

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2020.04.017

粒组缺失对紫色土抗剪强度的影响

许冲¹, 薛乐¹, 李贤¹, 汪时机^{1,2}

1. 西南大学工程技术学院, 重庆 400715; 2. 长江师范学院土木建筑工程学院, 重庆涪陵 408100

摘要: 为探究三峡库区紫色土因水土流失导致的部分粒组缺失情况下的力学特性, 选用重庆地区典型的侏罗系沙溪庙组紫色砂岩发育而成的灰棕紫色土进行三轴固结排水剪切试验。根据三轴试验数据分别从抗剪强度指标和峰值抗剪强度贡献率两个角度分析。数据表明: 1) 从抗剪强度指标来看, 在固结完成之后, 相比缺失细粒土和细砂, 缺失较大颗粒的土仍具有较高强度, 并分析了在围压的作用下, 不同土体结构与抗剪强度变化的关系。2) 从峰值抗剪强度贡献率来看, 缺失较大粒径的试样得到了加强, 反之试样强度被削弱, 贡献率消除了不同粒径的含量差别较大的影响, 研究结果对水土流失严重的紫色土地地区的地基加固工程具有一定的参考价值。

关键词: 粒组缺失; 紫色土; 三轴排水剪切试验; 抗剪强度指标; 峰值抗剪强度贡献率

中图分类号: TU4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-9868(2020)04-0135-07

紫色土是肥沃的岩成土壤, 富含多种微量元素和腐殖质, 对我国多省份的农业生产起到重要作用^[1]。紫色土具有颗粒间胶结不良, 极易崩解, 具有极为强烈的物理风化形状^[2-4]。因此, 其风化物及其所发育的土壤结构松散, 易受水流侵蚀, 雨水充沛的紫色土地地区土壤发育处于相对幼年的阶段^[5-6]。大部分关于紫色土的研究侧重于土壤肥力的保持研究^[7-8], 而自然环境下的降雨、山洪、季节变化等都会引起水土流失影响土颗粒组分从而破坏土的抗剪强度, 故对紫色土受侵蚀后应力应变关系的研究在工程实践中具有实际意义^[9-11]。

不同颗粒组分的土体具有不同的孔隙结构, 一方面其孔隙的大小和分布会导致内部液相的性状变化, 已有学者研究间断级配对比土水特征曲线的影响, 从而预测土体的抗剪强度^[12-14]。另一方面, 不同粒径的土颗粒在土体结构中承担的角色不同, 在自然环境下非饱和土抗剪强度的预测一直是土力学研究的重要问题。Kokusho 等^[15]发现, 在相同干密度不同颗粒级配情况下, 级配不良的非饱和砾质土较级配良好的非饱和砾质土更容易发生剪切破坏。Cho 等^[16]通过改变颗粒形状的不规则性来研究自然砂及粉碎砂的力学性质, 发现适当增加颗粒的不规则性会降低土的抗剪强度, 提高压力和临界内摩擦角的敏感性。郭鸿、戴北冰、Sitharam 等^[17-20]研究发现颗粒级配对内摩擦角的影响比较明显, 总体表现为颗粒越粗, 内摩擦角越大, 同时内摩擦角随不均匀系数的增大而增大, 随曲率系数的增大而减小。

国内外学者大多围绕各组分土颗粒不同配比、颗粒形状、颗粒大小等对土壤抗剪强度的影响进行试验研究, 或是缺失粒径对持水能力的影响^[21-23], 关于粒组缺失导致土体抗剪强度的影响, 有待进一步研究。基于此, 本文以重庆地区紫色土为研究对象, 通过筛除某一粒径级土壤单粒来模拟水土流失造成的粒组缺失, 重塑制样后进行固结排水三轴剪切试验, 并从抗剪强度指标变化和各粒组对贡献率两个角度探讨不同粒组土壤单粒缺失对重庆紫色土地抗剪强度影响规律。

收稿日期: 2019-06-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(11572262, 11972311); 中央高校基本科研业务费专项(XDJK2018AB003)。

作者简介: 许冲(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事土力学及边坡防护等方面的研究。

通信作者: 汪时机, 教授, 博士研究生导师。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验用土取自重庆市北碚区西南大学后山地地表下 40 mm 左右未经扰动过的淀积层, 该层生物活动和植物根系较少, 为砂质黏性紫色土, 其物理性质如表 1 所示, 颗粒级配如图 1 所示. 将天然土置于干燥处风干后摊开在木板上用木棒将较大团聚体碾开, 同时去除肉眼能看见的植物根系、动物残渣及较大砾石等, 使土壤结构充分散开. 过 2 mm 筛后置于 110 °C 烘箱充分烘干装至保鲜袋内密封, 待其温度降至室温, 使用标准土壤筛(筛口径分别为: 2, 1, 0.5, 0.25, 0.075 mm)进行筛分, 得到 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5, 0.075~0.25, 0~0.075 mm 5 组土壤. 为模拟实际情况下水土流失导致某一粒径缺失的工程条件, 依次从第一组抽离 5 组土壤中的一组, 将剩余 4 组按照原比例充分混合并标记, 得到包括完整粒组在内的 6 组土样. 各组土样的编号和粒径参数如表 3 所示, 其中 5 号和 6 号土样级配不良, 1-4 号土样均级配良好.

表 1 天然砂质黏性紫色土物理性质

比重/ Gs	湿密度/ (g · cm ⁻³)	含水率/ %	塑限/ %	液限/ %	颗粒组成/%				
					粗砂/mm		中砂/mm	细砂/mm	细粒/mm
					2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	<0.075
2.69	1.68	20.78	19.5	34.3	8.65	18.85	15.22	36.82	20.46

1.2 试验方法

将制备好的土样均匀喷洒相应质量的水至含水率为 18 %, 浸润 12 h 后按照表 2 制备试样.

表 2 制样参数

直径/ mm	高度/ mm	试样总 质量/g	干密度/ (g · cm ⁻³)	制备初始 含水率/%
61.8	125	708.9	1.60	18

将每组试样分五等分, 每份为一层, 采用本试验自主研制的压实装置压至每层高 25 mm. 该装置通过千斤顶提供稳定可靠的轴向力先将第一层的土在模型中压实, 用镊子将第一层土的表面打毛后倒入第二层, 压实完最后一层后, 将试样从模具中慢慢压出, 装进橡皮膜再稳定地安装在 FLSY30-1 型应力应变控制式非饱和土三轴仪中, 控制净围压为 100, 200, 300 kPa, 进行固结直到体积变化每 2 h 不超过 0.063 cm³, 排水量每 2 h 不超过 0.012 cm³ 即视为固结完成. 待试样固结完成后, 控制剪切速率为 0.08 mm/min 直接进行三轴剪切试验.

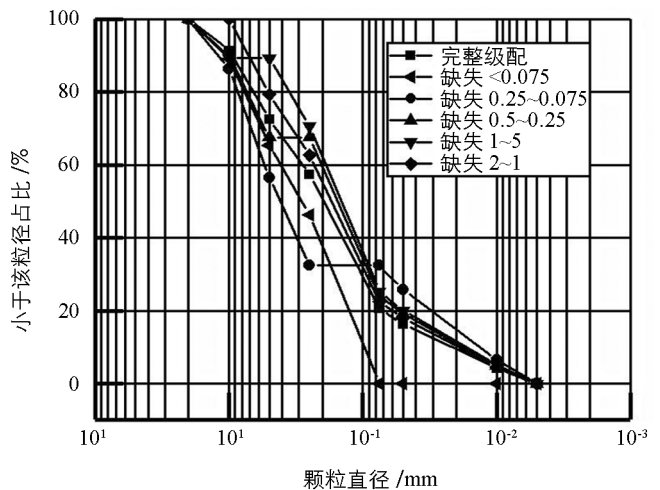


图 1 各缺失情况的天然紫色土粒径级配曲线

表 3 各组试样粒径参数

编号	缺失粒组/mm	参 数					备注
		d ₆₀	d ₃₀	d ₁₀	Cu	Cc	
1	无缺失	0.294 6	0.120 3	0.029 5	9.98	1.66	级配良好
2	缺失 2~1	0.238 2	0.108 0	0.026 8	8.89	1.83	级配良好
3	缺失 1~0.5	0.209 2	0.093 5	0.023 5	8.90	1.78	级配良好
4	缺失 0.5~0.25	0.219 5	0.098 6	0.024 7	8.89	1.80	级配良好
5	缺失 0.25~0.075	0.559 2	0.065 7	0.017 7	31.53	0.44	级配不良
6	缺失 0.075 以下	0.429 1	0.188 4	0.112 8	3.80	0.73	级配不良

2 结果与分析

2.1 抗剪强度指标计算

抗剪强度的主要评价指标包括内摩擦角 φ 和黏聚力 c . 取轴向应变值 15% 所对应的偏差应力作为峰值抗剪强度, 得到不同围压下共 18 个试验数据, 试验结果见表 4. 根据莫尔-库伦破坏准则 $\tau = c + \sigma \tan \varphi$, 每组试样的围压 σ_3 与大主应力 σ_1 (最大偏应力与围压的和) 具有较好的线性关系. 利用该准则得到 $\sigma_1 = A + B\sigma_3$, 其中 $A = \frac{2c \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$ $B = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$, 依据线性回归原理对表 4 中围压 σ_3 与大主应力 σ_1 数据进行最小二乘法线性回归, 得到 A 、 B 值及拟合方程, R^2 均大于 0.989, 进而获得内摩擦角 φ 和黏聚力 c (图 2), 式中 A 是拟合直线在纵轴上的截距, B 表示直线的斜率. 计算结果见表 5.

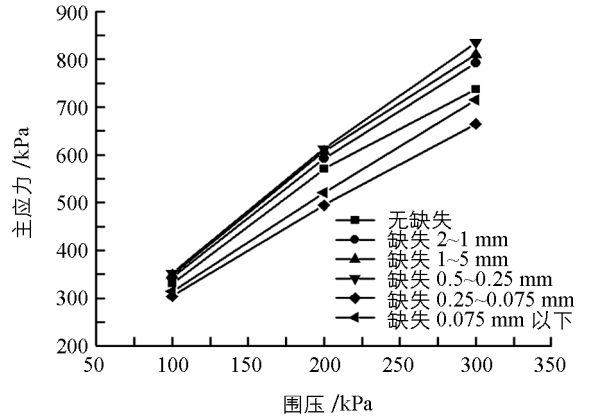


图 2 试样 σ_1 与 σ_3 关系线性拟合

考虑到不同粒径范围的土颗粒含量相差较大, 为描述不同粒径缺失对土体抗剪强度的影响效率, 本文定义不同粒径缺失组对偏应力的贡献率表示为

$$\Delta(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_i - (\sigma_1 - \sigma_3)_1}{(\sigma_1 - \sigma_3)_1 a_i} \times 100\%$$

式中: $(\sigma_1 - \sigma_3)_1$ 为没有粒组缺失时试样的峰值抗剪强度, $(\sigma_1 - \sigma_3)_i$ 第 i 组试样的峰值抗剪强度, a_i 为第 i 组缺失的粒组所占含量.

表 4 峰值抗剪强度值

kPa

围压 $\sigma_1 - \sigma_3$	编 号					
	1	2	3	4	5	6
100	230.52	242.82	247.87	251.97	203.60	214.54
200	370.36	392.15	407.67	412.65	294.82	320.63
300	437.07	491.74	509.89	535.51	364.37	414.88

表 5 计算 c 和 φ 值

指标	编 号					
	1	2	3	4	5	6
A /kPa	139.43	126.65	126.46	116.50	126.83	116.34
B	2.03	2.24	2.31	2.42	1.80	2.00
R^2	0.989 33	0.995 92	0.994 85	0.997 96	0.998 8	0.999 71
c /kPa	48.93	42.31	41.60	37.45	27.27	10.26
φ /°	19.87	22.51	22.92	24.07	16.62	18.92

2.2 粒组缺失对抗剪强度的影响

对比试验结果, 所有试样的抗剪强度随围压增高而依次提高. 当颗粒级配良好的时候, 即 2, 3, 4 组试样的抗剪强度相比 1 号试样均在一定程度上得到提升; 而当颗粒级配不良的时候, 即 5, 6 组试样的抗剪强度均相比 1 号试样在一定程度上有所下降. 其中 4 号试样的抗剪强度最大, 6 号试样抗剪强度最小, 故将固结排水试验的应力应变曲线分为对照组(a)、提升组(b)、降低组(c)三类如图 3 所示.

缺失的土壤单粒尺寸越小, 土体的黏聚力越小, 在缺失 < 0.075 mm 粒组的时候达到最低值; 而

内摩擦角随着缺失粒径尺寸的减小,整体呈现先增大后减小的趋势,试验结果最大值出现在缺失粒径 0.5~0.25 mm 的试样中,最小值为缺失 0.25~0.075 mm 的试样,较完整级配试样内摩擦角的变化区间为 16.4%至 21.1%.

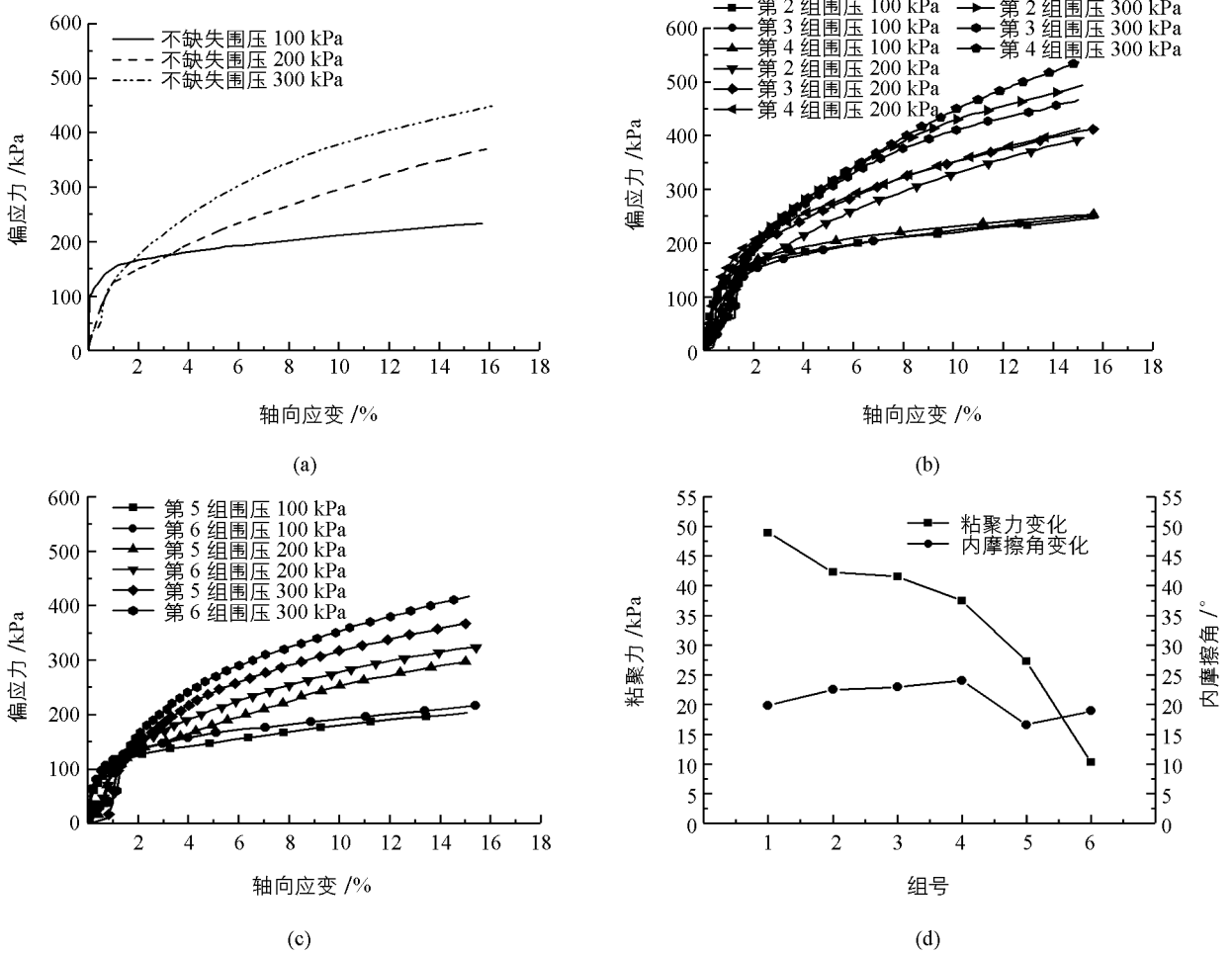


图 3 偏应力—轴向应变曲线及 c 、 φ 值变化规律曲线

由于试样的宏观变形并不是由于土颗粒的变形,而是由于孔隙的压缩和颗粒间位置的变化,所以随着应力水平增加,相同的应力增量而引起的应变并不相同,表现为非线性.试验结果表明,不同围压下各组试样都表现出相同的生长趋势,土的抗剪强度都随着围压升高而上升,但是每组试样抗剪强度随围压上升的增量并不相同.

试验结果特点如下:各个围压下,2,3,4号试样相对于1号试样,抗剪强度得到明显提高,5,6号试样的抗剪强度相对于1号试样则明显下降,其变化幅度为-20.4%至 22.5%.从图 3(d)中 c 、 φ 值变化规律曲线可以看出土颗粒间黏聚力随着缺失颗粒粒径的减小而减小,降低幅度约为 80%;内摩擦角的变化与缺失粒组无明显线性关系.

单位体积的表面积较大的细颗粒土通过毛细水提供黏聚,常吸附在粗颗粒表面的水层或与其他细颗粒土形成具有一定强度的团聚体,但是相邻的土颗粒并不直接接触,主要表现出黏聚效应而摩擦效应较小;而粗颗粒土由于体积较大,比表面积较小,其产生的黏聚力较小,然而相互咬合的粗颗粒土具有承载强度大、排水性好的特点,为整个土体提供了骨架作用.但是,缺失粗砂和中砂的试样内摩擦角普遍比缺失细砂和细粒的大,表明含量过多的粗颗粒对提升内摩擦角有不利作用.2,3号试样减少了大粒径土颗粒,其中粗砂仅占 20.6%和 10.6%,土体的骨架由较细的颗粒承担,少量的粗颗粒土被细颗粒土包围,这样操作使得原来的结构得到一定的加强.4号试样的粗砂占整个试样三分之一,细砂和细粒分别含 43.4%和

24.1%,可以看出除去了中砂以后一方面提升了粗砂的含量,也增加了小颗粒土的含量,形成了拥有较强的土骨架和密实的细粒填充结构.5号试样失去了原本占比最多的细砂部分,使得级配不均匀,同样地,6号试样缺失了粒径最小的粒组的填充.细粒和细砂的缺失使得5,6号试样土骨架中形成了很多微小空隙无法填补,最终对试样结构产生很不利的影响.将上述3种土体结构归类并依强度排序为:密实填充的高强度结构、土骨架的改进结构、不足填充的低强度结构.如图4所示.

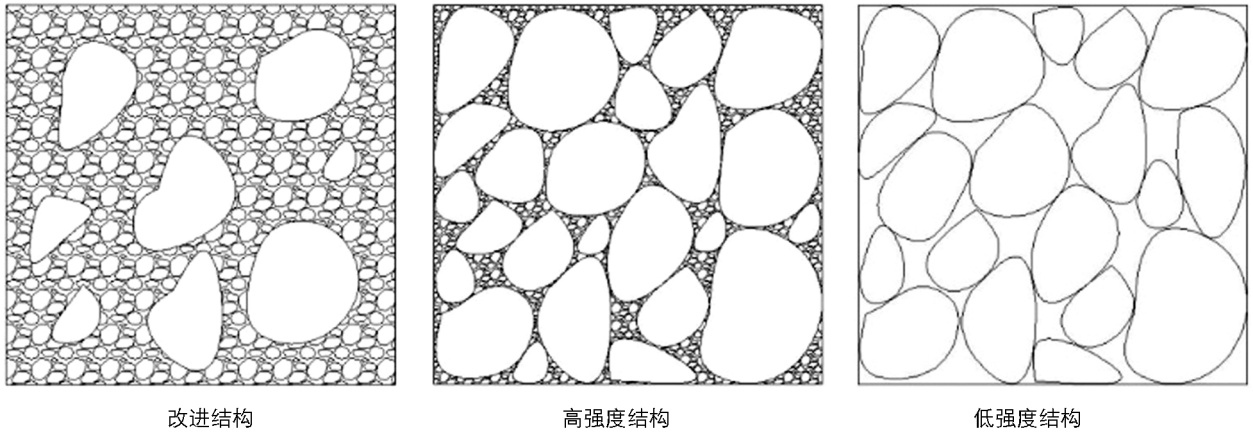


图4 土体结构示意图

2.3 不同粒组贡献率的影响

由图5可以看出,级配良好时,贡献率随着围压上升而上升,围压为300 kPa时,2号和4号表现几乎一致,当土壤中缺失0.5~0.25 mm粒组时对偏应力贡献率最大,贡献指数为1.48,而缺失1~0.5 mm的试样虽然对抗剪强度有提升但是贡献率最小,贡献指数仅有0.88;级配不良的两组试样在3种围压下贡献率均表现为负数,即不利的贡献,分别在围压200 kPa条件下对贡献率的绝对值最大,100 kPa和200 kPa围压时贡献率绝对值相对较低,不利贡献最大为-0.66.通过贡献率的数值可以看出较粗颗粒的缺失导致的贡献率

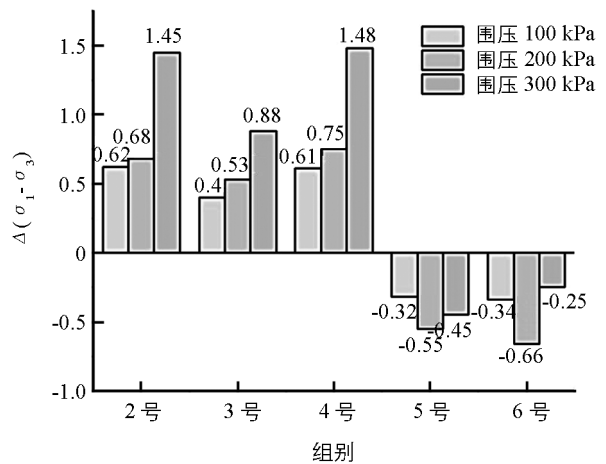


图5 各试样的贡献率

的变化随着围压的增加显著增加,表明实际工程中水土流失导致相应粒组缺失或减少后,其内摩擦角得到提升,随着围压增大,相对于原试样,其抗剪强度的增量会增加;相反,当较细颗粒土缺失后,随着试样被压缩,大颗粒土的破碎特性显现,一方面,粗颗粒土的强度被破坏,另一方面,由于缺少细颗粒土的填充,不能及时形成具有一定强度的土骨架,使得最终试样以较小的抗剪强度被破坏.其缺失会导致不利的贡献,反之,即在其他粒径不变的情况下,相应的增加细颗粒土将有助于提升试样强度.

3 结论

对因缺失不同粒组而导致级配变化的重庆紫色土进行三轴剪切试验,并对试验的结果分别从以下两个角度分析:粒径缺失对抗剪强度的影响和不同粒组对土体峰值抗剪强度的贡献率,可以得出以下结论:

- 1) 随着缺失颗粒尺寸的减小,土体的黏聚力降低,内摩擦角总体呈现先增大后减小的趋势.
- 2) 级配良好的土相对于级配不良的土,更易被压实,形成更加稳固的骨架和填充结构,所以抗剪强度随着围压的增加,提高的比例更大.

3) 贡献率不仅反映了不同粒径的缺失对整体抗剪强度的影响趋势,而且更好地反映了某单一粒组不同含量的影响。

4) 总结上述 3 种土骨架模型发现,土中内力主要由粗颗粒土承担,而细颗粒土提供填充作用。随着压缩的进行,大颗粒土被挤碎,更多的颗粒承担骨架作用,表现为偏应力增加。试验结果同时表明,对于紫色土坡体,缺失细颗粒的上坡土壤级配不良,抗剪强度较低,易发生水土流失甚至滑坡,是治理防护的关键区域。降雨初期细颗粒土容易流失,粗颗粒土含量占比上升,针对重庆浅层紫色土地区雨季,建议防护措施应重点考虑细颗粒土的流失,保持土体结构强度。

同时,论文主要是从抗剪强度指标角度分析不同粒径级土壤单粒缺失对重庆紫色土抗剪强度的影响规律,某一粒组的含量为单一变量时,该粒组的贡献率与其含量的关系不一定是线型的,其影响机理有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 董艳芳. 我国紫色土的系统分类与发生分类参比研究 [J]. 安徽农学通报, 2016, 22(22): 69-71.
- [2] 毛 新. 饱和与非饱和状态重庆紫色土渗透特性的试验研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [3] 张 丹, 陈安强, 刘刚才. 紫色泥岩崩解特性差异的试验研究 [J]. 土壤通报, 2013, 44(2): 459-464.
- [4] 唐嘉鸿, 杜 静, 钟守琴, 等. 紫色丘陵区微地形条件下耕作土壤发生特征 [J]. 土壤通报, 2018, 49(2): 260-267.
- [5] 王小刚, 董红燕, 韩光中. 紫色土基本理化性质与土壤侵蚀特征研究 [J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 66-72.
- [6] 田光龙, 李仲明. 紫色沉积岩成土类型及其性状 [J]. 山东农业大学学报, 1991, 22(2): 174-180.
- [7] 余 涵, 王成秋, 谢德体. 三峡库区紫色土柑桔园氮流失控制研究 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 30-37.
- [8] 樊晶晶, 慈 恩, 连茂山, 等. 三峡水库不同高程消落区水分变化对土壤有机碳的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2019, 41(5): 120-127.
- [9] 倪九派, 高 明, 魏朝富, 等. 干湿循环条件下重庆地区三种土壤抗剪强度的动态变化 [J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1090-1101.
- [10] 陈旺旺, 李典庆, 唐小松, 等. 抗剪强度参数概率分布的最大熵估计及边坡可靠度分析 [J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1469-1478.
- [11] 张爱国, 李 锐, 杨勤科. 中国水蚀土壤抗剪强度研究 [J]. 水土保持通报, 2001, 21(3): 5-9.
- [12] 孙红云, 孙德安. 非饱和南阳膨胀土的剪切强度及其预测 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2017, 23(1): 121-127.
- [13] 方 薇. 一种非饱和土的非线性抗剪强度包络壳模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(11): 2601-2609.
- [14] 李万双, 孙德安, 高 游. 土水特征曲线预测非饱和黏土的抗剪强度 [J]. 上海大学学报(自然科学版), 2016, 22(5): 648-655.
- [15] KOKUSHO T, HARAT, HIRAOKA R. Undrained Shear Strength of Granular Soils with Different Particle Gradations [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2004, 130(6): 621-629.
- [16] CHO G C, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength; Natural and Crushed Sands [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(5): 591-602.
- [17] 郭 鸿, 黄文华, 高 斌. 考虑颗粒级配效应的砂土剪切强度 [J]. 陕西理工学院学报(自然科学版), 2017, 33(1): 55-59.
- [18] 郭 鸿, 陈 茜. 颗粒级配对砂土剪切特性的影响及微观机理研究 [J]. 人民长江, 2017(11): 86-91.
- [19] 戴北冰, 杨 峻, 周翠英. 颗粒大小对颗粒材料力学行为影响初探 [J]. 岩土力学, 2014, 35(7): 1878-1884.
- [20] SITHARAM T G, NIMBKAR M S. Micromechanical Modelling of Granular Materials; Effect of Particle Size and Gradation [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2000, 18(2): 91-117.
- [21] 周 萍, 文安邦, 严冬春, 等. 紫色土坡耕地不同坡位不同高度地壤土壤颗粒组成及分形特征 [J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 84-88.

- [22] RAHARDJO H, SATYANAGA A, D'AMORE G A R, et al. Soil-Water Characteristic Curves of Gap-Graded Soils [J]. *Engineering Geology*, 2012, 125: 102-107.
- [23] SATYANAGA A, RAHARDJO H, ZHAI Q. Estimation of Unimodal Water Characteristic Curve for Gap-Graded Soil [J]. *Soils and Foundations*, 2017, 57(5): 789-801.

Effect of Grain Size Fraction Absence on Shear Strength of Purple Soil

XU Chong¹, XUE Le¹, LI Xian¹, WANG Shi-ji^{1,2}

1. *School of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;*

2. *School of Civil and Architectural Engineering, Yangtze Normal University, Fuling Chongqing 408100, China*

Abstract: In order to provide reference for foundation reinforcement projects in purple-soil areas with serious soil erosion, a triaxial consolidated drained shear test was conducted to explore the mechanical properties of purple soil under the conditions of grain size fraction absence caused by soil erosion in the Three Gorges Reservoir Area. The gray-brown purple soil was weathered from the purple sandstone of the typical Jurassic Shaximiao Formation in Chongqing. According to the triaxial test data, the shear strength index and contribution rate of the peak of shear strength were analyzed. The results showed that according to the shear strength index, after consolidation, the soil without larger particles still maintained greater strength than that without fine-grained soil and fine sand. The relationship between soil structure and shear strength under the effect of confining pressure was analyzed. From the perspective of the contribution rate of peak shear strength, the samples lacking larger particles were strengthened and, in contrast, the strength of the samples lacking finer particles was weakened. Moreover, the contribution rate eliminated the influence of larger content difference of different particle sizes.

Key words: grain size fraction absence; purple soil; triaxial drained shear test; shear strength index; contribution rate of peak shear strength

责任编辑 汤振金