

文章编号: 0451-0712(2003)12-0045-06

中图分类号: P642.3

文献标识码: A

# 平川沟泥石流流体形成的动力机制研究

陈洪凯, 唐红梅

(重庆交通学院岩土工程研究所 重庆市 400074)

**摘 要:** 泥石流沟内松散物质(岩土体)在降雨作用下,由吸水→强度衰减→蠕变而构成初始泥石流流体,形成机制包括降雨冲击机制和吸水软化机制。初始泥石流流体运动诱发沟岸冲蚀、沟底掏蚀而补给构成泥石流流体,补给机制包括岸坡切割机制和沟床物质启动机制。构建了由粒径为 6.31 cm 的均质颗粒固相和均质浆体的等效泥石流流体,为泥石流运动及冲击机理研究奠定理论基础。

**关键词:** 泥石流; 松散物质; 降雨; 初始泥石流流体; 动力机制; 等效泥石流流体

泥石流(Debris Flow)是高浓度水砂砾复合异相混合流,是颗粒大小差异很大的块石和含砂水体的联合运动,其中砂、砾主要呈滚动及跃动状态迁移。在小流域内,滑坡和泥石流通常相伴而生、互为因果,具有强烈的冲击、破坏作用。泥石流属于典型的灾害地貌现象及过程,是山丘地区公路建设过程中普遍存在且破坏作用极其强烈的灾害类型,是毁损穿越泥石流沟的公路路基、路面及相应防治结构物的重要外在动力机制。

川西南凉山境内的西昌~木里公路途径的平川河中游地段河床比降小,为典型的宽阔河谷,是沟谷泥石流集中发育的地段,发育了 20 余条泥石流沟,

如 51 号沟(平川沟)、油房沟、黄土坡沟等。其中平川沟泥石流最具代表性(图 1),泥石流沟的流域面积 16.8 km<sup>2</sup>,较大的形成区、狭长的流通区、2 个短小而宽阔的沉积区是其基本特征,泥石流沟内大冲大淤,加积过程极其严重。流通区具有明显的沉积过程,2 个沉积区分别位于形成区出口处(宽 20 m)和沟口(宽 500 m)。流域沟长 8.2 km,沟谷平均比降 0.181,泥石流沟发育于平川河的侵蚀阶地(位于海拔 1 800 m)和两级夷平面(分别位于海拔 2 500 m 和 3 000 m)之间。平川泥石流沟的中、下游发育两级跌水:上部跌水(位于形成区至流通区上部)沟槽的平均比降为 0.32,下部跌水(位于沉积区至流通

基金项目:交通部基金项目(95060233)、交通部人才基金项目(95050508)成果之一

收稿日期:2003-09-19

## Preliminary Analysis of Uneven Settlement of Expressway After Construction in Zhujiang Delta Area

MA Chuan-ming

(Engineering Department, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The expressway uneven settlement in the Zhujiang delta area resulting in diseases and bringing about endangerments are discussed, and the characteristics of the expressway uneven settlement analyzed. The causes of forming uneven settlement of embankment and joint of embankment and bridge after construction are researched. Finally, the treatment measures for controlling the uneven settlement of the expressway in the Zhujiang delta area are given.

**Key words:** Zhujiang delta area; expressway; uneven settlement

区下部)沟槽的平均比降为 0.18;而从上部跌水至下部跌水,泥石流沟槽的平均比降为 0.23<sup>[2,3]</sup>。如果按照拜格诺的颗粒流理论及高桥堡的计算式,可知平川沟泥石流沟中松散物质发生运动的条件是沟床比降为 0.26~0.42,表明平川沟泥石流沟中的松散物质从理论上具备了启动的客观条件。平川沟泥石流属于冲淤变动型沟谷泥石流,是我国西部公路泥石流流水毁的重要类型。

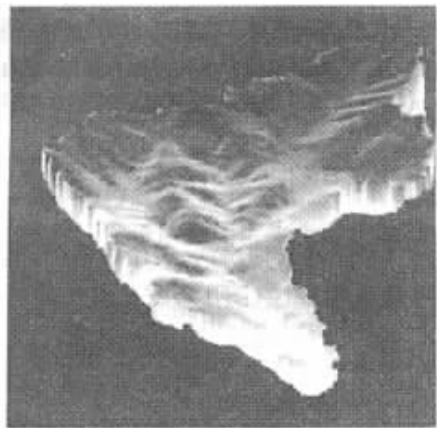


图 1 川西南西木路平川沟泥石流沟

基于现场观测和室内测试分析,本文重点对平川沟泥石流体的形成机制进行研究,目的在于为泥石流运动过程、冲击磨蚀作用研究及公路沿线冲淤变动型沟谷泥石流防治奠定理论基础。

## 1 初始泥石流体形成机制

初始泥石流体(Initial Debris Flow Mass)是水体与松散物质的简单混合。位于泥石流沟边坡上的松散物质在降雨动力冲击作用下发生不同程度的变形,并且水体逐渐对土体的软化作用而使土体发生流变而呈现蠕滑、流动,形成初始泥石流体(图 2)。其形成机制包括降雨冲击机制和吸水软化机制。

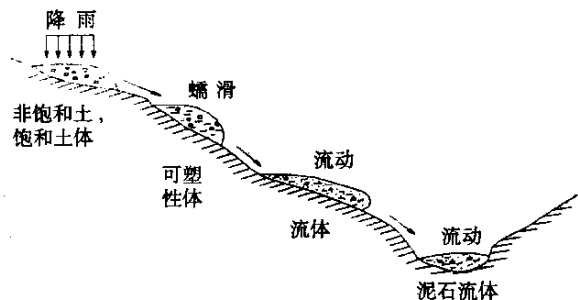


图 2 初始泥石流体形成过程

### (1) 降雨冲击机制。

假定位于泥石流沟边坡表面的松散土体为直径为  $d$  的球体(图 3),则土粒重量  $W = \frac{\pi}{6}d^3\rho_s$ ,其沿坡向下的切向分量  $T$  及与坡面垂直的法向分量  $N$  分别为:

$$T = W \sin \theta \quad (1)$$

$$N = W \cos \theta \quad (2)$$

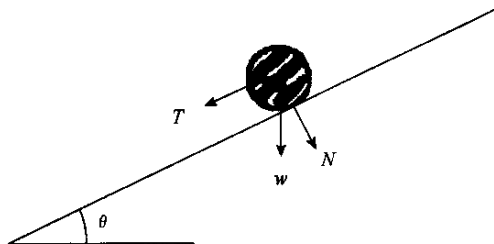


图 3 边坡表面的松散土体颗粒

如果颗粒与边坡面的接触面积为  $A$ ,则在接触面上产生的剪应力及法向应力分别为:

$$\tau = \frac{W}{A} \sin \theta \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{W}{A} \cos \theta \quad (4)$$

当已知颗粒与边坡面周围其他松散物质的粘聚力为  $C$ 、内摩擦角为  $\varphi$  时,按照 Mohr-Coulomb 强度定律,抗剪强度  $\tau_f$  为:

$$\tau_f = C + \sigma \tan \varphi = c + \frac{W}{A} \cos \theta \tan \varphi \quad (5)$$

则可以定义颗粒的稳定系数  $F$  为:

$$F = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{C + \frac{W}{A} \cos \theta \tan \varphi}{\frac{W}{A} \sin \theta} = \frac{\frac{CA}{W} + \cos \theta \tan \varphi}{\sin \theta} \quad (6)$$

在降雨作用期间,假定土体颗粒受到降雨的冲击作用  $P$ (图 4), $\beta$  为冲击力  $P$  与边坡倾向投影线的角。 $P$  可以沿边坡切线及法线方向进行分解,分别为:

$$T' = P \sin \beta \quad (7)$$

$$N' = P \cos \beta \quad \beta \in [\beta, \pi + \beta] \quad (8)$$

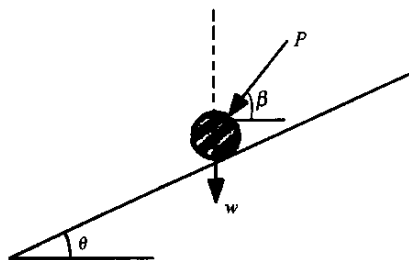


图 4 受降雨冲击作用的边坡土体颗粒

进而:

$$T=W\sin\theta+P\sin\beta \tag{9}$$

$$N=W\cos\theta+P\cos\beta \tag{10}$$

$$\tau=\frac{T}{A}=\frac{1}{A}(W\sin\theta+P\sin\beta) \tag{11}$$

$$\sigma=\frac{1}{A}(W\cos\theta+P\cos\beta) \tag{12}$$

$$\tau_f=C+\frac{1}{A}(W\cos\theta+P\cos\beta)\tan\varphi \tag{13}$$

这时,颗粒的稳定系数  $F'$  为:

$$\begin{aligned} F' &= \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{C + \frac{1}{A}(W\cos\theta + P\cos\beta)\tan\varphi}{\frac{1}{A}(W\sin\theta + P\sin\beta)\tan\varphi} \\ &= \frac{CA + (W\cos\theta + P\cos\beta)\tan\varphi}{(W\sin\theta + P\sin\beta)\tan\varphi} \\ &= \frac{\frac{CA}{W} + \cos\theta\tan\varphi + \frac{P}{W}\cos\beta\tan\varphi}{\sin\theta + \frac{P}{W}\sin\beta} \end{aligned} \tag{14}$$

若土体颗粒与周围物质的粘结力  $C=0$ , 则:

$$m = \frac{F'}{F} = \frac{1 + \frac{P}{W} \frac{\cos\beta}{\cos\theta}}{1 + \frac{P}{W} \frac{\sin\beta}{\sin\theta}} \tag{15}$$

令  $D_0 = \frac{P}{W}$ , 定义为降雨的冲击性能比, 则:

$$m = \frac{1 + D_0 \frac{\cos\beta}{\cos\theta}}{1 + D_0 \frac{\sin\beta}{\sin\theta}} \tag{16}$$

通常,  $m$  愈接近 1.0, 表明降雨冲击作用愈显著。

由  $\frac{dm}{d\beta} = 0$ , 可得:

$$\beta = 45^\circ + \arcsin\left(-\frac{D_0}{\sqrt{2}\cos\theta}\right) \tag{17}$$

上式即为斜坡表面松散土体的临界冲击作用式。由该式可见, 在降雨强度一定时, 即冲击性能比  $D_0$  为一个常数, 则最佳冲击方向  $\beta$  便可以确定, 实际冲击方向与最佳冲击方向愈近, 物质受降雨冲击启动的可能性愈大; 而若在泥石流沟中, 如果斜坡表面降雨强度及冲击方向具有统计一致性时, 即  $\beta$  为常数, 由式(17)便可求出临界冲击性能比  $D_0$ , 当实际降雨的冲击性能比超过临界性能比时, 斜坡表面的松散物质颗粒便易于启动。当斜坡表面大量的松散物质在降雨的冲击作用下启动, 便形成了坡面泥石流。

平川地区统计资料表明, 10 min 雨滴平均直径 0.394 cm,  $\theta = 57^\circ$ , 雨滴平均冲击力  $P = 3.2 \times$

$10^{-7}$  kN, 而泥石流沟斜坡表面 50% 左右的土粒直径为 4.2 cm, 其重量  $W = 2.94 \times 10^{-5}$  kN, 于是  $D_0 = 0.0114$ , 计算得到临界  $\beta = 44.15^\circ$ ,  $m = 0.99$ 。显然, 区内雨滴的冲击作用是十分显著的, 这与多年现场观测情况比较吻合。

(2) 吸水软化机制。

对于位于边坡表面的松散土体, 取分析模型如图 5。取位于边坡表面上的松散土体的体积为  $V$ , 强度参数为  $C, \varphi$ , 天然容重为  $\gamma$ , 干容重为  $\gamma_d$ 。根据土体三相理论, 单位土体的土粒重为  $W_s$ , 土粒体积为  $V_s$ 。当土体处于完全干燥状态时, 则:

$$W = W_s = \gamma_d V \tag{18}$$

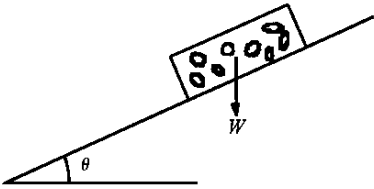


图 5 边坡表面松散土体分析模型

其沿坡向下的分力为  $T$  和沿坡面法线方向的分力为  $N$ 。

当土块逐渐吸水时, 湿润土块的总重量  $W'$  为  $W' = (1 + \omega)W_s$

进而, 沿坡向下的分力  $T'$  和沿坡面法线方向的分力  $N'$  分别为:

$$T' = (1 + \omega)W_s \sin\theta \tag{20}$$

$$N' = (1 + \omega)W_s \cos\theta \tag{21}$$

令土块与坡面岩土体的接触面积为  $A$ , 强度参数为  $C, \varphi$ , 则由 Mohr-Coulomb 强度公式可得:

$$\tau_f = C + \sigma \tan\varphi = C + (1 + \omega) \frac{W_s}{A} \cos\theta \tan\varphi \tag{22}$$

则, 定义稳定性指标:

$$\begin{aligned} \Delta\tau &= \tau_f - \tau \\ &= C + (1 + \omega) \frac{W_s}{A} (\cos\theta \tan\varphi - \sin\theta) \end{aligned} \tag{23}$$

可见, 土块的安全性指标为  $C, \omega, \theta, \varphi$  的函数, 即:

$$\Delta\tau = f(C, \varphi, \theta, \omega) \tag{24}$$

式(23)是式(24)的显示表达式。

当  $\Delta\tau > 0$  时, 土块处于稳定状态;

当  $\Delta\tau = 0$  时, 土块处于极限平衡状态;

当  $\Delta\tau < 0$  时, 土块处于失稳状态。

根据岩土工程的基本理论, 随着土体含水量的不断增加, 强度参数  $C, \varphi$  值不断降低, 总体趋势是

安全性指标下降。换言之,位于边坡上的松散土体随着含水量的增多,其强度参数逐渐降低,土体的强度衰减、安全性指标下降,从而导致松散物质的启动。

根据平川泥石流沟表面松散土体的物理力学试验结果,天然状态: $\gamma=20.6 \text{ kN/m}^3$ 、 $C=18.3 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=12.4^\circ$ 、 $\omega=12.2\%$ ;饱和状态: $\gamma=22.5 \text{ kN/m}^3$ 、 $C=13.1 \text{ kPa}$ 、 $\varphi=9.8^\circ$ 、 $\omega=90.1\%$ 。泥石流沟西侧斜坡松散土层平均厚  $3.6 \text{ m}$ ,下伏基岩顶面平均坡角  $29^\circ$ ,地表坡角  $36.9^\circ$ ,土粒平均直径  $4.2 \text{ cm}$ , $\gamma_s=26.3 \text{ kN/m}^3$ 。采用式(23)计算如下。

天然状态下:

$$\Delta\tau=2.3772 \text{ kPa}$$

饱和状态下:

$$\Delta\tau=-5.3916 \text{ kPa}$$

可见,在松散土体吸水饱和后,土粒处于失稳状态。

## 2 泥石流物质补给机制

初始泥石流流体形成以后,泥石流流体在泥石流沟中运动,从边坡及沟床不断补给松散物质。大量的松散土体与高速运动的初始泥石流流体相互作用,而构成泥石流流体。现场调研可见,平川沟泥石流物质补给机制包括岸坡切割机制和沟床物质启动机制。

### 2.1 岸坡切割机制

泥石流沟岸坡切割以后边坡上的松散土体模型见图 6。

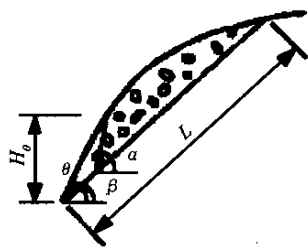


图 6 沟槽切割以后的松散土体块

随着沟槽谷底的向下切割,由前期的沟槽岸坡坡角  $\theta$  增大为切割坡体的坡角  $\alpha$ ,松散物质与完整基岩的接触面长度由切割前的  $L$  缩短了  $\Delta L$ 。假定切割前后岸坡松散物质的重量分别为  $W_b$  和  $W_a$ ,且切割  $W_b > W_a$ ,令  $\beta$  为接触面的平均倾角。则切割前,接触面上:

$$\sigma_b = \frac{W_b \cos \beta}{L} \quad (24)$$

$$\tau_b = \frac{W_b \sin \beta}{L} \quad (25)$$

切割后,接触面上:

$$\sigma_a = \frac{W_a \cos \beta}{L - \Delta L} \quad (26)$$

$$\tau_a = \frac{W_a \sin \beta}{L - \Delta L} \quad (27)$$

按照 Mohr-Coulomb 强度公式,切割前后松散土体的极限抗剪强度分别为

$$\tau_{fb} = C + \frac{W_b \cos \beta}{L} \tan \varphi \quad (28)$$

$$\tau_{fa} = C + \frac{W_a \sin \beta}{L - \Delta L} \tan \varphi \quad (29)$$

则,切割前后松散土体的极限安全性指标  $\Delta\tau_f$  为:

$$\Delta\tau_f = \left( \frac{W_b \cos \beta}{L} - \frac{W_a \sin \beta}{L - \Delta L} \right) \tan \varphi \quad (30)$$

由于沟槽岸坡切割部分的松散物质的重量  $\Delta W$  为:

$$\Delta W = \frac{1}{2} \Delta L \gamma H_0 \cos \beta \quad (31)$$

则:

$$\Delta\tau_f = \left[ \frac{W_b \cos \beta}{L} - \frac{(W_b - \frac{1}{2} \Delta L \gamma H_0 \cos \beta) \sin \beta}{L - \Delta L} \right] \tan \varphi \quad (32)$$

由  $\frac{\partial \tau_f}{\partial \Delta L} = 0$  可得:

$$H_0 = \frac{2W_b}{L \cos \beta} \quad (33)$$

式中: $H_0$  为沟槽岸坡的下切量。根据式(33)可以判别泥石流沟槽岸坡下切的临界高度。当实际下切量超过临界高度时,岸坡松散物质便在重力的作用下启动,即失稳补给泥石流。以平川泥石流流通区西侧为例,沟床至切割坡顶的垂直高度为  $23 \text{ m}$ , $\alpha=38^\circ$ , $\beta=52^\circ$ , $L=37.4 \text{ m}$ ,计算得  $W_b=2308.7 \text{ kN/m}$ ,则由式(33)计算:

$$H_0 = 200.5 \text{ m}$$

可见,该段沟槽岸坡下切的临界深度为  $200.5 \text{ m}$ ,而从 1973 年至 1998 年该段沟床下切深度为  $6.8 \text{ m}$ ,平均下切速度为  $0.27 \text{ m/年}$ ,据此可推知该泥石流沟在 700 余年的时间内将仍处于下切过程中。

### 2.2 沟床物质启动机制

平川泥石流沟属于大冲大淤型泥石流,前期泥石流流体大量残存于泥石流沟谷当中,稳定性差,在沟槽中洪水流速达到一定值时,便有可能重新启动、搬运而形成泥石流,分析模型见图 7,图中  $u$  为流体层的平均流速。

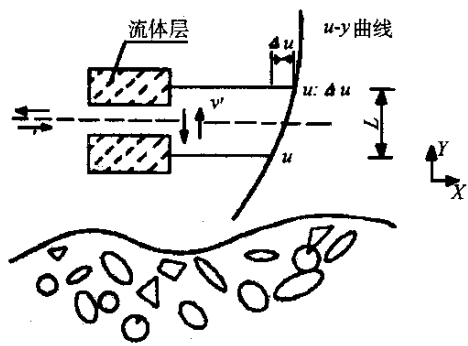


图 7 泥石流沟床表面流速分布模式

某一瞬间,上层(速度为  $u + \Delta u$ )中有一涡团具有  $v' < 0$  的横向(竖直方向)脉动速度,穿过理想的界面达到下层(速度为  $u$ ),界面上通过单位面积传递的质量流量为  $\rho v'$ ,上层速度较快的涡团到达下层,一般将产生流向脉动速度  $u' > 0$ 。反之,下层具有横向脉动速度  $v' > 0$  的流体涡团也会穿过达到上层,造成上层  $u' < 0$  的流向脉动速度。这种现象不断持续发生,并具有随机性,但总体效果是  $x$  方向的动量从上层向下层输送,因此,上层的动量减小而下层的增加。运用流体力学方法,可推导出泥石流沟床表面物质的临界湍流速度<sup>[13,14]</sup>:

$$\tau_f = \rho k^2 y^2 \left( \frac{du}{dy} \right)^2 \tag{34}$$

式中: $\rho$  为初始泥石流体的平均密度; $y$  为泥石流体内距离底床的高度; $u$  为泥石流体内速度; $k$  为实验常数,为 0.41。

位于泥石流沟槽中的前期泥石流流体或边坡崩积体,根据其胶结程度可以分为两大类型,即:不良胶结(图 8)和良好胶结(图 9)。

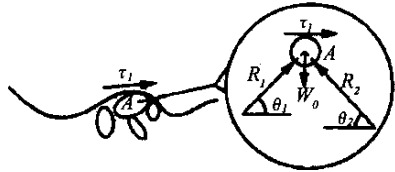
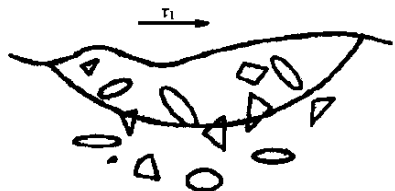


图 8 不良胶结型松散物



良好胶结型松散物

(1)对于不良胶结型松散物。

位于表面的松散物颗粒,其自重为  $W_0$ ,与周围物质颗粒的接触点为  $n$  个,来自于其他颗粒通过接触点传递的支撑力分别为  $R_1, R_2, \dots, R_n$ ,与水平方向的锐交角分别为  $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 。将所有支撑点等效为等效支撑点  $M_0$ ,则由重力及支撑力产生的抗倾力矩为  $\sum M_0$ ,由  $\tau_f$  产生的倾覆力矩为  $M_t$ ,则颗粒的稳定系数  $F$  可定义为:

$$F = \frac{\sum M_0}{\sum M_t} \tag{35}$$

如果  $F < 0$ ,颗粒处于滚动状态; $F = 0$ ,颗粒处于极限平衡状态; $F > 0$ ,颗粒处于静止状态。

换言之,对于不良胶结型松散物质,滚动失稳是其主要机理。

(2)对于良好胶结型松散物。

当松散物质胶结良好时,在  $\tau_f$  的作用下,其启动机理主要是剪切破坏,即在松散体中形成滑移破坏面。当滑动面上的抗剪强度小于  $\tau_f$  时,松散物质便启动进入水体中,融合而构成泥石流。

3 泥石流流体等效模型

由于平川沟泥石流属于典型的稀性泥石流,根据两相流理论可将泥石流流体中颗粒粒径大于 0.5 mm 的块石等效为粒径为 6.31 cm 的固体粒子,将块石粒径小于 0.5 mm 的粒子与水体联合等效为均质浆体<sup>[2]</sup>,等效泥石流流体物理模型见图 10。因此,可认为等效泥石流流体(Equivalent Debris Flow Mass)是含有大量均质石块的均质浆体,故其物理力学及流体性质特别决定于均质固相体及均质浆体<sup>[2,3]</sup>。

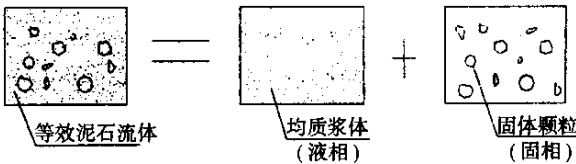


图 10 泥石流流体等效模型

4 结论

(1)平川沟泥石流为典型的稀性泥石流,具有大冲大淤的特性,属于典型的冲淤变动型沟谷泥石流,是制约公路交通有序进行的典型泥石流水毁类型。泥石流沟边坡上的松散岩土体是形成初始泥石流体的主要物质来源。降雨是形成初始泥石流体的根本动力。



(2)边坡上的松散岩土体形成初始泥石流体的基本过程可概化为:土体吸水→强度衰减→蠕变;形成机制可分为:降雨冲击机制和吸水软化机制,以后者为主。

(3)初始泥石流流体从泥石流沟的坡面运动到沟床与沟谷内水体联合作用,诱发沟岸冲蚀、沟底掏蚀而补给构成泥石流流体,补给机制包括岸坡切割机制和沟床物质启动机制。

(4)构建了等效泥石流体的物理模型,等效泥石流流体由粒径为 6.31 cm 的均质颗粒相(固相)和泥石流浆体组成。为后续公路泥石流理论研究的工程防治奠定了坚实的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 陈洪凯. 四川省主要自然灾害对公路水运干线的影响及对策研究[R]. 四川省科委基金项目. 1992.
- [2] 陈洪凯. 冲淤变动型沟谷泥石流治理与路基抗毁结构设计一体化模式研究[R]. 交通部基金项目. 2003.
- [3] 陈洪凯,唐红梅,马黑赤河,等. 大金河泥石流与滑坡研

究及治理[R]. 四川省科技厅科技项目. 2001.

- [7] 李德基. 我国西南泥石流灾害防治现状与最新进展[J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7(1).
- [8] 吴积善,田连权,康志成,等. 泥石流及其综合治理[M]. 北京:科学出版社, 1993.
- [9] 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.
- [10] 陈洪凯,唐红梅,白子培. 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).
- [11] 祝晓寅,陈洪凯,翁其能,等. 山区公路水毁机理与抗毁结构分析[J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(2).
- [12] 肖盛燮,陈洪凯,吴国松,等. 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] 唐红梅,翁其能,王凯,等. 冲淤变动型泥石流沟中物质启动类型及机理研究( I ) [J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(2).
- [14] 唐红梅,翁其能,王凯,等. 冲淤变动型泥石流沟中物质启动类型及机理研究( II ) [J]. 重庆交通学院学报, 2001, 20(2).

## Research on Dynamic Mechanism Formed by Debris Flow of Pingchuan Channel

*CHEN Hong-kai, TANG Hong-mei*

(Inst. of Geotechnical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Loose soils in a sloping debris flow channel become initial debris flow mass(IDFM) through strength attenuation and creep after absorbing water from precipitation. The dynamic mechanism formed by IDFM includes both impact of precipitation and soften soils on slope. In the course of erosion and scour induced by IDFM to the bank slope of debris flow valley, much loose rocks and/or soils throw into IDFM so as to construct real debris flow mass(RDFM). Dynamic mechanism to consummate RDFM includes cutting of bank and starting of bed materials in valley. According to above the authors set up equivalent debris flow mass model that is composed of homogeneous particles with diameter 6.31 cm and homogeneous grout in the paper, which is an important theoretical base to approach the movement and impact of debris flow.

**Key words:** debris flow; loose soil; precipitation; initial debris flow mass (IDFM); dynamic mechanism; equivalent debris flow mass

### 昆 石 高 速 公 路 通 车

2003 年 11 月 16 日,云南省昆明至石林高速公路通车。该路起于昆明市东侧石虎关,止于国家级风景名胜区分石林,全长 78.07 km,交通部批准概算总投资 38.06 亿元,工程于 2000 年 12 月开工。昆石公路是云南目前建设标准最高的一条高速公路,云南省交通厅积极组织科技攻关,引入园林景观设计,昆石公路成为代表云南高速公路形象、反映云南公路建设水平的旅游景观路。