

岷江上游桃关沟泥石流特性与工程治理

王全才¹, 刘希林¹, 孔纪名¹, 何思明¹, 陈晓栋²

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 2. 成都铁路局工程总公司, 四川 成都 610041)

摘 要:在实测调查和计算及实验论证的基础上, 分析岷江上游桃关沟泥石流活动变化趋势, 详细论证防治工程应考虑的问题, 并提出防治对策, 认为工程设计标准可按 50 a 或 100 a 一遇设计。

关键词:公路泥石流, 虚拟上移, 防护墩

中图分类号:P642. 23

文献标识码:A

桃关沟是岷江上游规模较大且最具代表性的泥石流沟之一, 因历史上“水打桃关”事件而使人铭记于心, 如今九寨沟环线公路的修建使之作为公路泥石流而更加受到人们的关注。本文在现场调查、试验的基础上, 对泥石流一些参数进行具体计算, 从而对该泥石流特性有了更深入的认识。在桃关沟泥石流治理上采取与常规治理方式不同的防治工程, 其治理的重心不在上, 而在下, 在于对公路重要工程的有效防护和对泥石流如何切入岷江的恰当处理上, 同时相对公路将泥石流堆积区虚拟上移, 以此改变由堆积区引发的一系列被动局面, 所以说目标防护的侧重性、新式结构及环保意识的体现是桃关沟泥石流工程治理的一个特色, 这也是未来同类灾害研究和工程设计中将突出反映的重要理念。本文针对桃关沟泥石流特性与工程治理作一分析, 以期对今后泥石流防治有指导意义。

1 泥石流发育条件和成因

1. 1 区域地质地理特征

都(江堰)汶(川)公路是为了满足九寨沟旅游热线的需要而即将动工修建的一条高等级公路, 全长 108 km, 溯岷江北上, 属中国大陆两大地貌单元的过

渡地带和川西 104°附近的强地震带, 因而沿线山高路险, 坡陡水深, 出露岩性常为易滑和易风化岩组如千枚岩, 坡体物质丰富且多呈松散破碎状, 地质条件比较复杂。区内岷江水系发育, 水流湍急, 流量波动很大, 冲刷携带能力甚强。岷江流经汶川县域时, 沿江水系更加发育, 冲刷切割尤为严重。桃关沟归属的汶川县气象条件反差极大, 是阿坝州年均气温、年极端气温、年均地温、年极端地温最高(高达 74 ℃)的同时也是最低(- 12 ℃以下)的一个县, 加上人为毁林和自然风化, 汶川境内的各种山地灾害非常发育, 使桃关沟成为阿坝州内目前最严重的两大泥石流沟之一。

桃关沟位于都汶路 K48+ 240~ K48+ 390, 汶川县城以南 29 km 处。由于汶川县城以南地区为典型的中高山河谷切割地貌^[1], 岷江由北东向南西流经本区, 为泥石流发育地区, 在历史上曾多次发生泥石流, 其中 1890-05-12 凌晨, 桃关沟山洪泥石流暴发, 300 多户人家除几人幸免外, 其他上千人不幸遇难, 这就是有名的“水打桃关”事件, 之后的 1960 年、1982 年、1992 年等又相继遭灾多次, 这些泥石流主要为山洪引发的稀型泥石流。

桃关沟一带出露的地层有: 元古界黄水河群, 志留系茂县群, 泥盆系月里寨群, 以及少量的第四系。

收稿日期(Received date): 2003- 09- 15; 改回日期(Accepted): 2003- 11- 02。

基金项目(Foundation item): 中国科学院知识创新项目(KZCX3- SW- 323)(1) 资助。[Supported by Knowledge Innovation Program of CAS(KZCX3- SW- 323)(1)]

作者简介(Biography): 王全才(1959-), 男, (汉族), 研究员, 主要从事滑坡整治工程设计与滑坡机理、工程结构与坡体协调性等方面的研究。[Wang Quancai(1959-), male, the Han nationality, Professor, works fields mainly covering mechanism of landslides, engineering design etc.

1

元古界岩浆岩为雪隆包岩体,该岩体呈北北东向椭圆形,侵入元古界黄水河群,与上覆奥陶系大理岩呈不整合接触,面积 236 km^2 。志留系茂县群出露的岩性下部为灰绿色、黑色千枚岩,上部为灰绿色、深灰色千枚岩夹变质的砂质灰岩,第四系分布在岷江河谷桃关沟口处。从沉积物的分布特征分析,海拔 $1\,650 \text{ m}$ 高程以上沟谷中主要为更新世的冰川(冰水)沉积,考察发现在桃关沟沟口堆积有全新世河流与泥石流沉积。

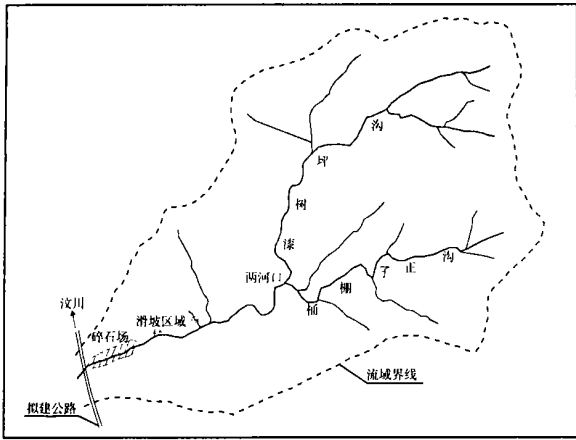


图1 桃关沟流域平面示意图

Fig. 1 Sketch map of Taoguan ravine drainage basin

1.2 区域地貌及水文特征

岷江的西侧为北东向的雪隆包~山葱岭山脉,其中最高峰雪隆包海拔 $5\,314 \text{ m}$ 。雪隆包山位于绵竹镇西北,东西宽 14 km ,南北长 24 km ,面积 236 km^2 。是“晋宁期”地壳运动时期形成的古老陆壳基底,经多次构造活动的作用后隆起成山,形成“雪隆包岩体”。

岷江的东侧为北东向的延伸的茶坪山脉。茶坪山脉是龙门山系的延伸部分,该山脉在汶川县城南最高峰海拔 $3\,556 \text{ m}$,由茂县延入本区,在地质构造上属于“北川~宝兴复背斜褶皱带”、“彭灌杂岩”的构造山,桃关沟就发育在绵竹镇东南的崇山之中。

桃关沟位于区域性大断裂带——茂汶断层的中段,是一条北东走向的压扭性大断裂,经汶川三江耿达、草坡、绵竹、玉龙、威州、雁门等地,上盘(北西盘)向南仰冲,下盘(南东盘)向北俯冲。扭动方式为逆时针。从宝兴县向北东经芦山县北端羊子岭,延伸

到汶川耿达,至绵竹后分为两支,一支沿牟托一十里铺复背斜经威州、三尖山等地延伸入茂县;另一支沿该复背斜南东侧经威州、雁门到茂县,断层走向 $NE30^\circ \sim 45^\circ$,总体约 40° ,倾向 $300^\circ \sim 330^\circ$,倾角 $45^\circ \sim 80^\circ$,长 156 km 以上,在汶川县境内长 113 km 。断层自古生代以来一直在活动,卷入地层十分破碎,羽状节理裂隙极为发育,是龙门山构造带主要发生地震的断裂之一。断层分3段:南四段:羊子岭~耿达;中段:耿达~绵竹一带;北东段:绵竹~茂县以东。

桃关沟所属区域气候具明显的垂直分带特征,随地势由东南向西北上升气候具明显的垂直分带性。在汶川县以南为南温带半湿润季风气候区。在岷江两侧高山区,海拔 $1\,500 \text{ m}$ 以上为中温带湿润季风气候区,海拔 $2\,300 \text{ m}$ 以上为北温带季风气候区和寒带季风气候区。气候温暖湿润,四季分明,夏季湿热,冬季温和,气温年较差小,具无霜期最长,光照不足(是四川省、阿坝州少日照中心),年平均降水量 $1\,285.1 \text{ mm}$,具有多雨多涝,秋雨绵绵的特点。根据渔子溪水文站 25 a 实测,多年平均降水量为 $1\,253.1 \text{ mm}$,最大年降水量为 $1\,688 \text{ mm}$ (出现在 1964 年映秀地区),最小年降水量为 836.7 mm (出现在 1974 年),连续最大 4 个月(6~9 月)降水量为 853.2 mm ,占年降水量的 68.2% 。¹⁾

由于茂汶断层的存在,使得汶川县以南地区岩石十分破碎,桃关沟内堆积的块石和松散物质,为泥石流的发生提供了固体物质条件。

1.3 桃关沟泥石流特征、成因及性质

桃关沟沟道总体走向为南东东方向,流域面积 49.85 km^2 ,主沟长 13.25 km ,下游沟道较为平直,为宽缓的“U”型,沟口处宽 200 m ,平均宽为 140 m ,总纵比降为 14.5% 。源头海拔最高 $3\,820 \text{ m}$,沟口高程 $1\,120 \text{ m}$,相对高度 $2\,700 \text{ m}$ 。根据沟道的特点,桃关沟可分为两段:

1. 下游沟段 从沟口至两河口,沟长 5.5 km ,纵比降 4.7% ,沟道较宽,为宽阔的“U”型谷,平均宽约 170 m ,为沟道流水搬运物的主要堆积区。沟坡两侧斜坡下部普遍堆积有厚 $1 \sim 3 \text{ m}$ 的坡积层。沟口段堆积有较多的松散固体物,沟内块石以风化花岗岩、变质石英砂岩为主,细颗粒以砂砾为主,粘土物质较少。块石最大砾径 $2 \text{ m} \times 1.6 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 。距沟口 1.7 km 发育有一处滑坡,位于沟道右岸,体积约

$13 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。该滑坡在 2000 年发生,大部分物质堆积在沟内,地貌上形成倒石锥。在雨季洪水过程中坡脚部分将被水流带走,同时诱发上部坡体滑动。在距沟口 2.0 km 发育有一处坡面泥石流,位于沟道右岸,发生于 2001 年雨季。该坡面泥石流形成区高于沟底 120 m,体积约 300 m^3 。坡体顺坡面下滑,在水的参与下形成坡面泥石流。

沟口以上约 1.5 km 段为碎石场,在沟谷两侧堆积有大量的碎石在沟谷内,已严重的挤占沟道(照片 1),造成沟内大量淤积。在大的降雨过程中发生泥石流的可能性极大。



照片 1 碎石堆积的桃关沟谷
Photo 1 Debris deposits in Taoguan ravine

2. 上游沟段 从两河口至沟缘,分为两支沟。左支沟为桶棚子正沟,右支沟为漆树坪沟。桶棚子正沟长 6 km,纵比降 35.33%,平均宽约 30~ 50 m。在两沟交汇处堆积有较多的松散固体物,岩性以花岗岩、变质石英砂岩块石为主,细颗粒以砂砾为主。块石最大砾径 $2 \text{ m} \times 1.6 \text{ m} \times 1.6 \text{ m}$ 。沟道两侧有浅层变形滑动现象

2 泥石流活动发展趋势

2.1 参数计算

泥石流的流量和流速作为反映泥石流特性的两个参数,在泥石流防治工程设计中不仅控制着工程结构(如拦砂坝、桥梁、排导槽)的一些几何数据,同时也影响着其他参数的计算和选取。清水洪峰流量的计算采用水科院推荐的推理公式^[2],公式中洪峰流量径流系数 ϕ 在《四川水文手册》^[1]中由 n (暴雨公式指数)、 $\frac{\mu}{S}$ 、 τ_0 两坐标值的交点获得, τ_0 按下式^[2]计算

$$\tau_0 = \left[\frac{0.383}{\frac{\mu}{S}^{1/4}} \right]^{\frac{4}{4-n}}$$

式中 $\theta = \frac{L}{J^{1/3} F^{1/4}}$, 上式中的含义、基础参数及清水洪峰流量及泥石流洪峰流量计算结果见表 1、2。

表 1 桃关沟最大设计洪水流量

Table 1 The maximum designed flood discharge of Taoguan ravine

流域面积 F (km^2)	主沟长 L_p (km)	主沟比降 J ‰	汇流参数 m	平均雨量 \overline{H}_{24}	衰减指数 n_2	频率 P %	雨量 H_{24} (mm)	雨力 S (mm/h)	单位汇 流时间 τ_0	暴雨参数 μ (mm/h)	径流系数 ϕ	汇流时间 τ (h)	清水洪峰 流量 Q_p (m^3/s)
50	13.25	140.5	0.504	50	0.75	1	141.5	64.0	3.201	2.85	0.892	3.316	322
					2	124.0	56.0	3.336	2.85	0.875	3.476	268	

表 2 桃关沟不同频率下泥石流流量

Table 2 Debris flow discharge of Taoguan ravine under different frequencies

频率 P (%)	泥石流容重 γ_c (t/m^3)	泥石流固体容重 γ_H (t/m^3)	泥沙系数 ϕ	清水洪峰流量 Q_p (m^3/s)	泥石流洪峰流量 Q_c (m^3/s)
1	1.6	2.7	0.545	322	746
2	1.6	2.7	0.545	268	621

2.2 活动发展趋势

从泥石流堆积物粒度分析来看, 桃关沟泥石流主要以砂砾为主, 粘粒含量极少 ($< 5\%$), 容重介于 $1.4\sim 1.6\text{ t/m}^3$ 间, 属稀性泥石流。稀性泥石流在运动过程中有冲刷和淤积双重现象,^[2]特别是在后期, 冲刷作用较为明显, 但主要是将前期淤积的泥石流物质冲走。据现场考察并测量推算, 桃关沟一次泥石流最大冲刷深度一般不会超过 3 m , 研究中将桃关沟的一次泥石流最大冲刷深度定为 3.5 m , 这也是我们在表 3 中计算泥石流流速确定泥石流径流深度时的考虑。

表 3 桃关沟泥石流流速
Table 3 Debris flow velocity of Taoguan ravine

沟床糙度	清水深度	泥石流容重	固体物容重	泥沙修正系数	流面纵坡	泥石流流速
$1/n$	$h\text{ (m)}$	$\gamma_c\text{ (t/m}^3\text{)}$	$\gamma_H\text{ (t/m}^3\text{)}$	φ	$I\text{ (}\text{‰}\text{)}$	$V_c\text{ (m/s)}$
7.5	3.5	1.6	2.7	0.55	141	4.12

就一场泥石流过程而言, 桃关沟泥石流为大量泥沙石块沿沟自上而下搬运运输移的过程, 在沟口附近, 泥石流发生后是以淤积为主。由于处于岷江的一级支流, 桃关沟与入汇河的关系, 用 100 a 一遇泥石流流量分析, 基本上属于势均力敌或略显主强支弱的主一支关系。因此, 泥石流发生过程中, 岷江主河很难将泥石流冲出的固体物质迅速带走, 加上岷江河道狭窄, 容易形成堵江现象。

据当地老乡介绍和实地量测, 坎桥之间估计下切深度 $3\sim 4\text{ m}$ 不等, 主要是 7 月份洪水期间的流水冲刷和粗化作用造成的。对常流水(雨季)流量作了实测, 桃关沟中下游沟道常流水(雨季)实测流量为 $5.2\text{ m}^3/\text{s}$, 由于下游部位堆放大量的人工采石, 提供了丰富的固体物质, 沟床的下切侵蚀现象已不明显, 反而有人为造成沟床淤积加高的可能。

据《汶川县志》的记载^[1], 桃关沟所属流域为非强暴雨区, 降水特征以阴绵区和秋绵雨为主。流域内植被覆盖很好, 沟床以粗大砾石为主, 细砂和粘粒物质很少, 属山区典型的砾石质河床, 砾石磨圆度较高, 河床物质比较稳定, 重新启动参与泥石流活动较为困难。

考察认为桃关沟为低频率泥石流沟, 平均 $20\sim 50\text{ a}$ 发生一次, 通过研究, 从降水条件和松散固体物质补给情况来看, 如果桃关沟内人工采石的强度能得到有效控制, 泥石流活动将不会有增强的趋势。

据实地考察计算对桃关沟泥石流危险度进行评价, 评价公式采用刘希林《泥石流风险评价》^[3] 中推荐的最新公式, 基础数据泥石流规模 $M = 364$, 100 年泥石流发生频率 $f = 5\%$, 其它参数 s_1 (流域面积)、 s_2 (主沟长度)、 s_3 (流域相对高差)、 s_6 (流域切割密度) 和 s_9 (不稳定沟床比例) 分别为 49.9 km^2 、 13.3 km 、 2.7 km 、 1.78 km/km^2 和 53% , 最后得危险度 $H = 0.74$ 。从发展趋势看, 桃关沟泥石流活动趋势属于高度危险。其活动特点为: 各因子取值较大, 个别因子取值甚高, 从表 2 表 3 可以看出, 潜在破坏力大, 有发生大规模泥石流造成重大危害的倾向。

3 防治对策与工程设计

3.1 防治对策

桃关沟是在特殊地质条件(茂汶断层、破碎易风化岩体、强烈地震带)、特殊自然环境(中国西部两大地貌单元过渡区、中高山河谷切割地貌、气温降水变化交替地带)以及特殊人文条件(人工砍伐、肆意采石、切坡堆料)等多种不利条件下发育而成的大型和特大型稀性泥石流沟。对桃关沟危险性分析评价结果表明, 其危险度 0.74 , 属于高度危险的泥石流沟, 对公路威胁严重^[4], 甚至可造成重大灾难, 必须采取工程措施。泥石流的防治历来都包含防和治两重意义, 桃关沟以人为破坏为主, 泥石流形成和发展的根源主要在上游, 因此, 要非常有效地治理泥石流, 无论从环保、效果、还是时间尺度上考虑都理应在上游。针对桃关沟泥石流主要属于人为的大量堆积形成特点, 及时制止人为开采或恰当给予治理, 才是减轻和解除泥石流危害的关键。

解决泥石流堆积区的问题和工程考虑的目的就是要: 严禁漫流, 防止淤积, 注意冲刷, 尽快排导, 做好泥石流沟与主河道的交汇切入。桃关沟公路工程及泥石流的性质和特点已经告诉我们, 防护的对象都在堆积区, 而泥石流大规模暴发的病源, 却在远离沟口的形成区。再考虑防治工程的原则, 所以本工

程将采取与常规治理方式不同的防治工程, 将泥石流的堆积区相对公路而言虚拟上移, 巧妙改变由堆积区引发的一系列被动局面, 这一切均由特殊的拦挡坝——调控坝来完成。这样, 既起到了适量拦挡的作用, 又达到了消能调控的目的。选择性的排泄, 有目的地约束, 在设计期限内, 能够发挥应有的多重作用。同时还有利于下游沟口的改造以及泥石流沟与主河道的最佳交汇和切入。

拦挡量是设计中应认真考虑的参数, 研究表明, 拦挡坝里溢流的泥沙体积越大, 下游致灾的程度就越严重, 当 75% 的泥石流冲积物被拦挡时, 致灾能力就大大减小^[5]。

拦挡坝的有效抗御性问题, 专门的试验已经说明, 空坝状态下, 泥石流流量的峰值显然能够被大大削减, 而坝被淤满后, 同样对降低泥石流泄流量的高峰是有效的, 除非泥石流发生之前坝后的沉积物坡度已经与原始沟床的坡度一样。

桃关沟泥石流的冲刷深度在 2.5~ 4.0 m 间, 淤积深度 6~ 10 m, 设计中已予以考虑。由于泥石流威力极大, 破坏性很强, 难以约束, 所以以往防治策略上通常采取自上而下、上下游分区分级解决和综合治理的措施。鉴于这次泥石流不从源头根治, 集中到工程部位后对主体工程的冲击力相当大, 所以在工程新型结构和抗冲刷材料上都专门给与考虑。

3.2 防治工程

对桃关沟泥石流, 我们重点采用以下工程。首先在公路桥梁沿泥石流沟上游约 400 m 处, 设置一长 100.5 m 的拦挡坝, 高 8 m, 坝型采用格栅坝, 片石砼结构。该坝同时起到拦挡、消能和调控等多重作用; 在坝的下游 10 m 以及公路的上、下游分别为 20 m 和 10 m 处各修一座潜坝; 在泥石流沟的左右岸, 根据冲刷可能影响的范围和深度, 分别设置了 220 m 和 150 m 的导流堤, 导流堤高 8 m, 片石砼结构, 考虑到投资及坝下导流范围较长的具体情况, 导流堤并非全段设置, 而是根据泥石流沟两岸及沟床的具体情况实适布设; 本设计工程中弱化了排导槽形式^[6]的考虑, 原因也是考虑桃关沟泥石流的实际情况。

值得说明的是, 本工程的设计中, 为了防止强大的泥石流对桥墩的冲击破坏作用, 在两个桥墩的上游附近设置了两个具有特殊结构和功能的防护墩。在公路泥石流的桥梁防护中, 体现出一定的创新意义。

4 结语

桃关沟泥石流沟是阿坝州规模和影响都很大的泥石流沟之一, 在岷江上游具有一定的代表性。而且又归属公路泥石流, 是国家基本建设中急需解决的一类课题, 对此进行研究特别是治理工程的研究, 有很强的实际意义。

对桃关沟泥石流的防治, 治理的重心不在上, 而在下, 不在泥石流本身的有效处置, 而在于对公路重要工程的有效防护和对泥石流如何汇入岷江的恰当处理上。因此可以说目标防护的侧重性及环保意识的体现, 不仅是对旅游热线灾害点桃关沟泥石流而言, 而且应该说是今后整个灾害研究和工程设计中必须突出反映的重要理念。

参考文献(References):

- [1] General Record of Wen Chuan county[M], National Press, 1994. [汶川县志[M]. 成都: 四川民族出版社, 1994.]
- [2] Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu. Research and Prevention of Debris Flow[M]. Sichuan Science and Technology Press, 1989. [中国科学院成都山地灾害与环境研究所. 泥石流研究与防治[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1989.]
- [3] Liu Xilin, Tang Chuan. Danger Assessment on Debris Flow[M]. Beijing: Science Press, 1995. [刘希林, 唐川. 泥石流危险性评价[M]. 北京: 科学出版社, 1995.]
- [4] Zhou Bifan, Li Dji, Luo Defu, et al. Guide to Prevention of Debris Flows[M]. Beijing: Science Press, 1991. [周必凡, 李德基, 罗德, 等. 泥石流防治指南[M]. 北京: 科学出版社, 1991.]
- [5] Zhu Tianhui. Study and control of Debris Flow landslide[M]. Gansu: Science and technology Press, 1988. [朱天慧. 泥石流滑坡及其防治[M]. 甘肃科学技术出版社, 1988.]
- [6] You Yong. Optimal Hydraulic Condition of Debris Flow Drainage Canal[J]. Journal of Mountain Science, 1999, 17(3): 255~ 258. [游勇. 泥石流排导槽水力最佳断面[J]. 山地学报, 1999.]

Analysis Debris Flow Characteristic and Engineering Control in Taoguan Ravine of the Upper Reaches of Minjiang River

WANG Quarr cai¹, LIU Xi lin¹, KONG Ji ming¹, HE Si ming¹, CHEN Xiao dong²

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041 China;*

2. *General Company of Engineering of Chengdu Railway Bureau, Chengdu 610041 China*)

Abstract: Debris flow of Taoguan Ravine is a large and one of the most representative debris flow ravines. It is famous for the historical event “Water swashing Taoguan”, and nowadays it is more noticeable as a highway debris flow because of the construction of the round uighway of Jiuzhaigou. The paper gains more clearly cogniton on debris flow characteristics based on the local investigation, experiment and some parameters computer of the debris flow. The debris flow control method is different from general control engineering. Its stress lies in available defending on road engineering an properly dealing with the debris flow entring Minjiang River. Through the measure above and virtual up removal of the debris flow depositional area ralative to the road, a series of passive condition, which are induced by the deposit ional area, will be changed so emphasizing on defending of target, new structure and environmen tal consciousness are the characteristic of the debris flow control in Taoguan Ravine, and this will be an important idea in similar hazards research and engineering design.

Key words: debris flow of highway; virtual up removal; defending frasta