

含水率对黄土高原地区几种主要类型 土壤流变特性的影响

张亚楠¹, 周琳², 许晨阳¹, 杜伟¹, 胡斐南^{1,2}

(1.西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院

水利部 水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 研究含水率对土壤浆体流变特性的影响机理, 为黄土高原地区泥浆体流动规律的认识和泥石流防治提供科学依据。[方法] 以黄土高原地区4种主要类型土壤为研究对象, 通过流变振荡剪切测试, 探究含水率对土壤流变特性的影响。[结果] ① 塷土、褐土和黑垆土的储能模量、损耗模量、剪切应力随含水率的增加(40%~80%)均呈减小趋势, 剪切应力分别从229.85, 193.38, 96.46 Pa减小到2.25, 2.65, 2.32 Pa; 在含水率较大(>50%)的条件下, 黄绵土表现出强应变过冲现象。② 4种土壤浆体的储能模量随剪切应变的增加出现两个平台区, 表现出两步屈服现象; 随着含水率的增加, 浆体出现两步屈服向一步屈服的转变。第一步屈服与初始网络结构的破坏有关, 第二步屈服表明浆体结构被完全破坏。③ 当土壤含水率 $\leq 50\%$, 土壤细颗粒可通过形成絮凝体增加絮凝程度从而提高土壤浆体流动点剪切应力; 当含水率 $> 50\%$ 时, 土壤中的粗颗粒通过增加颗粒间摩擦力提高流动点剪切应力, 此时黄绵土流动点剪切应力大于其他土壤。[结论] 土壤流变特性不仅与其自身性质有关, 而且受土壤含水率的重要影响; 细颗粒含量较大的土壤, 在高含水率条件下其浆体更易发生流动。

关键词: 振荡剪切; 流变特性; 储能模量; 剪切应力; 流动点

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0143-08

中图分类号: S152.9

文献参数: 张亚楠, 周琳, 许晨阳, 等. 含水率对黄土高原地区几种主要类型土壤流变特性的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 143-150. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.015; Zhang Yanan, Zhou Lin, Xu Chenyang, et al. Effect of water content on rheological properties of several major types of soil in Loess Plateau region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 143-150.

Effect of Water Content on Rheological Properties of Several Major Types of Soil in Loess Plateau Region

Zhang Yanan¹, Zhou Lin², Xu Chenyang¹, Du Wei¹, Hu Feinan^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.State Key Laboratory of Soil

Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water

Conservation, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The influence of the soil water content on the rheological properties of the soil slurry was analysed to provide a scientific basis for understanding the flow law of the slurry and the prevention and control of mudflow in the Loess Plateau region. [Methods] Four main types of soil in the Loess Plateau were studied, and the effects of water content on the soil rheological properties were investigated using rheological oscillation shear tests. [Results] ① The storage modulus, loss modulus and shear stress of loess soil, cinnamon soil and dark loessial soil all decreased with the increase of soil water content (40%~80%). The shear stress reduced from 229.85, 193.38 and 96.46 Pa to 2.25, 2.65 and 2.32 Pa respectively. Under

收稿日期: 2023-11-29

修回日期: 2024-03-13

资助项目: 国家自然科学基金项目“有机物质影响黄土区土壤结构稳定性的介尺度调控机理”(42277311)

第一作者: 张亚楠(1997—), 女(汉族), 甘肃省庆阳市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤流变学。Email: zhangyanan120105@163.com。

通信作者: 胡斐南(1986—), 男(汉族), 甘肃省平凉市人, 博士, 研究员, 主要从事土壤学与水土保持方面研究工作。Email: hufn@nwafu.edu.cn。

conditions of high water content ($> 50\%$), the loess soil showed a strong strain overshoot. ② With increased shear strain, the storage modulus of the four types of soil slurry appeared in two plateau areas, showing a two-step yield phenomenon. With increased soil water content, the slurry changed from a two-step to a one-step yield. The first step of the yield was related to the destruction of the initial network structure, and the second step indicated that the slurry structure was completely destroyed. ③ When the soil moisture content was less than 50% , the fine soil particles increase the degree of flocculation by forming flocs, thus increasing the shear stress at the flow point of the soil slurry. When the moisture content was greater than 50% , the coarse particles in the soil increased the shear stress at the flow point by increasing the friction between the particles. [Conclusion] Soil rheological properties are not only related to soil properties but also significantly influenced by soil water content. Soils with a high fine particle content have a slurry that is more susceptible to flow under high-water-content conditions.

Keywords: oscillatory shear; rheological properties; storage modulus; shear stress; yield point

黄土高原地区气候干旱,年内降水集中且强度大,导致沟谷切割强烈,沟壑纵横,而黄土本身质地疏松、垂直节理发育、湿陷性强、抗侵蚀性弱^[1-2],因此该地区常年受各种地质灾害侵扰,人民生命财产受到了巨大威胁^[3-4]。近年来,随着极端降水事件频发,黄土高原地区泥石流灾害凸显,制约了区域社会 and 经济发展^[5]。因此,开展黄土区泥石流相关研究对于系统认识泥石流灾害发生机制及开发预报模型均具有重要的理论价值和实践意义。

泥石流作为泥石流三大类之一,指发育在我国黄土高原地区以细粒泥沙为主要组成物的泥质流,流体的石块含量一般不超过固体物质总量的 2% ,也称泥浆体^[6]。泥石流在黄土高原地区均有分布,是山地环境恶化、水土流失极严重的标志^[7]。目前,已有许多学者^[8-9]对黄土高原地区泥石流进行了大量研究,这些研究主要集中在现场模拟降雨、GIS 技术、遥感和泥石流灾害预警模型等方面。例如,吴晓娟^[10]通过现场模拟降雨试验对泥石流的形成和起动机理进行了研究。马建全等^[11]对黄土高原淤地坝溃决型泥石流进行研究,建立了淤地坝溃决型泥石流易发性评价模型及其计算方法。目前关于黄土高原地区泥石流的相关研究主要采用传统方法进行现场模拟以及局地模型的研究,而对于土壤泥浆体运动过程与规律的深入认识仍不足。泥石流的产生、运动和消亡过程中的每个阶段都在发生流变^[12]。流变学是研究物质的流动与变形规律的学科^[13]。泥石流呈现塑性或黏性流体的性质,并具有强烈的内部变形^[14]。因此,研究泥石流的流变特性,有助于更好地认识泥石流的形成和运动机理^[15-16]。王功辉^[17]将硅砂与黄土以不同配比混合,研究细颗粒物质含量对流动特性的影响,指出不同粒径的土体会显著影响孔隙水压力的变化。不同溶解浓度纳米颗粒的振荡剪切测试结果显示,小振幅振荡下盐浓度

的增加也会导致纳米颗粒弹性模量显著增加^[18]。Shakeel A 等^[19]通过改变高岭土和膨润土的比例和总固体含量进行流变试验,结果表明当固体含量大于 35% 时,高岭石悬浮液在应力和振幅扫描试验中表现出两步屈服行为。Jeong S W 等^[20]对海洋沉积物进行振荡剪切测试,结果表明储能模量和损耗模量随含水量的增加而减小。李伟等^[21]研究海相黏土流变特性的规律时,发现弱应变过冲现象,且含水率越低,储能模量和损耗模量越高,损耗模量峰值越高,流动点剪切应力亦随含水率的增加呈指数降低趋势。可见,含水率、颗粒组成、浆体自身性质等对泥浆体流变性能具有显著影响。尽管目前有关黄土高原地区泥石流的研究已开展大量工作,但是有关典型土壤浆体流变特性的相关研究鲜有报道。特别是近年来极端降水呈增加趋势,研究水分条件对黄土泥浆体流变特性的影响,对于认识强降雨条件下黄土泥石流流动规律具有重要的理论和实践意义。本文以黄土高原地区 4 种主要类型土壤为研究对象,通过设置不同含水率,采用振荡剪切测试,研究不同含水率对典型黄土泥浆体流变特性的影响,探讨含水率对土壤浆体流变特性的影响机理。研究结果可为黄土高原地区泥浆体流动规律的认识和泥石流防治提供一定科学依据。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

2021 年 4 月采集供试土壤,分别为陕西省杨陵示范区地区($108^{\circ}4'21''E, 34^{\circ}16'30''N$)的塬土、陕西省周至地区($108^{\circ}13'19''E, 34^{\circ}9'48''E$)的褐土、陕西省长武地区($107^{\circ}47'42''E, 35^{\circ}12'24''N$)的黑垆土和安塞地区($109^{\circ}19'21''E, 36^{\circ}51'50''N$)的黄绵土。

土样均采集于农田土壤,采样深度均为 20 cm ,采集的土壤自然风干并剔除石块和植物根系后研磨

过 2 mm 筛装袋备用。

2021 年 9 月采用常规土壤分析方法测定土壤样品基本理化性质^[22-23]。有机质含量的测定采用 $K_2Cr_2O_7$ 加热法; pH 值采用电位法测定, 水土比为 2.5 : 1; 碳酸钙含量采用气量法测定; 阳离子交换量、

比表面积的测定采用表面性质联合测定法; 土壤颗粒组成采用吸管法测定, 按照国际标准划分黏粒 (<0.002 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和砂粒(2~0.02 mm); 液塑限采用液塑限联合测定法测定。供试土壤基本理化性质详见表 1^[24]。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physicochemical properties of test soil

土壤类型	有机质/ ($g \cdot kg^{-1}$)	pH 值	$CaCO_3$ / ($g \cdot kg^{-1}$)	阳离子交换量/ ($cmol \cdot kg^{-1}$)	比表面积/ ($m^2 \cdot g^{-1}$)	机械组成/%			液限/%	塑限/%
						黏粒	粉粒	砂粒		
塋土	14.48	8.01	73.00	23.19	41.53	25.40	40.55	34.05	26.09	12.28
褐土	24.11	7.90	82.60	19.64	42.29	27.18	44.86	27.96	26.93	14.68
黑垆土	14.76	8.06	58.18	21.23	51.64	26.56	39.65	33.79	24.94	12.93
黄绵土	4.67	8.60	100.00	7.21	23.00	8.00	15.33	76.67	23.15	11.62

1.2 振荡剪切测试

2022 年 5 月进行土壤流变试验, 使用安东帕公司生产的 MCR 302 流变仪, 叶片型转子搭配圆筒测定泥浆的流变特性。转子型号为 ST22-4V-40, 沿转轴方向的长度为 40 mm, 直径为 22 mm。本试验采用振荡剪切下的振幅扫描模式, 其可以涵盖小振幅和大振幅振荡剪切同时存在的流动响应。在 0.5 Hz 频率下设置应变范围为 0.001%~1 000%, 15 min 内测量 30 个点, 测量过程中温度保持在 20 °C。土壤样品过 0.5 mm 筛后, 按照给定含水率(40%, 50%, 60%, 70%, 80%), 称取相应质量的土壤样品与蒸馏水混合, 搅拌均匀后静置 20 min, 再进行测样, 每个试验重复 3 次。

1.3 振荡剪切测试原理

在振荡剪切测试中, 振幅扫描测试研究黏弹性物质在外力作用下的变形和流动行为。流变仪对样品施加正弦波规律的应变, 样品会相应反馈一个正弦波规律的应力曲线(图 1), 两个正弦波之间会存在一个范围为 0~90°的相位角 δ , 理想流体的 δ 为 90°, 理想固体的 δ 为 0, 黏弹性样品的 δ 介于 0~90°^[25]。

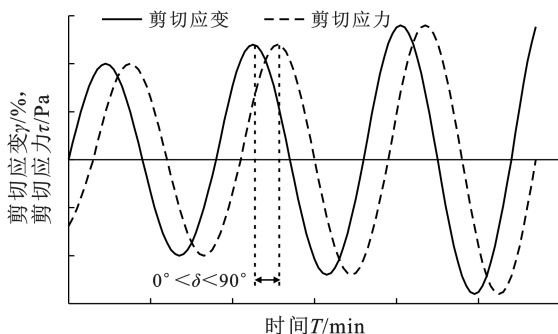


图 1 剪切应变和剪切应力随时间变化示意图

Fig.1 Diagram of shear strain and shear stress varied with time

根据经典力学中的胡克定律, 完全弹性物质在单轴应力条件下的剪切模量(G)是恒定的。在振荡剪切时, 采用复剪切模量(G^* , Pa), 其可分为储能模量(G' , Pa)和损耗模量(G'' , Pa), 计算公式为:

$$G^* = \tau_A / \gamma_A \quad (1)$$

$$G' = G^* \times \cos\delta \quad (2)$$

$$G'' = G^* \times \sin\delta \quad (3)$$

式中: G^* 为复剪切模量(Pa); G' 为储能模量(Pa); G'' 为损耗模量(Pa); τ_A 为剪切应力的振幅(Pa); γ_A 为剪切应变的振幅(无量纲); δ 为相位角。

储能模量和损耗模量随剪切应变变化的典型曲线如图 2 所示。图中可以得到储能模量 G' 、损耗模量 G'' , G' 与 G'' 的交点。储能模量 G' 代表黏弹行为的弹性部分, 即存储的变形能量。损耗模量 G'' 代表黏弹行为的黏性部分, 即流动时因内部摩擦等损失的能量^[16]。当 $G' > G''$ 时, 试样在此范围内表现为弹性固体行为; 当 $G' = G''$, 该点表示固体—流体相态转变点, 称为流动点(Yield point, YP), 是估算复杂流体黏弹性的重要流变参数; 而 $G' < G''$, 黏性在结构中占主导地位^[26]。从图 2 可以看到, 随着剪切应变的增加, 储能模量曲线出现了两个平台区。第一个平台区过后储能模量明显降低, 之后出现一个小又宽的平台; 到了第 2 个平台的临界应变时, 储能模量进一步减小, 这个现象被称为两步屈服。

2 结果与分析

2.1 储能模量和损耗模量与剪切应变的关系

图 3 为 4 种土壤浆体的储能模量和损耗模量随剪切应变变化的曲线。塋土、褐土和黑垆土土壤浆体的模量变化有相似趋势, 表现为随着含水率的增加,

储能模量和损耗模量均减小;而黄绵土在含水率为 60%,70%和 80%时,储能模量和损耗模量高于含水率为 50%的浆体试样。将不同土壤同一含水率下的储能模量和损耗模量相比较,发现所有含水率条件下储能模量和损耗模量表现为: 塋土 > 褐土 > 黑垆土。从图 3 中还可以看出,由两步屈服到一步屈服的转变。随着剪切应变的增加,塋土、褐土和黑垆土浆体的储能模量和损耗模量先出现一个平台区,在剪切应变到达黏弹性终点时,开始减小。而黄绵土浆体却呈现不一样的趋势,当含水率为 60%,70%和 80%时,储能模量和损耗模量在剪切应变范围为 0.001%~0.1%时曲线呈先上升后减小的趋势。随着含水率的增加,塋土、黑垆土和褐土的第 2 个平台区逐渐不明

显甚至消失;而黄绵土试样在所有含水率条件下,第二平台区均明显存在。

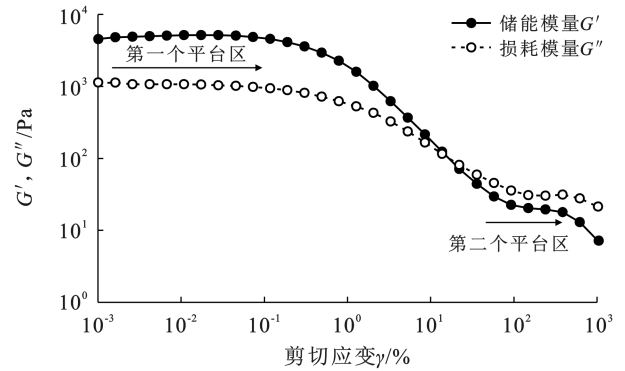


图 2 振荡剪切荷载结果及两步屈服示意图

Fig.2 Schematic of results from oscillatory shear load and dual yielding

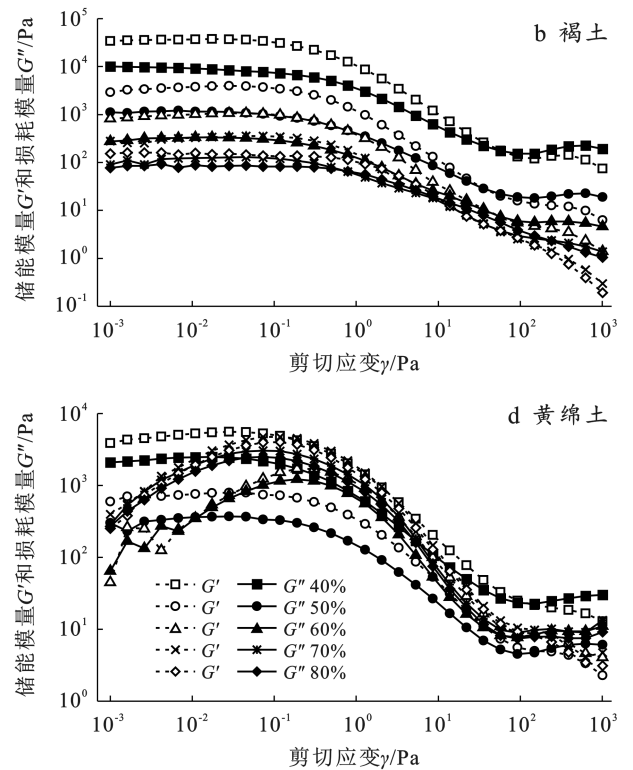
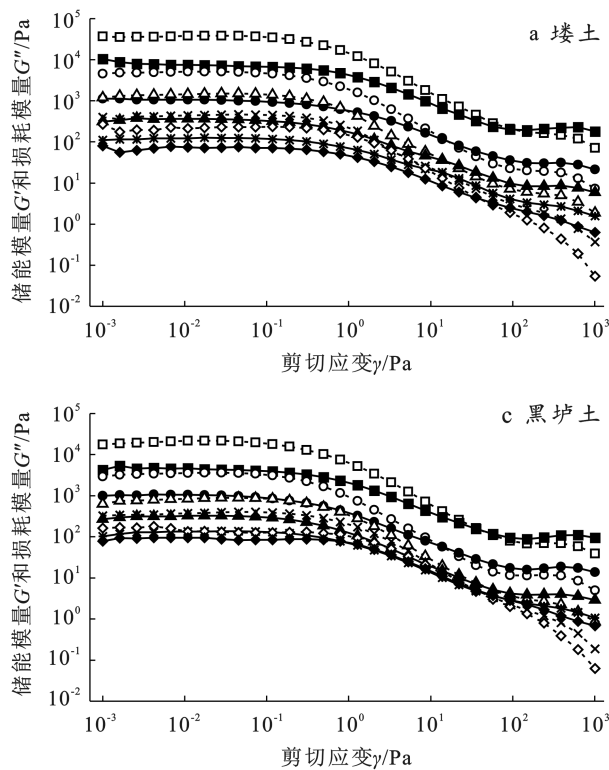


图 3 4 种土壤浆体储能模量和损耗模量与剪切应变的关系

Fig.3 Storage modulus and loss modulus as a function of strain amplitude for four soil slurries

2.2 剪切应力与剪切应变的关系

图 4 为 4 种土壤浆体剪切应力随剪切应变的变化关系图。随着剪切应变的增加,4 种土壤浆体的剪切应力整体呈增加趋势。在剪切应变范围为 0.001%~1%时,剪切应力逐渐增加,剪切应变范围为 1%~100%时出现一个平台区;剪切应变范围大于 100%时,剪切应力又出现明显增加。随着含水率的增加,塋土、褐土和黑垆土浆体的剪切应力逐渐减小。

2.3 储能模量与剪切应力的关系

图 5 为 4 种土壤浆体储能模量与剪切应力的关系图。从图中可以更直观地看到储能模量同样存在两个平台。随着含水率的增加,塋土、黑垆土和褐土的第二平台区宽度减小,逐渐变得不明显,直至最高含水率时完全消失;而黄绵土浆体的屈服现象对含水率变化并不敏感,在所有含水率条件下,黄绵土的第二平台区均存在。

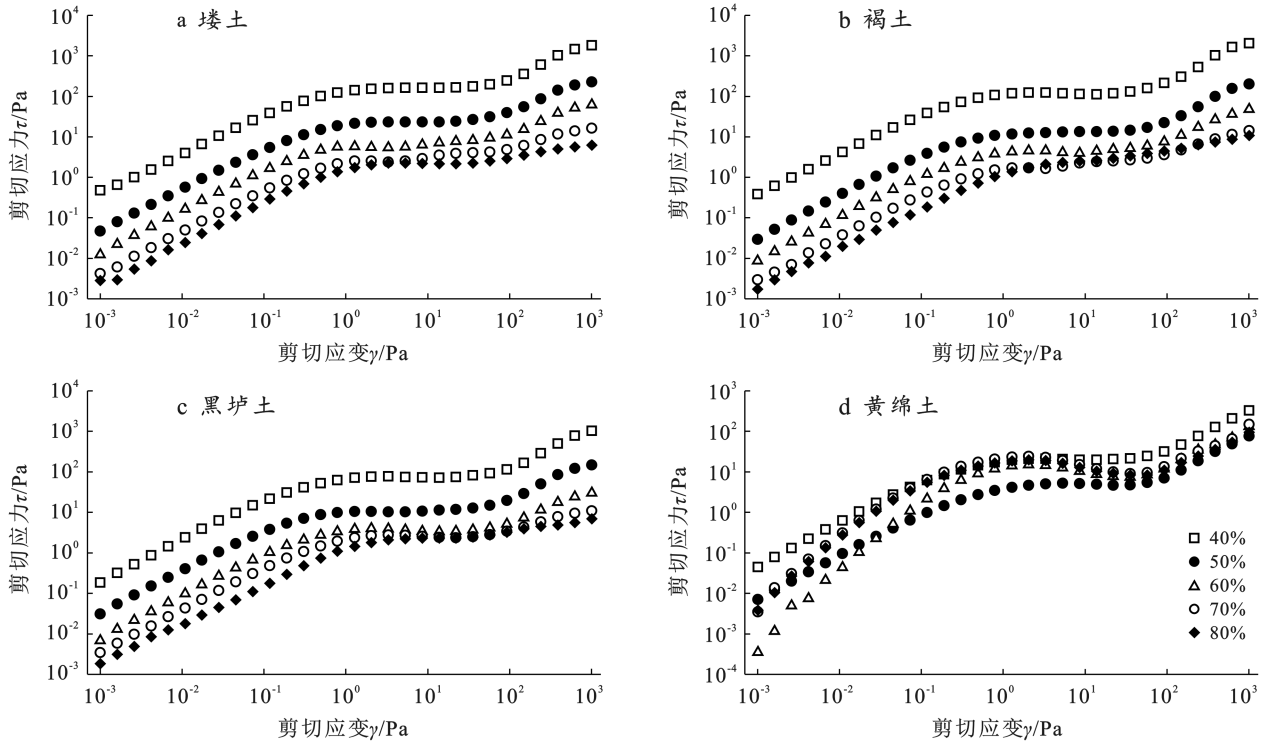


图 4 4 种土壤浆体剪切应力与剪切应变的关系

Fig.4 Shear stress as a function of strain amplitude for four soil slurries

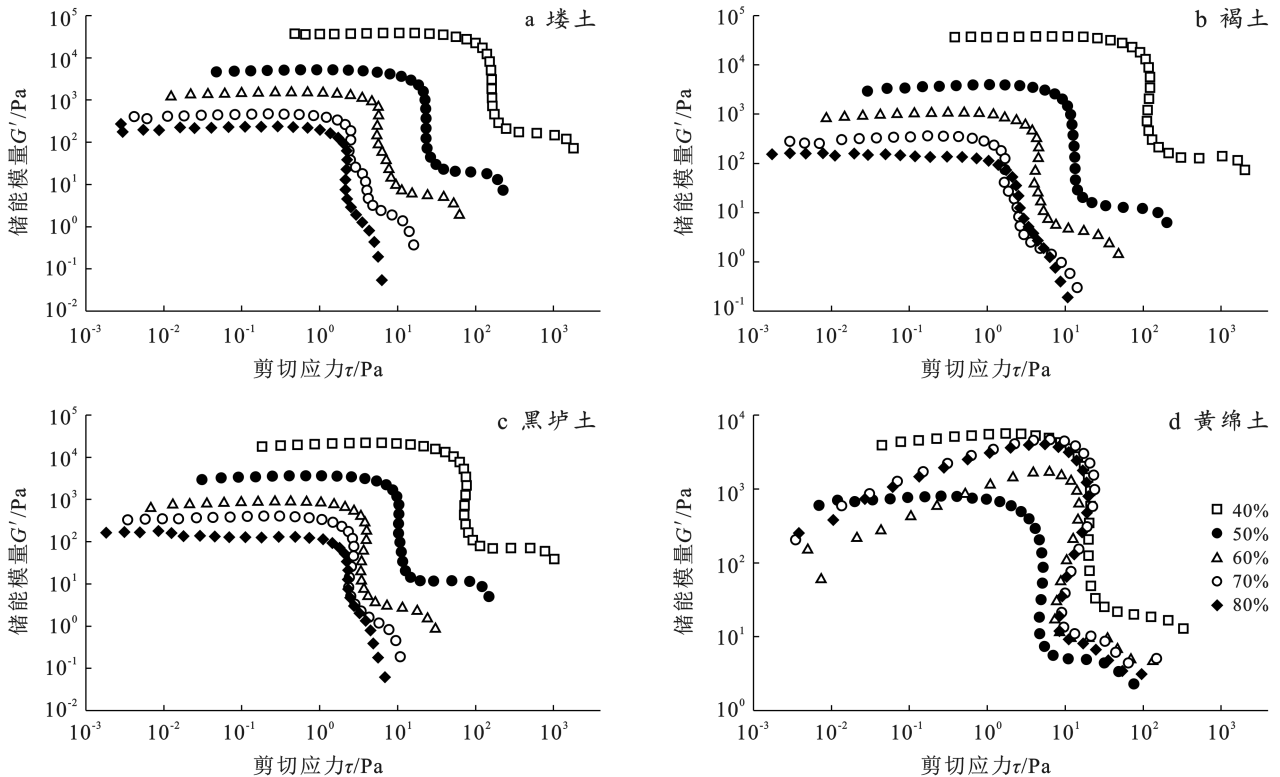


图 5 4 种土壤浆体储能模量与剪切应力的关系

Fig.5 Storage modulus as a function of shear stress amplitude for four soil slurries

2.4 含水率对流动点剪切应力的影响

图 6 为流动点剪切应力随土壤含水率的变化关系图。由图 6 可知,随着试样含水率的增加,4 种土

壤浆体流动点剪切应力整体呈降低趋势。当试样含水率为 40% 时,流动点剪切应力表现为: 塋土 > 褐土 > 黑塋土 > 黄绵土, 分别为 229.85, 193.38, 96.46 和

52.51 Pa;当试样含水率为 50%时,流动点剪切应力表现为:媠土>褐土>黄绵土>黑垆土,分别为 23.44, 14.37, 12.43 和 11.35 Pa;当试样含水率 $\geq 60\%$ 时,流动点剪切应力表现为:黄绵土>媠土 \approx 褐土 \approx 黑垆土。通过对屈服应力和含水率进行拟合,拟合结果如图 6 所示(τ 为屈服应力, ω 为含水率)。

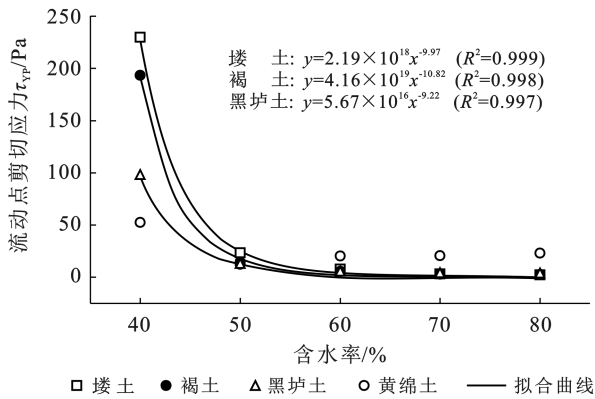


图 6 4 种土壤浆体流动点剪切应力的变化 ($p < 0.05$)

Fig.6 Variation in shear stress at yield point of four soil slurries ($p < 0.05$)

3 讨论

本研究发现,随着含水率的增加,媠土、褐土和黑垆土土壤浆体储能模量和损耗模量均减小。这与 Jeong 等^[20]的研究结果一致。含水率的增大导致样品黏弹性、结构强度减弱,流动性增强,故储能模量和损耗模量减小。同一含水率下,浆体的储能模量和损耗模量表现为:媠土>褐土>黑垆土。这主要与颗粒组成、碳酸钙、有机质含量等因素有关,研究表明,颗粒较小的悬浮液,可能具有更强的结构,主要是因其表面积较大,可增强粒子与粒子间的相互作用,碳酸钙、有机质等胶结物质可增强颗粒间黏结作用,进而导致模量较大^[19,27-29]。

随着浆体含水率的增加,4 种土壤浆体流动点剪切应力整体呈现减小的趋势。这主要是由于含水率增多导致颗粒与颗粒间的摩擦力降低,剪切应力随之降低^[21]。同时,高含水率的样品处于流体状态时,含水率越高流动时需要的剪切应力就越小^[14]。在含水率 40%条件下,流动点剪切应力表现为媠土>褐土>黑垆土;当含水率大于 50%时,黄绵土浆体流动点剪切应力大于其他 3 种土壤(图 6)。这可能是因为媠土、褐土和黑垆土的颗粒组成中粉黏粒含量较多,低含水率条件下,其在剪切荷载下絮凝作用较大。而黄绵土的砂粒含量较多,含水率较大时,砂粒在体系中的作用较明显,导致浆体颗粒之间摩擦力增大,故黄

绵土流动点剪切应力与其他土壤浆体趋势不同。Pellegrino 等^[30]研究发现,当粗颗粒和细颗粒含量的比值较小时,细颗粒会影响大颗粒的流变行为;当粗颗粒相较于细颗粒含量较多时,屈服应力与粗颗粒含量成正比。因此,在低含水率条件下,细颗粒会主要影响浆体的流变特性,而在高含水率条件下,粗颗粒则主要影响浆体的流变特性。黄绵土的砂粒含量高达 76.67%,含水率大于 50%的试样受粗颗粒摩擦和碰撞的影响,流动点剪切应力升高。

随着含水率的增加,发现由两步屈服到一步屈服的转变(图 3,图 5)。随着含水率的增加,媠土、黑垆土和褐土的第 2 个平台区逐渐变得不明显甚至消失,而黄绵土试样在所有含水率条件下,第 2 个平台区均明显存在。Shakeel A 等^[19]对高岭石、蒙脱石及其混合样进行振幅扫描试验时,发现在高岭石,以及高岭石和蒙脱石混合样中均观察到了两步屈服,而蒙脱石样品表现为一步屈服,说明高岭石主导了第二步屈服的发生,这与高岭石不膨胀的性质有关。根据已有研究,黄绵土高岭石含量低于黑垆土和褐土;但蒙脱石含量相对高于黑垆土和媠土^[22],因此导致黄绵土表现为一步屈服,与 Shakeel A 等^[19]研究结果一致。Ahuja A 等^[31]将可可粉、植物油、水制成悬浮液,采用流变学方法对其屈服行为进行了研究,同样也发现了两步屈服现象。两步屈服现象发生的原因可能是高浓度悬浮液形成的絮凝体(团簇)在第一次屈服时发生了一系列键旋转和结构恢复重排,第二次屈服为键断裂和网络破裂^[32]。细颗粒可以形成絮凝体增加网络结构^[33],而黄绵土黏粒含量较少,在高含水率条件(60%,70%,80%)下形成的网络结构有限,故第一个平台区不存在,只存在一步屈服现象。

在低剪切应变条件下,媠土、褐土和黑垆土浆体的储能模量和损耗模量会出现一个平台区;而黄绵土浆体则在含水率 $> 50\%$ 的条件下,储能模量和损耗模量在剪切应变范围为 0.001%~0.1%时曲线呈明显上升趋势,存在局部极大值,表现为强应变过冲现象(图 3)。研究发现,细颗粒可以和水合离子形成絮凝体,且细颗粒含量高时,絮凝体连接而成的网络结构具有一定的承载能力,并起到增加黏度和减缓沉降的作用^[33-34]。而黄绵土颗粒组成中砂粒含量较多,易发生沉降,故含水率 $> 50\%$ 的试样在剪切应变范围为 0.001%~0.1%内模量增加,之后随着剪切应变增加模量减少,发生强应变过冲现象。

4 结论

(1) 随着含水率的增加,媠土、褐土和黑垆土土壤

浆体的储能模量、损耗模量、剪切应力均减小,而黄绵土土壤浆体则在含水率 $> 50\%$ 的条件时,储能模量和损耗模量高于含水率为 50% 的试样,表现出强应变过冲现象;随着含水率的增加,4种土壤浆体流动点的剪切应力均减小。

(2) 4种土壤浆体均表现出了不同程度的两步屈服现象。随着含水率的增加,可以观察到由两步屈服到一步屈服的转变。塋土、褐土和黑垆土的第2个平台区逐渐变得不明显甚至消失,而黄绵土浆体在所有含水率条件下第二平台区均存在。

(3) 不同含水率条件下,土壤浆体具有不同的流变特性。当含水率较低时($\leq 50\%$),细颗粒在体系中起主要作用,其可通过形成絮凝体增加絮凝程度从而提高土壤浆体流动点剪切应力;当含水率较高时($> 50\%$),粗颗粒在土壤浆体中起主要作用,可通过增加土壤颗粒间摩擦力提高流动点剪切应力。对于黄土高原地区4种类型土壤,塋土、褐土和黑垆土因细颗粒含量较多,在含水率较高时浆体更容易发生流动。该研究可为黄土高原地区典型土壤浆体流动规律的认识和泥石流灾害防治提供一定的科学参考。

参考文献(References)

- [1] 彭建兵,林鸿州,王启耀,等.黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路[J].工程地质学报,2014,22(4):684-691.
Peng Jianbing, Lin Hongzhou, Wang Qiyao, et al. The critical issues and creative concepts in mitigation research of loess geological hazards [J]. Journal of Engineering Geology, 2014,22(4):684-691.
- [2] 张帆宇,刘高,谌文武,等.袁家湾滑坡在切坡开挖过程中的演化机理[J].岩土工程学报,2009,31(8):1248-1254.
Zhang Fanyu, Liu Gao, Chen Wenwu, et al. Evolution mechanism of Yuanjiawan landslide in the process of slope cutting and excavation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009,31(8):1248-1254.
- [3] Zhang Fanyu, Huang Xiaowei. Trend and spatiotemporal distribution of fatal landslides triggered by non-seismic effects in China [J]. Landslides, 2018,15(8):1663-1674.
- [4] 辛星,张帆宇.三维确定性模型在浅层黄土滑坡稳定性预测中的应用[J].工程科学学报,2018,40(4):397-406.
Xin Xing, Zhang Fanyu. Application of a 3D deterministic model for predicting shallow loess landslide stability [J]. Chinese Journal of Engineering, 2018,40(4):397-406.
- [5] 雷祥义,黄玉华,王卫.黄土高原的泥石流灾害与人类活动[J].陕西地质,2000,18(1):28-39.
Lei Xiangyi, Huang Yuhua, Wang Wei. Disasters of mud flow and human activities on the Loess Plateau of China [J]. Geology of Shaanxi, 2000,18(1):28-39.
- [6] 傅世伯,叶贵明.黄土高原区泥石流流量计算的配方法修正公式[J].人民黄河,1986,8(6):19-20.
Fu Shibo, Ye Guiming. Corrected formulae for allotment methods for mudflow calculations in the Loess Plateau region [J]. Yellow River, 1986,8(6):19-20.
- [7] 马东涛,崔鹏,张金山,等.黄土高原泥石流灾害成因及特征[J].干旱区地理,2005,28(4):435-440.
Ma Dongtao, Cui Peng, Zhang Jinshan, et al. Formation causes and features of mudflows in the Loess Plateau, China [J]. Arid Land Geography, 2005,28(4):435-440.
- [8] 强德霞,马海政,朱自平,等.甘肃省积石山县泥石流空间分布及分析[J].测绘通报,2022(7):107-111.
Qiang Dexia, Ma Haizheng, Zhu Ziping, et al. Spatial distribution and analysis of debris flow in Jishishan County of Gansu Province [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(7):107-111.
- [9] 张仲福.陇东黄土高原泥石流灾害临界雨量研究[J].地质灾害与环境保护,2020,31(3):18-24.
Zhang Zhongfu. The research on the critical rainfall of mudflow disaster in the Loess Plateau of East Gansu [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2020,31(3):18-24.
- [10] 吴晓娟.延安地区泥石流(泥流)形成机理研究[D].陕西西安:西北大学,2014.
Wu Xiaojuan. Research about the mechanism of debris flow(loess mudflow) in Yan'an area [D]. Xi'an, Shaanxi: Northwest University, 2014.
- [11] 马建全,吴轲桥,李识博,等.黄土高原淤地坝溃决型泥石流易发性评价[J].科学技术与工程,2022,22(17):6869-6879.
Ma Jianquan, Wu Keqiao, Li Shibo, et al. Evaluation on the susceptibility of debris flows induced by check-dam outburst in Loess Plateau [J]. Science Technology and Engineering, 2022,22(17):6869-6879.
- [12] 杨闻宇.剪切载荷作用下高浓度粘性泥沙流变特性的实验研究[D].上海:上海交通大学,2014.
Yang Wenyu. Experimental study on the rheological properties of dense cohesive sediments under shear loadings [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [13] 王梦寒.基于流变学对泥沙起动与絮凝规律的研究[D].上海:华东师范大学,2018.
Wang Menghan. Research the sediment incipient motion and flocculation based on rheological characteristics [D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [14] 史泽华.黄土流变特性试验研究[D].甘肃兰州:兰州大学,2019.
Shi Zehua. Experimental study on rheological properties of

- loess [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2019.
- [15] Coussot P, Meunier M. Recognition, classification and mechanical description of debris flows [J]. *Earth-Science Reviews*, 1996,40(3/4):209-227.
- [16] 胡正红,张婧,刘兴年,等.泥石流浆体流变特性影响因素试验研究[J].*水力发电学报*,2014,33(2):131-136.
Hu Zhenghong, Zhang Jing, Liu Xingnian, et al. Experimental study on rheological properties factors of debris flow slurry [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2014,33(2):131-136.
- [17] Wang G, Sassa K. Factors affecting rainfall-induced flowslides in laboratory flume tests [J]. *Geotechnique*, 2001,51(7):587-599.
- [18] Da Chang, Zhang Xuan, Alzobaidi S, et al. Tuning surface chemistry and ionic strength to control nanoparticle adsorption and elastic dilational modulus at air-brine interface [J]. *Langmuir*, 2021,37(19):5795-5809.
- [19] Shakeel A, Kirichek A, Chassagne C. Rheology and yielding transitions in mixed kaolinite/bentonite suspensions [J]. *Applied Clay Science*, 2021,211:106206.
- [20] Jeong S W, Urgeles R, Bahk J J, et al. Rheological characteristics of marine sediments from the Ulleung basin, east Sea to estimate the mobility of submarine landslides [J]. *Marine Geophysical Research*, 2022,43(2):16.
- [21] 李伟,刘叔灼,单毅,等.不同含水率对海相黏土流变特性和流变参数的影响[J].*广东海洋大学学报*,2022,42(2):120-125.
Li Wei, Liu Shuzhuo, Shan Yi, et al. Effect of different moisture content on rheological properties and rheological parameters of marine clay [J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2022,42(2):120-125.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. *Soil Agrochemical Analysis* [M]. 3th Edition, Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [23] Li Hang, Hou Jie, Liu Xinmin, et al. Combined determination of specific surface area and surface charge properties of charged particles from a single experiment [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011,75(6):2128-2135.
- [24] 刘婧芳,胡斐南,杨志花,等.土粒表面电场对土壤团聚体破碎及溅蚀的影响[J].*农业工程学报*,2020,36(7):149-156.
- Liu Jingfang, Hu Feinan, Yang Zhihua, et al. Effects of soil surface electric field on the breakdown and splash erosion of soil aggregate [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020,36(7):149-156.
- [25] Pértile P, Holthusen D, Gubiani P I, et al. Microstructural strength of four subtropical soils evaluated by rheometry: Properties, difficulties and opportunities [J]. *Scientia Agricola*, 2018,75(2):154-162.
- [26] Markgraf W, Watts C W, Whalley W R, et al. Influence of organic matter on rheological properties of soil [J]. *Applied Clay Science*, 2012,64(8):25-33.
- [27] Chang C, Powell R L. Effect of particle size distributions on the rheology of concentrated bimodal suspensions [J]. *Journal of Rheology*, 1994,38(1):85-98.
- [28] Holthusen D, Batistão A C, Reichert J M. Amplitude sweep tests to comprehensively characterize soil micro-mechanics: Brittle and elastic interparticle bonds and their interference with major soil aggregation factors organic matter and water content [J]. *Rheologica Acta*, 2020,59(8):545-563.
- [29] Stoppe N, Horn R. Microstructural strength of tidal soils-a rheometric approach to develop pedotransfer functions [J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2018,66(1):87-96.
- [30] Pellegrino A M, Schippa L. A laboratory experience on the effect of grains concentration and coarse sediment on the rheology of natural debris-flows [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2018,77(22):749.
- [31] Ahuja A, Gamonpilas C. Dual yielding in capillary suspensions [J]. *Rheologica Acta*, 2017,56(10):801-810.
- [32] Chan H K, Mohraz A. Two-step yielding and directional strain-induced strengthening in dilute colloidal gels [J]. *Physical Review E, Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2012,85(4):041403.
- [33] Guo Xingsen, Nian Tingkai, Wang Zhongtao, et al. Low-temperature rheological behavior of submarine mudflows [J]. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, 2020,146(2):04019043.
- [34] Burns K, Gabet E J. The effective viscosity of slurries laden with vegetative ash [J]. *Catena*, 2015,135(6):350-357.