

刘双, 余斌, 陈文鸿. 中颗粒粒径、级配对泥石流屈服应力的影响[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 230-242. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.017

LIU Shuang, YU Bin, CHEN Wenhong. Effect of medium-sized particle diameter and grading on yield stress of debris flow[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 230-242. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.017

中颗粒粒径、级配对泥石流屈服应力的影响

刘双^{1,2}, 余斌¹, 陈文鸿¹

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 贵州省地质矿产勘查开发局 114 地质大队 贵州省地矿局第二工程勘察院有限公司, 贵州 遵义 563000)

摘要:【目的】一般情况下, 泥石流屈服应力与固体体积浓度呈正相关, 也会随着黏土黏性的增强而增大, 同时还受粗颗粒特性的影响, 而现有的室内流变试验中未将中颗粒性质对屈服应力的影响纳入考虑之中。为了研究中颗粒性质对屈服应力的影响, 完善屈服应力计算模型, 【方法】以泥石流屈服应力为研究目标, 选取4种不同目数的中颗粒石英砂作为研究对象, 通过改变泥石流固体体积浓度、中颗粒粒径和级配, 配制泥石流浆体进行室内流变试验, 并对试验数据进行统计和分析。【结果】分析及对比结果显示: 中颗粒级配越好, 泥石流屈服应力就越小, 反之, 泥石流屈服应力就越大; 当泥石流固体体积浓度 $C_0 < 0.47$ 时, 中颗粒粒径对泥石流屈服应力几乎无影响, 当泥石流固体体积浓度 $C_0 \geq 0.47$ 时, 中颗粒粒径与泥石流屈服应力呈负相关。【结论】试验结果表明: 在粗颗粒研究基础上对中颗粒级配与中颗粒粒径进行修正后, 得到了新的体积浓度修正系数, 进一步完善了屈服应力的计算模型, 并验证了其具有更好的科学性和可靠性。

关键词: 泥石流; 屈服应力; 粒径; 级配; 形状; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.017

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P642.23

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)08-0230-13



Effect of medium-sized particle diameter and grading on yield stress of debris flow

LIU Shuang^{1,2}, YU Bin¹, CHEN Wenhong¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. 114 Geological Brigade of Guizhou Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Second Engineering Investigation Institute, Guizhou Bureau of Geology and Mineral Resources Co., Ltd., Zunyi 563000, Guizhou, China)

Abstract: [Objective] Generally, the yield stress of debris flow is positively correlated with solid volume concentration and the enhancement of clay viscosity. It is also influenced by the properties of coarse particles as well. However, existing laboratory rheological experiments have not considered the influence of medium particle properties on yield stress. To investigate the influence of medium particle properties on yield stress and improve the yield stress calculation model, [Methods] the yield stress

收稿日期: 2024-05-31; 修回日期: 2024-08-12; 录用日期: 2024-08-19; 网络出版日期: 2024-10-17

基金项目: 国家自然科学基金(U21A2032)

作者简介: 刘双(1992—), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为地质灾害防治、地下水污染防治。E-mail: 1204685952@qq.com

通信作者: 余斌(1966—), 男, 教授, 博士, 研究方向为地质灾害防治。E-mail: drbinyu@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

of debris flow was examined using four types of medium-particle quartz sand with different mesh sizes. By varying the solid volume concentration, medium particle size, and particle grading, debris flow slurry was prepared for laboratory rheological experiments, and the experimental data were statistically analyzed. [Results] Analysis and comparison result indicated that better medium particle grading resulted in lower yield stress, whereas poorer grading led to higher yield stress. When the solid volume concentration was $C_0 < 0.47$, medium particle size had little effect on yield stress. When $C_0 \geq 0.47$, medium particle size exhibited a negative correlation with yield stress. [Conclusion] The experimental result demonstrates that modifying medium particle grading and size, based on coarse particle studies, resulting a new volume concentration correction coefficient. This refinement further improves the yield stress calculation model, enhancing its scientific accuracy and reliability.

Keywords: debris flow; yield stress; particle diameter; grading; shape; influence factors

0 引言

泥石流是一种高重度、高级配、高黏性等性质不一,暴发突然、破坏力极强的非均质流体^[1-4],也是一种在水动力条件充足,即短历时强降雨条件下诱发的携带有大量泥沙、砾石甚至块石等物源的特殊洪流。我国活跃的地质构造、巨大的地形高差、季风气候带来的丰沛降雨、密集的人口分布和高强度的人类活动影响等因素的组合与叠加,使得泥石流广泛发育于约占全国陆地面积 2/3 的山地^[5-6],其中以四川、贵州、云南、西藏、甘肃等西部地区尤为严重。

当泥石流灾害爆发时,泥石流淤埋是造成建筑物与基础设施毁坏的主要危害方式,也是泥石流灾害评估与防治的重要参数之一。近年来,泥石流淤埋事件依然屡见不鲜,这不仅威胁着灾害点附近居民的正常生活,也阻碍了当地经济的发展。因此,对泥石流淤积厚度的影响因素进行研究,了解泥石流淤埋特点,以便相关工作者科学地开展防灾治灾工作,尽量减少甚至避免居民的损失,已经成为时下迫切的需求。

泥石流屈服应力是非牛顿体的固有属性,也是泥石流的关键流变参数,它与泥石流最大堆积厚度有着密切的关系^[7]。在泥石流屈服应力的影响因素研究中,国外学者认为屈服应力受泥石流固体体积浓度的影响最大,并与泥石流固体体积浓度的高次方成正比。其中,COUSSOT 等^[8]通过向清水中逐次加入从野外泥石流中提取的粗颗粒来配制不同的悬浮液,并运用多种流变测量技术确定其流变特性,对所得数据进行了赫歇尔-布克利模型拟合,建立了屈服应力-固体体积浓度曲线和流动曲线演化规律;ANCEY 等^[9]将黏粒与不同粗颗粒混合配制成泥石流流体后,进行泥石流模拟试验,试验结果表明泥石流流体的屈服应力取决于颗粒的体积浓度,提出计算屈服应力的经验公式,并进一步提出影响泥石流屈服应力的因素不止体积浓度,还要受粗颗粒的形状、级配分布、粒

径大小的影响;MARR 等^[10]通过水下砂质重力流试验,研究黏土与含水量在泥石流流动特性和泥石流沉积结构中的作用,并发现在一定的含水量和屈服强度下,膨润土的活性相对较高,高岭土的活性相对较低,黏土成分和含水量的不同也会使泥石流的沉积结构呈现出差异性。

国内学者则主要从泥石流密度、颗粒级配以及黏土矿物等影响因素进行试验研究,其中,马煜等^[11-12]在对不同黏粒成分和含量与泥石流屈服应力的关系研究试验中指出,泥石流屈服应力不仅与固体体积浓度有关,还会随着黏粒成分与含量的变化而变化。当黏粒含量与固体体积浓度一定时,四种不同黏粒成分的屈服应力关系为:蒙脱土>伊利石>高岭土(绿泥石),高岭土与绿泥石两者之间无明显的黏性强弱关系,并得出关于屈服应力与固体体积浓度、黏粒成分和含量的综合关系式;YU 等^[13]通过泥石流浆体试验获得了黏粒成分、含量对屈服应力的影响,统一量化了不同黏土成分对屈服应力的影响程度,提出了等效黏粒含量 P_0 的概念,成功解决了在不同黏粒成分以及不同黏粒含量下泥石流屈服应力与体积浓度的关系问题,并建立了屈服应力的计算模型;陈源井^[14]通过泥石流浆体试验,进一步研究粗颗粒特性(粒径、级配、材料以及形状)对泥石流屈服应力的影响关系,提出了等效体积浓度 C 的概念,建立了更为全面的屈服应力计算模型。

综上,国内外学者对泥石流屈服应力的影响因素研究已经做了大量工作,并且取得了丰富的研究成果,但是他们在试验中配制的泥石流浆体与野外实际的泥石流之间依然存在一定的差距,忽略了中颗粒部分对泥石流屈服应力的影响,试验材料以粗颗粒和黏粒为主(大多数流变试验中定义粒径介于 0.250~200.000 mm 的颗粒为粗颗粒,小于 0.005 mm 的颗粒为黏土颗粒,介于 0.005~0.250 mm 之间的颗粒为中颗粒^[15-18]),而野外泥石流中不仅含有粗颗粒与黏

粒,还有中颗粒的存在,笔者通过资料收集、实地调查、采样进行马尔文激光粒度分析后,发现中颗粒部分约占5%~25%^[19-23],因此,在黏土矿物成分和粗颗粒特性对泥石流屈服应力影响研究的基础上,引入颗粒粒径介于0.005~0.250 mm的中颗粒材料,量化中颗粒级配、中颗粒粒径以及中颗粒形状,探究不同中颗粒级配、中颗粒粒径在泥石流屈服应力中的影响,分析其作用机理,并对中颗粒形状与屈服应力的作用关系进行定性研究,进一步完善屈服应力计算的公式,对我国泥石流灾害防治具有重要意义。

1 试验概述

1.1 试验装置设计

泥石流的屈服应力,可以通过下式计算得出^[15]

$$\tau = hg(\gamma_c - \gamma_0) \sin \theta \quad (1)$$

式中, τ 为泥石流屈服应力(Pa); h 为泥石流的淤积厚度(m); γ_c 为泥石流密度(kg/m^3); γ_0 为环境密度,在空气中时, $\gamma_0 = 0$,在水中时, $\gamma_0 = 1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$; g 为重力加速度,常取值 $9.81\text{ m}/\text{s}^2$; θ 为泥石流淤积段淤积坡度($^\circ$)。

泥石流最大淤积厚度是指泥石流流体在自身重力作用下产生运动趋势的同时,还要克服泥石流运动的阻力,即屈服应力,当具有运动趋势的剪切力恰好等于屈服应力,这种临界状态下的淤积厚度就是最大淤积厚度。为了获取在不同中颗粒特性下泥石流流体的淤积情况,本文采用了一套小型泥石流室内试验装置(见图1),该装置中玻璃流通槽:长100 cm,宽20 cm,高30 cm。为了使玻璃流通槽底部更接近野外泥石流沟床的实际情况,采用钢板对槽底做了加糙处理,加糙厚度为0.3 cm。在试验过程中,可以通过旋转坡度升降杆以达到模拟不同沟床纵坡的目的,坡度调节范围为 $0^\circ\sim 45^\circ$,装置末端是容积约为 0.1 m^3 的泥石流储料箱,并在储存泥石流浆体时用木板前后封口,一方面是避免泥石流从装置末端流出,另一方面是避免在调整装置纵坡时,泥石流浆体受震动影响而先行流入玻璃流通槽,干扰后续试验中的淤积厚度测量。

1.2 试验步骤设计

本试验主要包括准备阶段和试验阶段两部分。其中,准备阶段涉及泥石流浆体配制和试验装置、测量工具准备;试验阶段则以倒入泥石流浆体、调整玻璃流通槽纵坡、测量所需参数为主要内容。

1.2.1 准备阶段

(1)按照试验控制变量设计,选择对应的中颗粒组合。

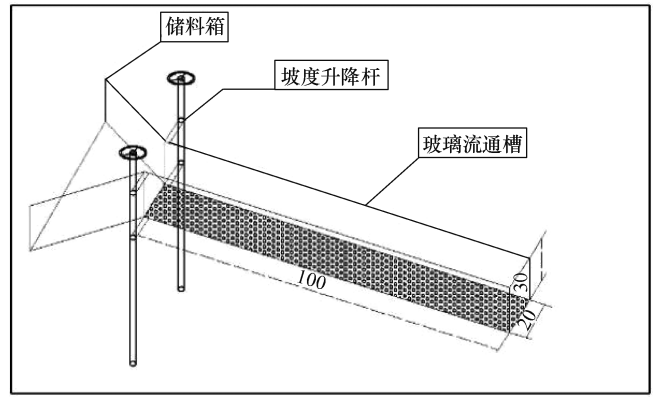


图1 试验装置示意(单位: cm)

Fig. 1 Experimental apparatus schematic (Unit: cm)

(2)计算泥石流浆体配料所需用量,主要包括各种目数中颗粒的质量,蒙脱土的质量以及水量。

(3)对计算好的配料进行称取,并按水、蒙脱土、中颗粒的先后顺序依次加入到搅拌桶中,充分搅拌使其混合均匀(见图2)。

(4)清洗试验装置,并检查左右两边坡度升降杆的调节程度是否一致,以保证装置保持水平,再将试验装置放置于平整宽敞的场地。

(5)准备好测量泥石流浆体淤积厚度的直尺,测量流通槽纵坡的罗盘,并在每一次试验开始前检查罗盘读数是否准确。

1.2.2 试验阶段

(1)将配置好的泥石流浆体倒入装置储料箱内之前,需再充分搅拌1 min,待浆体倒入后,抽掉玻璃流通槽入口处的挡板,让泥石流浆体自由流入玻璃流通槽。

(2)等流通槽内泥石流浆体稳定无流动后,缓慢调节坡度升降杆,每次调整范围以 $2^\circ\sim 3^\circ$ 为宜,当泥石流浆体再次停止流动后,测量流通槽纵坡和对应的浆体淤积厚度,并记录测量数据。

(3)在同一组试验变量中,为使试验数据更加准确,需重复上一步骤,继续抬升流通槽纵坡,至少测量三组不同流通槽纵坡下的泥石流浆体淤积厚度,直到泥石流浆体全部流出流通槽为止。

(4)选择不同的中颗粒组合,在不同密度条件下继续重复前三个步骤,以完成控制变量试验,便于下一步的数据分析与探讨。

1.3 试验材料设计

试验中的泥石流浆体是由水、黏土、中颗粒材料按一定比例充分搅拌、混合得到,其中,受地域因素影响,不同地区的黏土有着不同的特性,对泥石流浆



(a) 配料称取



(b) 拌 合

图 2 配料称取及拌和

Fig. 2 Weighing and mixing of ingredients

体黏性的影响也不尽相同。为了消除这种差异性影响, YU 等^[13]提出了黏土特征系数 C_M 和等效黏粒含量 P_0 的概念, 为了获取本试验所用山东蒙脱土的 C_M 值, 在马煜^[11]室内试验的基础上, 采用与其相同的砂粒级配进行试验, 求得在屈服应力几乎相同时, 马煜试验所用的高岭土含量大概是本试验所用蒙脱土含量的 1.7 倍(见图 3), 即试验所用蒙脱土的 C_M 值为 1.7, 最终得到试验所用山东蒙脱土的 P_0 值为 0.153。

要研究中颗粒与泥石流屈服应力的作用关系, 首先要量化中颗粒的特性(级配、粒径、形状)。在粗颗粒与泥石流屈服应力的作用机理研究中, 陈源井^[14]采用等效粒径 d_v 来量化粗颗粒的粒径参数, 即

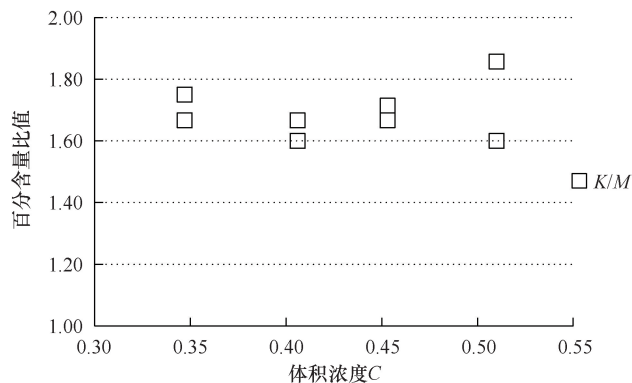


图 3 试验所用蒙脱土与基准高岭土的百分含量关系

Fig. 3 Relationship between percentage content of montmorillonite and reference kaolinite used in experiment

等效为与粗颗粒具有相同体积的球体直径, 与此同时, 选取平均等效粒径(加权平均)作为混合组合的粒径参数, 而本试验所用的中颗粒材料分别为 80 目、200 目、400 目以及 1 250 目的石英砂, 粒径大小主要介于 0.005~0.250 mm 之间, 无法通过排水法准确测算其等效粒径, 再加之这 4 种目数的石英砂都可以通过马尔文激光粒度分析绘制得到颗粒分布曲线(见图 4), 并且 d_v 与 d_{50} 取值上的差异最终体现在屈服应力数值上的误差变化不足 2%, 这种误差是可以接受的, 因此, 本文选取 d_{50} 作为中颗粒材料的粒径参数; 同样, 由于中颗粒粒径过小, 且有的颗粒近乎粉末状, 肉眼无法清晰观测其形状, 又受限于排水法直接测算, 故本文先将 4 种不同目数的中颗粒处理后置于不同倍数的显微镜下进行观测并拍照标记(见图 5), 再寻找大量与经放大后的中颗粒形状相似且粒径大小介于 2~5 μm 之间的颗粒, 分批次进行排水法和称重法测算, 测算值取平均, 以间接获得不同目数中颗粒的球度值 Ψ , 选取平均球度值(加权平均)

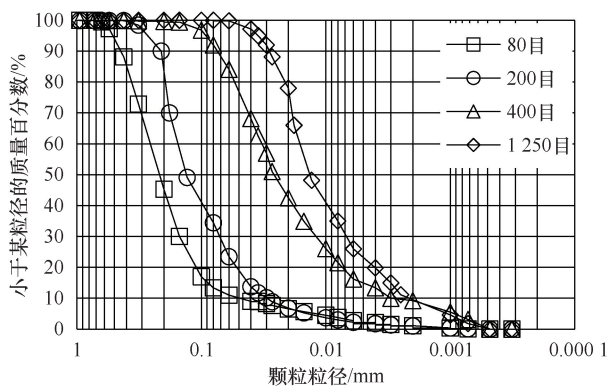


图 4 不同目数中颗粒的颗粒分布曲线

Fig. 4 Particle size distribution curves of medium particles with different mesh sizes

作为混合组合的形状参数,相关参数如表1所列。为了满足试验控制变量需要,在现有的4种中颗粒石英砂基础上,调配出了5个中颗粒组合,相关参数如表2所列。

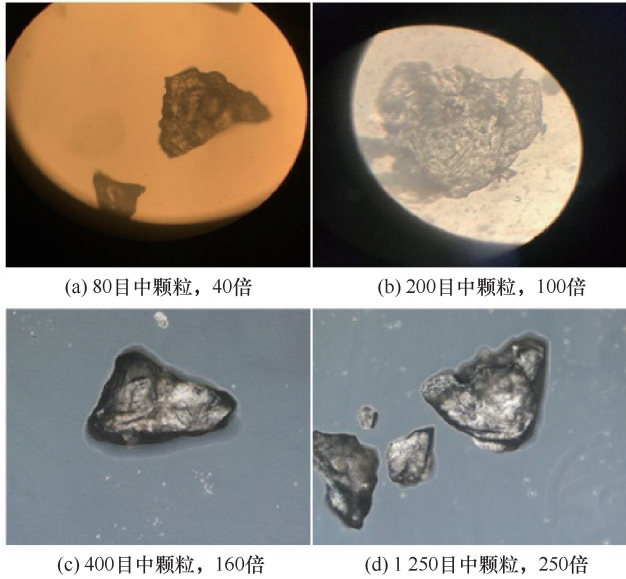


图5 四种中颗粒在显微镜下的形状

Fig. 5 Microscopic shapes of four medium particle types

表1 不同目数中颗粒的球度值

Table 1 Sphericity values of medium particles with different mesh sizes

中颗粒/目数	粗颗粒个数/个	S等体积球体/cm ²	S粗颗粒/cm ²	球度 Ψ
80	15	22.1	30.7	0.72
200	20	17.9	24.5	0.73
400	10	25.8	35.8	0.72
1 250	15	23.9	33.2	0.72

表2 中颗粒变量组合相关参数

Table 2 Relevant parameters of medium particle variable combinations

中颗粒组合	密度/g·cm ⁻³	d_{50} /mm	C_c	Ψ	各种目数中颗粒配比
组合1	2.65	0.025	1.2	0.72	80目:400目:1250目=3:2:5
组合2	2.65	0.070	1.2	0.72	80目:400目=1:1
组合3	2.65	0.027	1.4	0.72	80目:400目:1250目=3:3:4
组合4	2.65	0.025	1.6	0.72	200目:400目:1250目=2:5:3
组合5	2.65	0.025	1.0	0.72	80目:1250目=2:3
200目	2.65	0.130	1.2	0.73	
400目	2.65	0.027	2.4	0.72	
1 250目	2.65	0.014	1.2	0.72	

注: C_c 为曲率系数, 采用 $C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10}d_{60}}$ 计算得到^[24]; Ψ 为颗粒球度, 采用 $\Psi = \frac{\text{与颗粒等体积球体的表面积}}{\text{颗粒实际表面积}} = \frac{AS}{A} \leq 1$ 计算得到^[25]。

2 试验结果与数据分析

陈源井^[14]通过泥石流浆体室内试验, 进一步研究粗颗粒粒径、级配、材料以及形状对泥石流屈服应力的影响关系, 得出粗颗粒特性的不同最终会引起体积浓度的改变, 因此引入体积浓度修正系数 a 和等效体积浓度 C , 完善了余斌^[13]的计算模型, 建立了更为全面的屈服应力计算公式

$$\tau = \tau_0 C^2 e^{22CP_0} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \tau_0 = 30 & (C < 0.47) \\ \tau_0 = 30e^{5(C-0.47)} & (0.47 \leq C < 0.59) \\ \tau_0 = 30e^{5(C-0.47)} e^{8(C-0.59)} & (C \geq 0.59) \end{cases} \quad (3)$$

$$C = aC_0 \quad (4)$$

$$a = n \left(\frac{S}{6.61} \right)^{-0.01} \left(\frac{C_c}{0.523} \right)^{0.18} \left(\frac{\Psi}{0.72} \right)^{-0.4} \quad (5)$$

式中, τ 为泥石流屈服应力 (Pa); C_0 为初始体积浓度; C 为等效体积浓度; P_0 为等效黏粒含量; a 为体积浓度修正系数, 通过对粗颗粒材料、粒径、级配以及形状修正拟合得到; n 为材料系数, 取值情况由其材料种类决定, 其中玻璃颗粒和砂粒取值为 1, PVC 颗粒取值为 0.95, POM 颗粒取值为 0.89; S 为颗粒材料的平均表面积 (mm²), 可通过公式 $S = \frac{\pi d_{50}^2}{\Psi}$ 计算; C_c 为颗粒材料的曲率系数; Ψ 为颗粒球度值。

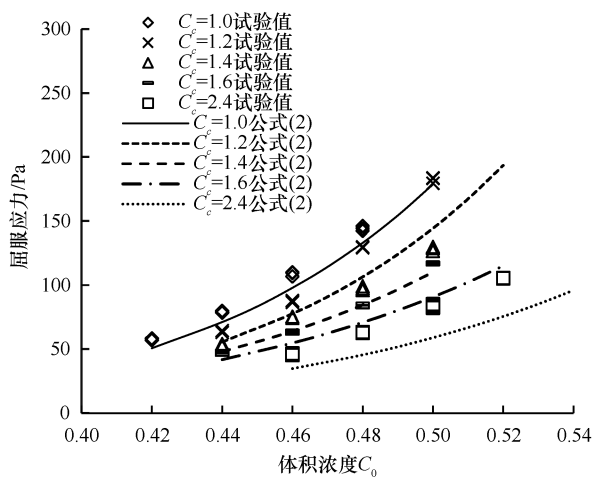
本试验将不同目数的中颗粒、水以及蒙脱土按一定比例混合搅拌, 配制成具有不同中颗粒级配、粒径的泥石流流体, 并按照其影响程度依次进行控制变量研究, 即最先研究中颗粒级配对泥石流屈服应力的影响, 其次是中颗粒粒径对屈服应力的影响, 受试验材料形状的制约, 最后只能对中颗粒形状与屈服应力的

影响情况进行定性分析,同时将试验数据与公式(2)的计算值进行对比,分析差异并依次进行参数修正,从而进一步得到了引入中颗粒级配和粒径后的体积浓度修正系数,具体的修正过程如下。

2.1 中颗粒级配与屈服应力的关系

试验在控制中颗粒组合的粒径参数 d_{50} 和球度 Ψ 基本一致且初始体积浓度 C_0 介于 0.42~0.52 之间的情况下,即选取表 2 中组合 1、组合 3、组合 4、组合 5 及 400 目进行试验,得到了不同的曲率系数 C_c 与泥石流屈服应力 τ 的关系,如图 6(a) 所示。当固体体积浓度相同时,随着曲率系数的增大,对应的泥石流屈服应力减小,与此同时,将中颗粒试验值与陈源井^[14]对粗颗粒研究得到的模型曲线进行对比后,发现粗颗粒研究值较中颗粒试验值小,且呈现出中颗粒组合越不均匀, C_c 值越大,级配越好,其试验值与粗颗粒研究曲线差异越大,相反,中颗粒组合越均匀, C_c 值越接近于 1,级配越差,试验值与粗颗粒研究曲线越接近,一方面验证了粗颗粒研究的可靠性,另一方面说明中颗粒级配对泥石流屈服应力确实存在较大影响,主要表现为当中颗粒级配较好,即中颗粒大小不均匀时,相对较小的颗粒会填充在较大颗粒的空隙之间,也就占据了原有封闭水的空间,导致固体颗粒的有效体积浓度相对减小,泥石流屈服应力也就较小;当中颗粒级配较差,即中颗粒大小均匀时,颗粒与颗粒之间的封闭水相对较多,固体颗粒的有效体积浓度相对增多,泥石流屈服应力也就较大,这与麻考^[26]、王珩^[27]等就颗粒级配对泥沙流变特性的影响研究结论相一致。

在考虑了中颗粒级配对泥石流屈服应力的影响



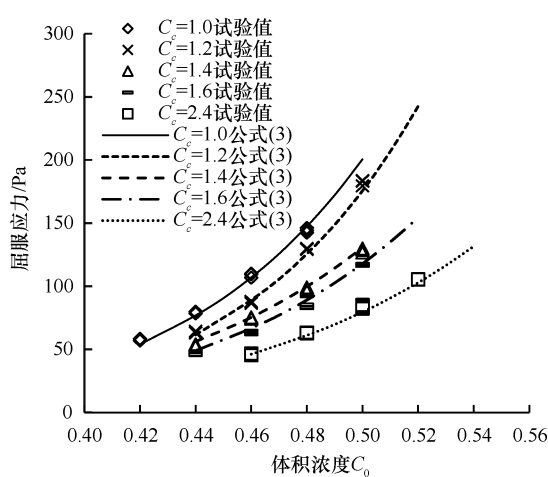
(a) 修正前

后,对公式(2)中的体积浓度修正系数 a 进行曲率系数 C_c 修正,公式(2)其余部分不变,修正结果如图 6(b) 所示,得到体积浓度修正系数 a_1 ,其表达式为

$$a_1 = 1.14n C_c^{0.14} \left(\frac{S}{6.61} \right)^{-0.01} \left(\frac{\psi}{0.72} \right)^{-0.4} \quad (6)$$

2.2 中颗粒粒径与屈服应力的关系

试验继续控制中颗粒组合的曲率系数 C_c 和球度 Ψ 不变,且初始体积浓度 C_0 介于 0.42~0.52 之间的情况下,即选取表 2 中组合 1、组合 2、200 目及 1250 目进行试验,得到了不同粒径参数 d_{50} 与泥石流屈服应力 τ 的关系,在整理试验数据时,发现当泥石流固体体积浓度 C_0 分别为 0.46、0.44、0.42 时,不同中颗粒粒径参数 d_{50} 的组合,其泥石流屈服应力值相差不大甚至无差别,即当体积浓度 C_0 为 0.46 时,4 个不同粒径参数 d_{50} 的组合,它们的浆体黏性相似,搅拌过程具有一定阻力,屈服应力值约等于 80 Pa;当体积浓度 C_0 为 0.44 时,4 个不同粒径参数 d_{50} 的组合,它们的浆体黏性相似,流动性较好,屈服应力值约等于 64 Pa;当体积浓度 C_0 为 0.42 时,4 个不同粒径参数 d_{50} 的组合,它们的浆体黏性相似,配料表现为易搅拌,易混合,浆体较稀,屈服应力值约等于 49 Pa;通过密度换算后,得到这三个体积浓度的密度值分别为 1.78 g/cm³、1.75 g/cm³、1.71 g/cm³,都属于稀性泥石流的密度值。由此推测,在中颗粒级配与形状相同的前提下,中颗粒粒径对稀性泥石流的屈服应力大小无影响。YU 等^[13]在进行屈服应力试验研究时,提出当泥石流固体体积浓度小于等于 0.47 时,粗颗粒粒径对泥石流屈服应力无影响,因此,本试验增加体积浓度为 0.47 的组次。



(b) 修正后

图 6 公式(2)在曲率系数修正前后计算值与试验值的对比

Fig. 6 Formula (2) Comparison between calculated and experimental values before and after curvature coefficient correction

如图 7(a) 所示, 当泥石流固体体积浓度小于 0.47 时, 中颗粒粒径对泥石流屈服应力影响不大甚至无影响。究其原因, 是体积浓度 0.47 换算成泥石流密度为 1.80 g/cm^3 , 该密度值恰好是稀性泥石流和亚黏性泥石流的分界密度, 泥石流固体体积浓度 $C_0 < 0.47$, 浆体黏度较差, 中颗粒在浆体中受到的粘滞力较小, 相互之间无法形成网络结构; 而当泥石流固体体积浓度 $C_0 \geq 0.47$ 时, 泥石流屈服应力 τ 随中颗粒粒径 d_{50} 的增大而减小, 一方面中颗粒粒径越大, 其比表面积越小, 受到的黏性也就越小, 其表面的物理吸附作用也越弱, 另一方面粒径越大的中颗粒受到的重力也越大, 两个因素都会导致泥石流屈服应力变小, 这与谈广鸣^[28]、陈沁泽^[29] 等就颗粒粒径对泥沙流变特性的影响研究结论相吻合。

对中颗粒级配参数(曲率系数 C_c) 进行修正后, 同时考虑到中颗粒粒径在泥石流固体体积浓度 $C_0 \geq 0.47$ 的情况下对泥石流屈服应力的影响, 再对公式(6)的体积浓度修正系数 a_1 进行中颗粒粒径参数 d_{50} (颗粒表面积 S) 修正, 修正结果可如图 7(b) 所示, 得到了体积浓度修正系数 a_2 , 其表达式为

$$a_2 = 1.14nC_c^{0.14} \left(\frac{S}{6.61} \right)^{-0.012} \left(\frac{\psi}{0.72} \right)^{-0.4} \quad (7)$$

2.3 定性分析中颗粒形状对屈服应力的影响

受中颗粒石英砂生产工艺流程的制约, 试验所用中颗粒的球度值和中颗粒混合组的平均球度值基本相同, 因此本试验在现有条件下无法对中颗粒形状与泥石流屈服应力的影响关系进行定量分析研究, 将继续

沿用粗颗粒的形状(球度 Ψ) 修正模型, 但由于野外实际的泥石流浆体中颗粒形状可能受区域气候、岩性、物理化学风化以及构造等因素的不同而表现出差异性^[30-32], 因此本文将从岩性角度出发, 定性分析中颗粒形状对泥石流屈服应力的影响情况。

笔者在野外调查的过程中, 分别对砂岩、板岩、花岗岩三个地区的泥石流沟进行了取样, 筛选出粒径介于 $0.005 \sim 0.25 \text{ mm}$ 的中颗粒, 再通过水洗沉降法进一步将中颗粒样品细分为三个粒径范围, 以此来观测野外实际的泥石流浆体中颗粒形状是否相同, 将三种不同岩性的中颗粒置于不同倍数显微镜下观测后(见图 8), 发现在同种岩性地区的泥石流样品中, 中颗粒形状差异不大, 花岗岩和板岩地区的中颗粒主要呈多角形, 砂岩地区的中颗粒主要呈类球形, 中颗粒粒径大小的不同不会引起形状上的差异; 而在不同岩性地区的泥石流样品中, 中颗粒形状有所不同, 主要表现为花岗岩地区的中颗粒呈多角形, 且各角都比较尖锐, 边缘轮廓主要向内凹陷, 板岩地区的中颗粒虽也呈多角形, 但其各角相对于花岗岩岩性的中颗粒而言更平滑, 且颗粒轮廓为向外凸起的弧形, 砂岩地区的中颗粒呈类球形, 几乎无尖锐的凸起, 颗粒轮廓近似圆形。换言之, 花岗岩地区的中颗粒形状与球形相差较大, 板岩地区的中颗粒与球形也有一定差异, 但是相似程度比花岗岩好, 砂岩地区的中颗粒呈类球形, 中颗粒的球度值总体呈现出 $\Psi_{\text{砂岩}} > \Psi_{\text{板岩}} > \Psi_{\text{花岗岩}}$ 的规律。

与此同时, 寻找收集与三种岩性地区中颗粒形状

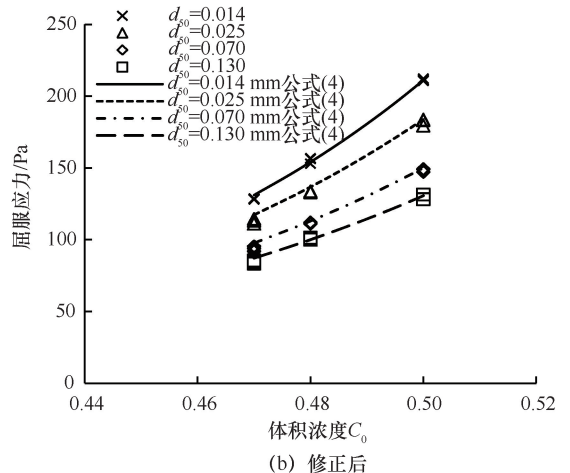
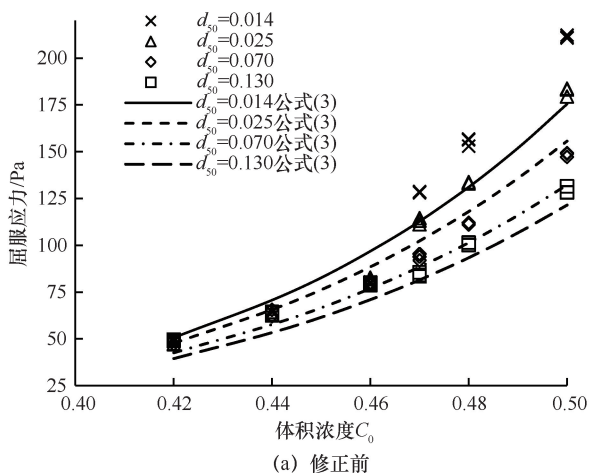


图 7 公式(3)在 d_{50} 修正前后计算值与试验值的对比

Fig. 7 Formula (3) Comparison between calculated and experimental values before and after d_{50} correction

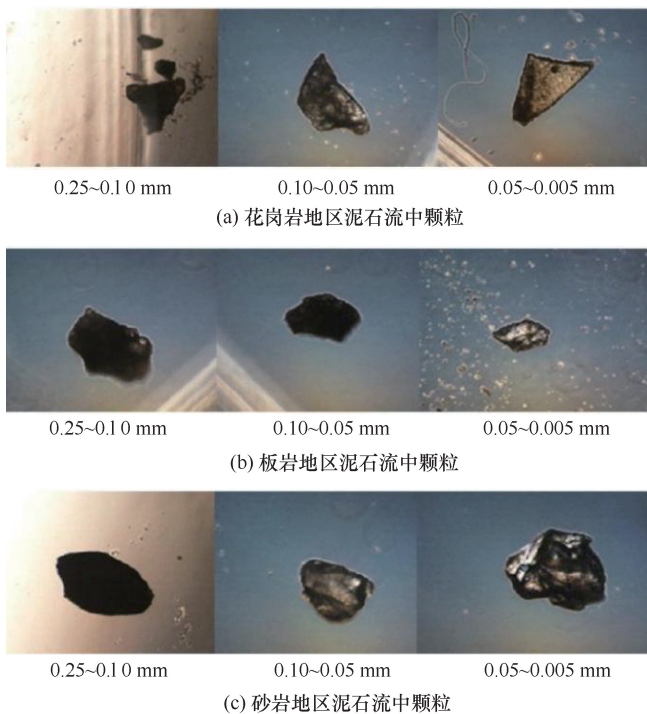


图8 不同岩性中颗粒在显微镜下形状

Fig. 8 Microscopic shapes of medium particles of different lithologies

相似的粗颗粒,并通过排水法间接测算它们的球度值,得到花岗岩地区中颗粒的球度值约为0.60,板岩地区中颗粒球度值约为0.75,砂岩地区的中颗粒球度值约为0.80。

2.4 屈服应力计算模型的修正结果

通过上述室内试验中控制变量逐一研究中颗粒级配、粒径对屈服应力的影响情况,再加上对野外实际泥石流浆体中的中颗粒形状进行定性分析后,得到了关于中颗粒的体积浓度修正系数 \bar{a} ,其表达式如下

$$\bar{a} = 1.14nC_c^{0.14} \left(\frac{S}{6.61} \right)^{-0.012} \left(\frac{\psi}{0.72} \right)^{-0.4} \quad (8)$$

新的体积浓度修正系数 \bar{a} 已经将中颗粒粒径、级配对泥石流屈服应力的影响纳入其中,现结合陈源井^[14]研究得到的粗颗粒体积浓度修正系数 a ,完善了泥石流屈服应力的计算模型为

$$\tau = \tau_0 C^2 e^{22CP_0} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \tau_0 = 30 & (C < 0.47) \\ \tau_0 = 30e^{5(C-0.47)} & (0.47 \leq C < 0.59) \\ \tau_0 = 30e^{5(C-0.47)} e^{8(C-0.59)} & (C \geq 0.59) \end{cases} \quad (10)$$

$$C = C_0(Xa + Y\bar{a}) \quad (11)$$

式中, X 为粗颗粒占泥石流浆体中除细颗粒外固体

部分的百分含量比,对野外泥石流堆积物取样、颗粒分析后获取; Y 为中颗粒占泥石流浆体中除细颗粒外固体部分的百分含量比,对野外泥石流堆积物取样、颗粒分析后获取; a 为粗颗粒研究得到的体积浓度修正系数; \bar{a} 为中颗粒研究得到的体积浓度修正系数。

3 模型验证

3.1 数据来源

基于文献[8]和文献[10]对屈服应力的影响因素的研究,获取了文献[8]中 d_{50} 分别为0.04 mm、0.125 mm、0.2 mm、0.4 mm的试验数据,对莫斯卡多泥石流调查得到 d_{50} 为14.7 mm的实测数据,以及文献[10]中 d_{50} 为0.13 mm和0.15 mm的试验数据,同时获取了文献[33]的测量数据,从文献中得到关山沟^[34]、野牛沟^[35]、古香沟^[36]等泥石流沟的实测数据。此外,研究团队分别在四川理县、汶川县以及西藏林芝地区的泥石流沟进行了野外实地调查,获取了大量的野外数据。

位于西藏林芝地区和映秀镇的泥石流沟,区域岩性为花岗岩,故这两个区域泥石流的颗粒球度取值为0.60;位于理县薛城镇的泥石流沟,区域岩性为花岗岩、千枚岩以及砂岩,受限于本文对颗粒形状参数的研究程度,但赵尚学^[37]曾对泥石流沉积体中一定数量砂石进行过统计测算,得到野外泥石流浆体中颗粒的平均球度在0.60左右,因此本文在进行验证时,薛城镇的泥石流颗粒球度值取0.60。笔者对西藏林芝地区的天摩沟、映秀镇的磨子沟以及薛城镇的孙家沟的泥石流堆积物进行了取样、颗粒分布,从颗粒分布曲线中获取了这三条典型泥石流沟的颗粒曲率系数 C_c 值、粒径参数 d_{50} 值、 X 值、 Y 值,代入公式(6)中反算得到了林芝地区、映秀镇以及薛城镇泥石流沟的 P_0 值(见表3)。

表3 典型泥石流沟实测数据及反算得到的 P_0 值Table 3 Measured data of typical debris flow gullies and back-calculated P_0 values

沟名	淤积厚度 /m	淤积坡度 /($^{\circ}$)	ρ / $g \cdot cm^{-3}$	τ /Pa	P_0
西藏-天摩沟	2.7	4.5	2.12	4 380	0.125
映秀-磨子沟	2.6	5.6	2.16	5 371	0.127
薛城-孙家沟	2.5	6.0	2.15	5 506	0.132

3.2 验证结果

将野外调查数据代入新模型即公式(9)后得到屈服应力计算值 τ_m 与屈服应力实测值(或试验值) τ_c 进

表 4 野外泥石流沟的相关参数

Table 4 Relevant parameters of field debris flow gullies

序号	沟名	$\rho/g \cdot cm^{-3}$	P_0	d_{50}/mm	C_c	ψ	a	\hat{a}	X	Y	C	τ_m/Pa	τ_c/Pa
1	关山沟	2.10		2.5	1.0		1.19	1.20	0.87	0.13	0.78	3 321	4 103
2	板桥沟	2.11		2.1	0.98		1.19	1.20	0.87	0.13	0.78	3 821	4 506
3	窝荡沟	2.05	0.127	2.0	0.98	0.60	1.19	1.20	0.88	0.12	0.75	2 031	2 276
4	野牛沟	2.10		2.0	0.99		1.19	1.20	0.93	0.07	0.78	3 407	4 142
5	磨子沟	2.15		3.0	0.97		1.18	1.19	0.92	0.08	0.81	5 495	5 506
6	米美村	2.09		2.0	0.99		1.19	1.20	0.82	0.18	0.78	3 383	3 409
7	岗美村	2.11		3.2	0.98		1.18	1.19	0.92	0.08	0.79	4 087	4 463
8	古乡沟	2.12		2.5	0.98		1.18	1.20	0.92	0.08	0.80	5 029	5 622
9	拿果村	2.14		3.5	0.96		1.17	1.18	0.85	0.15	0.81	5 560	6 368
10	排龙沟	2.11		3.0	0.97		1.18	1.19	0.90	0.10	0.79	4 145	4 308
11	拉月村	2.10		2.5	0.98		1.18	1.20	0.83	0.17	0.79	4 467	4 537
12	索通村	2.04		3.1	0.99		1.18	1.19	0.85	0.15	0.75	2 029	2 237
13	比通村	2.10		2.3	0.92		1.18	1.19	0.91	0.09	0.78	3 627	4 733
14	松绕村	2.08		2.5	0.98		1.18	1.20	0.75	0.25	0.78	3 498	3 863
15	天摩沟	2.12	0.125	3.0	0.94	0.60	1.17	1.18	0.86	0.14	0.79	4 356	4 380
16	则当村	2.11		3.8	0.92		1.17	1.19	0.88	0.12	0.79	3 892	4 418
17	达打村	2.07		3.0	0.99		1.18	1.19	0.85	0.15	0.76	2 306	2 815
18	次多村	2.05		2.0	0.96		1.19	1.20	0.82	0.18	0.76	2 133	2 509
19	磨代村 1	2.12		2.1	0.98		1.19	1.20	0.75	0.25	0.80	4 854	5 187
20	磨代村 2	2.11		3.0	0.98		1.18	1.19	0.78	0.22	0.79	3 780	4 307
21	瓦巴村	2.11		2.0	0.96		1.19	1.20	0.80	0.20	0.79	4 030	4 537
22	八十道班	2.08		2.3	0.98		1.19	1.20	0.85	0.15	0.78	3 139	3 536
23	七十八道班	2.12		2.1	0.98		1.19	1.20	0.93	0.07	0.81	5 427	5 407
24	扎西贡上游 1 km	2.05		3.0	0.98		1.18	1.19	0.87	0.13	0.76	2 548	6 300
25	萝卜沟	2.12		8.0	0.93		1.15	1.15	0.87	0.13	0.77	3 123	3 366
26	木卡沟	2.17		3.0	0.83		1.15	1.16	0.77	0.23	0.80	5 953	6 446
27	磨子沟	2.05		4.0	0.97		1.17	1.18	0.90	0.10	0.74	1 989	2 367
28	跨流沟	2.19		3.0	0.75		1.13	1.15	0.75	0.25	0.80	5 996	6 730
29	甲米沟	2.08		6.0	0.99		1.17	1.17	0.80	0.20	0.76	2 733	2 981
30	古城沟	2.03		1.2	0.99		1.21	1.22	0.78	0.22	0.75	2 320	2 254
31	通化沟	2.02		2.1	1.00		1.19	1.21	0.75	0.25	0.74	1 782	2 070
32	孙家沟	2.16	0.132	7.0	0.89	0.60	1.14	1.15	0.94	0.06	0.80	5 396	5 371
33	飘厂沟	2.09		7.0	0.98		1.16	1.17	0.80	0.20	0.77	3 307	3 318
34	岩窝沟	2.10		2.0	0.94		1.18	1.20	0.84	0.16	0.78	3 798	4 087
35	大扎楼沟	2.19		2.5	0.72		1.12	1.15	0.74	0.26	0.80	5 832	6 730
36	孙地坪沟	2.15		7.0	0.89		1.14	1.15	0.77	0.23	0.78	4 281	4 405
37	破碛房沟	2.18		12.3	0.95		1.14	1.15	0.90	0.10	0.80	5 473	6 699
38	南沟	2.15		5.0	0.94		1.16	1.17	0.88	0.12	0.80	5 431	4 897
39	甘溪沟	2.14		7.0	0.94		1.15	1.16	0.89	0.11	0.79	4 277	4 748

行对比(见表 4)。数据验证如图 9 所示。文献[10]中的数据验证效果较好,而文献[8]中和文献[33]的数据在代入新模型后的屈服应力计算值与实测值之间依然存在较大差距,这种差距主要体现在当屈服应力大于 300 Pa 时,新模型的屈服应力计算值与文献[8]的试验数据较为接近;而当屈服应力小于 300 Pa 时,新模型的屈服应力计算值要远小于文献[8]中的试验值;与此同时,文献[33]的验证结果也存在当屈服应力大于 800 Pa 后,误差呈现递减的趋势。

上述验证过程的差异性也同样出现在粗颗粒的屈服应力计算模型中,本文以文献[8]中屈服应力

大于 300 Pa 的数据和文献[33]中屈服应力大于 800 Pa 的数据作为标准,对比新模型[公式(6)]和粗颗粒模型[公式(2)]在屈服应力计算上的准确性,从两式的误差统计中可知新模型在误差控制上比旧模型好(见表 5),并且计算方法也更加科学。虽然在与文献[8]的数据对比中表现为新旧模型之间屈服应力的计算误差不大,但这主要是受到了中颗粒含量的影响,在文献[8]的数据中,中颗粒含量占比约为 20%,此时中颗粒特性对屈服应力的影响远不及粗颗粒对屈服应力的影响,而在中颗粒含量占比超过 35%的文献[33]中,新模型的屈服应力

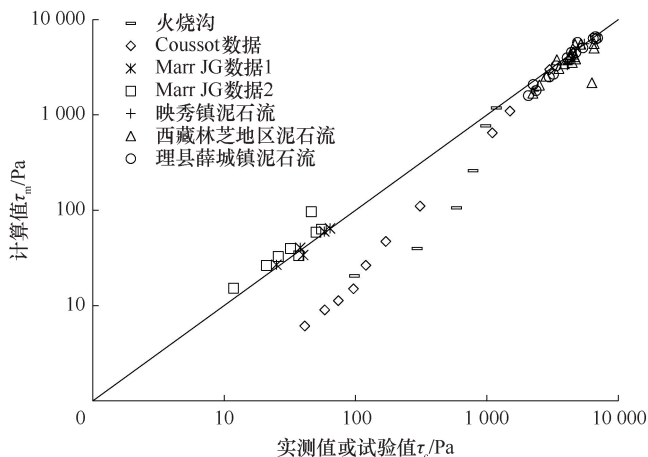


图9 数据验证

Fig. 9 Data validation

表5 新旧模型误差对比

Table 5 Error comparison between new and old models

参考文献	$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	τ_c / Pa	$\tau_{\text{公式}(6)} / \text{Pa}$	$\tau_{\text{公式}(2)} / \text{Pa}$	误差率 A/%	误差率 B/%
文献[8]	2.07	310	110	107	64.4	65.5
	2.24	1 100	650	626	40.9	43.1
	2.29	1 500	1 097	1 055	26.8	29.7
	2.39	3 000	2 995	2 871	0.2	4.3
文献[33]	2.20	981	769	689	22.0	30.0
	2.24	1 177	1 184	1 056	1.0	10.0

注： τ_c 为文献[8]、文献[33]的测量值；误差率A为新模型的屈服应力计算值与文献[8]、文献[33]测量值的误差统计；误差率B为粗颗粒模型的屈服应力计算值与文献[8]、文献[33]测量值的误差统计。

计算值则更接近于实测值，误差也明显比粗颗粒模型小。

据统计，世界范围内的泥石流黏粒含量大多在3%左右^[38-40]，而黏土特征系数值介于1.0~1.7^[13]，可进一步计算出野外泥石流沟的 P_0 值大约为0.030~0.051，本文通过新模型反演后得到文献[8]的 P_0 值为0.084，文献[33]的 P_0 值为0.092，而通过粗颗粒模型反演得到文献[8]和文献[33]的 P_0 值分别是0.117和0.120，可见，通过新模型反演得到的 P_0 值比粗颗粒模型反演得到的 P_0 值更接近于野外的实际情况。

在此基础上，进一步对39条泥石流沟的屈服应力新旧模型计算值与野外调查的屈服应力实测值进行误差统计(见表6)，从表中可知，扎西贡上游1 km处的泥石流沟，其误差率D达到了60%，通过对该泥石流沟进行数据复核和野外照片对比分析后，发现造成这种误差较大的原因可能是团队在进行现场泥石流体的淤积厚度测量时，未准确找到最近一次泥石流发生时的堆积体位置或者将多次泥石

表6 泥石流屈服应力模型值与实测值误差统计

Table 6 Error statistics of yield stress model values and measured values of debris flow

沟名	τ_c / Pa	$\tau_{\text{公式}(6)} / \text{Pa}$	$\tau_{\text{公式}(2)} / \text{Pa}$	误差率 D/%	误差率 E/%
野牛沟	4 142	3 407	3 374	18	19
磨子沟	5 506	5 495	5 438	0	1
窝荡沟	2 276	2 031	1 997	11	12
板桥沟	4 506	3 821	3 752	15	17
关山沟	4 103	3 321	3 270	19	20
米美村泥石流	3 409	3 383	3 330	1	3
岗美村泥石流	4 463	4 087	4 047	8	9
古乡沟	5 622	5 029	4 974	11	12
拿果村泥石流	6 368	5 560	5 452	13	14
排龙沟	4 308	4 145	4 092	4	5
拉月村泥石流	4 537	4 467	4 365	2	4
索通村泥石流	2 237	2 029	1 996	9	11
比通村泥石流	4 515	3 627	3 592	20	20
松绕村泥石流	3 863	3 498	3 383	9	12
天摩沟	4 380	4 356	4342	0	1
则当村泥石流	4 418	3 892	3 811	12	14
达打村泥石流	2 815	2 306	2 267	18	19
次多村泥石流	2 509	2 133	2 075	15	17
磨代村泥石流 1	5 187	4 854	4 684	6	10
磨代村泥石流 2	4 307	3 780	3 680	12	15
瓦巴村泥石流	4 537	4 030	3 903	11	14
八十道班泥石流	3 536	3 139	3 076	11	13
七十八道班泥石流	5 407	5 427	5 270	0	3
扎西贡上游 1 km	6 300	2 548	2 509	60	60
萝卜沟	3 366	3 123	3 084	7	8
木卡沟	6 446	5 953	5 649	8	12
磨子沟	2 367	1 989	1 968	16	17
跨流沟	6 730	5 996	5 583	11	17
甲米沟	2 981	2 733	2 692	8	10
古城沟	2 254	2 320	2 237	2	1
通化沟	2 070	1 782	1 728	14	17
孙家沟	5 371	5 396	5 354	0	0
飘厂沟	3 318	3 307	3 260	1	2
岩窝沟	4 087	3 798	3 697	7	10
大扎楼沟	6 730	5 832	5 367	13	20
孙地坪沟	4 405	4 281	4 153	3	6
破碉房沟	6 699	5 473	5 441	18	19
南沟	4 897	5 431	5 354	10	9
甘溪沟	4 748	4 277	4 230	10	11

注： τ_c 为野外泥石流沟的实测值；在用粗颗粒旧模型进行屈服应力计算时，等效黏粒含量同样通过天摩沟、孙家沟和磨子沟这三条典型泥石流沟的测量数据反演获得，其中天摩沟的 P_0 值为0.127、孙家沟的 P_0 值为0.132、磨子沟的 P_0 值为0.128，这与新模型反演获得的 P_0 值很接近，主要是受到了中颗粒含量的影响，天摩沟中颗粒含量占14%、孙家沟中颗粒含量占6%、磨子沟中颗粒含量占8%；误差率B为新模型的屈服应力计算值与野外实测值的误差统计值；误差率D为粗颗粒模型的屈服应力计算值与野外实测值的误差统计值。

流堆积厚度误认为是一次堆积，从而导致淤积厚度测量结果偏大、未采集到准确的厚度数据。除此之外，其余的38条泥石流沟的误差率D都较小(<30%)，

即将相关参数代入新模型后得到的屈服应力计算值与野外实测值较为接近, 证明新模型具有一定的可靠性。

从新旧模型的屈服应力计算值与实测值误差对比来看, 新模型在误差控制上依然要比旧模型好, 即新模型的屈服应力计算值比旧模型的屈服应力计算值更接近于野外实测值, 其中, 新模型的等效体积浓度不仅受到了粗颗粒特性的影响, 还受到了中颗粒级配、粒径的影响, 与此同时, 等效体积浓度的大小还要受粗颗粒与中颗粒在泥石流流体固体物质中含量多少的制约。在对野外 39 条泥石流堆积物取样分析后, 发现大部分泥石流沟的中颗粒含量少于 20%, 相反它们的粗颗粒含量大于 80%, 因此粗颗粒对泥石流屈服应力的影响依然起着主导作用, 此时, 新模型的屈服应力计算值与粗颗粒模型的屈服应力计算值相差不大, 误差率 D 只比误差率 E 高 1%~2%, 在中颗粒含量极少的泥石流沟中, 误差率 D 甚至等于误差率 E 。而以薛城镇的大扎楼沟为例, 其中颗粒含量达到了 26%, 对泥石流屈服应力的影响明显更大, 误差率之间相差 7%, 可见当中颗粒含量增多时, 新模型的误差控制越好, 计算准确度越高, 这也说明了新模型在屈服应力计算方法上比陈源井的模型更科学, 更适用。

4 结果讨论

通过中颗粒级配、中颗粒粒径与屈服应力的关系研究, 发现当其他条件相同时, 中颗粒级配的好坏、中颗粒粒径的大小与泥石流屈服应力值大小呈负相关关系。受颗粒形状的影响, 浆体在运动过程中, 不同形状的颗粒间会发生碰撞与镶嵌, 当球度越小, 也就是颗粒形状越不规则, 颗粒间的相互作用也就越多, 更易相互嵌合形成具有一定强度的骨架结构, 从而使浆体抗剪强度增强, 相反, 颗粒形状越接近于球形, 其浆体的相对抗剪强度也就越差^[41]。因此推测中颗粒的形状也会对泥石流屈服应力有重要影响, 但受试验所用中颗粒材料形状的限制, 最后只能对中颗粒形状与屈服应力的影响情况进行定性分析。

对比新旧模型的屈服应力计算值, 结果显示, 用新模型计算得到的屈服应力值更接近于实测值, 特别是在对比中颗粒含量存在较大差异的屈服应力计算值时, 发现当泥石流中颗粒含量越高时, 新模型的屈服应力计算值更精准。由此可见, 我们在进行泥石流流变参数计算时, 不能忽略中颗粒的存在。

本文虽然对三种岩性地区的中颗粒形状进行了定性阐述, 但是由于泥石流堆积体中的颗粒形状还受到了如气候、构造、水动力等多种因素的影响, 因此仅从岩性角度进行定性阐述具有一定的局限性, 在今后研究中需要进一步深入, 丰富验证数据, 以进一步验证新模型的适用性。

5 结论

针对国内外学者对泥石流屈服应力影响因子研究的不足, 本文采用泥石流流变试验控制变量, 探究中颗粒粒径、级配对泥石流屈服应力的影响情况, 得到以下结论。

(1) 通过量化中颗粒特性, 特别是中颗粒级配和中颗粒粒径, 解决了中颗粒是否对泥石流屈服应力存在影响、影响程度如何等问题。

(2) 在粗颗粒研究的基础上, 得到了新的体积浓度修正系数, 将中颗粒粒径、中颗粒级配对泥石流屈服应力的影响纳入考虑之中, 完善了泥石流屈服应力的计算模型。

(3) 通过一系列数据验证和误差率统计, 证明了新模型较粗颗粒模型具有更好的科学性和可靠性。

参考文献 (References):

- [1] 苟印祥. 泥石流动力特性的数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
GOU Y X. The Dynamic Characteristics of the Debris Flow Numerical Simulation[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [2] 张璇钰, 刘桂卫, 孙琪皓, 等. 综合遥感技术在山区铁路泥石流勘察中的应用[J]. 铁道勘察, 2024, 50(1): 16-22.
ZHANG X Y, LIU G W, SUN Q H, et al. Application of comprehensive remote sensing technology in mountain railway debris flow survey[J]. Railway Investigation and Surveying, 2024, 50(1): 16-22.
- [3] 李琦, 唐永刚. 泥石流的成因及预防对策分析[J]. 甘肃科技, 2020, 36(11): 58-60.
LI Qi, TANG Yonggang. Analysis of the causes and preventive measures of debris flows[J]. Gansu Science and Technology, 2020, 36(11): 58-60.
- [4] 元星, 方敏, 曹汝亮. 基于动态变频和实时过滤技术的泥石流泥位预警方法及应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2024, 55(7): 125-133.
QI Xing, FANG Min, CAO Ruliang. A method and application of debris flow and mud level warning based on dynamic frequency conversion and real time filtering technology[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024, 55(7): 125-133.
- [5] 崔鹏, 邹强. 山洪泥石流风险评估与风险管理理论与方法[J]. 地理科学进展, 2016, 35(2): 137-147.
CUI P, ZOU Q. Theory and method of risk assessment and risk

- management of debris flows and flash floods [J]. *Progress in Geography*, 2016, 35(2): 137-147.
- [6] 马俊学, 高会然, 许冲. 北京市昌平区韩台村“23·7”暴雨山洪泥石流灾害特征分析[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(7): 1-18.
MA J X, GAO H R, XU C. Characteristics of flash flood-debris flow disaster induced by the ‘23·7’ rainstorm in Hantai Village, Changping District, Beijing [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2024, 55(7): 1-18.
- [7] 林雪平, 游勇, 柳金峰, 等. 动床条件下黏性泥石流沟道淤积试验研究[J]. *山地学报*, 2013, 31(3): 327-333.
LIN Xueping, YOU Yong, LIU Jinfeng, et al. Experimental study on siltation of viscous debris flow channel under moving bed condition [J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, 31(3): 327-333.
- [8] COUSSOT P, LAIGLE D, ARATTANO M, et al. Direct determination of rheological characteristics of debris flow [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 124(8): 865-868.
- [9] ANCEY C, JORROT H. Yield stress for particle suspensions within a clay dispersion [J]. *Journal of Rheology*, 2001, 45(2): 297-319.
- [10] MARR J G, HARFF P A, SHANMUGAM G, et al. Experiments on subaqueous sandy gravity flows: The role of clay and water content in flow dynamics and depositional structures [J]. *GSA Bulletin*, 2001, 113(11): 1377-1386.
- [11] 马煜. 粘土矿物成份与泥石流屈服应力的关系研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
MA Y. Research on Clay Minerals and Yield Stress of Debris Flow by Experiments [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2011.
- [12] 马煜, 余斌. 黏土矿物对泥石流屈服应力影响的实验研究[J]. *人民长江*, 2016, 47(10): 81-85.
MA Y, YU B. Experimental research on influence of clay minerals on yield stress of debris flow [J]. *Yangtze River*, 2016, 47(10): 81-85.
- [13] YU B, MA Y, QI X. Experimental study on the influence of clay minerals on the yield stress of debris flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(4): 364-373.
- [14] 陈源井. 粗颗粒在泥石流屈服应力中的作用机理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
CHEN Y J. Research on Coarse Particles and Yield Stress of Debris Flow by Experiments [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [15] 余斌, 唐川, 刘清华, 等. 泥石流动力特性与活动规律研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
YU B, TANG C, LIU Q H. Dynamic Characteristics and Activity Law of Debris Flow [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [16] VU T S, OVARLEZ G, CHATEAU X. Macroscopic behavior of bidisperse suspensions of noncolloidal particles in yield stress fluids [J]. *Journal of Rheology*, 2010, 54(4): 815-833.
- [17] YU B, CHEN Y, LIU Q. Experimental study on the influence of coarse particle on the yield stress of debris flows [J]. *Applied Rheology*, 2016, 26(4): 11-23.
- [18] 杨红娟, 韦方强, 胡凯衡, 等. 不同上限粒径泥石流浆体的流变参数变化规律 [J]. *水利学报*, 2016, 47(7): 884-890.
YANG H J, WEI F Q, HU K H, et al. Rheological parameters of debris flow slurries with different maximum grain sizes [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(7): 884-890.
- [19] 陈伟楠, 徐明. 崇礼县城张麻沟泥石流发育特征研究 [J]. *地下水*, 2019, 41(2): 106-109.
CHEN Weinan, XU Ming. Study on development characteristics of debris flow in Zhangma Gully, Chongli County [J]. *Groundwater*, 2019, 41(2): 106-109.
- [20] 党超. 安夹沟特大型泥石流沟特征及治理方案 [J]. *四川地质学报*, 2018, 38(3): 469-473.
DANG C. Geological features and control of the anjiagou debris flow [J]. *Acta Geologica Sichuan*, 2018, 38(3): 469-473.
- [21] 钟鑫, 赵德军, 黎厚富. 西藏波密县卡达沟泥石流发育特征及危险性评价 [J]. *人民长江*, 2018, 49(S2): 103-107.
ZHONG X, ZHAO D J, LI H F. Development features and danger assessment of Kadagou debris flow in Bomi, Tibet [J]. *Yangtze River*, 2018, 49(S2): 103-107.
- [22] 杨进兵, 陈兴长, 汪惠, 等. 泥石流堆积物中细颗粒含量与渗透系数关系试验研究 [J]. *岩土力学*, 2016, 37(11): 3184-3190.
YANG J B, CHEN X C, WANG H, et al. An experimental study of relationship between fine grain content and permeability coefficient of debris flow deposits [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(11): 3184-3190.
- [23] 魏丽, 胡凯衡. 蒋家沟阵性泥石流输沙规律研究 [J]. *自然灾害学报*, 2014, 23(2): 53-60.
WEI L, HU K H. Study on sediment transporting characteristics of intermittent debris flows in Jiangjia Ravine [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2014, 23(2): 53-60.
- [24] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学(3版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
LI G X, ZHANG B Y, YU Y Z. *Soil Mechanics (3rd ed)* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2022.
- [25] 任玉宾, 王胤, 杨庆. 颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响 [J]. *岩土力学*, 2018, 39(2): 491-497.
REN Yubin, WANG Yin, YANG Qing. Effects of particle size distribution and shape on permeability of calcareous sand [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(2): 491-497.
- [26] 麻考, 许春阳, 陈永平, 等. 不同级配组成对泥沙流变特性影响实验研究 [J]. *泥沙研究*, 2024, 49(2): 25-32.
MA K, XU C Y, CHEN Y P, et al. Experimental study on the influence of silt content on sediment rheological properties [J]. *Journal of Sediment Research*, 2024, 49(2): 25-32.
- [27] 王珩, 陆采荣, 刘伟宝, 等. 砂的级配特性对砂浆流变性的影响及预测 [J]. *材料导报*, 2020, 34(S2): 1255-1260.
WANG H, LU C R, LIU W B, et al. Influence of gradational characteristics of sands on rheology properties of mortar and rheology prediction [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(S2): 1255-1260.
- [28] 谈广鸣, 舒彩文, 陈一明, 等. 黏性泥沙淤积固结特性 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
TAN G M, SHU C W, CHEN Y M. Viscous sediment consolidation characteristics [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014.

- [29] 陈沁泽, 王宪业, 赵中豪, 等. 粒度与含水率对泥沙流变特性影响的试验研究[J]. 泥沙研究, 2021, 46(6): 58-64.
CHEN Q Z, WANG X Y, ZHAO Z H, et al. Experimental study on the influence of particle size and water content on sediment rheological properties[J]. Journal of Sediment Research, 2021, 46(6): 58-64.
- [30] 罗莉. 岩石风化程度影响因素浅析[J]. 化工管理, 2018(28): 13-14.
- [31] 傅华, 韩华强, 凌华. 母岩性质对粗颗粒材料动力特性影响试验研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2014, 36(5): 56-59.
FU Hua, HAN Huaqiang, LING Hua. Experimental study on the influence of parent lithology on dynamic properties of coarse granular materials[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science Edition), 2014, 36(5): 56-59.
- [32] 涂新斌, 王思敬. 图像分析的颗粒形状参数描述[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(5): 659-662.
TU X B, WANG S J. Particle shape descriptor in digital image analysis[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 659-662.
- [33] BAGNOLD R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear[J]. Proceedings of the Royal Society of London Series A, 1954, 225(1160): 49-63.
- [34] 柳金峰, 游勇, 范建容, 等. 汶川地震触发潜在性泥石流研究: 以岷江上游关山沟为例[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009, 41(S1): 70-75.
LIU J F, YOU Y, FAN J R, et al. The study on the potential debris flow triggered by Wenchuan earthquake: A case study of the Guanshan gully in the upper reaches of Minjiang River[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2009, 41(S1): 70-75.
- [35] 毛硕, 莫楠楠. 岷江野牛沟泥石流形成机制及堵河分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2015, 32(4): 90-93.
MAO Shuo, MO Nannan. Mechanism of debris flow formation and analysis of river blockage in the Yeniu Gully of the Minjiang River [J]. Journal of Hebei Engineering University (Natural Science Edition), 2015, 32(4): 90-93.
- [36] 曾庆利, 杨志法, 张西娟, 等. 帕隆藏布江特大型泥石流的成灾模式及防治对策: 以扎木镇-古乡段为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2007, 18(2): 27-33.
ZENG Q L, YANG Z F, ZHANG X J, et al. Hazard model and countermeasure to super-large debris-flow in Parlung River: Case study of the section from Zamu Town to Guxiang Gully [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2007, 18(2): 27-33.
- [37] 赵尚学. 泥石流沉积砾石组构特征的探讨[J]. 水土保持通报, 1985(1): 24-27.
ZHAO Shangxue. Discussion on the Fabric Characteristics of Debris Flow Sedimentary Gravel[J]. Water and Soil Conservation Bulletin, 1985(1): 24-27.
- [38] 陈中学. 黏土颗粒含量对蒋家沟泥石流启动影响及成灾机理研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2010.
CHEN Zhongxue. Research on the impact of clay particle content on the initiation of Jiangjia Gully debris flow and disaster mechanism [D]. Wuhan: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Geotechnical Mechanics), 2010.
- [39] 陈宁生, 崔鹏, 陈瑞, 等. 中尼公路泥石流的分布规律与基本特征[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2002(1): 46-50.
CHEN Ningsheng, CUI Peng, CHEN Rui, et al. Distribution patterns and basic characteristics of mudslides on the China Nepal Highway[J]. Chinese Journal of Geological Hazards and Prevention, 2002(1): 46-50.
- [40] 刘剑虹, 宋一得, 李景天, 等. 大白泥沟和查箐沟泥石流堆积物中黏粒化学成分分析[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2000(4): 41-42.
LIU Jianhong, SONG Yide, LI Jingtian, et al. Chemical composition analysis of clay particles in debris flow deposits from Dabaini Gully and Chaqing Gully [J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Science Edition), 2000(4): 41-42.
- [41] 段晓冬. 碎屑流对阻挡结构的动力冲击研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2015.
DUAN Xiaodong. Research on dynamic impact of debris flow on blocking structure [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2015.

(责任编辑 王 璐)