

三峡库区紫色土渗流—应力的耦合关系

谷易¹, 毛海涛^{1,2}, 何涛¹, 张超¹

(1.重庆三峡学院 土木工程学院, 重庆 404100; 2.山西农业大学 城乡建设学院, 山西 太原 030000)

摘要: [目的] 研究三峡库区紫色土在渗流与应力耦合作用下的渗透特性和抗剪强度特性, 深入探究紫色土应力—渗流的耦合关系, 为农业工程、边坡工程、水土保持等实际工程应用提供理论参考。[方法] 以三峡库区紫色土为研究对象, 借助 SLB-1A 型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪, 分析多因素耦合对紫色土抗剪强度特性和渗透性的变化。[结果] 含水率对三峡库区紫色土的黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的影响程度不同, 并在含水率为 11% 处取得峰值, 内摩擦角随含水率增大而减小, 二者变化趋势符合线性变化的特征; 紫色土渗透性的变化在不同含水率梯度间存在较大的差异性, 且含水率在 11%~13% 之间时差异性相对显著; 以渗透压等于 40 kPa 为临界值, 紫色土的渗透性降低形式不同; 主应力差控制值越大, 不同含水率紫色土的渗透性降低越显著。[结论] 渗透—剪切作用下, 含水率和围压极大影响了紫色土的抗剪强度, 其黏聚力在含水率 11% 处取得峰值, 黏聚力和内摩擦角的变化符合线性变化; 相同条件下, 主应力差控制值越大, 不同含水率紫色土的渗透性降低越显著, 主应力差的贡献率高于含水率。各因素对影响紫色土渗透性的贡献率由高到低依次为: 渗透压 > 主应力差 > 围压 > 含水率。

关键词: 紫色土; 含水率; 渗透—剪切; 剪切强度; 渗透性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)01-0044-08

中图分类号: TU41

文献参数: 谷易, 毛海涛, 何涛, 等. 三峡库区紫色土渗流—应力的耦合关系[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 44-51. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.006; Gu Yi, Mao Haitao, He Tao, et al. Coupling relationship between seepage and stress of purple soil in Three Gorges reservoir area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 44-51.

Coupling Relationship Between Seepage and Stress of Purple Soil in Three Gorges Reservoir Area

Gu Yi¹, Mao Haitao^{1,2}, He Tao¹, Zhang Chao¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Three Gorges University, Chongqing 404100, China;

2. College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taiyuan, Shanxi 030000, China)

Abstract: [Objective] The permeability and shear strength characteristics of purple soil in the Three Gorges reservoir area under the coupling effect of seepage and stress were studied, and the coupling relationship between stress and seepage of purple soil was deeply explored, in order to provide theoretical reference for practical engineering applications such as agricultural engineering, slope engineering and soil and water conservation. [Methods] Changes in shear strength and permeability of purple soil under multi-factor coupling were analyzed using an SLB-1A stress-strain controlled triaxial shear permeability tester. [Results] The influence of water content on cohesion (c) and internal friction angle (φ) of purple soil in the Three Gorges reservoir area was different, and the peak value was obtained at the water content of 11%. The internal friction angle decreased linearly with increasing water content. The permeability of purple soil varied greatly among different water content gradients, and the differences were relatively obvious when the water contents

收稿日期: 2022-05-23

修回日期: 2022-07-18

资助项目: 山西省自然科学基金面上项目“干旱区平原水库渗流控制与坝后土壤盐渍化动态响应关系研究”(202103021224151); 重庆市万州科学技术项目(cqzw2019005); 21 世纪初高等教育教学改革基金(2021XG009); 重庆三峡学院研究生科研创新项目资助(YJSKY22064)

第一作者: 谷易(1996—), 女(汉族), 重庆市梁平区人, 硕士研究生, 研究方向为紫色土力学性质。Email: guyi6863@163.com。

通信作者: 毛海涛(1980—), 男(汉族), 山西省平陆县人, 博士, 教授, 主要从事水利工程渗流相关问题的研究。Email: maohaitao1234@163.com。

were between 11% and 13%. With the permeability pressure equal to the critical value of 40 kPa, the permeability reduction forms of purple soil were different. The greater the control value of the principal stress difference, the lower the permeability of purple soil with different moisture contents. [Conclusion] Water content and confining pressure greatly affected the shear strength of purple soil under the action of seepage-shear. Cohesion reached a peak value at 11% water content, and the changes of cohesion and internal friction angle were linear. Under the same conditions, the influence of water content and principal stress difference on the permeability coefficient of purple soil with axial stress followed a cubic relationship. The contribution rates of various factors to the permeability of purple soil from high to low followed the order of permeability pressure > principal stress difference > confining pressure > water content.

Keywords: purple soil; water content; permeability-shear; permeability; shear strength

紫色土是三峡库区耕地面积比例最大的土壤类型,占库区内耕地面积的 78.7%^[1]。其母质较为独特,发育时间短,物理风化强烈,有遇水强度急剧下降等特性^[2]。三峡库区降雨集中,受气候和库区蓄水等影响,在实际工程建设、水土保持等方面存在亟待解决的问题^[3-4]。紫色土坡地一直是库区内水土流失防治的重点^[5]。紫色土的侵蚀过程常常伴随着应力、渗流、温度等多场耦合作用,进而改变了其抗剪强度和渗透性,导致土壤特性演变机理较复杂。

在影响紫色土抗剪强度的众多因素中,含水率的作用极为显著。国内外学者对此开展了许多研究工作^[6-8],如倪九派等^[9]研究了含水率、干密度的交互作用对紫色土抗剪强度的影响规律,发现每一个干密度都有对应的含水率,黏聚力出现最大值的含水率基本在 10% 左右;胡斐南等^[10]认为当含水率在 13% 左右时,紫色水稻土对应的抗剪强度指标出现峰值,史炳林^[11]在对紫色土坡耕地土壤抗剪强度的研究中发现,其黏聚力在含水率为 11%~16% 时有临界值出现。而川西地区紫色土的抗剪强度和水敏性均在含水率为 15% 左右出现峰值。关于紫色土渗透性的研究,大都集中在土壤颗粒成分的变化^[12-13]、土壤侵蚀^[14]、坡度^[15]或降雨强度^[14,16-17]等,而将应力作用,如围压、主应力差等与渗透作用相互耦合的试验还较少。实际上,工程环境中的紫色土常处于外荷载、自重及地下水等多因素作用的复杂受力状态^[18],其物理学特性的改变伴随着应力场和渗流场耦合作用的改变,在三峡库区特殊水文地质条件下耦合作用尤为显著。然而,系统分析含水率作用下三峡库区紫色土应力—渗流耦合作用的研究仍鲜见报道,还需要大量的研究工作。

本研究以三峡库区紫色土为研究对象,借助 SLB-1 A 型应力应变控制式三轴剪切—渗透耦合试验仪,开展含水率、围压、主应力差、渗透压等共同作用下紫色土物理力学特性变化规律研究,深入探究紫

色土应力—渗流的耦合关系,以期为三峡库区水土保持等工程提供参考。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区腹地—重庆市万州区境内,北纬 30° 44' 18"—30° 45' 12",东经 108° 26' 42"—108° 38' 44",区内主要的耕地资源为紫色土,以沙溪庙组 J₂S 紫色土分布最广^[19-20],地貌特征以山地、丘陵为主,属于亚热带季风湿润气候,日照充足,雨量充沛^[21]。年均气温 18.2 °C,年均降水为 1 445 mm^[22],年平均日照 1 258 h,年均相对湿度 82%。试验用土于 2020 年 12 月取自万州区周家坝某边坡,岩性以泥岩和砂岩为主,呈互层结构。坡上部有自然生长的植物,坡中下部为自然剥落的裸土,坡底种植有农作物,主要采集的是坡下无耕种的裸土,属于泥岩风化残坡积物,为沙溪庙组 J₂S 紫色土,呈暗紫色。

1.2 材料与方法

1.2.1 试验材料与物理性质指标 通过梅花形采样法采集 10—30 cm 的混合土样 60 kg 带回实验室,经实验室风干、去杂、碾散、过 2 mm 的筛网,测定其基本的物理性质指标(见表 1)。试验土样的颗粒级配曲线见图 1。根据试验方案配置目标含水率样品,湿润一昼夜备用,随后按照《土工试验方法标准》的操作规程^[23],将土样制成直径 39.1 mm,高度 80 mm 的圆柱,设计干密度为 1.68 g/cm³,试件制作完成后,脱模称取其质量,检验试件干密度是否达到预设目标。

表 1 紫色土的主要物理特性指标

Table 1 Main physical properties of purple soil

液限 $\omega_L / \%$	塑限 $\omega_P / \%$	塑性 指标 I_P	干密度 $\rho_d /$ ($g \cdot cm^{-3}$)	含水率 $\omega / \%$
31.6	8.3	23.3	1.57	8.91

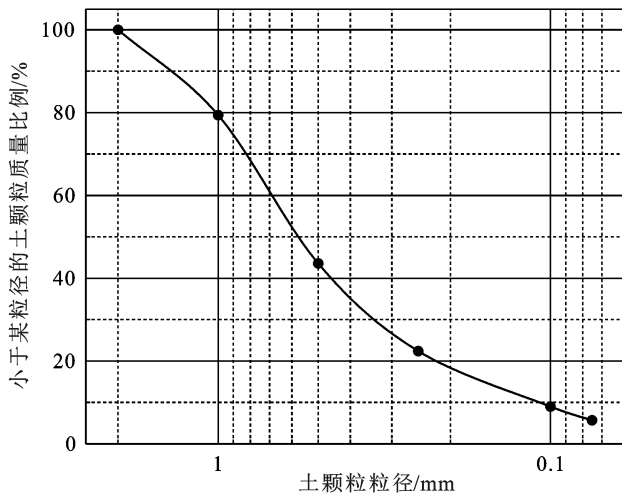


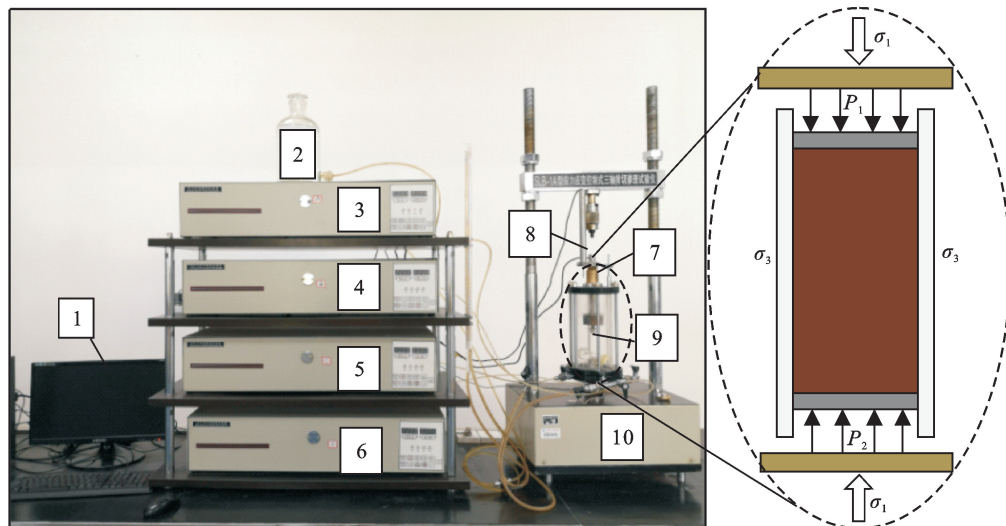
图 1 紫色土颗粒级配曲线

Fig.1 Purple soil particle gradation curve

1.2.2 试验方案与步骤

(1) 试验设备。试验采用南京土壤仪器厂生产的 SLB-1A 型应力应变控制式三轴剪切渗透耦合试验仪,该系统由围压、轴压和渗透水压三套相互独立的加载部分组成。该系统具有渗透压力施加系统,能准确控制流量、压力大小;围压加载范围为 0~1.99 MPa,轴压范围为 0~20 kN,渗透压可在 0~0.99 MPa 范围内调整。采用该试验仪能检测出土样在应力—渗流耦合作用下,各主要力学参数的变化规律,控制精度高,能实时通过传感器采集数据,试验设备装置见图 2。

(2) 试验方案。根据已有的研究成果表明,一般黏壤土的特性在含水率为 21% 左右基本趋于稳定^[24],故本试验设计 6 个不同含水率梯度分别为 7%,9%,11%,13%,15%,17%。根据试验目的,制定 3 种试验方案。



注:1 数据采集系统;2 补液瓶;3 应力应变控制器;4 围压及孔压控制器;5 反压 1 及体变控制器;

6 反压 2 及体变控制器;7 压力传感器;8 位移传感器;9 压力室;10 加压油缸。

图 2 SLB-1A 型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪

Fig.2 SLB-1A stress-strain controlled triaxial shear seepage tester

①方案 1。固定渗透压,对不同含水率紫色土开展不同围压梯度下的剪切—渗透试验,分析应力—渗流耦合作用下不同含水率紫色土的抗剪强度特性及渗透特性,设计围压工况为 200,300,400,500 kPa;

②方案 2。改变竖向渗透压,分别为 20,30,40,50,60 kPa,分析渗透压对紫色土渗透性的影响规律;

③方案 3。设计主应力差控制梯度分别为 100,200,300 kPa,分析不同主应力差控制作用对紫色土应力—渗透耦合关系的影响规律。

(3) 试验步骤。①开始试验前,打开各控制器并预热半小时,检查各控制器中的水量是否充足,调节

三通阀门进行补液,各控制器数显读数手动清零;

②安装试样并固定好仪器后,打开电脑端软件,新建工程并输入基本信息,选择恒水头渗透试验,在试验目标值栏设定反压力 1 为 0,主应力差、围压、反压力 2 为设计值,应变速率为 0.4 mm/min; ③点击开始,当围压、渗透压上升到目标值时,打开反压阀门,开始渗透试验,此时根据设计工况确定是否启动主应力差控制,数据采集系统按时间序列自动采集数据;

④当上游流量与排水流量的变化速率相等时,关闭反压阀门,停止主应力差、上反压及下反压,进入三轴剪切或压缩试验,选择不固结不排水(UU)剪切试验,

启动应变速率,此时选择按变形量的采集方式数据,当轴向应变达到设计值时,停止剪切,重复前述渗透试验。

基于上述试验设备和步骤,采集得到轴向位移,体积变化,渗透时间和渗透水量等试验数据,并结合达西定律,采用如下计算公式^[25]求解渗透系数:

$$k = \frac{Q\rho_w g H}{A \Delta t \Delta P} \quad (1)$$

式中: k 为渗透系数(cm/s); Δt 为渗流历时(s); Q 为 Δt 间隔的总渗量(ml); ΔP 为渗透水压(kPa); ρ_w 为水的密度(g/cm^3); g 为重力加速度(N/kg); H 为初始高度减轴向位移(cm); A 为截面面积(cm^2) $= (V - \Delta V)/H$, ΔV 为固结完成后的体积变化量(ml)。根据上述公式,可计算出试验过程中各量值之间的关系。

此外,试验中需要注意的是:各紫色土试样蒸馏水从试样底部流入、顶部流出方式模拟土中渗流,即试样底部的进口压力大于试样顶部的出口压力,使试样顶、底部形成渗透压力差。为了保证单项渗流试验的正常进行,试样端部的透水石的渗透系数远大于试件的渗透系数,同时通过橡皮膜施加于试件的围压要大于竖向渗透压力,确保渗流不在橡皮膜与试件接触面发生,同时剪切速率设置为 0.4 mm/min,以主应力差的峰值作为试样的抗剪强度,若无峰值出现则取应变 15%对应的主应力差作为破坏峰值。

2 结果与分析

2.1 渗透—剪切作用下紫色土的抗剪强度

2.1.1 紫色土的破坏峰值 通过对不同含水率紫色土开展不同围压梯度下的剪切—渗透试验,测得紫色土的峰值主应力差(偏应力,图 3)。

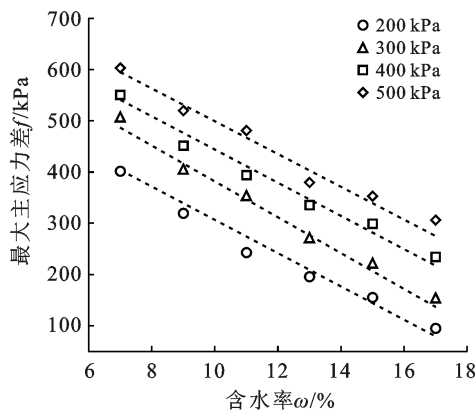


图 3 含水率与偏应力峰值之间关系

Fig.3 Relationship between moisture content and peak deviatoric stress

从图 3 可知,同一围压下,随着土体含水率的增加,其偏应力峰值基本呈线性下降。如当围压为 200 kPa,含水率由 7%增加至 17%时,相应的偏应力峰值迅速地由 441.5 kPa 降至 125.03 kPa,下降幅度约为 71.68%,同样的,当围压为 300 kPa 时,其偏应力峰值迅速地由 514.96 kPa 降至 171.7 kPa,下降幅度约为 66.66%。由此可见,在相同围压作用时,随着含水率的增加,土体能承受竖向荷载的能力就越低。而当含水率一定时,围压越大,紫色土等达到的偏应力峰值也越大。当含水率为 7%时围压由 200 kPa 增加到 500 kPa 时,其偏应力峰值增幅为 33.4%。同理当含水率为 11%,17%时增幅分别为 35.98%,59.16%。这表明,含水率一定时,随着围压的增大,增加了土体的径向握裹力,孔隙结构更加密实,土体能承受竖向荷载的能力增强,因而峰值增大。

2.1.2 含水率对紫色土黏聚力的影响 分析含水率与土壤抗剪强度关键参数的内在关系。

图 4 为不同含水率下三峡库区紫色土黏聚力 c 的变化关系,可以随着含水率的增大紫色土的黏聚力呈现先增大后减小的变化规律,当含水率从 7%增加到 11%时,黏聚力由 45.17 kPa 增至 78.29 kPa;含水率从 11%增加至 17%时,黏聚力由 78.29 kPa 减至 43.1 kPa。整个过程黏聚力随含水率的变化存在明显的峰值,峰值处含水率约为 11%。

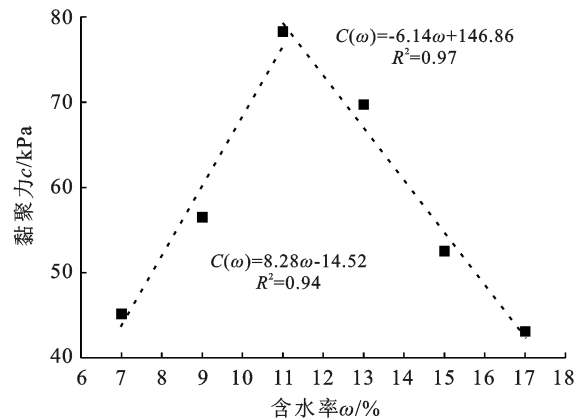


图 4 黏聚力与含水率的关系

Fig.4 Relationship between cohesion and moisture content

以含水率 11%作为界限含水率,对三峡库区紫色土黏聚力与含水率的关系进行线性拟合可得:

- (1) 当含水率为 $7\% < \omega < 11\%$ 时

$$C(\omega) = 8.28\omega - 14.52 \quad (R^2 = 0.94) \quad (2)$$
- (2) 当含水率为 $11\% < \omega < 17\%$ 时

$$C(\omega) = -6.14\omega + 146.86 \quad (R^2 = 0.97) \quad (3)$$

式中: $C(\omega)$ 为黏聚力(kPa)。

拟合直线的 R^2 均为 0.94, 说明上述线性拟合基本能反映实际情况。随着紫色土样含水率的增加, 在土颗粒表面形成水膜, 土体黏聚力的产生受颗粒间黏聚力联结作用和胶结作用的影响, 进而影响土体的抗剪强度。

2.1.3 含水率对紫色土内摩擦角的影响 从图 5 可以看出, 紫色土的内摩擦角随含水率的增加整体呈现递减趋势, 拟合二者关系如公式(4)所示, 拟合关系呈线性负相关, 斜率为 -0.97 , 在含水率 7%, 17% 分别对应的摩擦角为 28.30° , 19.28° , 下降幅度约为 31.87%。分析原因, 当干密度一定时, 低含水率的紫色土样较高含水率的紫色土样而言, 土颗粒结构较为紧密, 颗粒间引力较强, 颗粒间摩擦阻力和咬合力作用明显, 导致紫色土的内摩擦角较大; 而随着含水率的增加, 在土颗粒外围形成水膜, 且逐渐变厚, 水膜的润滑作用降低了颗粒间的摩擦阻力, 进而降低了土样的内摩擦角。

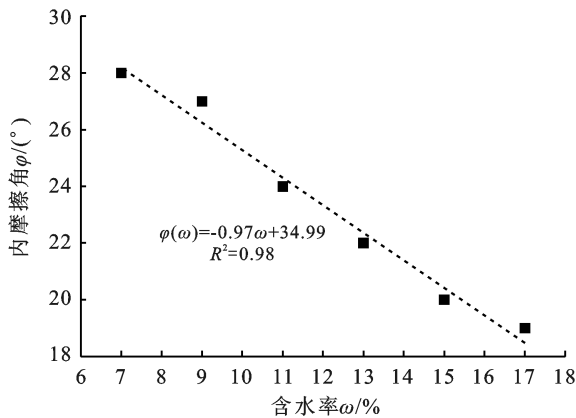


图 5 内摩擦角与含水率的关系

Fig.5 Relationship between internal friction angle and water content

对内摩擦角与含水率的关系进行线性拟合可得:

$$\varphi(\omega) = -0.97\omega + 34.99 \quad (R^2 = 0.98) \quad (4)$$

式中: $\varphi(\omega)$ 为内摩擦角($^\circ$)。

2.1.4 含水率对应力—应变的影响 试验过程中发现, 在不同围压作用下, 各含水率土样以 0.4 mm/min 的剪切速率, 轴向应变达到 15% 时的剪切位移均未超过 7 mm, 且各围压下的变化趋势基本一致。因此, 可以围压等于 300 kPa 时为代表工况进行分析。取剪切位移 8 mm 为横轴终点, 绘制不同含水率下紫色土的切应力—剪切位移曲线(见图 6)。

由图 6 可以看出, 含水率变化对紫色土的切应力—剪切位移曲线影响显著。相同条件下, 含水率为 11% 的紫色土样达到抗剪强度峰值的剪切位移均大

于其他含水率, 当土体抗剪强度达到峰值时, 切应力趋于稳定变化, 整体曲线大致可分为 3 个阶段。阶段 1 为剪切初期, 切应力随剪切位移的增加而缓慢线性增长, 此时可理解为该阶段土体处于弹性阶段, 发现含水率为 11% 的紫色土持续周期较长, 直到剪切位移为 1.8 mm 左右时才开始下一阶段, 其余各试样仅持续到 1 mm 左右; 阶段 2 为应变硬化阶段, 曲线较陡, 各含水率下紫色土样的切应力均随剪切位移的增大而迅速增大, 如含水率为 7% 的紫色土, 切应力由 105.22 kPa 增加至 253.89 kPa, 增幅为 58.56%, 过程较短; 阶段 3 为屈服阶段, 曲线的斜率逐渐变缓, 总体分为两个趋势, 以含水率 11% 为临界点, 小于 11% 的紫色土样, 切应力随剪切位移的增加总体呈缓慢线性增长, 而大于 11% 的土样, 增长趋势近似为一条直线, 屈服明显。由此可见, 三峡库区紫色土的切应力—剪切位移存在一定的水敏性, 临界含水率同上述一致, 约为 11%。

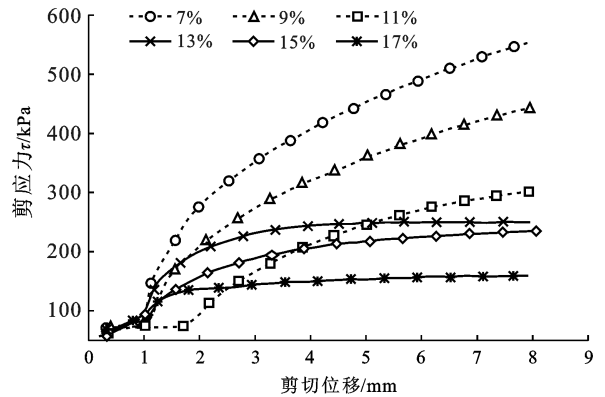


图 6 不同含水率下紫色土切应力—剪切位移曲线

Fig.6 Shear stress-shear displacement curves of purple soil under different water contents

2.2 紫色土的渗透特性分析

2.2.1 剪切作用下紫色土的渗透性 各围压下随着轴向应变的变化, 紫色土内部孔隙也在发生着变化, 进而影响土体的整体渗透性。各级围压作用时, 不同含水率紫色土渗透系数与轴向应变的关系如图 7 所示。

由图 7 可知, 不同初始含水率紫色土的渗透系数随轴向应变变化的规律基本相似。在渗透—剪切初期, 各含水率的渗透性下降幅度相对较大, 其后下降幅度逐渐趋缓并达到稳定。具体来看, 以围压 200 kPa 工况为例, 含水率为 7% 的紫色土在轴向应变为从 0% 变化至 8.27% 时, 渗透系数从 $4.4 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 下降至 $9.8 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 降低幅度达 77.73%, 而轴向应变为从 8.27% 变化至 16.1% 时, 渗透系数从 $9.8 \times$

10^{-6} cm/s 下降至 8.29×10^{-6} cm/s,降低幅度为 15.41%;含水率为 11%的紫色土在轴向应变为从 0%变化至 8.15%时,渗透系数从 1.05×10^{-5} cm/s 下降至 2.45×10^{-6} cm/s,降低幅度达 76.66%,而轴向

应变为从 8.15%变化至 16.1%时,渗透系数从 2.45×10^{-6} cm/s 下降至 2.31×10^{-6} cm/s,降低幅度仅为 5.71%。由此可见,当围压一定时,含水率越大渗透系数随轴向应变的增加降幅越低。

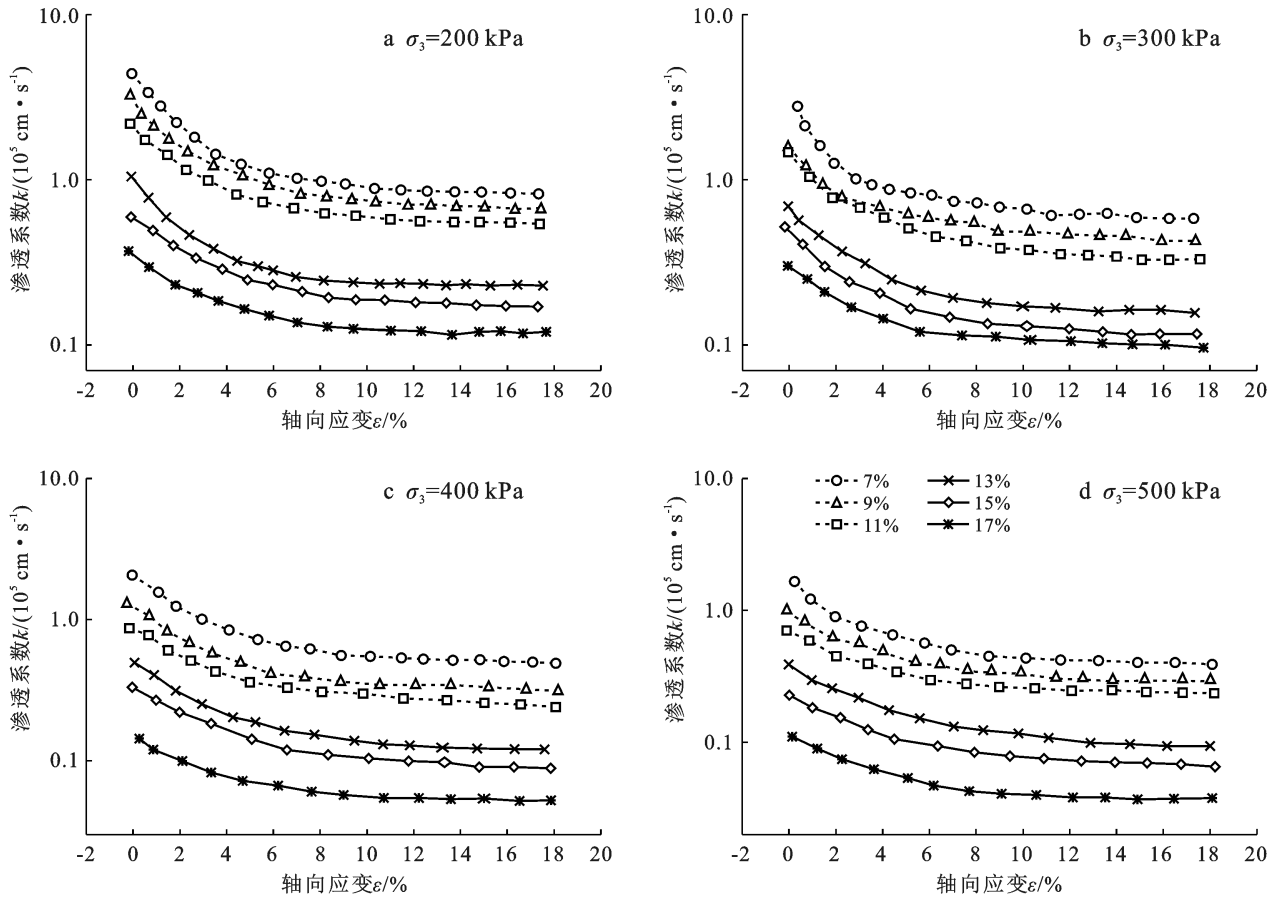


图 7 不同初始含水率对 k 的影响

Fig.7 Effect of different initial moisture content on k

对比图 7a,7b,7c,7d 发现,4 种围压下,各含水率紫色土的渗透性在含水率为 11%和 13%之间表现出较大的差异性,说明相同条件下,此时紫色土的渗透性受到含水率作用敏感程度较高;同样,当围压为 400 kPa 和 500 kPa 时,紫色土的渗透性在含水率为 15%至 17%区间亦表现出一定的差异性,说明围压增大时会扩大含水率对紫色土渗透性的影响。因此,围压影响紫色土渗透性的贡献率高于含水率。

2.2.2 渗透压对紫色土应力—渗透耦合关系的影响

通过上述分析可知,三峡库区紫色土临界含水率约为 11%,对抗剪强度、渗透性等均存在该临界值,其对应的土体特性变化规律也具有代表性。因此,设置不同渗透压,观测含水率为 11%的紫色土在围压为 200 kPa 状态下土体渗透性与应变的关系如下图 8 所示。

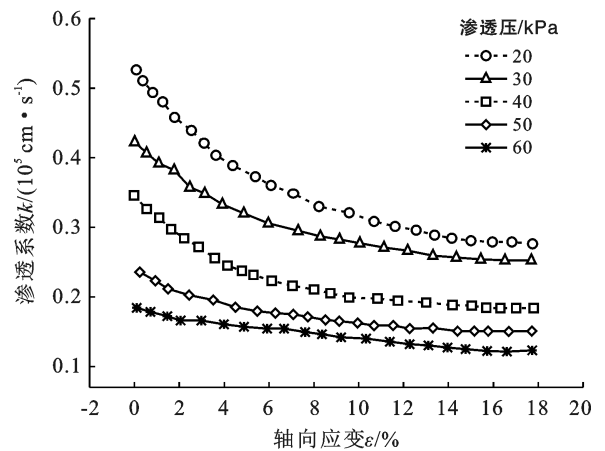


图 8 渗透系数随轴向应变的变化曲线

Fig.8 Variation curve of permeability coefficient with axial strain

由图 8 可知,各渗透压力作用下,紫色土渗透系数随轴向应变的增加而减小。当渗透压为 20,30,

40 kPa时,其渗透性前期下降较快,随后趋缓并达到稳定。如当渗透压为 20 kPa, ϵ 由 0%增加到 8%时,其渗透系数由 5.26×10^{-6} cm/s 下降为 3.37×10^{-6} cm/s,下降幅度为 34%; ϵ 由 8%增加到 16%时,渗透系数由 3.37×10^{-6} cm/s 下降为 2.7×10^{-6} cm/s,下降幅度为 20%;当渗透压为 50,60 kPa 时,土体渗透性呈现缓慢的降低趋势,基本呈直线型变化。如当渗透压为 60 kPa, ϵ 由 0%增加到 16%时,渗透系数下降幅度为 36.8%。随着渗透压的逐渐增大,紫色土的渗透系数亦呈降低趋势,当 $\epsilon=0\%, 8\%, 16\%$, 渗透压力由 20 kPa 增加到 60 kPa 时,紫色土渗透系数的变化幅度分别为 62.36%,54.3%,53.87%,总的渗透

系数均处于同一数量级当中。由此可见,渗透—剪切时,相同条件下轴向应变作用和渗透压力作用均会降低紫色土的渗透性,而围压一定时,轴向应变对其渗透性削弱作用略小于渗透压。

2.2.3 主应力差对紫色土应力—渗透耦合关系的影响 为进一步探究不同含水率紫色土在受到主应力差控制作用时其渗透性的变化规律,开展 3 种主应力差控制下紫色土的应力—渗流耦合试验研究,设置渗透压为 20 kPa,为保持其余因素与前述研究的一致性,故设置围压仍为 200 kPa。图 9 为不同含水率紫色土,在 3 种主应力差控制下,渗透系数与轴向应变的关系。

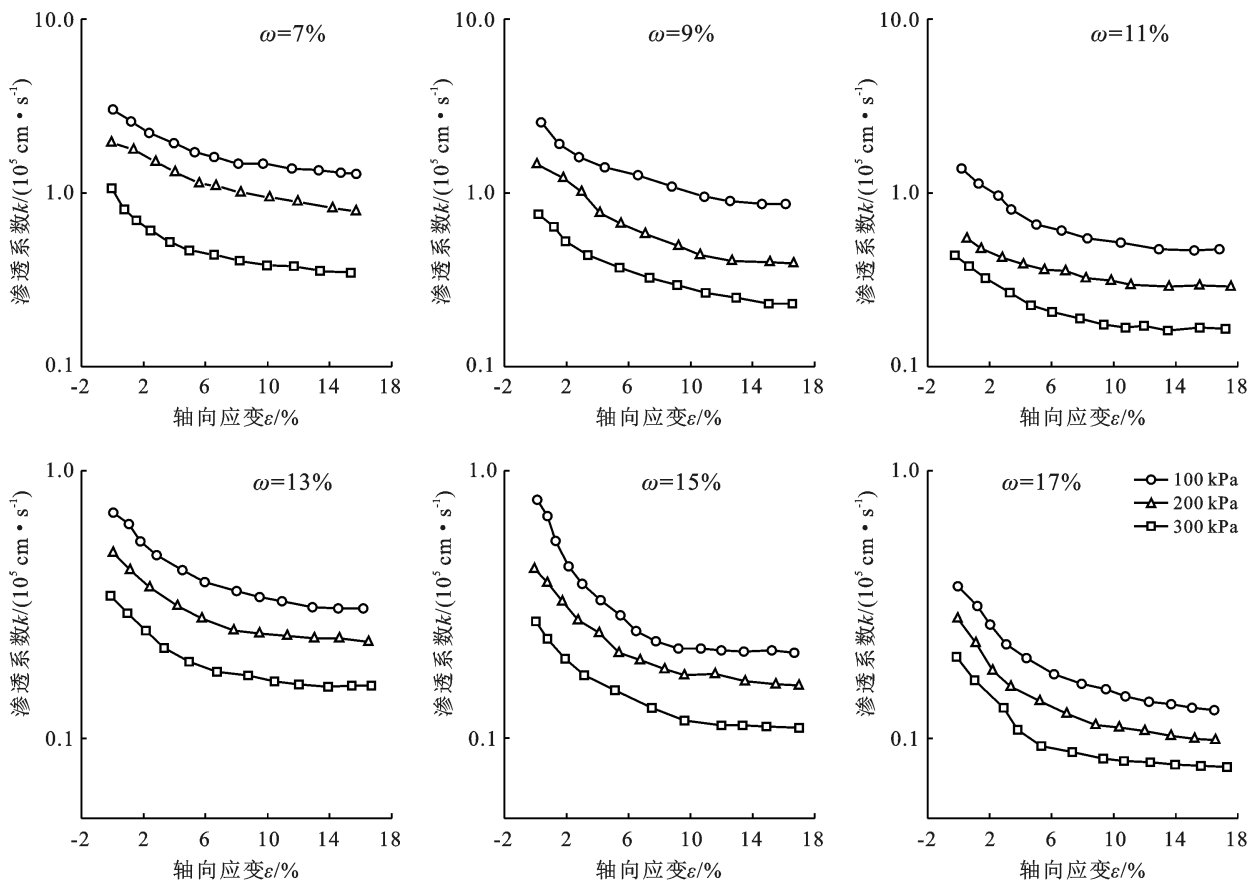


图 9 不同初始含水率下主应力差对 k 的影响

Fig.9 Effect of principal stress difference on k under different initial water content

由图 9 可以看出,各主应力差控制下,不同含水率紫色土渗透性随轴向应变变化的趋势基本一致,且随着主应力差控制值的增加,紫色土的渗透性呈显著的降低趋势。以 $\omega=7\%$ 为例,主应力差由 100 kPa 增至 200 kPa 的过程中,渗透系数由 1.68×10^{-5} cm/s 降低至 1.08×10^{-5} cm/s,下降幅度为 35.71%;主应力差由 200 kPa 变化至 300 kPa,渗透系数由 1.08×10^{-5} cm/s 降低至 4.20×10^{-6} cm/s,下降幅度为 61.11%,说明相同条件下,主应力差越大,紫色土的

渗透性越低。

此外,相同条件下,紫色土的渗透性随轴向应变的增加而减小,如当主应力差为 100 kPa, ϵ 由 0%增至 8%时,含水率为 15%紫色土的渗透性表现出较大的降低趋势,渗透系数由 9.08×10^{-6} cm/s 下降为 2.2×10^{-6} cm/s,下降幅度达到 75.77%;而当主应力差为 300 kPa, ϵ 由 0%增加至 8%时,仅含水率为 7%时,紫色土的渗透性表现出相对较大的降低趋势,渗透系数由 1.02×10^{-5} cm/s 下降为 4.19×10^{-6} cm/s,

下降幅度为 58.92%。由此可见,主应力差的增加会抑制含水率变化对其渗透性的降低作用。

3 讨论

3.1 渗透—剪切时紫色土的强度变化的内因

当渗透压一定时,不同含水率紫色土在受到围压的作用时其抗剪强度具有一定的水敏性,其抗剪强度峰值随着含水率的增加呈现出降低趋势,因紫色土试样的顶部存在恒定压力差,紫色土的有效围压可能受渗透压力的作用而降低,进而减弱了对横向变形的约束能力,试样承载能力降低,这与程鹏等^[26]对生态边坡的水力和力学特性的分析有相似之处。此外,三峡库区紫色土的黏聚力随着含水率的增加有峰值出现,变化趋势呈先增大后减小,临界含水率为 11%。而内摩擦角随含水率的增加逐渐减小,事实上,含水率较低时,土颗粒间的作用力主要以范德华力为主,由于水分子较少,所以颗粒间作用力不大,而含水率超过 11%后,紫色土颗粒表面水膜就加厚,起到了润滑的作用,降低了土颗粒之间的滑动摩擦力和咬合摩擦力,土体越容易被破坏,二者整体的趋势均符合线性变化的特征,这与黄海均等^[2]、韦杰等^[27]在无渗透压作用下,对三峡库区紫色土抗剪强度水敏性研究的试验结果相类似。这是由于土中任意点的渗透压力在各方向上的作用力大小相等的,它能使土颗粒受到静水压缩的作用,而土颗粒的压缩模量较大,故土粒本身的压缩可忽略不计。因此抗剪强度参数的变化在有渗透压作用随含水率的变化趋势一致。

3.2 渗透—剪切时紫色土的渗透性变化原因

各含水率紫色土在围压作用下,其渗透性总体均呈下降趋势,且相同条件下,紫色土渗透性的变化在不同含水率梯度间存在较大的差异性。4 种围压下,其渗透性在含水率为 11%和 13%之间表现出较大的差异性。这表明紫色土的渗透性受初始含水率影响的敏感程度较高,在相同围压加载时,初始含水率较高的紫色土,其固结排水量相对较大。随着围压的增大试样的固结排水量增大,相应的紫色土试样也相对密实,渗透—剪切试验过程中则排出量相对减小。各渗透压力作用下,紫色土的渗透系数随轴向应变的增加呈现出两种变化趋势,当渗透压小于 40 kPa 时,其渗透性呈现出先快速降低后下降幅度相对缓慢的趋势,当渗透压大于 40 kPa 时,其渗透性呈现缓慢的降低趋势,相同条件下轴向应力作用和渗透压力作用均会降低紫色土的渗透性,而围压一定时,轴向应力对其渗透性削弱作用略小于渗透压,总的渗透系数降幅不超过一个数量级。这与梁广川,汪时机等^[28]对砂

质黏性紫色土的渗透性研究结果相类似。此外,各主应力差控制下,不同含水率紫色土渗透性随轴向应变变化的趋势基本一致,且随着主应力差控制值的增加,紫色土的渗透性呈显著的降低趋势,主应力差的增加会抑制含水率变化对其渗透性的降低作用,原因是主应力差增加使得土壤颗粒孔隙被挤密,土壤密实度增加,从而造成试样的渗透性降低,亦减小了含水率的影响效果。

4 结论

(1) 渗透—剪切作用下,含水率对三峡库区紫色土的黏聚力 c 与内摩擦角 φ 的影响程度不同,黏聚力随含水率增加先增大后减小并有明显峰值,峰值处含水率约为 11%;内摩擦角随含水率增大而减小。

(2) 相同条件下,不同含水率紫色土的渗透性在含水率为 11%和 13%之间表现出相对较大的差异性,围压越大时,紫色土的渗透性受到含水率作用敏感程度较高,围压影响紫色土渗透性的贡献率高于含水率。

(3) 不同渗透压作用对降低紫色土的渗透性的程度不同,以 40 kPa 为临界值,轴向应力的贡献率低于渗透压;主应力差控制值越大,不同含水率紫色土的渗透性降低越显著,主应力差的贡献率高于含水率。

[参 考 文 献]

- [1] 汪明星.重庆山地丘陵区紫色土饱和导水率传递函数研究[D].重庆:西南大学,2017.
- [2] 黄海均,毛海涛,严新军,等.三峡库区高边坡紫色土抗剪强度的水敏性特征[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6): 974-983.
- [3] 吕刚,史东梅.三峡库区紫色土土壤水分入渗特性研究[J].灌溉排水学报,2009,28(6):87-90.
- [4] 薛乐,汪时机,李贤,等.重庆紫色土抗侵蚀能力的粒组效应研究[J].土壤学报,2019,56(3):582-591.
- [5] 张健乐,史东梅,刘义,等.土壤容重和含水率对紫色土坡耕地耕层抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2020,34(3):162-167.
- [6] Wang Zhengcheng, Zhang Shixin, Mao Haitao, et al. Experimental study on the disintegration mechanism of consolidated purple soil in Three Gorges Reservoir area of China [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022,15(6):1-14.
- [7] 钟茫.非饱和紫色土抗剪强度影响因素研究[D].重庆:西南大学,2014.
- [8] 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.

(下转第 60 页)

- 作用关系研究进展[J].世界林业研究,2010,23(6):50-54.
- [18] 窦超银,康跃虎,万书勤.地下水浅埋区重度盐碱地覆膜咸水滴灌水盐动态试验研究[J].土壤学报,2011,48(3):524-532.
- [19] 李银科,马全林,王耀琳,等.景电灌区次生盐渍化土地枸杞林的土壤特征研究[J].草业学报,2015,24(5):66-74.
- [20] 李亚娟,王亚亚,曹广民,等.三江源区土地利用方式对土壤氮素特征的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):272-277.
- [21] 王云强,张兴昌,李顺姬,等.小流域土壤矿质氮与地形因子的关系及其空间变异性研究[J].环境科学,2007,28(7):1567-1572.
- [22] Yin Xinwei, Feng Qi, Zheng Xinjun, et al. Spatio-temporal dynamics and eco-hydrological controls of water and salt migration within and among different land uses in an oasis-desert system [J]. Science of the Total Environment, 2021,772:145572.
- [23] 王彦芳,裴宏伟.1980—2015 年河北坝上地区生态环境状况评价与对策研究[J].生态经济,2018,34(1):186-190.
- [24] 王雪梅,康璇,赵枫.不同土地利用方式下渭一库绿洲土壤盐渍化特征分析[J].水土保持研究,2016,23(1):160-164.
- [25] Yu Junbao, Li Yunzhao, Han Guangxuan, et al. The spatial distribution characteristics of soil salinity in coastal zone of the Yellow River Delta [J]. Environmental Earth Sciences, 2014,72(2):589-599.
- [26] 袁磊,吴庭雯,韩双宝,等.内蒙古高原内流区土壤水溶盐空间变异特征及其影响因素[J].西北地质,2021,54(4):192-198.
- [27] 吉力力·阿不都外力,米热班·阿布里米提,刘东伟,等.艾比湖干涸湖底不同景观类型下富盐沉积物盐分积聚特征[J].中国沙漠,2013,33(5):1426-1432.
- [28] Yimer F, Ledin S, Abdelkadir A. Changes in soil organic carbon and total nitrogen contents in three adjacent land use types in the Bale Mountains, South-eastern Highlands of Ethiopia [J]. Forest Ecology and Management, 2007,242(2/3):337-342.
- [29] 马林,王洪媛,刘刚,等.中国北方农田氮磷淋溶损失污染与防控机制[J].中国生态农业学报(中英文),2021,29(1):1-10.
- [30] 吴庭雯,袁磊,韩双宝,等.安固里淖内陆河流域地下水硝酸盐污染时空分布特征及成因分析[J].环境化学,2021,40(8):2515-2523.

(上接第 51 页)

- [9] 倪九派,袁天泽,高明,等.土壤干密度和含水率对 2 种紫色土抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2012,26(3):72-77.
- [10] 胡斐南,魏朝富,许晨阳,等.紫色土区水稻土抗剪强度的水敏性特征[J].农业工程学报,2013,29(3):107-114.
- [11] 史炳林.紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪特征研究[D].重庆:重庆师范大学,2017.
- [12] 郭进,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡地土壤颗粒流失特征[J].水土保持学报,2012,26(3):18-21.
- [13] 李江文,冉卓灵,韩珍,等.含岩屑紫色土水分扩散规律[J].水土保持学报,2020,34(1):178-185.
- [14] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):18-23.
- [15] 夏振尧,张伦,牛鹏辉,等.干密度初始含水率坡度对紫色土崩解特性的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(1):121-127.
- [16] 王文武.不同坡度下紫色土坡耕地土壤侵蚀演变特征[D].四川雅安:四川农业大学,2019.
- [17] 李达,汪时机,李贤,等.非饱和砂质黏性紫色土一维渗透特性试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(2):373-380.
- [18] 宁宝宽,王宇暘,陈四利,等.水泥尾矿砂土的应力渗流耦合特性试验[J].水文地质工程地质,2015,42(4):74-78.
- [19] Lili M, Bralts V, Yinghua P, et al. Methods for measuring soil infiltration: State of the art [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2008,1(1):22-30.
- [20] 谢君,杜静,刘芸.重庆紫色土棚的有效性及其影响因素分析[J].西南师范大学学报(自然科学版),2011,36(2):153-157.
- [21] 周萍,文安邦,严冬春,等.三峡库区紫色土坡耕地草本地埂植物根系分布及抗拉力学特征[J].水土保持通报,2017,37(3):1-6.
- [22] 王晓菊,毛海涛,黄庆豪,等.基于 Copula 函数的三峡库区万州段蓄水前后降雨量—径流量关系分析[J].水资源与水工程学报,2021,32(2):23-30.
- [23] 中华人民共和国水利部.GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[M].北京:中国计划出版社,2019.
- [24] 常松果.红壤坡耕地耕层土壤抗剪强度及影响因素响应特征[D].重庆:西南大学,2017.
- [25] 梁广川.不同因素对重庆紫色土土—水特征曲线的影响研究[D].重庆:西南大学,2020.
- [26] 程鹏,李锦辉,宋磊.生态边坡的水力和力学特性分析:试验研究[J].岩土工程学报,2017,39(10):1901-1907.
- [27] 韦杰,史炳林,李进林.紫色土坡耕地埂坎土壤抗剪性能对含水率的响应[J].农业工程学报,2016,32(20):153-160.
- [28] 梁广川,汪时机,李贤,等.砂质黏性紫色土渗透特性试验研究[J].岩土工程学报,2018,40(S2):220-224.