

水盐含量和固化剂掺量对红黏土 抗剪强度的影响研究

饶杰龙^{1,2}, 张家新³, 于立通¹, 刘潇¹, 郭晓霞³

(1. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;

2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

3. 大连理工大学 工业装备结构分析优化与CAE软件全国重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为揭示海相填土被海水逐渐渗透条件下抗剪强度变化, 对大连红黏土进行一系列直剪试验, 分析含水率和含盐量对红黏土抗剪强度的影响, 并分析2%、4%石膏粉和18%、20%、22%糯米浆对含盐红黏土的固化效果, 在此基础上, 量化水盐含量和固化剂种类及掺量对红黏土剪切强度的敏感性。结果表明: 红黏土的含水率是影响抗剪强度的主要因素, 随着含水率的增加, 其抗剪强度呈先减小后增大再减小的变化过程。含盐量是影响红黏土抗剪强度的因素之一, 低含盐量能适当提升红黏土的抗剪强度, 过量含盐量会使其抗剪强度大幅降低。石膏粉对含盐红黏土的固化效果相对较好, 并且随着干密度的增加, 固化含盐红黏土的抗剪强度也会随之上升。

关键词: 海洋填土; 直剪试验; 抗剪强度; 含水率; 含盐量; 固化剂; 干密度

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0196-06

Effects of Water and Salt Content and Curing Agent Content on Shear Strength of Red Clay

RAO Jielong^{1,2}, ZHANG Jiabin³, YU Litong¹, LIU Xiao¹, GUO Xiaoxia³

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

3. State Key Laboratory of Structural Analysis, Optimization and CAE Software for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: In order to reveal the change of shear strength of Marine fills under extreme environment, a series of direct shear tests were carried out on Dalian red clay, and the effects of water content and salt content on the shear strength of red clay were analyzed. Meanwhile, the curing effects of 2%, 4% gypsum powder and 18%, 20%, 22% glutinous rice pulp on salt-containing red clay were analyzed. On this basis, the sensitivity of water and salt content, curing agent type and dosage to the shear strength of red clay was quantified. The results indicate that the water content of red clay is the primary factor influencing its shear strength. As the water content increases, the shear strength of red clay initially decreases, then increases, and subsequently decreases. Furthermore, salt content also plays a role in affecting the shear strength of red clay. Low salt content can improve the shear strength of red clay properly, but excessive salt content can greatly reduce the shear strength of red clay. The curing effect of gypsum powder on salt-bearing red clay is relatively good, and with the increase of dry density, the shear strength of cured salt-bearing red clay will also increase.

Keywords: marine fills; direct shear test; shear strength; moisture content; salt content; curing agent; dry density

大连金州湾国际机场采用离岸填海建人工岛的方式进行建设,海上填土的基本力学性质显著影响工程建设可靠性和后期的安全运营。红黏土是对水环境变化极为敏感的特殊土,填土所经历的高含盐、富水环境会改变红黏土的基本力学性质^[1]。因此,有必要研究极端环境影响下红黏土的力学性质,以及固化稳定化方式,以期提升海洋环境下填土的稳定性的。

国内外学者对红黏土的力学特性研究已经取得了丰富的成果。例如,罗贵川等^[2]以贵州铜仁红黏土为工程案例,探究了红黏土风化层的分布规律,研究了红黏土层的厚度变化规律。方薇等^[3]以武一广客专沿线红黏土为工程背景,开展了大量的室内静动力试验。柏巍等^[4]采用平板载荷方法,获得了红黏土在不同方向的地基承载力及变形。郭文广^[5]研究了振冲碎石桩加速红黏土地基的固结过程,并对碎石桩设计计算参数进行了优化。张彦召等^[6]通过对原状和重塑土样进行不固结不排水三轴剪切试验和 SEM 测试,分析了原状和重塑土样之间的力学差异。赵亦婷^[7]以贵阳市恒丰中心深基坑黏土工程为案例,分析了原状红黏土的应力-应变关系和抗剪强度指标,对比分析了含水量对红黏土固结特性的影响。毛吉成等^[8]模拟了红黏土路基填筑加载过程中的孔隙水压力的变化过程,给出了适宜的填筑速率。刘宝臣等^[9]通过固结不排水三轴试验,研究了黏粒含量和含水率对红黏土强度特性的影响。李佳明等^[10]采用新型纳米碳酸钙材料对红黏土进行改性,降低了红黏土的抗剪指标参数以及液、塑限。相关研究在红黏土的工程应用方面也进行了大量研究。Quinones^[11]对红黏土的压实度进行了大量室内土工试验和现场试验,改进了试验的备料方法。De Graft-Jphnson 等^[12]研究了红黏土的抗剪强度与含水量关系,给出了抗剪强度与含水量的经验公式。为提高不良土体的承载性能,王沛等^[13]发现石灰、粉煤灰、水泥等无机固化材料,均适宜固化滨海盐渍土。陈林栋等^[14]在红黏土中添加糯米浆,发现其可以提高红黏土的无侧限抗压强度。

上述研究表明,路基、地基、边坡等赋存条件下的红黏土基本力学性质,以及固化方法已经取得了丰硕成果。然而,高含盐、富水等工况下的海洋红黏土的抗剪强度和固化方式缺少研究。鉴于此,本研究拟对海洋含盐和富水情况下的大连红黏土进行一系列直剪试验研究,分析含水率和含盐量对红黏土抗剪强度的影响。在此基础上,分析 2%、4% 石膏粉和 18%、20%、22% 糯米浆对含盐红黏土的固化

效果,以期为填海工程中红黏土作为地基材料的强度和稳定性的提升提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

测试用土取自在建的大连金州湾国际机场路基地,其基本物理特性和颗粒级配曲线分别如表 1 和图 1 所示。

表 1 土的物理力学性质

| 颗粒比重 G_s | 液限 $\omega_L/\%$ | 塑限 $\omega_P/\%$ | 不均匀 系数 C_u | 天然干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$ | 最优含水率 $W_{op}/\%$ |
|---------------|---------------------|---------------------|-----------------|-------------------------------------|----------------------|
| 2.72 | 39.73 | 22.3 | 4.3 | 1.385 | 19.7 |

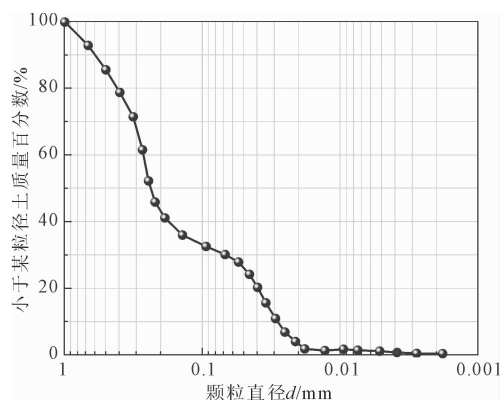


图 1 红黏土颗粒级配曲线

1.2 试验方法

将原状红黏土烘干及破碎并过 2 mm 筛。按照表 2 的工况制备试样,每种土样制备四个。

已知重塑红黏土的干密度为 $1.385 g/cm^3$ 。结合工程实践,选定最大含水率为 51% (过饱和状态),最小含水率为 21%,含水率增幅 5%,称量一定质量的干土和相应体积含水率所需的水,制备不同含水率的试样。含盐土和固化含盐土均为饱和土样。

试验步骤如下:(1) 烘干及破碎:将原状土放入烘干箱,调节烘干温度为 $105^\circ C$ 烘干 24 h,待其温度降低到常温,再将其放入粉碎机破碎,再将粉碎后的土样过 2 mm 筛,筛分后放入自封袋中备用。(2) 称量:按照试验设定的干密度称量所需土样,放置在制样容器中备用。(3) 配制:对于饱和土样,称取试验设定的含盐量(占黏土的质量百分比)和固化剂含量(占黏土的质量百分比),将红黏土、盐和固化剂搅拌均匀后加入一定量纯水,用刮土刀均匀搅拌后密封 24 h。本文采取通过高精度液体密度计控制糯米浆密度和通过量筒控制加入糯米浆质量的方法。用量筒量取所需体积的糯米浆溶液,先加入糯

表 2 测试土样的工况

| 干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$ | 孔隙比 e | 含盐量 /% | 体积含水 率/% | 固化剂 | 固化剂 含量/% |
|-----------------------------------|------------|-----------|-------------|-----|-------------|
| 1.385 | 0.964 | 0.0 | 21 | 无 | 0 |
| 1.385 | 0.964 | 0.0 | 26 | 无 | 0 |
| 1.385 | 0.964 | 0.0 | 31 | 无 | 0 |
| 1.385 | 0.964 | 0.0 | 36 | 无 | 0 |
| 1.385 | 0.964 | 0.0 | 41 | 无 | 0 |
| 1.385 | 0.964 | 0.0 | 46 | 无 | 0 |
| 1.385 | 0.964 | 0.0 | 51 | 无 | 0 |
| 1.450 | 0.876 | 0.0 | 47 | 无 | 0 |
| 1.450 | 0.876 | 0.5 | 47 | 无 | 0 |
| 1.450 | 0.876 | 1.0 | 47 | 无 | 0 |
| 1.450 | 0.876 | 1.5 | 47 | 无 | 0 |
| 1.450 | 0.876 | 2.0 | 47 | 无 | 0 |
| 1.450 | 0.876 | 2.5 | 47 | 无 | 0 |
| 1.350 | 1.015 | 3.0 | 50 | 无 | 0 |
| 1.450 | 0.876 | 3.0 | 47 | 无 | 0 |
| 1.550 | 0.755 | 3.0 | 43 | 无 | 0 |
| 1.350 | 1.015 | 3.0 | 50 | 石膏粉 | 2 |
| 1.450 | 0.876 | 3.0 | 47 | 石膏粉 | 2 |
| 1.550 | 0.755 | 3.0 | 43 | 石膏粉 | 2 |
| 1.350 | 1.015 | 3.0 | 50 | 石膏粉 | 4 |
| 1.450 | 0.876 | 3.0 | 47 | 石膏粉 | 4 |
| 1.550 | 0.755 | 3.0 | 43 | 石膏粉 | 4 |
| 1.350 | 1.015 | 3.0 | 50 | 糯米浆 | 18 |
| 1.450 | 0.876 | 3.0 | 47 | 糯米浆 | 18 |
| 1.550 | 0.755 | 3.0 | 43 | 糯米浆 | 18 |
| 1.350 | 1.015 | 3.0 | 50 | 糯米浆 | 20 |
| 1.450 | 0.876 | 3.0 | 47 | 糯米浆 | 20 |
| 1.550 | 0.755 | 3.0 | 43 | 糯米浆 | 20 |
| 1.350 | 1.015 | 3.0 | 50 | 糯米浆 | 22 |
| 1.450 | 0.876 | 3.0 | 47 | 糯米浆 | 22 |
| 1.550 | 0.755 | 3.0 | 43 | 糯米浆 | 22 |

米浆,然后加水至所需质量,加水时要注意量筒壁上无糯米浆的残留。取对于非饱和土样,按照试验设定的体积含水率,将水均匀喷洒在土样中,用刮土刀均匀搅拌后密封 24 h。(4) 压样:将上述配置好的土样按照压样法的标准压入体积为 60 cm^3 环刀中。(5) 真空饱和:将制作好的试样放入真空压力锅,在压力锅顶盖附近的密封圈涂抹凡士林,盖好顶盖。然后将抽气机与压力锅相连,打开抽气阀门,在近似真空的条件下进行时间为 2 h 的抽气饱和;然后打开抽水阀门,使纯水缓慢吸入到真空压力锅,保证试样完全浸润在水中,浸泡时间为 6 h,从而使试样达到饱和状态。对于含盐土需加入对应浓度的盐水进行饱和。(6) 直剪试验:对准直剪仪的固定上盒和活动下盒后插入固定销,依次放入透水石和滤纸,将

装有试样的环刀平口向下对准剪切盒放置,然后用加压盖板将试样推入到剪切盒内,在其上放置透水石和滤纸,安装仪器。

采用快剪试验,以 0.8 mm/min 的剪切速率进行快剪,剪切时间 7.5 min ,即产生 6 mm 的剪切位移。垂直压力均设置为 50 kPa 、 100 kPa 、 200 kPa 、 300 kPa 。转动手轮,使上盒前端钢珠刚好与测力计接触。调整测力计读数为零。顺次加上加压盖板、钢珠、加压框架,安装垂直位移计,准备开始试验。试验结束后,根据抗剪强度指标计算黏聚力和内摩擦角^[15-16]。土的抗剪强度公式为:

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

式中: τ 为土的抗剪强度, kPa ; c 为土的黏聚力, kPa ; σ 为剪切面的法向正应力, kPa ; φ 为土的内摩擦角, ($^\circ$)。

2 试验结果与分析

2.1 含水率与剪切强度关系

含水率对红黏土的黏聚力和内摩擦角的影响,如图 2、图 3 所示。

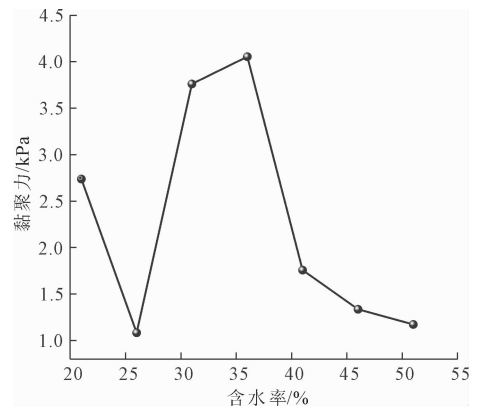


图 2 含水率对红黏土黏聚力的影响

由图 2 可以看出,含水率对红黏土的黏聚力有很大程度的影响^[17],其黏聚力随含水率的变化可以分为三个阶段:① 当土样含水率在 $21\% \sim 26\%$ 的区间时,其黏聚力大幅度降低,下降了 1.7 kPa 。在红黏土含水率较低条件下,土孔隙中的水分子和土颗粒中的金属阳离子相结合,二者形成化学键,此时,土中水大部分属于强结合水,土体具有一定的抗剪强度和黏聚力。当土中含水率逐渐增加,直至接近塑限时,弱结合水在强结合水的外边缘不断产生,包裹着土颗粒的水膜不断增厚,形成大量自由水,降低了土颗粒的黏聚性,土样黏聚力迅速降低。既有研究表明^[18],土的基质吸力随着孔隙溶液浓度的增加而提高,导致含较少水的盐渍土强度总体提升,通过强度确定的黏聚力和内摩擦角均会提升。随着含

水率的增加,红黏土内部的可溶盐逐渐被稀释溶解,从土颗粒表面离开,黏聚力大幅减小。②当土样含水率在26%~36%的区间时,其黏聚力大幅度增加,上升了3 kPa左右。土孔隙中自由水含量持续增加,导致毛细水面积增加,土体表面张力增大;收缩膜表面积增加,进而其张力^[19]增大,对土体的形变具有一定约束作用。③当土样含水率在36%~51%的区间时,其黏聚力又逐渐减小,速率由快转慢,下降了3 kPa左右。随着含水率的增加导致土样逐渐趋近饱和,导致毛细水面积减小,土体表面张力减小;收缩膜张力减小,对土体型变的约束作用减弱,土样黏聚力迅速降低,在趋近饱和时,下降速率逐渐减缓。

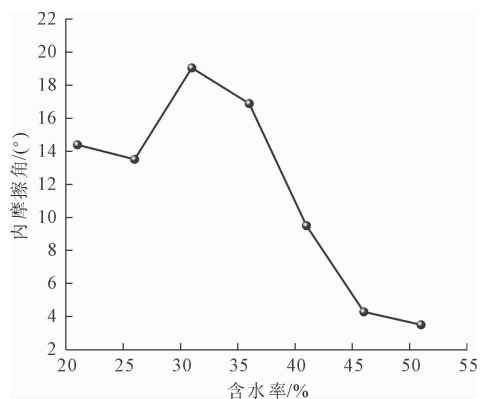


图3 含水率对红黏土内摩擦角的影响

由图3可以看出,当土样含水率在21%~31%的区间时,内摩擦角变化幅度较小,大致增加4.5°;随着含水率(31%~51%)逐渐增加,土样的内摩擦角有较大变化,下降了15.5°。红黏土在较低含水率时,土体内的游离氧化铁与水分子产生胶结,生成团粒结构。随着含水率的持续增加,较多的水分子在团粒表层形成一种润滑水膜,这种水膜的吸附力极高,水分子紧密的固定在团粒表面,降低了团粒间表面的摩擦系数,内摩擦角减小。随着含水率的进一步增加,土孔隙中的自由水逐渐增多,孔隙被大量的自由水填充,逐渐接近饱和状态,润滑作用减弱,内摩擦角增大。当含水率超过液限时,土体逐渐由固态变化到液态,自由水的含量增加,对团粒有浮力作用,内摩擦角迅速减小。当过饱和土体接近泥浆状态,内摩擦角几乎没有变化,保持稳定。

2.2 含盐量与剪切强度关系

图4给出了含盐量对重塑红黏土的黏聚力影响变化。由图4可知,含盐量对红黏土的黏聚力影响较大。当含盐量在0~2%的范围内,随着含盐量的增加,红黏土的黏聚力也随之增加,但增长速率较为

缓慢,最大值为4.59 kPa。当含试样内的含盐量超过2%时,红黏土的黏聚力减小的较为明显,呈直线下降趋势,2%含盐量的试样黏聚力约为3%含盐量试样的1.5倍。已有研究表明,土体中的钠离子具有凝聚作用,随着盐溶液浓度的增加,土体的孔隙比增大,土体中的胶体颗粒电解质溶液中产生絮凝不易分散,土体成团,土粒间“面-面”的接触模式减少,“点-面”、“线-面”的接触模式增加^[19-23]。黏聚强度取决于土粒间的物理化学作用,通常与土体中液体的离子成分、浓度及孔隙比有关。笔者认为,当含盐量超过2%时,过量浓度的钠离子一方面可以降低土的斥力和胶结作用力,另一方面土体聚团导致孔隙比增大,从而使土体的黏聚力降低。

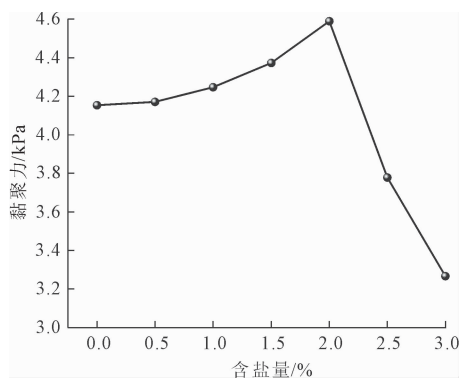


图4 含盐量对红黏土黏聚力的影响

图5给出了含盐量对重塑红黏土的内摩擦角的影响变化,由图5可知,红黏土的内摩擦角对含盐量的敏感度较低。最大值为24.44°,最小值为21.94°。随着含盐量的增加,红黏土的内摩擦角变化不明显。摩擦强度主要与土体表面的粗糙程度有关。土体表面越粗糙,土的内摩擦角就越大。由于溶液的盐效应,随着浓度的增加,促进土体的凝聚作用,土颗粒间相互嵌入咬合力增加,导致摩擦力增加,土的内摩擦角增加。

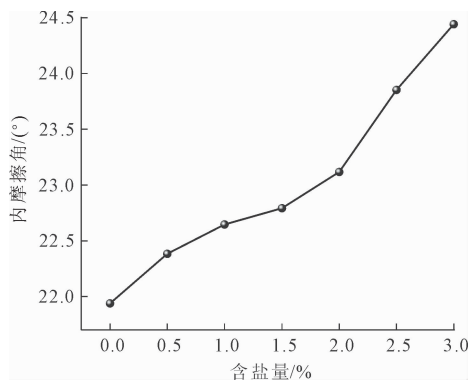


图5 含盐量对红黏土内摩擦角的影响

2.3 固化剂与剪切强度关系

图 6 给出了在不同干密度条件下,不同含量固化剂对含盐红黏土黏聚力的变化规律,从图 6 可以看出,石膏粉对含盐红黏土黏聚力的提升相对较好,随着石膏粉含量的增加,黏聚力也随之上升。在相同干密度条件下,其中添加 4% 石膏粉的含盐红黏土对黏聚力的提升接近添加 20% 糯米浆对含盐红黏土的提升。随着干密度的增加,固化含盐红黏土的黏聚力都有所提升,其中,添加 4% 石膏粉、20% 糯米浆和 22% 糯米浆的含盐红黏土在干密度越高的条件下,固化效果越好。

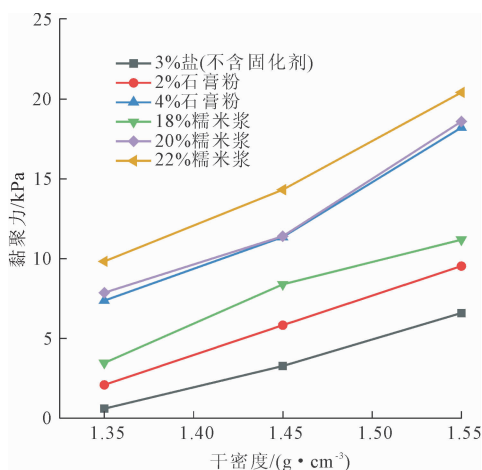


图 6 固化剂对含盐红黏土黏聚力的影响

图 7 给出了不同含量固化剂在不同干密度条件下对含盐红黏土内摩擦角的变化规律,从图 7 可以看出,石膏粉对含盐红黏土内摩擦角的提升相对较好。在相同干密度条件下,其中添加 4% 石膏粉的含盐红黏土对内摩擦角的提升高于添加 18% 糯米浆对含盐红黏土的提升。随着干密度的上升,固化含盐红黏土的内摩擦角逐渐增大,但增长的幅度很小。

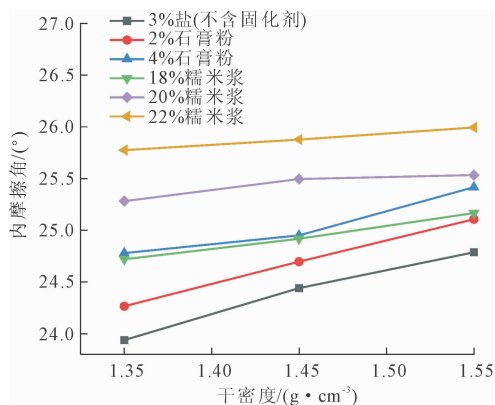


图 7 固化剂对含盐红黏土内摩擦角的影响

结合图 6 和图 7 可以看出,石膏粉对含盐红黏

土的固化效果较好,4% 含量石膏粉含盐红黏土的黏聚力和内摩擦角都要优于 18% 含量糯米浆含盐红黏土。随着干密度的上升,固化含盐红黏土的黏聚力和内摩擦角都逐渐增大。

3 影响因素敏感性分析

红黏土的黏聚力和内摩擦角会随着水盐含量、干密度以及固化剂掺量的变化而改变。在多种因素的联合作用下,不同因素变化对黏聚力和内摩擦角的敏感性^[24]影响不同,为评估因素变化对红黏土黏聚力和内摩擦角的影响,定义单位区间内某因素与红黏土黏聚力和内摩擦角变化关系曲线的斜率为敏感系数,分别表示为 k_c 和 k_φ ,构造公式如下所示:

$$k_c = \left| \frac{c_{i+1} - c_i}{F_{i+1} - F_i} \right| \quad (2)$$

$$k_\varphi = \left| \frac{\varphi_{i+1} - \varphi_i}{F_{i+1} - F_i} \right| \quad (3)$$

式中: c_{i+1} 为 F_{i+1} 因素下土体的黏聚力; c_i 为 F_i 因素下土体的黏聚力; F_{i+1} 为第 $i+1$ 因素取值; F_i 为第 i 因素取值; φ_{i+1} 为 F_{i+1} 因素下土体的内摩擦角; φ_i 为 F_i 因素下土体的内摩擦角。

依据不同工况下红黏土的黏聚力和内摩擦角测试结果,整理了含水率和含盐量分别对红黏土黏聚力和内摩擦角的敏感系数,以及干密度、石灰和糯米浆掺量分别对含盐红黏土黏聚力和内摩擦角的敏感系数,结果见表 3、表 4。

表 3 变化因素对黏聚力的敏感性

| 因素 | k_{\max} | k_{\min} | k_{avg} |
|---|------------|------------|------------------|
| 含水率/% | 0.536 | 0.033 | 0.250 |
| 含盐量/% | 1.622 | 0.035 | 0.586 |
| 干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 33.251 | 26.728 | 29.990 |
| 石膏粉含量/% | — | — | 16.626 |
| 糯米浆含量/% | 2.202 | 0.982 | 1.592 |

注: k_{\max} , k_{\min} , k_{avg} 分别为敏感系数最大值、最小值和平均值,其中 k_{avg} 按照各因素所有区间的 k 取值进行计算。

表 4 变化因素对内摩擦角的敏感性

| 因素 | k_{\max} | k_{\min} | k_{avg} |
|---|------------|------------|------------------|
| 含水率/% | 1.480 | 0.156 | 0.733 |
| 含盐量/% | 1.469 | 0.290 | 0.834 |
| 干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) | 5.029 | 3.467 | 4.248 |
| 石膏粉含量/% | — | — | 0.257 |
| 糯米浆含量/% | 0.281 | 0.247 | 0.264 |

由表 3、表 4 可知,含盐量变化对红黏土黏聚力和内摩擦角的敏感性比含水率对其的影响相对较

大;各因素变化对含盐红黏土黏聚力和内摩擦角的敏感性影响由大到小依次为干密度、石膏粉、糯米浆。按照 k_{\max} 的计算值可以发现,含水率变化对红黏土内摩擦角的敏感性比含盐量对其的影响相对较大;各因素变化对含盐红黏土内摩擦角的敏感性影响由大到小依次为干密度、糯米浆、石膏粉。因而,在进行具体的红黏土内摩擦角研究中应考虑研究区间对研究因素的影响。

4 结 论

通过对红黏土进行的一系列直剪试验,分析了不同水盐含量对红黏土黏聚力和内摩擦角的影响,进而探究了多种不同含量固化剂对含盐红黏土的固化效果,在此基础上,分析了不同干密度对固化含盐红黏土黏聚力和内摩擦角的影响。得出以下结论:

(1) 红黏土的含水率是影响抗剪强度的主要因素。随着含水率的增加,红黏土的黏聚力呈“减小-增大-减小”的变化过程,在塑限含水率附近达到最小值。内摩擦角在塑限含水率附近开始大幅下降,在液限含水率附近接近稳定。红黏土的液塑限可以作为判断内摩擦角变化过程的临界含水率。

(2) 红黏土的含盐量是影响抗剪强度的因素之一。对于同一重塑土样,法向压力越大,抗剪强度峰值越大;随着含盐量的增加,重塑土样的黏聚力先增大后减小;由于溶液具有盐效应,导致土颗粒的接触面变得粗糙,随着含盐量的增加,土的内摩擦角不断增大。

(3) 石膏粉对含盐红黏土的抗剪强度有很大提升,对其固化效果相对较好。随着干密度的增加,固化含盐红黏土的抗剪强度也会随之提高。

参考文献:

[1] 郑刚,张军辉,章定文,等.地基处理技术现状与发展[J].土木工程学报,2024,57(7):51-70.

[2] 罗贵川,尹天平.碳酸盐岩风化残积层红黏土的边坡稳定性[J].安全与环境工程,2009,16(3):119-122.

[3] 方薇,杨果林.武(汉)广(州)客专武汉-韶关段红黏土工程特性研究[J].工程地质学报,2009,17(3):408-414.

[4] 柏巍,万智.红黏土地区地基承载力和变形参数的空间分布特征[J].岩土力学,2010,31(S2):164-169.

[5] 郭文广.红黏土地基振冲碎石桩复合地基特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.

[6] 张彦珍,左双英,李雨霏.贵阳红黏土介-微观结构对力学特性影响试验研究[J].水利水电技术,2019,50

(1):36-42.

[7] 赵亦婷.贵阳红黏土应力-应变关系及软化特性研究[D].贵阳:贵州大学,2017.

[8] 毛吉成,张冲冲,胡宣,等.贵州某公路陡坡路基红黏土填筑加载速率分析[J].水利科技与经济,2019,25(9):38-41.

[9] 刘宝臣,周浩风,杨柏,等.黏粒含量及含水比对红黏土强度特性的影响[J].水利水电技术(中英文),2024,55(7):147-156.

[10] 李佳明,陈学军,黄翔,等.纳米碳酸钙对红黏土的影响及其作用机理分析[J].桂林理工大学学报,2020,40(1):109-116.

[11] Quinones P J. Compaction Characteristics of Tropically Weathered Soils[M]. Urbana Champagin: University of Illinois,1963.

[12] De Graft-Johnson J W S, Bhatia H S, Gidigas M D. The engineering characteristics of a lateritic residual clay of Ghana for earthdam construction [C]//Symposium Earth Rockfill Daffas, New Dehli, 1968:94-107.

[13] 王沛,柴寿喜.固化滨海盐渍土路用性能的室内试验与现场测试[J].工程地质学报,2011,19(3):440-446.

[14] 陈林栋,李涛,李才平,等.糯米浆对红黏土力学特性改良试验研究[J].技术与市场,2021,28(3):130-132.

[15] 陈磊,赵健.含水率对排土场黏土抗剪强度参数的影响研究[J].水利技术监督,2017,35(12):71-73.

[16] 武鹏,倪万魁,王鲜,等.宁南地区红黏土的强度特性研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2015,38(8):1119-1123.

[17] 陈筠,高彬,张瑶丹,等.不同应力路径下红黏土的力学特性与含水率的变化规律试验研究[J].水利水电技术,2019,50(2):53-60.

[18] 刘倩倩,李舰,蔡国庆,等.全吸力范围的盐渍土持水特性的试验研究[J].岩土力学,2021,42(3):713-722.

[19] 汤连生.从粒间吸力特性再认识非饱和土抗剪强度理论[J].岩土工程学报,2001,23(4):412-417.

[20] 车雯方.水环境对钠基土和钙基土工程性能的影响及机理分析[D].杨凌:西北农林科技大学,2018.

[21] 颜荣涛,赵续月,于明波,等.盐溶液饱和黏土的等向压缩特性[J].岩土力学,2018,39(1):129-138.

[22] 赵续月. NaCl 溶液饱和重塑黏土的三轴试验研究[D].桂林:桂林理工大学,2018.

[23] 赵蕊.基于贵阳红黏土力学参数试验的邓肯-张模型修正[D].贵阳:贵州大学,2016.

[24] 陈之祥,李顺群,夏锦红,等.冻土导热系数测试和计算现状分析[J].建筑科学与工程学报,2019,36(2):101-115.