

含水率-温度双因素影响的红黏土力学特性分析

王江滔¹,包特门白乙拉¹,杨伟光¹,周琦¹,傅鹤林²

(1.中交第四公路工程局第一工程有限公司,北京市 10002;2.中南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410075)

摘要:在新的气候环境和工程建设要求下,涉及红黏土的工程问题不断突出,亟待深入掌握残坡积红黏土的力学和工程性质。该文以湖南省内典型红黏土为研究对象,基于不固结不排水直剪试验,开展含水率和温度双因素影响下的残坡积红黏土力学特性研究,重点关注影响红黏土力学性能的最不利条件。研究表明:① 受单因素含水率影响,随含水率的增加红黏土的抗剪强度减小10%~40%;而考虑含水率与温度双因素影响,温度增加时,红黏土的抗剪强度随含水率增加而减小的效果减弱;② 红黏土的黏聚力同时受温度和含水率的影响,同一温度下,含水率增加,黏聚力减小40%~70%,温度越高,含水率对黏聚力的影响越小;同一含水率下,温度为30℃时,黏聚力最小;③ 非极端温度范围内(10~30℃),红黏土的内摩擦角主要受温度影响,温度增加,内摩擦角增加5%~10%。

关键词:含水率;温度;红黏土;力学特性;直剪试验

中图分类号:U414

文献标志码:A

0 引言

近年来,随着气候环境的变化,湖南地区的雨期由每年5—7月份加长至4—8月份,雨期温度10~40℃,存在极大的差异性,加之雨期的间歇间断性,高低温与干湿组合的复杂气候形成一种常态化,已有学者开始探究快速检测南方湿热地区红黏土路基的方法^[1-3]。当前,对红黏土的力学特性研究中,多考虑含水率或温度单一因素影响,对于常态化的复杂气候条件显然不再适用。因此,有必要对含水率及温度双因素影响下的坡地红黏土力学特性展开研究,以揭示红黏土质斜坡的失稳机理并提出相应的灾害防治手段。

含水率作为红黏土的基本物理参数,对红黏土的力学特性起决定性作用。关于含水率对红黏土力学特性影响的研究,已有大量学者展开了工作,并取得了阶段性的进展。学术界普遍认为红黏土的抗剪强度随含水率的增大而减小^[4]。张培培等^[5]通过直剪试验发现红黏土的抗剪强度随含水率的增大呈非线性减小,其减小的速率由小变大;张添锋等^[6]确定了抗剪强度随含水率减小快慢的分界含水率为

20%;李怀鑫等^[7]则认为含水率为15%~24%时,红黏土的抗剪强度随含水率呈线性减小。也有学者认为红黏土的抗剪强度并非随含水率增加而减小。吴昱东^[8]提出红黏土的抗剪强度与黏聚力均随含水率的增加而呈现先增大后减小的变化规律;谭罗荣等^[9]提出高含水率红黏土的工程力学性质反而较好的规律,并通过一种土体胶凝结构模型,阐述了这种现象的合理性。

在含水率一定时,温度必定成为影响红黏土力学特性的重要因素。王云龙^[10]通过研究不同初始含水率下红黏土中水的蒸发,间接说明了温度对含水率变化的影响,进而导致红黏土物理力学性能的变化;常留成^[11]直接指出了温度对红黏土黏聚力的显著影响,当温度大于65℃时,红黏土的黏聚力会随温度的升高而增加。在此基础上,多会会等^[12]将含水率与温度对红黏土的影响建立起联系,得出含水率对强度特性的温度敏感性明显高于干密度。

与此同时,对于多因素影响红黏土力学特性的研究,学者们主要考虑了含水率和液塑限双重影响下红黏土的抗剪强度特性^[13-17]。除此之外,同时考虑干密度与含水率对红黏土的抗剪强度影响也是目前研究的重点^[14],而考虑压实度和液塑限影响下路堤

收稿日期:2021-09-18

基金项目:湖南创新型省份建设专项经费资助项目(编号:2019RS1059);湖南省教育厅重点项目(编号:19A477)

作者简介:王江滔,男,大学本科,工程师.E-mail:1291070861@qq.com

边坡稳定性在近期也受到了广泛的关注^[19-20]。

由于试验温度难以控制,考虑多因素对于红黏土性能的影响研究中,温度与含水率共同作用下红黏土的力学特性研究涉及较少。显然对于复杂气候的常态化,迫切需要寻求含水率与温度双重因素影响下的红黏土力学特性,对相应的工程予以理论指导。为此,本文试图通过直剪试验与红黏土的微观特性分析,明确含水率与温度差异下的红黏土力学模式,以获得含水率与温度在斜坡失稳过程中的影响机制。

表 1 试样的物理参数

含水率/ %	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/ %	塑限/ %	塑性指数	最优含 水率/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
14.89	1.86	1.62	38.8	19	19.8	17.3	1.81

试样制备前土体过 2 mm 筛,由于常温条件下红黏土的风干脱水具有可逆性,而高温下具有不可逆性,因此选择使用风干土进行制样,试样性质更接近原状土。试验开始前,通过反复预试验,得出试样加载前不同温度工况下的温度损失,将土体配至试验所需温度及含水率,使得试样温度及含水率降到最低。

1.2 试验装置及方案设计

试验采用 ZJ-4 型四联直剪仪进行。直剪仪为应变控制式,竖向应力选取 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 共 4 个水平,剪切速率 0.8 mm/min。一方面,研究为探寻含水率对红黏土的力学特性影响,其含水率在试验过程中应保持不变,即试验过程不排水;另一方面,基于湖南坡地浅层红黏土研究对象,其边坡降雨致滑失稳往往都是短时间内发生,为揭示实际工程滑坡的变形特征,选择不固结不排水的快剪试验。

考虑到湘潭地区近 30 年的气温及极端高温天气的不断上升,并结合试验的设备条件,选取 $-5 \sim 45^\circ\text{C}$ 作为试验温度变化区间,并设置 0°C 、 15°C 、 30°C 、 45°C 4 种不同的温度水平进行试验。试验中从剪切盒温度及环境温度两个方面控制温度。

通过试样的天然含水率、最优含水率以及液塑限,同时考虑到环刀样的成形情况,试验试样选取 15%~21% 作为含水率变化区间,并设置 15%、

1 材料与方 法

1.1 试验土样及制备

试验中的坡地红黏土取自湖南省长株潭地区,依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[21],对该红黏土样进行室内常规试验,得出红黏土的基本物理指标见表 1。用 X 射线衍射试验分析该黏土的矿物成分,其中高岭石为 56.59%,针铁矿为 15.61%,石英为 12.45%,三水铝石为 11.44%。

17%、19%、21% 4 种不同的含水率水平。用与试样含水率相近的湿棉布围住剪切盒以控制湿度。

在 4 种温度及 4 种湿度的基础上,依据控制变量原则设计 16 组试验工况,分别对应 16 种不同的温度及含水率条件。

2 结果与分 析

2.1 湿热影响下的抗剪强度特性

基于 4 种不同的含水率水平,可以得到红黏土抗剪强度与温度的关系,在 4 种含水率中,红黏土试样的抗剪强度均随竖向压力的增大而增大,说明竖向压力的增大土颗粒间的有效应力增加,土体抗剪强度增加,符合有效应力原理。

不同含水量水平下,红黏土的抗剪强度与温度的变化关系见图 1。参考李广信^[22]关于冻土抗剪强度随温度的变化,在同一应力水平上,冻土的抗剪强度随温度的增加而降低,在温度为 0°C 时,冻土的抗剪强度应为最低值;图 1 显示,高含水率(19%、21%)的红黏土抗剪强度随温度(高于 0°C)的增加而增加,这与冻土情况下抗剪强度随温度变化的趋势恰好相反,说明高含水率下温度处于 0°C 时,土体抗剪效果最不利。

不同含水率下红黏土抗剪强度随温度的变化曲线如图 2 所示。

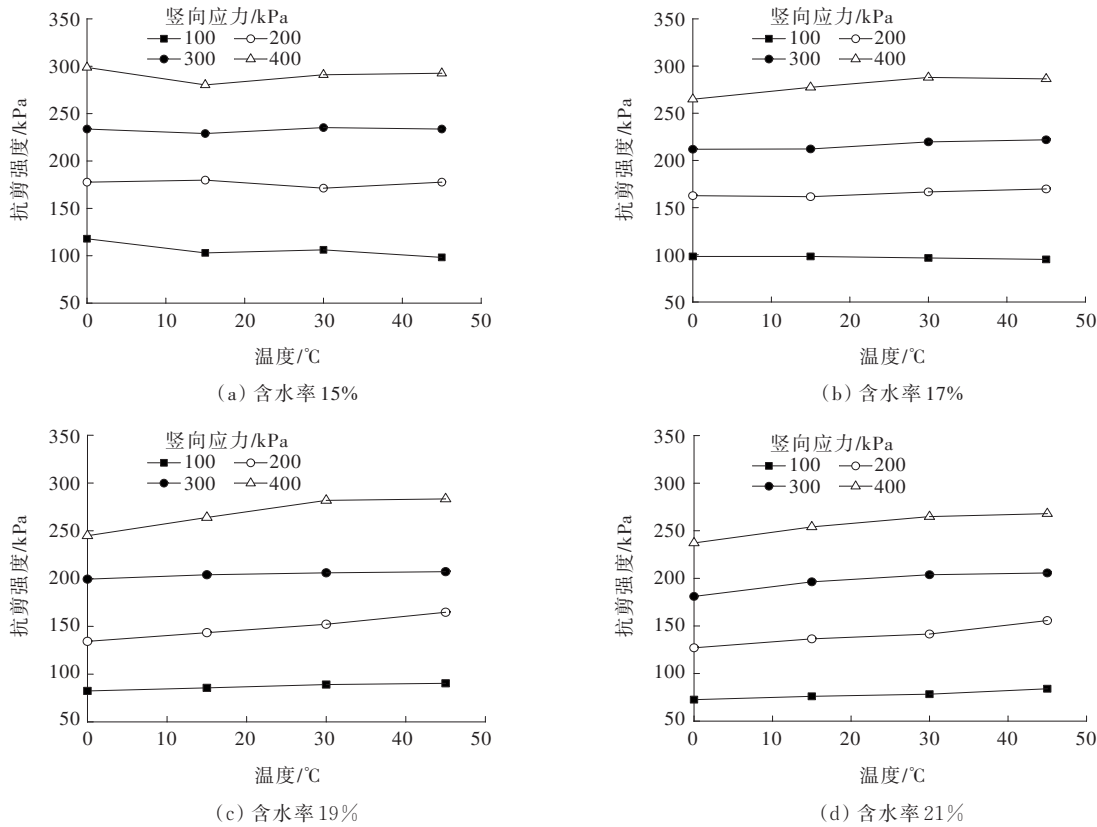


图1 不同含水率下抗剪强度随温度变化曲线

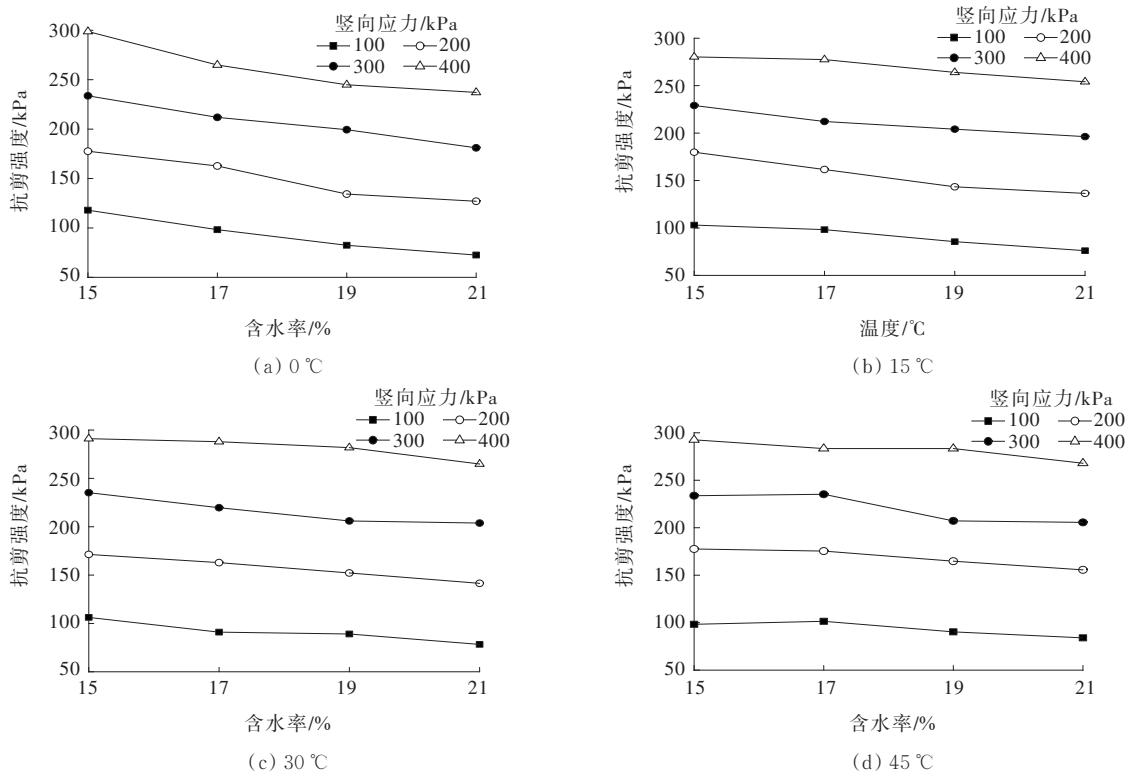


图2 不同温度下抗剪强度随含水率变化曲线

由图2可知:在相同的竖向压力与温度水平下,红黏土的抗剪强度均随含水率的增大而减小,这与罗文俊等^[4]探究不同含水率红黏土抗剪强度的结论

基本一致,但本研究中抗剪强度随含水率的减少量更小,即含水率的增加减弱抗剪强度的效果不明显,考虑到其试验在常温下进行,而本研究中温度在0 °C

时,红黏土试样的抗剪强度随含水率的增加下降最快。在 15℃环境下的试验与常温较为接近,但抗剪强度随含水率减小的幅度远不及文献[4]的结果。进一步分析发现,两种红黏土的矿物组成存在很大的差异,推断红黏土的矿物组成会影响含水率对抗剪强度的影响。对照 4 种不同温度下,红黏土的抗剪强度随含水率减小的幅度,发现随着温度的升高,因含水率增加而减弱红黏土的抗剪强度效果越来越不明显。

2.2 湿热对力学指标的影响

红黏土的黏聚力受湿热的影响大,在本研究中的温度及含水率变化范围内,黏聚力最大差值达 30 kPa。从黏聚力随温度与含水率变化的热力图(图 3)可以直观地看出:黏聚力主要随含水率呈阶梯状变化,说明红黏土的黏聚力主要受含水率影响,同一温度下,含水率增加黏聚力减小;在低温下,热力图中的等高线较为密集,而随着温度的上升,等高线变得稀疏,说明在低温下红黏土的黏聚力受含水率影响大,温度升高后,含水率对黏聚力的影响变小;热力图中,黏聚力的等高线在 30℃附近凸起,说明同一含水率水平下,温度在 30℃时黏聚力最小。

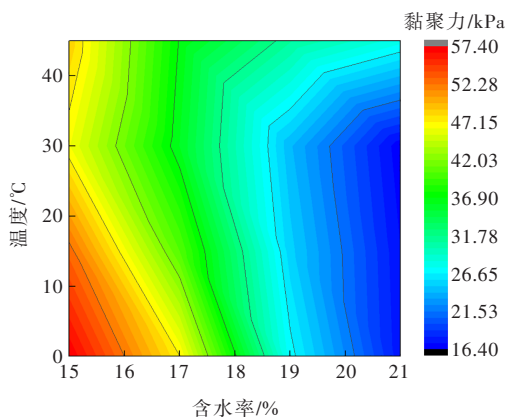


图 3 黏聚力与温度、含水率变化关系曲线

红黏土的内摩擦角受温度及含水率的影响较小,在试验控制的温度和含水率范围内,内摩擦角变化的最大差值不超过 5°(15%变化率)。在内摩擦角关于温度及含水率变化的热力图(图 4)中,在低温与高温下,内摩擦角主要随含水率呈阶梯状变化,而在 10~30℃范围内,内摩擦角主要随温度呈阶梯状变化,说明在极端温度下(低温或高温)含水率的变化对红黏土的内摩擦角影响大,且低温下随着含水率

的增加,内摩擦角减小,而在一般温度范围(10~30℃),内摩擦角主要受温度变化的影响。

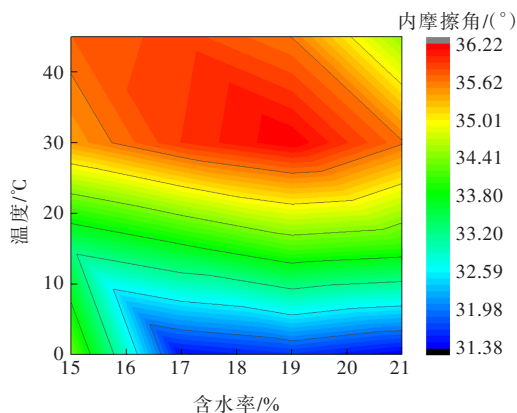


图 4 内摩擦角与温度、含水率变化关系曲线

2.3 抗剪强度特性分析

在岩土工程问题中,研究土破坏的临界状态,对揭示土的破坏机理有较大的指导意义。因此,探寻红黏土破坏时的临界应力状态,成为研究红黏土工程问题必不可少的一部分。依据本研究中的试验条件,使用 Mohr-Coulomb 强度理论,其莫尔包络线表示为:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2 \cot \varphi} = \sin \varphi \quad (1)$$

即:

$$\tau_f = c + \sigma \tan \varphi \quad (2)$$

基于 Mohr-Coulomb 屈服准则,本文着重研究不同含水率下温度对湖南省重塑红黏土的抗剪强度的影响,建立了正应力 σ -抗剪强度 τ -温度 T 之间的关系(图 5)。

图 5 中,当空间上的一点 $P(T, \sigma, \tau)$ 在曲面下方时,该状态(包括含水率、温度与应力状态)下的红黏土未破坏;而当 P 点在曲面上时,说明该状态下红黏土达到了极限平衡状态;当 P 点位于曲面上方位置时,此状态下的土体已被剪切破坏。

2.4 内因分析

通过电镜扫描获取该红黏土 2 000 倍放大后的微观结构(图 6),红黏土样中堆积状结构多为高岭石,游离氧化铁在各结构之间连接起到黏结作用。

电泳试验表明:黏土矿物颗粒的表面带负电荷,影响着黏土矿物的物理力学性质。同时基于黏土颗粒与水相互作用时的双电层理论,表面比极大的黏

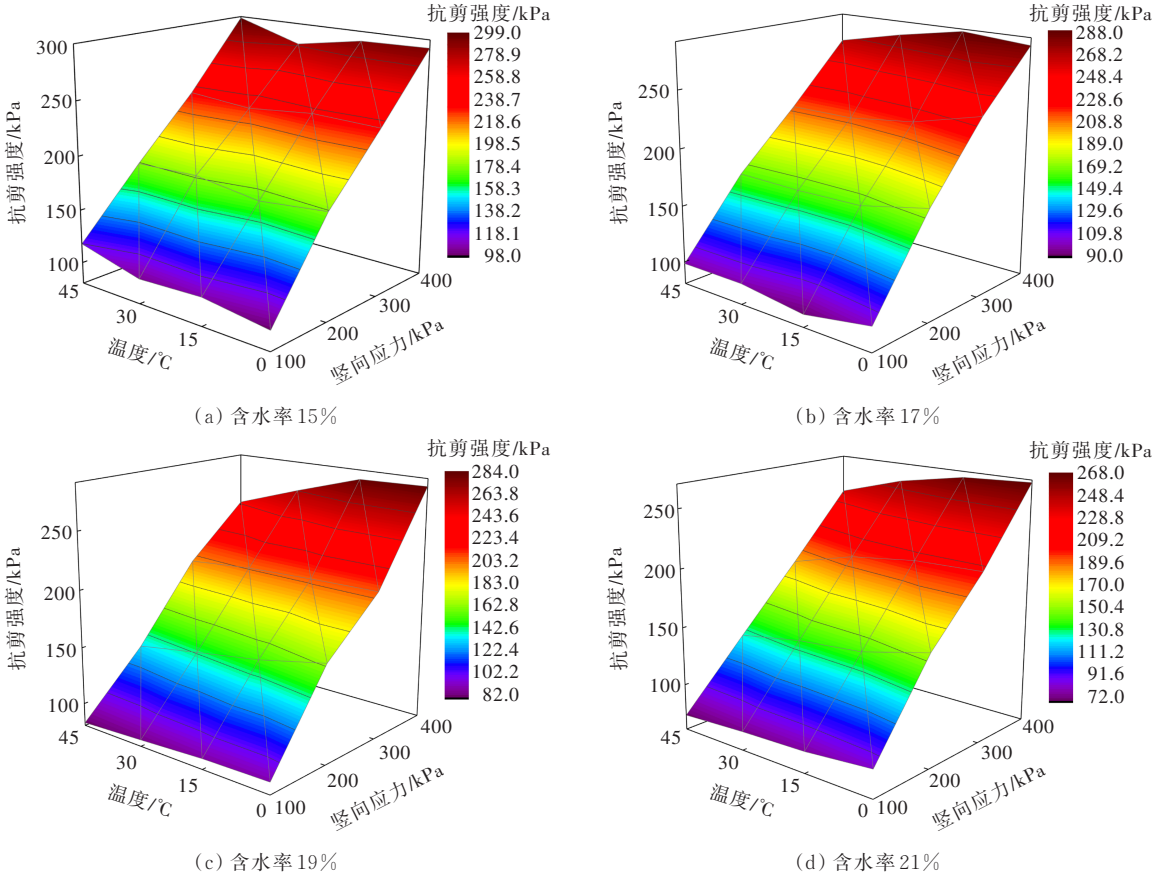


图5 不同含水率的重塑红黏土摩尔-库伦破坏包络面

土颗粒会吸附周围液体中的水分子偶极子、阳离子,形成双电层。靠近黏土表面的正电荷(面)离子,受到的静电引力强,吸附在黏土表面的力较大,因此排列的密度也大,性质更加稳定。而远离黏土表面,正电荷(面)离子所受的静电引力小,排列相对稀疏,且极易受到外力的作用,离子活动性强。

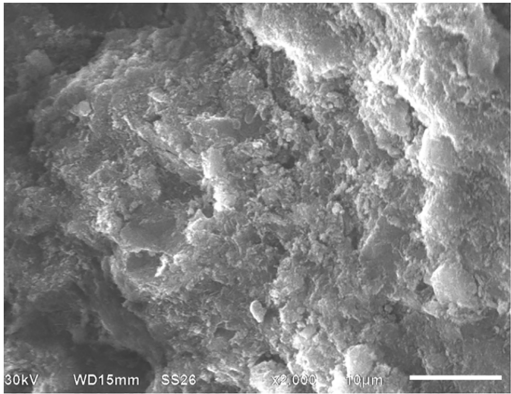


图6 电镜2 000倍放大以后的红黏土

在探究含水率与温度对红黏土的抗剪强度影响中,含水率增加会使黏土表面的扩散层厚度增大,增大黏土颗粒之间的距离,黏粒之间的电分子力减弱,

距离黏土表面的弱结合水润滑作用相对增强,相邻黏粒之间的黏聚力减弱,最终黏土抗剪强度也随之降低。

黏土颗粒表层的水分子依靠静电、配位和氢键牢固地联结,成为黏土中的强结合水,因此在试验温度变化范围内基本不会发生较大的变化;而离黏土颗粒表层较远的水分子主要通过范德华力连接,温度发生变化时易受到破坏,因此其对温度变化较为敏感。土体的温度从0℃增加到30℃过程中,水分子向黏土表面的扩散能力增强,弱结合水的有效厚度增加,使得黏土体的黏聚力减小;而黏土的温度为30℃时,黏土表层的水分子最多,此时土体达到最大分子持水量,之后随着温度的增加,水分子产生热运动,部分结合水转化为自由水,黏土颗粒间的黏结作用反而加强,红黏土的黏聚力增加。

此外参考马琳等^[23]关于游离氧化铁性质的研究,在温度达到40℃以上时,无定形氧化铁会发生老化,由此在本研究中控制试验温度为45℃时,由于红黏土中富含无定形的游离氧化铁转化为晶质,黏土的黏聚

力大幅度增强,使得含水率影响抗剪强度的效果大大削弱。

基于上述对红黏土的直剪试验及其微观特性分析,短期内的温度变化不足以影响深部土体,在温度及竖向应力一定时,红黏土试样含水率的增加导致其抗剪强度和黏聚力均减小,而滑坡灾害的发生通常伴随着降雨过程的发展,斜坡土体含水率在短时间内会产生较大改变,使得红黏土的强度降低,从而导致滑坡灾害的发生。

3 结 论

(1) 在试验控制温度和含水率范围内,同一温度及应力水平下,随含水率的增加红黏土的抗剪强度减小 10%~40%,温度增加会使红黏土的抗剪强度随含水率增加而减小的效果不明显,温度增加时,红黏土的抗剪强度随含水率增加而减小的效果减弱;含水率为 15%,竖向应力为 100 kPa 时,温度对抗剪强度的影响最为明显;红黏土的强度降低,导致斜坡潜在滑动面抗滑力下降,进而影响斜坡稳定性。

(2) 红黏土的黏聚力同时受温度和含水率的影响,同一温度下,含水率增加,黏聚力减小 2/5~2/3,且在低温下红黏土的黏聚力受含水率影响大,随着温度升高后,含水率对黏聚力的影响变小;同一含水率下,温度为 30℃时,黏聚力最小。

(3) 非极端温度范围内(10~30℃),红黏土的内摩擦角主要受温度影响,温度增加,内摩擦角也随之增加,但至多增加 10%,说明该温度范围内温度增加致使红黏土内摩擦角增加的效果不显著,而在极端气温下,红黏土的内摩擦角随温度和含水率变化较为复杂。

参考文献:

- [1] 张军辉,邓宗煌,刘杰,等.南方湿热地区既有路基快速检测方法研究[J].中外公路,2019,39(6):6-10.
- [2] 席丹妮.“废弃黏土砖-红黏土”路基填料工程特性研究[D].桂林:桂林理工大学,2021.
- [3] 杨德忠,陈开圣,李强.高掺量磷石膏稳定红黏土路用性能研究[J].中外公路,2022,42(4):185-191.
- [4] 罗文俊,王海洋,刘焕强,等.不同含水率红黏土的抗剪强度试验研究[J].华东交通大学学报,2020,37(1):119-126.
- [5] 张培培,罗保才,刘娉慧,等.含水率对红黏土强度特性的影响[J].水力发电,2019,45(5):45-49.
- [6] 张添锋,孙德安,刘文捷.桂林压实红黏土抗剪强度与含水率关系[J].上海大学学报(自然科学版),2014,20(5):586-595.
- [7] 李怀鑫,林斌,陈士威,等.不同含水率下红黏土软化模型及强度试验研究[J].黄金科学技术,2020,28(3):442-449.
- [8] 吴昱东.含水率对红黏土物理力学性质的影响及微观机制研究[D].桂林:桂林理工大学,2019.
- [9] 谭罗荣,孔令伟.某类红黏土的基本特性与微观结构模型[J].岩土工程学报,2001,23(4):458-462.
- [10] 王云龙.不同初始含水率红黏土蒸发实验研究[J].中国水运(下半月),2020,20(5):216,219.
- [11] 常留成.红黏土工程特性的温度效应试验研究[D].南昌:东华理工大学,2018.
- [12] 多会会,胡艳香,李炆,等.温度梯度下红黏土的强度特性变化规律[J].土工基础,2020,34(2):204-207.
- [13] 蒲黍條.含水率对不同状态红黏土抗剪强度的影响研究[J].贵州大学学报(自然科学版),2019,36(4):93-100.
- [14] 李海龙.分析含水率对红黏土强度特性影响[J].粘接,2020,41(3):111-114,154.
- [15] 董金玉,赵亚文.不同含水率下高低液塑限红黏土抗剪强度特性研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2018,39(3):84-87.
- [16] 肖丽娜,黄质宏,何逢春,等.上覆荷载作用下红黏土抗剪强度变化规律研究[J].河南理工大学学报(自然科学版),2021,40(3):156-162.
- [17] 唐静,丁启龙.改性预崩解炭质泥岩强度特性及微观机理分析[J].交通科学与工程,2021,37(1):13-18.
- [18] 陈鸿宾,陈学军,齐运来,等.干密度与含水率对重塑红黏土抗剪强度参数影响研究[J].工程地质学报,2019,27(5):1035-1040.
- [19] 卢博,陈群,陈秀强,等.压实度对高液限黏土路堤稳定性的影响[J].中外公路,2018,38(1):21-25.
- [20] 樊小林.干湿循环作用对山区营运高速公路低液限黏土路堤边坡稳定性影响分析[D].长沙:长沙理工大学,2021.
- [21] 交通运输部公路科学研究院.公路土工试验规程:JTG 3430—2020[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
- [22] 李广信.高等土力学[M].2版.北京:清华大学出版社,2016.
- [23] 马琳.游离氧化铁对花岗岩残积红土强度增长的试验及本构模型研究[D].长春:吉林大学,2007.