

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.10.016

肖雪, 汪时机, 杨寻, 等. 三峡库区砂质黏性紫色土强度劣化规律试验研究[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2023, 45(10): 149-159.

三峡库区砂质黏性紫色土强度劣化规律试验研究

肖雪¹, 汪时机^{1,2}, 杨寻¹, 李贤¹, 黎桢君¹, 夏浩城¹

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715;

2. 重庆市建筑物全生命周期健康检测与灾害防治工程研究中心, 重庆 408100

摘要: 为揭示三峡库区周期性干湿交替作用对紫色土强度的影响机制, 研究干湿循环次数、细颗粒($d < 0.075$ mm)含量以及质量含水率三因素对紫色土三轴抗剪强度特性的影响, 通过试验数据回归分析, 提出干湿循环作用下砂质黏性紫色土黏聚力劣化程度的定量表达式. 试验结果表明: ① 干湿循环作用对黏聚力的影响远大于摩擦角, 其中, 第 7 次循环黏聚力下降 24.87%, 内摩擦角下降幅度为 11.17%. 在干湿循环达 5 次以后, 强度参数基本保持不变, 土体结构也基本趋于稳定. ② 随着质量含水率从 18% 降低至 6%, 试样黏聚力增加 38.81%, 内摩擦角增加 32.85%, 证明质量含水率对试样抗剪强度参数有重要影响. 细颗粒含量对强度参数的影响较小, 随着细颗粒含量的增加, 黏聚力也逐渐增加, 对摩擦角影响无明显变化规律, 但总体呈下降趋势. ③ 根据二次多元回归拟合及方差分析, 三因素对抗剪强度以及参数均有影响作用, 根据 p 值大小进行显著性分析, 含水率的强度参数的影响高于另外两因素的影响, 且三因素对试样黏聚力的影响高于摩擦角; 该研究结果对揭示土体抗剪强度的劣化机制有重要参考意义.

关键词: 强度指标; 干湿循环; 细颗粒含量; 质量含水率;

三轴剪切试验; 强度劣化

中图分类号: TU442

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 1673-9868(2023)10-0149-11

Experimental Study on Strength Deterioration of Sandy-Clayey Purple Soil in Three Gorges Reservoir Area

XIAO Xue¹, WANG Shiji^{1,2}, YANG Xun¹,

LI Xian¹, LI Anjun¹, XIA Haocheng¹

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

2. Chongqing Engineering Research Center for Whole Life Cycle Health Inspection and Disaster Prevention of Buildings, Chongqing 408100, China

Abstract: To reveal the mechanism of the influence of periodic wet and dry cycles on the strength of purple

收稿日期: 2022-10-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(11972311); 西南大学创新研究 2035 先导计划项目(SWU-XDPY22003).

作者简介: 肖雪, 硕士研究生, 主要从事土体水力-力学方面的研究.

通信作者: 汪时机, 博士, 教授, 博士研究生导师.

soil in the Three Gorges reservoir area, the effects of three factors, namely the number of wet and dry cycles, the content of fine particles ($d < 0.075$ mm) and the water content in the soil, on the triaxial shear strength characteristics of purple soil were investigated, and the quantitative expressions for the degradation of the cohesion of sandy clayey purple soil under the action of wet and dry cycles were proposed by regression analysis of experimental data. The experimental results show that: (1) The effects of dry and wet cycles on the cohesion was much greater than that of the friction angle, in which the cohesion decreased by 24.87% in the 7th cycle and the internal friction angle decreased by 11.17%. After the wet and dry cycles reached 5 times, the strength parameters basically remained unchanged and the soil structure was basically stabilized. (2) As the water content decreased from 18% to 6%, the cohesion increased by 38.81% and the internal friction angle increased by 32.85%, which proved that the water content in the soil had an important effect on the shear strength parameters. However, the effect of fine particle content on the strength parameters was small, and the cohesion gradually increased with the increase of fine particle content. There was no obvious regularly change on the effect of friction angle. (3) According to the quadratic multiple regression fitting and ANOVA, the three factors have effects on the shear strength as well as the parameters. The significance analysis according to the size of p -value shows that the response value of the three factors on the strength parameters is quadratic, and the effect of the strength parameters of the water content is higher than the effect of the other two factors, which has certain guiding significance for the actual project. The results of this study are an important reference for revealing the deterioration mechanism of the shear strength of the soil.

Key words: strength index; wet and dry cycles; fine particle content; moisture content; triaxial shear test; strength deterioration

紫色土主要分布于我国长江流域及西南片区,紫色土中富含蒙脱石、高岭石等黏粒矿物成分,具有一定的膨胀性,因此易在周期性干湿循环交替的环境中产生裂隙^[1].同时三峡库区地处亚热带季风气候区,在周期性库水位涨落、西南片区季节性降雨的环境影响下,土体内部质量含水率(下文中含水率均指质量含水率)呈现饱和-非饱和-饱和的交替变化状态,导致土表颗粒级配改变,易引起三峡库区土体的水土流失和山体滑坡等自然灾害,从而对农田水利、边坡等设施造成严重危害^[2].因此,模拟周期性干湿循环条件,研究土体抗剪强度衰减规律并探讨其对力学性能的影响,对防止自然灾害的发生以及揭示紫色土的结构特性具有重要的理论和现实意义.

国内外学者对此进行了大量研究,张芳枝等^[3]研究发现经反复干湿循环后,非饱和土产生相同应变时的应力有所减小,土样破坏时的强度有所降低;Chen等^[4]人研究发现与随后的干湿循环相比,第一个干湿周期的体积收缩更为显著;李妍等^[5]研究表明,紫色土在经历干湿循环后,土体内部结构发生破坏,且前3次干湿循环衰减强度最大,3次循环后下降速率减慢.吴杨等^[6]人开展了不同细颗粒含量甲烷水合物沉积物三轴剪切试验研究,结果表明随细颗粒含量的增加,土的抗剪强度以及膨胀性都呈上升趋势;Kampala等^[7]研究发现干湿循环可导致多种人工改良土的无侧限抗压强度和抗剪强度衰减;汤华等^[8]研究表明低含水率时试样整体结构密实,随含水率的升高,试样抗剪强度出现不同程度的劣化效应,内摩擦角呈线性趋势衰减,黏聚力呈波动趋势;李贤^[9]研究发现干湿循环次数和土壤细颗粒等变量与土体黏聚力 c 和内摩擦角 φ 存在一定的线性关系,且土壤细颗粒含量与干湿循环次数对黏聚力的影响远远大于对摩擦角的影响.

自然环境下,干湿交替常导致砂质黏性紫色土细颗粒流失及裂隙萌生、发育等.基于此本文将在干湿循环次数、细颗粒含量以及质量含水率三因素下,探讨非饱和土三轴剪切强度峰值及其参数等土力学性质,并分析抗剪强度指标在干湿循环次数变化等条件下的劣化趋势,对揭示三峡库区紫色土抗剪强度的劣化机制有重要参考意义.

1 材料与方法

1.1 土样与试样制备

本次试验用土取自重庆市北碚区缙云山水土保持基地, 取土深度距地表 40 cm, 按照《土工试验方法标准》进行室内试验. 土样物理性质见表 1, 测定其天然湿密度为 1.68 g/cm^3 , 经计算天然干密度为 1.4 g/cm^3 , 相对密度 2.69, 孔隙率 48%, 塑性指数为 14.8, 结合土壤分类标准(塑性指数 >10 , 粒径大于 0.075 mm 的颗粒含量 $>50\%$), 本次试验用土定义为砂质黏性土. 试验用土颗粒级配如图 1 所示, 经计算不均匀系数 $C_u>5$, 曲率系数为 1.6, 级配良好.

表 1 紫色土的主要物理特性指标

土粒 相对密度	液限	塑限	颗粒组成/%				
			1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	0.075~0.25 mm	$<0.075\text{ mm}$
2.69	34.32	19.51	25.00	28.31	9.96	16.86	19.87

制样物性指标为: 含水率 18%、干密度 1.5 g/cm^3 . 本次试验按照《土工试验方法标准》进行操作, 制样过程如下: 紫色土碾碎过 2 mm 筛, 然后置于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱烘干至恒重, 配制成相应细颗粒含量的土体后进行配水; 将制备好的质量含水率为 18% 的土体放置 24 h 后, 在制样器内分 5 层击实, 层高为 16 mm, 每层压实后接触面刨毛, 避免试样分层, 每层完成后, 倒入下一层土壤进行压实; 制成高 80 mm, 直径 39.1 mm 的土柱, 存放于保湿缸 24 h 后用于试验. 本次试验使用仪器为南京 TSZ10-1.0 型应变控制饱和三轴仪, 电机自动升降可控制自动剪切速率以及围压. 仪器精度(轴力 0.01 kN, 轴向位移 0.01 mm, 进排水和体变 0.001 mL).

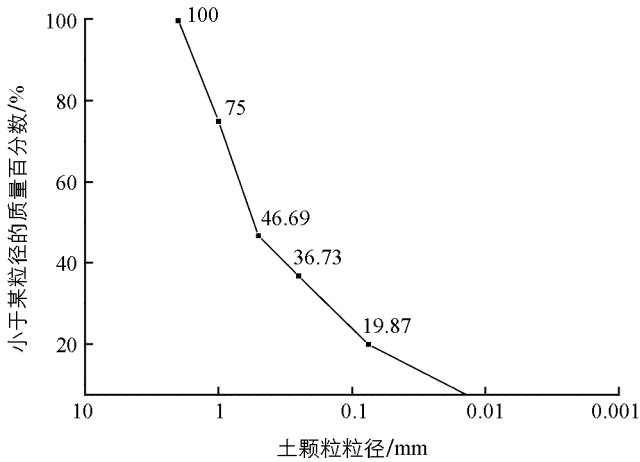


图 1 紫色土颗粒级配曲线

1.2 试验方案

本次试验旨在模拟土体排水条件较差时的受力状态, 因此, 将制备好的试样进行不固结不排水试验, 试验设置干湿循环次数、细颗粒含量以及质量含水率 3 个因素为变量, 共 36 组试验. 试验中围压分别设置为 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa, 剪切速率为 0.8 mm/min, 当轴向应变大于 20% 时停止剪切, 应力-应变曲线有峰值时取峰值偏应力作为三轴剪切强度, 无峰值时取轴向应变 15% 所对应的偏应力作为三轴剪切强度^[15].

1.2.1 细颗粒含量、最终含水率试验

由土壤筛分法得直径为 0.075 mm 的紫色土细颗粒含量为 20% 左右. 根据黄丽等^[16]的研究, 由于西南地区常年雨水充沛, 导致土壤退化、表土颗粒流失, 降雨后, 表层土中小于 0.02 mm 的黏粒比降雨前下降 160%, 因此设置细颗粒含量分别为 10%, 20% (原级配), 30% 来模拟降雨前后细颗粒含量的变化(分别为 F_1, F_2, F_3).

本次实验中, 将细颗粒(直径 $<0.075\text{ mm}$)筛分后, 按照 10%, 30% 的细颗粒含量配比, 原级配则不用筛分, 将干土混合均匀, 以备试验; 将制备好的土样进行相应次数的干湿循环, 此时试样已完成烘干. 吸湿阶段采用小型喷雾器, 每隔半小时对试样喷洒 3 mL 蒸馏水, 相应质量含水率达到 6%, 12%, 18% (分别为 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$) 时停止, 将土样覆盖保鲜膜静置 24 h 备用.

1.2.2 干湿循环次数试验

将制备好的土样分别进行 0, 3, 5, 7 次干湿循环, 分别记为 N_0, N_3, N_5, N_7 , 采用先湿后干的循环方

式. 吸湿: 将制备好的土样用饱和三瓣膜封装, 放入饱和缸内抽真空饱和 24 h; 脱湿: 取出后放入温度为 60 ℃ 的烘箱, 半小时检测一次含水率, 含水率达 5% 时停止烘干, 至此一个为干湿循环. 根据涂义亮等^[17] 的研究, 干湿循环幅度介于饱和含水率及烘干至恒重范围内; 本次试验循环幅度为饱和状态- 5% 含水率- 饱和状态. 具体试验设计方案见表 2.

表 2 试验方案设计

水平	干湿循环次数/ <i>N</i>	细颗粒含量/ <i>F</i>	最终含水率/ ω
1	0	—	—
2	3	10%	6%
3	5	20% (NG)	12%
4	7	30%	18%

1.3 干湿循环作用下的强度劣化指标

1.3.1 结构性定量参数

根据谢定义等^[10-11] 对综合结构势理论的定义, 结构土既具有结构可稳性也具有结构可变性. 为使土体结构性参数能与荷载的作用相互联系, 以反映土体受荷载过程中原始结构的破坏, 次生结构逐渐形成的耦合和动态变化规律, 谢定义建议以原状土、饱和原状土和扰动重塑土的试验来定义和测定综合结构势参数, 具体表达式如下:

$$m_p = \frac{S_s/S_0}{S_0/S_r}$$

(1)

式中, S_0 为某一压力下原状土的压缩应变, S_s 为饱和原状土的压缩应变, S_r 为重塑土的压缩应变. 本次试验将未经干湿循环的土体作为式(1) 中的原状土, 经过干湿循环作用的土体为扰动重塑土. 即以同一理论方法提出干湿循环作用对紫色土三轴剪切结构性定量参数 m_{en} 的影响, 其中

$$m_{en} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_n}{(\sigma_1 - \sigma_3)_0} \cdot \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_s}{(\sigma_1 - \sigma_3)_0}$$

(2)

式中, $(\sigma_1 - \sigma_3)_0$ 为初始结构偏应力, $(\sigma_1 - \sigma_3)_s$ 为饱和状态下的偏应力, $(\sigma_1 - \sigma_3)_n$ 为第 n 次干湿循环作用下的偏应力, 其中 $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_n}{(\sigma_1 - \sigma_3)_0}$ 可反映土体的结构可稳性, 即干湿循环次数对未经干湿循环作用的土体结构稳定性的影响; $\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_0}{(\sigma_1 - \sigma_3)_s}$ 反应土体的结构可变性, 即未经干湿循环的土体在较饱和状态下的应力比, 可反映土体内部结构性的变化. 干湿循环作用对结构损伤越大, m_{en} 值就越小; 当干湿循环次数为 0 时, 土体结构未发生变化, 根据式(2), 即初始状态下 $m_{e0} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_s}{(\sigma_1 - \sigma_3)_0}$.

1.3.2 劣化度

为定量分析偏应力随干湿循环次数的劣化规律, 本文采用劣化度来反映干湿循环次数对土体抗剪强度的损伤程度, 其中包括总劣化度、阶段劣化度、阶段内单次循环劣化度^[12-13]; 本文采用式(3) 中的总劣化度作为强度劣化指标.

$$D_i = \frac{C_0 - C_i}{C_0} \times 100\%$$

(3)

式中, D_i 为抗剪强度的总劣化度, C_0 为初始状态偏应力大小, C_i 为经干湿循环后的偏应力大小. 根据胡长明等^[14] 的研究, 通过(4) 式所示的双曲线函数进行不同含水率, 不同细颗粒含量下的黏聚力的拟合.

$$D_0 = A - \frac{A}{1 + \frac{N}{B}}$$

(4)

式中, D_0 为黏聚力劣化度, A 为最终劣化度, B 为控制劣化度发展速率的参数, B 值越小说明强度指标劣化的发展速率越快. 式(4)中 B 值通过试验数据拟合得出, A 值通过试验直接得出, 即 A 值是基于不同含水率、细颗粒含量下, 干湿循环对土样抗剪强度参数的影响, 直接计算得出.

2 结果与分析

2.1 三因素对紫色土抗剪强度的影响规律

2.1.1 含水率的影响规律

根据室内试验结果, 不同含水率下试样的应力-应变曲线如图 2 所示, 抗剪强度及强度参数如表 3 所示.

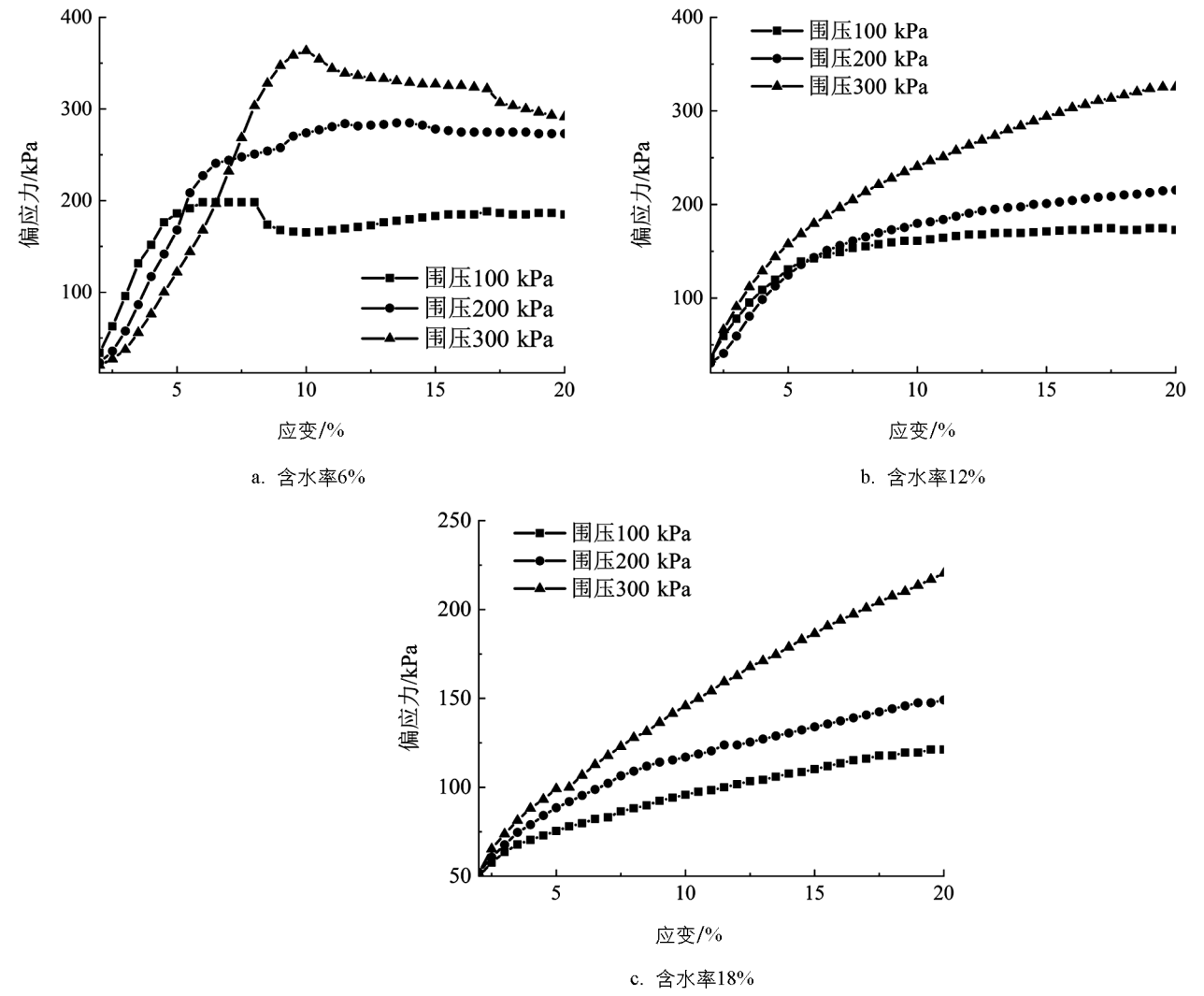


图 2 不同含水率下试样应力-应变曲线(F_2N_0)

表 3 不同含水率下试样的抗剪强度参数

含水率	6%	12%	18%
c/kPa	43.17	32.91	26.42
$\varphi/^\circ$	17.00	15.81	11.41
R^2	0.999	0.955	0.954

如图 2 和表 3 所示, 含水率越小, 抗剪强度峰值越大; 相应地, 抗剪强度参数也越大; 土中含水率 $\omega=6\%$ 时, 应力-应变曲线呈软化型, 有明显的应力峰值出现, 剪切完成后, 土体发生脆性破坏, 剪切破坏面大致呈 $45^\circ+\varphi/2$ 角, 即剪切破坏面与大主应力面所成夹角为 $45^\circ+\varphi/2$. 当 $\omega=12\%$ 及 $\omega=18\%$ 时, 应力-应变曲线呈应变硬化型, $\omega=18\%$ 时的硬化程度高于 $\omega=12\%$, 因此随土中含水率逐渐增加, 应力-应变曲线逐渐硬化. 含水率对强度参数有重要影响, 含水率从 6% 增加到 18% 时, 试样黏聚力下降 38.81% , 内摩擦角下降 32.85% . 分析其影响机制为: 土体含水率越高, 就会有越多的水分子填充土颗粒间的孔隙部分, 水分子的存在有利于土体颗粒间滑移, 减小土颗粒间的摩擦力, 起到润滑作用.

2.1.2 细颗粒含量的影响规律

不同细颗粒含量下试样的应力-应变曲线如图 3 所示(原级配试样的应力-应变曲线见图 2b), 抗剪强度参数如表 4 所示.

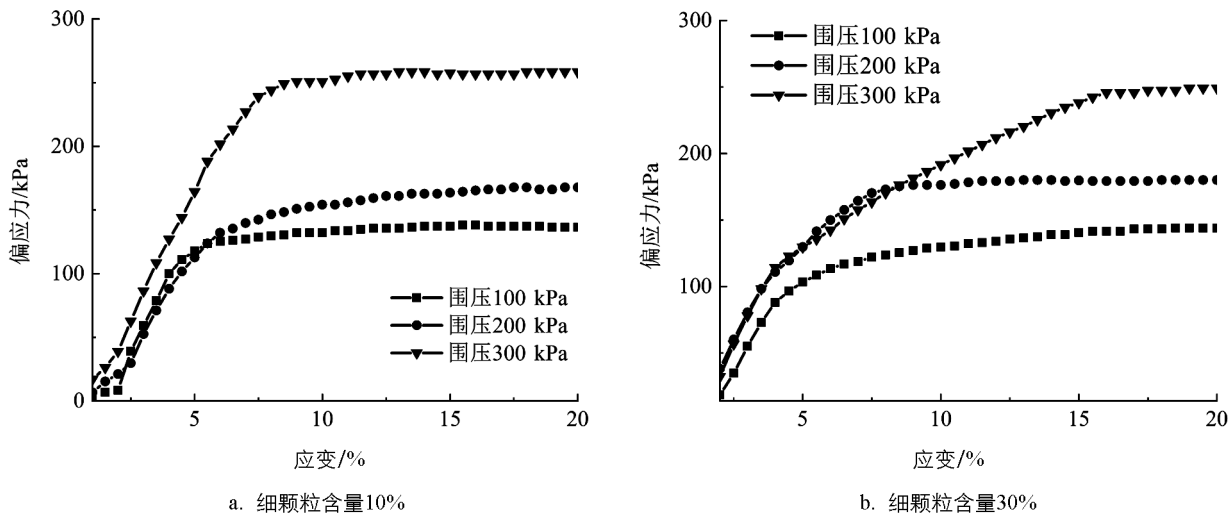


图 3 偏应力-应变曲线($\omega_2 N_0$)

表 4 不同细颗粒含量试样的抗剪强度参数

细颗粒含量	10%	20%(NG)	30%
c/kPa	26.17	32.91	34.97
$\varphi/^\circ$	13.39	15.81	12.01
R^2	0.944	0.955	0.976

如图 3 和表 4 所示, 不同级配对偏应力及强度参数有重要影响, 原级配土体试样偏应力高于另外两组, 考虑是由于土体颗粒级配良好(经计算原级配土不均匀系数 $C_u=16.973>5$, 曲率系数 $C_c=1.979>1.6$, 均高于另外两组), 颗粒间填充密实, 能形成更加稳固的骨架和填充结构. 表 4 中, 随细颗粒含量增加, 土样黏聚力增加 25.15% , 对摩擦角的影响无明显线性规律, 而黏聚力变化的幅度明显大于内摩擦角的变化, 这与许冲等^[18]所得的结论相同. 部分细颗粒土通过毛水提供黏聚力, 常吸附在粗颗粒表面的水层或其他细颗粒形成具有一定强度的团聚体, 但相邻的土颗粒并未直接接触, 因此表现出黏聚力效应大, 摩擦角效应小.

2.1.3 干湿循环次数的影响规律

不同循环次数下, 偏应力与应变的关系如图 4 所示, 抗剪强度及其参数如表 5 所示, 干湿循环次数对摩擦角的影响如图 5 所示.

干湿循环作用对偏应力及强度参数的影响如图 4 和表 5 所示, 可以发现, 应力-应变曲线整体趋势大致相同, 证明试验具有可重复性; 同时, 随干湿循环次数增加, 试样的破坏偏应力呈减小趋势, 第 3 次循环后, 偏应力减小的幅度最大; 在干湿循环作用下, 试样黏聚力下降幅度分别为 12.2%, 10.4%, 4.5%, 可得随干湿循环作用黏聚力下降幅度逐渐减缓, 5 次循环后, 强度基本处于稳定状态. 干湿循环对摩擦角的作用关系图如图 5 所示, 可以看出摩擦角变化较小, 相比未经干湿循环的试样, 摩擦角下降大约 10%, 这与张芳枝等^[3]的研究结果一致, 同时, 摩擦角远没有黏聚力对强度参数的作用大.

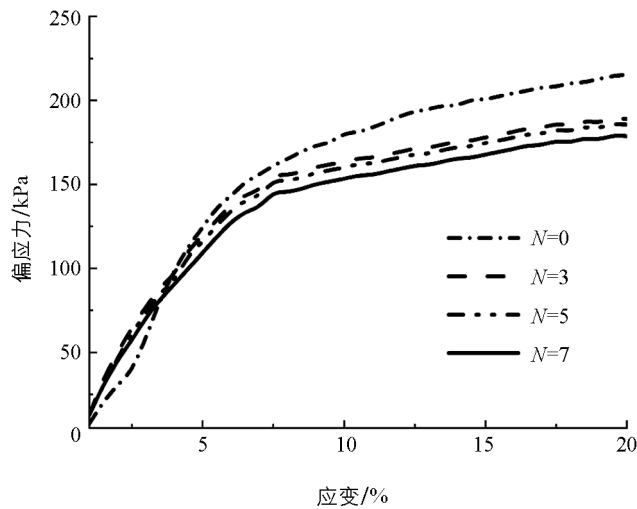


图 4 偏应力与应变的关系 ($F_2\omega_2, \sigma=200\text{ kPa}$)

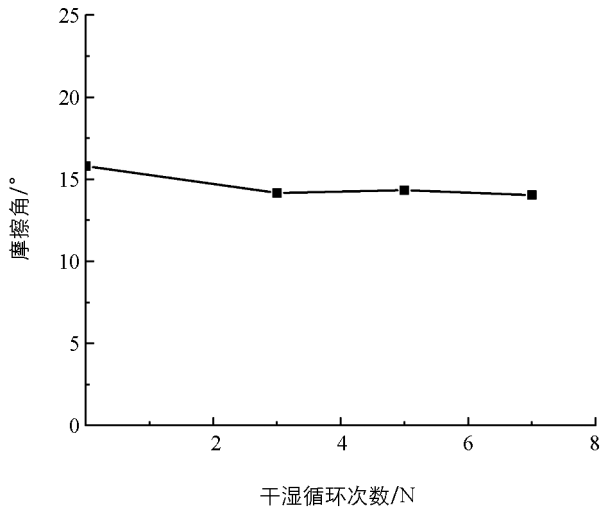


图 5 干湿循环次数-摩擦角关系图

表 5 不同循环次数试样的抗剪强度参数

循环次数	0	3	5	7
c/kPa	32.91	28.89	25.88	24.72
$\varphi/^\circ$	15.81	14.17	14.34	14.04
R^2	0.955	0.972	0.961	0.958

2.2 干湿循环次数对紫色土强度劣化的影响

2.2.1 结构性定量参数

据式(2)可知, $m_{\varepsilon n}$ 值越小, 干湿循环对结构损伤程度越大. 三轴剪切结构性参数 $m_{\varepsilon n}$ 与轴向应变 ε 之间的关系曲线如图 6 所示.

由图 6 可知, 在轴向应变未超过 2% 时, 三轴剪切结构性参数 $m_{\varepsilon n}$ 急剧下降, 考虑是由于试样帽与加载杆之间接触不紧密, 前期结构不稳定所致. 由图 6 缩略图可知, 轴向应变大于 2% 时, $m_{\varepsilon n}$ 逐渐减小, 前期减小速度较快, 对结构损伤程度越来越大; 当轴向应变到达 6% 时, 结构性参数下降速度趋于缓慢, 轴向应变到 15% 时, 结构性参数趋于稳定, 后期紫色土的结构性损伤基本保持不变. 说明前期土体损伤较大, 后期逐渐形成对偏应力敏感性较低的结构特性, 结构性参数趋于平缓. 随干湿循环次数的增加, 对土体结构的破坏作用更加明显, 这

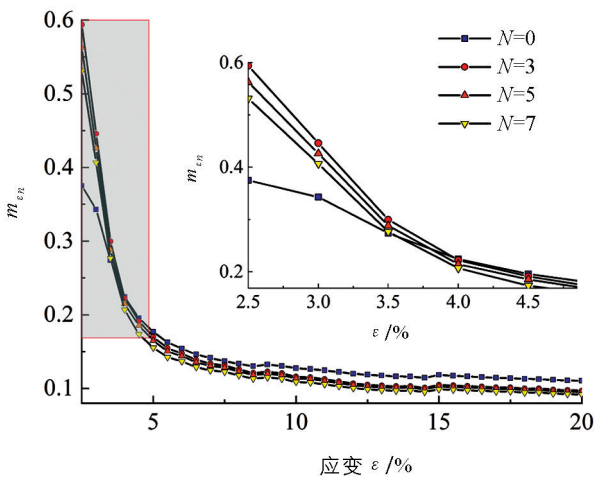


图 6 含水率 12% $m_{\varepsilon n}-\varepsilon$ 关系曲线图

说明前期土体损伤较大, 后期逐渐形成对偏应力敏感性较低的结构特性, 结构性参数趋于平缓. 随干湿循环次数的增加, 对土体结构的破坏作用更加明显, 这

与 Hu 等^[13]的研究结果一致. 同时, $N=3$ 时对土体结构产生的损伤最大, 3 次循环以后对土体结构损伤程度下降. 第 5 次干湿循环与第 3 次干湿循环的结构性参数接近, 表明干湿循环对紫色土初始结构有损伤作用, 前 3 次干湿循环对试样结构影响最大, 干湿循环次数越多, 结构损伤程度也就越大.

2.2.2 劣化度

根据式(3)强度劣化表达式可知, 干湿循环对试样强度劣化作用如图 7 所示. 由图 7 可以看出, 干湿循环对试样强度的劣化趋势大致相同, 前 3 次的劣化作用明显; 含水率越高, 劣化速度越快, 劣化度也越高, 劣化速度及劣化度大小依次为 $18\% > 12\% > 6\%$. 同时相较于原级配及细颗粒含量为 10% 的试验组, 细颗粒含量为 30% 的试验组劣化速度更快. 劣化速度及劣化度大小依次为 $30\% > 10\% > 20\%$ (原级配), 土样中细颗粒含量越大, 形成初期土骨架越不稳定. 根据式(4)定量分析干湿循环对黏聚力的劣化作用, 干湿循环次数对黏聚力的拟合参数如表 6 所示.

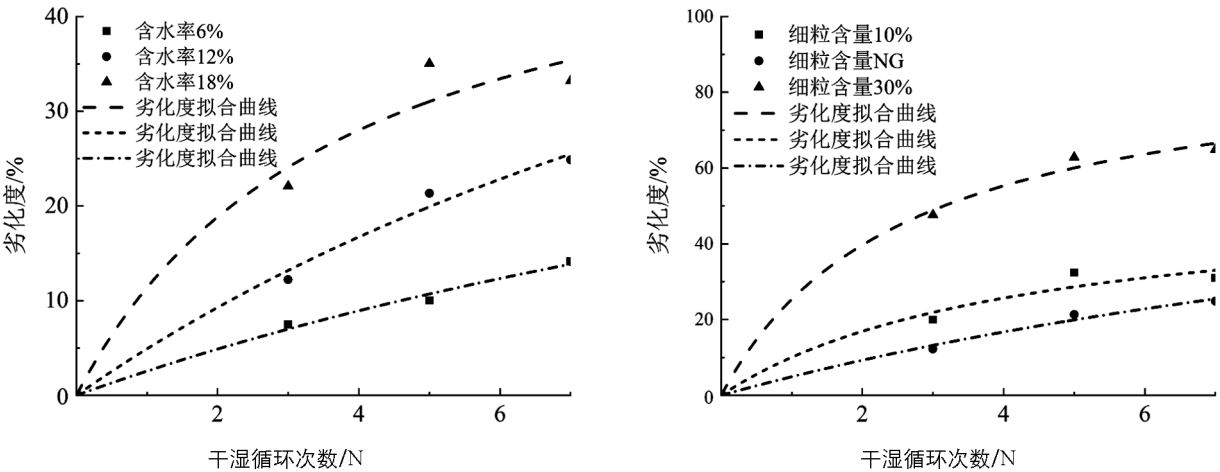


图 7 干湿循环对强度的劣化作用

表 6 不同细颗粒含量、含水率下黏聚力劣化度的拟合参数

参数	细颗粒含量			含水率		
	10%	20%(NG)	30%	6%	12%	18%
A	31.014	24.867	64.92	14.137	24.867	33.231
B	4.312	16.199	2.599	19.359	16.199	3.803
R ²	0.951	0.986	0.993	0.989	0.986	0.952

由表 6 可知, 拟合的相关指数 R^2 均大于 0.95, 具有良好的拟合度. 且黏聚力的最终劣化度以及劣化速率(即拟合参数 A 和 B)能够反映不同含水率及细颗粒含量的劣化规律. 原级配颗粒的劣化速度较慢, 而另外两组细颗粒含量的劣化速度更快. 同时, 含水率为 18% 的土样劣化速度最快. 由于土中自由水过多, 土体结构易受干湿循环作用影响. 随含水率的增加, 劣化速度越快. 但含水率对劣化的影响小于细颗粒含量对劣化度的影响, 也就是说在考虑对土体劣化程度的影响时, 应当优先考虑颗粒级配的影响.

2.4 三因素对强度参数的耦合效应

为研究干湿循环作用、细颗粒含量以及含水率对土体抗剪强度指标的耦合影响作用, 用 Design-Expert 软件, 通过二次多元回归拟合及方差分析可得二次多项式回归方程为:

$$c = 35.09 - 3.19 * N - 3.93 * \omega + 2.81 * F + 0.03 * N\omega - 0.03\omega F * +$$
$$0.18 * N^2 + 0.13 * \omega^2 - 0.05 * F^2$$

(5)

$$\varphi = 18.78 - 0.27 * N - 0.28 * \omega + 0.39 * F - 0.02 * N * \omega - 0.02 * N^2 -$$
$$0.02 * \omega^2 - 0.01 * F^2$$

(6)

式中, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角, N 为干湿循环次数, ω 为含水率, F 为细颗粒含量. 黏聚力方差分析结果见表 7, 摩擦角方差分析结果见表 8.

表 7 黏聚力拟合方差分析结果

因素	自由度	平方和	均方根	F 值	p 值	显著性
Model	9	3 061.903 0	340.211 4	24.077 4	$\leq 0.000\ 01$	高度显著
N	1	712.03	712.03	50.392	$\leq 0.000\ 01$	高度显著
ω	1	1 649.452	1 649.452	116.735	$\leq 0.000\ 01$	高度显著
F	1	192.94	192.94	13.655	0.001	显著

注: $p \leq 0.000\ 1$ 为高度显著; $p \leq 0.05$ 为显著; $p > 0.05$ 为不显著.

表 8 摩擦角拟合方差分析结果

因素	自由度	平方和	均方根	F 值	p 值	显著性
Model	9	611.382	67.931	33.373	$\leq 0.000\ 01$	高度显著
N	1	6.824	6.824	3.352	0.078 6	
ω	1	527.2	527.2	259.004	$\leq 0.000\ 01$	高度显著
F	1	40.614	40.614	19.953	0.000 137	显著

注: $p \leq 0.0001$ 为高度显著; $p \leq 0.05$ 为显著; $p > 0.05$ 为不显著.

如表 7 和表 8 所示, 含水率 ω 以及细颗粒含量 F 均为显著性. 根据 p 值大小, 在三因素水平内, 对土体黏聚力劣化程度的影响依次为含水率>干湿循环次数>细颗粒含量; 三因素对内摩擦角的劣化影响分别为含水率>细颗粒含量>干湿循环次数. 表 7 和表 8 对比可得, 三因素对黏聚力的影响大于对摩擦角的影响, 实际工程中若需提高紫色土抗剪强度以及降低对土体内部结构的影响, 改善黏聚力应作为改良紫色土的重点. 根据公式(5)和公式(6), 分别将 $N=3$, $\omega=12\%$, $F=20\%$ 带入, 可得 3 组表达式, 根据表达式画出曲面并于实验数据点作比较, 最终拟合精度较好. $N=3$ 时公式(5) 和公式(6)二次拟合曲面如图 8 所示.

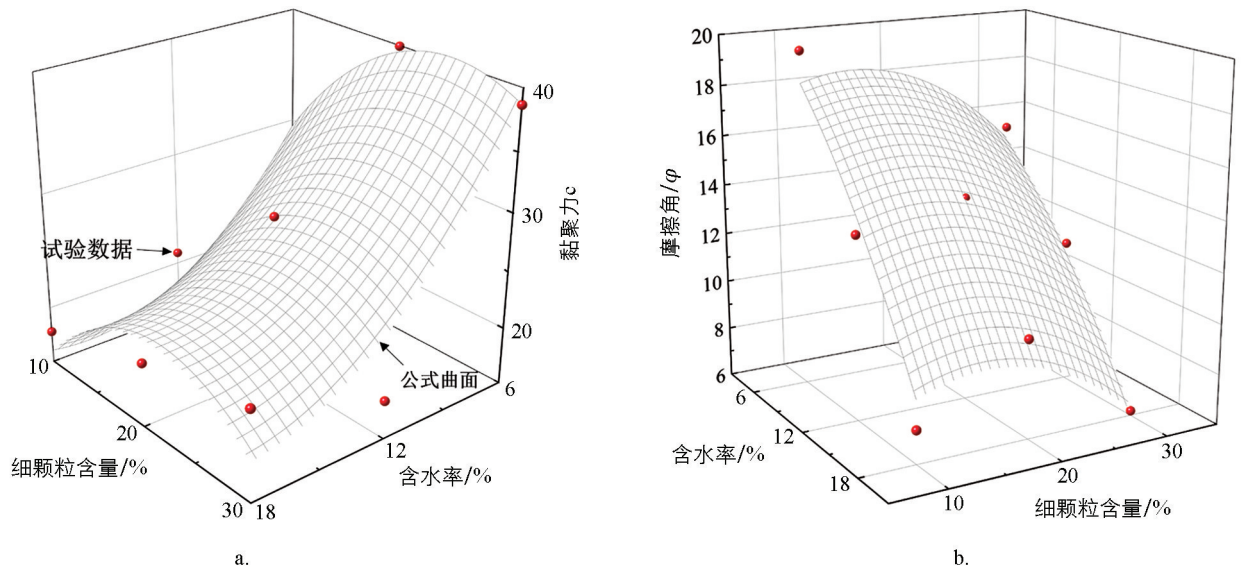


图 8 黏聚力(左)及内摩擦角(右)公式曲面和试验数据($N=3$)

经计算黏聚力二次拟合式 $R^2=0.931$, 内摩擦角二次拟合式 $R^2=0.972$, 拟合精度较高, 说明公式(5) 和公式(6)具有较高可靠性, 能准确地描述实验数据, 可信度较高; 同时图 8 中可以看出, 含水率对黏

聚力的影响远大于细颗粒含量的影响,公式(5)中含水率 ω 项的系数显然大于 F 的系数;根据图8中对内摩擦角影响,含水率的影响大于细颗粒含量.从公式(5)也可以得出三因素对黏聚力影响的大小分别是含水率>干湿循环次数>细颗粒含量.根据拟合曲线图,对摩擦角的影响因素排序大小分别是含水率>细颗粒含量>干湿循环次数,公式(5)和公式(6)拟合式可为紫色土在自然状态下的强度变化提供参考.

因此,通过三因素耦合效应分析可以得出相较于其他两种因素的影响,含水率的影响程度最大,实际情况中,应当先从土中含水率开始,及时排水,降低土中含水率来提高三峡库区堤坝稳定性;土体黏聚力的下降是造成土体强度下降、内部结构损伤的重要因素,这与杨和平等^[19]的研究结果相符.若需增加土体抗剪强度、改良紫色土土体,增加土颗粒间黏聚力是重点.

3 结论

本文针对重庆地区紫色土在干湿循环作用下的强度劣化规律,综合考虑干湿循环次数、含水率以及细颗粒含量的影响,通过三轴剪切试验,分析紫色土本身物理结构性质,拟合分析得出紫色土黏聚力的劣化规律;并通过 Design-Expert 进行二次多元回归拟合及方差分析,得出3种影响因素的作用大小,得到如下结论:

(1) 当含水率 $\omega=6\%$ 时,应力-应变曲线呈软化型,剪切破坏面大致呈 $45^\circ+\varphi/2$,含水率越低偏应力及强度参数越高;当 $\omega=12\%$ 及 $\omega=18\%$ 时,应力-应变曲线呈应变硬化型,发生剪胀现象,含水率越高,硬化程度越大.

(2) 随细颗粒含量的增加,相较于级配不良的土体,级配良好的土体具有较大的偏应力及强度参数,即级配良好的土体劣化度较低.

(3) 干湿循环作用使土体抗剪强度下降,黏聚力降低,同时,干湿循环作用对摩擦角的影响不明显,但总体呈减小趋势,根据结构性定量参数 m_{en} ,前3次循环对土的结构影响最大,到5次及以后,结构性损伤趋于稳定.

(4) 根据二次多项式回归方程及方差分析 p 值得出拟合表达式能较好的反映试验点;含水率对抗剪强度参数的影响最大,应该优先考虑干湿循环作用以及含水率的影响;三因素对黏聚力的影响大于对内摩擦角的影响,因此,若需提高紫色土抗剪强度以及降低对土体内部结构的影响,改善黏聚力应作为改良紫色土的重点,以上结论可以为现实工程提供理论依据.

参考文献:

- [1] 赵景波,贺秀斌,邵天杰.重庆地区紫色土和紫色泥岩的物质组成与微结构研究[J].土壤学报,2012,49(2):212-219.
- [2] 鲜青松,唐翔宇.薄层紫色土坡耕地胶体颗粒随地表径流及裂隙潜流迁移规律[J].农业工程学报,2017,33(13):143-150.
- [3] 张芳枝,陈晓平.反复干湿循环对非饱和土的力学特性影响研究[J].岩土工程学报,2010,32(1):41-46.
- [4] CHEN R, XU T, LEI W D, et al. Impact of Multiple Drying-Wetting Cycles on Shear Behaviour of an Unsaturated Compacted Clay[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(19): 683.
- [5] 李妍,彭义.干湿循环条件下紫色土抗剪强度与膨胀率研究[J].西南师范大学学报(自然科学版),2015,40(4):70-73.
- [6] 吴杨,崔杰,廖静容,等.不同细颗粒含量甲烷水合物沉积物三轴剪切试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(1):156-164.

[7] KAMPALA A, HORPIBULSUK S, PRONGMANEE N, et al. Influence of Wet-Dry Cycles on Compressive Strength of Calcium Carbide Residue - Fly Ash Stabilized Clay [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, 26(4): 633-643.

[8] 汤华, 严松, 杨兴洪, 等. 差异含水率下全风化混合花岗岩抗剪强度与微观结构试验研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(S1): 55-66, 76.

[9] 李贤. 微生物灌浆固化紫色土的水力-力学特性及其强化机理研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2020.

[10] 谢定义, 齐吉琳, 张振中. 考虑土结构性的本构关系 [J]. 土木工程学报, 2000, 33(4): 35-41.

[11] 谢定义, 齐吉琳. 土结构性及其量化参数研究的新途径 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 651-656.

[12] 于靖涵. 干湿循环条件下非饱和土强度劣化特征分析 [D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2020.

[13] HU C M, YUAN Y L, MEI Y, et al. Comprehensive Strength Deterioration Model of Compacted Loess Exposed toDrying-Wetting Cycles [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(1): 383-398.

[14] 胡长明, 袁一力, 王雪艳, 等. 干湿循环作用下压实黄土强度劣化模型试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(12): 2804-2818.

[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

[16] 黄丽, 张光远, 丁树文. 侵蚀紫色土土壤颗粒流失的研究 [J]. 水土保持学报, 1999, 5(1): 35-39, 85.

[17] 涂义亮, 刘新荣, 钟祖良, 等. 干湿循环下粉质黏土强度及变形特性试验研究 [J]. 岩土力学, 2017, 38(12): 3581-3589.

[18] 许冲, 薛乐, 李贤, 等. 粒组缺失对紫色土抗剪强度的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2020, 42(4): 135-141.

[19] 杨和平, 王兴正, 肖杰. 干湿循环效应对南宁外环膨胀土抗剪强度的影响 [J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 949-954.

[20] 李勇俊, 严颖, 赵春发, 等. 细小颗粒对道砟材料剪切性能影响的试验研究 [J]. 实验力学, 2020, 35(6): 985-993.

[21] 彭怡, 王玉宽, 傅斌, 等. 紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素 [J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 142-144.

[22] 王铁行, 郝延周, 汪朝, 等. 干湿循环作用下压实黄土动强度性质试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(6): 1242-1251.

[23] 陈锐, 张星, 郝若愚, 等. 干湿循环下地聚合物固化黄土强度劣化机制与模型研究 [J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1164-1174.

[24] 胡旭辉, 张坤勇, 聂美军, 等. 干湿循环条件对膨胀土强度指标的影响 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(1): 269-279.

[25] 吴金峰. 基于颗粒特征的砂土抗剪强度指标的预测研究 [D]. 扬州: 扬州大学, 2022.

[26] ALDAOOD A, BOUASKER M, AL-MUKHTAR M. Impact of Wetting-Drying Cycles on the Microstructure and Mechanical Properties of Lime-Stabilized Gypseous Soils [J]. Engineering Geology, 2014, 174: 11-21.

[27] 刘波, 钟守琴, 魏朝富. 紫色土丘陵区田间道基础及工程处理 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2015, 37(5): 38-44.

责任编辑 孙文静