

文章编号: 1008-2786-(2015)6-721-05

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000087

稀性坡面泥石流粗颗粒在不同水力作用下的起动

何 坤¹ 沈军辉¹ 刘 海^{1,2} 童建波¹ 蔺 力¹

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059;

2. 安徽省公益性地质调查管理中心, 安徽 合肥 230040)

摘 要: “5.12”汶川地震产生了大量崩滑堆积体, 这些棱角状粗颗粒体在水流激发下易起动形成坡面泥石流。在对汶川地震区坡面泥石流地质模型调研基础上, 建立以立方体为稀性坡面泥石流粗颗粒的基本模型, 结合坡面泥石流的宽级配特性, 提出立方体模型的滑移、翻转(包括绕边翻转、绕支点翻转及嵌固绕边翻转)等起动方式。并以水力学、泥沙动力学为理论基础, 推导出粗颗粒在滑移、翻转起动方式下的起动平均流速公式。参照陈伯奇的实验数据, 计算粒径为 5~10 mm 颗粒在不同坡度条件下的起动流速, 并对比显示两者具有较好的吻合性, 表明立方体作为稀性坡面泥石流粗颗粒的起动模型是合理的。计算结果也表明, 在同一坡度条件下, 粗颗粒滑移起动所需的水流激发流速最低, 绕边起动次之, 颗粒嵌固起动所需的激发流速最大。如坡度为 30°条件下, 滑移起动的水流激发流速为 0.349 m/s, 绕边起动为 0.430 m/s, 嵌固起动为 0.473 m/s。据此推断, 当水流达到一定流速(如 30°坡度下、流速为 0.349 m/s)时, 粗颗粒的最初起动以滑移为主; 随着流速增大, 逐渐出现翻转起动; 当水流流速急剧增大时, 大部分嵌固粗颗粒会以翻转的方式瞬间起动, 从而形成稀性坡面泥石流。成果对稀性坡面泥石流起动条件研究具有一定的理论意义, 对泥石流灾害预警具有一定的指导作用。

关键词: 稀性坡面泥石流; 起动流速; 立方体; 滑移起动; 翻转起动

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

“5.12”汶川地震产生了大量崩滑堆积体, 造成震后泥石流频发^[1]。其中花岗岩等高强度岩体产生的碎屑物多呈不规则棱角状—次棱角状的多面体颗粒, 杂乱堆积在斜坡上, 为坡面泥石流的形成提供了丰富的物源(图 1)。

在水流作用下, 这些颗粒往往以滑移、翻转方式起动。因此, 本文以立方体作为粗颗粒起动的基本模型, 借助泥沙动力学基本原理, 建立力和力矩的平衡方程, 考虑水流方向与斜坡的夹角, 推导了稀性泥石流粗颗粒的起动流速公式, 以便进一步加深对稀性坡面泥石流起动条件的认识。

1 坡面型泥石流粗颗粒起动方式

国内外有关泥沙起动条件的研究均以球体或椭球体为基本模型开展, 这与河流及斜坡上的沙粒相符。但对于稀性坡面泥石流而言, 泥石流物质多呈棱角状—次棱角状, 与球体模型具有很大的差异。因此, 本文以更符合实际的立方体为粗颗粒基本模型(图 2), 来研究坡面泥石流颗粒的起动方式和起动流速。根据现场调研结合颗粒受力分析, 粗颗粒具有滑移、翻转(包括绕边翻转、绕支点翻转及嵌固绕边翻转)等起动方式。

收稿日期(Received date): 2014-09-23; 修回日期(Accepted): 2015-02-01。

基金项目(Foundation item): 高等学校博士学科点专项科研基金(博导类)资助课题(20115122110012)。[Higher Specialized Research Fund for the Doctoral Program (Ph. D. class) funded project.]

作者简介(Biography): 何坤(1988—), 男, 硕士研究生, 从事岩土体稳定性研究。[He Kun, Master Degree. His research focuses on geotechnical stability.] E-mail: 9133219112qq.com

* 通信作者(Corresponding author): 沈军辉, 男, 教授, 博士生导师, 从事工程地质、环境地质研究。[Shen Junhui, Professor. His research focuses on engineering geology and environmental geology.] E-mail: 820747923@qq.com

2 不同起动方式下水流瞬时速度公式推导

如图 2 所示,斜坡与水平面的夹角为 θ ,水流与斜坡的夹角为 β ,作用在斜坡粗颗粒上的力有水下重力 W 、水流拖曳力(剪切力) F_D 、水流上举力 F_L ,其表达式分别为

$$W = V(\gamma_s - \gamma) \quad (1)$$

$$F_D = C_D S \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (2)$$

$$F_L = C_L A \frac{\rho u_b^2}{2} \quad (3)$$

式中 等效面积 $S = \frac{A_1}{\sin\beta}$, 其中 $0 < \beta \leq 90^\circ$, 粗颗粒迎水面面积 $A_1 = ac$, 粗颗粒底面面积 $A = ab$, 体积 $V = abc$, C_D 、 C_L 为拖曳力及上举力系数, u_b 为水流作用在床面粗颗粒上的瞬时流速, γ_s 、 γ 分别为泥石流流固体颗粒的容重和水的容重, ρ 为水的密度, a 为立方体的长, b 为立方体的宽, c 为立方体的高; $F_1 = W \sin\theta$ 、 $F_2 = F_D \cos\beta$ 、 $F_3 = F_D \sin\beta$ 、 $F_4 = W \cos\theta$ 其中 F_2 、



图 1 坡面型泥石流的堆积状况

Fig. 1 Accumulation conditions of dilute debris flow

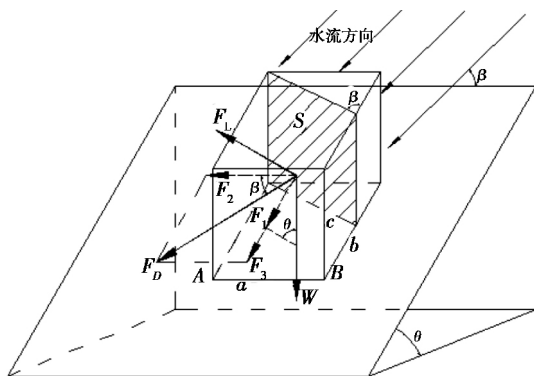


图 2 作用在斜坡粗颗粒上的力

Fig. 2 Forces on the Coarse particle lying on the slop

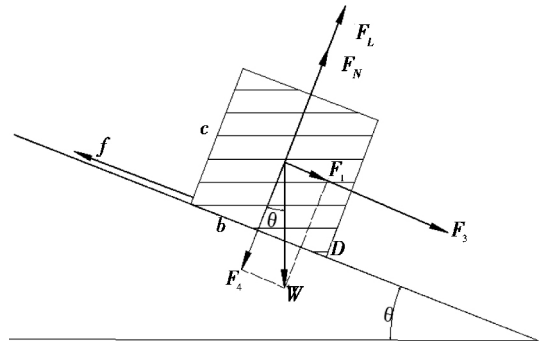


图 3 粗颗粒滑移起动受力分析

Fig. 3 Stresses on coarse particle when slipping

F_3 为水流拖曳力在坡面倾向和走向上的分力, F_1 、 F_4 分别为重力在平行于坡面方向和垂直于坡面向上的分力(图 3)。

2.1 滑移起动方式下的水流瞬时速度

当 $F_D \sin\beta + W \sin\theta \geq f$ 时,粗颗粒以滑移的方式在斜坡上起动(图 2、3),为了便于公式的简化,将滑块简化为正方体,此时 $a = b = c$,粗颗粒起动的临界条件为

$$\frac{\sqrt{(F_D \sin\beta + W \sin\theta)^2 + F_D^2 \cos^2\beta}}{W \cos\theta - F_L} = \tan\varphi \quad (4)$$

式中 φ 为粗颗粒在水下的休止角。将公式(1)、(2)、(3)代入公式(4),可得粗颗粒起动的瞬时速度

$$u_b = \sqrt{\frac{2W[\sqrt{E} - (C_D \sin\theta + \tan^2\varphi C_L \cos\theta)]}{A\rho(C_D^2 - \tan^2\varphi C_L^2 + C_D^2 \cos^2\beta)}} \quad (5)$$

式中

$$E = C_D^2 \tan^2\varphi \cos^2\theta (1 + \cos^2\beta) + C_D C_L \tan^2\varphi \sin 2\theta + \sin^2\theta (\tan^2\varphi C_L^2 - C_D^2 \cos^2\beta)$$

当 $\beta = 90^\circ$ 时,瞬时起动流速为

$$u_b = \sqrt{\frac{2W[\tan\varphi(C_D \cos\theta + C_L \sin\theta) - (C_D \sin\theta + \tan^2\varphi C_L \cos\theta)]}{A\rho(C_D^2 - \tan^2\varphi C_L^2)}}$$

当 $\beta = 0^\circ$ 时

$$u_b = \sqrt{\frac{2W(\sqrt{H} - 2\tan^2\varphi \cos\theta)}{A^2 \rho^2 (C_D^2 - \tan^2\varphi C_L^2)}}$$

式中

$$H = 4\tan^4\varphi \cos^2\theta + A^2 \rho^2 (B^2 \cos^2\theta - \sin^2\theta) (C_D^2 - \tan^2\varphi C_L^2)$$

2.2 翻转起动方式下的水流瞬时速度

2.2.1 绕边翻转方式起动

当水流足够大时,粗颗粒以 D 点翻转起动(图 4),此时支持力 $F_N = 0$,建立 V 、 D 点为交点的力矩平衡方程

$$F_1 \frac{c}{2} + F_3 \frac{2}{3}c + F_L \frac{b}{2} = F_4 \frac{b}{2}$$

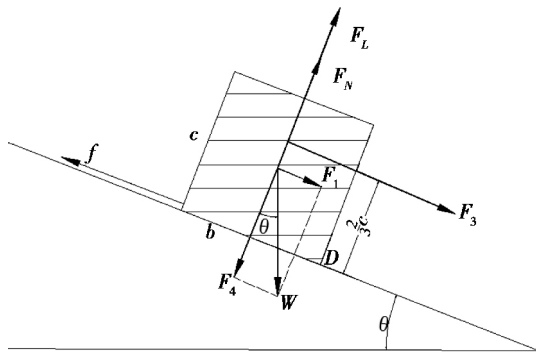


图4 粗颗粒绕边翻转起动受力分析

Fig. 4 Stresses on coarse particle when flipping around a side

式中

$$F_1 = W \sin \theta, F_3 = F_D \sin \beta, F_4 = W \cos \theta$$

求解得

$$u_b = \sqrt{\frac{6W(b \cos \theta - c \sin \theta)}{\rho(4C_D a c^2 + 3C_L a b^2)}} \quad (6)$$

2.2.2 绕支点翻转起动

当 $F_L \geq W \cos \theta$ 且 $F_2 \geq W \frac{a}{c}$ 时,粗颗粒会以立方

体顶点 A 点(图2)为支点翻转起动

$$F_1 l_1 + F_2 l_2 + F_3 l_3 + F_L l_4 = F_4 l_4$$

解得

$$u_b = \sqrt{\frac{2W(\cos \theta l_4 - \sin \theta l_1)}{C_D a c p l_3 + C_D a c p l_2 \cot \beta + C_L a b p l_4}} \quad (7)$$

式中 l_1, l_2, l_3, l_4 分别为 F_1, F_2, F_3, F_4 到 A 点动臂

$$l_1 = \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{c}{2}\right)^2}, l_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{2}d\right)^2 + \left(\frac{2}{3}c\right)^2}$$

$$l_3 = \sqrt{\left(\frac{1}{2}a\right)^2 + \left(\frac{2}{3}c\right)^2}, l_4 = \sqrt{\left(\frac{1}{2}a\right)^2 + \left(\frac{1}{2}b\right)^2}$$

当 $\beta = 90^\circ$ 时

$$u_b = \sqrt{\frac{2W(\cos \theta l_4 - \sin \theta l_1)}{C_D a c p l_3 + C_L a b p l_4}}$$

当 $\beta = 0^\circ$ 时

$$u_b = \sqrt{\frac{2W(\cos \theta l_4 - \sin \theta l_1)}{C_D b c p l_2 + C_L a b p l_4}}$$

2.2.3 绕嵌固边翻转起动

考虑到泥石流的宽级配特性,假定粗颗粒嵌固在小块石中(图5),以 D 点为支撑点翻转起动,此时嵌固接触面的阻力 $F_N = 0$,建立力矩平衡方程

$$\left(\frac{c}{2} - h\right) F_1 + \left(\frac{2}{3}c - h\right) F_3 + F_L \frac{b}{2} = W \frac{b}{2} \cos \theta$$

求解得

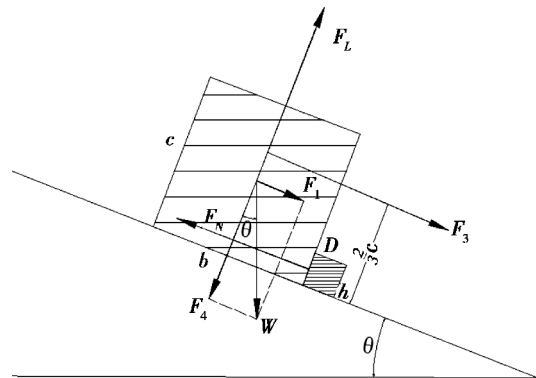


图5 粗颗粒嵌固时的受力分析

Fig. 5 Stresses on embedded coarse particle when it starts

$$u_b = \sqrt{\frac{6W(b \cos \theta - (c - 2h) \sin \theta)}{C_D a c p c \sec \beta (4c - 6h) + 3C_L \rho a b^2}} \quad (8)$$

令嵌固比为

$$\lambda = \frac{h}{c}$$

则

$$u_b = \sqrt{\frac{6W(b \cos \theta - c(1 - 2\lambda) \sin \theta)}{C_D a c^2 p c \sec \beta (4 - 6\lambda) + 3C_L \rho a b^2}} \quad (9)$$

2.3 粗颗粒起动水流平均速度的求解

根据对实测脉动流速资料的分析,水流瞬时速度 u_b 具有正态分布特征,其分布密度 $f(u_b)$ 为

$$f(u_b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{u_b}} \exp\left[-\frac{(u_b - \bar{u}_b)^2}{2\sigma_{u_b}^2}\right] \quad (10)$$

式中 $u_b, \bar{u}_b, \sigma_{u_b}$ 分别为水流瞬时速度、瞬时平均速度及瞬时速度均方差。

由文献[2]可知 $\sigma_{u_b} = \sigma \bar{u}_b = 0.37\bar{u}_b$,而瞬时流速、瞬时平均流速及瞬时流速均方差具有如下关系

$$u_b = \bar{u}_b + \sigma_{u_b} \psi = (1 + \sigma \psi) \bar{u}_b \quad (11)$$

式中 ψ 为与起动级别、起动概率有关的系数。

表1 运动状态与流速及起动概率的关系

Table 1 Relationship with velocity and start moving state probabilities

起动级别	运动状态	ψ	瞬时速度 u_b	概率 P
1	弱动	3	$u_b \geq \bar{u}_b + 3\sigma_{u_b}$	0.001 4
2	中动	2	$u_b \geq \bar{u}_b + 2\sigma_{u_b}$	0.022 8
3	普动	1	$u_b \geq \bar{u}_b + \sigma_{u_b}$	0.158 5

从瞬时流速 u_b 分布的特性可知 μ_b 的不同取值与相应概率 P 存在表1所示关系。参考 Kramer^[3]和奥国仁^[4]的作法,按表1的关系分别定义了弱动、中动、普动三种起动状态。

考虑水流作用在颗粒上的作用点,认为作用在该颗粒的 $2c/3$ 处比较恰当^[5],以该处的流速作为起动代表流速(瞬时平均流速)

$$\bar{u}_b = \frac{2}{3}\eta u_* = \frac{2}{3}\eta \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (12)$$

式中 τ 为水流切应力 \bar{u}_b 为水流作用在床面颗粒上的平均流速 u_* 为摩阻流速。 η 的取值一般为 5.6~8.51^[6]。将公式(11)代入公式(12)可得

$$u_* = \frac{3u_b}{2\eta(1+0.37\psi)} \quad (13)$$

垂线平均流速 v 和摩阻流速 u_* 之间的关系如下^[5]

$$v \approx 6.5u_* \left(\frac{h}{c}\right)^{\frac{1}{6}}$$

式中 h 为水流深度 c 为立方体高。由此可以得到粗颗粒的起动平均流速公式

$$v \approx 9.75 \times \frac{u_b}{\eta(1+0.37\psi)} \left(\frac{h}{c}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (14)$$

3 计算成果与实验数据对比分析

陈奇伯^[7]选用三峡坝区花岗岩颗粒作为实验材料,参照窦国仁提出的 3 个不同起动概率中的颗粒大量起动概率 $p=0.1585$ 作为判别颗粒起动的统一量标准。在长 2 m、宽 0.17 m、槽深 $h=0.2$ m 的水槽中进行了薄层水流下颗粒起动速度的实验,得到不同粒径颗粒在坡度 θ 分别为 5° 、 10° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 的斜坡上的起动流速。根据几何相似原理,本文选用粒径最大的 5~10 mm 颗粒实验成果(表 2) 作为对比资料。

表 2 不同起动方式下的起动流速计算值与实验值对比
Table 2 Starting velocities calculated and experimental values under different starting models

坡度 $/\circ$	滑移起动 $/(m/s)$	绕边翻起动 $/(m/s)$	嵌固绕边翻转 起动 $/(m/s)$	陈奇伯实验流速 $/(m/s)$
30	0.349	0.430	0.473	0.424
25	0.441	0.494	0.532	0.513
20	0.515	0.549	0.583	0.555
15	0.579	0.597	0.628	0.594
10	0.634	0.639	0.668	0.635
5	0.682	0.677	0.702	0.672

取平均粒径 $d=7.5$ mm 的颗粒进行起动流速计算。将立方体斜径视为平均粒径,计算得 $a=4.3$ mm,水流与斜坡走向的夹角为 $\beta=90^\circ$,颗粒容重 $\gamma_3=26.5$,水的重度 $\gamma=10$,水的密度 $\rho=1$,其他计算参

数为: $C_D=0.45$, $\frac{C_D}{C_L}=0.25$ ^[8], $C_L=0.112$,水深 $h=0.2$ m, $\varphi=35.3d^{0.04}=38.26^\circ$,嵌固比 $\lambda=0.05$, $\eta=8.51$ 。根据表 1 取 $\varphi=1$ 。根据公式(5)、(6)、(9)分别计算得到 u_b ,代入公式(14)计算得起动流速(表 2)。

将表 2 中的数据绘制成折线图(图 6)可知,计算数据与实验数据吻合性较好,其中绕边翻转的计算流速与实验数据很接近,仅相差 0.003~0.019 m/s,滑移起动的计算流速与实验数据也仅相差 0.001~0.075 m/s。

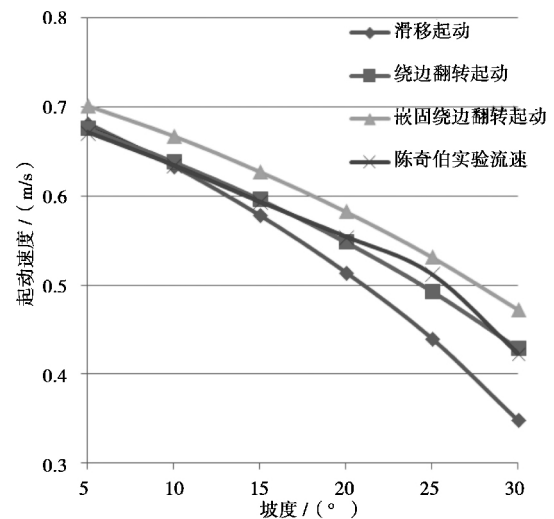


图 6 不同坡度下起动流速

Fig. 6 Starting velocities under different gradients

计算结果也表明,随着坡度的增大,无论是滑移起动、还是翻转起动,所需的激发流速逐渐减小。此外,在相同坡度下,粗颗粒滑移起动所需的激发流速最低,绕边起动次之,颗粒嵌固时起动所需的激发流速最大。据此推断,当水流流速达到一定程度时,粗颗粒的最初起动以滑移方式为主;随着水流流速增大,逐渐出现翻转起动;当水流流速急剧增大时,大部分嵌固粗颗粒会以翻转的方式瞬间起动,从而形成稀性坡面型泥石流。

4 结 论

1. 本文以立方体为稀性坡面泥石流粗颗粒的基本模型,推导得出了粗颗粒在滑移和翻转起动方式下的流速公式,并将颗粒起动流速计算值与陈奇伯实验数据作了对比,两者具有较好的吻合性,表明立方体作为稀性坡面泥石流粗颗粒起动模型是合理的。

2. 在相同坡度下,粗颗粒滑移起动所需的激发

流速最低, 绕边起动次之, 颗粒嵌固起动所需的激发流速最大。如在 30° 坡度条件下, 滑移起动所需激发流速为 0.349 m/s , 绕边起动激发流速为 0.43 m/s , 嵌固起动激发流速为 0.473 m/s 。据此推断, 当水流流速达到一定程度(如 30° 坡度条件下、流速为 0.349 m/s) 时, 粗颗粒的最初起动以滑移为主; 随着水流流速增大, 逐渐出现翻转起动; 当水流流速急剧增大时, 大部分嵌固粗颗粒会以翻转的方式瞬间起动, 从而形成稀性坡面泥石流。

参考文献(References)

- [1] Xie Hong, Zhong Dunlun, Jiao Zheng et al. Debris flow in Wenchuan earthquake-hit area in 2008 [J]. Mountain Research 2009 27(4): 507–509 [谢洪, 钟敦伦, 矫震, 等. 2008 年汶川地震重灾区泥石流 [J]. 山地学报 2009 27(4): 507–509]
- [2] Han Qiwei, He Weiming. Sediment movement statistical theory [M]. Beijing: Science Press, 1984: 101–103 [韩其为, 何为民. 泥沙运动统计理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1984: 101–103]
- [3] Kramer H. Sand mixtures and Sand Movement in Fluvial Modal [J]. Trans. ASCE, 1935, 100: 798–838
- [4] Dou Guoren. Again start on the sediment flow rate [J]. Sediment Research, 1999, 6: 1–7 [窦国仁. 再论泥沙起动流速 [J]. 泥沙研究, 1999, 6: 1–7]
- [5] Han Qiwei, He Weiming. Sediment start rule and starting velocity [M]. Beijing: Science Press, 1999 [韩其为, 何为民. 泥沙起动规律及起动流速 [M]. 北京: 科学出版社, 1999]
- [6] He Wendu. Nonuniform sediment characteristics [D]. Chengdu: Sichuan University, 2002: 46–47 [何文社. 非均匀沙运动特性研究 [D]. 成都: 四川大学, 2002: 46–47]
- [7] Cheng Qibo, Jie Mingshu, Zhang Hongjiang. SanXia dam area non-cohesive uniform granite sand starter Conditions [J]. Peoples of the Yangtze River, 1996, 27(7): 13–14 [陈奇伯, 解明曙, 张洪江. 三峡坝区非粘性均匀花岗岩砂粒起动条件研究 [J]. 人民长江, 1996, 27(7): 13–14]
- [8] Qian Ning, Wan Zhaohui. Sediment movement [M]. Beijing: Science Press, 1983: 53–55 [钱宁, 万兆惠. 泥沙运动 [M]. 北京: 科学出版社, 1983: 52–55]

Starting Conditions of the Coarse Particles about Diluted Slope Debris Flows under Clear Water Conditions

HE Kun¹, SHEN Junhui¹, LIU Hai^{1, 2}, TONG Jianbo¹, LIN Li¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. The Geological Survey Management Center of Anhui Charities, Hefei, Anhui 230040, China)

Abstract “5.12” Wenchuan earthquake generated a lot Slumping Mass, the angular coarse particles on slope are easy to start forming debris flow Under water erosion. This article is on the basis of the Geological research model of the earthquake debris flow on slope, established the basic model of the cube as the coarse particle of the lean debris flow on slope, combined with a wide size distribution characteristics of the debris flow on slope, the cube model contain the slip, flip (including around the edge flip, flip around and embedded solid fulcrum around the edge flip) and other start-up mode, and the theory are based on the hydraulics, sediment dynamics, deducing the starting average velocity formula of the coarse particles in the slip. Referring Chen Qibo experimental data, we calculate the starting velocity when the diameter of particles is $5 \sim 10 \text{ mm}$ at different slope conditions, the comparison of the data showed good agreement between the two, indicating that the cube as a starter model of debris flow on slope dilute coarse particles is reasonable. The results also show that, under the same gradient conditions, the Stimulate the flow rate of coarse starting slip is the minimum, followed by winding start side, the flow rate of solid particles embedded in the excitation required for starting is the maximum. For examples, the gradient is 30° under the conditions of starting the slip velocity of the flow excitation 0.349 m/s , about the starting edge of 0.430 m/s , embedded solid starter is 0.473 m/s . As we can infer from this, when the water reaches a certain velocity (such as flow velocity below 30° slope of 0.349 m/s), the coarse particles initially start to slip; as the flow rate increases, the gradual emergence of flip start; when the flow velocity increases sharply, most embedded solid coarse particles to flip instant way to start to form a dilute of debris flow on slope, thereby forming a dilute of debris flow on slope. The achievement has some theoretical significance for thinning of debris flow on slope starting conditions study, debris flow disaster warning has a guiding role.

Key words: diluted slope debris flows; starting way; starting velocity; cube; slip start; flip start