

DOI:10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2016.03.09

钢轨格栅坝在水石流防治工程中的应用

黄建明

(中国有色金属工业西安勘察设计研究院, 陕西 西安 710054)

摘要: 钢轨格栅坝对水石流灾害治理效果显著, 逐渐为工程界所接纳。文章梳理了拦挡工程设计思路, 着重阐述格栅坝的设计步骤及应注意的问题, 对泥石流重度 γ_c 、设计泥深 H_c 、水力坡度 I 、糙率系数 n 的正确取值做了详细讨论和分析; 提出了采用断面过流的几何条件和流速公式确定不同断面泥石流流速和设计泥深的方法; 建议采用水中土体的体积浓度 C_v 来确定横梁间距和治理效果; 运用量纲分析方法指出了《泥石流灾害防治工程勘察规范 (DZ/T0220—2006)》、《泥石流灾害防治工程设计规范 (DZ/T0239—2004)》(文中简称“勘察规范”、“设计规范”) 中对于块石冲击力 F_b 、扬压力 F_y 单位的错误注释。以上方法和步骤已在华山峪泥石流治理工程设计中得到了验证。

关键词: 泥石流防治; 钢轨格栅坝; 量纲分析法

中图分类号: TU42

文献标识码: A

文章编号: 1003-8035(2016)03-0052-08

Application of rail-grille-dam in prevention and control engineering of debris flow

HUANG Jianming

(Xi'an Engineering Investigation and Design Research Institute of China National Non-ferrous Metals Industry, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The rail-grille-dam has a significant effect on the prevention and control of debris flow, and is gradually accepted by the engineering circles. The paper reviews the design ideas of blocking engineering, focuses on the steps and noteworthy problems in the design process of grille-dam, discusses and analyzes the correct values of unit weight (γ_c), mean mud depth (H_c), Hydraulic gradient (I), and roughness coefficient (n); put forward a method of determining flow speed and mean mud depth of debris flow using geometrical condition of cross section flow; suggests to use the volume concentration to determine the spacing of the grid beams and evaluate the treatment effect; points out the wrong units of stone impact force (F_b) and uplift pressure (F_y) in “Code for investigation of debris flow disaster prevention engineering” (DZ/T 0220—2006) and “Code for design of debris flow disaster prevention engineering” (DZ/T 0239—2004) using dimensional analysis method. The above methods and steps have been confirmed in treatment engineering design of Huashan valley.

Keywords: prevention and control of debris flow; rail grille dam; dimensional analysis method

0 引言

我国地质灾害频发, 已成为影响社会安定和经济发展的一大不利因素。泥石流是常见地质灾害的一

种, 具有暴发突然、破坏性大的特点, 给广大山区造成了巨大的经济损失和人员伤亡。党和政府日益重视地质灾害防治工作, 广大泥石流研究人员通过理论研究与工程实践, 提出了“以防为主, 防治结合, 综合治理”

收稿日期: 2016-01-25; 修订日期: 2016-04-15

作者简介: 黄建明 (1989-), 男, 甘肃定西人, 助理工程师, 工学硕士, 主要从事地质灾害防治工程研究和设计工作。E-mail: 351363270@qq.com

的防治原则,形成了较为完善的减灾技术^[1]。

由于泥石流组成物质具有各向异性,不同类型的泥石流其动力特征各不相同,因此泥石流防治工程设计具有非标准性和风险性两大特点^[2]。泥石流防治工程设计的一般思路是限制泥石流三大形成条件中的一个或多个,以减轻或消除泥石流灾害,防治措施主要有工程和生物两大类。以各类拦挡坝为主的拦挡工程措施,有限制泥石流松散固体物质活动、减小泥石流重度等作用,在泥石流防治工程中被广泛应用。对水石流防治而言,由于其物质组成的特点,格栅坝以其节省材料、便于施工、透水拦砂、工期较短等显著优势被广泛应用。

笔者在泥石流防治工程设计过程中发现,现行规范和资料对钢轨格栅坝设计的介绍较为笼统,各学科衔接较为生硬,容易误导设计人员得出错误的计算结果。鉴于此,笔者详细总结了拦挡坝的设计过程,并以华山峪泥石流防治工程设计为例,着重对钢轨格栅坝的设计步骤、计算过程中应注意的问题以及规范中存在的一些问题做了探讨,旨在完善钢轨格栅坝设计思路与方法。

1 拦挡坝设计步骤及需要注意的问题

1.1 确定总体思路

泥石流防治工程方案的选择具有较高的针对性。由于地形和施工条件所限,泥石流防治工程措施多布置在流通区,主要包括疏导和拦挡措施。合理采用拦挡坝可达到减沙、减势、控制水沙下泄量、控制流量的效果,但若坝体布置位置不利或坝体地基土不良,由于回淤和拦挡作用使得水位抬升,坝体有溃坝和坝基冲刷风险。因此,应对泥石流沟道进行多次、详细的现场踏勘,在充分认识泥石流沟道现状的基础上,论证采用拦挡工程的合理性,最终确定合理的防治工程方案。当采用拦挡坝时,应选择有利的坝体位置和符合泥石流特征的坝体类型。同时,还应注重与排导、生物等措施的有机结合,以体现地灾防治的“综合治理”原则。

1.2 初定多个拟建工程沟道断面,进行断面详测、补充勘察

通过野外踏勘,结合治理工程总体思路,选取适宜布置拦挡坝的沟道断面,并进行详细的断面测量与工程勘察。由于泥石流沟治理工程涉及流域面积大,对全流域进行大比例尺地形测量耗时耗力,应尽可能使用已有资料和对局部沟道的工程测量来完成设计工作。

1.3 确定泥石流防治工程设计标准

按受灾对象和灾害程度、参考工程造价,综合确定防治工程安全等级;再依据设计规范中表2-2确定泥石流灾害主体工程设计标准。对泥石流设计标准的理解应分为两个层面:一是泥石流设计标准不等于工程有效服务期,是指防治工程的设计能力能控制相应频率的泥石流规模,在不涉及工程结构和施工质量的前提下,当发生超出设计标准的降雨频率时,工程就有失效或者毁坏的可能;二是实际工程中泥石流防治工程不一定完全按照标准降雨频率毁坏和失效,在大暴雨或暴雨等极端降雨条件下也可能发生破坏,已有学者提出了超越概率的泥石流防治工程的可靠性评价方法^[3]。以上两点体现了泥石流设计工程的风险性。

1.4 确定设计参数

泥石流设计参数包括泥石流的流体重度 γ_c 、泥石流的流量 Q_c 、泥石流流速 v_c 、泥石流设计泥深 H_c 、泥石流冲起高度、泥石流弯道超高、泥石流冲击力、地震参数等。

1.4.1 泥石流重度 γ_c

泥石流重度通过查表法、现场配方法或综合取值法确定。需要注意的是, γ_c 在勘察、设计规范中的注释和单位不统一。勘察规范表G.2中 γ_c 的单位统为“ t/m^3 ”,但设计规范式3.1-3.8注释“ γ_c 为泥石流重度(kN/m^3)”;勘察规范和设计规范中大量称 γ_c 为“泥石流重度”(见表F.1、表G.2、式I.3等),但在勘察规范式F.1中却明确定义 γ_c 为“泥石流流体密度”、式I.8中注释 γ_c 为“比重(t/m^3)”。严格地说,“重度”和“容重”具有相同的物理意义,均表示单位体积物体的重量,“比重”又称之为相对密度,是物质完全密实状态下的密度与标准状态下(标准大气压,3.98℃)水的密度的比值,量纲为一,因此勘察规范中注释 γ_c 为“比重(t/m^3)”不够准确,容易误导工程设计人员得出错误的计算结果。例如已知某泥石流密度为 $1.572 \text{ t}/\text{m}^3$,则重度 $15.72 \text{ kN}/\text{m}^3$ (取 $g=10 \text{ m}/\text{s}^2$,下同);调查所得该泥石流固体物质密度 $2.2 \text{ t}/\text{m}^3$,则固体物质重度为 $22 \text{ kN}/\text{m}^3$,可知泥石流泥沙修正系数:

$$\varphi = \frac{\rho_c - \rho_w}{\rho_H - \rho_c} = \frac{\gamma_c - \gamma_w}{\gamma_H - \gamma_c} = 0.91$$

该式计算结果量纲为一,此时以重度或密度值带入均不影响 φ 值,但在泥石流流速公式(式I.8)中,因 $\gamma_H = \rho_H g$, γ_H 亟需明确的物理意义,其取值直接影响流速的计算结果。由于式I.8为经验公式,其取值应为泥石流流体密度(t/m^3),若取 $\gamma_H = 22 \text{ kN}/\text{m}^3$,计算所

得流速偏小。出现以上问题的原因如下:

(1)不同资料中采用不同的单位制表示同一物理量。在国际单位制中,“ t/m^3 ”是密度单位而不是重度单位;但在重力单位工程制中就以质量单位为力的单位^[4],重度单位为“ t/m^3 ”。

(2)计算公式的出处。理论计算公式中每个物理量意义明确,可通过量纲运算来检验参数取值及单位的正确性;但如果计算公式为现场试验所得数据拟合的经验公式,此时各参数取值及单位应与拟合时的初始取值相同。因此,在实际工程设计时,应明确 γ_c 的物理意义、采用何种单位制和用于何种公式。

1.4.2 泥石流流量 Q_c

为确定拦挡工程高度(库容),需要对每个拟建工程断面上游的设计洪峰流量和一次泥石流输沙量进行计算。各断面设计洪峰流量可根据坝体控制流域面积与全沟流域面积所占比例,按照相关资料^[4],用式1求得工程断面处的设计洪峰流量 Q_c 。

$$Q_c = Q \cdot (A_{be}/A_{bl})^{0.8} \quad (1)$$

式中: Q_c ——工程断面处的设计流量/ (m^3/s) ;

Q ——形态断面处的流量/ (m^3/s) ,取设计标准下的泥石流洪峰流量;

A_{be} ——工程断面控制的流域面积/ km^2 ;

A_{bl} ——形态断面控制的流域面积/ km^2 。

一次泥石流过程总量和冲出固体物质量可按照规范中方法确定。

1.4.3 泥石流流速 v_c 与设计泥深 H_c 的计算

每一个工程断面的流速不同,应分别计算。目前,对于泥石流流速还没有成熟的计算方法,应根据泥石流类型,参考规范选择合适的计算公式。以西南地区(铁二院)公式为例,平均泥深可以通过对沟道形态断面的调查、实测确定,若无条件时,对于某已知断面(已知平均宽度 B 、过流流量 Q),可由断面过流的几何条件(式2)与流速计算公式(式3)联立求得泥石流流速与设计泥深。

$$H_c = \frac{Q}{v_c \cdot B} \quad (2)$$

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{\gamma_H \cdot \varphi + 1}} \cdot \frac{1}{n} H_c^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中各参数的注释和单位见规范。在运用以上公式时应注意以下问题:

(1)注意设计泥深 H_c 代替水力半径 R 的条件。式3实际是曼宁公式的修正式,用设计泥深代替水力

半径需满足一定的条件。相关规范^[5]规定,当宽深比大于100时,水力半径才可用平均水深替代;杨润、温德清等人^[6]就不同断面形状采用平均水深代替水力半径后的计算所得的流量误差做了分析,当控制流量计算误差在2%以内时,得到 $B/h > 66.3$,说明文献^[5]规定的 $B/h > 66.3$ 的标准可以适当放宽。但也指出不可用 H_c 盲目代替 R 。由于泥石流防治工程拦挡坝一般布置在沟谷狭窄处,宽深比较难达到采用泥深代替平均水深的标准,笔者建议设计时根据设计标准下过流断面的形状,计算水力半径;无测量条件时,可用设计泥深代替。

(2)关于式3中 n 的注释及取值问题。勘察、设计规范对式3中 n 做了不同的注释:勘察规范中注释 n_c 为泥石流的河床糙率、“ $1/n$ ”为清水河床糙率系数、 M_c 为泥石流沟床糙率系数;设计规范中,注释 n 为泥石流沟床的糙率系数。有文献^[7]中注释 $m_c = 1/n$ 为泥石流沟床的糙率系数。可见,以上资料中对 n 的注释不统一,而在计算流速时,糙率系数为 n 还是 $1/n$ 对计算结果影响较大,容易混淆。查阅有关资料^[8]可知,水力学中公制的糙率表达形式为 n ,为曼宁糙率系数,它与壁面的粗糙程度、渠道断面形状和水力半径、水位与流量、不规则断面、冲淤河流的形态等因素相关;也有文献^[9]指出 n 值是一个综合反映了边壁粗糙、渠槽形状和水利条件的参数,应被称作水力摩阻系数。因此,笔者建议注释 n 为“综合反映泥石流水力条件和流通环境糙率系数”,设计计算时可通过查阅当地水文手册赋值。

(3)关于泥石流水力坡度 I 的取值问题。勘察规范式(1.8)中注释“ I ——泥石流水力坡度/ $\%$ ”,一般可用沟床纵坡代替”。应当注意的是,习惯上以千分率表示沟道纵坡度,但在流速计算时 I 应带入沟道坡降值,这与采用百分率或千分率无关。

1.4.4 泥石流冲高、爬高以及弯道超高

需注意的是,泥石流运动过程中遇到障碍、上坡道或弯道处过流时才会产生相应的冲高、爬高及弯道超高,应使实际情况对所需断面进行选择计算,不必逐一计算,其计算方法详见勘察规范。

1.4.5 泥石流冲击力

泥石流冲击力与受冲击的构件材质、尺寸形状、构件的支撑条件等相关,需在明确受冲击对象后才可求得。

1.4.6 地震参数

地震参数可通过《建筑抗震设计规范》

(GB50011—2010)附录 A.0.24 查得。

1.5 确定拦挡坝类型、数量(坝址)、假定断面尺寸、确定基础埋深

首先,应根据泥石流流类型来确定拦挡坝的类型。若是泥石流、泥流时,由于其固体物质粒径小,想要起到拦渣滞留、回淤固床、降低泥石流动力等作用,必然要求坝身具有较小的渗透性,因此,常采用预留泄水孔的实体坝;而对于水石流,由于其主要有大量砂、砾和卵石组成,采用渗透性强的坝体形式,有利于水、石分离,达到拦排结合的效果。另外还可降低坝体所承受的水压力及扬压力,有利于坝体稳定。

其次,坝体数量的确定应着重考虑坝体库容和群坝调节能力,参考工程造价综合确定。一般来说,坝体越高,库容越大,但工程量和造价也随之增大。确定坝体数量时应从下游开始逐级按库容对泥沙进行分配,直至不同坝高对应的库容不小于步骤 1.4.2 中所得设计标准下泥石流在一定时间段内所产生的固体物质总量,同时应保证同一河段内拦挡坝的数量不少于 3 座,每座坝的调节能力不大于 $1/3^{[2]}$ 。库容的计算方法有等高线法、横断面法、经验公式法等,可参考文献[4]。

在确定了坝高和坝体数量后,对于考虑坝顶溢流方案的坝体还应进行溢流段设计。溢流口高度应大于设计泥深(已在 1.4.6 中确定)和安全超高之和,溢流口宽度应能满足设计标准下的过流要求;埋深应能满足抗冲刷要求。对于格栅坝,中墩间距还应使横梁跨长合理,不致使块石对横梁的冲击力过大,可参考切口坝宽度取值^[10]。

1.6 假定横梁间距、评价预期治理效果

相关研究表明^[11],横梁间隔应考虑格栅坝对水石流的筛子效应,结合野外现场统计所得块石的质量分数确定,格栅坝的横梁间距从上游至下游应逐渐缩小。笔者认为,以上研究成果适用于支沟较少的泥石流沟治理,对于支沟发育的泥石流沟,因沿程均有物源补给,横梁间距的确定应建立在对坝体控制流域范围内固体物质的颗粒分析和预期治理效果的基础之上。

众所周知,对泥石流进行拦挡、减渣治理的目的,就是要经拦挡措施后将泥石流转化为高含砂水流,从而减轻危害。水流、含砂水流或高含砂水流中土体的体积浓度 C_v 应满足^[4]:

$$C_v < 1/(\gamma_s + \gamma_w) \quad (4)$$

其中: $C_v = (\gamma_c - \gamma_w)/(\gamma_s - \gamma_w)$, γ_c 、 γ_w 、 γ_s 分别为泥石流重度、水的重度和泥石流中土体的实体重度。

根据已确定的拦挡坝库容,按式 5 计算治理后水

土混合体是否为高含砂水流,若还为泥石流,说明拦挡工程拦截能力有限,应调整横梁间隔或拦挡坝布置。

$$Q_H - V' = (Q - V') \cdot C'_v \quad (5)$$

其中: Q 、 Q_H ——治理前最下游一级拦挡工程断面处的一次性过程总量(m^3)与冲出固体物质量(m^3);

V' ——各级拦挡工程拦截停淤的固体物质,与固体物质颗粒组成、格栅坝横梁间隔有关;

C'_v ——治理后自最下游一级拦挡工程流出的土水混合体中土体的体积浓度, $C'_v = (\gamma'_c - \gamma_w)/(\gamma'_s - \gamma_w)$, γ'_c 为治理后土水混合体重度。

1.7 钢轨格栅坝荷载分析

钢轨格栅坝主要由三部分组成:钢轨横梁、边墩、中墩,对于格栅坝的受力分析也应从三种不同的受力构件出发。

横梁荷载分析考虑三种工况:空库顶部受冲击横梁(工况 A)、空库中下部未受冲击横梁(工况 B)和满库下部横梁(工况 C)。不同工况横梁所受荷载及组合见表 1。对钢轨浇筑于坝体墩及中墩的格栅坝,求解块石冲击力时应视其为两端固定梁而不是简支梁,运用弹性力学理论进行求解^[10]。

边墩、中墩荷载分析时考虑空库、半库、满库三种工况,再结合有无地震,共分为六种工况。所受荷载及组合见表 2。对于边墩和中墩,按悬臂梁计算块石冲击力。

表 1 钢轨格栅坝横梁设计工况

Table 1 Project conditions of cross beams of rail grille-dam

所受荷载	工 况 号		
	A	B	C
堆积体水平压力 F_{dl}'	/	/	√
泥石流水平压力 F_{dl}	√	√	/
整体冲击力 F_δ	√	/	/
大块石冲击力 F_b	√	/	/

因同一沟道内不同坝体断面处的泥石流流速不同,导致与流速相关的荷载在不同断面处的大小也不相同;另外,对于同类构件而言,不同工况下所受荷载不同,甚至同一工况下不同位置的构件受力不同(如横梁)。因此应考虑最为不利的荷载条件对构件进行设计计算。例如对不同断面的边墩、中墩荷载分析时,可取几个工程断面处的最大泥石流流速来计算冲击荷载;横梁反力作用位置应为对边墩抗倾覆性最为不利的顶部横梁处。

表 2 格栅坝中墩及边墩各设计工况下的作用力

Table 2 Forces on piers and the side piers of grille-dam in different project conditions

所受荷载	工 况 号					
	A	A'	B	B'	C	C'
自重 W_b	√/√	√/√	√/√	√/√	√/√	√/√
溢流体重 W_f	√/-	√/-	√/-	√/-	√/-	√/-
扬压力 F_y	√/√	√/√	√/√	√/√	/	/
堆积体水平压力 F_{dl}'	/	/	√/√	√/√	√/√	√/√
泥石流水平压力 F_{dl}	√/√	√/√	√/√	√/√	/	/
水平水压力 F_{wl}	√/√	√/√	√/√	√/√	/	/
泥石流动水压力 σ	√/√	√/√	√/√	√/√	√/√	√/√
被动土压力 F_p	√/√	√/√	√/√	√/√	√/√	√/√
泥石流整体冲击力 F_s	√/√	√/√	√/√	√/√	/	/
块石冲击力 F_b	√/√	√/√	√/√	√/√	/	/
横梁反力 F_l	√/√	√/√	√/√	√/√	√/√	√/√
地震力 F_w	/	√/√	/	√/√	/	√/√

注:(1) 本表参考文献[10]编制;

(2) 表中“/”前表示中墩的作用力,“/”后表示边墩的作用力。

另外,在计算各荷载时应用量纲分析的方法来验证计算结果,不可迷信规范。以设计规范中块石冲击力 F_b 的计算公式(3.1-9)为例说明这一问题。

力学中各物理量量纲均可由三个基本量纲(质量 $[M]$ 、长度 $[L]$ 、时间 $[T]$)求得。加速度量纲为 $[LT^{-2}]$,则力的量纲为 $[MLT^{-2}]$,面积力的量纲为 $[ML^{-1}T^{-2}]$ 。公式(3.9-1)中各参数的量纲如下:

$$E——[ML^{-1}T^{-2}]; J——[L^4];$$

$$V——[LT^{-1}]; W——[MLT^{-2}];$$

$$g——[LT^{-2}]; L——[L].$$

则 F_b 的量纲

$$[F_b] = \sqrt{\frac{[ML^{-1}T^{-2}] \cdot [L^4] \cdot [LT^{-1}]^2 \cdot [MLT^{-2}]}{[LT^{-2}] \cdot [L^3]}} \cdot 1$$

$$= [MLT^{-2}]$$

由此可知,在国际单位制下, F_b 的单位应为 kN 而不是 kPa(设计规范中注释 F_b 的单位为 kPa),因此在对格栅坝支墩、格栅等进行荷载分析时应将大块石冲击力以集中力形式施加于构件之上。除此之外,勘察规范中式(I.20)(I.21)也给出了大块石冲击力的计算公式,但注释各参数的单位与设计规范不统一,如注释构件弹性模量 E 单位为帕(Pa),设计规范采用千帕(kPa);石块重量 W 单位为质量单位吨(t),设计规范采用 kN 等。通过量纲分析,泥石流大块石冲击力计算公式中各参数的单位应统一表述为: F_b 为泥石流大块石冲击力(kN); E 为工程构件弹性模量(kPa); J 为工程构件截面中心轴的惯性矩(m^4); V 为石块运动速度(m/s); W 为块石重量(kN); g 为重力加速度(取 $g = 9.8 m/s^2$); L 为构件长度(m); α 为石块运动方向与

构件受力面的夹角。

除了 F_b 外,同样地,对设计规范中式(3.1-7)进行量纲分析,可知扬压力量纲 $[F_y] = [(MLT^{-2})/L]$,为线性分布荷载,在设计规范中对其他参数注释单位情形下其单位应该为 kN/m,而不是 kPa;对式(3.1-8)进行量纲分析时,得出泥石流的整体冲击力的量纲 $[F_s] = [ML^{-1}T^{-2}]$,为面积力,在对构建受力分析时应按构件厚度对面积力进行线性等效。

1.8 坝身结构计算

对横梁、边墩、中墩按 1.7 中确定的荷载进行结构计算。主要包括横梁强度复核、支墩稳定计算、支墩强度计算。

(1) 横梁强度复核

在对横梁进行结构计算时,按 1.7 中确定的支撑条件和构件材质,计算构件的内力和支座反力,内力用以复核横梁横截面尺寸及材质,支座反力用于中墩或边墩稳定性分析;钢轨格栅坝横梁复核包括横梁抗弯强度和横梁腹板剪应力,可参考文献[12]。

(2) 支墩稳定性计算

主要包括中墩和边墩的抗滑、抗倾覆稳定性计算,可参照重力式挡土墙进行,但由于支墩不符合平面应变假定,因此计算过程中各种类型力的简化均应按墙长合算,验算墙体截面自重也应按墙长合算,否则将影响安全系数的大小。

(3) 支墩强度计算

主要包括支墩与地基接触面上的地基应力、支墩垂直正应力、边缘主应力、边缘剪应力。可参考文献[4]进行。

若以上验算结果不满足设计标准及要求,应重新拟定断面和构件材料。

1.9 地基计算

验算地基土的承载力是否满足要求,若不满足时可采用地基处理及加固措施,如桩基础、换填基础。

2 工程实例

2.1 工程概况

华山峪位于陕西省华阴市华山景区,地层岩性以第四系全新统以及太古界太华群为主,主要岩性为片麻岩、燕山期二长花岗岩、第四系全新统崩洪积层。华山峪沟长 6.2 km,流域面积 11.5 km²,包括 1 条主沟和 11 条支沟,另有四处岩质崩塌点。主沟道平均纵坡降 25.4%,沟道和山坡上堆积有大量的巨石、块石,平均厚度 0.5~2.5 m,沟谷两侧山坡坡度一般大于 70°,

局部近直立甚至倒转,第四系覆盖物较少,沟谷狭窄,局部仅数米宽,呈典型的“V”字型沟谷;沟内植被覆盖率小于 50%,主要为灌木;泥石流物源主要为形成区基岩崩塌、风化破碎的碎屑物、沿坡麓堆积的崩坡积块石、碎石及各泥石流沟的河道堆积物,总的物源储量约为 $216.29 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。华山峪具备泥石流形成的三大条件,易形成水石流,直接威胁华山峪沟道内游客和景区管理人员 2 000 间房、3 000 人的生命和财产安全,并对位于沟口的陇海铁路、华山村、华麓村、玉泉院及华山镇、华山景区管委会等村庄和单位构成威胁,潜在经济损失逾 2.8×10^8 元,急需治理。

2.2 防治总体思路

由于华山峪流域面积大,对整个沟道进行治理所需资金巨大。因此考虑在“形成区固源、流通区拦挡减渣、堆积区疏导”的总体方案基础上,确定了在流通区上游采用格栅坝以透水拦砂、削弱动力;下游采用砌石坝用以拦截小颗粒物质、抬升水位以束水防淤;并与既有的疏通河堤有机结合,对泥石流进行疏导,最终达到减灾目的。除拦挡工程外,对局部沟道松散堆积物较多一侧,采用 2~3 m 挡土墙进行稳固;清理和移除坡面的风化碎屑、孤石,采用 SNS 斜坡稳定系统对欠稳定岩质坡面进行防护;在部分旅游道路靠山侧、支沟沟口处修建挡土墙以稳固已有风化松散堆积体。以上措施从该沟泥石流特征出发,具有较强的针对性,符合泥石流治理非标准性设计的原则。

2.3 分项工程设计

经现场踏勘,对适合布置工程措施的沟道断面进行了详细的测量,在适宜建坝的位置进行详细勘察、照片采集等工作。在室内完成了剖面绘制、土工试验成果整理等工作。

2.3.1 泥石流防治工程设计标准

根据华山峪泥石流潜在威胁对象及泥石流发生后可能造成的损失,确定华山峪泥石流防治工程安全等级为一级,因此设计降雨强度按 100 年一遇考虑,即拦挡工程库容应能满足一次百年一遇泥石流的冲出固体物质量,且各工程构件的安全系数满足要求。

2.3.2 设计参数

经计算,华山峪泥石流重度 16.78 kN/m^3 ;设计基本地震加速度值为 0.20 g,反应谱特征周期 0.35 s;拟建工程各断面处的设计泥深、流速、流量见表 3、表 4。

2.3.3 坝体类型、数量、断面尺寸、基础埋深

根据现场踏勘及室内资料,考虑到水石流固体物质沉积时的分选性,上游六道坝体为钢轨格栅坝,以拦

截粒径大的块石;下游两道坝体为实体重力坝,用以拦截粗砂、碎石等颗粒粒径较小的固体物质,并提高水位,增加水流动能和搬运能力,减少水石流物质在下游排导渠沉积,共集中布设 8 级拦挡坝。经试算,设置 8 道拦挡工程后,拦挡工程库容达到 $2.38 \times 10^4 \text{ m}^3$,大于最下游断面(A-A')上游一次性冲出量($2.03 \times 10^4 \text{ m}^3$),已能满足拦挡要求,且满足“同一个河段内建造的拦挡坝不应少于 3 座,每座坝的调节能力不宜大于 1/3”的要求,此时对应的坝体高度见表 5;另外对坝体的溢流段进行了验算,验算结果见表 6;假定的坝体横断面尺寸见表 7。

表 3 拟建工程断面处设计泥深与泥石流流速

Table 3 Design mud depth and flow velocity of debris flow in the proposed engineering section

断面号	断面上游 坡降	断面 宽度/m	流速/(m/s)	设计 泥深/m
A-A'	0.249	24.8	5.32	0.95
C-C'	0.258	13.6	6.39	1.24
D-D'	0.259	23.8	5.08	0.87
E-E'	0.272	19.0	5.44	0.92
F-F'	0.281	11.0	6.60	1.24
H-H'	0.299	8.2	6.99	1.27
K-K'	0.327	11.8	5.74	0.87
M-M'	0.392	25.8	3.49	0.38

表 4 泥石流流量及冲出物质量

Table 4 Debris flow and volume of solid material

剖面号	坝号	上游流域 面积/ km^2	断面设计 洪峰流量/ (m^3/s)	一次过程 总量/ m^3	冲出固体 物质量/ m^3
A-A'	1#	9.761	124.64	50 702.5	20 342.5
C-C'	2#	8.800	107.59	43 765.9	17 559.4
D-D'	一	8.646	104.92	42 680.5	17 123.9
E-E'	二	8.096	95.57	38 879.1	15 598.70
F-F'	三	7.767	90.10	36 651.0	14 704.8
H-H'	四	6.712	73.23	29 791.0	11 952.5
K-K'	五	5.784	59.28	24 114.4	9 675.0
M-M'	六	3.914	34.05	13 851.7	5 557.5

表 5 拦挡工程类型及库容

Table 5 The type and storage capacity of dam

编号	有效 高度/m	类型	回淤长度/ m	断面 面积/ m^2	库容/ m^3	库容 合计/ m^3
1	5	砌石	153.0	118.5	6 043.5	
2	4	砌石	134.7	61.6	2 765.8	
一	6	格栅	91.5	73.0	2 226.5	
二	4	格栅	221.1	41.8	3 080.7	
三	4	格栅	120.0	44.2	1 768.0	23 787.2
四	6	格栅	215.8	41.2	2 963.7	
五	6	格栅	127.0	59.6	2 523.1	
六	6	格栅	120.0	60.4	2 416.0	

表 6 格栅坝过流能力复核表

Table 6 Review calculation of the flow capacity of grille-dams

编号	设计流量/ (m ³ /s)	溢流 口宽/m	溢流流 速/(m/s)	设计 泥深/m	溢流 口深/m	允许流量/ (m ³ /s)
一	104.92	14.0	6.30	1.19	2	176.47
二	95.57	14.0	6.13	1.11	2	171.65
三	90.10	14.0	6.08	1.06	2	170.20
四	81.20	14.0	5.90	0.98	2	165.22
五	73.23	14.0	5.87	0.89	2	164.44
六	59.28	14.0	5.70	0.74	2	159.53

表 7 格栅坝支墩结构尺寸

Table 7 Structural sizes of piers and side piers of grille-dams

坝体 部位	迎、背水 侧坡比	纵向 顶宽/m	靠岸 侧坡比	凌空 侧坡比	横向 厚度/m	基础 埋深/m
4 m 边墩	1:0.2	5	1:0.3	1:0.7	2.2	2
4 m 中墩	1:0.2	5	1:0.3	1:0.7	1.5	3
6 m 边墩	1:0.2	5	1:0.2	1:0.5	2.2	2
6 m 中墩	1:0.2	4.5	1:0.2	1:0.5	1.5	3

2.3.4 横梁间隔与治理效果分析

经对华山峪泥石流流固体物质颗粒分析,得小于 35 cm 粒径占其总质量的 95% 左右,重度 26 kN/m³。因

坝体控制范围内有巨石,当格栅坝间距小于 d₉₅ 时,拦截率可达 95% 以上^[10]。若横梁间距为 30 cm,按 1.6 所述进行计算,可得 $C_e = 0.031$,而 $1/(\gamma_s + \gamma_w) = 0.28$,故治理后土水混合体为高含沙水流,满足要求。

2.3.5 荷载分析与结构计算结果

按 1.7 ~ 1.9 所述,对横梁、支墩进行荷载分析,中墩采用 C25 钢筋混凝土、边墩采用 M10 浆砌石。荷载计算结果限于篇幅不做罗列,表 8 ~ 表 12 是计算参数及各构件的结构验算结果。从计算结果可知,横梁需选用 Q690 以上钢材制作的 43 号钢轨才可满足强度要求;支墩的安全系数均符合设计标准;由于格栅坝埋深 3 m 后均为基岩,且坝体支墩宽度为 7.8 m,经计算,坝体抗冲刷性能、地基承载力及其稳定性均满足要求。

表 8 泥石流基本参数

Table 8 Basic parameters of Huashan ravine debris flow

泥石流 重度/ (kN/m ³)	堆积体 重度/ (kN/m ³)	大块石 直径/ m	大块石 速度/ (m/s)	泥石流 最大流速/ (m/s)
16.78	26	1.0	3.5	6.99

表 9 横梁参数

Table 9 Parameters of beams of grille-dams

梁高/mm	γ_x	γ_y	W_{nx}/m^3	钢轨重/(kg/m)	W_{ny}/m^3	S/m^3	I/m^4	t_w/mm
114	1.05	1.20	4.5×10^{-4}	43	2.13×10^{-4}	1.33×10^{-4}	1.44×10^{-4}	14.47

表 10 支墩验算参数

Table 10 Parameters for checking calculation of piers and side piers of grille-dams

坝体部位	容重/ (kN/m ³)	轴心抗压/ kPa	抗剪强度/ kPa	轴心抗拉/ kPa	弯曲抗拉/ kPa	与地基间的 摩擦系数	弹性模量/ kPa
边墩	24	8 800	450	300	570	0.55	3.5×10^6
中墩	25	11 900	1 130	1 270	1 270	0.55	2.8×10^7

表 11 格栅坝横梁验算结果

Table 11 Checking results of beams of grille-dams

工况	整体冲击力/ kPa	石块冲击力/kN	堆积体水平 压力/kPa	泥石流水平 压力/kPa	$\frac{M_x}{\gamma_x W_{nx}} + \frac{M_y}{\gamma_y W_{ny}}/MPa$	τ/MPa
A	111.27	151.9	/	2.5	576.3	12.5
B	/	/	/	2.5	6.48	0.17
C	/	/	2.8	/	7.26	0.19

表 12 支墩安全系数计算结果一览表

Table 12 Checking results of stability of pier and side pier of grille-dams

坝体 部位	抗滑移稳定性系数						抗倾覆稳定性系数					
	工况 A	工况 A'	工况 B	工况 B'	工况 C	工况 C'	工况 A	工况 A'	工况 B	工况 B'	工况 C	工况 C'
4 m 边墩	2.25	1.34	3.49	1.71	5.46	2.12	2.77	2.02	3.24	2.27	6.15	3.45
4 m 中墩	1.37	1.09	1.50	1.11	2.24	1.48	1.64	1.35	1.74	1.41	2.22	1.73
6 m 边墩	2.82	1.54	4.24	1.87	8.06	2.49	3.56	2.32	3.67	2.36	7.42	3.68
6 m 中墩	1.68	1.19	2.21	1.44	3.44	1.91	1.70	1.22	1.71	1.22	2.50	1.62

3 结论与建议

依据泥石流勘查、设计规范中有关格栅坝设计的相关规定,通过查阅文献和工程实例计算,总结了格栅坝设计的详细步骤及注意事项,得出以下有利于泥石流防治工程设计的结论与建议:

(1) 建议勘查规范、设计规范均统一物理量的名称、表示形式及其量纲,使其物理意义明确,与其他专业学科统一;设计人员在选用和确定泥石流重度 γ_c 、设计泥深 H_c 、水力坡度 I 、糙率系数 n 四个参数时应明确参数和计算公式的出处和适用条件,以免出错。

(2) 对无实测条件的设计断面,若满足用设计泥深代替水力半径的条件,则可采用断面过流的几何条件和泥石流流速计算公式联立求得断面设计流速和设计泥深。

(3) 给出了采用治理后土水混合体中土体的体积浓度 C_s 来确定格栅坝横梁间距的思路和计算方法。

(4) 对钢轨格栅坝的各工程构件进行了详细的荷载及其组合分析,并用量纲分析方法指出设计规范中大块石冲击力、扬压力的量纲有误,应分别为集中力和线性分布荷载。

(5) 以上结论和问题已在华山峪泥石流治理工程设计中得到验证,计算结果合理。

参考文献:

- [1] 赵健. 我国泥石流灾害防治措施研究[J]. 中国水利, 2007(14): 50-52.
ZHAO Jian. Study on the prevention and control measures of debris flow in China[J]. China Water Resources, 2007(14): 50-52.
- [2] DZ/T 0239-2004, 泥石流灾害防治工程设计规范[S].
DZ/T 0239—2004, Code for design of debris flow disaster prevention and control engineering[S].
- [3] 乔建平, 杨宗佶, 陈权亮, 等. 泥石流防治工程可靠性的超越概率[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2014, 25(2): 1-6.
QIAO Jianping, YANG Zongji, CHEN Quanliang, et al. Exceedance probability analysis on reliability of debris flows control projects[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2014, 25(2): 1-6.
- [4] 周必凡, 等. 泥石流防治指南[M]. 科学出版社, 1991.

- ZHOU Bifan, et al. Guidelines for the prevention and control of debris flow[M]. Science Press, 1991.
- [5] GB50179—1993, 河流流量测验规范[S].
GB50179—1993, Code for liquid flow measurement in open channels[S].
- [6] 杨润, 温德清. 曼宁公式中以平均水深代替水力半径的流量计算误差[J]. 新疆电力技术, 2008(4): 43-44.
YANG Run, WEN Deqing. The calculation error of flow using water depth instead of hydraulic radius in the Manning formula[J]. Xinjiang Electric Power Technology, 2008(4): 43-44.
- [7] 门玉明, 等. 地质灾害治理工程设计[M]. 冶金工业出版社, 2011.
MEN Yuming, et al. Engineering design of geological hazard control [M]. Metallurgical Industry Press, 2011.
- [8] 何建京. 明渠非均匀流糙率系数及水力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2003.
HE Jianjing. Roughness coefficient and turbulent characteristics for non-uniform flow in open channels [D]. Nanjing: Hehai University, 2003.
- [9] 李榕. 关于影响曼宁粗糙系数 n 值的水力因素探讨[J]. 水利学报, 1989, 12: 62-66.
LI Rong. The discussion of hydraulic factors influence on value of Manning roughness coefficient n [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1989, 12: 62-66.
- [10] 吴强, 陈征宙, 刘裕华, 等. 格栅坝在泥石流防治中的应用——以汶川地震引发的烂泥沟泥石流治理为例[J]. 防灾减灾工程学报, 2011, 31(3): 341-348.
WU Qiang, CHEN Zhengzhou, LIU Yuhua, et al. Application of grille-dam to prevention and control of debris flows: a case study on control of Lanni gully debris flows caused by Wenchuan earthquake [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2011, 31(3): 341-348.
- [11] 詹敏. 钢制格栅坝拦截泥石流效果试验研究[J]. 水土保持应用技术, 2007(4): 23-24.
ZHAN Min. Study on efficiency of steel grid dam against debris flow[J]. Soil and Water Conservation in China, 2007(4): 23-24.
- [12] GB 50017—2003, 钢结构设计规范[S].
GB 50017—2003, Code for design of steel structures [S].