

何飞, 穆锐, 韩力, 等. 降雨作用下红黏土边坡的变形及现场剪切试验研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S2): 619-628.

HE Fei, MU Rui, HAN Li, et al. The deformation and field shear test research of red clay slope under rainfall[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S2): 619-628.

降雨作用下红黏土边坡的变形及现场剪切 试验研究

何飞¹, 穆锐², 韩力¹, 邓智平², 王鹏程¹

(1. 贵州中建建筑科研设计院有限公司, 贵州 贵阳 550006; 2. 联勤保障部队工程大学, 重庆 401331)

摘要: 边坡土体的变形特征和抗剪强度是边坡稳定性分析的重要依据。为研究降雨作用下红黏土边坡的变形特征和抗剪强度变化规律, 以实际红黏土边坡工程为例, 考虑降雨作用对边坡土体变形和抗剪强度的影响, 通过对该边坡典型钻孔的侧向变形监测, 得到了红黏土边坡的蠕变特征, 同时对红黏土边坡的3组坡前试样和3组坡体试样进行现场剪切试验。结果表明: 监测期内, 红黏土边坡相同钻孔深度的侧向变形随降雨作用入渗逐渐增大, 同一钻孔土层的侧向变形随钻孔深度的增大而减小, 在土层岩层过渡区存在拐点急剧下降特征, 最后降低至零; 边坡土体的剪应力-剪切位移关系曲线按“弹性变形、屈服变形、硬化变形和破坏变形”四阶段发展变化, 出现了明显的峰值强度和稳定的残余强度, 具有显著的应力-应变软化特征; 给出了坡前试样、坡体试样的峰值强度和残余强度经验模型, 并得到了坡前土体的抗剪强度指标经验值 $c_f=38.760$ kPa、 $\varphi_f=15.9^\circ$ 、 $c_{fr}=34.577$ kPa、 $\varphi_{fr}=12.6^\circ$, 坡体土体的抗剪强度指标经验值 $c_f=33.522$ kPa、 $\varphi_f=10.2^\circ$ 、 $c_{fr}=30.234$ kPa、 $\varphi_{fr}=9.5^\circ$ 。研究成果可为红黏土边坡的稳定性分析、确定抗剪强度参数及类似工程建设提供理论与数据参考。

关键词: 边坡工程; 红黏土; 降雨作用; 侧向变形; 抗剪强度; 现场剪切试验

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S2.097

中图分类号: TU43

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S2-0619-10

The deformation and field shear test research of red clay slope under rainfall

HE Fei¹, MU Rui², HAN Li¹, DENG Zhiping², WANG Pengcheng¹

(1. Guizhou Zhongjian Architectural Research and Design Institute Co., Ltd., Guiyang 550006, Guizhou, China;

2. Joint Logistic Support Force University of Engineering, Chongqing 401331, China)

Abstract: The deformation characteristics and shear strength of slope soil is an important basis for slope stability analysis. In order to study the deformation characteristics and shear strength of laterite clay slope under rainfall, the actual red clay slope engineering is taken as an example, considering the influence of rainfall on the deformation and shear strength of the slope soil,

收稿日期: 2025-01-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(52438004); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2022]一般237)

作者简介: 何飞(1981—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事边坡与地基的设计、检测和加固等方面的研究工作。E-mail: 876262183@qq.com

通信作者: 穆锐(1993—), 男, 讲师, 硕士, 主要从事岩土力学、基础工程及相关方面的教学与科研工作。E-mail: markmugzdx@163.com

and the creep characteristics of the red clay slope are obtained through the lateral deformation monitoring of the typical borehole of the slope. Field shear tests on three groups of pre-slope samples and three groups of slope samples of the laterite clay slope are conducted. The results show that during the monitoring period, the lateral deformation of the red clay slope at the same borehole depth gradually increases with the infiltration of rainfall, and the lateral deformation of the same borehole soil layer decreases with the increase of borehole depth. The shear stress-shear displacement relationship curve of slope soil develops and changes according to the four stages of " elastic deformation, yield deformation, hardening deformation and failure deformation" has significant stress-strain softening characteristics, and there are obvious peak strength and stable residual strength. The empirical model of the peak and residual strength of the pre-slope specimen has been provided and the slope specimen and the empirical shear strength index of the pre-slope soil body are given as $c_f=38.760$ kPa、 $\varphi_f=15.9^\circ$ 、 $c_{fr}=34.577$ kPa、 $\varphi_{fr}=12.6^\circ$, and the empirical values of shear strength index of soil body of slope body $c_f=33.522$ kPa、 $\varphi_f=10.2^\circ$, and $c_{fr}=30.234$ kPa、 $\varphi_{fr}=9.5^\circ$. The research result can provide theoretical and data reference for the stability analysis of red clay slopes, determination of shear strength parameters and similar engineering construction.

Keywords: slope engineering; red clay; rainfall action; lateral deformation; shear strength; field shear tests

0 引言

红黏土通常是指在亚热带温湿气候条件下, 碳酸盐类岩石经第四纪以来风化而成的残积、坡积或残-坡积形成的高塑性黏土, 因富含铁、铝氧化物等胶结物呈褐红色、棕红色或黄褐色, 俗称红土。广泛分布在我国的云南、广西、贵州、湖南、江西及广西等省份^[1-2]。工程实践表明, 红黏土因具有高孔隙比、高含水量、高塑性以及高强度等特点, 其抗剪强度指标成为工程设计、施工与应用的重要参数^[3-4]。近年来, 通过理论分析、数值模拟、试验研究、电镜扫描等研究方法研究了含水率、围压、剪切速率等对红黏土抗剪强度指标的影响^[5-7], 得到了含水率、围压等条件与抗剪强度间的关系, 为红黏土在工程应用中的相关理论设计与施工技术提供有益参考。

红黏土的强度特性虽与其他土体具有相似性, 但也存在较大差异, 特别是红黏土在干湿循环作用、降雨作用等作用下, 其力学性质差异表现较为明显。近年来, 诸多学者对干湿循环作用、降雨作用下的土体抗剪强度指标进行研究, 同时对一些特殊土体进行现场剪切试验。在干湿循环作用下, LIU 等^[8]、刘旻等^[9]、吴珺华等^[10]分别对红黏土和膨胀土边坡开展了室内模型试验和现场剪切试验研究, 得到了干湿循环作用下红黏土和膨胀土边坡的抗剪强度变化规律。在降雨作用下, 祁昊等^[11-12]、刘惠江等^[13]分别对冰水堆积体角砾土和树种根系固土进行剪切试验研究, 结果表明降雨溶浸后角砾土、膨胀土试样的结构变得松散、黏聚力降低, 为类似工程的抗剪强度分析提供依据。此外, 张建华

等^[14]对黄土、冰碛土、卵砾石土、砾石土进行现场剪切试验, 对上述土体的抗剪强度指标变化进行详细分析, 相较于室内试验的理想受力状态, 现场剪切试验与工程中土体的实际受力状态更接近, 研究结论可为工程设计提供参考依据。上述研究表明关于红黏土的研究, 大多数集中在红黏土抗剪强度的室内试验研究, 对红黏土边坡的现场剪切试验研究, 特别是在降雨作用下红黏土边坡的蠕变特征及抗剪强度指标变化规律方面的研究还很缺乏。

鉴于此, 本文结合实际工程案例, 通过地质勘探、地震勘探、变形监测、现场剪切试验等研究方法, 研究红黏土边坡的侧向变形特征、剪切变形及强度特征, 分析边坡典型剖面的孔深-位移变形、剪切变形、抗剪强度指标变化规律及作用机制, 以期能为类似工程提供理论与数据支撑。

1 边坡工程概况及红黏土的基本特征

1.1 工程概况

红黏土边坡位于贵阳市内, 如图 1 所示。边坡场地位于山地斜坡-阶地-沟谷地带, 区域地形高程差约 234 m, 呈阶梯形, 第一阶标高约为 1062~1108 m, 第二阶标高约为 1108~1176 m, 第三阶标高约在 1176~1296 m, 在第三阶后有一圆弧形的构造盆地(盆地斜), 整个边坡走向长约 235 m, 坡顶至坡脚的坡面距离约 130~180 m, 边坡土层的平均厚度约为 8.46 m。边坡范围位于第一阶至第二阶内, 场地地形总体呈“V”字型的沟壑, “V”字型的端部为一相对平坦阶地, 呈现边坡两侧地势相对较低的地形地貌特征。

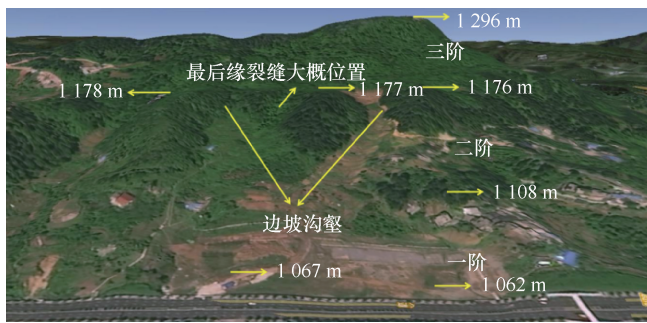


图1 红黏土边坡概况

边坡附近有一正断层, 局部褶曲或挠曲多变, 地层产状有一定变化, 总体向息烽构造盆地倾斜, 场区地层产状约 $190^{\circ} \sim 255^{\circ} \angle 24^{\circ} \sim 35^{\circ}$, 平均值约为 $225^{\circ} \angle 30^{\circ}$; 节理裂缝发育, 主要分为两组: ① $35^{\circ} \sim 66^{\circ} \angle 50^{\circ} \sim 87^{\circ}$ 、② $125^{\circ} \sim 175^{\circ} \angle 56^{\circ} \sim 76^{\circ}$ 。由于红黏土边坡经常受降雨作用的影响, 坡顶开始产生后缘裂缝, 在边坡坡脚已形成新生的裂缝, 如图2所示, 边坡具有一定的蠕变变形特征。

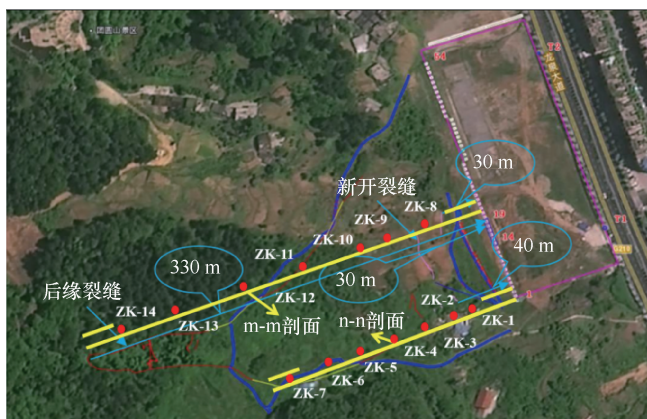


图2 边坡裂缝分布情况

1.2 红黏土的基本特征

根据地质勘察资料, 边坡地层构成为侏罗系自流井群地层, 其下伏地层分别为三叠系狮子山组、二桥组。其中, 边坡岩土层上覆为第四系红黏土, 根据钻孔剖面图结果显示, 边坡土层厚度在 $5.1 \sim 20.0$ m 范围内, 平均厚度约为 10.0 m。值得注意的是, 通过对边坡历史降雨作用分析发现, “V” 字型地貌特征使降雨作用对边坡的抗剪强度变化规律影响较大(见表1)。

由表1可知, 降雨作用对红黏土边坡的整体强度指标影响较大, 特别在天然状态下和饱和状态下抗剪强度指标参数变化较大, 具体表现为天然状态下的抗剪强度明显大于饱和状态下的抗剪强度。由此可见, 降雨作用对红黏土的黏聚力 c 影响幅度大于内摩擦角

φ , 对红黏土重度的影响作用相对较小。天然状态下重度范围在 $18.24 \sim 20.90$ kN/m^3 , 饱和状态为 $20.35 \sim 21.55$ kN/m^3 。

表1 红黏土边坡的抗剪强度指标(历史测试数据)

土体状态	降雨作用	内摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$	内聚力 c/kPa	重度 $\gamma / \text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	测试时间
天然状态	1次	10.6	3.8	19.30	2013年
	2次	11.4	4.55	18.24	2014年
	3次	9.91	20.19	20.90	2016年
	4次	20.1	48.2	19.10	2020年
保护状态	1次	10.2	3.6	20.35	2013年
	2次	10.6	4.34	20.40	2014年
	3次	7.93	16.15	21.55	2016年
	4次	10.8	18.02	20.35	2020年

注: 选取当年降雨量最大的作用定义为1次降雨作用(饱和状态)。

为进一步全面了解红黏土边坡近期的基本特征, 将现场取样深度分别为 4.0 m、 12.5 m 的土样运至实验室进行物理性质试验, 其中室内剪切试验方法参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[15] 相关规定进行, 测得试样比重 G_s 为 2.75 , 干密度为 1.78 g/cm^3 , 试验结果如表2所列。根据液性指数 I_L 判定该土样处于可塑状态。由图3可知, 不同取样深度对抗剪强度指标变化影响相对明显, 内摩擦角 φ 在 $10.20^{\circ} \sim 11.31^{\circ}$ 范围, 黏聚力 c 在 $36.79\text{kPa} \sim 38.42\text{kPa}$ 范围, 测试结果为红黏土边坡的变形特征及现场剪切试验抗剪强度提供参考依据。

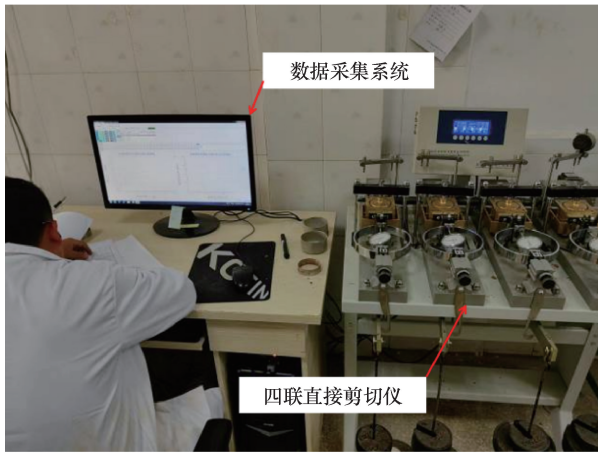
表2 红黏土基本物理特征

类别	$\rho/\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$w/\%$	$w_l/\%$	$w_p/\%$	I_L	I_p
$h=4.0$ m	2.08	22.7	28.8	17.6	0.51	11.2
$h=12.5$ m	2.17	20.0	26.9	12.8	0.46	14.2

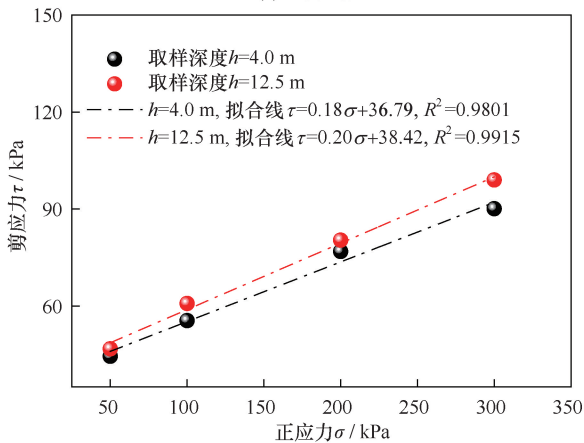
注: h 代表取样深度。

1.3 降雨量特征分析

由表1可知, 降雨作用对边坡土体的抗剪强度参数影响较大。为研究降雨作用对红黏土边坡的变形及剪切强度变化规律, 图4给出了红黏土边坡在2022年4月—2022年6月的降雨量分布情况。由图4可知, 红黏土边坡在2022年4月—2022年6月时间范围内受到连续性降雨作用较明显, 结合降雨量分布特征, 红黏土边坡4月和6月的降雨作用要大于5月的降雨作用。其中, 4月份红黏土边坡的最大日降雨量出现在第二周, 最大日降雨量为 34 mm; 5月份红黏土边坡的最大日降雨量出现在第二周, 最大日降雨量为 26 mm; 6月份红黏土边坡的最大日降雨量出现在第一周, 最大日降雨量为



(a) 室内试验



(b) 正应力-剪应力关系曲线

图3 红黏土剪切试验结果

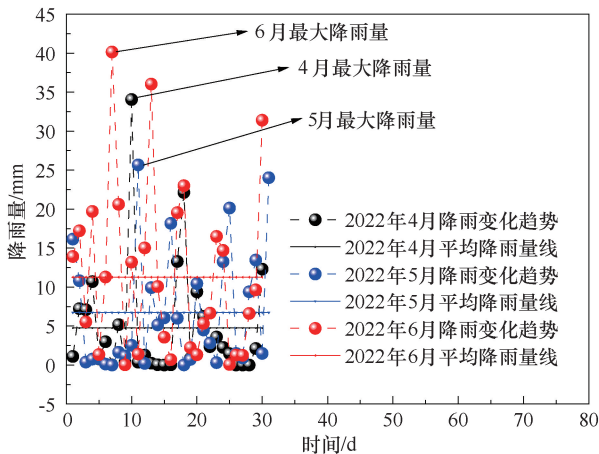


图4 监测期内边坡的降雨情况

40 mm。

综上,红黏土边坡在2022年4月—2022年6月时间范围内经历了三次较大的降雨作用(4月为第一次、5月为第二次、6月为第三次),连续性降雨作用影响了边坡土体的抗剪强度指标。

2 红黏土边坡的侧向变形特征

2.1 侧向变形监测方法与测点布置

根据地质勘察结果,采用主动源进行地震勘探绘制出边坡工程的典型地质剖面 m-m 和 n-n 的地层结构云图,如图 2 所示。钻孔(简称 ZK)编号依次为 ZK-1、ZK-2、ZK-3、ZK-4、ZK-5、ZK-6、ZK-7、ZK-8、ZK-9、ZK-10、ZK-11、ZK-12、ZK-13、ZK-14,其中 m-m 剖面的最大覆土厚度为 19.5 m、最小覆土厚度为 10.0 m; n-n 剖面的最大覆土厚度为 17.8 m、最小覆土厚度为 12.0 m。此外,地震主动源勘探结果显示该边坡的土层与岩层的接触面为“锯齿状”接触,且岩层相对稳定,对边坡的变形影响不大,其稳定性主要决定于土层变形特征与力学强度特征,特别是抗剪强度指标参数的影响。

因此,为了更好地掌握红黏土边坡土体在降雨作用(饱和状态)下的变形情况,基于边坡的标高(H)分布规律,采用侧斜管对选取 ZK-4(H=1 079.7 m)、ZK-5(H=1 091.9 m)、ZK-6(H=1 101.4 m)、ZK-9(H=1 075.4 m)、ZK-10(H=1 076.5 m)、ZK-11(H=1 086.6 m)、ZK-12(H=1 098.2 m)、ZK-13(H=1 112.0 m)、ZK-14(H=1 120.6 m)钻孔进行边坡侧向变形监测。

2.2 孔深-位移变形规律与特征分析

图 5 和图 6 分别给出了边坡剖面 m-m、剖面 n-n 钻孔测点的钻孔深度-侧向变形关系曲线。由图 5、图 6 可知,监测初始阶段,边坡土体的侧向变形随钻孔深度的增加近似呈水平变化趋势,但随降雨渗透作用的增强,在同一监测时间段内,同一钻孔的侧向变形随钻孔深度的增加逐渐减小,在土层与岩层交接处,边坡土体的侧向变形会随着钻孔深度的增加快速下降,当钻孔深度达到临界钻孔深度时,边坡位移将急剧下降至零,最终随钻孔深度的增加,边坡侧向变形不再增加。本节以图 5 中 m-m 剖面 ZK-11 的钻孔深度-侧向变形关系曲线为例进行详细说明。

如图 5(c)所示,ZK-11 钻孔的侧向变形监测结果表明,第一次监测结果显示(2022 年 4 月 4 日),ZK-11 钻孔的侧向变形随钻孔深度的增大呈水平变化趋势;但随着第一次降雨作用在边坡土体中入渗,ZK-11 钻孔的侧向变形逐渐由零开始增大。第二监测结果显示(2022 年 4 月 7 日),地表面的侧向变形为 2.39 mm,随后随钻孔深度的增加逐渐降低变为零;随着第二次降雨作用对边坡土体入渗增强,钻孔 ZK-11 的侧向变形逐渐增大,2022 年 6 月 6 日监测

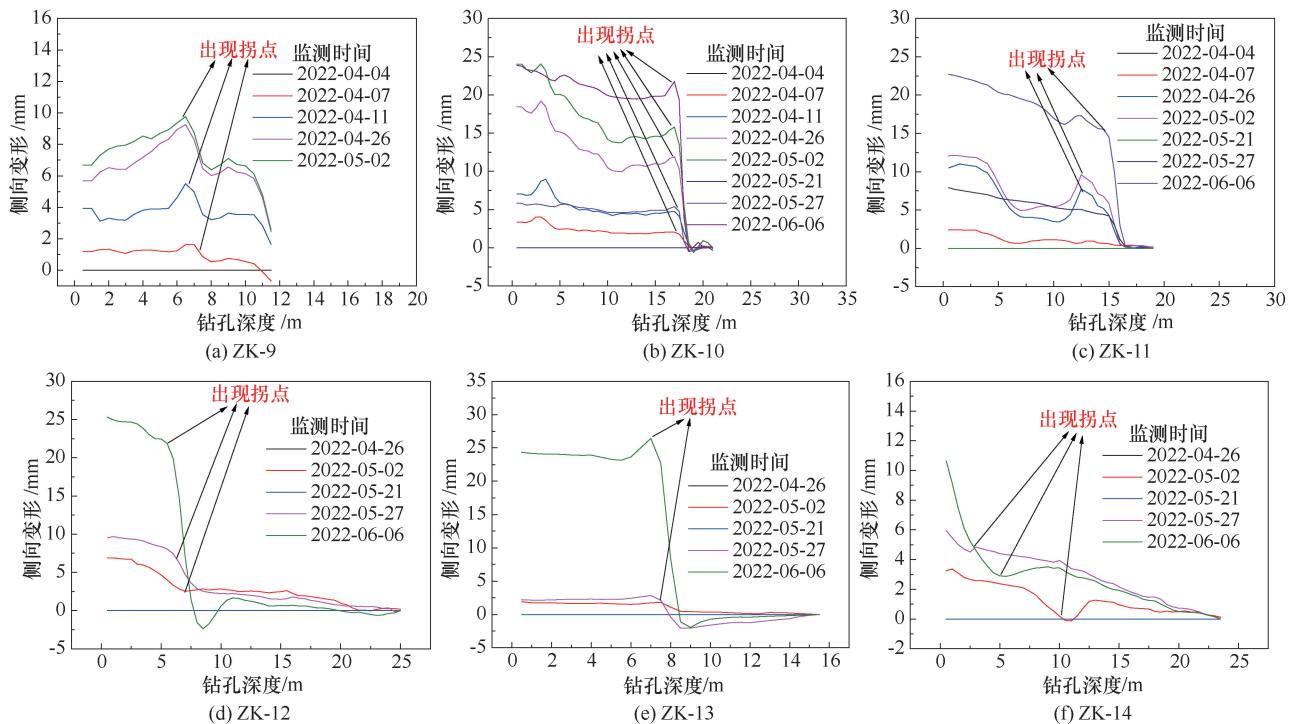


图5 m-m剖面钻孔深度-侧向变形关系曲线

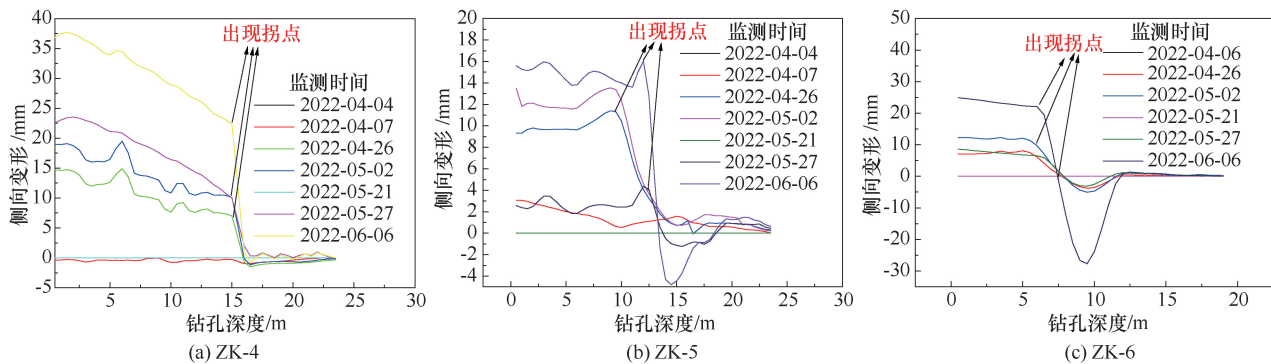


图6 n-n剖面钻孔深度-侧向变形关系曲线

结果显示,地表出现最大侧向变形 22.72 mm, 钻孔深度为 0.5 m, 随着钻孔深度的继续增大, 钻孔侧向变形逐渐呈线性减小变化趋势, 变化幅度为 54.53%; 当钻孔深度为 15 m 时(标高为 1 086.6 m), 钻孔侧向变形出现拐点(侧向变形为 14.54 mm), 到达临界深度(土层岩层交界处); 随后边坡土体的侧向变形随钻孔深度的增加急剧下降, 当钻孔深度变化了 1.5 m, 钻孔的侧向变形迅速降低至 0.24 mm, 且当钻孔深度继续增加时钻孔的侧向变形几乎保持水平变化趋势。同理, 采用同样方法依次对钻孔测点的侧向变形监测结果分析可得, ZK-4 在地面下约 16.0 m (1 079.7 m) 有明显变形拐点特征; ZK-5 在地面下约 14.5 m (1 091.9 m) 有明显变形拐点特征; ZK-6 在地

面下 11.5 m (1 101.4 m) 有明显变形拐点特征; ZK-10 位置在地面下 18.0 m (1 076.5 m) 有明显变形拐点特征; ZK-12 在地面下 10.5 m (1 098.2 m) 开始有明显变形拐点特征; ZK-13 在地面下 9.0 m (1 112.0 m) 开始有明显变形拐点特征; ZK-14 位置在地面下 10.5 m (1 120.6 m) 开始有明显变形拐点特征。基于上述边坡土体侧向变形实时监测结果发现, 在监测期间, 该边坡坡体具备蠕变变形特征。值得注意的是, 图 5(d)、图 5(f), 图 6(b)、图 6(c) 监测结果显示, ZK-12、ZK-13、ZK-5、ZK-6 分别在钻孔深度 7.5~10 m、7.5~10 m、8~10 m、12.5~17.5 m、7.5~12.5 m 范围内出现了反向的侧向变形(负值), 绝对值最大侧向变形出现在 ZK-6, 其最大绝对值为

27.72 mm, 方向为坡面向内。可见, 此钻孔深度范围内的侧向变形对边坡蠕动变形及稳定性是有利的。

2.3 边坡侧向变形影响因素分析与讨论

通过对 m-m 剖面、n-n 剖面钻孔深度-侧向变形关系曲线的变化规律与特征分析发现, 边坡土体的侧向变形与边坡的地质条件、外部的降雨作用、土体的抗剪强度等因素密切相关, 现对其具体影响因素作进一步分析讨论, 具体情况如下。

(1) 地质条件的影响。基于主动源地震勘探结果, 边坡地质条件、构造呈现高低相间现象, 土层与岩层间呈锯齿状接触, 这种接触面有利于边坡的稳定性。首先, 从 m-m 剖面、n-n 剖面的钻孔深度-侧向变形变化规律可以看出, 每个钻孔在表层边坡土体的侧向变形均比较大, 主要原因之一在于地表边坡土体的碎散性较大, 内部黏聚力和内摩擦角等强度指标发挥作用不大, 颗粒间排列不够紧凑, 下滑力明显增大, 产生变形大。其次, 从地质构造和深度-侧向变形特征视角分析发现, 曲线出现拐点变形特征往往发生在边坡土层向岩层过渡区域, 在该过渡段钻孔侧向变形明显减小, 且变化幅度较大, 从拐点变形减小至零。最后, 部分钻孔的侧向变形出现了反向变化的规律(如 ZK-12、ZK-13、ZK-5、ZK-6), 其侧向变形由边坡外向边坡内发生转变, 出现了较大的坡内变形, 边坡土体发生内部滑移。综上可知, 边坡的岩土构造、分布规律、软弱夹层等地质条件是影响边坡土体侧向变形的关键因素之一。

(2) 降雨作用的影响。由图 5、图 6 可知, 监测期内坡体具有蠕动变形的特征, 且随着监测时间增加蠕变特征越显著, 主要原因在于边坡土体受到了多次降雨作用的影响, 降低了边坡土体的抗剪强度, 边坡土体的侧向变形随降雨入渗不断增大。一方面, 降雨作用对边坡土体侧向变形直接产生影响, 在第一次降雨入渗中, 边坡表层土体开始产生侧向变形(ZK-11 变形为 2.41 mm), 但随着降雨入渗作用不断加大, 边坡土体在同一测点的侧向变形增大明显(ZK-11 变形为 22.56 mm)。另一方面, 降雨作用的入渗降低了边坡土体抗剪强度指标, 降雨作用改变了土体颗粒间的相互作用, 成为土颗粒间土体的“润滑剂”, 摩擦力急剧下降, 同时弱化了土体颗粒间的黏聚力, 根据摩尔-库伦定律($\tau=c+\sigma\tan\varphi$)可知, 边坡土体的抗剪强度在降雨作用下急剧下降, 边坡土体的重度明显增大, 边坡稳定性将逐渐下降, 侧向变形逐渐增大, 最终导致边坡土体的抗滑力难以抵抗边坡土体的下滑力, 出现了明显的蠕变特征。

3 红黏土剪切试验及结果分析

3.1 试验方法及试验点布置

为全面了解边坡场地土体的强度特性, 本文对边坡土体进行了现场剪切试验, 试验方法参照《岩土体现场直剪试验规程》(HG/T 20693—2006)相关规定进行, 考虑边坡土体特征的全面性和实际情况, 现场剪切试验主要对坡前和坡体位置的土体进行, 试验的剪切方向为坡体变形方向, 同时避开或减少现场地表植被、根系及大块石等对剪切试验的影响。在边坡场地共进行 6 组现场剪切试验, 试验点分别布置在坡前(3 组试验)试坑、坡体(3 组试验)试坑内, 试验点位置如图 1 所示。其中, 坡前试验点的标高为 1067 m, 坡体试验点的标高为 1108 m, 具体试验过程如图 7 所示。



图 7 现场试验及装置

3.2 剪切变形规律与特征分析

现场剪切试验得到了红黏土典型剪切应力 τ -剪切位移 ΔL 关系曲线, 如图 9 和图 10 所示。由图 9、图 10 剪切试验结果表明: 边坡破前和坡体的土体剪切应力 τ -剪切位移 ΔL 呈典型的非线性关系, 随剪切位移的增加, 剪切应力整体依次呈先增大、出现峰值、后减小, 随后出现剪切应力残余值的变化规律, 且垂直压力越大, 关系曲线越陡, 当剪切位移 ΔL 较小时剪切应力 τ 存在明显的软化现象, 即剪切应力出现峰值强度 τ_j 。具体变化规律可以描述为剪切试验初始阶段, 剪切应力随剪切应变呈线性增加; 随着剪切位移的继续增加, 剪切应力随剪切位移呈非线性增加, 直至剪切应力出现峰值强度; 此时土体破坏特征明显, 随着试验的继续进行, 土体的剪切应力随剪切位移的增加而呈非线性降低, 最后降低至残余强度, 土体发生剪切破坏。进一步分析发现, 图 9 和图 10

中坡前和坡体土体的剪切应力-剪切位移关系曲线可以描述为弹性变形、屈服变形、硬化变形和破坏变形四个阶段, 如图 8 所示。

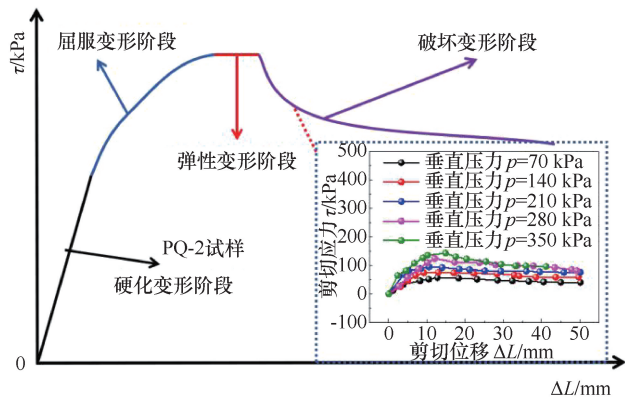


图 8 边坡土体现场剪切“四阶段”模型

(1)弹性变形阶段。剪切位移在 0~5 mm 范围内, 此时试样发生弹性变形, 在垂直应力约束作用下, 试样在水平剪切应力作用下发生“挤压型”弹性变形, 土颗粒间的孔隙逐渐被压缩, 但土颗粒尚未发生三维空间上的相对错动, 剪切位移值 ΔL 较小, 试样的剪切应力 τ -剪切位移 ΔL 具有明显的线性关系变化特征。

(2)屈服变形阶段。剪切位移在 5~15 mm 范围内, 在这个阶段内, 试样开始出现塑性变形, 试样的剪切应力 τ -剪切位移 ΔL 由明显的线性关系向非线性关系转变, 土颗粒间除了孔隙被压缩外, 还将发生颗粒间相互错动变形, 重新排列分布, 此时剪切应力的增加幅度变缓, 剪切位移增加幅度变大, 剪切位移值 ΔL 逐渐增大, 试样的剪切应力 τ -剪切位移 ΔL 具有明显的非线性关系变化特征。

(3)硬化变形阶段。剪切位移在 15~20 mm 范围内, 随着水平剪切荷载继续增大, 在屈服变形阶段作用下, 土的强度将逐渐增大, 此时试样所有土颗粒将在这个阶段内形成“孔隙最小、排列最优”的极限

重组状态, 剪切位移增加相对较缓, 试样土颗粒达到了最密实状态, 随后土颗粒间出现较明显的滚动摩擦现象, 水平剪切带逐渐形成, 剪切应力逐渐增大并达到峰值强度 (τ_f), 剪切应力 τ -剪切位移 ΔL 具有明显的“波浪”或“锯齿”的非线性变化特征。

(4)破坏变形阶段。剪切位移超过 20 mm 范围内, 在这个阶段内, 试样的剪应力出现峰值强度后, 剪切位移快速发展, 试样发生明显破坏形态, 剪切应力随剪切位移 ΔL 增加而减小, 当剪切位移大于 30 mm, 随剪切位移 ΔL 增加, 剪切应力 τ 降低幅值不明显, 且呈水平变化趋势。此时, 由于受试样内部结构、分布不均匀等因素的影响, 破坏时的剪切面与坡角呈大致水平形态, 但具有微小的凹凸变化特征, 例如锯齿状、波浪状、台阶状等。

基于典型的剪切应力 τ -剪切位移 ΔL 关系曲线变化特征, 进一步对图 8 和图 9 的试验结果进行分析。结果表明: 随剪切位移的增加, 坡前和坡体试样的剪应力呈线性急剧增加, 变化幅度较大, 弹性模量较大, 随后呈非线性增加, 增幅有所降低, 当试样剪切应力增加幅度减缓时, 试样开始进入硬化变形阶段, 出现峰值强度后, 试样发生剪切破坏, 出现残余强度, 现场试验呈现完整的全应力-应变关系曲线, 连续性好。同样, 垂直压力 p 对剪切应力-剪切位移关系曲线“开口度”影响较大, 在剪切位移相同的情况下, 垂直压力 p 越大, 剪切应力-剪切位移关系曲线“开口”越大, 剪切应力越大, 剪切位移越小。可见, 在现场剪切试验过程中, 随着垂直压力 p 的逐渐增大, 试样的抵抗变形能力和抗剪强度峰值也逐渐增大。值得注意的是, 坡前和坡体试样的剪切应力 τ -剪切位移 ΔL 关系曲线全应力-应变关系曲线具有显著的“驼峰型”软化特征。因此, 在实际边坡工程稳定性判断时, 应当尽量避免降雨作用对边坡土体发生软化变形, 导致边坡工程因土体剪切强度降低发生失稳事故。

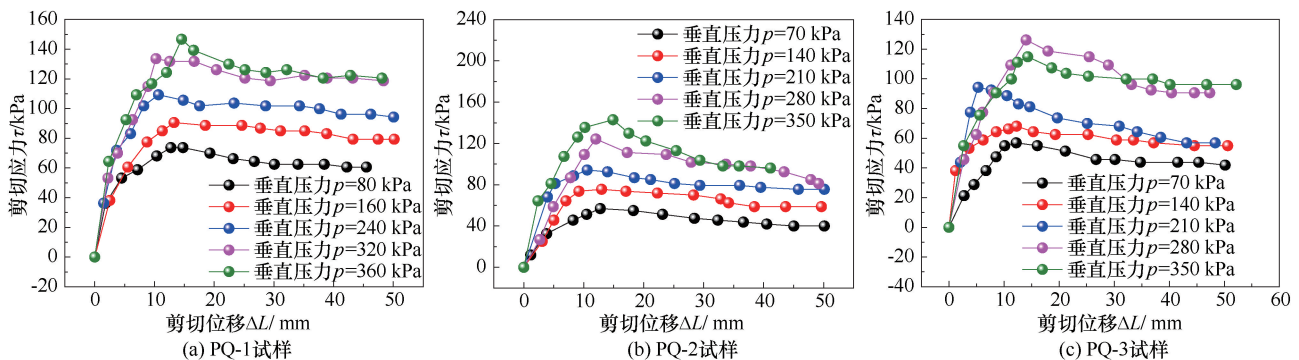


图 9 坡前红黏土剪切应力-剪切位移关系曲线

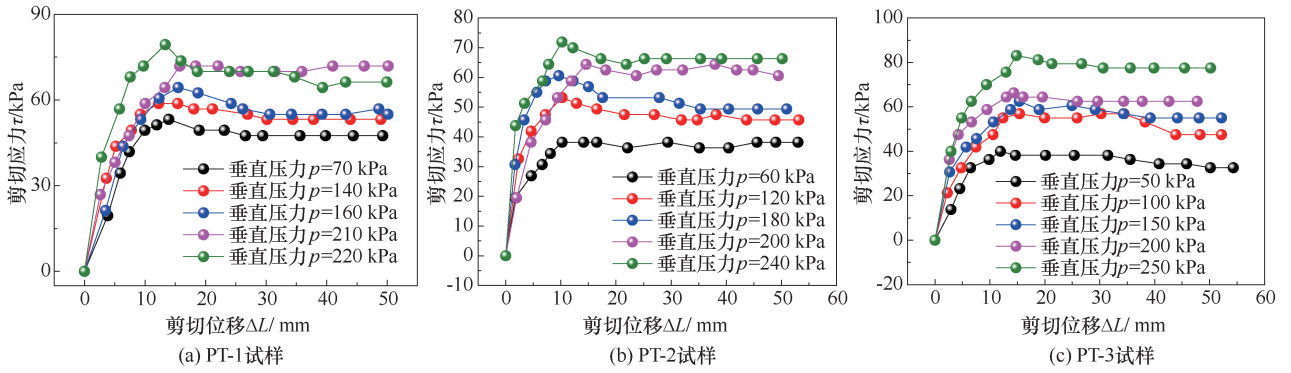
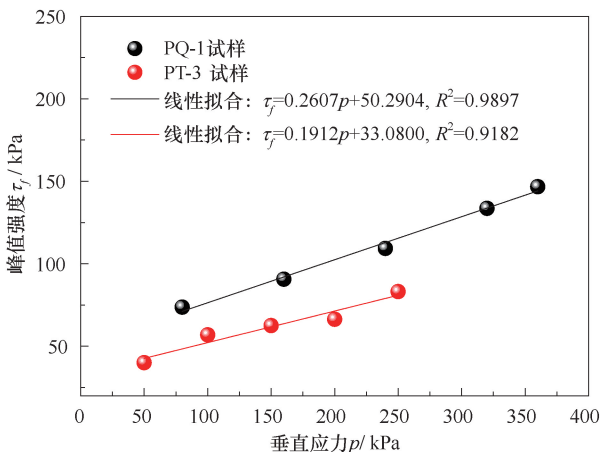


图 10 坡体红黏土剪切应力-剪切位移关系曲线

3.3 抗剪强度指标

现场试验结果表明, 剪应力 τ -竖向压力 p 曲线呈明显的线性关系变化规律, 如图 11 所示。通过现场剪应力 τ -竖向压力 p 的关系曲线, 获得坡前和坡体位置土体的抗剪强度指标如表 3 所列。通过表 3 中的试验结果发现, 坡前和坡体位置的土体抗剪强度指标存在较大的差异。虽然现场试验结果得到的抗剪强度指标与边坡土体在天然工况或暴雨工况下所得的强度指标值较为接近, 但在边坡工程的实际支护设计与稳定性分析评价中, 还应综合考虑土体结构、土层结构、软弱夹层以及土体的实际工况进行综合评价。根据对红黏土边坡工程的现场调查、踏勘、钻探等方式, 确定了在坡体上土层覆土厚度约为 12.0 ~ 23.0 m, 平均厚度约 14.2 m, 土体均匀性差, 土体在坡积土或强风化破碎带内存在潜在的滑动带。综上所述, 由于边坡土体剪切试验结果的峰值极差大于平均值 30%。因此, 坡前或坡体土体的抗剪强度指取值主要依据勘察资料及《建筑边坡工程技术规范》(GB50330—2013) 第 4.2.10 条, 按照折减系数为 0.85 的取值方法确定抗剪强度参数, 建议该边坡工

图 11 边坡红黏土峰值强度-残余强度与垂直应力 p 拟合关系

程土体在天然状态的取值为: (1) 坡前土体摩擦角 φ (峰值 13.9°、残余 11.4°) 和内聚力 c (峰值 32.6 kPa、残余 26.0 kPa); (2) 坡体土体摩擦角 φ (峰值 7.9°、残余 7.8°) 和内聚力 c (峰值 28.6 kPa、残余 25.4 kPa)。

表 3 现场剪切试验强度指标

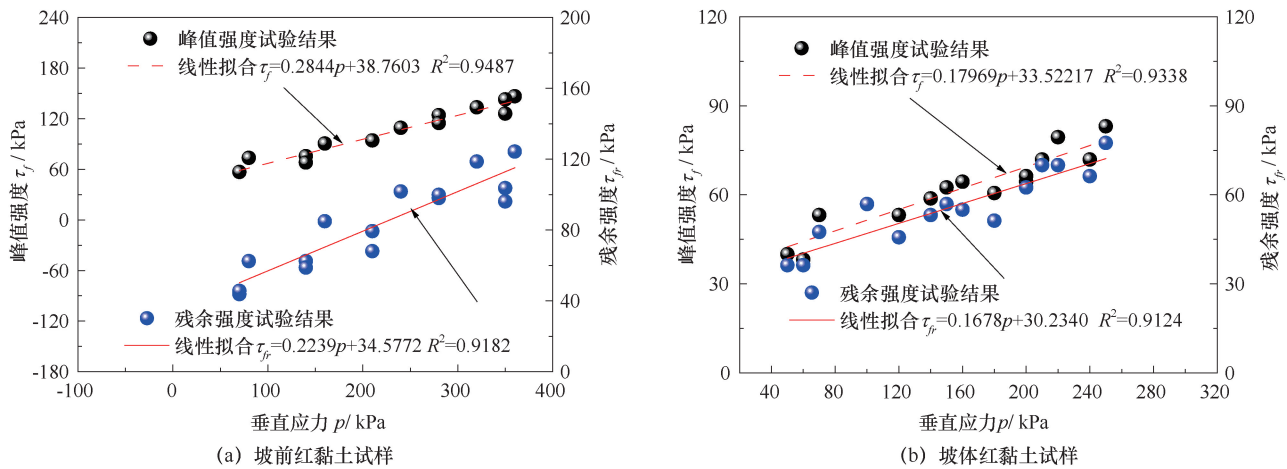
位置	组别	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$		内聚力 c/kPa		备注
		峰值	残余	峰值	残余	
坡前	1	14.5	12.4	50.3	47.4	天然
	2	17.5	12.5	32.6	30.9	天然
	3	16.9	13.4	31.2	26.0	天然
	平均值	16.3	12.8	38.3	34.8	天然
	极差	3.0	1.0	19.1	21.4	天然
坡体	1	9.3	9.2	39.2	33.3	天然
	2	10.2	9.6	28.9	25.4	天然
	3	10.8	10.0	33.1	31.6	天然
	平均值	10.1	9.6	33.7	30.1	天然
	极差	1.5	0.8	10.3	7.9	天然

注: 现场试验的剪切方向为坡体变形方向。

结合现场剪切试验结果(见表 3)以及图 9 和图 10 中不同垂直应力下坡前及坡体试样的典型剪切应力 τ -剪切位移 ΔL 关系曲线变化规律, 坡前 3 组试样和坡体 3 组试样的现场剪切结果均出现了明显的“应力-应变”软化特征, 且均出现了明显的峰值强度和较稳定的残余强度值。为进一步研究坡前和坡体试样的峰值强度和残余强度变化规律, 根据不同垂直应力下坡前的坡前和坡体试样剪切破坏时试验数据, 整理得出边坡试样的峰值强度-残余强度与垂直应力关系, 如图 12 所示。为建立降雨作用下坡前和坡体中试样的峰值强度和残余强度的经验模型, 按照经典的 Mohr-Coulomb 强度理论, 通过线性回归分析得到坡前和坡体试样的峰值强度指标和残余强度指标经验值。公式为

$$\tau = \sigma \tan \phi + c \quad (1)$$

式中, τ 为剪切应力 (kPa); σ 为正应力 (垂直应力)

图 12 边坡红黏土峰值强度-残余强度与垂直应力 p 拟合关系

(kPa); φ 为试样的内摩擦角($^{\circ}$)。

由图 12(a)可知,对坡前土体的 3 组试样剪切破坏时试验数据进行线性回归分析,得到坡前土体的峰值强度和残余强度经验模型

$$\begin{cases} \tau_f = 0.2844p(\sigma) + 38.7603, R^2 = 0.9487 \\ \tau_{fr} = 0.2239p(\sigma) + 34.5772, R^2 = 0.9182 \end{cases} \quad (2)$$

基于式(2)经验模型,坡前土体的峰值强度指标为:峰值黏聚力 $c_f = 38.760$ kPa;峰值内摩擦角 $\varphi_f = 15.88^{\circ}$;残余强度指标:残余黏聚力 $c_{fr} = 34.577$ kPa;峰值内摩擦角 $\varphi_{fr} = 12.62^{\circ}$ 。同理,图 12(b)给出了坡体中 3 组试样线性回归分析关系,得到坡体中试样的峰值强度和残余强度经验模型

$$\begin{cases} \tau_f = 0.1797p(\sigma) + 33.5222, R^2 = 0.9338 \\ \tau_{fr} = 0.1678p(\sigma) + 30.2340, R^2 = 0.9124 \end{cases} \quad (3)$$

基于式(3)经验模型得,坡体试样中的峰值强度指标为:峰值黏聚力 $c_f = 33.522$ kPa,峰值内摩擦角 $\varphi_f = 10.19^{\circ}$;残余强度指标:残余黏聚力 $c_{fr} = 30.234$ kPa,峰值内摩擦角 $\varphi_{fr} = 9.53^{\circ}$ 。值得注意的是,对比表 3、式(2)及式(3)的结果可知,边坡试样的强度指标实测值差异较明显,坡前和坡体中的试样在剪切破坏后,仍具有较高的黏聚力和内摩擦角,这也与红黏土边坡的形成过程和组成部分密切相关。

3.4 剪切强度指标影响因素讨论

通过对比分析试样的室内剪切强度与现场剪切强度试验结果可以发现,试样抗剪强度与土体结构、剪切条件、地质条件及饱和度等因素密切相关。鉴于此,本文将土体结构性、试验条件等对土体的室内剪切强度指标与现场剪切强度指标试验结果影响进行讨论,具体情况如下。

(1) 土结构性的影响。边坡试样的剪切强度指标

因土的结构性特征存在差异,土的结构性特征决定着土体强度指标的本质属性。一方面,试样的结构组成、矿物含量、孔隙率、饱和度等将直接影响剪切强度指标测定值。从室内剪切强度与现场剪切强度指标来看,室内试验内摩擦角 φ 在 $10.2^{\circ} \sim 11.3^{\circ}$ 范围变化,黏聚力 c 在 $36.8 \sim 38.4$ kPa 范围变化;现场剪切坡前试样峰值强度指标(内摩擦角 φ 在 $14.5^{\circ} \sim 17.5^{\circ}$ 范围变化,黏聚力 c 在 $31.2 \sim 50.3$ kPa 范围变化)、残余强度指标(内摩擦角 φ 在 $12.4^{\circ} \sim 13.4^{\circ}$ 范围变化,黏聚力 c 在 $26.0 \sim 47.4$ kPa 范围变化);现场剪切坡体试样峰值强度指标(内摩擦角 φ 在 $9.3^{\circ} \sim 10.8^{\circ}$ 范围变化,黏聚力 c 在 $28.9 \sim 39.2$ kPa 范围变化)、残余强度指标(内摩擦角 φ 在 $9.2^{\circ} \sim 10.0^{\circ}$ 范围变化,黏聚力 c 在 $25.4 \sim 33.3$ kPa 范围变化),无论是峰值强度和残余强度,试样的黏聚力变化幅度相对较大,内摩擦角变化幅度相对较小,主要原因在于内摩擦角的变化主要决定于矿物成分,受其他条件影响较小,同时该试样可能主要含有云母类(伊利石)、蒙脱石等黏土矿物,具体物质含量还需做进一步化学成分和微观结构特征分析。另一方面,试样的饱和度也成为影响抗剪强度的关键因素之一,从表 1 中的试验结果可以看出,天然状态比饱和状态下的内摩擦角要大,但黏聚力要小。

(2) 剪切条件的影响。与土结构性的影响作用相比,剪切条件(试验条件)是影响试样抗剪强度变化规律的外部因素,主要包括剪切方向、剪切速率以及边界条件等。在本文中,室内剪切试验采用圆形剪切面,且剪切方面与垂直应力互余,现场剪切试验的剪切面为矩形,且剪切方向与边坡的变形方向相同,导致试样的在剪切试验过程中存在明显的尺寸效应、约

束作用不同、有效接触面积不同,造成室内剪切试验和现场剪切试验的差异性。一方面,与现场剪切试验相比,由于受到接触面积、约束作用、尺寸效应的影响,室内剪切试验得到的黏聚力和内摩擦变化幅度相对较小,且室内试验的内摩擦角值要大于现场剪切试验;现场剪切试验的接触面积越大,土颗粒间的接触越充分,得到的试验结果越客观真实;另一方面,现场剪切试验的剪切条件与边坡土体的实际受力状态更相似,强度参数对边坡的稳定性分析评价更具有参考价值。可见,剪切条件也成为影响试样抗剪强度指标的关键因素。

4 结 论

(1)监测期内,边坡土体出现了蠕变特征。降雨作用下对红黏土边坡的侧向变形和抗剪强度指标影响较大。随着监测时间的增加,降雨入渗作用越明显,红黏土边坡的侧向变形越大。值得注意的是,同一钻孔的侧向变形随钻孔深度的增大而减小,在边坡的土层与岩层过渡区将出现明显的下降特征,存在侧向变形拐点。岩土构造、软弱夹层等地质条件也是影响边坡土体稳定的关键因素之一。

(2)坡前/坡体红黏土试样的沿坡面方向发生剪切破坏,剪切面具有“锯齿状、波浪状、台阶状”微小结构特征,其剪切应力-剪切位移关系曲线出现明显的“驼峰型”应力-应变软化特征,剪切应力随剪切位移的增加呈“四阶段”扩展趋势,即弹性变形阶段、屈服变形阶段、硬化变形阶段和破坏变形阶段,试样在硬化变形阶段出现“峰值强度”,在破坏变形阶段出现“残余强度”。

(3)结合现场剪切试验结果,对坡前3组试验数据和坡体3组试验数据进行线性回归分析,分别得到了边坡红黏土的峰值强度和残余强度经验模型。其中,坡前土体的抗剪强度指标经验值依次为 $c_f = 38.760$ kPa、 $\varphi_f = 15.9^\circ$ 、 $c_{fr} = 34.577$ kPa、 $\varphi_{fr} = 12.6^\circ$;坡体土体的抗剪强度指标经验值依次为 $c_f = 33.522$ kPa、 $\varphi_f = 10.2^\circ$ 、 $c_{fr} = 30.234$ kPa、 $\varphi_{fr} = 9.5^\circ$ 。

(4)与室内剪切试验相比,现场剪切试验的试验结果与红黏土边坡的实际抗剪强度指标参数更客观、

更接近,可为类似红黏土边坡工程的稳定性分析提供有益参考。

参考文献:

- [1] 尤志国. 土力学与基础工程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019.
- [2] 刘晓红. 高速铁路无砟轨道红黏土路基动力稳定性研究[D]. 南京: 中南大学, 2011.
- [3] 穆锐. 贵阳地区红黏土动力特性及其动本构关系研究[D]. 贵州: 贵州大学, 2019.
- [4] 张彦召, 左双英, 季永新. 红黏土在原状及重塑状态下的力学性质试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(6): 1477-1482.
- [5] 穆锐, 黄质宏, 郭建强, 等. 不同含水比贵阳原状红黏土 CU 三轴试验研究[J]. 水利水电技术, 2019, 50(7): 189-194.
- [6] 赵蕊, 左双英, 王嵩, 等. 不同含水量贵阳重塑红黏土三轴抗剪强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 90-95.
- [7] ZHANG Y Z, PU S Y, LI R Y M, et al. Microscopic and mechanical properties of undisturbed and remoulded red clay from Guiyang, China [J]. Scientific Reports, 2020, 10: 18003.
- [8] LIU Yang, CHEN Kaisheng, LYU Mengfei, et al. Study on failure of red clay slopes with different gradients under dry and wet cycles[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(9): 4609-4624.
- [9] 刘旸, 陈开圣, 吕梦飞, 等. 干湿循环下红黏土边坡响应的模型试验[J]. 水利水电技术, 2018, 49(8): 193-203.
- [10] 吴珺华, 袁俊平. 干湿循环下膨胀土现场大型剪切试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S1): 103-107.
- [11] 祁昊, 冯文凯, 陈建峰, 等. 降雨作用下冰水堆积体角砾土强度变化的微观机制[J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 731-739.
- [12] 祁昊, 冯文凯, 陈建峰, 等. 降雨作用下欢喜坡冰水堆积体角砾土强度特性[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 78-84.
- [13] 刘惠江. 热带雨林树种根系固土力学性能与现场剪切试验研究[D]. 海口: 海南大学, 2018.
- [14] 张建华, 姚志华, 冯世清, 等. 基于现场和室内剪切试验的原状黄土强度特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(6): 188-197.
- [15] 中华人民共和国建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

(责任编辑 王海锋)