

# 粘性泥石流残留层与泥深的关系分析

吴积善, 张 军, 程尊兰, 游 勇, 刁惠芳

(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)

**摘 要:** 粘性泥石流泥深的观测数据过去大部分不包含残留层厚度, 认为当后继粘性泥石流通过残留层时, 残留层是不动的, 泥深从残留层表面起算。本文通过大量的泥石流原型观测和简易模型试验表明, 当后继泥石流通过时, 残留层除底部很薄的一层不动外, 都是运动的, 并有三种运动形式, 泥深应包含残留层。残留层的厚度一般为 20~60 cm, 这样对过去不包含残留层厚度的泥深观测数据应进行更正, 粘性泥石流流量和输沙率也需相应增加。

**关键词:** 粘性泥石流; 残留层; 泥深确定

中图分类号: P642. 23

文献标识码: A

## 1 问题的提出

残留层是粘性泥石流通过后, 粘附在河床、沟岸或堆积扇面上的一层泥石流流体, 它对粘性泥石流具有改变泥深、增大流量、减小阻力、缓和冲淤、孕育多种流态和塑造特殊地貌形态等作用。但是近 20 余年来对它的专门研究很少, 以致某些很关键的粘性泥石流问题, 长期没有得到解决, 例如泥深与残留层的关系。泥深( $h_c$ )看起来是一个很简单的问题, 但泥石流界对粘性泥石流的泥深却存在着二种截然不同的观点。一种认为: 粘性泥石流经过铺床形成残留层后, “后来的阵性泥石流就以很高的流速(平均流速 10 m/s, 最大流速 15 m/s), 在泥面上运动”<sup>[1]</sup>, 残留层为“不动的粘附层”<sup>[1]</sup>, 因此泥深的底面从残留层的表面算起, 不包含残留层。另一种观点认为: 残留层形成后, 后继的粘性泥石流通过时, “残留层也运动”<sup>[2]</sup>, 只有残留层底部很薄的一层是不运动的<sup>[3, 2]</sup>, 泥深从未铺床前的沟床面算起, 即包含残留层, 这种观点是通过模型试验形成的, 在天然泥石流沟床没有得到充分的验证。这样国内按前一种观点进行观测的泥石流站的泥深不包含残留

层; 按后一种观点观测的泥深包含残留层。而粘性泥石流残留层的厚度一般为 20~60 cm, 大者可达 100 cm 以上, 则按上述二种观点分别进行观测, 泥深可以相差 20~60 cm, 甚至超过 100 cm。如图 1 按云南东川蒋家沟 2001—08—10 的泥石流观测资料点绘, 第 4 阵泥石流的残留层厚一般为 32 cm, 后继第 5 阵泥石流在残留层表面以上的泥深为 25 cm, 如果泥深不含残留层为 25 cm, 含残留层则 57 cm, 二者相差一倍以上; 第 8 阵与第 9 阵也一样, 二者相差 36 cm。

虽然这二种观点早在 1981 年前已经出现, 但一直没有统一, 而目前国内, 以至国际上, 粘性泥石流的流速、流量、输沙量等计算公式的建立或检验所需泥深等数据, 多采用我国东川泥石流观测研究站的观测资料, 亦有采用武都泥石流观测站的资料, 而这二个站却分别按上述二种观点进行观测的。这样就出现了一个涉及到这些流速、流量、输沙量等计算公式客观性的问题, 因为泥深是这些公式最主要的参数之一, 如果泥深相差 20~60 cm, 以至 > 100 cm, 则公式的正确性和实用性就值得推敲。

因此, 摆在当前泥石流界一个十分严谨的重要问题是粘性泥石流泥深是否包含残留层? 为解决此

收稿日期(Received date): 2002—12—10; 改回日期(Accepted): 2003—05—10.

基金项目(Foundation item): 国家自然科学基金资助项目(49971012)[ This research is supported by the National Science Foundation Grant.]

作者简介(Biography): 吴积善(1938—), 男, 浙江慈溪市人, 研究员, 从事以泥石流为主的山地灾害研究和防治实践。[ Author: Wu ji-shan (1938), male, born in Cixi, Zhejiang professor, majors in dynamics and mitigation practice of debris flow hazards ]

1) 中国科学院兰州冰川冻土沙漠研究所、东川矿务局、北京大学地质地理系。云南东川蒋家沟的泥石流。油印稿。1973. 87.

2) 吴积善, 田连泉。泥石流波(龙头)的形成和演变。参加 1981 年铁路泥石流学术会议论文, 中国科学院成都地理研究所印。1981. 3~7.

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

问题必须查明: 当后继泥石流通过残留层时, 残留层是否运动? 以什么形式运动? 是否有不动层存在?

## 2 观测、试验方法

为了查明和解决上面提出的问题, 采用了东川蒋家沟原型泥石流观测、人工泥石流试验和简易模型试验相结合的方法。

### 2.1 蒋家沟原型泥石流观测

除了配合东川泥石流观测研究站对蒋家沟部分

次、阵的泥石流进行常规观测外, 还于 2000 年和 2001 年雨季在站的观测断面上游, 选择了相对比较窄、顺直、沟岸稳定的观测沟段, 重点进行残留层观测。该段长 64.5 m, 沟床宽 25 ~ 36 m, 纵比降 0.062 ~ 0.070, 除观测泥石流常规要素外, 重点对白天暴发的部分粘性阵性泥石流(简称阵性流)残留层的特征、表面结构、泥石流通过时的运动形式, 进行了 9 次观测, 并作取样分析。其中有一次, 在二阵泥石流之间, 观测人员冒险多次进入沟床, 用测杆测定约为 half 沟床宽的残留层厚度(图 1)。

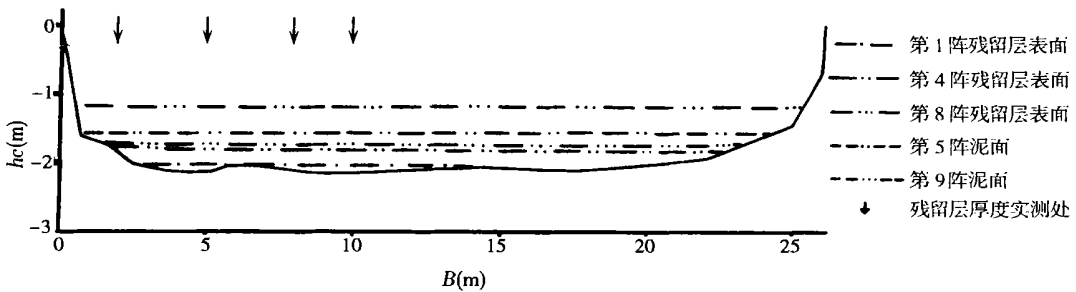


图 1 东川蒋家沟 2001—08—10 几阵粘性泥石流的泥面和残留层

Fig. 1 Residual thickness and flow surface of several surges of viscous debris flow in Jiangjiagou Gully, Aug. 10, 2001

### 2.2 支沟自然泥石流和人工泥石流观测

在蒋家沟中偏下游, 选择了一条名为滑脚坡沟的高频率粘性泥石流支沟进行观测, 观测段分别设在该沟的出山口下方和堆积扇上, 长 15 m 左右, 沟床宽 0.8 ~ 2.5 m, 过流断面宽一般为 0.3 ~ 1.8 m, 纵比降一般为 0.1736 ~ 0.2164, 最大到 0.6494。除测定泥石流的常规要素外主要是通过预放在残留层上部的多种浮标观测阵性泥石流通过时, 残留层的运动形式、厚度、隆起在表面大石块的变化状况, 共观测 9 场 84 阵。被观测的泥石流有自然形成的, 也有人工进沟挖下两岸含水量丰富的松散堆积物至沟床中, 制造的人工泥石流, 两者的性质基本相同。

### 2.3 简易小型模型试验

试验槽由木板制成, 考虑本项试验的对象是既不均匀又不稳定的粘性阵性泥石流。因此我们选用的槽子比较短, 操作方便, 但可以做多种试验。槽子全长 5.0 m, 从进口到出口分 1.7、1.9 和 1.4 m 三段; 中段有 0.24、0.34 和 0.48 m 三种宽度, 上下二段均为 0.24 m; 三段之间用可以转动的轴相连, 每段比降可从 0° 变至 45°。设 6 个断面观测泥位、流速(用浮标或龙头作标志测定)、流态和残留层厚度

等。重点进行了残留层在泥石流作用下再次运动时的表面流速横向分布(用小块泡沫预置在残留层表面, 一般放 5 点); 中泓流速垂线分布(先把标有不同色彩、直径 1 mm 左右的细竹棍预埋在槽中部的残留层中, 一般为 3 ~ 4 处, 当后继泥石流通过时, 它们发生运动, 等其停止运动, 再次成为新的残留层后, 再把竹棍找出来, 根据其前进的距离, 由表面一根的运动速度推算其它各根的平均速度)。采用上述不同要素的组合, 共进行了 24 组 192 次试验。

## 3 观测、试验和研究结果

通过上述的观测和试验, 获得了大量资料, 尤其是实测数据。在此基础上通过分析研究, 解决了第 1 节提出的问题。

### 3.1 在正常情况下残留层是运动的

通过上述方法的观测、试验, 都说明除少数特殊情况外, 当后一阵泥石流通过前一阵形成残留层时, 除底部很薄的一层外, 残留层都是运动的, 后一阵泥石流(包括上游残留层物质的参与)通过后出现的残留层, 是由后一阵泥石流体形成的。其依据为:

1. 表 1 为蒋家沟 2001—08—10 下午暴发的一次泥石流中前后(第 8 和第 9 阵)二阵泥石流及其残留层的观测资料, 资料表明: ①前后二阵泥石流的容重不同, 前阵比后阵大  $0.11\text{ g/cm}^3$ ; 残留层的容重亦不同, 前阵比后阵大  $0.10\text{ g/cm}^3$ , 变化趋势与泥石流相同; ②前后二阵隆起在残留层表面的大石块数量不同, 相差 3 块, 位置亦有明显变化; ③前后二

阵残留层的厚度不同, 前阵比后阵大 4 cm 左右; ④前一阵残留层中有一根小树枝, 在后一阵的残留层中没有再见到。这都说明: 后一阵泥石流通过后的残留层是由后一阵泥石流流体构成的, 而不是前期残留层延续遗留下来的, 在滑脚坡沟的观测结果与上述结果一致。

表 1 东川蒋家沟 2001—08—10 前后二阵泥石流残留层的某些要素变化

Table 1 Variations of some elements of residual layers before and after two surges of debris flow in Jiangjagou, Aug. 10, 2001

项目	容重	泥深 <sup>1)</sup>	隆起在残留层表面的大石块		残留层厚度(cm)			
	$\text{g/cm}^3$	cm	块数	位置	离岸 2m	离岸 5m	离岸 8m	离岸 10m
8 阵	泥石流	2.23	72					
	残留层	2.22	8	多数偏南侧	14	33	36	41
9 阵	泥石流	2.12	90					
	残留层	2.12	5	多数在中部	13	30	32	35

1) 泥深包括残留层厚度。

2 在简易模型试验中, 通过预埋在前一阵残留层中细竹棍和安放在表面上的泡沫块清楚地显示, 在正常情况下残留层除底部极薄的一层外, 竹棍或泡沫块均有不同程度地向前运动, 后一阵泥石流通过后的残留层, 是由后一阵泥石流流体遗留下来的。图 2 的 4 个图式左边呈直线的点, 在平面上是横向安放在前一阵残留层表面的 5 个泡沫块, 在剖面上的 3~4 点是沿垂向埋入残留层中的竹棍; 右边的点是在后一阵泥石流作用下经过运动后, 在新的残留层表面或其中停积下来的相应标志点, 即经历了残留层体—泥石流流体—新残留层体的过程。这种情况一般只出现在泥石流流速不大, 扰动很弱的情况下, 尤其在模型试验中。所有图式都说明在后一阵泥石流的作用下, 残留层都是运动的, 运动的距离由槽壁向中间, 底层向表层加大, 除底部加糙的图 2—b 外, 底部的竹棍亦都是运动的, 说明在比较光滑的木板面上不动层是极薄的, 为一层粘附在板面上的泥浆膜。图 2—a、b、c 的表面流速均  $< 0.4\text{ m/s}$ , 呈底部滑动的蠕动流或层移流, 因此横向或垂向诸点经过运动后虽然彼此的间距有所变化, 但排列的次序没有改变; 图 2—d 的流速  $> 0.6\text{ m/s}$ , 有一定的扰动, 在横向和垂向的间距变化很大, 横向排列的次序也有改变, 有的卷入流体之中。如果流速更大, 扰动更强烈, 则横向和垂向上部的诸标志点排列会更混乱, 可惜由于试验槽短, 流速太大, 所有横向的泡沫块和垂

向的中上部的竹棍均冲出试槽, 测不到这种状态下的数据。

3.2 残留层具有三种运动形式

由于残留层的容重( $\gamma_a$ )、厚度( $ha$ )和底部沟床粗糙度不同, 以及后继泥石流的流速( $V_c$ )、容重( $\gamma_c$ )和泥深( $hc$ )的差异, 根据模型试验和原型观测发现残留层不仅运动, 还具有三种运动形式(图 3)。

1. 挤压——隆起——底部滑动的蠕动流、波动流或层移流

当后继泥石流流速较小( $V_c < 1.2$ (适用于模型试验)~ $3.0$ (适用于一般泥石流沟) $\text{m/s}$ )时, 在其作用下, 残留层首先受到挤压, 随之向上隆起,  $ha$  增加, 只要  $ha$  一增加, 残留层逐渐解体并开始向前运动。当泥石流  $V_c < 0.5 \sim 0.8\text{ m/s}$ , 而原来残留层的容重( $\gamma_a$ )和结构强度较大(即较粘稠)时多呈蠕动流(图 3—a);  $\gamma_a$  和结构强度较小(即比较偏稀)时, 先出现波动流(图 3—b), 然后为层移流。当泥石流  $V_c > 0.5 \sim 0.8 (< 1.0 \sim 2.0\text{ m/s})$  时, 开始就呈流速较大的层移流(形式与图 3—a 相似)。简易模型试验的残留层, 大多为这类运动形式。

2. 撞击——抬升或飞溅——拢(紊)动流

当后继泥石流流速较快( $V > 1.2 \sim 3.0\text{ m/s}$ )时, 泥石流强烈撞击残留层, 随之出现抬升, 飞溅, 残留层体与泥石流流体相互搅杂, 并迅速向前运动, 常呈拢(紊)动流(图 3—c)。蒋家沟泥石流的残留层大多

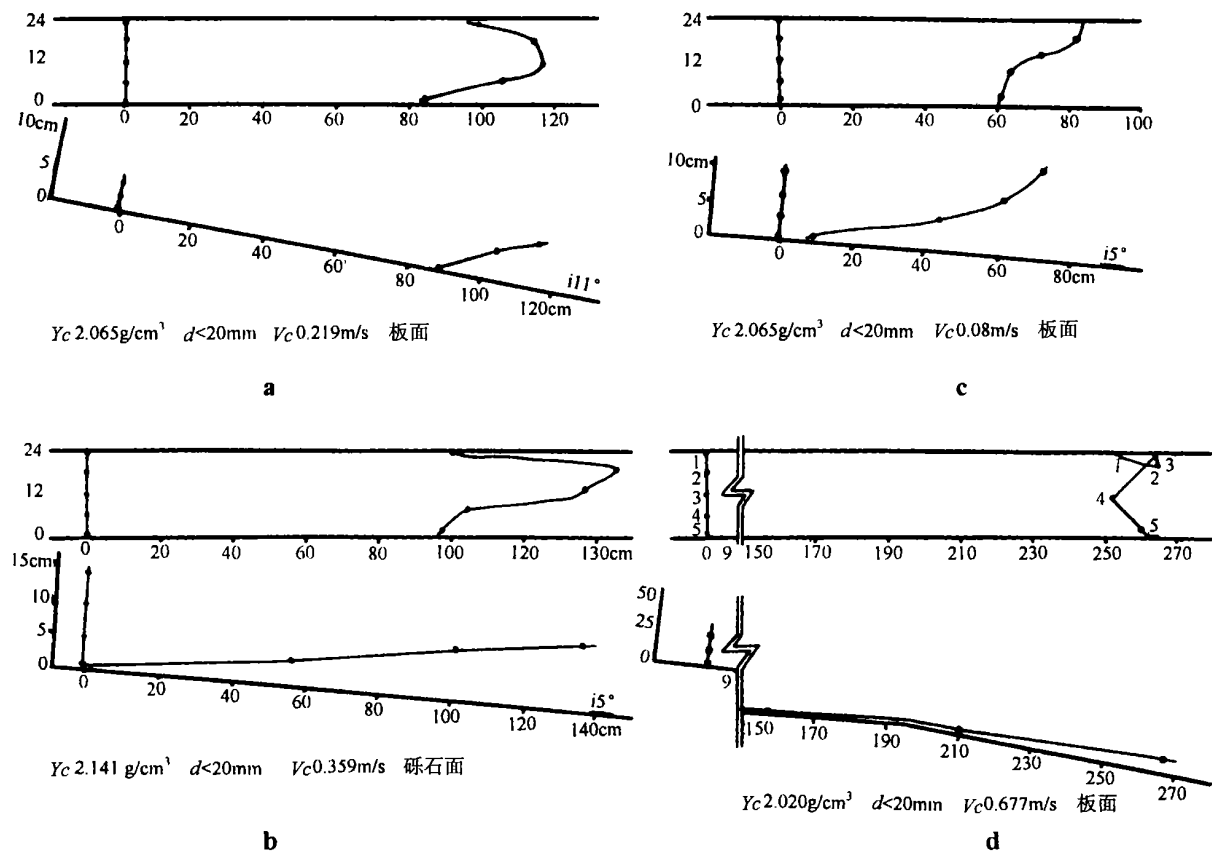


图 2 残留层在粘性泥石流作用下, 经过运动再次成为残留层后横向和垂向诸标志点的分布变化

Fig. 2 Variations of mark distributions in vertical and horizontal directions after the passing of viscous debris flow through the residual layer

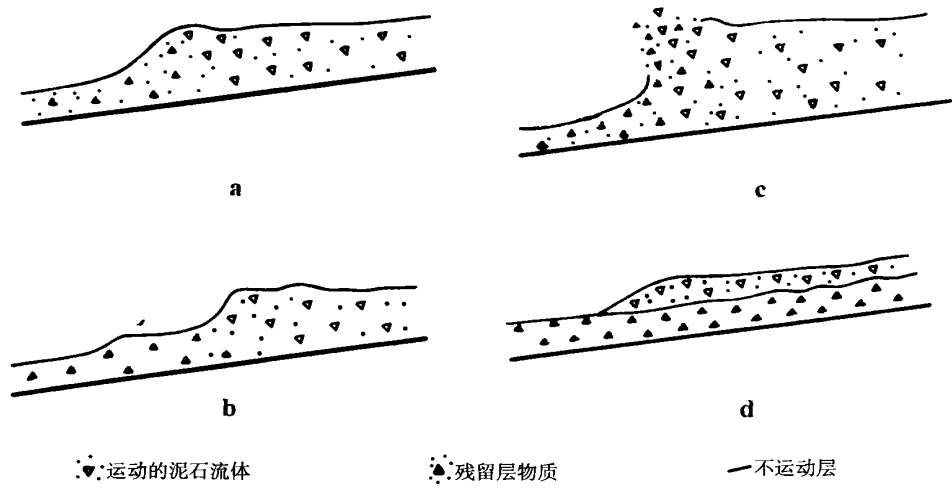


图 3 残留层在后继泥石流通过时的运动形式

Fig. 3 Motions of residual layers at the passing of successive surge

数为这种运动形式。

### 3. 超伏——表层稀释冲起——参与上部泥石流运动

当残留层的容重很大( $\gamma_a > 2.3 \sim 2.4 \text{ g/cm}^3$ ), 结构性很强, 显得十分粘稠, 而后继泥石流的  $\gamma_c$  较小( $< 1.9 \text{ g/cm}^3$ ), 流动性强, 规模又比较小, 这样不足以挤压或撞击残留层时, 泥石流流体就超伏在残留层上, 沿着其表面向下流动(图 3—d)。在其流动中“稀释”了残留层表层, 被稀释部分结构强度锐减, 往往被冲起, 与上部的泥石流一起运动, 但残留层在总体上没有明显运动。这种运动形式只发生在上述很特殊的条件下, 在全部观测、试验中仅出现于滑脚坡沟泥石流堆积扇上。

### 3.3 在残留层底部与沟床之间有一个厚度很小, 又不连续的不动层

泥石流沟的床面往往由于多种原因显得粗糙不平, 但经过几阵粘性泥石流后, 就被泥石流填平或夷平。过去有不少研究者把残留层表面视为泥石流沟的床面, 但实际上残留层在后继泥石流的作用下是运动的, 其表面不能作为床面, 真正的床面是在残留层底部那个被泥石流填平和夷平的面。从图 2 的 a、c、d 的 3 个图式看出, 安放在残留层底部, 即试验槽底板面上的细竹棍, 当泥石流作用下残留层发生运动时, 竹棍都有不同程度的运动, 但板面上始终粘附着一层极薄的可视为不动的泥膜, 其厚度不超过 0.5 mm, 因为竹棍的直径为 1.0 mm 左右, 若不动的泥膜厚超过 0.5 mm, 则竹棍就可能不会运动。

至于原始的沟床面高低不平时, 则不动层的表面应该是那个被泥石流填平或夷平的平滑面。从图 2—b 看出, 安放在残留层底部的竹棍当残留层运动时它却没有运动, 其原因是此次试验在试验槽底部铺了一层扁平的石块, 石块的厚度一般为 2.5 cm, 变化于 2.0 ~ 3.0 cm。试验表明: 假如把竹棍安放在厚度薄的石块上, 则其上面充填流体比较厚, 它就不会运动, 如图 2—b。假如放在比较厚的石块上, 上面充填的流体很薄, 或仅有一层泥膜, 就容易运动。通过初步试验和分析, 如果最高(3 cm)的石块

面按 100 % 计, 则不动层的表面大概是在占总表面积约 75% 的那个石块高度的面上, 然后再加上石块表面的泥膜厚度。这对天然沟床也基本适用, 即泥深从沟床面较高的部位开始起算。尽管天然沟床的凹凸度或石块大小不一形成的高、低差比较大, 但这个平滑面以下的所谓不动部分, 实质上是充填于石块之间或凹坑之中的泥石流流体, 是一个不连续层。而平滑面只略高于通常所说的平均沟床面, 加之泥膜层很薄, 因此在正常情况下不动层的有效厚度很小, 与泥深或残留层厚度相比, 可忽略不计。在一些很特殊的情况下, 不动层可能比较厚, 如上节介绍的残留层第三种运动形式(图 3—d), 但这种情况很少出现。

综合上述三项结果, 清楚地说明残留层当后继粘石泥石流通过时, 在正常情况下, 除底部很薄一层不动外, 都是运动的, 并具有三种运动形式, 虽然第三种形式不动层较厚, 但这是一种特殊条件下的形式, 仅出现在小型支沟的泥石流堆积扇上, 一般主沟泥石流未见到这种情况。所以粘性泥石流泥深应包含残留层, 基本上可以从原沟床面比较高的部位起算。

### 参考文献(References):

- [1] Du Ronghuan, Kang Zhicheng, Chen Xunqian, *et al.* A Comprehensive Investigation and Control Planning For Debris Flow in Xiaojiang River Basin of Yunnan Province. Chongqing: Chongqing Branch of Science and Technology Document Press, 1987. p142. [杜榕桓, 康志成, 陈循谦, 等. 云南小江泥石流综合考察与防治规划研究[M]. 重庆: 科学技术文献出版社重庆分社, 1987. 142.]
- [2] Traffic Science Institute of Gansu Province, and Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, CAS. Road Engineering in Debris Flow Areas. Beijing: The People's Traffic Press, 1981. P51. [甘肃省交通科学研究所, 中国科学院兰州冰川冻土研究所. 泥石流地区公路工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 1981. 51.]
- [3] Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, CAS, and Traffic Science Institute of Gansu Province. Debris Flows in Gansu Province. Beijing: The People's Traffic Press, 1982. p39. [中国科学院兰州冰川冻土研究所, 甘肃省交通科学研究所. 甘肃泥石流[M]. 北京: 人民交通出版社, 1982. 39.]

# Relationship Between Depth and Residual Layer of Viscous Debris Flow

WU Ji-shan, ZHANG Jun, CHENG Zun-lan, YOU Yong, and DIAO Hui-fang

(*Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041 China*)

**Abstract:** Residual layer is left by viscous debris flow adhering to the channel, bank, or the surface of deposition fan, which plays an important role in changing flow depth, raising discharge, reducing resistance and silt and deposit. However, it has escaped from researches for 20 years and left us some key problems, such as, whether the flow depth contains the residual layer. Some authors point out that the subsequent flow is moving at high speed on the surface of the layer, keeping it unmoved, and the flow depth does not contain the layer (observations are those in Jiangjia Gully, Yunnan); others argue that the subsequent flow takes the under-layer moving forward together, and the depth actually contains the thickness of the layer (observations are those in Wudu, Gansu). Thickness of residual layer is about 0.20~0.60m on average, resulting in error of the same magnitude in depth calculation, which imposes direct influence on the calculation of velocity, discharge, and sediment yield. Therefore it is urgent to answer that whether the flow depth contains the layer thickness.

Field observations of living debris flows in Jiangjia Gully, man-made debris flows in tiny tributary, and simulation experiments have shown that only a thin base part is left while the main moves together with the subsequent surges when they pass through on the precursory layer. The layer moves in three manners: creep, wave, or base laminar flow through a extrusion-uplift-base slip process; turbulence through collision, scattering and splash; intrusion into the above flow through dilution and convection. The second manner, turbulence, is most frequent in natural debris flows. In conclusion, flow depth does contain thickness of the residual layer, and observation data should take these in account. Correspondingly, formulas for related calculations must re-confirmed by data after correction.

**Key words:** debris flow; residual layer; flow depth determination