

梳子坝对土石流之防治效率

连惠邦¹, 柴钊武², 柯志宗³

(1 逢甲大学水利工程学系 台湾; 2 中州技术学院机械系 台湾; 3 逢甲大学土木水利研究所)

摘要: 梳子坝是一种透过性坝体, 可以有效地防止土石流之危害。因此, 本研究经由土石流通过梳子坝的质量守恒定律和渠槽试验, 分别建立土砂流出率、泥砂体积浓度比及贮砂率等三种主要的效率参数, 作为评估梳子坝防治土石流之效率, 并据以发展出一种简单的设计模式, 可以用来设计单一梳子坝的高度、开口间距及总开口宽度等坝体几何因子。

关键词: 梳子坝; 土石流; 效率

中图分类号: P642.22

文献标识码: B

文章编号: 1005-3409(2001)01-0052-07

The Controlling Efficiency of Slit Dam for Debris Flow Disaster

LIAN Hui-bang¹, CHAI Fang-wu², KE Zhi-zong³

(1, 3 Department of Hydraulic Engineering, Feng Chia University, Taichung, Taiwan;

2 Department of Mechanic Engineering, Chung Chou College of
Technology and Commerce, Changhua, Taiwan)

Abstract: Using mass conservation law of debris flow which passing through a slit dam and laboratory experiments, this paper has established three primary efficiency parameters: the sediment flow-out ratio, sediment concentration ratio, and sediment storage rate behind the slit dam. These efficiency parameters are developed to evaluate the effectiveness of the slit dam in retarding the debris flow and to design the height and spacing of posts and the location of a slit dam or a series of slit dams.

Key words: slit dam; debris flow; efficiency

1 前言

台湾山区河道常常因土石流而造成严重之灾害, 故研发有效的治理对策来治理这种灾害是必要的。目前对土石流防治的方法中, 有结构物和非结构物之分, 其中采用结构物, 包括防砂坝、导流堤及渠道等拦蓄土石流所携出的土砂量, 来达到防灾效果是比较常用的防治方法。防砂坝是一种非透过性的混凝土坝体, 由于具有高效率的拦砂功能, 常被广泛地运用于治理山区河道之一般土砂灾害。但是, 受坝体本身透水性差、上游贮砂空间有限且易被淤埋, 以及无选择性地拦阻砂石等不利因素之影响下, 往往在土石流发生的时候, 无法适时地发挥其功能, 有效降低土石流之被害规模及范围。为了改善这种缺点,

在奥地利、日本等防砂事业较先进的国家, 则是改以透过性防砂坝(open-type dam)来治理土石流问

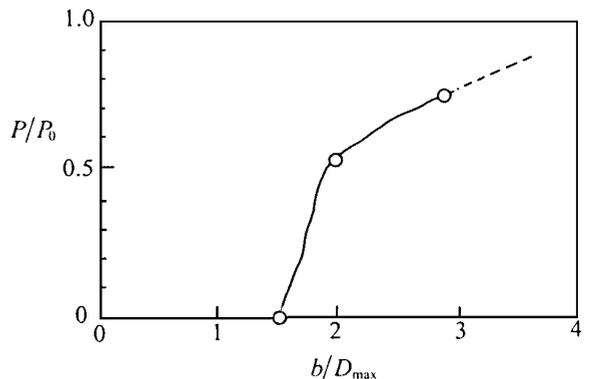


图 1 土石流尖峰土砂流出量与相对开度之关系图

* 收稿日期: 2000-11-20

作者简介: 连惠邦, 逢甲大学水利工程学系副教授; 柴钊武, 中州技术学院机械系副教授; 柯志宗, 逢甲大学土木水利研究所研究生。

题。透过性防砂坝是一种拦阻捕捉工法, 具有拦排兼备, 改变非透过性防砂坝(closed-type dam)全部拦挡为部分拦挡之功能, 允许部分对下游不会造成危害的水体及土砂颗粒穿过坝体进入河道, 且透过坝体开口的适当配置, 可选择性的拦蓄土砂, 具有拦粗排细之性能, 而有利于降低粗大颗粒对下游设施的直接冲击和破坏, 相当地实用。

透过性防砂坝对土石流之防治性能, 在日本已获得若干具体成果。渡边正幸(Watanabe, 1980)提出梳子坝开口宽度(b)会影响土石流之贮砂效率, 当相对开度(relative spacing) $b/D_{\max} < 2.0$ (D_{\max} = 最大泥砂颗粒粒径) 时, 梳子坝可降低土石流尖峰流出土砂量达 50% 以上, 如图 1 所示。随后, 池谷浩等(1980)、芦田和男等(1980)及水山高久等(1988)陆续针对各种类型透过性防砂坝进行研究, 结果显示坝体相对开度满足

$$b/D_{\max} < 1.5 \sim 2.0 \quad (1)$$

时, 对土石流所挟带的大量土砂就能产生闭塞作用, 故建议以此作为坝体开口宽度之设计标准。近来, 水山高久等(1995)认为透过性防砂坝对土石流及一般挟砂水流尖峰土砂量之调节效率, 除了与相对开度有关外, 亦受土石流临前流体泥砂体积浓度(C_a)之影响, 因而提出

$$P_Q = \frac{Q_a - Q_b}{Q_a} = 1 - 0.11 \left(\frac{L_{\min}}{D_{95}} - 1 \right)^{0.36} C_a^{-0.93} \quad (2)$$

式中: P_Q ——尖峰土砂量减少率; Q_a ——过坝前土石流之尖峰土砂流量; Q_b ——过坝后之尖峰土砂流量; L_{\min} ——格子最小间距; D_{95} ——95% 泥砂颗粒粒径; C_a ——土石流临前泥砂体积浓度。以表明坝体防治效率与相对开度和土石流临前泥砂体积浓度之关系, 并提供坝体设计之参考。

盱衡过去的相关研究显示, 透过性防砂坝对土石流的防治功能, 已被多数研究者肯定认同, 同时也提出了具体的关系式, 用以说明坝体对土石流的拦阻效率。然而, 这些研究多只采用相对开度这个参数来表征透过性坝体的几何特征, 并以此来衡量坝体之防治效率, 这可能是由于工程师们已普遍接受采用相对开度是比较简单的方式, 而忽略了坝体相对开度无法完整地展现梳子坝对土石流的治理效果, 这使得直接将之作为设计坝体几何因子的惟一参数, 则有失妥当。Johnson and Richard(1989)指出, 坝体高度、开口宽度及构筑位置是设计梳子坝的三个主要因子, 特别是影响防治效率之坝体上游贮砂

能力, 与坝体开口宽度密切相关。据此, 本研究拟由梳子坝与土石流间的土砂互动机制, 建立三种效率参数作为表征坝体对土石流的防治效率; 同时, 也将利用这三种效率参数建立一个有系统的坝体设计流程, 提供作为设计单一梳子坝之坝高(与筑坝位置相关)、相对开度及狭缝密度(slit density)等几何因子。最后, 本研究对新设梳子坝的设计流程, 举出了假想案例来加以说明, 提供工程设计之参采。

2 效率关系式(Efficiency Relations)

2.1 土砂流出率(sediment flow-out rate)

考虑表面流作用溪床堆积土层厚度及饱和度 a 及饱和度 S_b ($0 < S_b < 1.0$) 而形成土石流后, 以一定的速度向下游坝址方向行进; 在未通过坝体时, 其固相土砂颗粒和液相水体依质量守恒定律, 可分别表为

$$q^{sa} = UaC_m = UhC_a \quad (3a)$$

$$q^{wa} = Uh(1 - C_a) = q^{ws} + Ua(1 - C_m)S_b \quad (3b)$$

式中: q^{sa} ——土石流单位宽度固体泥砂颗粒流量; q^{wa} ——土石流单位宽度液相水体流量; q^{ws} ——上游供给之地表径流量; C_m ——床面堆积土体之最大泥砂体积浓度; h ——土石流流深。假设饱和度 $S_b = 1.0$, 则土石流单位宽度土砂流量和水体流量之关系, 可表为

$$q^{sa} = \frac{C_a}{1 - C_a} q^{wa}$$

以体积形式表示, 可得

$$V_{sa} = \frac{C_a}{1 - C_a} V_{wa} \quad (4)$$

式中: V_{sa} ——通过坝体前土石流之总土砂量; V_{wa} ——通过坝体前土石流之液相水体总体积。当土石流行进间遇有梳子坝阻碍时, 除了较粗的泥砂颗粒被坝体拦蓄外, 仍有部分的土砂及大量水体穿过坝体, 故通过坝体后水砂混合流体之泥砂体积浓度, C_b 依定义可写为

$$C_b = \frac{V_{sb}}{V_{sb} + V_{wb}} \quad (5)$$

式中: V_{sb} 和 V_{wb} 分别为通过坝体之土砂量及水体流量。令土砂流出率(P) 为土石流流出及进入坝体土砂量之比, 即

$$P = \frac{V_{sb}}{V_{sa}} \quad (6)$$

且泥砂体积浓度比(R , sediment concentration ratio), 被定义为

$$R = \frac{C_{db}}{C_{da}} \quad (7)$$

将式(5)代入式(4)中,经整理可得

$$P = \lambda \frac{R(1 - C_a)}{1 - RC_a} \quad (8)$$

式中: λ ——水体流出比(water squeezed out ratio)。上式表明,土石流通过梳子坝前、后,土砂流出率及泥砂体积浓度比之关系式,而土砂流出率及泥砂体积浓度比两参数可以表征坝体之拦挡效率,对评估梳子坝防治土石流效果相当有用。考虑梳子坝高度足以防止土石流越坝而下的情况,当梳子坝开口宽度近乎无限小(即 $b \rightarrow 0$) 而非透过性坝体时,理论上没有任何土砂可经由开口穿过坝体,这将使或 $R = 0$, 而坝体土砂流出率 $P = 0$ 。另外,当坝体开口宽度与溪流等宽(即 $b = B$),梳子坝将容许土砂自由流出,即 $C_a = C_b$, 且 $\lambda = 1$, 故土砂流出率为

$$P = 1 \quad (9)$$

这个关系式仅可能发在土石流流动过程中,溪流上无任何坝体拦阻之情况。

2.2 贮砂率(sediment storage rate)

在比较陡峻的溪流上构筑梳子坝时,由于坝体上游贮砂容积相当有限,使得在拦蓄较大规模的土石流时,只能贮留部分少量的土砂,而其它大部分的土砂将会越坝流出,大大降低了坝体的防治效率;换句话说,梳子坝防治效率明显地受其上游贮砂容积之影响。为了表征梳子坝上游的贮砂能力,令贮砂率为坝体上游蓄留之土砂量与其最大贮砂容积之比值,即

$$S_T = \frac{V_{sa} - V_{sb}}{V_m} \quad (10)$$

式中: S_T ——贮砂率($0 \leq S_T \leq 1.0$); V_m ——坝体上游最大贮砂容积,与溪床坡度、淤砂坡度、坝长及坝

高等因素有关,对矩形等宽度且坡度均匀的溪流而言,可表为

$$V_m = \frac{1}{2} \frac{BH^2}{I_o - I_d} \quad (11)$$

式中: B ——坝体长度; H ——坝体有效高度; I_o ——溪床坡度; I_d ——坝体上游淤砂坡度[$(2/3I_o)$]。将式(6)代入式(10)式,并整理可得

$$S_T = (1 - P) \frac{V_{sa}}{V_m} \quad (12)$$

式中: V_{sa}/V_m 系土石流携出土砂量规模与坝体上游最大可能贮砂容积之比值,可表征土石流流出规模,故称之为土石流相对规模(relative scale of debris-flow); 此外,由式(12)得知,贮砂率亦受土砂流出率 P 之影响,而土砂流出率因与进出坝体泥砂体积浓度相关,加上 Mizuyama(1995) 经试验证实,通过坝体的泥砂体积浓度与土石流速度无关。因此,贮砂率除了与坝体几何形态和渠道宽度相关外,亦受土石流相对规模和过坝前土石流泥砂体积浓度之影响,表为函数关系,可写为

$$S_T = f_1(b, b/B, D_r, V_{sa}/V_m, C_a) \quad (13)$$

式中: b ——坝体总开口宽度; D_r ——特征粒径,为 $r\%$ 的泥砂颗粒粒径。将上式利用白金汉 Π 定理进行因次分析,可得无因次方程式为

$$S_T = f_2\left(\frac{b}{D_r}, \frac{b}{B}, \frac{V_{sa}}{V_m}, C_a\right) \quad (14)$$

式中: b/D_r ——相对开度; b/B ——狭缝密度; V_{sa}/V_m ——土石流相对规模。

2.3 容许土砂流出率(Allowable sediment flow-out rate)

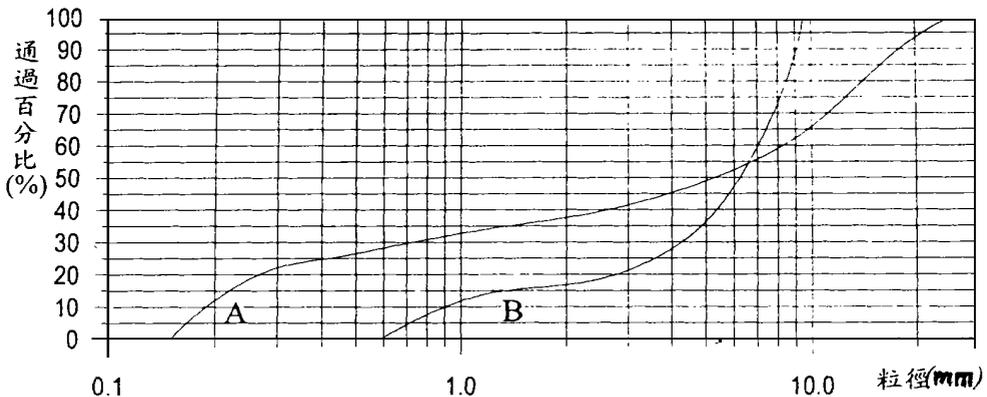


图 2 固体泥砂颗粒粒径分布曲线

虽然梳子坝可以拦蓄土石流所携出的部分土砂和粗大砾石, 但其流出的土砂量如果还是很大时, 则对下游地区民众仍具有高度的危险性。从安全上的考量, 这意味着梳子坝必须被要求设计成具有拦蓄有害土砂量, 而让无害土砂量自由流出之功能。因此, 我们假设土石流流经梳子坝后将被转化成为无害的一般挟砂水流, 或者土石流经坝体拦蓄后流出之水砂混合流体泥砂体积浓度 C_b 必须满足以下条件, 即(Lien and Tsai, 1999)

$$C_b \leq C_{\min} = \frac{\rho}{\rho_s + \rho} \quad (15)$$

式中: C_{\min} ——土石流最小泥砂体积浓度; ρ_s ——固体泥砂颗粒密度; ρ ——水体密度。将式(15)代入式(7)及(8)中, 则容许泥砂体积浓度比和土砂流出率, 可分别表为

$$R_a = \frac{1}{(s+1)C_a} \quad (16)$$

和
$$P_a = \lambda \frac{1-C_a}{sC_a} \quad (17)$$

式中: s 为比重(ρ_s/ρ)。

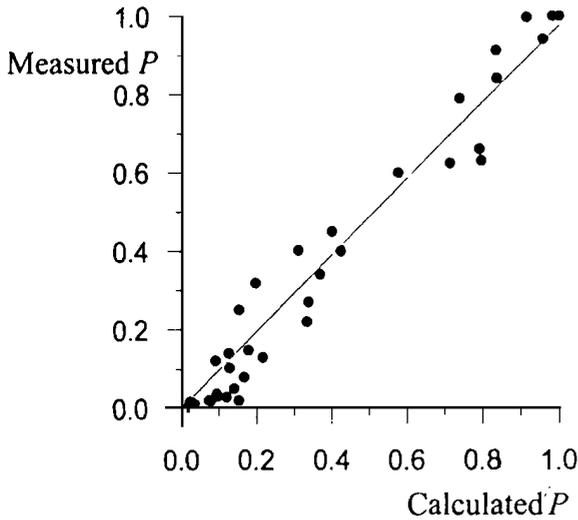


图 3 土砂流出量之实测值与计算值比较图

3 渠槽试验

为了探讨式(8)及(14)之妥当性, 本研究在长 7 m 和宽 0.2 m 坡度可调整的渠槽中, 进行数种渠槽坡度、粒径组成及坝体开口间距等之试验工作。试验之渠槽坡度有 13°、17° 及 21° 等三种, 采用平均粒径分别为 8.6 mm 和 8.8 mm 之两种土砂, 沿着渠槽观测段底部铺成 5 cm 厚的床砂质, 图 2 为其粒径分

布曲线。而土石流系由上游定量地提供 2.12 L/s 的流量, 经冲刷渠槽底部土砂形成。不同柱体间距之梳子坝模型被放置于渠槽下游端。本研究试验可分为两种类型, 一是下游无设坝情况, 另一是下游有设坝情况。当土石流通过梳子坝后, 在下游端置一容器捕捉流出之土砂量, 用以量度水流之泥砂体积浓度, 同时采另一只容器量度全部流出之土砂重量及体积。

4 试验资料分析

4.1 土砂流出率

在评估梳子坝防治效率时, 决定土砂流出率和泥砂体积浓度比间的关系式, 是相当重要的工作。根据式(8)得知, 土石流通过坝体后之土砂流出率仅受泥砂体浓度比及过坝前泥砂体积浓度之影响, 而与土石流速度无关。因此, 由试验资料依式(8)进行分析, 分析结果如图 3 所示。图 3 为实测土砂流出率 P 与经 $R(1-C_a)/(1-RC_a)$ 所计算之土砂流出率比较图。图中显示, 实测值与计算值间甚为相近, 而水体流出比 $\lambda = 0.95$, 其关系式可表为

$$P = 0.95 \frac{4(1-C_a)}{1-RC_a} \quad (18)$$

上式相关系数 $r = 0.92$ 。

4.2 贮砂率

依据前述得知, 贮砂率为与相对开度 b/D 、狭缝密度 b/B 、土石流相对规模 V_{sal}/V_m 及过坝前泥砂体积浓度等参数相关, 故若取特征粒径 D_r/D_{\max} , 则贮砂率经验公式经回归分析可得

$$S_T = \frac{4.38(V_{sal}/V_m)^{0.506} (1-b/B) 1.0C_a^{0.808}}{(b/D_{\max})^{0.207}} \quad (19)$$

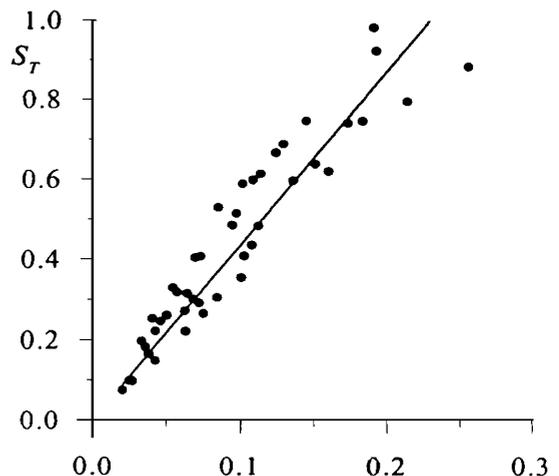


图 4 贮砂率关系图

上式仅适用于 $b/D_{max} = 0.90 \sim 5.60$ 、 $b/B = 0.45 \sim 0.85$ 及 $V_{sa}/V_m = 0.4 \sim 5.0$ 等件。如图 4 所示,其回归相关系数达 0.96。上式表明,坝体贮砂率系随着相对开度和狭缝密度增加而降低,且与土石流相对规模及过坝前泥砂体积浓度呈正比例相关,显示当土石流相对规模或其泥砂体积浓度很大时,将使坝体贮砂率增加而逐渐趋近于 1.0,此时坝体拦蓄土砂能力会骤然消失,土石流将越坝流出,对下游地区可能造成危害。

5 应用

梳子坝对土石流具有拦阻的效率已被证实。然而,有关单一梳子坝几何因子的设计流程及其适当

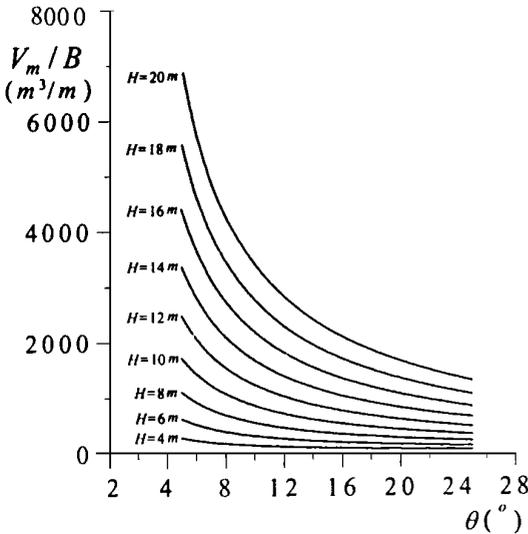


图 5 不同渠床坡度及坝高下坝体上游的单位宽度贮砂容积

的修筑位置问题,至今仍一直未被提出。为此,本研究利用土砂流出率、泥砂体积浓度比、贮砂率、容许土砂流出率和过坝前土石流泥砂体体积浓度等参数,通过有系统性的结合,发展新建梳子坝坝体几何因子之设计方法。

5.1 设计流程(Design sequence)

在进行坝体几何因子设计时,我们作了以下几个假设:

- (1) 土石流在沿着溪流流动的过程中,其最大粒径为固定,而不受坝体之影响, $D_{max} =$ 定值。
- (2) 土石流通过坝体后之泥砂体积浓度(C_b)及土砂量(V_{sb}),在到达下一座梳子坝前维持不变。
- (3) 土石流所携出的总土砂量(V_{sa})为已知。
- (4) 设计坝体高度必须考虑出水高,以防止土石流越出河道的两岸,故本研究取出水高为大于或等

于 2 倍土石流最大粒径;由于该条件与溪流两岸高度相关,对构筑梳子坝地点提出了限制条件,因而成为选取适当坝址的指标参数。

对于单一梳子坝或系列梳子坝的设计流程,兹分述如下:

(1) 资料搜集:渠道宽度(B)、渠道两岸高度(H_b)、渠床坡度($I = \tan\theta$)、最大粒径(D_{max})、静止床面泥砂体积浓度(C_m)、动摩擦系数($\tan\alpha$)、固体泥砂颗粒密度(ρ_s)、水体密度(ρ)。

(2) 假设过坝前土石流总携出土砂量(V_{sa})为已知。

(3) 由已知 $\tan\theta$ 、 C_m 、 $\tan\alpha$ 、 ρ_s 、 ρ 及 $\xi = 0.1$, 代入以下公式可得过坝前泥砂体积浓度,即(Lien and Tsai, 1999)

$$C_a = \frac{1}{2} [(C_m + x_1 + x_2) \pm \sqrt{(C_m + x_1 + x_2)^2 - 4x_1 C_m}] \quad (20)$$

式中
$$x_1 = \frac{\rho \tan\theta}{(\rho_s - \rho)(\tan\alpha - \tan\theta)} \quad (21)$$

$$x_2 = \frac{\xi}{\tan\alpha - \tan\theta} \quad (22)$$

$$\text{及 } \tan\theta \tan\alpha \quad (23)$$

(4) 在服从坝体高度必须小于或等于 $H_b + 2D_{max}$ 的先决条件下,在溪流选择两岸高度符合该条件的适当地点,决定任意坝体高度 H ; 利用式(11)或图 5 即可求的坝体上游可能的最大贮砂容积 V_m 。图 5 为显示在不同渠床坡度及坝高下坝体上游的单位宽度贮砂容积。

(5) 选择适当泥砂体积浓度比 R , 并由式(18)求得土砂流出率 P 。

(6) 利用土砂流出率 P 及土石流相对规模 V_{sa}/V_m , 由式(12)可得贮砂率 S_r 。

(7) 依定义检验贮砂率之合理性。由于贮砂率必须是小于或等于 1.0, 故检验步骤 6 所得贮砂率是否大于 1.0, 假如 $S_r > 1.0$, 则重复步骤 5 或利用图 6 计算 R 、 P 及 S_r 。

(8) 决定一适当的相对开度 b/D_{max} , 并计算柱体开口间距 $b = b/(D_{max})D_{max}$ 。

(9) 由式(19)代入已知之 C_a 、 V_{sa}/V_m 及 b/D_{max} 等值, 计算狭缝密度 b/B , 并由已知渠道宽度 B 计算总开口宽度 b 。

(10) 计算开口数及梳子坝柱体宽度, 即

$$n = \left(\frac{b}{b} \right) \quad (24)$$

$$W = \frac{B - (n \times b)}{n + 1} \quad (25)$$

式中: n 为正整数。

(11) 假如土石流过坝后之泥砂体积浓度比为小于或等于容许泥砂体积浓度比时, 则至步骤 13。

(12) 假设过坝后水砂混合流体之泥砂体积浓度及土砂量, 在到达下座梳子坝前可维持不变时, 则对于下一座梳子坝而言, 有 $V_{sa} = V_{sb}$ 及 $C_a = C_b$, 并重复步骤 4。

(13) 绘出坝体几何形态。

为了说明整个设计流程, 本研究举出以下的假案例和数据来进行梳子坝的设计和检核。

5.2 新建单一梳子坝之设计

当溪流流域面积或其土砂生产量较小, 一场土石流事件可能携出之土砂量规模有限时, 可以考虑采用单一梳子坝来拦蓄土砂, 达到消减土石流对下游地区之威胁。

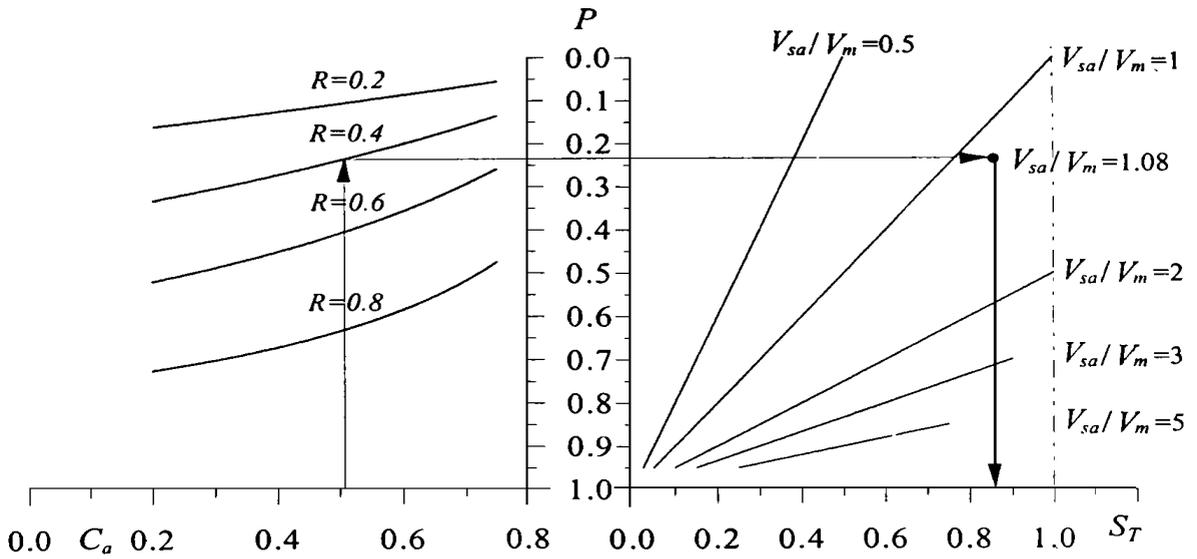


图 6 泥砂体积浓度比和贮砂率图解法

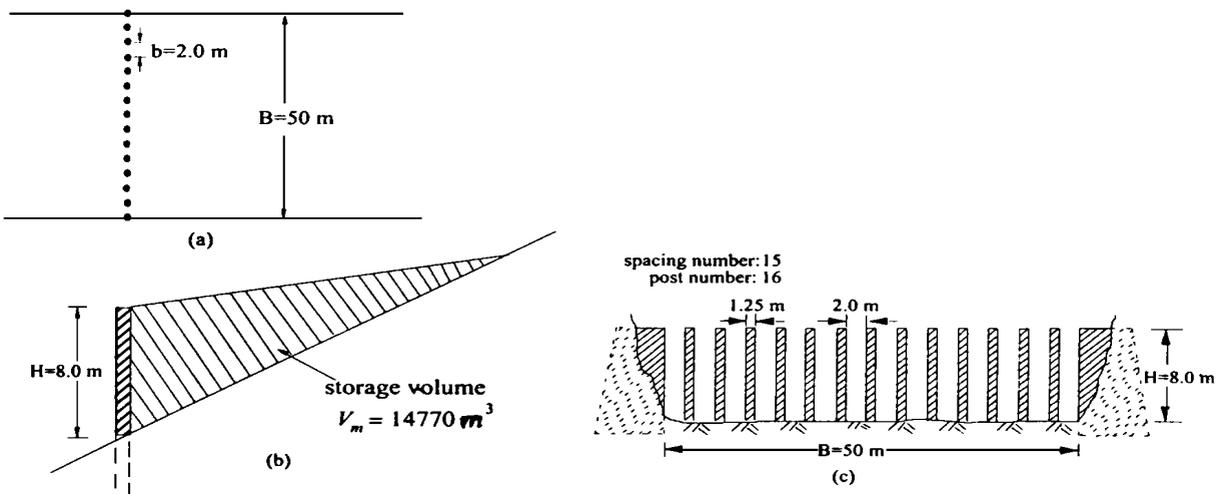


图 7 梳子坝坝体几何形态(a)上视图; (b)侧视图; (c)正视图

(1) 溪流及河床质资料: $B = 50 \text{ m}$ 、 $H_b = 12 \text{ m}$ 、 $I_o = 0.325$ 、 $D_{\max} = 100 \text{ cm}$ 、 $V_{sa} = 16\,000 \text{ m}^3$ 、 $C_m = 0.7$ 、 $\tan\alpha = 0.32$ 、 $\rho_s = 2.5 \text{ g/cm}^3$ 及 $\rho = 1.0 \text{ g/cm}^3$ 。

(2) 由(19)、(20)及(21)等方程式, 并取系数 $\xi = 0.1$, 可得过坝前泥砂体积浓度 $C_a = 0.51$ 。

(3) 由溪流已知资料, 最大坝高必须小于或等于 $14 \text{ m} (= H_b + 2D_{\max})$; 因此, 由溪流现场可能之坝址, 我们选取坝高 $H = 8 \text{ m}$, 并利用式(11)或图 6 求解坝体上游最大可能贮砂容积 $V_m = 14\,770 \text{ m}^3$, 故土石流相对规模 $V_{sa}/V_m = 1.08$ 。

(4) 初步选取泥砂体积浓度比 $R = 0.4$, 则由式(18)及(12)可得 $P = 0.234$ 及 $S_T = 0.87$ 。

(5) 因泥砂体积浓度比 $R = 0.4$ 小于容许泥砂体积浓度比 $R_a = 0.56$, 显示坝体防治效率满足安全上之需求。

(6) 任意选取相对开度 b/D_{\max} , 则开口间距为 $b(b/D_{\max})D_{\max} = 2 \times 1 = 2 \text{ m}$ 。

(7) 由已知的 $V_{sa}/V_m = 1.08$, $S_T = 0.87$, $C_a = 0.51$ 及 $b/D_{\max} = 2.0$ 等值代入式(19), 可得狭缝密度 $b/B = 0.62$, 且 $b = (b/B \cdot 30 \text{ m})$ 。

(8) 由式(26)及(27), 可得开口数 $n = b/b = 30/2.0 = 15$ 及柱体宽度 $W = (B - n \times b)/(n + 1) = 1.25 \text{ m}$ 。

(9) 如图 7 为综合以上的演算结果。图中显示, 梳子坝具有高度 8 m、开口间距 2 m、总开口宽度 30 m 及 $14\,770 \text{ m}^3$ 的贮砂量, 同时三个主要的效率参数分别为 $P = 0.234$, $R = 0.4$ 及 $S_T = 0.87$ 。

6 结 论

由于梳子坝具有拦蓄土砂之功能, 可以有效地

降低土石流之危害程度, 故本研究通过一定的理论过程, 发展出土砂流出率、泥砂体积浓度比及贮砂率等三种效率参数, 作为评估坝体之防治效率; 同时, 经由有系统性之结合, 建立了梳子坝坝体高度、柱间开口宽度及总开口宽度之设计模式。本研究试验工作系在一坡度可自 13 度至 21 度的流槽中进行, 且采用两种不同的土砂材料作为河床质, 其平均分别为 8.6 mm 和 8.0 mm, 而泥砂体积浓度和总流出土砂体积为于渠槽下游端采用两个容器分别盛接量度。

根据渠槽试验资料建立了式(19), 并证实坝体贮砂率与相对开口宽度和狭缝密度呈反比例相关, 并随着土石流相对规模 V_{sa}/V_m 和过坝泥砂体积浓度 C_a 增加而增大; 此外, 从式(18)得知, 土砂流出率随着泥砂体积浓度比及过坝前泥砂体积浓度而变化, 且由试验资料分析可得水体流出比 $\lambda = 0.95$ 。

本研究结合(18)、(19)、(20)、(21)及(22)等式建立了新建单一梳子坝坝体几何因子之设计流程, 同时分别以假想案例说明设计流程。

参考文献:

- [1] Ashida, K. and Takahashi, T. Study on debris flow control-hydraulic function of grid type open dam[J]. Annuals, Disaster Prevention Res. Inst., Kyoto Univ, Japan, 1980. 1~9.
- [2] Ikeya, H. and Uehara, S. Experimental study about the sediment control of slit sabo dams[J]. J. of the Japan Erosion Control Engineering Society, Japan, 1980. 114. 37~44(in ese).
- [3] Johnson, P. A., and Richard, H. M. Slit dam design for debris flow mitigation[J]. J. of Hydr. Engrg. ASCE, 1989, 115(9): 1 293~1 296.
- [4] Lien, H. P. and F. W. Tsai, Volumetric sediment concentration in debris flow[J]. International Journal of Sediment Research. 1999, 14(3): 23~31.
- [5] Mizuyama, T., Suzuki, H., Oikawa, Y. and Morita, A. Experimental study on permeable sabo dam[J]. J. of the Japan Erosion Control Engineering Society, Japan, 1988, 41(2): 1~25(in ese).
- [6] Mizuyama, T., Kobashi, S. and Mizuno, H. Control of passing sediment with grid-type dams[J]. J. of the Japan Erosion Control Engineering Society, Japan, 1995, 47(5): 8~13(in ese).
- [7] Watanabe, M., Mizuyama, T. and Uehara, S. Review of debris flow countermeasure facilities[J]. J. of the Japan Erosion Control Engineering Society, Japan, 1980. 115. 40~45.
- [8] 连惠邦, 等. 上游河道宽度变化对河相关系影响之研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(3): 138~146.
- [9] 连惠邦. 防砂坝下游河床局部冲刷现象之研究[J]. 水土保持研究, 1995, 2(3) 45~49.