距离速流槽顶部 15 m 附近的速流槽底发生显著磨损, 壁面砼平均磨损深度 3.5 cm 左右。该泥石流的实验参数及速流结构相关取自文献[8], 分别为

$$d_e = 6.31 \text{ cm}, \quad \gamma_c = 17.3 \text{ kN/m}^3, \quad \gamma_s = 22.5 \text{ kN/m}^3, \quad \theta = 27^\circ, \quad \varphi = 12.03^\circ,$$

$$\lambda = 0.0157, \quad h_0 = 3.2 \text{ m}, \quad b = 6.0 \text{ m}, \quad k_0 = 13, \quad v_f = 9.7 \text{ m/s}, \quad v_s = 9.06 \text{ m/s}.$$

由(9)式计算得出距离速流槽顶部 15 m 附近泥石流体的运动加速度为 22 m/s^2 , 由(4)式和(14)式分别计算得 $R_f = 20540 \text{ kN/m}$ 、 $R_s = 76441 \text{ kN/m}$, 该处泥石流体平均速度计算为 9.38 m/s , 求得速流槽底部体积磨损量 δ 为 $0.2154 \text{ m}^3/\text{s}$ 、平均磨损厚度为 3.59 cm、平均磨损速度为 $4.5 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ 。

可见, 由本文计算方法计算的速流槽底部壁面砼的平均磨损深度与实际观察值比较吻合, 误差小于 5%, 具有足够的工程精度。

[参 考 文 献]

- [1] 唐邦兴, 章书成. 泥石流研究[J]. 中国科学院院刊, 1992, (2): 119—123.
- [2] 杜榕桓, 李鸿璜, 唐邦兴, 等. 三十年来的中国泥石流研究[J]. 自然灾害学报, 1995, 4(1): 64—73.
- [3] 章书成. 泥石流研究述评[J]. 力学进展, 1989, 19(3): 365—375.
- [4] 吴积善. 云南蒋家沟泥石流观测研究[M]. 北京: 科学技术出版社, 1990, 78—92.
- [5] 周必凡, 李德基, 罗德富, 等. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991, 65—70.
- [6] 王继康. 泥石流防治工程技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996, 37—100.
- [7] 吴积善, 田连权, 唐志成, 等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京: 科学出版社, 1993, 10—28.
- [8] 陈洪凯. 冲淤变动型沟谷泥石流治理与抗毁路基设计一体化模式[R]. 交通部重点科技基金项目, 2003, 82—98.
- [9] CHIEN Ning, WAN Zhao_hui. Mechanics of Sediment Transport [M]. Virginia: ASCE Press, 1998, 360—367.
- [10] 张远君, 王惠玉, 张振鹏, 等. 两相流体动力学[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1987, 17—90.
- [11] 陈擷华. 砼过流面抗高速挟沙水流磨损技术综述[J]. 水利水电施工, 1994, (4): 27—30.
- [12] 李学军. 磨损机理探讨及抗腐蚀材料应用[J]. 西北水资源与水利工程, 1996, 7(3): 39—46.
- [13] 尹延国, 胡献国, 崔德密, 等. 含沙高速水流状态下水工混凝土的磨损问题探讨[J]. 混凝土与水泥制品, 1999, (3): 14—16.

- [14] 黄细彬, 袁银忠, 王世夏. 含沙掺气高速水流对壁面磨蚀的分析[J]. 河海大学学报, 2000, 28(2): 27—31.
- [15] 尹延国, 胡献国, 崔德密, 等. 水工混凝土小角度冲蚀磨损特性的研究[J]. 摩擦学学报, 2001, 21(3): 126—130.
- [16] 尹延国, 朱元吉, 胡献国. 水工混凝土冲蚀磨损试验方法研究[J]. 水利水电技术, 2001, 32(3): 15—18.
- [17] 倪晋仁, 黄湘江. 高浓度固液两相流的运动特性研究[J]. 水利学报, 2002, (7): 8—15.
- [18] 海潮, 李印柏, 林新松. 粘接与表面粘涂技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996, 80—85.

Research on Abrasion of Debris Flow to High Speed Drainage Structure

CHEN Hong_kai^{1, 2}, TANG Hong_mei¹, WU Si-fei¹

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China;

2. Key Laboratory for the Exploitation of Southwestern Resources & Environmental Disaster Control Engineering of

Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;)

Abstract: As one weak topic in research of debris flow, abrasion of debris flow shortens obviously application life of control structure composed of concrete. High speed drainage structure, one of the most effective techniques to control giant debris flow disaster, has shortened one third application life due to abrasion by debris flow. Based on velocity calculation method founded by two phase theory, research of abrasion mechanism of debris flow to high speed drainage structure was made. the mechanisms includes both abrasion mechanism of homogeneous sizing and shearing mechanism of particle of debris flow to high speed drainage through structure. Further abrasion equations of both sizing and particle were established by Newton movement theory of debris flow. And abrasion amount formula of the high speed drainage through structure is set up by dimensional analysis. Amount to calculating in the formula is consistent with testing data in situ, which is valuable in design of high speed drainage structure.

Key words: debris flow; two phase liquid; high speed drainage structure; abrasion; abrasion amount