

钠盐含量变化对海涂粉砂土工程边坡土力学性质的影响

郑一鹏¹, 余冬立^{1,2}, 王洪德¹

(1. 河海大学农业工程学院, 南京 210098; 2. 中国科学院教育部

水土保持与生态环境研究中心黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为探索钠盐含量变化对海涂粉砂土工程边坡稳定性的影响, 以界限含水率试验和抗剪强度测定试验为基础, 分析 Na^+ 含量对粉砂土界限含水率和抗剪强度等土力学参数的响应规律, 并结合无限边坡安全系数计算, 明确不同饱和度条件下土壤 Na^+ 含量变化对边坡稳定性的影响。结果表明: 随着 Na^+ 含量增加, 土样塑限呈缓慢增大趋势, 而液限呈减小的变化规律。平均黏聚力和平均内摩擦角均随 Na^+ 含量增加而减小。对相同质地土壤, 当饱和度不变时, 边坡安全系数 FS 随 Na^+ 含量增加而减小; 当 Na^+ 含量不变时, 土壤饱和度越大, 安全系数 FS 越小, 当饱和度为 1 时, FS 达到最小值。土壤饱和度越高, FS 随 Na^+ 含量增加而减小的幅度越大。

关键词: 盐渍土; 界限含水率; 抗剪强度参数; 无限边坡; 安全系数

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0093-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.02.015

Effects of Sodium Salt Content on Soil Mechanical Properties of Silty Sandon Engineering Soil Slope in Coastal Reclamation Area

ZHENG Yipeng^{1,2}, SHE Dongli^{1,2}, WANG Hongde¹

(1. College of Agriculture Engineering, Hohai University, Nanjing 210098; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: In order to explore the effects of sodium salt content on the stability of silty engineering slope in marine saline-alkali land, limit moisture content and shear strength experiments were carried out to investigate the influence of Na^+ content on the soil mechanics parameters including limiting moisture content, shear strength and other parameters. Moreover, combined with the calculation of the infinite slope safety factor, the influence of soil Na^+ content on slope stability under different saturation conditions was defined. The results showed that with the increasing of Na^+ content, the plastic limit of soil sample increased slowly, while the liquid limit decreased. In addition, average cohesion and average internal friction angle both decreased with the increasing of Na^+ content. For the same soil texture, the slope safety factor (FS) decreased with the increasing of Na^+ content when the soil saturation was constant. When the Na^+ content was constant, the greater the soil saturation, the less the FS was, and the FS reached the minimum value when soil was fully saturated. The higher the soil saturation, the greater the decrease amplitude of FS with the increasing of Na^+ content.

Keywords: saline-alkali soil; limit moisture content; shear strength parameters; infinite slope; safety factor

土壤盐渍化是土壤退化的重要形式之一^[1]。中国盐渍化土壤分布广泛, 盐渍化土壤面积达 $3.6 \times 10^7 \text{ hm}^2$ ^[2], 主要分布在西北干旱半干旱地区、青藏高原和沿海地区等^[3-4]。为改善盐渍化区域土壤环境,

农业开发建设与国土整治过程中配套修建了大量水利工程, 包括开挖沟渠(河)、道路等。在各类工程建设中, 提高工程边坡稳定性是保障工程使用寿命的关键问题之一。由于盐渍化土壤中离子含量高, 当盐离

子溶于土壤水体后将很大程度改变土体结构,从而影响围垦区土体工程力学稳定性^[5]。努尔比亚·吾斯曼^[6]通过界限含水率试验,得出随着氯化钠(NaCl)含量增加,土样液限减小,当含水率较低时,液限变小使土体更快达到液性状态,从而降低土体强度;王军等^[7]通过试验表明,含盐量增加使碳酸盐渍土黏聚力减小,内摩擦角呈先减小后增大变化规律;付江涛等^[8]通过对人工配制硫酸钠(Na₂SO₄)盐渍土抗剪强度试验,指出存在土体抗剪强度变化的含盐量阈值,在含盐量小于该阈值时,黏聚力和内摩擦角随含盐量增加而呈减小趋势,当含盐量大于该阈值时,黏聚力与内摩擦角随含盐量增加而增大;张薇^[9]指出,盐渍土腐蚀工程设施^[10-11],Cl⁻和SO₄²⁻等离子溶入水中腐蚀钢筋和混凝土,随时间增长,工程边坡中的抗滑挡墙、锚杆等易受到腐蚀失去强度而引起滑坡。上述研究表明,盐分种类及盐分含量对黏土界限含水率及抗剪强度参数均有不同程度的影响,沿海地区土壤母质多为河流冲积海相沉积物,土壤积盐过程先于成土过程,主要为高钠盐粉砂土^[4]。在降雨入渗和地下水强烈蒸发共同作用下,沿海土壤水分运动过程中伴随频繁的“脱盐”与“反盐”过程,土壤钠离子化学环境动态变化明显,影响土壤结构与工程边坡稳定特性。因此,本研究以界限含水率和抗剪强度测定试验为基础,分析海涂粉砂土界限含水率和抗剪强度等土力学参数对Na⁺含量的响应规律,并结合无限边坡安全系数计算,探索土壤Na⁺含量变化对边坡稳定性的影响,为沿海地区工程边坡防护提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本研究土样取自江苏省如东县东陵垦区盐渍土,取样深度为表层0—20 cm。试验土壤类型为粉砂壤土,土壤砂粒(0.25~0.05 mm)含量38.6%,粉砂粒(0.05~0.002 mm)含量52.9%,黏粒(<0.002 mm)含量8.5%;粉砂土的初始含盐量2.03 g/kg,有机质含量3.26 g/kg。取回试验土壤后均匀摊开并进行风干、碾压、粉碎后过2 mm筛,用于培养试验。

1.2 试验设计

试验于2016年5—11月在河海大学南方地区高效灌排与农业水土环境教育部重点实验室日光温室中进行。称取试验土样,分成5份。根据文献^[12]中方法,配置一定浓度NaCl溶液,均匀喷洒到各土样上,将土样搅拌均匀后用薄膜密封包裹住,放置阴凉处,每过5天搅拌1次,放置60天后取出,培育成含盐量为2.03,5,10,15,20 g/kg的5种梯度土样。采用PVC管柱状容器将

培育好的不同含盐量的土样分层装填制作成土柱,装填土壤容重为1.35 g/cm³。分别采用淡水(蒸馏水)灌溉入渗不同盐分含量土柱(5个处理)和微咸水(NaCl含量分别为蒸馏水、3,6,9,12 g/L)灌溉入渗初始盐分含量土柱(土壤含盐量2.03 g/kg,5个处理)。于5月2日、6月30日和9月8日分3次向各土柱共灌水7.5 L,每次灌水入渗量2.5 L。每次灌水结束后,所有土柱敞开进行自然蒸发脱水。各处理设置3个重复。

土柱入渗—蒸发干湿交替试验结束后(11月9日),取各土柱0—10 cm土样,测定土壤Na⁺含量和液塑限与抗剪强度参数。采用数显式液、塑限联合测定仪法(CYS-2,南京土壤仪器厂)测定供试土壤界限含水率。根据《土工试验方法标》^[13]配制供试土样,将其填入调土杯中并刮平,填土容重控制在1.45 g/cm³。每个试样任取3个点进行试验,按照规范^[13]使用液、塑限联合测定仪分别测定并记录试验土样上3个点的圆锥下垂深度。试验后取锥体附近土样测定含水率。各土样重复测定2次。根据规范,以含水率为横坐标,圆锥下沉深度为纵坐标,在双对数坐标纸上绘制关系曲线,曲线中下沉深度17 mm对应的含水率为液限,下沉深度2 mm对应含水率为塑限^[13-14]。

采用应变控制式直剪仪测定供试土壤抗剪强度参数。根据规范^[13]中的试验方法制备试验所用试样,测得试样含水率为22%,干密度为1.45 g/cm³。将试样置于剪切盒中,分别在垂直围压为100,200,300,400 kPa下开展直剪试验,读取并记录测力量表读数,试验后再次测定试样含水率。根据规范^[13]公式计算土样剪应力,并根据剪应力与剪切位移关系曲线计算土样抗剪强度。以抗剪强度为横坐标,垂直压力为纵坐标,绘制抗剪强度与垂直压力关系曲线图,其中直线倾角为内摩擦角 φ ,纵坐标截距为黏聚力 c 。

1.3 边坡安全系数计算

本研究通过分析无限边坡稳定性来阐明土壤钠盐含量变化对浅层边坡失稳的影响。在边坡稳定性计算方法中,通常采用整体的极限平衡法进行分析,根据不同的边坡破裂面形状采用不同的分析方式。边坡失稳破裂面形状与土质相关,含有粗粒土或砂性土的破裂面多成直线形^[15]。海涂土壤为粉砂土,且灌排工程边坡滑动面深度与长度之比小。当深长比<0.1时,应采用直线破裂面法中的无限边坡滑动分析法计算安全系数(FS)。无限边坡示意图1。

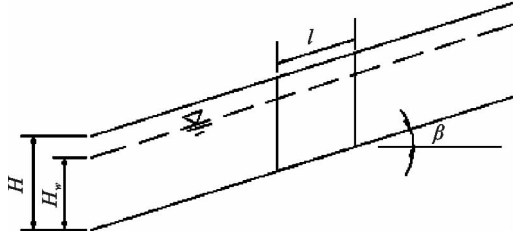
根据公式利用无限边坡滑动分析法计算安全系数^[16]:

$$FS = A \frac{\tan \varphi}{\tan \beta} + B \frac{c}{\gamma H}$$

$$A = 1 - \frac{\rho_w H_w}{\gamma H \cos^2 \beta}$$

$$B = \frac{1}{\cos^2 \beta \tan \beta}$$

式中: φ 为内摩擦角($^\circ$); c 为黏聚力(kPa); γ 为土的重度(kN/m^3); γ_w 为水的重度(kN/m^3); H 为土层厚度(m); H_w 为土中水层厚度(m)。



注: H 为土层厚度(m); H_w 为土中水层厚度(m); l 为单位土条长度($l=1$)(m); β 为坡角($^\circ$)。

图1 无限边坡示意

根据研究区灌排工程边坡建设实际情况,本研究拟定坡脚 $\beta=30^\circ$, 土层厚度为 1 m, 设置土体饱和度梯度为 0, 40%, 60%, 100%。根据抗剪强度试验确定的平均黏聚力和内摩擦角, 运用无限边坡滑动分析法计算土体安全系数, 分析不同饱和度条件下土壤 Na^+ 含量变化对海涂粉砂土边坡稳定性的影响。

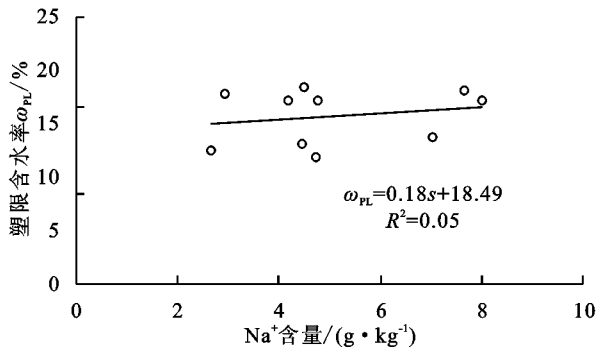


图2 Na^+ 含量与塑限、液限关系散点图

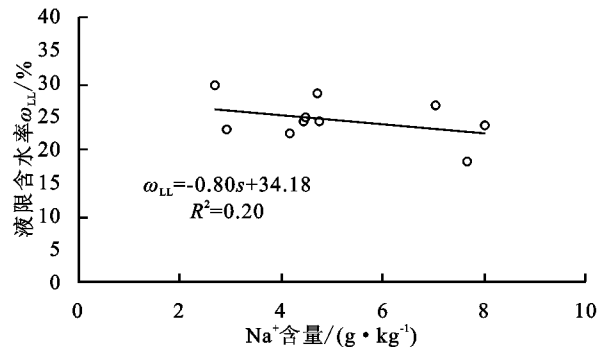
2.2 土壤钠盐含量变化对土体抗剪强度参数的影响

图3为土样 Na^+ 含量与其平均黏聚力和平均内摩擦角关系散点图。随土壤 Na^+ 含量增加土样平均黏聚力呈显著降低趋势(关系式为: $c = -0.68s + 13.32$, 决定系数 $R^2 = 0.44$); 当土样 Na^+ 含量从 2.67 g/kg 到 8.02 g/kg 变化时, 平均黏聚力从 12.03 kPa 减小到 6.21 kPa, 减小 48.4%, 变化幅度较大。土样平均内摩擦角随 Na^+ 含量增加而降低, Na^+ 含量—平均内摩擦角 φ 关系曲线较平缓(关系式为: $\varphi = -0.20s + 30.64$, 决定系数 $R^2 = 0.34$); 随 Na^+ 含量增加, 土样平均内摩擦角最小值比最大值减小 7.5%, 变化幅度较小。高钠盐土壤中溶液浓度大, 使土颗粒表面扩散层水膜厚度变厚, 降低土壤胶体间的黏结作用。同时留存在土壤水中的 Cl^- 能降低土颗粒之间的引力, 导致土壤颗粒间的距离增大, 从而导致土样黏聚力和内摩擦角均减小^[19-20]。

2 结果与分析

2.1 土壤钠盐含量变化对土体界限含水率的影响

通过界限含水率试验测定出不同 Na^+ 含量下土样塑限 ω_{PL} 和液限 ω_{LL} 。图2为土样 Na^+ 含量与其液塑限关系散点图。土样塑限随 Na^+ 含量增加呈缓慢增加的变化规律(关系式为: $\omega_{\text{PL}} = 0.18s + 18.49$, 决定系数 $R^2 = 0.05$); 当土样 Na^+ 含量从 2.67 g/kg 增加到 8.02 g/kg 时, 塑限最大值相比最小值增加 22.7%。而 Na^+ 含量增加会使土样液限逐渐减小, Na^+ 含量—液限 ω_{LL} 关系曲线下降趋势明显(关系式为: $\omega_{\text{LL}} = -0.80s + 34.18$, 决定系数 $R^2 = 0.20$); 当土样 Na^+ 含量从 2.67 g/kg 增加到 8.02 g/kg 时, 液限减小幅度没有塑限减小幅度大, 从 34.8% 降低至 29.2%, 减小 16.1%, 决定系数 R^2 相对较高。已有研究^[17]表明, 影响土壤界限含水率的主要原因是土壤颗粒表面的扩散层厚度。当 NaCl 溶入水中, 溶液浓度增大, Na^+ 受到土壤颗粒间双电层排斥力和范德华吸引力的作用而紧密地吸附在黏粒表面, 使双电层被压缩, 热力学电位降低, 扩散层厚度变薄, 降低了土样液限^[18]。



3 边坡安全系数

图4为采用无限边坡滑动分析法计算土样 Na^+ 含量、土壤饱和度与边坡安全系数 FS 关系散点图。取 4 个饱和度梯度, 分别为 H_w/H 为 0, 0.4, 0.6 和 1。运用 SPSS 19.0 软件进行相关性分析, 可以得出 Na^+ 含量和饱和度对 FS 均成显著关系($P < 0.05$)。当 H_w/H 保持不变时, 随 Na^+ 含量的增加, 土样 FS 呈线性降低趋势。 Na^+ 含量的增加会使土样黏聚力和内摩擦角均有不同程度的减小, 因此通过无限边坡滑动法计算出的安全系数也呈显著减小的变化规律。随饱和度的增加, 土样 FS 减小幅度有所增加, 分别为 30.5%, 35.3%, 38.6% 和 45.8%。说明土壤饱和度越高, Na^+ 含量对 FS 的影响更强, FS 随 Na^+ 含量增加而减小的幅度更大。当 Na^+ 含量不变时, 边坡土壤饱和度增大使 FS 线性降低, 相邻饱和度间的

FS 平均减小幅度分别为 14.0%, 8.7% 和 17.8%, 可以看出饱和度为 0~40% 和 60%~100% 时, FS 减小速率较快; 当 $H_w/H=1$ 时, FS 达到最小值 ($FS=$

1.1)。当边坡土体中钠盐含量和饱和度增加到一定程度时, FS 会降低至 1 以下, 这时边坡会开始滑动, 导致坡体发生滑坡。

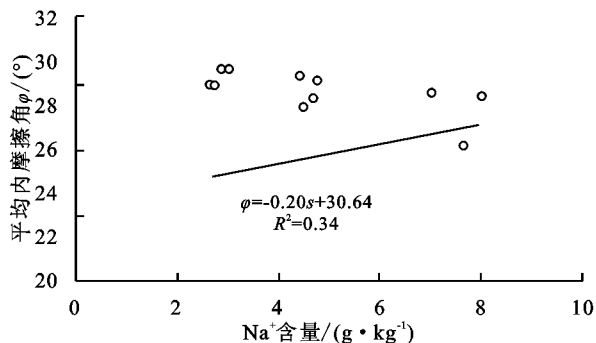
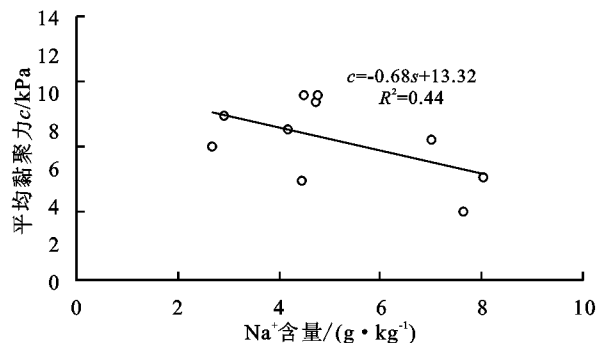


图 3 Na^+ 含量与抗剪强度参数关系散点图

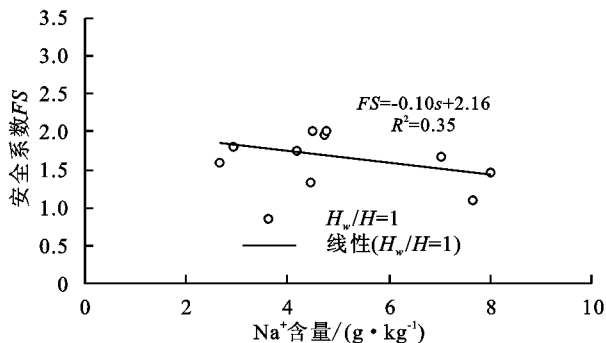
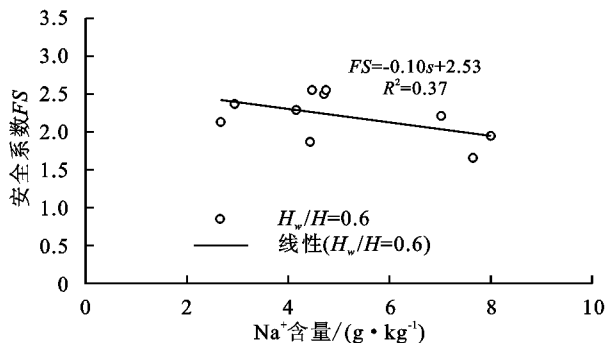
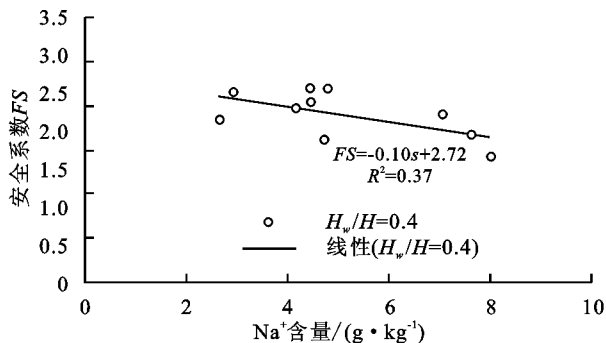
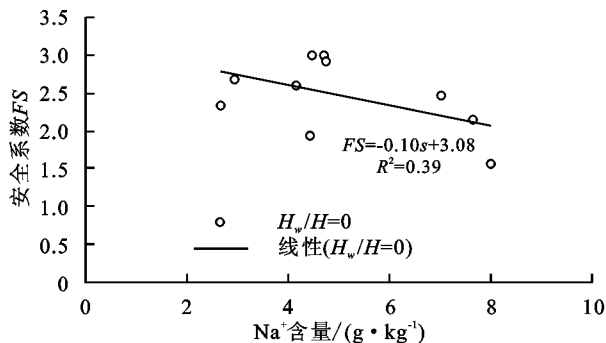


图 4 不同饱和度下 FS 与 Na^+ 含量的关系

4 讨论

本研究以界限含水率和抗剪强度测定试验为基础, 分析海涂粉砂土界限含水率和抗剪强度等土力学参数对 Na^+ 含量的响应规律, 并结合无限边坡安全系数计算, 探索土壤 Na^+ 含量变化对边坡稳定性的影响。随着 Na^+ 含量增加, 土样塑限逐渐上升而液限呈降低趋势。海涂围垦区土壤中粉粒含量高, 土样压实过程中多处处于非饱和状态, 依靠微弱的毛细压力保持土样完整性, 产生假塑性^[21]。假塑性的存在容易导致试验测得的液、塑限值比实际值偏大。通过与努尔比亚·吾斯曼^[6]所做试验结果对比发现, 粉砂土在含盐量较低的情况下土样液限降低幅度更大。这说明钠盐含量对粉砂土液限的影响比黏性土更大。

本研究发现, 土样黏聚力与内摩擦角随 Na^+ 含量增加均呈减小的变化规律。土壤中盐分以晶体和溶液形式存在, 形成了水、土、气、盐并存的“四相”物质体系, 盐

分中易溶盐相态变化会引起土体结构的变化^[22]。付江涛等^[8]通过测定含盐量对人工配制硫酸钠(Na_2SO_4)盐渍土抗剪强度试验, 提出当含水率不变时, 存在土体抗剪强度变化的含盐量阈值, 该值为 5.17%, 在含盐量小于该阈值时, 黏聚力和内摩擦角随含盐量增加而减小, 当含盐量大于该阈值时则呈相反的变化趋势。当含盐量到达阈值后, 由于含水率不变, 硫酸钠随含盐量增加将饱和而析出晶体, 这部分盐就作为土中的固相, 在土颗粒间起到胶结作用、吸收水分及降低溶液的润滑作用, 使土样的黏聚力和内摩擦角均增大。本研究所用土壤与上述试验所用土壤质地相似, 但试验使用的钠盐种类不同。付江涛等^[8]在经过洗盐处理后向土样中施加的钠盐为无水硫酸钠, 土样含盐量远大于本研究土样含盐量。且本研究土样硫酸钠含量并没有达到该试验结论中的含盐量阈值。由于氯化钠溶解度较高, 含盐量并没有达到土样含水率条件下的饱和和需

求,氯化钠和硫酸钠均不会以结晶盐的形式析出,因此土样的黏聚力和内摩擦角均呈减小趋势。

边坡安全系数是边坡稳定性的一个定量评价概念。本研究发现粉砂土浅层边坡安全系数与 Na^+ 含量和饱和度呈负相关关系。努尔比亚·吾斯曼^[6]通过条分法计算出施加 NaCl 的黏性土边坡安全系数,且安全系数随含盐量的增加而增大。该结果与本研究的差异在于含盐量不同。本研究中氯化钠含量没有达到土体含水量条件下的饱和需求。随着氯化钠的施加量增加,溶液离子浓度增大,土颗粒表面扩散层水膜厚度变厚,降低土壤胶体间的黏结作用,增强溶液中 Na^+ 的润滑作用,使土样黏聚力和内摩擦角随钠盐含量的增加而显著减小。这导致通过无限边坡滑动分析法计算出的安全系数也随钠盐含量的增加逐渐减小。而努尔比亚的试验中,氯化钠含量达到饱和程度,多余的氯化钠以结晶盐的形式析出,力学特性上表现为抗剪强度参数的增强^[23],计算出的安全系数随含盐量的增加而增加。且本试验使用土壤为粉砂盐渍土,黏粒含量较少,抗液化能力较弱,受含水率影响很大,含水率稍微增高便会使土的强度大大降低^[24],降低边坡稳定性。因此,钠盐含量、土壤饱和度和土壤质地是提高边坡稳定性时必须考虑的3个重要因素,为改良江苏海涂粉砂土工程边坡,增强沿海地区工程边坡防护提供理论依据。

5 结论

(1)海涂粉砂土塑限随 Na^+ 含量增加表现为增大过程,增大趋势缓慢;盐渍土液限与 Na^+ 含量关系密切,液限随 Na^+ 含量增加呈减小的变化规律。土壤液限降低导致土体更容易达到液性状态,土体强度大大降低。

(2)海涂粉砂土平均黏聚力和平均内摩擦角均随 Na^+ 含量增加而显著降低。土壤黏聚力与内摩擦角的降低会导致海涂盐渍土边坡安全系数减小。当饱和度不变时,安全系数 FS 随 Na^+ 含量增加而逐渐减小,当安全系数减小到1以下,边坡将不再保持稳定。

(3)当 Na^+ 含量不变时,土壤饱和度越大, FS 越小,当饱和度为1时, FS 达到最小值。且土壤饱和度越高, FS 随 Na^+ 含量增加而减小的幅度越大。当 Na^+ 含量与饱和度同时处于较高水平时,盐渍土边坡安全系数很小。

参考文献:

- [1] 高江平,王永刚.盐渍土工程与力学性质研究进展[J].力学与实践,2011,33(4):1-7.
- [2] 杨劲松.中国盐渍土研究的发展历程与展望[J].土壤学报,2008,45(5):837-845.
- [3] 温利强.我国盐渍土的成因及分布特征[D].合肥:合肥工业大学,2010.
- [4] 余冬立,刘冬冬,彭世彰,等.海涂围垦区排灌工程边坡土壤侵蚀过程的水动力学特征[J].水土保持学报,2014,28(1):1-5.
- [5] 张飞,胡小庆,刘亚薇,等.含盐量对硫酸盐渍土抗剪强度影响试验研究[J].铁道建筑,2014(6):162-164.
- [6] 努尔比亚·吾斯曼.盐渍土的物理力学性质及对边坡稳定的影响研究[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2012.
- [7] 王军,顿耀龙,郭义强,等.松嫩平原西部土地整理对盐渍化土壤的改良效果[J].农业工程学报,2014,30(18):266-275.
- [8] 付江涛,栗岳洲,胡夏嵩,等.含盐量对亚硫酸盐渍土抗剪强度影响的试验[J].农业工程学报,2016,32(6):155-161.
- [9] 张薇.滨海盐碱土改良后水盐动态及理化性质的研究[D].北京:北京林业大学,2014.
- [10] 李芳,高江平,陈建,等.盐渍土盐胀对低层建筑的危害及其防治[J].土木工程学报,1999,32(5):46-50.
- [11] 温利强,杨成斌,李士奎.中国西北地区盐渍土分布及危害[J].工程与建设,2010,24(5):585-587.
- [12] Liu D D, She D L. Sodicty effects on hydrological processes of sodic soil slopes under simulated rainfall[J]. Hydrological Processes,2017,31:981-994.
- [13] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准[M].北京:中华计划出版社,1989.
- [14] 徐奋强.黏性土液塑限测定试验研究[J].岩土工程界,2006,9(11):41-42.
- [15] 李宏波.直线滑动面法分析路基边坡稳定性的探讨[J].路基工程,2010(6):37-39.
- [16] Sadasivam B Y, Reddy K R. Engineering properties of waste wood-derived biochars and biochar-amended soils[J]. International Journal of Geotechnical Engineering,2016,9(5):521-535.
- [17] 孟庆芳.污染粉质粘土液塑限试验研究[D].太原:太原理工大学,2009.
- [18] 张芹,颜荣涛,韦昌富,等.孔隙溶液对粉质黏土界限含水率的影响[J].岩土力学,2015(增刊1):558-562.
- [19] 李飞,王贵军,张季超.土力学与基础工程[M].武汉:武汉理工大学出版社,2012.
- [20] 刘康.青海氯盐渍粉土物理力学性质研究及路基变形分析[D].西安:长安大学,2012.
- [21] 高大钊,熊兴邦.土的分类研究方法:对土分类定名的几点建议[J].岩土工程学报,1988,10(2):1-8.
- [21] 徐湘田,白瑞强,赖远明,等.含盐冻结粉质砂土力学性质的试验研究[J].煤炭学报,2016,41(4):836-842.
- [23] 洪安宇,杨晓松,党进谦,等.非饱和氯盐渍土抗剪强度特性试验研究[J].长江科学院院报,2013,30(4):52-55.
- [24] 肖军华,刘建坤,彭丽云,等.黄河冲积粉土的密实度及含水率对力学性质影响[J].岩土力学,2008,29(2):409-414.