

文章编号: 0451—0712(2004)12—0149—06

中图分类号:P642.23

文献标识码:A

泥石流沟岸冲蚀演绎及动力学研究

陈洪凯^{1,2}, 陈野鹰¹, 唐红梅¹, 金发均³, 马永泰³

(1. 重庆交通学院岩土工程研究所 重庆市 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 重庆市 400044; 3. 凉山彝族自治州公路局 西昌市 615000)

摘 要:我国位于泥石流沟岸的公路里程累计 800 km 左右。沟岸冲蚀是公路泥石流研究的主要方面之一,是泥石流冲蚀能、岸坡抗蚀能耦合作用的表像。应用地貌学方法将泥石流沟岸冲蚀演绎过程分为 4 个阶段,即冲蚀槽形成阶段、泥石流顶托底部拉裂阶段、自重顶部拉裂变形阶段和坍塌阶段,核心是悬岸的产生及失稳。大量调查发现,沟岸坍塌失稳均主要发生在泥石流暴发期间,其主要原因是泥石流对岸坡的冲蚀作用使得岸坡产生纵向振动,增加荷载效应,减小了悬岸岩土体的刚度,进而诱发了悬岸体的坍塌。运用动力学方法建立了悬臂体系的纵向振动位移方程,据此应用牛顿第二定律便可求解获得泥石流振动对岸坡破坏的诱发荷载,并对护岸结构关键技术进行了探讨。

关键词:公路泥石流; 沟岸; 冲蚀; 演绎; 动力效应; 防治技术

公路泥石流是指发育在公路沿线对公路建构筑物的安全与稳定造成严重影响并导致公路交通中断的泥石流病害,从公路水毁角度可分为冲淤变动型沟谷泥石流、冲击破坏型沟谷泥石流和淤积破坏型沟谷泥石流^[1,2],尤其是大型及特大型公路泥石流,如新疆天山境内及川西南美姑河流域的公路泥石流,通常具有大冲大淤、毁损作用强烈等特点^[3,4,5]。陈洪凯教授等多年来致力于公路泥石流研究,建立了比较系统的公路泥石流防治技术,如速流结构、底埋隧道、翼型墩汇流结构、泥石流沟糙底及固底技术等^[1,6,7,8],取得了比较显著的经济及社会效益。然而,对于公路泥石流而言,国内外尚处于初步研究阶段,相关技术规范对公路泥石流防治尚未具有较强的针对性,这是迄今公路泥石流病害比较发育的根本原因^[9,10]。公路泥石流研究应该紧密结合公路建构筑物的特征,力求从能量角度使公路与泥石流协同组合,遵循泥石流发育及能量传输突变规律,因势利导,实施研究及防治^[1]。研

究过程中,应高度重视泥石流与防治结构以及泥石流沟岸坡、沟床等的相互作用,利用演化的观点认识公路泥石流^[11,12,13],利用泥石流两相流力学、流体力学及泥沙运动力学等^[1,14,15]建立泥石流能量传输突变理论。

在我国西部地区,公路穿越泥石流沟的方式主要包括直接纵向穿越和间接纵向穿越两类。对于后者,主要指公路沿着泥石流沟通行一定距离后在适当位置纵向穿越,而在泥石流沟岸建造的公路也称沿溪公路,这种类型的公路在我国累计 800 km 左右,在泥石流暴发期间极易被毁损。如西昌至木里的干线公路雅砻江小关沟泥石流,1998 年 7 月的 2 次泥石流,致使长约 3 km 的沿溪公路全部被毁,路基冲蚀殆尽(图 1),工程恢复所用投资 2 000 万元左右。可见,作为公路泥石流研究的核心内容之一,开展泥石流沟岸在泥石流作用下的冲蚀动力学研究,对于公路建造及养护具有比较重要的指导借鉴价值。本

基金项目:交通部跨世纪人才专项基金项目(95050508)、西部交通项目(200332822047)、交通部重点科技基金项目(95060233)及高等学校重点实验室访问学者基金资助项目成果之一

收稿日期:2004—07—27

参考文献:

- [1] 徐绍铨,吴祖仰. 大地测量学[M]. 武汉:武汉测绘科技大学出版社,1996.
- [2] 孔祥元,梅是义. 控制测量学(下)[M]. 武汉:武汉测绘

科技大学出版社,1996.

- [3] 王栋. Visual Basic 程序设计实用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2002.

文基于对泥石流沟岸冲蚀演绎机理的分析,运用动力学方法对沟岸进行动力学研究,欠妥之处,敬请专家指正。

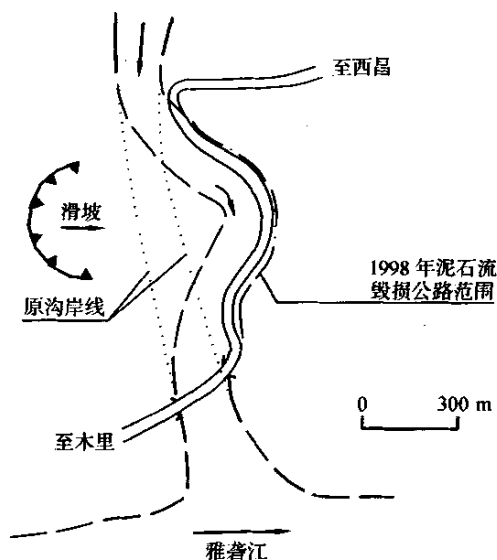


图 1 雅砻江小关沟泥石流公路水毁

1 岸坡泥石流冲蚀演绎机理

泥石流对岸坡的冲蚀主要体现在泥石流沟的弯道凹岸部位,可用地貌学方法分析岸坡冲蚀演绎机理。作为一种特殊的流体,泥石流的运动通常具有直进性^[1],在从直道或突岸进入凹岸过程中,泥石流与岸坡线呈较大角度相交。而作为固液二相体系的泥石流液体相对岸坡起到冲击、冲刷破坏作用,而固相则对岸坡除了冲击作用外尚有显著的刻划磨蚀作用。对于特定的泥石流沟,一定频率的泥石流所形成的泥石流其冲蚀作用能量沿着泥石流沟基本是恒定的,则岸坡的冲蚀模态主要受控于岸坡自身的抗蚀能力。

岸坡冲蚀是泥石流冲蚀能、岸坡抗蚀能耦合作用的表像。从地貌学的观点看,物质组成比较均匀的岸坡的冲蚀发育具有链式特性;换言之,岸坡在泥石流作用下的后退呈现冲蚀→坍塌→后退的宏观演绎过程,其中,冲蚀阶段和后退阶段具有渐变性,而坍塌阶段具有突变性。而在岸坡的每一次坍塌形成过程中,多数情况是一次或几次泥石流活动的直接结果,可称之为岸坡冲蚀的微观演绎过程。本文所指岸坡泥石流冲蚀演绎机理主要针对微观演绎过程,可分为 4 个阶段。

阶段一,冲蚀槽形成阶段。泥石流沟凹岸坡体中下部在泥石流停息时期内通常处于河流或溪流流水浸泡及冲刷过程中,岩土体强度通常较低,局部地方已经形成向岸坡内部凹陷的空腔,可称之为初始冲蚀

槽。而初始冲蚀槽在泥石流活动期间,被泥石流体不断地冲刷、切割、撞击,初始冲蚀槽规模逐渐扩大,对于比较松软的土质岸坡初始冲蚀槽向岸坡内部伸及的长度可及 2 m 左右、高度 2~3 m,而比较坚硬的岩质岸坡的初始冲蚀槽长度可及 0.4~0.6 m、高度 0.5 m 左右(图 2)。

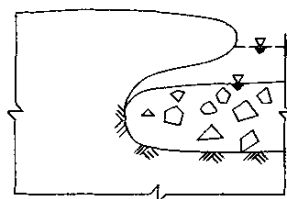


图 2 冲蚀槽形成阶段

阶段二,泥石流顶托底部拉裂阶段。岸坡内初始冲蚀槽在泥石流活动期间的逐渐扩大过程中,由于高速运动的泥石流体强烈楔入初始冲蚀槽,泥石流体除了继续冲蚀槽内侧壁并使槽向岸坡内部的长度逐渐增大外,泥石流体的竖向动力膨胀对槽上部逐渐突出的岸坡岩土体(成为悬崖)产生向上的顶托力。在泥石流顶托力作用下悬崖底部受荷拉裂,产生由下至上的拉张裂缝(图 3)。

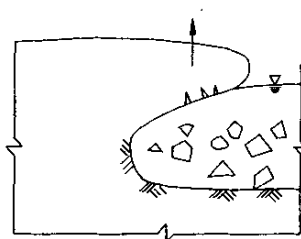


图 3 泥石流顶托底部拉裂阶段

阶段三,自重顶部拉裂变形阶段。当初始冲蚀槽发展到一定程度时,岸坡悬崖演绎到临界变形阶段,在自重作用下悬崖岩土体顶部变形加剧,出现拉裂缝(图 4)。尤其是公路位于悬崖顶部时,车辆及人畜荷载等可以加剧悬崖拉裂变形进程。

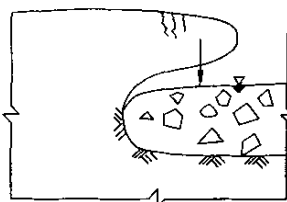


图 4 自重顶部拉裂变形阶段

阶段四,坍塌阶段。当悬崖顶部及底部拉裂缝逐渐发育至一定程度时,裂缝桥突然断裂,悬崖体处于失稳阶段而发生坍塌。

岸坡演绎的 4 个阶段中,核心是悬崖的产生及失稳。对于阶段四即岸坡坍塌,需要经过阶段二、阶段三的多次重复,每一次重复均导致悬崖规模的进一步增大及变形增大、强度衰减。调查发现,对于顶部距离泥石流沟床 15 m 左右的土质岸坡,当冲蚀槽向岸坡内部的长度超过 4 m、高度超过 5 m 时易于发生坍塌;岩质岸坡当冲蚀槽向岸坡内部的长度超过 8 m、高度超过 7 m 时也比较容易发生岸坡坍塌。

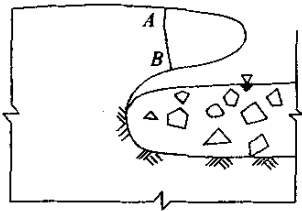


图 5 坍塌阶段

2 岸坡冲蚀动力效应研究

岸坡悬崖岩土体坍塌过程具有突变性,通过 1999 年~2003 年对平川泥石流沟流通区西岸坡悬崖的观察发现,悬崖坍塌失稳均在泥石流暴发期间。研究表明,岸坡发生坍塌时岸坡冲蚀槽多数均未被泥石流流体完全冲填,坍塌主要是在泥石流强烈的动力作用下突然失稳。泥石流流体在沿冲蚀槽内快速流动过程中,产生强烈冲击力和向下吸力,使得岸坡产生纵向振动,增加荷载效应,减小了悬崖岩土体的刚度,诱发了悬崖体的坍塌。岸坡冲蚀动力效应的物理模型见图 6。

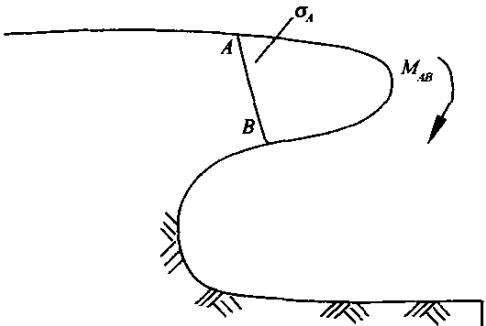


图 6 岸坡冲蚀动力效应物理模型

石流体对沟岸的纵向振动效应可以简化为悬臂结构连续体系的纵向振动,其振动结构荷载及力学模型见图 7 和图 8。

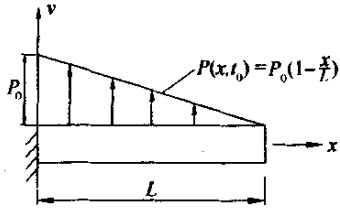


图 7 岸坡冲蚀动力效应荷载模型

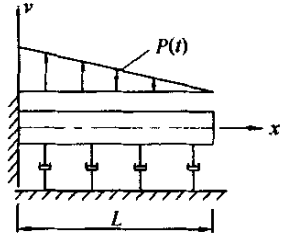


图 8 岸坡冲蚀动力效应力学模型

结构承受的激励 $P(x,t)$ 形式如下:

$$P(x,t) = P_0(1 - \frac{x}{l})\cos\Omega t \tag{1}$$

式中: P_0 为激励峰值,可由试验获得。

根据连续体纵向振动理论能得到结构振动微分方程:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2}[EI \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}] + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = P(x,t) \tag{2}$$

式中: E 为材料的弹性模量; I 为截面惯性矩; ρ 为悬臂体的密度; A 为悬臂体的截面积。

当用截面平均 I 、 A 近似代替其实际值时,方程(2)的通解(齐次解)有如下结果:

$$V_i(x,t) = C \{ \cosh(\lambda_i, x) - \cos(\lambda_i, x) - k_i [\sinh(\lambda_i, x) - \sin(\lambda_i, x)] \} \cdot \cos(\omega_i t - \alpha) \tag{3}$$

式中: C 是任意常数幅值,可由试验获得。其中参数 k_i 由下式计算:

$$k_i = \frac{\cosh(\lambda_i, L) + \cos(\lambda_i, L)}{[\sinh(\lambda_i, L) + \sin(\lambda_i, L)]} \tag{4}$$

设方程(2)有形式 $V(x,t) = p(x)\cos\Omega t$ 的特解。将 $V(x,t)$ 代入式(2),同时与式(1)合并得到:

$$EI \frac{\partial^4 p}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = P_0(1 - \frac{x}{l}) \tag{5}$$

令方程(5)有如下形式的解:

$$P(x) = B_0 + B_1 x + B_2 x^2 + B_3 x^3 + B_4 x^4 + B_5 x^5 \tag{6}$$

将式(6)代入式(5)得

根据岸坡的破坏特点,将悬崖体视为悬臂梁,泥

$$120EIB_0x - \rho A\Omega^2(B_0 + B_1x + B_2x^2 + B_3x^3 + B_4x^4 + B_5x^5) = P_0(1 - \frac{x}{l}) \quad (7)$$

求解方程(7)可得:

$$P(x) = \frac{P_0}{\rho A\Omega^2}(\frac{x}{l} - 1) \quad (8)$$

并且:

$$V(x, t) = P(\frac{x}{l} - 1)\cos\Omega t \quad (9)$$

合并式(9)和式(3)即可得到连续体系纵向振动微分方程的解答:

$$v(x, t) = C \sum_{i=1}^{\infty} \{ \cosh(\lambda_i, x) - \cos(\lambda_i, x) - k_i [\sinh(\lambda_i, x) - \sin(\lambda_i, x)] \} \cdot \cos(\omega_i t - \alpha) + \frac{P_0}{\rho A\Omega^2}(\frac{x}{l} - 1)\cos\Omega t \quad (10)$$

式中,悬崖体在泥石流冲击作用下的自振频率为

$\omega_i = \frac{(\lambda_i L)^2}{L^2} [\frac{EI}{\rho A}]^{\frac{1}{2}}$, 而且 $(\lambda_i L)$ 的前 4 项解为:

$$\begin{cases} \lambda_1 L = 1.875 \ 1 \\ \lambda_2 L = 4.694 \ 1 \\ \lambda_3 L = 7.854 \ 8 \\ \lambda_4 L = 10.996 \end{cases}$$

实用中, i 取前 1~2 项即可保证计算结果的精度要求。得到连续体系纵向振动位移方程(10)后,再利用牛顿第二定律,即可计算出运动使突出部分沟壁产生的附加动力大小,从而求解振动对沟岸坡崩塌的作用。

3 岸坡冲蚀防治问题

泥石流岸坡冲蚀防治的核心是调节泥石流冲击方向、控制泥石流对岸坡坡脚的掏蚀以及基于泥石流的冲击荷载建造防治结构类型。岸坡冲蚀防治技术以护岸结构、挑坝等结构类型为主,前者为岸坡的直接防治结构类型并具有一定的竖向及侧向承载力,后者为岸坡的间接防治结构类型。下面以护岸结构为例进行分析。

护岸结构(Bank revetment)是指利用挡土墙或护面墙减小泥石流对岸坡的冲蚀确保岸坡稳定及岸坡公路构筑物安全与稳定的防治结构型式。一般位于泥石流沟沉积区及流通区岸坡,尤其是流通区岸坡防护尚可控制流通区岸坡泥石流物源。护岸结构平面图及断面图分别见图 9 和图 10。

万方数据

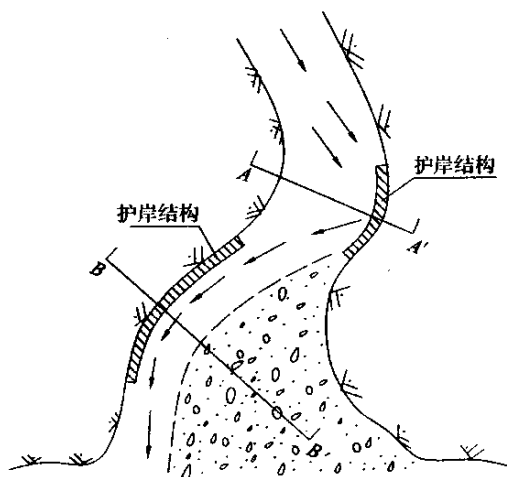
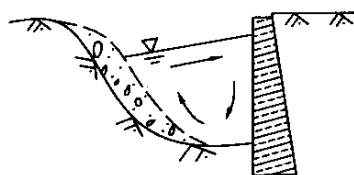
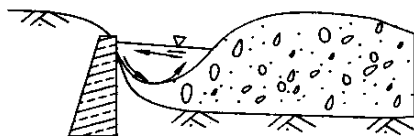


图 9 护岸结构平面



A-A' 断面



B-B' 断面

图 10 护岸结构断面

护岸结构可为重力式挡土墙,由素混凝土或浆砌石现场浇筑;也可为钢筋混凝土护面墙。设计时应注意 3 个关键问题:

(1)护岸结构基础埋置深度,以泥石流沟 20 年内最大下切深度作为基础埋深;

(2)护岸结构强度,以泥石流在防治部位的最大冲击、撞击力作为外荷载,进行结构强度计算及基础验算;

(3)护岸结构超高计算,设计时应充分考虑到泥石流阵性超高、弯道爬高,超高高度不低于 20 年一遇泥石流阵性超高及弯道爬高 2.0 m。

护岸结构既适用于粘性泥石流,也适用于稀性泥石流。适用于防治稳定性较差的泥石流沟岸坡,对于岸坡内侧具有公路构筑物或岸坡为公路桥涵跨越泥石流沟的桥台、墩台时,护岸结构可确保其安全与稳定;对于流通区岸坡虽未有公路构筑物但岸坡岩

土体松散为泥石流重要物源时,应用护岸结构可控制泥石流物源,间接达到防治泥石流的目的。例如四川西昌至木里干线公路小关沟泥石流沟内公路沿着沟岸布设,长 3 km 左右,路面至泥石流沟床高差 3~5 m,1998 年 7 月 20 年一遇的泥石流活动将公路路基路面全部毁损,1999 年实施水毁恢复工程后见图 11,总投资 2 000 万元左右,该工程迄今经历了多次泥石流检验,效果极为显著。

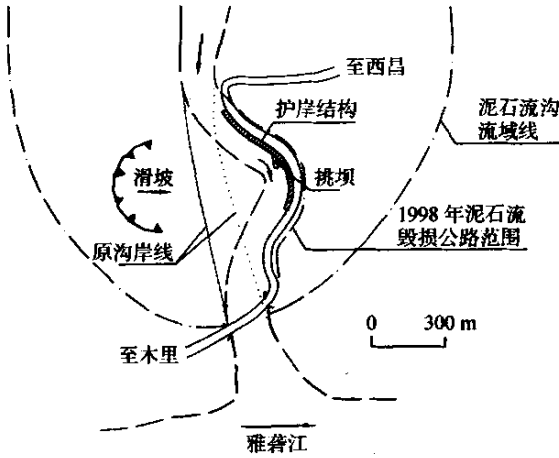


图 11 西昌至木里干线公路小关沟泥流水毁恢复工程

值得指出的是,岸坡防治结构设计中,应高度重视结构抗御泥石流冲撞以及结构基础埋深设计,合理确定泥石流在易毁岸坡段的最大冲刷深度,确保结构体的整体稳定。

4 结论

(1)泥石流对岸坡的冲蚀演绎过程可分为 4 个阶段,即冲蚀槽形成阶段、泥石流顶托底部拉裂阶段、自重顶部拉裂变形阶段和坍塌阶段,核心是悬岸的产生及失稳。

(2)悬岸坍塌失稳均在泥石流暴发期间,泥石流流体沿冲蚀槽内快速流动过程中产生强烈冲击力和向下吸力,使得岸坡产生纵向振动,增加荷载效应,减

小了悬岸岩土体的刚度,诱发了悬岸体的坍塌。将悬岸体视为悬臂梁,泥石流流体对沟岸的纵向振动效应可以简化为悬臂结构连续体系的纵向振动,运用动力学方法建立了悬臂体系的纵向振动位移方程,据此应用牛顿第二定律便可求解获得泥石流振动对岸坡破坏的诱发荷载。

(3)根据岸坡冲蚀演绎机理分析了岸坡冲蚀防治问题,提出了护岸结构及挑坝两类实用防治技术,并对护岸结构关键技术进行了探讨。

参考文献:

- [1] 陈洪凯,唐红梅,马永泰,等.公路泥石流研究及治理[M].北京:人民交通出版社,2004.
- [2] 陈洪凯,唐红梅.公路泥流水毁概化模式研究[J].公路,2003,(8).
- [3] 陈洪凯,等.平川沟泥石流形成的动力机制研究[J].公路,2003,(12).
- [4] 唐红梅,陈洪凯,李亚训,等.新疆天山公路泥石流形成环境研究[J].公路,2004,(6).
- [5] 陈洪凯,唐红梅,马永泰.公路特大型泥石流研究及治理新理念[J].公路,2004,(2).
- [6] 陈洪凯,唐红梅.速流结构防治泥石流的理论及应用[J].中国地质灾害与防治学报,2004,15(1).
- [7] 陈洪凯,唐红梅,吴四飞.公路特大型泥石流灾害控制技术[J].公路,2004,(3).
- [8] 易鹏莹,唐红梅,陈洪凯.沟谷泥石流护岸、固底与糙底技术研究[J].重庆交通学院学报,2003,22(2).
- [9] 唐红梅,陈洪凯.公路泥石流研究综述(1)[J].重庆交通学院学报,2004,23(4).
- [10] 唐红梅,陈洪凯.公路泥石流研究综述(2)[J].重庆交通学院学报,2004,23(5).
- [11] 陈洪凯,唐红梅,白子培,等.山区公路水毁路基发育机制研究[J].重庆交通学院学报,1994,13(4).
- [12] 肖盛燮,陈洪凯.桥梁受洪灾异相耦合破坏作用的形态及仿真模拟[J].重庆交通学院学报,1999,18(4).
- [13] 吴四飞,唐红梅,李强,陈洪凯.泥石流和速流结构耦合作用数值模拟[J].重庆交通学院学报,2004,23(5).
- [14] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].科学出版社,2003.
- [15] WF 休斯,JA 布莱顿,徐燕厚,过明道,徐立功,等译.流体动力学[M].北京:科学出版社,2002.

Research on Evolution Process and Dynamic Effect of Banks of Debris Flow Valleys Under Both Impact and Erosion

CHEN Hong-kai^{1,2}, CHEN Ye-ying¹, TANG Hong-mei¹, JIN Fa-jun³, MA Yong-tai³

(1. Inst. of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Lab. for Exploitation of Southwestern Resources & the Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Highway Bureau of Liangshan Yi Nationality Autonomous Prefecture of Sichuan Province, Xichang 615000, China)

Abstract: Total mileage along banks of debris flow valley is 800 kilometers in China. Impact and erosion of debris flow to banks of debris flow valley is one of key studies for debris flow along highways, the impact and erosion to banks is a macro-feature of coupling action of impact and erosion energy of debris flow as well as anti-impact and anti-erosion energy of the banks. The evolution process of impact and erosion of banks of debris flow valley is divided into four stages by geomorphology principle, i. e. formation stage of trough of impact and erosion, tension stage of bottom of cantilever banks supported by debris flow, tension stage of top of cantilever bank under gravity force of banks, and avalanche stage of cantilever banks. The key problem of the evolution process is that cantilever banks occur and are unstable. According to vast investigations, it is identified that avalanche of banks takes place usually during breaking out time of debris flow, whose reasons are that the vertical vibration of bank from the impact and erosion occurs and dynamic effect increases while the rigidity of banks decreases. Deformation equations of vertical vibration of cantilever bank are established by dynamics principles, which can calculate triggering loads to cause fracture of the banks by Newton's second law. In the end some key techniques about bank revetment are approached in the paper.

Keywords: debris flow along highway; bank of debris flow valley; impact and erosion; evolution process; dynamic effect; control technique

西部高速公路总里程突破 7 000 km

2004 年 11 月 18 日,在广西南宁召开的中国西部论坛上,交通部有关人士透露,我国西部地区高速公路总里程已突破 7 000 km,预计 2005 年,西部地区高速公路里程将突破 1 万 km。

截至 2003 年年底,西部地区高速公路总里程已突破 7 000 km,比 4 年前增长了 1.8 倍。继四川之后,西部地区又有云南和广西高速公路通车里程突破 1 000 km。目前除西藏外,西部所有省(区、市)都有了高速公路。预计到 2010 年,西部地区高速公路通车里程将超过 2 万 km。

与此同时,以国道主干线和西部通道为主体的西部干线公路建设正持续加速。2001 年,西南公路出海通道建成,打通了西部地区的南大门。2003 年,沪蓉国道主干线建成通车,成为沿江经济带的交通大动脉。2004 年 10 月,连霍国道主干线全线建成高等级公路,过去汽车从乌鲁木齐到连云港需要半个多月的时间,现在只需要 50 多个小时。至此,西部地区 9 条国道主干线总规模达 1.6 万 km。

目前,国家对西部交通建设的支持,使分布在西部广袤土地上的广大乡村联系日益紧密。在国债和车购税资金的支持下,除西藏外,西部所有的县都通了沥青(水泥)路,公路通车总里程已达 74 万 km,比 1999 年增长 40%。预计到 2005 年,西部公路总里程将超过 78 万 km。