

紫色土坡耕地埂坎土壤裂隙发育及其对抗剪强度的影响

谢思凯¹, 韦杰^{1,2*}, 康进承²

(1. 重庆师范大学三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331;

2. 三峡库区地表生态过程重庆市野外科学观测研究站, 重庆 401331)

摘要: 【目的】探究失水过程中埂坎的裂隙发育规律及其对抗剪强度的影响, 为揭示埂坎失稳机制提供科学依据。【方法】以典型紫色土坡耕地埂坎为研究对象, 模拟试验埂坎土壤水分耗散和裂隙发育过程, 测试土壤抗剪强度, 分析土壤抗剪强度与裂隙发育的关系。【结果】埂坎裂隙发育具有明显的阶段性特征, 裂隙面积率、面积-周长比、形状指数和分形维数总体表现为先快后慢再趋于稳定。裂隙发育的阶段性对土壤抗剪强度及其参数的影响存在差异, 快速发育阶段 ($31\% \geq w > 22\%$), 裂隙发育和无裂隙发育试样的土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角无明显差异; 缓慢扩展和基本稳定阶段 ($22\% \geq w > 10\%$), 裂隙发育通过影响土壤黏聚力对抗剪强度影响较大。试验条件下, 裂隙发育试样的土壤抗剪强度总体小于无裂隙发育试样, 土壤抗剪强度随含水率衰减而逐渐增大。裂隙发育和无裂隙发育试样抗剪强度的差异主要取决于土壤黏聚力, 试验范围内的最小黏聚力 (10.97 kPa) 出现在质量含水率 20% 左右。裂隙发育试样的黏聚力随水分耗散的变化幅度不大, 而内摩擦角则随水分耗散呈近似线性增大, 裂隙发育试样的土壤抗剪强度主要受内摩擦角影响。【结论】紫色土坡耕地埂坎土壤裂隙发育具有明显的阶段性特征, 裂隙发育对埂坎土壤抗剪强度影响显著, 且在低含水率时的影响更明显, 埂坎土壤黏聚力受裂隙发育的影响较内摩擦角大。

关键词: 埂坎; 裂隙; 抗剪强度; 水分耗散; 紫色土

中图分类号: S157.3+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2023)03-0577-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022071203

谢思凯, 韦杰, 康进承. 紫色土坡耕地埂坎土壤裂隙发育及其对抗剪强度的影响 [J]. 土壤通报, 2023, 54(3): 577-586

XIE Si-kai, WEI Jie, KANG Jin-cheng. The Development of Soil Cracks on Bunds in Purple Soil Sloping Farmlands and Its Influence on the Soil Shearing Strength[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(3): 577-586

【研究意义】埂坎是坡耕地重要的水土保持措施, 也是坡耕地治理和土地整理等生态建设工程的重要组成部分, 通过分割汇水面积、削减洪峰流量、促进径流下渗调控坡面水文等过程减少水土流失、保育水土资源, 还通过种植作物增加农民收入, 具有良好的生态效益与经济效益^[1-4]。紫色土坡耕地埂坎分为土坎、石坎和土石混合坎等多种类型, 其中土坎因其修筑成本低、生态适应性强等优势被广泛应用, 约占紫色土区现有埂坎总量的 65%^[3]。埂坎稳定性是其发挥水土保持功能的前提, 抗剪强度是衡量埂坎稳定性的重要指标^[4]。持续高温和降雨作用易使土坎产生裂隙, 裂隙持续发育破坏土体完整性, 弱化土体结构, 同时在降雨条件下为水分迁移提供快速通道, 加速土壤入渗, 软化土体, 降低土体强

度及稳定性^[5-7]。埂坎失稳不仅影响坡耕地侵蚀阻控效果, 还会加剧坡面侵蚀^[4]。因此, 明确裂隙发育对土壤抗剪强度的影响是揭示埂坎失稳机制以及防止埂坎垮塌的实践需要。【前人研究进展】研究表明, 水分变化引起土体开裂, 裂隙面密度随含水率的衰减逐渐增大, 随干湿循环次数的增加呈先增大后趋于稳定变化^[8-9]。裂隙发育影响土壤抗剪强度, 土壤黏聚力和内摩擦角随裂隙面密度的增加而不断减小, 土壤黏聚力衰减率与裂隙面密度呈良好的线性关系^[8-9]; 裂隙发育对抗剪强度参数的影响存在差异, 表现为土壤黏聚力衰减量显著大于内摩擦角^[9-10]。【本研究切入点】紫色土与其他类型土壤性质不同, 对裂隙发育和抗剪强度的响应也存在差异; 紫色土埂坎紧实度、干湿梯度与田面差异大, 裂隙发育及其

收稿日期: 2022-07-12; 修订日期: 2022-10-14

基金项目: 重庆市杰出青年基金项目 (cstc2019jcyjqqX0025)、重庆英才青年拔尖人才项目 (CQYC201905009) 和重庆市研究生科研创新项目 (CYS21280) 资助

作者简介: 谢思凯 (1997—), 男, 重庆大足人, 硕士研究生。主要研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: cqxiesikai@126.com

*通讯作者: E-mail: wei_jie@mails.ucas.ac.cn

效应明显不同于紫色土坡耕地。关于紫色土坡耕地埂坎土壤裂隙发育及其对抗剪强度的影响机制尚不明确,不利于紫色土坡耕地埂坎技术研发和坡面侵蚀控制,针对紫色土埂坎裂隙发育及引起的失稳机制这一科学问题开展研究十分必要。【拟解决的问题】本研究以紫色土坡耕地埂坎为研究对象,通过室内模拟试验,对比分析失水过程中裂隙发育和无裂隙发育埂坎土壤抗剪强度及其参数变化,揭示裂隙发育对埂坎土壤抗剪强度的作用机制。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于重庆市北碚区歇马镇,该区域以低山丘陵为主,地势起伏较大,海拔 200~900 m。属亚热带湿润季风气候区,年平均气温 18.3℃,7、8 月高温天气较多,高温天气日数年占比 67% 以上,年平均降水量 1105.4 mm。土壤类型主要为紫色土,岩石以灰岩、页岩、砂岩和泥岩等为主。研究区内曾实施过坡改梯、保土耕作、退耕还林(草)等水

土保持措施,土坎因其良好的经济效益和生态效益成为区域内坡耕地主要的水土保持措施之一。典型埂坎外边坡 40°~75°,地埂顶宽 0.3~0.5 m,高度 0.2~1.1 m,埂坎上生长的草本植物主要有牛筋草(*Eleusine indica*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)和狗牙根(*Cynodon dactylon*)等。

1.2 样品采集与试样制备

试验土样于 2021 年 10 月采自歇马镇典型紫色土坡耕地埂坎。采样时,在同一埂坎选取 5 个纵剖面,去除埂坎表面杂草后,自上而下按 0~10 cm、10~30 cm 和 30~50 cm 分层依次采样,每个剖面采集 35 kg 土样,混合均匀后带回实验室用于制作试样。同时在埂坎的不同位置分别采集 3 个环刀样用于土壤物理性质的测定,土样采集完成后对埂坎进行修复。将土样带回实验室风干后碾磨,过 2 mm 筛后放入密封袋中备用,参考 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》^[1]进行制样。测定紫色土的主要物理性质指标如表 1 所示。

表 1 紫色土坡耕地埂坎供试土样概况
Table 1 General situation of soil samples on the bunds in purple soil sloping farmlands

容重 Bulk density (g cm ⁻³)	自由膨胀率 Free expansion rate (%)	总孔隙度 Total porosity (%)	有机质 Organic matter (g kg ⁻¹)	颗粒组成 Particles (%)		
				黏粒 Clay (<0.002 mm)	粉粒 Silt (0.002~0.05 mm)	砂粒 Sand (>0.05~2 mm)
1.44 ± 0.15	36.33 ± 0.08	42.33 ± 0.03	12.12 ± 0.24	13.89 ± 0.11	81.25 ± 0.05	4.86 ± 0.05

注:表中数据为均值±标准差。

参考原位土体的水分状况及干密度指标,设计试验土样的初始质量含水率为 31%,干密度为 1.4 g cm⁻³。计算出所需风干土和实际需水量,称取土样平铺于试验盘内,根据土样需水量用喷壶均匀喷洒于土样上,充分搅拌均匀后回填至直径 21 cm、高 3.5 cm 的试验盘中,采用静压法将土样压实并控制土样的初始厚度为 2 cm,压实后用保鲜膜密封,浸润 48 h,制成裂隙发育试样。无裂隙发育试样的初始质量含水率和干密度与裂隙发育试样相同,称取目标质量土样并采用静压法将土样完全压入环刀(直径 6.18 cm,高 2 cm)中,然后用保鲜膜密封并浸润 48 h,制成无裂隙发育试样。试样制作完成后用保鲜膜密封,等待测试。试验共设计 12 个含水率梯度,即裂隙发育和无裂隙发育试样各 12 组,因直剪试验需要,每组 4 个重复,试验共制样 96 个。测

试抗剪参数时重复 3 次采样,试验结果取均值。

所需过筛风干土质量和加水量计算方法如公式(1)和公式(2)。

$$m_0 = \rho \times v \times 0.01 \times (100 + w_0) \quad (1)$$

$$m_w = \frac{m_0}{1 + 0.01w_0} \times 0.01 \times (w - w_0) \quad (2)$$

式中, m_0 为风干土(g); ρ 为试样干密度(g cm⁻³); v 为试样体积(g cm⁻³,直剪环刀或自制容器体积); w_0 为风干土含水率(%); m_w 为制备土样所需加水量(g); w 为试验土样初始含水率(%)。

1.3 试验方法

将制备好的试样放入 38℃ 电热恒温干燥箱内进行脱湿处理,每隔 90 min 对 1 组试样进行称重并做好记录,根据质量变化计算含水率。每次称重的同时使用索尼 DSC-200(像素 1800 万)相机垂直于裂

隙发育试样上方 30 cm 记录裂隙发育情况。为保证拍摄环境的一致性,拍照时遮蔽其他光源,仅用 LED 灯照明。受尺寸效应影响,无裂隙发育试样的水分耗散速率与裂隙发育试样的水分耗散速率存在部分差异,无裂隙发育试样在达到与对应裂隙发育试样相同含水率时停止脱湿试验。每组试样脱湿时间间隔 90 min,第 12 组试样脱湿时长为 1080 min。

每次对试样拍摄完成后,选取裂隙发育显著区域置于环刀(61.8 mm × 20.0 mm)中并根据裂隙走向选取平直裂隙面进行切样。试验设备为南京土壤仪器有限公司生产的 ZJ 型应变控制式四联直剪仪,剪切速率控制为 0.8 mm min⁻¹,垂直荷载分别为 25、50、100 和 200 kPa。无裂隙发育试样在达到与裂隙发育试样相同含水率水平时放入直剪仪上进行剪切试验。

根据 Mohr-Coulomb 公式计算试样的抗剪强度,见公式(3)。

$$\tau_f = \sigma \times \tan \varphi + c \quad (3)$$

式中, τ_f 为抗剪强度(kPa); φ 为土壤内摩擦角(°); σ 为作用在剪切面上的轴向荷载(kPa); c 为土壤黏聚力(kPa)。

1.4 图像处理及测量参数

为减少边缘效应的影响,以图片中心为圆心,8.5 cm 为半径截取裂隙分布区域,尺寸为 2450 × 2450 像素,参照张展羽等研究^[12],采用 Photoshop 对截取图像进行灰度化、二值化和去杂点处理。裂隙提取借鉴已有研究^[13],应用 Image J 提取图中裂隙

面积和裂隙周长几何参数保存至 Excel 后根据公式计算裂隙形态特征参数,采用裂隙发育强度(裂隙面积率和面积-周长比)和裂隙发育复杂度(形状指数和分形维数)综合表征裂隙形态特征参数。相关参数的计算方法见公式(4)~公式(7)^[13]:

$$S_A = \sum A_i / A_0 \times 100\% \quad (4)$$

$$P_A = \sum A_i / P_0 \quad (5)$$

$$F_A = \sum_{i=1}^n [(0.25P_i / \sqrt{S_i}) \times (S_i / S_0)] \quad (6)$$

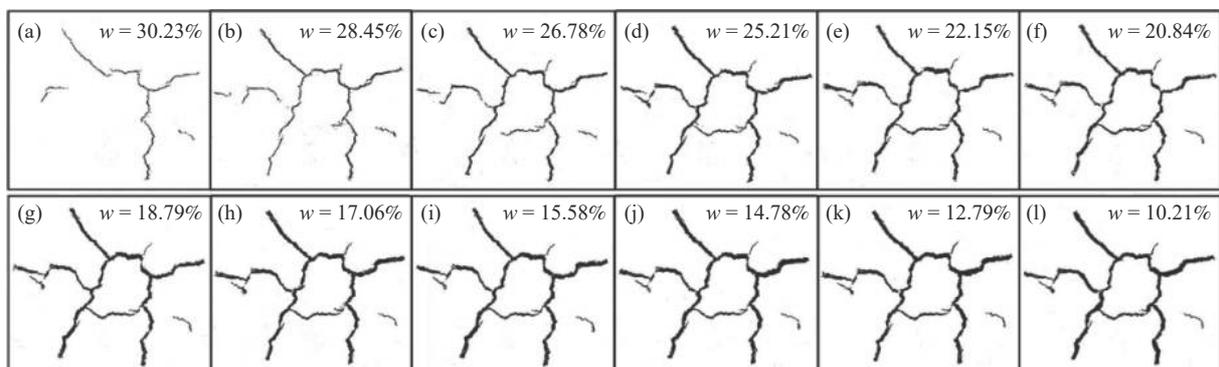
$$C_A = \sum_{i=1}^n [2 \ln(0.25P_i) / \ln(S_i)] / N \quad (7)$$

式中, S_A 为裂隙面积率(%), A_i 为第 i 条裂隙面积(cm²), A_0 为试样表面总面积(cm²), P_A 为面积-周长比(cm), P_0 为裂隙网络的总轮廓周长(cm), F_A 为裂隙形状指数, P_i 为裂隙周长(cm), S_i 为裂隙面积(cm²), S_0 为裂隙总面积(cm²), C_A 为裂隙分形维数, N 为裂隙条数。

2 结果与分析

2.1 紫色土埂坎裂隙发育过程

埂坎土壤裂隙发育随水分耗散具有明显的阶段性特征。综合考虑 4 个裂隙参数,裂隙发育过程总体可分为快速发育(I)、缓慢扩展(II)和基本稳定(III)3 个阶段(图 1 和图 2)。



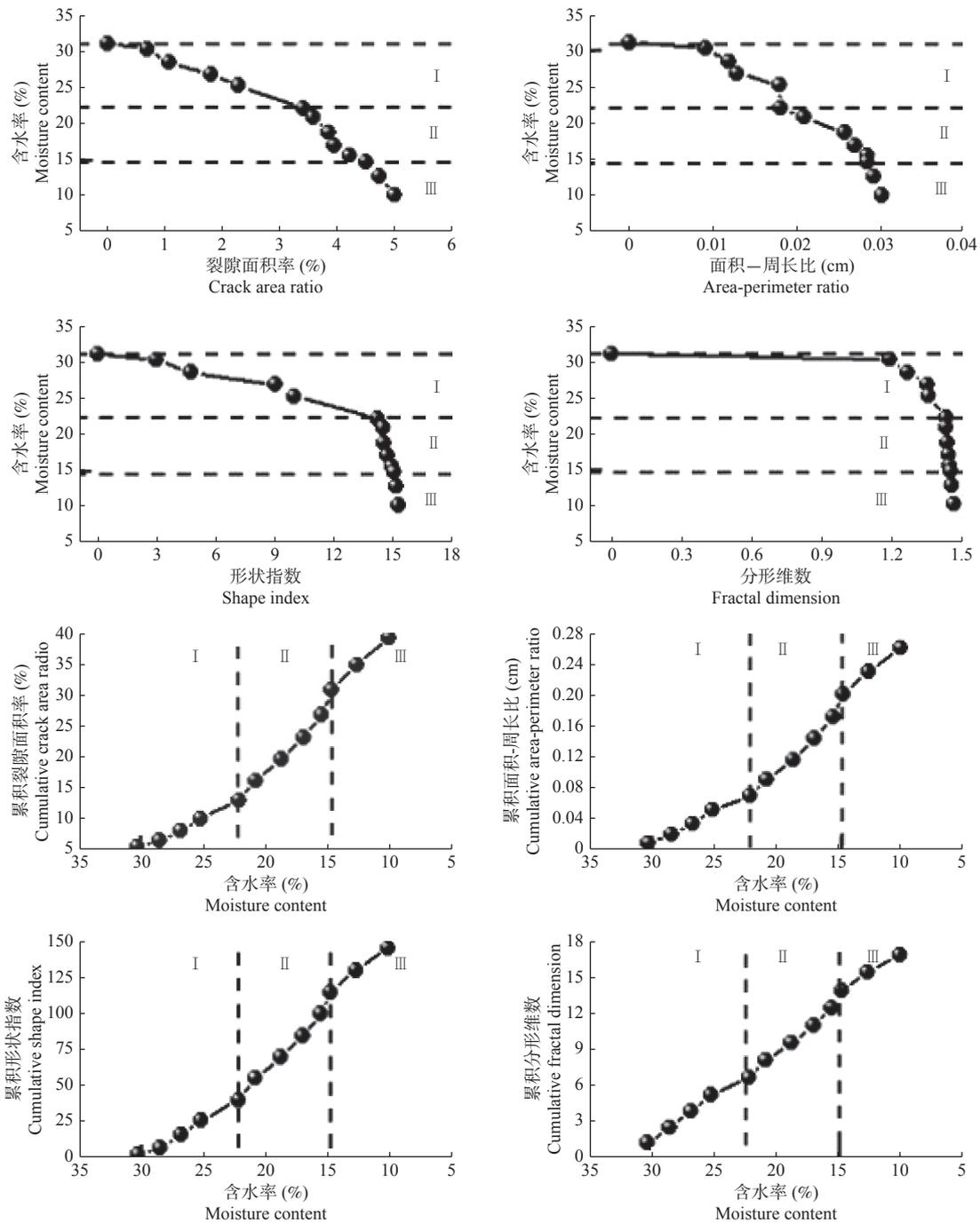
注:w 表示含水率。

图 1 紫色土坡耕地埂坎土壤裂隙发育过程

Fig.1 Development process of soil cracks on the bunds in purple soil sloping farmlands

阶段 I (图 1a~图 1e): 水分耗散初期,含水率由 31% 耗散至 22% 的过程中,土体表面结构相对

松散处产生细微裂隙,并沿裂隙尖端向前延伸和弯曲,相邻裂隙随水分耗散逐渐变宽变深并衍生新裂



注: I 表示裂隙快速发育阶段; II 表示裂隙缓慢扩展阶段; III 表示裂隙基本稳定阶段。下同。

图 2 紫色土坡耕地地坎裂隙参数变化

Fig.2 Variation of crack parameters of the bunds in purple soil sloping farmlands

隙, 新裂隙近似垂直于原生裂隙生长并逐渐贯通形成裂隙网络, 各裂隙随水分的持续耗散逐渐变宽变深。此阶段试样表面裂隙从无到有, 裂隙发育强度和裂隙发育复杂度快速增大, 裂隙面积率、面积一周长比、形状指数和分形维数的变化速率依次为 394%、99%、379% 和 20%。

阶段 II (图 1e ~ 图 1j): 随水分持续耗散, 含

水率由 22% 耗散至 14%, 试样表面不再出现新裂隙, 原生裂隙略有变宽变深, 裂隙缓慢扩展。此阶段的裂隙面积率、面积一周长比、形状指数和分形维数的变化速率依次为 32%、57%、6% 和 2%。

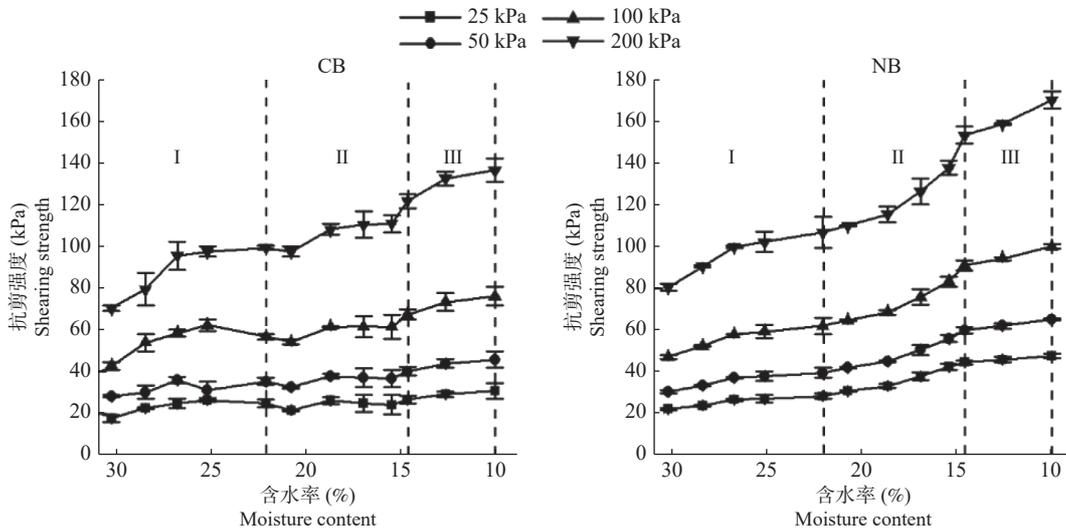
阶段 III (图 1j ~ 图 1l): 随水分进一步耗散至试验结束 (14% ≥ w > 10%), 裂隙形态结构已无明显变化, 裂隙发育基本稳定。此阶段, 裂隙面积率、

面积—周长比、形状指数和分形维数的变化速率仅为 11%、6%、1% 和 1%。

2.2 裂隙发育对埂坎土壤抗剪强度的影响

裂隙发育 (CB) 和无裂隙发育 (NB) 试样的土壤抗剪强度均随含水率衰减而增大, 且在同一含水率下随垂直荷载的增大而增大, 二者土壤抗剪强度随含水率变化具有高度的相似性 (图 3)。裂隙发育试样的土壤抗剪强度变化于 17.75 ~ 136.27 kPa。阶段 I, 在 25、50、100 和 200 kPa 垂直荷载下, 土壤抗剪强度分别增长 7.17、7.08、13.97 和 28.78 kPa, 增长速率依次为 40%、25%、33% 和 41%, 平均增

长 35%, 是阶段 II 和阶段 III 土壤抗剪强度平均增长率的 2.2 倍和 2.6 倍。无裂隙发育试样的土壤抗剪强度在各垂直荷载下总体高于裂隙发育试样, 数值变化于 22.23 ~ 169.62 kPa。阶段 I, 土壤抗剪强度在各垂直荷载下增长 6.23 ~ 26.11 kPa, 平均增长率为 30%, 是裂隙发育试样增长率的 0.9 倍; 阶段 II ~ 阶段 III, 无裂隙发育试样的土壤抗剪强度随水分耗散继续增长, 在各垂直荷载下增长 15.99 ~ 67.50 kPa 和 3.09 ~ 16.67 kPa, 平均增长率分别为 66% 和 14%, 是裂隙发育试样增长率的 4.1 倍和 1.01 倍。



注:CB 表示有裂隙发育; NB 表示无裂隙发育。

图 3 埂坎土壤抗剪强度随含水率的变化

Fig.3 The variation of soil shearing strength with moisture content in bunds

为进一步探讨裂隙发育对埂坎土壤抗剪强度的影响, 对裂隙参数与埂坎土壤抗剪强度的相关关系进行分析。由于裂隙参数和埂坎土壤抗剪强度随水分耗散的变化规律具有一致性, 以垂直荷载 200 kPa 下裂隙面积率和形状指数与裂隙发育试样土壤抗剪强度的相关关系为例进行分析 (图 4)。试验范围内, 裂隙参数与土壤抗剪强度总体呈非线性增长变化。阶段 I, 裂隙面积率由 0.7% 增长至 3.4%, 形状指数由 2.9 增长至 14.1, 变化速率分别为 394% 和 379%, 同期裂隙发育试样土壤抗剪强度的变化速率为 41%。阶段 II, 裂隙面积率、形状指数、裂隙发育试样土壤抗剪强度的变化速率分别为 32%、6% 和 22%, 此阶段的裂隙参数和土壤抗剪强度的增长速率均显著减缓。阶段 III, 裂隙发育基本稳定, 裂隙面积率、形状指数和裂隙发育试样土壤抗剪强度的变化速率仅为 11%、1% 和 12%。从阶段 I 到阶段 III, 裂隙发

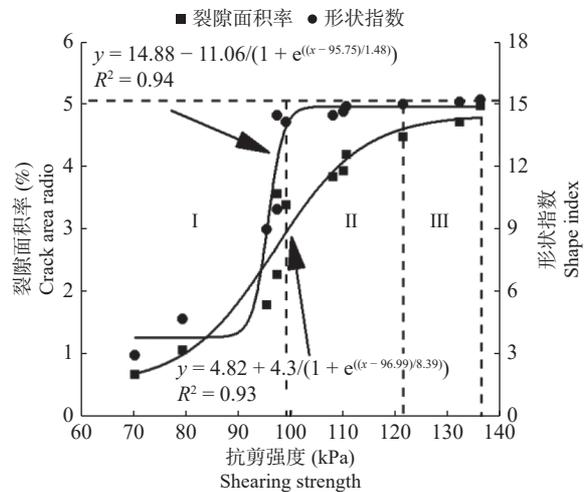


图 4 埂坎土壤裂隙参数与抗剪强度散点图

Fig.4 Scatter plot of soil crack parameters and shearing strength in bunds

育试样土壤抗剪强度平均衰减 7.39 kPa、16.83 kPa 和 30.27 kPa，衰减率为 8%、13% 和 19%，呈加速衰减变化。此外，裂隙参数与土壤抗剪强度的相关关系可用多项式拟合，拟合方程的决定系数均大于 0.9，拟合效果较好。相关分析表明（表 2），埂坎土壤抗剪强度与裂隙发育强度和裂隙发育复杂度呈极显著正相关关系（抗剪强度与裂隙面积率、面积—周长比、形状指数和分形维数的 Pearson 系数分别为 0.93、0.92、0.87 和 0.84， $P < 0.01$ ），表明埂坎土壤裂隙参数中，裂隙面积率与土壤抗剪强度的相关性最强。

表 2 埂坎土壤裂隙参数与抗剪强度相关系数

Table 2 The correlation coefficient between soil crack parameters and soil shearing strength in bunds

项目 Item	裂隙面积率 Crack area ratio	面积—周长比 Area-perimeter ratio	形状指数 Shape index	分形维数 Fractal dimension
抗剪强度	0.93**	0.92**	0.87**	0.84**

注：**代表显著相关（ $P < 0.01$ ）。

2.3 裂隙发育对埂坎土壤抗剪强度参数的影响

相较于无裂隙发育试样，裂隙发育影响埂坎土壤黏聚力比较显著，而对内摩擦角影响较小（图 5）。裂隙发育试样的黏聚力随水分耗散的变化都没超过 5 kPa，三个阶段分别增长 2.05 kPa、-1.03 kPa 和 2.50 kPa，平均增长 9%，明显的谷值（10.97 kPa）出现在质量含水率 20% 左右。无裂隙发育试样的黏聚力随水分耗散呈近似线性增长变化，数值变化于 13.91 ~ 30.10 kPa，总体均高于裂隙发育试样，为裂隙发育试样黏聚力的 1.01 ~ 2.2 倍。阶段 I，裂隙发育试样的黏聚力随水分耗散先增大后减小，较无裂隙发育试样总体衰减 0.23 ~ 3.00 kPa；阶段 II 和阶段 III，裂隙发育试样的黏聚力较无裂隙发育试样分别衰减 3.00 ~ 15.95 kPa 和 14.33 ~ 15.68 kPa，分别在质量含水率 10% 和 20% 左右时出现最大值和最小值。此外，裂隙发育试样的黏聚力在三个阶段的平均衰减率分别为 8%、44% 和 51%，呈加速衰减变化。

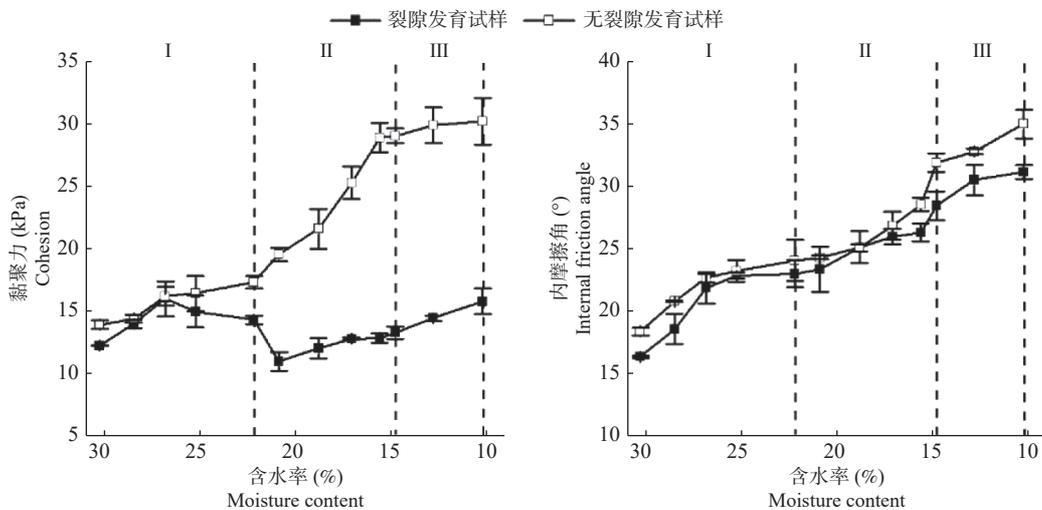


图 5 埂坎土壤抗剪强度参数随含水率的变化

Fig.5 The variation of soil shearing strength parameters with moisture content in bunds

裂隙发育和无裂隙发育试样的内摩擦角在各阶段均随水分耗散呈近似线性增长变化。裂隙发育试样的内摩擦角随水分耗散总体变化于 16.40° ~ 31.07°，三个阶段分别增长 5.65°、7.75° 和 3.10°，平均增长 24%，较无裂隙发育试样总体衰减 0.05° ~ 3.83°，其中阶段 I 的内摩擦角衰减 0.35° ~ 2.20°，平均衰减 6%，为阶段 II 和阶段 III 内摩擦角平均衰减率的 1.03 倍。

结合图 3 和图 5 可以看出，土壤抗剪强度及其

参数在裂隙发育的不同阶段存在显著差异。快速发育阶段（ $31\% \geq w > 22\%$ ），裂隙发育和无裂隙发育试样的土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角无明显差异；随含水率衰减，裂隙通过影响土壤黏聚力改变土壤抗剪强度，裂隙发育和无裂隙发育试样的土壤抗剪强度和黏聚力的差值逐渐增大，裂隙发育对土壤抗剪强度的影响表现为阶段 III > 阶段 II > 阶段 I。相较于无裂隙发育试样，裂隙发育对土壤黏聚力影响较大，而对内摩擦角影响较小，裂隙发育和无裂

隙发育试样抗剪强度的差异主要取决于土壤黏聚力。试验范围内,裂隙发育试样的黏聚力随水分耗散的变化幅度不大,内摩擦角则随水分耗散呈近似线性增长变化,裂隙发育试样的土壤抗剪强度主要受内摩擦角影响。

3 讨论

3.1 裂隙发育过程对土壤抗剪强度的影响

含水率对土壤抗剪强度有直接影响,含水率衰减导致土体收缩产生裂隙,裂隙的产生进一步影响土壤抗剪强度(图6)。土体失水过程中,表层水分蒸发,下层水分受毛管水作用向上迁移,毛管水作用与表面孔隙水的张力作用形成弯液面,弯液面的表面张力连同毛管水作用和重力作用使土粒在水平方向相互靠拢,垂直方向发生固结,土体收缩^[14]。当土粒收缩产生的张拉应力超过土体本身的抗拉强度阈值时裂隙产生,裂隙形成的裂隙面会加速局部水分蒸发,破坏区域应力场平衡,表面应力和毛管水作用将向裂隙两边重新排列直至平衡,同时也会使

裂隙面土粒失去部分约束,其所受张拉应力向下转移并在裂隙尖端集中,受毛管水和张拉应力作用,裂隙不断变宽变深^[15-16]。此时,无裂隙发育试样的土壤抗剪强度主要受含水率影响,土粒间的水膜厚度随含水率衰减逐渐减小,黏结力和咬合力逐渐增大,土壤抗剪强度及其参数也随之增大。裂隙发育试样受含水率和裂隙的双重影响,裂隙发育破坏土体结构完整性,使土粒间的黏结力减弱,土壤黏聚力减小,内摩擦角主要受土粒间的摩擦力和咬合力影响,裂隙发育对其影响较小^[17],土壤抗剪强度总体有所下降。随水分的持续耗散,土体进一步失水收缩,土体含水率梯度逐渐稳定,裂隙发育也随之趋稳。此时,受单一含水率影响的无裂隙发育试样逐渐收缩,土体结构变得紧密,土粒间的黏结力和咬合力逐渐增大,使土壤黏聚力和内摩擦角均增大,土壤抗剪强度总体增大。裂隙发育试样受含水率衰减及裂隙发育趋稳影响,土壤抗剪强度及其参数总体有所增大,但裂隙产生的破裂面依旧存在,土体结构不完整,土壤抗剪强度总体小于无裂隙发育试样。

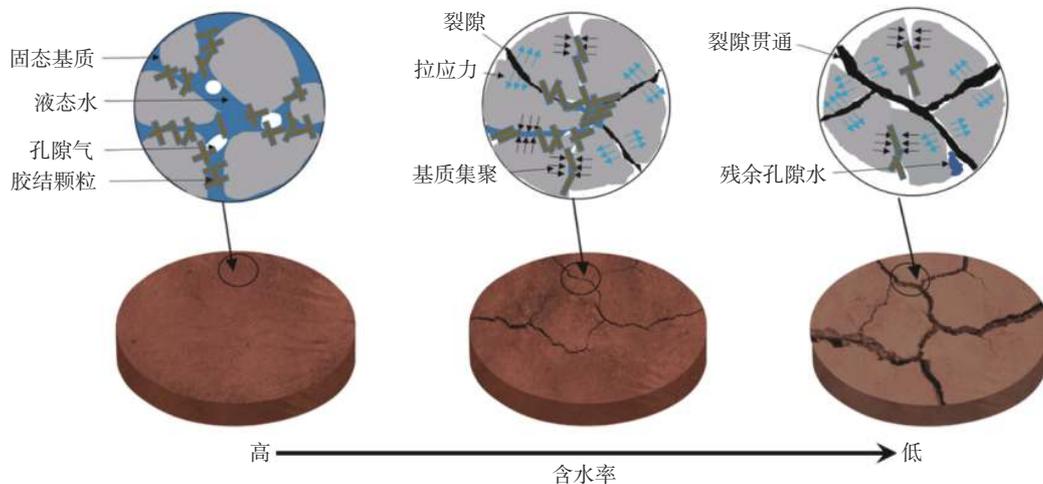


图6 埂坎土壤裂隙发育过程示意图

Fig.6 The schematic diagram of crack development process in bund soil

本研究裂隙发育强度和裂隙发育复杂度总体先迅速增长后缓慢扩展并趋于稳定,裂隙发育规律与李颖等^[18]研究结果相似,但在裂隙发育阶段的划分上存在部分差异,可能是采样间隔和试验土样的差异造成的。本研究设计的采样间隔为90 min,相较于李颖等^[18]研究多30 min;所用土样的粉黏粒占比较李颖等^[18]研究更大,同一条件下裂隙发育更明显。此外,土壤裂隙发育受含水率的影响较大,且在高含水率时影响更明显^[18]。受采样间隔和试验土样差异

的影响,本研究的裂隙发育错过了短暂的起始阶段,总体呈先迅速增长后缓慢扩展并趋于稳定变化。本研究裂隙发育试样的土壤抗剪强度总体小于无裂隙发育试样,抗剪强度及其参数的衰减情况在不同含水率梯度下存在差异,低含水率($22\% \geq w > 10\%$)时的最大土壤抗剪强度衰减率超过42%,最大黏聚力衰减率达55%,为高含水率($31\% \geq w > 22\%$)时最大土壤抗剪强度衰减率的4.6倍和最大黏聚力衰减率2.1倍,初步认为低含水率时的裂隙发育对土壤抗

剪强度的影响更显著。

3.2 不同类型土壤裂隙发育对抗剪强度的影响

研究表明, 随土壤抗剪强度的增长, 裂隙面积率的增长趋势与含水率衰减的变化趋势一致, 裂隙发育下的土壤黏聚力随含水率的衰减呈波动变化, 可以推定土壤黏聚力随裂隙面积率的增长呈波动变化, 这一结果与成玉祥^[19] 等对黄土裂隙密度与抗剪强度的研究结果较为一致。主要是因为高含水率下裂隙发育对土壤抗剪强度的影响较小, 土体以干燥收缩为主, 土粒间间距减小, 咬合力增强, 黏聚力增大; 随水分的持续耗散, 含水率对土体强度的影响减弱, 裂隙对土体强度的影响增强, 裂隙破坏土体结构使土粒间的黏结力减弱, 黏聚力开始降低;

当含水率和裂隙发育的耦合作用大于裂隙产生的破坏作用时, 土壤黏聚力开始增长, 使土壤黏聚力随裂隙率的增长呈波动式变化^[19]。本研究的土壤黏聚力在裂隙发育停止时的衰减率达 47.6%, 同一裂隙密度条件下的黄(棕)土^[9,20-21] 和红黏土^[22-23] 的黏聚力衰减率变化于 25.2%~45.8%, 均小于紫色土(表 3)。此外, 裂隙发育下的红黏土^[24] 在质量含水率 10% 时的黏聚力衰减率为 28%, 仍小于紫色土的黏聚力衰减率, 这可能与紫色土的黏粒含量较少有关。土壤抗剪强度与土壤黏粒含量呈正相关, 黏粒含量越高, 黏化作用越强, 而黏粒含量较低土壤的黏结能力较弱, 土体更易受裂隙破坏, 土壤抗剪强度衰减更明显^[25]。

表 3 裂隙参数与土壤抗剪强度的相关研究结果
Table 3 Results of study on correlation between crack parameters and soil shearing strength

土样来源 Source of soil sample	试验方法 Test type	土壤类型 Soil type	试验参数 Test parameter		抗剪强度参数 Shearing strength parameter		裂隙密度 Crack area ratio (%)	黏聚力衰减率 Rate of cohesion decay (%)	来源 Source
			ρ_d (g cm ⁻³)	w (%)	c (kPa)	φ (°)			
边坡	直剪	黄棕壤	1.5	10.0	12.0	29.0	4.9	27.6	汪时机等 ^[9]
工地	直剪	黄壤	1.8	17.0	41.6	12.5	4.9	25.9	李科成等 ^[20]
工地	直剪	黄壤	1.8	21.4	29.2	7.1	4.9	25.2	韦秉旭等 ^[21]
公路	三轴	红壤	1.6	23.0	97.0	6.5	4.9	45.8	陈开圣 ^[22]
工地	直剪	红壤	1.9	16.8	18.9	10.4	4.9	38.8	刘馥铭等 ^[23]
边坡	直剪	红壤	1.5	10.0	761.0	52.0	-	28.0	黄丽华等 ^[24]
埂坎	直剪	紫色土	1.4	10.0	15.8	31.1	4.9	47.6	本研究

注: 表中“-”代表无数据, ρ_d 为干密度, w为含水率, c为黏聚力, φ 为内摩擦角。

本研究通过室内模拟试验分析了紫色土坡耕地埂坎土壤的裂隙发育过程及其对抗剪强度的影响, 试验条件可能与野外实际情况存在差异, 但考虑到裂隙发育具有一定的分形特征, 试验中截取一小部分测试抗剪强度参数, 扰动条件变化不大, 数值可能存在绝对值上的差异, 但反映的规律具有一致性。此外, 文中所述裂隙提取方法仅适用于二维平面, 无法对试样内部裂隙发育情况进行分析, 后续研究中可以对试样裂隙进行三维空间分析, 通过裂隙连通性和深度等参数更好地反映裂隙发育与抗剪强度的相关关系。

4 结论

(1) 紫色土坡耕地埂坎土壤裂隙发育具有明显的阶段性特征, 可分为快速发育、缓慢扩展和基本稳定三个阶段。

(2) 裂隙发育显著影响埂坎土壤抗剪强度, 裂隙发育和无裂隙发育试样的土壤抗剪强度随含水率

变化具有高度的相似性。裂隙发育试样的土壤抗剪强度总体小于无裂隙发育试样且与裂隙参数呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。裂隙发育的阶段性对土壤抗剪强度及其参数的影响存在差异, 快速发育阶段 ($31\% \geq w > 22\%$), 裂隙发育和无裂隙发育试样的土壤抗剪强度、黏聚力和内摩擦角无明显差异; 缓慢扩展和基本稳定阶段 ($22\% \geq w > 10\%$), 裂隙通过影响土壤黏聚力对抗剪强度影响较大。

(3) 裂隙发育和无裂隙发育试样抗剪强度的差异主要取决于土壤黏聚力。相较于无裂隙发育试样, 裂隙发育显著影响土壤黏聚力, 而对内摩擦角影响较小, 裂隙发育试样的土壤抗剪强度主要受内摩擦角影响。

参考文献:

- [1] Yan Y, Zhen H C, Zhai X Y, et al. The role of vegetation on earth bunds in mitigating soil erosion in Mollisols region of Northeast China[J]. *Catena*, 2021, 196: 104927.
- [2] Mekuriaw A, Heinimann A, Zeleke G, et al. Factors influencing

- the adoption of physical soil and water conservation practices in the Ethiopian highlands[J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2018, 6(1): 23 – 30.
- [3] 李进林, 韦 杰. 三峡库区坡耕地埂坎类型、结构与利用状况[J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1): 229.
- [4] Wei J, Shi B L, Li J L, et al. Shear strength of purple soil bunds under different soil water contents and dry densities[J]. *Catena*, 2018, 166: 124 – 133.
- [5] Zhang J, Zhu D, Zhang S H. Shallow slope stability evolution during rainwater infiltration considering soil cracking state[J]. *Computers and Geotechnics*, 2020, 117: 103285.
- [6] 周明涛, 杨 森, 秦健坤, 等. 土壤裂隙研究的回顾与展望[J]. *土壤通报*, 2017, 48(4): 988 – 995.
- [7] Luo Y L, Wei J, Tang Q, et al. Water seepage and retention in purple soil bunds on sloping farmland in the Three Gorges Reservoir area, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(9): 1410 – 1422.
- [8] 陈安强, 张 丹, 雷宝坤, 等. 元谋干热河谷变性土收缩变形对其裂缝发育及土体强度的影响[J]. *土壤通报*, 2015, 46(2): 341 – 347.
- [9] 汪时机, 杨振北, 李 贤, 等. 干湿交替下膨胀土裂隙演化与强度衰减规律试验研究[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(5): 113 – 122.
- [10] Xie Y, Zhang B, Liu B, et al. Shrinkage cracking and strength deterioration of red clay under cyclic drying and wetting[J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(3): 2574 – 2578.
- [11] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- [12] 张展羽, 朱文渊, 朱 磊, 等. 根系及盐分含量对农田土壤干缩裂缝发育规律的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 83 – 89.
- [13] 校 亮, 熊东红, 张宝军, 等. 干热河谷冲沟侵蚀劣地坡积区土体性质与裂缝形态发育特征[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(6): 81 – 86.
- [14] 唐朝生, 施 斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(8): 1415 – 1423.
- [15] 曾 浩, 唐朝生, 林 鑫, 等. 土体干缩裂隙发育方向及演化特征的层间摩擦效应研究[J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(6): 1172 – 1180.
- [16] 唐朝生, 施 斌, 刘 春, 等. 影响黏性土表面干缩裂缝结构形态的因素及定量分析[J]. *水利学报*, 2007, (10): 1186 – 1193.
- [17] 常留成, 王红雨, 薛凯喜. 不同干燥温度条件下非饱和红黏土裂隙演化及抗剪强度变化规律研究[J/OL]. *工程地质学报*. [2022-06-24]. <https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-603>.
- [18] 李 颖, 韦 杰, 罗华进, 等. 水分耗散下紫色土埂坎裂隙发育及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1): 38 – 44.
- [19] 成玉祥, 曹宝宝, 张大伟. 裂隙密度对黄土抗剪强度影响的试验研究[J]. *科学技术与工程*, 2019, 19(28): 284 – 289.
- [20] 李科成, 邓 璞, 罗 雪. 重塑膨胀土细观裂隙参数与抗剪强度的关系分析[J]. *公路工程*, 2015, 40(1): 190 – 193, 204.
- [21] 韦秉旭, 黄 震, 高 兵, 等. 干湿循环作用下膨胀土裂隙演化规律及其对抗剪强度影响[J]. *公路工程*, 2015, 40(4): 127 – 130, 140.
- [22] 陈开圣. 干湿循环下红黏土裂隙演化规律及对抗剪强度影响[J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(1): 89 – 95.
- [23] 刘馥铭, 邵 曼. 红黏土裂隙发育及与低应力抗剪强度的关系研究[J]. *湖南交通科技*, 2015, 41(1): 17 – 20.
- [24] 黄丽华, 刘顺青. 考虑裂隙影响的红黏土边坡浅层稳定性分析[J]. *华南地震*, 2022, 42(2): 102 – 108.
- [25] 雷 洁, 张国明, 刘连友, 等. 土壤抗剪强度测定与影响因素研究进展[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(4): 486 – 492.

The Development of Soil Cracks on Bunds in Purple Soil Sloping Farmlands and Its Influence on the Soil Shearing Strength

XIE Si-kai¹, WEI Jie^{1,2*}, KANG Jin-cheng²

(1. *Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China*; 2. *Chongqing Observation and Research Station of Earth Surface Ecological Processes in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China*)

Abstract: [Objective] The aim was to explore the crack development law of the bund and its effect on the soil shearing strength in the process of moisture dissipating, and in order to provide a scientific basis for revealing the instability mechanism of the bund. [Method] A typical bund in purple soil sloping farmland was chosen as a case to explore the relationship between crack development and soil shearing strength through simulation experiments to observe the moisture dissipating and crack development process of the bund soil and test the soil's shearing strength. [Result] The development of cracks on the bund had obvious stage characteristics, and the area ratio, area perimeter ratio, shape index and fractal dimension of cracks generally showed that they increased rapidly at first, then expanded slowly and tended to be stable. The stages of crack development had different effects on the soil shearing strength and its parameters. The shearing strength, cohesion and internal friction angle of the samples with crack development and no crack development had no significant changes in rapid development phase ($31\% \geq w > 22\%$), while the crack development had a greater impact on the soil shearing strength and cohesion in the slow expansion and basically stable phase ($22\% \geq w > 10\%$). Under the experimental conditions, the soil shearing strength of the samples with crack development was smaller than that of the samples without crack development as a whole, and the soil shearing strength gradually increased with the moisture dissipating. The difference between the shearing strength of the samples with cracks and no crack depended mainly on the soil cohesion. The soil cohesion tended to be a minimum (10.97 kPa) when the mass fraction of moisture content was at about 20% within testing range. The cohesion of the samples with crack development changed slightly with moisture dissipating, while the internal friction angle increased linearly with moisture dissipating. The shearing strength of the cracked soil was mainly affected by the internal friction angle. [Conclusion] The development of soil cracks in purple soil farmlands has obvious stage characteristics. It has a significant effect on the shearing strength of soil, and it is more obvious when the moisture content is low. The influence of crack development on soil cohesion is greater than that of internal friction angle.

Key words: Soil bund; Soil crack; Shearing strength; Moisture dissipating; Purple soil

[责任编辑: 韩春兰]