

引用格式:程建毅,郭晓军,李泳. 泥石流物源土体标度分布参数与粘聚力的关系[J]. 山地学报, 2024, 42(3): 401-410.

CHENG Jianyi, GUO Xiaojun, LI Yong. Relationship between soil scale distribution parameters of debris flow source soils and cohesive strength [J]. Mountain Research, 2024, 42(3): 401-410.

泥石流物源土体标度分布参数与粘聚力的关系

程建毅^{1,2}, 郭晓军^{1*}, 李泳¹

(1. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所 山地灾害与地表过程重点试验室, 成都 610299;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 颗粒级配影响土体力学性质(如粘聚力)。细颗粒(尤其是粘粒)含量对粘聚力起着决定性作用。颗粒级配可用土体特殊粒径(如 D_{50} 等)来表征,但并不能避免同参异效等问题。采用土体标度分布 μ 和 D_c 两个参数,可准确地描述土体颗粒组成特征,但该分布参数的物理意义,以及特征参数与土体力学参数之间的关系尚不明确。本文实施室内试验测试,采用标度分布表征土体颗粒组成,研究在不同含水率和标度参数条件下土体粘聚力的变化特征,探讨土体颗粒组成、含水率和粘聚力之间的关系。结果表明:(1)标度分布参数 μ 随着细颗粒含量的增加而增大,并呈现指数函数关系;(2)随着细颗粒含量的增加,粘聚力先迅速增大后缓慢增加并趋于稳定,且粘聚力 c 与标度分布参数 μ 呈现对数函数关系;(3)粘聚力随着含水率的增大先增大后减小,即存在一个使得土体粘聚力达到最大值的含水率阈值,在达到此阈值之前,细颗粒含量对粘聚力的影响较为显著,达到该阈值之后,含水率成为更主要的影响因素;(4)基于试验结果,得到土体粘聚力随含水率及标度参数共同影响下的二元模型。研究可为明确标度分布参数的物理意义以及确定土体力学参数提供试验依据。

关键词: 土体粘聚力;标度分布;含水率;直剪试验;细颗粒含量

中图分类号: TU431

文献标志码: A

土体的类型和性质对泥石流的形成模式和运动方式起着决定性作用^[1]。土体粘聚力是土力学的重要参数之一^[2],表征土体颗粒之间相互吸附和结合的能力^[3],是土体抗剪强度构成的定性描述性术语。研究土体粘聚力的影响因素,对于理解和预测土体破坏和泥石流的形成具有重要意义^[4]。

影响粘聚力的因素有土壤含水率、颗粒组成及结构、矿物成分和有机物质等,其中土体颗粒组成的影响至关重要。土体的颗粒组成决定土体的比表面积,影响颗粒间、颗粒与水分子间的作用力,最终影响粘聚力的大小及其动态变化过程^[5]。一般认为,颗粒越小,颗粒之间的表面积越大,粘附力也随之增

大^[6];土体越不均匀,异质化程度越高,粘聚力越大,如不均匀系数较大的土体可能包含大量的粘土颗粒,因而粘聚力可能较大^[7]。概率密度曲线、特征粒径(如 D_{50} 等)、不均匀系数和曲率系数等,常用来定量描述土体颗粒组成。概率密度曲线难以用定量式表达,在土力学计算时有很大的局限性;特殊粒径代表颗粒累积达到某一百分比时对应的粒径值,导致容易出现同参异效(如不同粒径分布的土体具有相同的 D_{50})的情况;不均匀系数和曲率系数通过特征粒径计算得到,提供了一种简明的描述颗粒不均匀性和级配曲线弯曲程度的方法,但仍无法反映其整体分布^[8]。由于缺乏描述土体颗粒特征参数

收稿日期(Received date): 2024-03-07;改回日期(Accepted date): 2024-05-28

基金项目(Foundation item): 第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0903-02);国家自然科学基金(42322703)。[The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program (2019QZKK0903-02); National Natural Science Foundation of China (42322703)]

作者简介(Biography): 程建毅(1999-),男,湖北襄阳人,硕士研究生,主要研究方向:岩土工程。[CHENG Jianyi (1999-), male, born in Xiangyang, Hubei province, M. Sc. candidate, research on geotechnical engineering] E-mail: chjy@imde.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): 郭晓军(1985-),男,山西运城人,博士,研究员,主要研究方向:泥石流。[GUO Xiaojun (1985-), male, born in Yuncheng, Shanxi province, Ph. D., professor, research on debris flow] E-mail: aaronguo@imde.ac.cn

的统一数学表达式,这影响后续颗粒组成与土体强度的定量关系的研究。

在前期研究中,我们提出了土体颗粒组成的普适性标度分布公式^[9-10],建议使用标度参数中的 μ 和 D_c 两个参数来描述土体颗粒组成,但对于标度分布参数的物理意义,尤其是其与土体力学性质之间的关系尚不明确^[11]。本文以云南省蒋家沟泥石流物源土为研究对象,通过筛分、配比,制备具有不同 μ 值的土样,开展室内直剪试验,以标度分布参数 μ 和含水率作为变量,探讨土体粘聚力和标度分布参数之间的关系。研究可为理解土体标度分布参数的物理意义提供试验依据,也可为定量表达土体力学性质和颗粒组成的关系提供新的方法。

1 原始土体的表征方法

研究采用云南省蒋家沟的泥石流物源土作为原始土样。该流域生态破坏严重,植被覆盖率低,岩石破碎严重,坡面土体多为风化严重、结构松散的宽级配土,是泥石流的重要物源^[12]。

采用标度分布描述土体颗粒组成特征,利用振动筛和马尔文粒度仪测定土体各粒径区间的占比情况,进而绘制粒径分布累积曲线(图1)。从结果上看,原始状态下该区域土体的粒径分布主要在10 mm以下,其中粒径在1 mm以上的部分占比约为55%~65%,粒径在0.075 mm以下的细颗粒部分占比约为8%~12%。经测定,该采样区域土体在野外自然状态下含水率大约为6%~9%,在降雨后

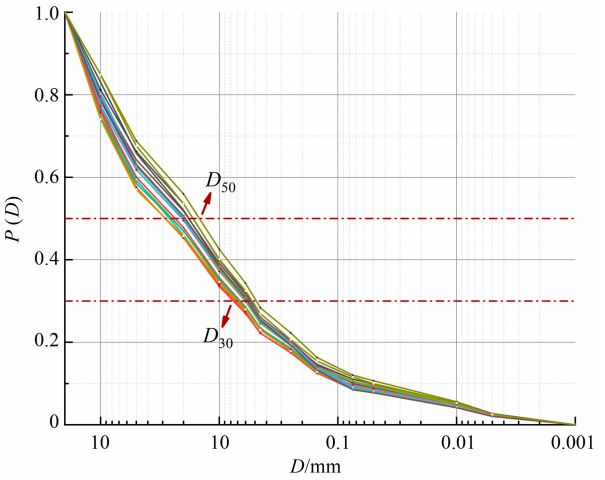


图1 天然土体累积分布曲线
Fig. 1 Cumulative distribution curve of natural soil

可达20%以上。
根据不同粒度区间土体颗粒的占比情况,采用标度分布描述土体颗粒组成^[13]:

$$P(D) = CD^{-\mu} \exp(-D/D_c) \tag{1}$$

式中, D 为颗粒粒径(mm); $P(D)$ 为粒径大于 D 的颗粒百分比; μ 和 D_c 为标度参数,目前可明确 μ 可用来刻画土体的细颗粒特征, D_c 可表征土体颗粒的变化范围和粗颗粒特征^[4,13],但其物理意义仍需进一步明确。

采用特殊粒径(D_{50} 、 D_{30})、不均匀系数、曲率系数和标度分布参数(μ 、 D_c)描述土体粒径组成特征(表1)。特殊粒径 D_{50} 和 D_{10} 代表土体颗粒累积达到50%和10%时对应的粒径值,没有考虑土体中所有颗粒的整体特征,也容易出现同参异效的情况。如

表1 泥石流物源土各参数值
Tab. 1 Parameter values of source soil of debris flow

序号	μ	D_c	D_{50}/mm	D_{10}/mm	C_u	C_c
1	0.0443	6.0694	2.3252	0.0388	102.5739	1.9549
2	0.0301	8.5005	3.0718	0.0478	84.3829	2.3208
3	0.0523	6.7125	2.4621	0.0433	100.9254	1.9929
4	0.0434	7.4153	2.7177	0.0439	99.8490	2.1541
5	0.0328	6.8835	2.6076	0.0415	99.1735	2.1018
6	0.0414	5.9477	2.3981	0.0371	100.1870	2.0394
7	0.0411	8.6865	2.8016	0.0369	86.7793	2.2753
8	0.0436	6.7485	2.5929	0.0456	90.8374	1.9885
9	0.0434	6.8038	2.6167	0.0442	89.4395	1.9694
10	0.0431	4.8318	2.4903	0.0405	104.8367	1.9451
上下限比值	1.7393	1.7978	1.3211	1.2971	1.2424	1.1931

采样土体的颗粒曲线差异明显,但除第二组土体之外,其余土体 D_{50} 范围为 2.4 ~ 2.8 (表 1),不能明显区分土体的颗粒差异;不均匀系数 Cu 和曲率系数 Cc 分别由特殊粒径计算得到,其中 $Cu = D_{50}/D_{30}$ 、 $Cc = D_{30}^2/(D_{10} \times D_{60})$,范围分别为 84 ~ 104 和 1.99 ~ 2.28;二者虽然描述了土体的不均匀性和级配曲线的弯曲程度,但难以用来直接分析土体力学性质和土体颗粒组成之间的定量关系。因此,采用标度分布参数 μ 和 D_c 双参数来代表土体颗粒组成曲线,可使结果的不确定性更小,同时,土体标度分布参数 μ 和 D_c 的变化空间分别为 0.030 ~ 0.052 和 4.83 ~ 8.69,其上下限的差值分别为 1.74 和 1.80 倍,均大于其他参数,也更易于区分土体的颗粒差异。

2 试验设计及参数控制

2.1 试验误差控制

试验土体和原始土体的颗粒组成之间的关系,

是试验是否具有代表性的关键。根据《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》^[14] 要求,配置土样时使用粒径 < 2 mm 的土体颗粒。舍去土体中颗粒粒径 2 mm 及以上的部分,其余部分颗粒按照原始比例配制,同时测试原始土体全粒径条件与试验条件下的标度分布参数值,发现两者有很好的指数函数关系(图 2),利用这一关系,可以根据试验土体参数推算原始状态下的土体参数值,控制试验误差,使试验具有代表性。

2.2 土体颗粒组成和含水率设计

试验采用具有不同标度参数变量的土体,旨在探讨粘聚力与标度分布参数的关系,通过控制不同土样中细颗粒(粒径 < 0.075 mm)占比,来改变参数 μ 值。在试验设计时将配置土样的细颗粒含量分别设定为天然状况下细颗粒含量的 0.5 ~ 2.5 倍(即 6% ~ 34%,共七组),其余部分粒径按原始比例配比,七组土样的粒径分布特征及标度分布参数 μ 、 D_c 值如表 2 所示。

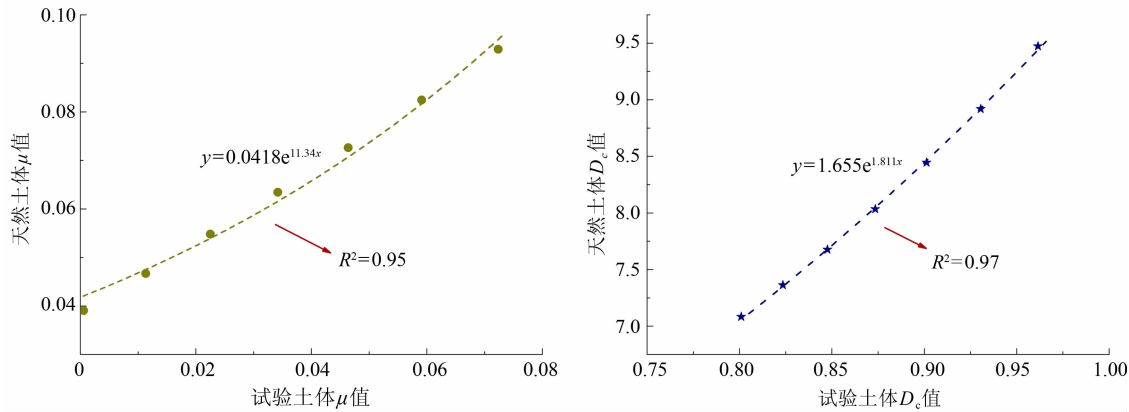


图 2 原始土样与试验土样标度参数的关系
Fig. 2 Relationship between scale parameters of original soil sample and test soil sample

表 2 土样粒径分布与标度参数值
Tab. 2 Particle size distribution and scaling parameters of the soil samples

土体粒径与 标度分布参数	七组土样中各粒径占比/%						
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#
粒径	1.000 mm	29.5	27.7	26.1	24.6	23.2	21.9
	0.600 mm	17.3	16.2	15.3	14.4	13.6	12.8
	0.450 mm	12.4	11.7	11.0	10.4	9.8	9.2
	0.250 mm	13.1	12.3	11.6	10.9	10.3	9.7
	0.150 mm	12.4	11.7	11.0	10.4	9.8	9.2
	0.075 mm	9.1	8.6	8.1	7.6	7.1	6.7
	<0.075 mm	6.2	11.8	17.0	21.9	26.3	30.5
标度分 布参数	μ	0.029	0.033	0.038	0.042	0.047	0.051
	D_c	6.850	7.048	7.255	7.473	7.703	7.945

为了确保单一变量原则,设计正交试验,土体干密度设定为 1.65 g/cm^3 ,含水率分别设置为 $7\% \sim 19\%$,间隔为 3% 。在每种含水率条件下,对上述七组不同细颗粒含量的土样进行强度参数测试,每组试验重复进行三次,取其平均值,以获得准确的测试值。

2.3 土体粘聚力测试

试验采用电动四联动直剪仪,将筛分后的土体样品按表 2 所示比例配比,并加水至目标含水率。分别在不同垂直压力 σ 下,对土体施加水平剪切力 τ ,观察 τ 随剪切位移的变化,得到土体的剪应力-剪切位移关系曲线,通过库仑定律计算出土体粘聚力 c 。进而分析在不同含水率条件下,不同 μ 值土样对应的粘聚力变化。

3 试验结果

3.1 土体标度参数 μ 值和细颗粒占比的关系

在配置土样的过程中,通过改变土体中细颗粒占比,来控制标度分布参数 μ 。随着在土中加入的细颗粒占比从 6% 提升至 34% ,标度分布参数 μ 的

值由 0.03 增大至 0.06 ,且二者关系可用指数函数表征(图 3),由此也验证了标度分布参数 μ 可定量表征一组土体中的细颗粒含量。

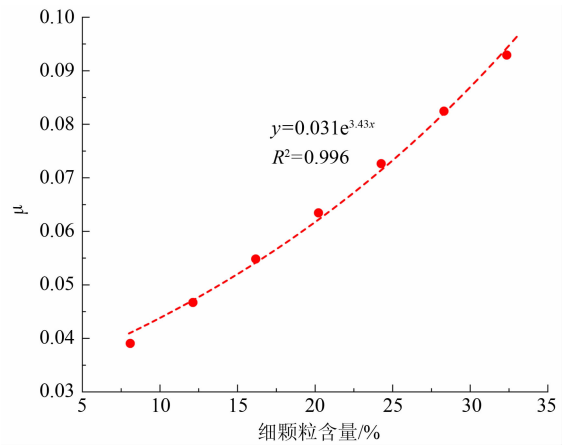


图 3 土中细颗粒占比与 μ 的关系

Fig. 3 Correlation of μ with the proportion of fine particles in soil

3.2 不同细颗粒条件下的土体粘聚力

分别对五种含水率条件下、不同 μ 值土样的试验结果进行分析。以含水率 7% 为例,根据剪切过程绘制出四种垂向荷载条件下的剪应力-剪切位移关系曲线(图 4)。所有土样在剪切过程中均呈现出

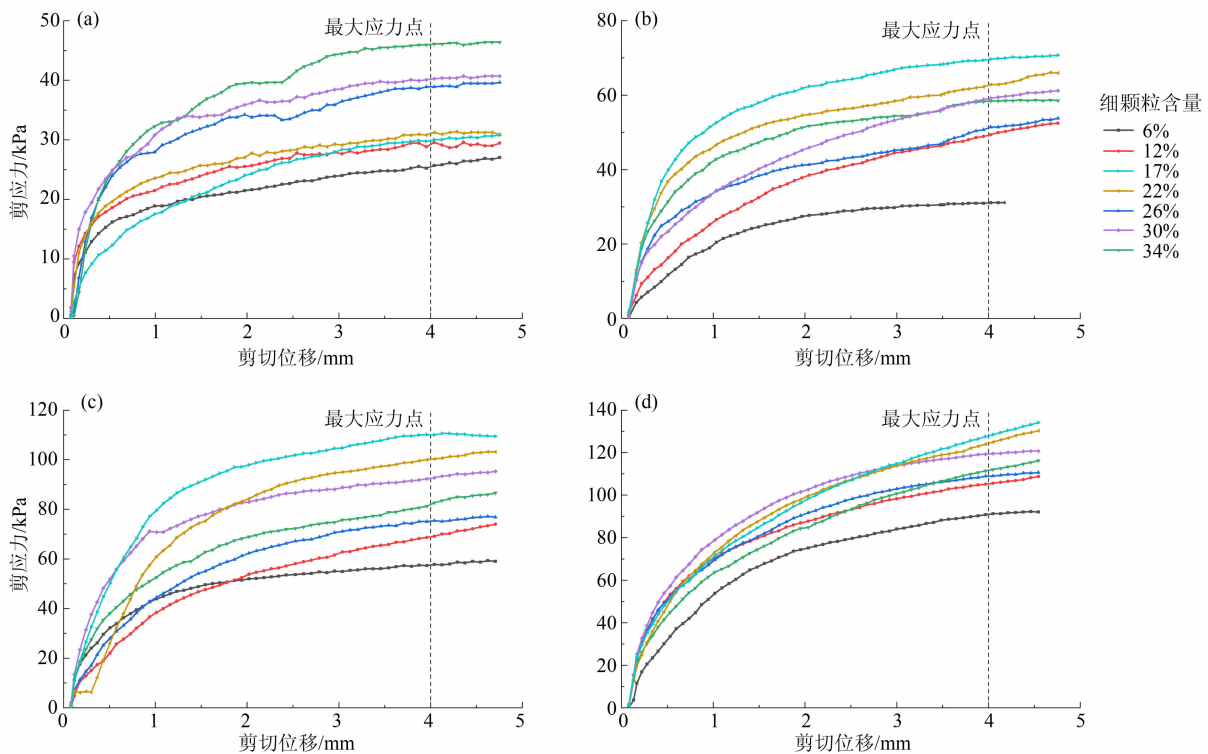


图 4 不同土样应力应变曲线: (a) $\sigma = 50 \text{ kPa}$; (b) $\sigma = 100 \text{ kPa}$; (c) $\sigma = 150 \text{ kPa}$; (d) $\sigma = 200 \text{ kPa}$

Fig. 4 Stress-strain curves of the different soil samples: (a) $\sigma = 50 \text{ kPa}$; (b) $\sigma = 100 \text{ kPa}$; (c) $\sigma = 150 \text{ kPa}$; (d) $\sigma = 200 \text{ kPa}$

应变硬化的特点,即随着剪切位移的不断增加,土体剪应力不断增大,取剪切位移达到 4 mm 位置时对应的剪应力为最大剪应力^[15]。

记录不同 μ 值土样在不同垂向压力下的最大剪应力变化(图 5),可更直观地比较细颗粒含量与垂向压力对土体抗剪强度的影响。可以看出,含水率 7% 时,同一围压下,细颗粒含量越大(μ 值越大),土体抗剪强度越大,对应的最大剪应力也越大;而对于同一组细颗粒含量的土体,垂向压力越大,会使得土体内部颗粒更紧密,颗粒间摩擦力更大,其对应的最大剪应力也越大。

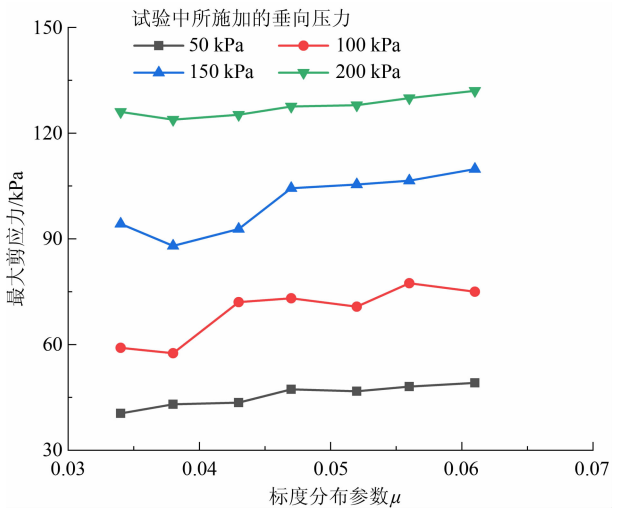


图 5 四种压应力下各 μ 值土体的最大剪应力
Fig. 5 Maximum shear stress of soil with each μ value under four compressive stresses

基于上述试验结果,根据库仑定律拟合各组土样的应力-应变曲线(图 6),得到土体的粘聚力(表 3)。随着细颗粒含量从 6% 增加至 34%,土体

的粘聚力呈现出明显的增大趋势。在土体中细颗粒含量较低时,粘聚力随着细颗粒含量的增加迅速增大,而当细颗粒含量增加到一定范围时,土体粘聚力的增大变得缓慢并逐渐趋于稳定。

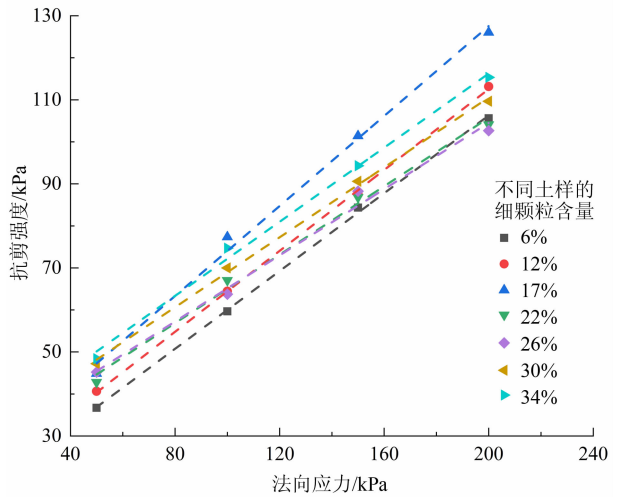


图 6 七组土样的内摩擦角和粘聚力曲线
Fig. 6 Internal friction angle and cohesion curves of seven groups of soil samples

对试验设定的其余四组含水率土体重复上述试验,不同含水率条件下土体粘聚力随 μ 的关系见表 4。在四种不同含水率下,土体粘聚力随 μ 的变化趋势基本一致,均呈同步增大趋势。且随着 μ 的增大,土体粘聚力迅速增大,而当 μ 增大到一定值时,粘聚力的增大减缓并趋于稳定。

造成这一现象的原因为:当土体中细颗粒含量较少时,粗颗粒骨架充填不实,粘聚力主要由粗粒土间的相互作用决定,其值较小;随着土中细颗粒含量增加,细颗粒开始填充土体骨架间隙,使土体结构变

表 3 不同 μ 值土体的粘聚力与最大剪应力
Tab. 3 Cohesion and maximum shear stress of soil with different μ values

μ 值	不同法向应力下土体的最大剪应力/kPa				粘聚力/kPa
	$\sigma = 50$ kPa	$\sigma = 100$ kPa	$\sigma = 150$ kPa	$\sigma = 200$ kPa	
0.029	40.5	59.1	94.2	126.0	7.0
0.033	43.0	57.5	88.0	123.8	9.9
0.038	43.5	72.0	92.8	125.2	16.7
0.042	47.3	73.1	104.4	127.6	19.5
0.047	46.7	70.7	105.4	134.6	19.2
0.051	48.1	77.4	106.5	123.9	20.7
0.056	49.1	75.0	109.8	128.7	22.3

表 4 五种不同含水率下土样的粘聚力
Tab.4 Cohesion of soil samples with five different water contents

μ 值	不同含水率下土体的粘聚力/kPa				
	含水率 7%	含水率 10%	含水率 13%	含水率 16%	含水率 19%
0.029	0.07	0.10	0.13	—	—
0.033	6.96	13.72	14.02	—	—
0.038	9.85	16.30	17.19	2.157	—
0.042	16.66	20.50	22.13	6.840	—
0.047	19.48	24.28	25.45	8.340	—
0.051	19.23	25.75	28.52	14.437	0.58
0.056	20.70	28.38	29.48	16.520	1.15

得更密实,另外,细颗粒中含有的胶体物质和有机质通常较粗颗粒具有更好的黏附性^[16],导致土体粘聚力增大。而随着细颗粒含量越来越多,土体骨架间的孔隙被完全充填,甚至粗颗粒不能充分接触和咬合,导致粘聚力的增大变得缓慢甚至停止^[17-18]。而在本试验选择的研究区中,泥石流物源土中细颗粒往往难以达到如此高的含量,因此可认为,土体粘聚力随着土中细颗粒含量的改变呈现出有规律的增加。

3.3 不同含水率条件下的粘聚力

含水率也是影响土体粘聚力的重要因素。不同颗粒组成的土体,含水率对粘聚力的影响有显著差异(图 7)。 μ 值较小的两组土样($\mu = 0.029$ 和 $\mu = 0.033$) 在含水率为 16% 时,土体粘聚力 c 接近于 0。而 μ 值较大($\mu = 0.051$ 和 $\mu = 0.056$) 的两组土样在含水率为 19% 时,粘聚力为 0.58 kPa 和

1.15 kPa,依然具有一定的强度。

不同细颗粒含量的土体,土体的粘聚力均随着土中含水率的增大呈现先增大后减小的趋势,即存在一个使粘聚力达到峰值的含水率阈值(图 7)。试验中,该阈值为 13% 左右,即含水率 7% ~ 13% 时,土体的粘聚力随着水分的增加,粘聚力持续增大;当含水率大于 13% 时,土体粘聚力急剧下降,且细颗粒含量较少的土样先失去粘聚力,含水率达到 19% 时,几乎所有土样都已不再具有粘聚力。这一阈值可看作是土体的最优含水率^[19-20],在最优含水率时土体具有最大剪切强度。当土体中含水率小于该值时,土体中的孔隙多由气相填充,气体会对土颗粒产生支撑作用,减弱了颗粒之间的接触,颗粒间结合较弱,粘聚力较小;随着含水率的增大,土中孔隙开始被液相填充,部分水分子被土颗粒表面吸附形成水膜^[21],水分在微小孔隙中产生的毛细作用使得土体颗粒更紧密结合,因而增加了土体的粘聚力;当含水率持续增大并超过该值时,大量孔隙被液相填充,土体接近饱和甚至过饱和状态,颗粒间接触面减小,土颗粒“悬浮”,土体结构变得松散,导致土体粘聚力逐渐减小甚至不再具有粘聚力^[22]。

3.4 土体颗粒组成与含水率共同作用下的土体粘聚力

在每一组含水率条件下,土体粘聚力 c 随着 μ 值的变化都呈现出相似规律(图 8),且该变化趋势可用对数函数关系较好拟合(R^2 均在 0.95 以上):

$$c = a \ln(\mu) + b \tag{2}$$

式中, a 、 b 为参数(kPa)。土体含水率的不同主要影响 c - μ 关系函数中参数 a 、 b 的值,随着含水率的增加,参数 a 、 b 的值均增大(表 5)。

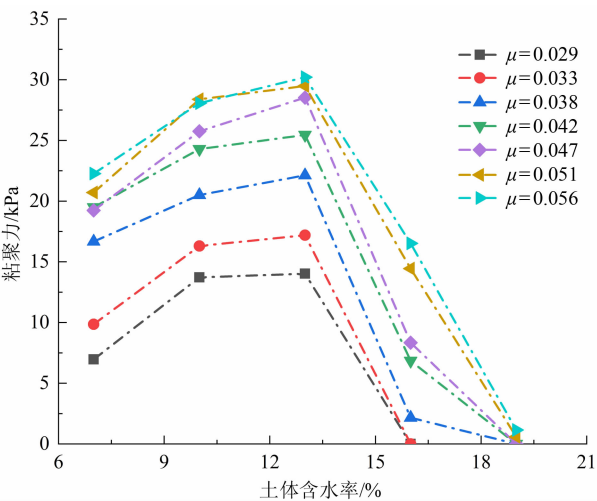


图 7 土体粘聚力随含水率变化

Fig. 7 Soil cohesion changes with water content

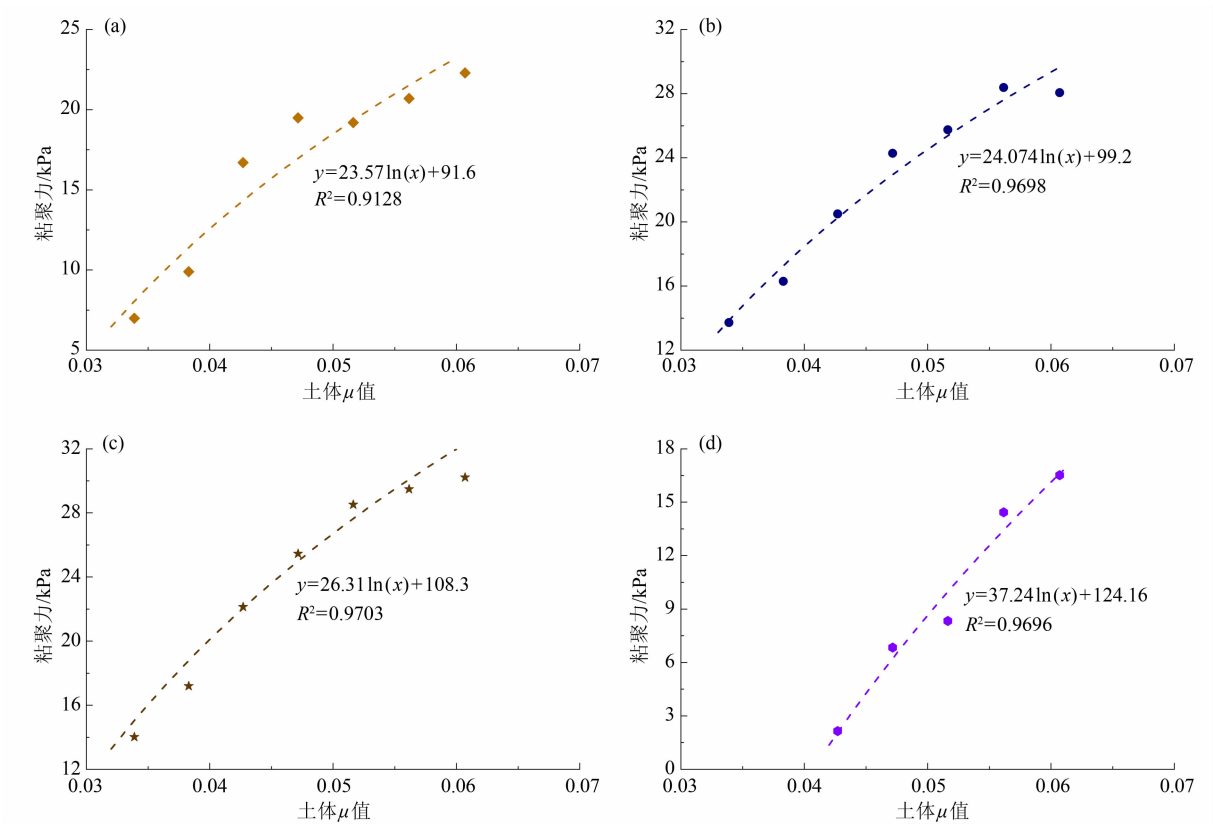


图8 四种不同含水率条件下 μ - c 关系拟合曲线:
(a) 含水率=7%; (b) 含水率=10%; (c) 含水率=13%; (d) 含水率=16%
Fig.8 Fitting curve of μ - c relationship under four different moisture content conditions:
(a) moisture content =7%; (b) moisture content =10%; (c) moisture content =13%; (d) moisture content =16%

表5 不同含水率条件下 c 随 μ 的变化关系

含水率	函数关系式	a/kPa	b/kPa	R^2
7%	$c = 23.57 \ln(\mu) + 91.6$	23.57	91.6	0.91
10%	$c = 24.07 \ln(\mu) + 99.2$	24.07	99.2	0.97
13%	$c = 26.30 \ln(\mu) + 108.3$	26.30	108.3	0.97
16%	$c = 37.24 \ln(\mu) + 124.16$	37.24	124.16	0.97

根据试验结果,分析土体标度分布参数、含水率与粘聚力的关系,将不同工况下的试验结果视为曲面上一点(μ_i, w_i, c_i),绘制在三维坐标系下并拟合曲面,得到基于颗粒组成和含水率变化条件下的土体粘聚力三维分布(图9)。

图中颜色越深表示土体粘聚力越大。可以看出,土体含水率和 μ 值共同控制土体粘聚力,并存在着一个使得粘聚力最大的含水率值(该试验中为13%),当含水率小于该临界值时,土体颗粒组成(尤其是细颗粒含量)对粘聚力的影响更显著,细颗

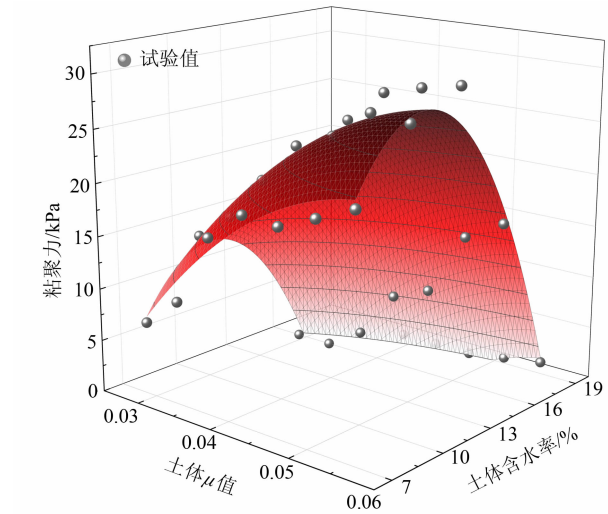


图9 不同 μ 与含水率条件下的土体粘聚力
Fig.9 Soil cohesiveness under different μ and water content conditions

粒含量越大,粘聚力越大,并且粘聚力随着 μ 值的增大呈现出对数增大趋势;而当含水率超过该临界值后,土体粘聚力迅速降低,含水率是该阶段更主要的

控制因素,相比而言,细颗粒含量的影响较小;而含水率达到19%之后,粘聚力基本消失。根据这一关系,可以在已知土体颗粒组成和含水率的条件下直接估算土体粘聚力及其动态变化。

4 讨论

本文采用标度分布的参数 μ 来刻画土体的颗粒特征,通过室内直剪试验,测试分析了不同条件下的土体粘聚力,为标度分布参数物理意义的量化提供了试验依据。同时揭示了土体粘聚力与标度分布参数之间的关系,也为表征泥石流物源土体的物理力学参数提供试验依据和新的思路,为了进一步扩展和完善研究结果,可以从以下方向考虑。

(1)拓展土体类型与条件。除了目前研究的土体类型外,应增加对不同类型的土壤(如残积土、黄土、红土等)及含石量较高的混合土体的研究,以验证该理论的普适性。并考虑温度、压力等环境因素对土体力学性质的影响,建立更加全面的物理力学模型。

(2)多参数关联分析。除了粘聚力外,还可以考虑内摩擦角、渗透性等其他同样与土体颗粒特征高度相关的力学参数与标度分布的关系,构建全面的土体物理力学参数体系。

(3)数值模拟方法与工程应用。可以结合离散元等方法,模拟不同标度分布参数的土体在受力过程中的行为,验证试验结果的可靠性,并探索难以直接通过试验观测的微观机制。并进一步将研究成果应用于实际工程问题中,如边坡稳定性分析、地基承载力计算等。

5 结论

(1)标度分布参数 μ 值和细颗粒含量具有良好的指数函数关系,表明 μ 值是刻画土体细颗粒含量的有效参数,可准确、定量描述一组土体的细颗粒占比,为标度分布参数物理意义的量化提供了依据。

(2)随着 μ 在一定范围内的不断增大,土体粘聚力先快速增大,后增速减缓,并趋于一个稳定值。这一关系可用对数函数拟合,且在不同含水率条件下均成立。

(3)随着含水率的增大,土体的粘聚力呈现先

增加至最大值,而后急剧减小的趋势,当含水率大于19%时,所有土样均不再具有粘聚力。在本试验中,粘聚力最大值出现在含水率13%左右。

(4)土体含水率和颗粒组成是影响粘聚力的重要因素,当土样中含水率低于13%时,土体级配与含水率共同影响粘聚力;当土体含水率超过13%时,土体粘聚力主要由含水率控制,两者对粘聚力的共同作用可用二维多项式表达。

参考文献(References)

- [1] GUO Xiaojun, LI Yong, CUI Peng, et al. Intermittent viscous debris flow formation in Jiangjia Gully from the perspectives of hydrological processes and material supply [J]. Journal of Hydrology, 2020, **589**: 125184. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125184
- [2] BELKHATIR M, SCHANZ T, ARAB A. Effect of fines content and void ratio on the saturated hydraulic conductivity and undrained shear strength of sand - silt mixtures [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, **70**: 2469 - 2479. DOI: 10.1007/s12665-013-2289-z
- [3] 李涛,赵洪扬,翁勃航,等. 细颗粒形状和含量对钙质混合砂强度的影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, **45**(7): 1517 - 1525. [LI Tao, ZHAO Hongyang, WENG Bohang, et al. Experimental study on effects of shape and content of fine particles on strength of calcareous mixed sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, **45**(7): 1517 - 1525] DOI: 10.11779/CJGE20220535
- [4] 王保亮,李泳,苟万春,等. 降雨作用下土体细颗粒迁移特征及其对崩塌的影响[J]. 工程科学与技术, 2017, **49**(S2): 40 - 50. [WANG Baoliang, LI Yong, GOU Wanchun, et al. Fine grain migration and its impact on soil failures under rainfall infiltration [J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, **49**(S2): 40 - 50] DOI: 10.15961/j.jsuese.201600879
- [5] 张晨阳,湛民,胡明鉴,等. 细颗粒组分含量对钙质砂抗剪强度的影响[J]. 岩土力学, 2019, **40**(S1): 195 - 202. [ZHANG Chenyang, CHEN Min, HU Mingjian, et al. Effect of fine particles content on shear strength of calcareous sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(S1): 195 - 202] DOI: 10.16285/j.rsm.2018.1706
- [6] 王军,施静,刘飞禹,等. 砂土颗粒级配对格栅-土界面静、动力直剪特性的影响[J]. 岩土力学, 2019, **40**(1): 109 - 117. [WANG Jun, SHI Jing, LIU Feiyu, et al. Effect of particle gradation on static and dynamic direct shear properties of geogrid-sand interface [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, **40**(1): 109 - 117] DOI: 10.16285/j.rsm.2017.1027
- [7] 蒋德旺,崔鹏,王姣,等. 细粒含量对冰碛土抗剪强度影响的实验研究[J]. 冰川冻土, 2019, **41**(1): 129 - 139. [JIANG

- Dewang, CUI Peng, WANG Jiao, et al. Experimental study on the effect of shear strength of moraine soil with fine grain content [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, **41**(1): 129 – 139] DOI: 10.7522 /j. issn. 1000 – 0240. 2019. 0056
- [8] KIM U, KIM D, ZHUANG Li. Influence of fines content on the undrained cyclic shear strength of sand-clay mixtures [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, **83**: 124 – 134. DOI: 10.1016/j. soilodyn. 2016. 01. 015
- [9] 李泳, 谢江, 周小军, 等. 泥石流颗粒的标度分布[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, **45**(1): 1 – 7. [LI Yong, XIE Jiang, ZHOU Xiaojun, et al. A scaling distribution for grain composition of debris flow [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, **45**(1): 1 – 7] DOI: 10.15961/j. jsuese. 2013. 01. 002
- [10] 李泳, 陈晓清, 胡凯衡, 等. 泥石流颗粒组成的分形特征[J]. *地理学报*, 2005, **60**(3): 495 – 502. [LI Yong, CHEN Xiaqing, HU Kaiheng, et al. Fractality of grain composition of debris flows [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2005, **60**(3): 495 – 502]
- [11] ZHANG Jun, LI Yong, YANG Taiqiang, et al. A universal grain-size distribution of soil with scaling invariance [J]. *European Journal of Soil Science*, 2023, **74**(2): e13354. DOI: 10.1111/ejss. 13354
- [12] 李泳, 胡凯衡, 苏凤环, 等. 流域演化与泥石流的系统性——以云南东川蒋家沟为例[J]. *山地学报*, 2009, **27**(4): 449 – 456. [LI Yong, HU Kaiheng, SU Fenghuan, et al. Debris flow viewed from the basin evolution: A case study of Jiangjia Gulley, Yunnan [J]. *Mountain Research*, 2009, **27**(4): 449 – 456]
- [13] 李泳, 苟万春, 王保亮, 等. 颗粒组成与泥石流运动的涨落[J]. *山地学报*, 2016, **34**(4): 468 – 475. [LI Yong, GOU Wanchun, WANG Baoliang, et al. Grain composition and the fluctuation of debris flow motion [J]. *Mountain Research*, 2016, **34**(4): 468 – 475] DOI: 10.16089/j. cnki. 1008 – 2786. 000152
- [14] GB/T 50123 – 2019. 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [GB/T 50123 – 2019. Standard for geotechnical testing method [S]. Beijing: China Planning Press, 2019]
- [15] LI Yong, ZHOU Xiaojun, SU Pengcheng, et al. A scaling distribution for grain composition of debris flow [J]. *Geomorphology*, 2013, **192**: 30 – 42. DOI: 10.1016/j. geomorph. 2013. 03. 015
- [16] 丁一, 冀卫东, 王旭东. 颗粒级配对混合土力学性质影响的试验研究[J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2018, **40**(1): 127 – 132. [DING Yi, JI Weidong, WANG Xudong. Experimental study on effects of grain size distribution on mechanical properties of mixed soil [J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2018, **40**(1): 127 – 132] DOI: 10.3969 /j. issn. 1671 – 7627. 2018. 01. 020
- [17] PAPADOPOULOU A I, TIKI T M. The effect of fines plasticity on monotonic undrained shear strength and liquefaction resistance of sands [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2016, **88**: 191 – 206. DOI: 10.1016/j. soilodyn. 2016. 04. 015
- [18] PAPADOPOULOU A, TIKI T. The effect of fines on critical state and liquefaction resistance characteristics of non-plastic silty sands [J]. *Soils and Foundations*, 2008, **48**(5): 713 – 725. DOI: 10.3208/sandf. 48. 713
- [19] AHMAD W, TARO U, MUHAMMAD U. Effect of the optimum and residual moisture content on the strength characteristics of unsaturated sands [C]// *E3S Web of Conferences*, 2023, **382**: 02007. DOI: 10.1051/e3sconf/202338202007
- [20] GUO Zekun, ZHANG Zizhao, MU Yanxiao, et al. Effect of freeze-thaw on mechanical properties of loess with different moisture content in Yili, Xinjiang [J]. *Sustainability*, 2022, **14**(18): 11357. DOI: 10.3390/su141811357
- [21] ABDI M, MALEKI M, CHALI E. Investigation of the critical state behavior of unsaturated silty sand with different fine contents in terms of net and effective stresses [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2024, **28**(6): 1332 – 1353. DOI: 10.1080/19648189. 2023. 2252906
- [22] CHANG C S, YIN Zhenyu. Micromechanical modeling for behavior of silty sand with influence of fine content [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2011, **48**(19): 2655 – 2667. DOI: 10.1016/j. ijsolstr. 2011. 05. 014

Relationship between Soil Scale Distribution Parameters of Debris Flow Source Soils and Cohesive Strength

CHENG Jianyi^{1,2}, GUO Xiaojun^{1*}, LI Yong¹

(1. Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Process, Chengdu Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Particle gradation governs soil mechanical properties, e. g. , cohesion. The content of fine particles in

soils, such as clay content, plays a decisive role in generating cohesive strength of soils. Although soil particle gradation can be characterized by specific grain sizes, e. g. , D_{50} , it does not avoid issues in soil mechanics such as soils tagged with the same characteristic particle size but distinct geophysical properties. Antecedent research proposed a soil scale distribution model (SSDM) by two parameters μ and D_c to define soil particle gradation. This model proved to be an acceptable expression of soil particle gradation characteristics, but there was unknown for its geophysical interpretation as well as its relation to soil cohesive strength.

In this study, laboratory tests were conducted to characterize the soil particle gradation using SSDM; the changes in cohesive strength of soil samples were investigated under the conditions of different moisture contents and scale parameters; then geophysical relationship between granularity composition/scale distribution parameter, moisture content and cohesion was carefully concluded.

(1) The scale distribution parameter (μ) increases with the increases of fine particle contents in soils, exhibiting a fine exponential function relationship.

(2) As fine particle content increased, the cohesive strength in soils rapidly increased initially and then gradually stabilized. The relationship between the cohesive strength (c) and the scale parameter (μ) could be quantitatively expressed using a logarithmic function.

(3) The cohesive strength increased first and then decreased with increasing moisture content. There existed a threshold moisture content that maximized the cohesive strength of the soils. Before reaching this threshold, the fine particle contents had a significant impact on the cohesive strength; however, after exceeding the threshold, soil moisture content became the dominant influencing factor.

(4) Based on the experimental results, a binary model for soil cohesive strength with joint influence of moisture content and scale distribution parameters was proposed.

This research can provide scientific basis for geophysical interpretation of soil scale distribution and determination of mechanical parameters for debris flow source soils.

Key words: soil cohesion; soil scale distribution; moisture content; direct shear test; fine particle content

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)