

颗粒级配及含盐量对西宁地黄土状盐渍土抗剪强度特征影响试验研究

付江涛

陕西理工大学土木工程与建筑学院, 陕西 汉中
Email: fujiangtao865@sina.com

收稿日期: 2020年11月3日; 录用日期: 2020年11月18日; 发布日期: 2020年11月25日

摘要

通过对西宁盆地广泛分布的黄土状盐渍土进行筛分试验, 获得5组不同粒径(<0.1 mm, 0.1~0.25 mm, 0.25~0.5 mm, 0.5~1.0 mm和1.0~2.0 mm)的土体, 在土体中加入不同质量硫酸钠(Na_2SO_4)以配制成不同粒径、不同含盐量(0.0%、0.5%、1.0%、3.0%、6.0%、9.0%和12.0%)的盐渍土试样, 通过室内直剪试验对上述试样进行剪切试验, 试验结果表明: 1) 含盐量和土体粒径对盐渍土抗剪强度指标和试样变形破坏产生显著影响, 对于5种不同粒径盐渍土, 其抗剪强度指标均随含盐量增加表现出先减小后增加变化特征, 黏聚力和内摩擦角最小值所对应含盐量均为1%~3%; 2) 对于粘聚力, 当含盐量小于等于6%时, 粘聚力随粒径增加表现出降低的变化特征, 当含盐量为9%和12%时, 粘聚力则表现出增加的变化特征; 3) 对于内摩擦角, 当含盐量为0.0%~3.0%时, 土体黏聚力随粒径增大表现出增加的变化趋势, 当含盐量为6.0%、9.0%和12.0%时, 其内摩擦角则随粒径增加表现出先增加后减小的变化特征; 4) 随含盐量逐渐增加, 盐渍土剪应力-应变关系表现出盐渍土由弹塑性逐渐过渡至脆性的材料特性; 5) 对于粒径较小(<0.5 mm)的盐渍土, 随着含盐量逐渐增加, 盐渍土的变形和破坏特征表现为由弹塑性变形破坏过渡至脆性变形破坏的变化规律, 对于粒径较大盐渍土(>0.5 m), 其破坏特征主要以脆性破坏为主。该研究结果对于揭示青藏高原东北部盐渍土地区边坡水土流失、边坡失稳机理具有重要的理论研究价值, 同时也对该区及地质特征与气候特征与该区相似的区域水土流失、滑坡等地质灾害的科学防治和边坡治理具有实际指导意义。

关键词

盐渍土, 颗粒级配, 抗剪强度指标, 含盐量, 西宁

Experiment Study on the Effect of Soil Particle Size Distribution and Salt Content on the Shear Strength of Xining Salinized Soil

Jiangtao Fu

School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong Shaanxi
Email: fujiangtao865@sina.com

Received: Nov. 3rd, 2020; accepted: Nov. 18th, 2020; published: Nov. 25th, 2020

Abstract

Based on sieve tests, 5 sets of soil with different particles size (<0.1 mm, 0.1 - 0.25 mm, 0.25 - 0.5 mm, 0.5 - 1.0 mm and 1.0 - 2.0 mm) were obtained. Built on that, Na₂SO₄ powder in different mass was added into sieved soil to make salinized soils in different salt contents with different particle sizes. After these, indoor direct shear tests were conducted to these salinized soils. The results exhibit that: 1) both salt content and soil particle size distribution exert significant effects on the shear strength properties and failure behaviors of salinized soil. For the five sets of salinized soils in different particle sizes, their shear strength indices exhibit an initial decreasing and then increasing trend with salt content and the salt content corresponding to minimum values in shear strength is 1% and 3%. Additionally, cohesion is sensitive to the variation of salt content and internal frictional angle is insensitive; 2) for cohesion, as salt content ranges from 0.0% to 6.0%, it experienced a linear decreasing trend with soil particle size increasing, whereas as salt content distribute from 9.0% to 12.0%, it exhibits an increasing trend with soil particle size increasing; 3) for internal friction angle, as salt content less than 6.0%, it exhibits an increasing trend and beyond this value, it exhibits an initial increasing and then declining trend with particle size increasing; 4) with salt content increasing, shear stress-strain curve experienced a transition from elastic-plastic to brittle property; 5) as to salinized soil with soil particles size less than 0.5 mm, with salt content increasing, its deformation and failure property are characterized with a transition from elastic-plastic to brittle property, and as to soil with particle size larger than 0.5 mm, its deformation and failure properties are dominated with brittle feature. The researching results have a significant role in salinized arable land reclamation in regions jeopardized with soil salinization and soil erosion, also can be used to shed light on the mechanism of soil erosion and slope failure in salinized regions and play a practical role in soil erosion prevention.

Keywords

Salinized Soil, Soil Particles Composition, Shear Strength Indexes, Salt Content, The Xining Basin

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

盐渍土是指易溶盐含量超过 0.3% 的各类土体, 广泛分布于我国西北干旱、半干旱地区以及东部滨海地区[1] [2] [3] [4]。受盐分、温度、含盐量、含水率、盐分类型、颗粒组成等多种因素影响, 盐渍土物理力学、变形和破坏特性较为复杂[5]-[10]。其中, 粒径和含盐量是影响盐渍土物理力学、变形和破坏特性最基本的因素[10]-[20]。如于天佑等(2019) [9]指出细粒(0.005~0.05 mm)硫酸盐渍土冻胀行为与其温度、

水分和含盐量密切相关；张莎莎等(2010) [10]发现粗粒盐渍土(粗砂)在降温阶段会同时产生盐胀和溶陷，且溶陷量大于盐胀量导致的土体结构变化是粗粒盐渍土冻胀破坏的主要原因；Hu *et al.* (2011) [11]、Zhi *et al.* (2014) [12]研究了水盐运移与土壤颗粒级配间关系，发现土体粒径是影响盐渍土物理特性的重要因素。由此可见，关于盐渍土粒径对其物理力学特性方面的研究，主要集中于盐渍土冻胀破坏特性、水盐运移及溶陷性等方面，而关于盐渍土粒径对其抗剪强度以及在剪切作用下变形破坏方面的研究却相对较少[7]；此外，相关研究表明当盐渍土盐含量超过某阈值时，土体抗剪强度表现出降低或升高的变化趋势[14] [15] [16] [17]，而不同粒径下盐渍土抗剪强度指标是否遵循该变化趋势则需进一步探讨。因此，本研究选取广泛分布于青藏高原东北部西宁盆地的黄土状土为研究对象，通过对土体进行筛分试验以获得不同粒径的土体，并在该土体中加入不等量 Na_2SO_4 粉末以配制成不同含盐量的人工制备盐渍土试样，进而在该基础上，借助于直剪试验获得该盐渍土试样的抗剪强度指标并观察其破坏特性，最后分析了土粒级配和含盐量对人工制备盐渍土抗剪强度指标以及破坏特征的影响，该研究结果为进一步揭示青海东北部盐渍土地区水土流失和边坡失稳机理提供理论依据，同时也对该区水土流失、滑坡等地质灾害的科学防治和边坡治理提供科学指导。

2. 研究方法 with 材料

2.1. 研究区概况

研究区西宁盆地位于青藏高原东北部与黄土高原西缘交接地带，地形由高山区、低山丘陵和湟水河谷组成，地势由盆地外围向中心地区逐渐降低，属于典型的山间河谷地貌，地形较为破碎，土体类型以黄土及类黄土为主[21]-[27]，黄土高陡边坡较为发育，生态环境脆弱，使得区内地质灾害频发，给当地居民生命及财产安全带来较大隐患[21] [22] [23] [24]。相关调查结果表明，区内主要地质灾害为水土流失、滑坡、崩塌和土体盐渍化[21]-[27]。其中，水土流失面积为 7623.9 km^2 ，主要分布于湟水河流域[21] [22] [23] [24]；滑坡和崩塌分别为 63 处和 22 处[22]，主要分布于湟水河干流及主流两侧丘陵边缘与河谷边缘的过渡地带[22]；土体盐渍化主要分布于西宁盆地南山区、机场、东部河谷阶地、低山丘陵地区，以及西宁东出口前倾斜平原区一带，区内土体盐渍化类型以硫酸盐渍土为主，程度为中 - 强[25] [26] [27]。此外，区内植被较为稀疏，裸露边坡中的细粒土经流水和风力搬运而发生位移，并重堆积于边坡底部，而粗颗粒土因其自重相对较大不易被营力搬运而滞留原位，这必将导致边坡土体颗粒级配发生改变，从而导致边坡土体物理力学特性产生不同程度变化，进而为水土流失、滑坡、崩塌、滑坡等地质灾害的进一步发展提供基础。

2.2. 研究方法

为探讨颗粒级配对盐渍土抗剪强度影响，将采集于研究区的黄土状土碾散，并放置于 105°C 的烘箱中烘烤 24 h，然后分别过孔径为 2.0 mm、1.0 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.1 mm 的土工筛，获得粒径为 $< 0.1 \text{ mm}$ 、 $0.1\sim 0.25 \text{ mm}$ 、 $0.25\sim 0.5 \text{ mm}$ 、 $0.5\sim 1.0 \text{ mm}$ 和 $1.0\sim 2.0 \text{ mm}$ 的土体，并将筛得的土体分别放置于铁盘中待用。区内土体实测含水率为 9.5%~12.98%，故将重塑盐渍土试样含水率设定为 12%。区内土体含盐量主要为 0.0%~6.0%，个别区域为 13.0%，故将重塑盐渍土含盐量设定为 0.0%、0.5%、1.0%、3.0%、6.0%、9.0% 和 12.0%；在上述试样中，重塑盐渍土加水量、加盐量和土体质量以及试样制备过程按照《土工试验方法标准》相关规定进行设置。待所有样品制备完毕后，将试样保存于密封性良好的环刀中养护 24 h，以确保重塑盐渍土中盐分能充分结晶，待养护完毕后依据规范《土工试验方法标准》相关规定开展室内直剪试验。

3. 试验结果

3.1. 重塑盐渍土试样抗剪强度变化特征

重塑盐渍土试样直剪试验结果表明, 在 50 kPa、100 kPa、200 kPa、300 kPa 垂直压力作用下, 试样抗剪强度随含盐量增长表现出先减小后增加的变化特征, 如图 1 所示。如对于粒径介于 0.1~0.25 mm 的试样, 当含盐量由 0.0% 增加至 3.0% 时, 在 50 kPa 垂直压力作用, 抗剪强度由 34.0 kPa 减小至 25.91 kPa, 当含盐量由 3% 增加至 12% 时, 抗剪强度则由 25.91 kPa 增至 67.83 kPa, 由该结果可知, 当重塑盐渍土试样中含盐量为 3% 时, 其抗剪强度达到最小值。张飞等(2014) [18]、陈炜韬等(2006) [16]、付江涛等(2016) [17]、赵海艳等(2005) [28] 亦得到类似的结果, 但需说明的是上述学者所获得的结果中, 其含盐量分别为 6.0%、1.3%、3.0% 和 10.0%; 另外, 在上述研究中, 前两者采用的盐渍土为硫酸盐渍土和亚硫酸盐渍土, 后两者的盐渍土则为氯盐渍土。

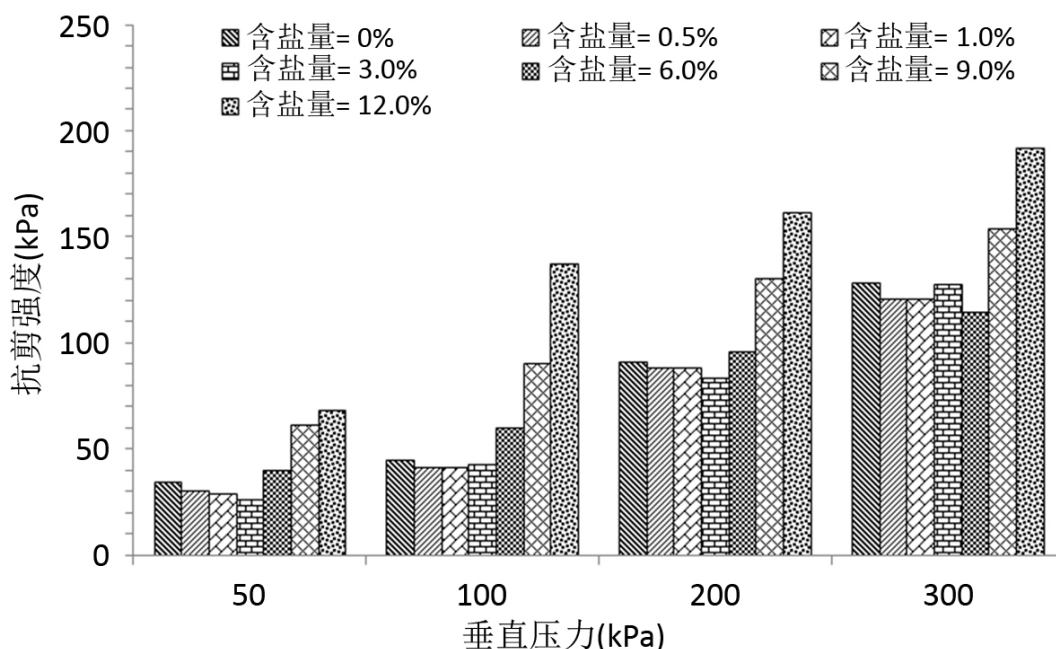


Figure 1. Relationship between shear strength of remolded saline soil and vertical pressure under different particle size composition

图 1. 不同级配条件下重塑盐渍土试样抗剪强度与垂直压力关系

3.1.1. 重塑盐渍土试样黏聚力与含盐量关系

图 2 所示为不同颗粒级配条件下, 重塑盐渍土试样黏聚力与含盐量关系, 由该图可知相同级配下, 随含盐量增加, 重塑盐渍土试样黏聚力均呈先减小后增加的变化规律。在此以颗粒小于 0.1 mm 的土体为例说明, 当含盐量分别为 0.0%、0.5%、1% 和 3% 时, 重塑盐渍土试样相应黏聚力分别为 14.90 kPa、14.09 kPa、13.66 kPa 和 12.04 kPa, 即试样黏聚力随含盐量增加表现出逐渐减小的变化特征, 而当含盐量由 3% 增至 6%、9% 和 12% 时, 相应的黏聚力则由 12.04 kPa 增至 32.06 kPa、40.32 kPa 和 53.33 kPa, 由该结果可知, 在含盐量为 3% 时重塑盐渍土试样黏聚力达到最小值, 即 12.04 kPa。

对上述结果进一步分析可知, 含盐量对重塑盐渍土试样黏聚力存在含盐量阈值, 即当含盐量由 0% 增至 3% 时, 重塑盐渍土试样相应黏聚力表现出减小的特征, 而当含盐量由 3% 增至 12% 时, 其相应的黏聚力则表现出增加的变化特征, 在含盐量持续增长阶段, 黏聚力达到最小值时所对应的含盐量值即为含

盐量阈值。相类似地,对于粒径为 0.1~0.25 mm 试样,其含盐量阈值为 1.0%,其相应的黏聚力为 9.35 kPa,对于粒径为 0.25~0.5 mm 试样,其含盐量阈值为 1.0%,其相应的黏聚力为 10.48 kPa,对于粒径为 0.5~1.0 mm 试样,其含盐量阈值为 1.0%,其相应的黏聚力为 10.43 kPa,对于粒径为 1.0~2.0 mm 试样,其含盐量阈值为 3.0%,其相应的黏聚力为 3.39 kPa,如图 2 所示。

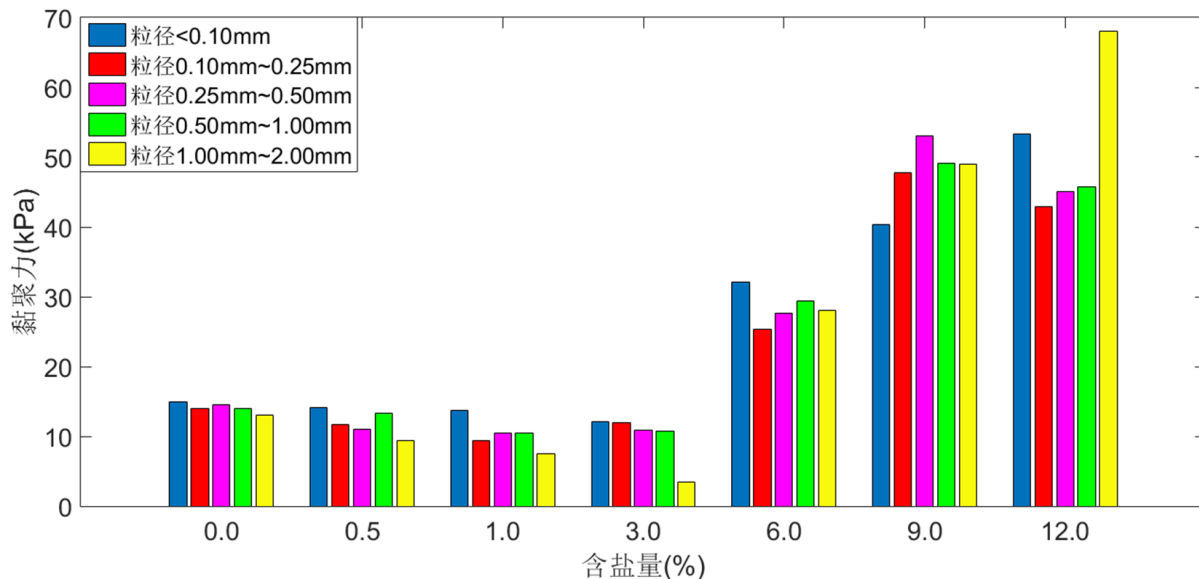


Figure 2. Relationship between cohesion and salt contents of remolded salinized soil under different particle size composition
图 2. 不同级配条件下重塑盐渍土试样黏聚力与含盐量关系

3.1.2. 重塑盐渍土试样内摩擦角与含盐量关系

图 3 所示为不同颗粒级配条件下, 重塑盐渍土试样内摩擦角与含盐量关系。由该图可知, 相同颗粒级配条件下, 随含盐量增长, 试样内摩擦角总体上呈先减小后增加的变化规律。为说明上述规律, 以粒径小于 0.1 mm 的试样为例加以阐述, 即当含盐量由 0% 减至 1.0% 时, 试样内摩擦角则由 18.51° 减至 13.51°, 而当含盐量由 1.0% 增至 12.0% 时, 其相应的内摩擦角由 13.51° 单调递增至 20.20°, 由此可见, 含盐量为 1.0% 时, 重塑盐渍土试样的内摩擦角为最小值, 即 13.51°。此外, 其余 4 种粒径条件下内摩擦角最小值分别为 15.91°、16.61°、17.19° 和 16.82°, 其相应的含盐量阈值分别为 0.5%、1.0%、0.5% 和 6.0%。

综上所述, 在含盐量增加的初始阶段, 即含盐量小于含盐量阈值时, 重塑盐渍土试样抗剪强度指标均随含盐量的增加而减少, 而当含盐量大于该阈值时, 试样内摩擦角随含盐量增长呈显著增加趋势。这主要归因于在一定粒径条件下, 重塑盐渍土试样中的含盐量低于含盐量阈值时, 适量盐分可增大土粒的间距[15], 从而造成试样黏聚力和内摩擦角减小, 且含盐量愈接近含盐量阈值时, 试样黏聚力和内摩擦角愈小, 而当试样含盐量超过含盐量阈值时, 盐分起到胶结作用或盐分开始结晶, 这种晶体填充于土体颗粒孔隙中从而起到骨架作用, 且含盐量愈高, 该胶结作用或骨架作用愈显著, 故重塑盐渍土试样黏聚力和内摩擦角愈大, 因此重塑盐渍土试样抗剪强度愈高[15]。

此外, 需说明的是本研究中, 在相同粒径条件下, 含盐量阈值并非始终表现为一一对应关系, 如当土体粒径小于 0.1 mm 时, 其黏聚力对应的含盐量阈值为 3.0%, 而内摩擦角对应的含盐量阈值为 1.0%, 与本研究结论相类似的研究亦可见张飞等(2014) [7]、Fu et al. (2019) [17], 但以上学者并未讨论不同级配条件下, 盐渍土抗剪强度指标与含盐量关系。

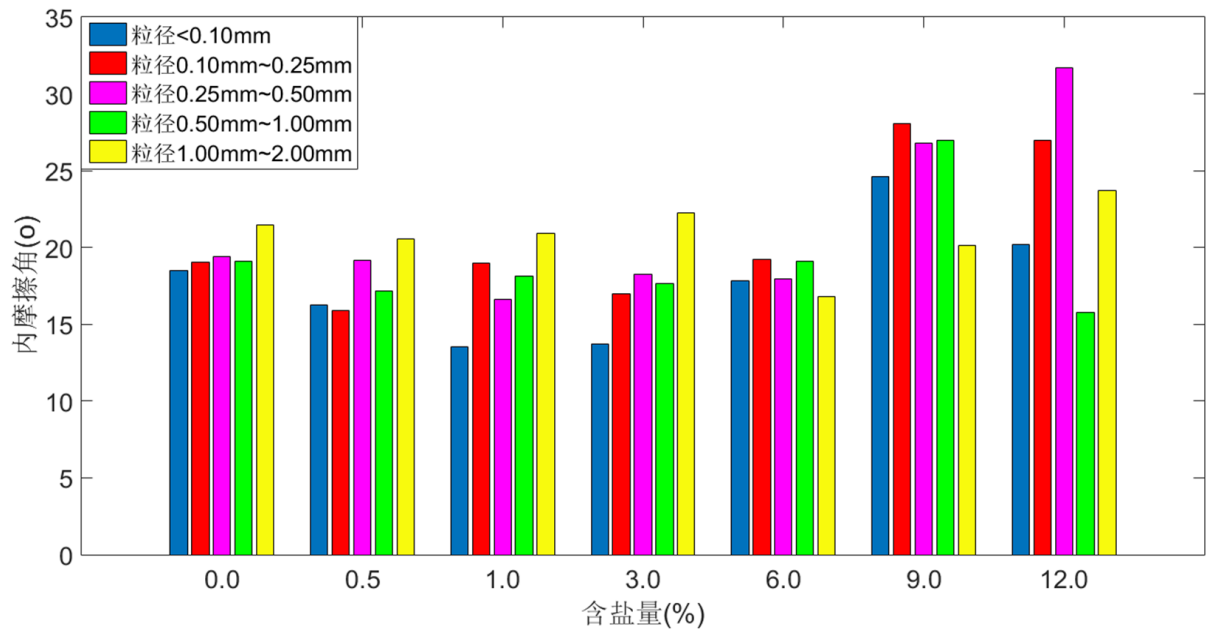


Figure 3. Relationship between internal friction angel and salt contents of remolded salinized soil under different particle size composition

图 3. 不同颗粒级配条件下重塑盐渍土试样内摩擦角与含盐量关系

3.2. 颗粒级配对盐渍土抗剪强度影响

3.2.1. 颗粒级配对盐渍土黏聚力影响

本研究中随粒径逐渐增加,盐渍土黏聚力表现出两种不同的变化特征,即当含盐量小于等于 6.0%时,随粒径逐渐增加,土体黏聚力呈线性降低的变化特征,如含盐量为 3.0%时,粒径由细至粗的 5 种不同颗粒级配土体,其黏聚力分别为 12.04 kPa、11.94 kPa、10.92 kPa、10.69 kPa 和 3.39 kPa;当含盐量大于 6.0%时,黏聚力随粒径增大表现出增加的变化特征,如含盐量为 9.0%的土体,当粒径由小于 0.1 mm 增至 1.0~2.0 mm,其相应的黏聚力由 40.32 kPa 增加至 49.04 kPa,如图 4 所示。

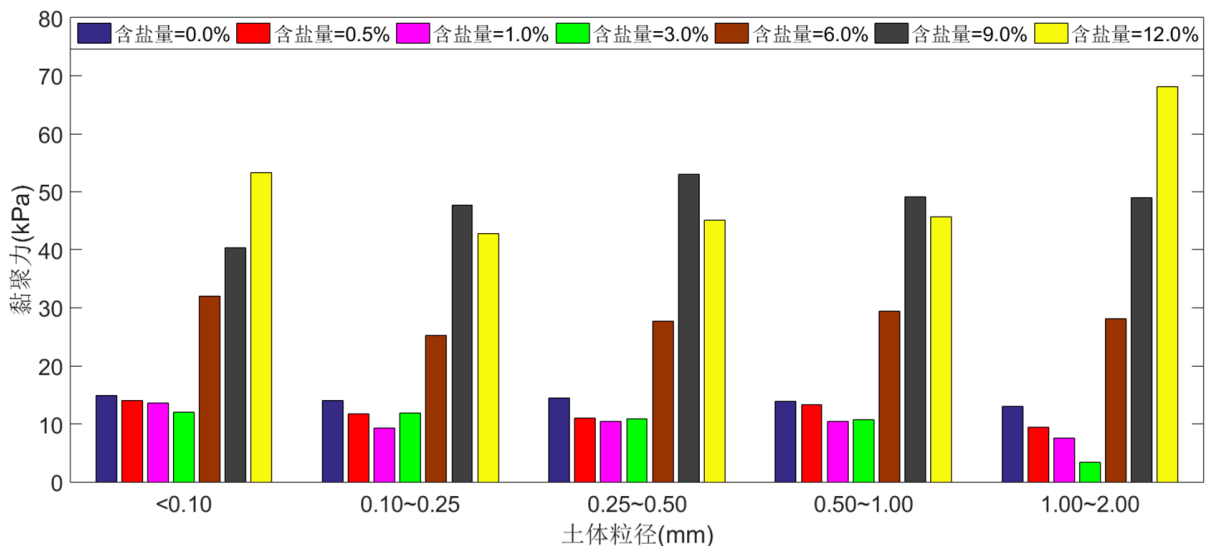


Figure 4. Relationship between cohesion and soil particle size of remolded salinized soil in different salt content

图 4. 不同含盐量下重塑盐渍土试样黏聚力与粒径关系

3.2.2. 颗粒级配对盐渍土内摩擦角值影响

本研究中, 7 种含盐量盐渍土在 5 种不同颗粒级配条件下, 其内摩擦角表现为 2 种变化特征, 即当含盐量为 0.0%~3.0% 时, 土体内摩擦角随粒径增加表现出增加的变化特征, 如含盐量为 3.0% 时, 土体粒径由小于 0.1 mm 增至 1.0~2.0 mm, 其相应的内摩擦角则由 13.7° 增至 22.24°, 当含盐量为 6.0%、9.0% 和 12.0% 时, 其内摩擦角则随粒径增加呈先增加后减小的变化特征, 如含盐量为 12.0% 时, 随粒径由小于 0.1 mm 增至 0.25~0.50 mm, 其内摩擦角由 20.2° 增至 31.7°, 但当粒径由 0.25~0.50 mm 增至 1.00~2.00 mm 时, 其内摩擦角则降低至 23.70°, 如图 5 所示。

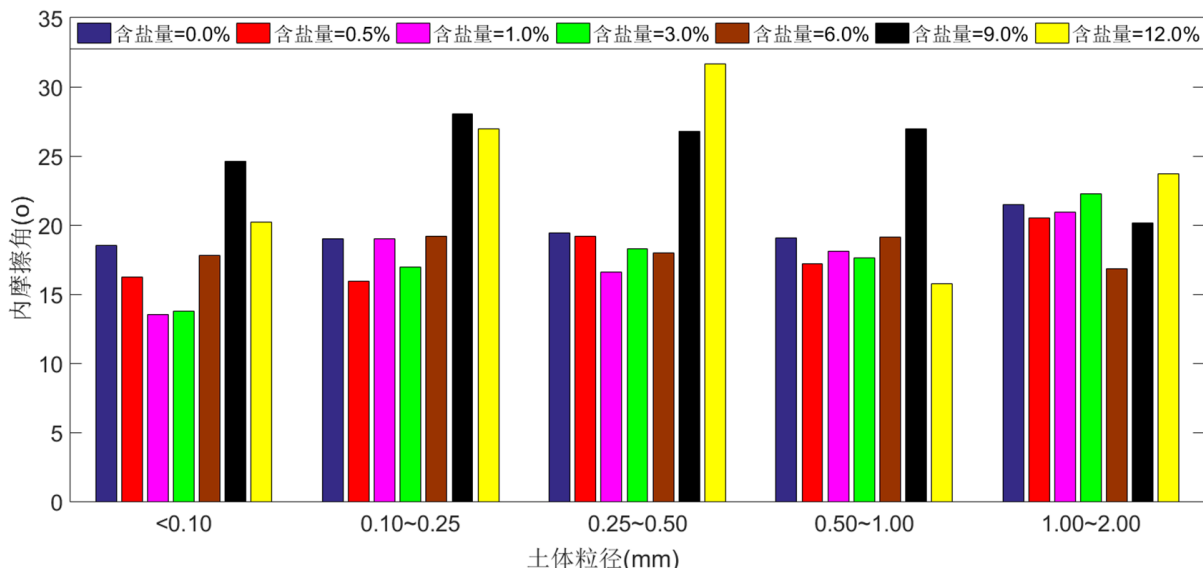


Figure 5. Relationship between internal friction angle and soil particle size of remolded salinized soil in different salt content
图 5. 不同含盐量下重塑盐渍土试样内摩擦角与粒径关系

3.3. 盐渍土试样剪应力与应变关系特征

本研究中随着含盐量逐渐增加, 盐渍土的剪应力 - 应变关系表现出 2 种不同的变化特征, 其中, 含盐量低于 6.0% 的盐渍土应力 - 应变关系为同一类型, 即非结构类型, 高于 6.0% 的盐渍土应力 - 应变关系为另一类型, 即结构类型, 这反映出盐渍土材料属性由弹塑性逐渐过渡至脆性的特点。为阐明上述观点, 以粒径为 0.25~0.50 mm 盐渍土为例进行说明, 如图 6 所示。由该图 a 和 b 可知, 当含盐量为 0.0% 和 0.5% 时, 随着剪应力逐渐增加, 剪应变亦表现出增加的变化特征, 但在不同垂直压力下, 其增加趋势表现出不同的变化特征, 在垂直压力为 50 kPa (P1) 和 100 kPa (P2) 条件下, 其应力 - 应变曲线类似于“理想弹 - 塑性模型”或“弱硬化塑性破坏模型” [29] [30], 当垂直压力为 200 kPa (P3) 和 300 kPa (P4) 时, 其剪应力 - 应变关系类似与“线性强化弹塑性模型”或“强硬化塑性模型” [30]。综上所述, 低含盐量土体并不具备结构性或结构性较弱的特性。当含盐量超过 6.0% 时, 盐渍土试样在外界荷载作用下, 其应力 - 应变曲线表现出脆性材料所具有应力 - 应变关系, 如图 c 和 d 所示。由该图可知, 在垂直压力为 50 kPa 和 100 kPa 时, 含盐量为 9.0% 和 12.0% 的盐渍土剪应力 - 应变关系表现出“弱软化脆性破坏”特性 [30]; 而在垂直压力为 200 kPa 和 300 kPa 时, 其剪应力 - 应变关系则表现出“强硬化塑性破坏”特性 [30], 上述现象表明盐渍土应力 - 应变关系表现出较强的结构性, 这说明当土体含盐量较高时, 相对过量的硫酸钠盐会以结晶盐的形式析出, 起到胶结和骨架的作用, 并填充于土中孔隙, 从而导致盐渍土剪应力 - 应变关系表现出结构性土体所具有的“弱软化脆性破坏”特征或“强硬化塑性破坏型”特性 [29] [30]。

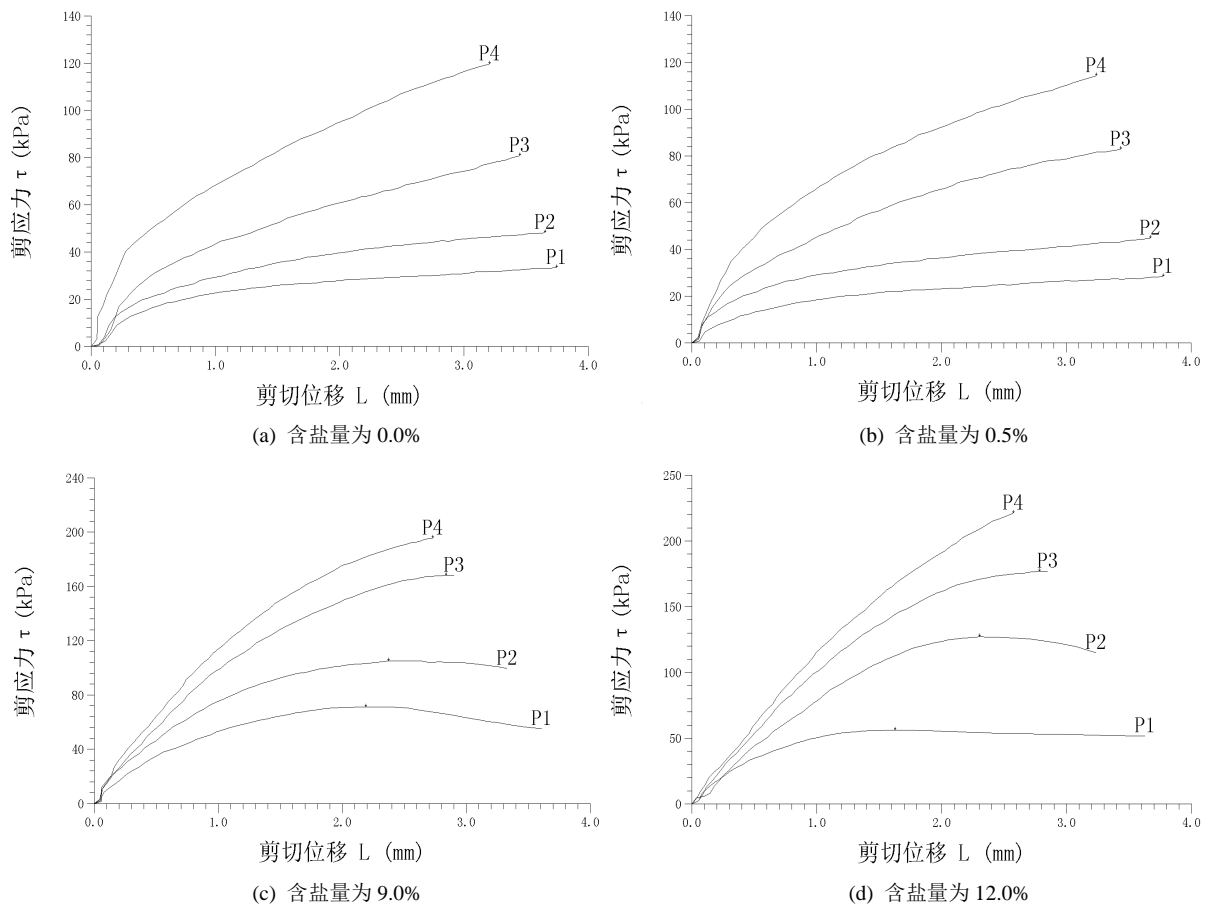


Figure 6. Curve of strain-stress of salinized soil with size of soil particle ranging from 0.25 mm to 0.50 mm
图 6. 研究区土体粒径为 0.25~0.50 mm 的盐渍土剪应力与应变关系曲线

3.4. 盐渍土试样变形破坏特征

本研究中含盐量和土粒级配均会对盐渍土试样变形和破坏特征产生影响,其中,对于细粒盐(<0.5 mm)渍土,当含盐量高于 6.0%时,盐渍土变形破坏以弹性-脆性为主,含盐量低于 6.0%时以弹性-塑性为主,对于粗粒盐渍土(>0.5 mm),土体破坏以脆性破坏为主。为此,本研究选取粒径小于 0.1 mm 盐渍土和粒径为 0.5~1.0 mm 试样为例进行说明。其中,含盐量分别为 0.0%、0.5%、1.0%、3.0%和 6.0%在剪切作用后,试样基本上保持原状,尤其是含盐量较小时试样完整性更好,这说明含低盐量情况下,细粒盐渍土在剪切作用下变形以弹塑性变形为主,这反应了低含盐量条件下,试样并未产生显著的结构性或结构性并不明显;而剩余 2 组试样(含盐量为 9.0%和 12.0%)几乎在剪切面处均发生沿剪切面的破坏,该现象说明当含盐量较高时,土体产生了较强的结构性,其原因在于土体中 Na_2SO_4 的再结晶作用会生成 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$,这会消耗土体中一定量水分,从而导致土体实际含水率降低,使盐渍土试样由弹塑状态过渡至脆性状态,同时再结晶的 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 会填充于土体空隙中产生胶结力和形成骨架,这种胶结作用和骨架便形成了土体的结构,当施加于盐渍土试样的剪应力大于胶结力时,盐渍土试样结构发生破坏,从而导致盐渍土试样产生脆性破坏。此外,粒径为 0.5~1.0 mm 盐渍土试样在剪切作用下,几乎全部发生脆性破坏而形成碎块,试样破坏主要发生在剪切面位置处,其剪切面的破坏亦为脆性破坏(b)。这种造成细粒和粒径相对较大盐渍土试样,在剪切作用下产生不同变形破坏特征的主要原因可能在于土体粒径相对较大的试样,其土体颗粒之间分子相互吸引作用和化学键相对较弱,在剪切应力作用下易发生变

形破坏, 而粒径相对较小的土体颗粒之间的范德华力、静电引力和化学键等作用相对较强, 故不利于试样发生脆性破坏[31]。

3.5. 讨论

3.5.1. 含盐量对土体抗剪强度影响

研究表明, 含盐量对土体抗剪强度影响存在一阈值, 即当土体试样含盐量低于该阈值时, 随含盐量增加, 土体黏聚力和内摩擦角呈降低的特征; 当含盐量高于该阈值时, 随含盐量增加, 土体黏聚力和内摩擦角均表现出逐渐增加的特征[14] [15] [16] [17] [18]。陈炜韬等(2006) [16]研究了由 CaCl_2 配制而成的氯盐渍土抗剪强度指标与土体 CaCl_2 含量关系, 发现随 CaCl_2 含量增加, 土体黏聚力和内摩擦角均呈先减小后增加的变化特征, 且在含盐量为 10.36% 条件下, 土体黏聚力达到最小值, 该规律与本研究所得到的结论基本一致。张飞和任志军(2014) [7]亦得出了相类的研究结论。此外, 需指出的是本研究中, 当重塑盐渍土含水率为 12% 时, 5 种不同粒径的盐渍土含盐阈值为 1.0~3.0%, 而上述学者[7] [14] [15] [16] [17] [18]研究所得到的含盐量阈值分别为 1.6%、10.38% 和 1%, 与本研究结果不一致, 产生二者结论不一致的原因可能与含盐量类型、含水率和土体级配程度等方面的差异有关, 例如 Fu et al. (2016) [14]、张飞和任志军(2014) [7]发现硫酸盐渍土抗剪强度对应的含盐量阈值随土体含水率增加呈增加的变化特征。

本研究对 5 种不同颗粒级配的 7 个含盐量梯度的盐渍土试样抗剪强度指标与其相应含盐量关系进行了拟合, 如表 1 所示。由该表可知, 试样抗剪强度指标与其含盐量关系均可由二项式 $y = ax^2 + bx + c$ 表示, 但需说明的是当土体颗粒级配为 1.0~2.0 mm 时, 黏聚力与含盐量关系亦可用三项式进行表示, 即 $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$, 该关系式表示黏聚力存在 2 个含盐量阈值, 即黏聚力随含盐量增加呈先减少后增加再减少的变化特征。该现象并未出现在其他粒径的盐渍土中, 其原因可能与土体粒径大小具有密切关系, 即当粗粒硫酸盐渍土含盐量较小时, 可溶解的 Na_2SO_4 尚未达到饱和, Na_2SO_4 可溶解于水, 从而使溶解的 Na_2SO_4 以水化离子的形式存在, Na^+ 会增加粗土粒间的距离, 从而强化对土体的润滑作用, 使得土颗粒间引力被削弱, 该过程会导致 Na_2SO_4 含量较小的土体在剪应力作用下表现出内摩擦角减小、黏聚力减小的变化特征。随 Na_2SO_4 含量增加, 超过第 1 含盐量阈值时, 过量的 Na_2SO_4 则以结晶盐的形式析出, 结晶盐作为固体颗粒的一部分起到胶结作用, 且填充于土体中孔隙, 从而增大了土体颗粒间的摩擦力; 同时饱和结晶盐构成了盐渍土的一部分骨架, 即从而使试样呈内摩擦角和黏聚力均增大的特征; 当含盐量超过第 2 含盐量阈值时, 硫酸盐会发生盐胀作用, 由于粗粒土粒径较大, 土体颗粒间的粘结作用减弱, 盐胀作用一定程度上削弱了粗颗粒土间的粘结力, 使得黏聚力和内摩擦角随含盐量的增加呈再次减小的变化规律[15]。

Table 1. Fitting equation of cohesion with salt content of salinized soil

表 1. 研究区盐渍土试样黏聚力与土体含盐量拟合方程

粒径(mm)	黏聚力拟合方程	内摩擦角拟合方程
<0.1	$y = 1.8551x^2 - 8.1927x + 21.44, R^2 = 0.9538$	$y = 0.5313x^2 - 3.3158x + 20.441, R^2 = 0.5337$
0.10~0.25	$y = 1.5795x^2 - 6.4026x + 17.29, R^2 = 0.8492$	$y = 0.5657x^2 - 2.8007x + 20.613, R^2 = 0.7984$
0.25~0.50	$y = 1.6637x^2 - 6.427x + 17.1, R^2 = 0.8177$	$y = 0.9357x^2 - 5.5793x + 25.02, R^2 = 0.9327$
0.50~1.00	$y = 1.6195x^2 - 6.3069x + 17.5, R^2 = 0.8533$	$y = 0.5585x^2 - 3.1265x + 22.029, R^2 = 0.7985$
1.00~2.00	$y = 3.3933x^2 - 17.692x + 28.42, R^2 = 0.9652$	$y = 0.282x^2 - 2.1915x + 23.959, R^2 = 0.2485$

注: 表中 R^2 表示拟合优度。

3.5.2. 粒径对土体抗剪强度影响

本研究中, 在相同含盐量条件下, 随土体粒径增加, 土体黏聚力和内摩擦角值分别表现出 2 种不同

的变化特征,其原因可能在于以下几个方面:

1) 关于黏聚力,对于粒径较小的土体,当含盐量低于含盐量阈值时,土体黏聚力主要来自于土粒间的相互吸附作用,如范德华力、静电引力、表观黏聚力、颗粒间接触点的化合价键等[31] [32] [33] [34],且土粒愈小,这种相互作用愈显著,故在宏观上表现为低含盐量细粒盐渍土的黏聚力大于粗粒盐渍土;当土体含盐量高于含盐量阈值时,粗粒盐渍土黏聚力远大于细粒盐渍土,其原因可能在于多余的盐分重结晶,并在土颗粒间胶结形成骨架,故土体黏聚力随粒径增加呈增加的特征,且含盐量愈高时,这种由盐分造成的胶结作用和骨架作用则愈为显著;此外,当含盐量一定时,对于粒径较小的土体,单位体积内的含盐量相对较低,故盐分的胶结和骨架作用亦相对较小,而对于粒径较粗的土体,单位体积内的含盐量则相对较高,故盐分的胶结作用和骨架作用则相对较强,故盐渍土含盐量大于阈值时,粗粒盐渍土黏聚力远大于细粒盐渍土。

2) 关于内摩擦角,本研究中,不同粒径盐渍土内摩擦角随含盐量增加表现出两种不同的变化规律,即当含盐量为 0.0%~3.0%时,土体内摩擦角随粒径增加表现出增加的变化特征,当含盐量为 6.0%~12.0%时,其内摩擦角则随粒径增加呈先增加后减小的变化特征,导致土体内摩擦角产生上述两种变化特征的原因可能在于:首先,当土体含盐量较小时,以离子形式存在于土体中的 Na^+ 对土颗粒产生较强的润滑作用,且土颗粒愈细小,这种润滑作用愈为显著[15],当土颗粒较大时, Na^+ 对土颗粒的润滑作用则相对较弱,故低含盐量的细粒径土内摩擦角小于粗粒径土;其次,当土体含盐量较高时,随土体粒径增加,土体内摩擦角呈先增加后减小的变化特征,该现象产生的原因可能与土颗粒自身强度有关,即本研究中不同级配的土颗粒是采用筛分法获得的,粒径较大颗粒很大程度上是由细小颗粒土体粘聚在一起形成的,在土体含盐量较高的条件下,细颗粒土(该粒径难以再次发生破碎)受到胶结作用和盐分再结晶作用较强,故在剪切作用下,其破坏的形式主要表现为盐分骨架的破坏,故其黏聚力较大而内摩擦角相对较小;对于大粒径土,因其粒径较大,单位体积内,土体含盐量高于小粒径土,故盐分对大粒径组成的土体的胶结和再结晶作用相对高于较小粒径组成的土体,故在宏观上,大粒径土体在剪切应力作用下发生的破坏主要以大粒径土体破碎和盐分产生的胶结作用及骨架破坏为主,大粒径土体破坏后产生的小粒径为其它土颗粒相对位移提供了润滑作用,故导致高含盐量的大粒径土体具有较高黏聚力和较低内摩擦角的结果。

4. 结论

1) 土体含盐量可对土体抗剪强度指标产生显著性影响,表现为对于同一粒径的土体,随含盐量的增加,盐渍土黏聚力和内摩擦角均呈先减小后增加的变化特征,且 5 种不同粒径条件下的盐渍土黏聚力和内摩擦角所对应的含盐量阈值为 1.0%、3.0%。

2) 土体粒径为影响盐渍土抗剪强度指标的另一重要因素,随土体粒径增加,7 种不同含盐量的土体黏聚力表现出两种截然不同的变化特征,即当含盐量小于 6.0%时,随着土体粒径逐渐增加,土体黏聚力呈线性降低的变化特征;当含盐量大于 6.0%时,土体黏聚力随粒径增加表现出增加的变化特征。

3) 5 种颗粒级配条件下,7 个含盐量梯度的盐渍土内摩擦角表现出 2 种变化特征,即当含盐量为 0.0%~3.0%时,土体内摩擦角随粒径增加呈增加的变化特征,当含盐量为 6.0%~12.0%时,内摩擦角随粒径增加呈先增加后减小的变化特征。

4) 随含盐量由 0.0%增至 12.0%,盐渍土剪应力-应变关系表现出由“非结构性土”向“结构性土”过渡的变化特征。当含盐量低于 6.0%时,应力-应变关系以“理想弹-塑性模型”、“弱硬化塑性破坏模型”、“线性强化弹塑性模型”、“强硬化塑性模型”为主;含盐量高于 6.0%时,应力-应变关系以“弱软化脆性破坏”和“强硬化塑性破坏”为主。

5) 对于粒径较小(<0.5 mm)的盐渍土,随着含盐量逐渐增加,盐渍土的变形和破坏特征表现为由弹塑

性变形破坏过渡至脆性变形破坏的变化规律, 其中, 当含盐量低于 6.0% 时, 盐渍土变形和破坏属于弹塑性变形和破坏范畴, 当含盐量大于 6.0% 时, 盐渍土变形和破坏属于脆性变形和破坏范畴; 对于粒径较大盐渍土(>0.5 m), 其破坏特征主要以脆性破坏为主。

基金项目

陕西教育厅专项基金(18JK0172;14JK0213), 陕西理工大学人才启动基金(SLGQD2017-02)。

参考文献

- [1] Lai, Y.M., Wan, X.S. and Zhang, M.Y. (2016) An Experimental Study on the Influence of Cooling Rates on Salt Expansion in Sodium Sulfate Soils. *Cold Regions Science and Technology*, **124**, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2015.12.014>
- [2] Lai, Y.M., Wu, D.Y. and Zhang, M.Y. (2017) Crystallization Deformation of a Saline Soil during Freezing and Thawing Processes. *Applied Thermal Engineering*, **120**, 463-473. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.04.011>
- [3] Liu, Y.W., Wang, Q., Liu, S.W., et al. (2019) Experimental Investigation of the Geotechnical Properties and Microstructure of Lime-Stabilized Saline Soils under Freeze-Thaw Cycling. *Cold Regions Science and Technology*, **161**, 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.03.003>
- [4] Fang, J.H., Li, X., Liu, J.K., et al. (2018) The Crystallization and Salt Expansion Characteristics of a Silty Clay. *Cold Regions Science and Technology*, **154**, 63-73. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2018.06.009>
- [5] 梁健伟, 房营光, 陈松. 含盐量对极细颗粒黏土强度影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(z2): 3821-3829.
- [6] Penov, I., Manolov, I., Alexiev, A. and Kavardziev, Y. (2011) Salinisation in Bulgaria: Institutional Settings for Soil Conservation (A Case Study of Belozem Village). *Land Degradation & Development*, **22**, 134-143. <https://doi.org/10.1002/ldr.1031>
- [7] 张飞, 任治军. 细粒硫酸盐渍土抗剪强度特性试验研究[J]. 勘察科学技术, 2014(S1): 51-56.
- [8] 张志权. 不同粉粘粒含量盐渍土的工程性质研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2004.
- [9] 于天佑, 吴亚平, 司培国, 等. 细粒硫酸钠盐渍土盐胀冻特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2019, 41(2): 407-415.
- [10] 张莎莎, 谢永利, 杨晓华, 等. 典型天然粗粒盐渍土盐胀微观机制分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(1): 123-127.
- [11] Hu, H.C., Tian, F.Q. and Hu, H.P. (2011) Soil Particle Size Distribution and Its Relationship with Soil Water and Salt under Mulched Drip Irrigation in Xinjiang of China. *Science China Technological Sciences*, **54**, Article No.: 1568. <https://doi.org/10.1007/s11431-010-4276-x>
- [12] Zhi, Z., Hu, H., Tian, F., et al. (2014) Soil Salt Distribution under Mulched Drip Irrigation in an Arid Area of Northwestern China. *Journal of Arid Environments*, **104**, 23-33. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.01.012>
- [13] Wen, B.P. and Yan, Y.J. (2014) Influence of Structure on Shear Characteristics of the Unsaturated Loess in Lanzhou, China. *Engineering Geology*, **168**, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2013.10.023>
- [14] Fu, J.T., Hu, X.S., Li, X.L., et al. (2019) Influences of Soil Moisture and Salt Content on Loess Shear Strength in the Xining Basin, Northeastern Qinghai-Tibet Plateau. *Journal of Mountain Science*, **16**, 1184-1197. <https://doi.org/10.1007/s11629-018-5206-9>
- [15] 陈炜韬, 李姝, 王鹰. 含盐量、含盐类别对盐渍土抗剪强度的影响[J]. 铁道建筑技术, 2005(6): 54-56.
- [16] 陈炜韬, 王明年, 王鹰, 等. 含盐量及含水量对氯盐盐渍土抗剪强度参数的影响[J]. 中国铁道科学, 2006, 27(4): 1-5.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Peng, J.B., Wang, S.K., Wang, Q.Y., et al. (2019) Distribution and Genetic Types of Loess Landslides in China. *Journal of Asian Earth Sciences*, **170**, 329-350. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2018.11.015>
- [20] Zhang, W.L., Zhang, T., Song, C.H., et al. (2017) Termination of Fluvial-Alluvial Sedimentation in the Xining Basin, NE Tibetan Plateau, and Its Subsequent Geomorphic Evolution. *Geomorphology*, **297**, 86-99. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.008>
- [21] 段小玲. 青海省水土流失现状及生态建设思路[J]. 林业调查规划, 2004, 29(4): 55-58.

-
- [22] 孙毅. 西宁市黄土滑坡发育特征及稳定性分析——以小西山滑坡为例[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013
- [23] 杨丽波. 西宁市城市水土保持的进展及今后的工作思路[J]. 青海科技, 2013, 10(1): 19-21.
- [24] 赵串串, 董旭, 辛文荣, 等. 青海湟水河流域水土流失原因及防治措施分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(6): 200-202.
- [25] 罗友弟. 青海地区盐渍土分布规律及其盐胀溶陷机制探讨[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(4): 116-120.
- [26] 仲德春. 西宁地区盐渍土的分布特征及地基处理研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2011, 29(2): 30-33.
- [27] 姜有生. 青海东部地区盐渍土的分布特征及工程应对措施[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2006(3): 98-101.
- [28] 赵海艳, 张渊, 韩文峰. 我国北方滨海盐渍土的工程特性研究[J]. 天津城市建设学院学报, 2005, 11(4): 250-253.
- [29] 王仁. 塑性力学引论[M]. 北京: 北京大学出版社出版, 2006.
- [30] 王丽琴, 鹿忠刚, 邵生俊. 岩土体复合幂 - 指数非线性模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(5): 1269-1278.
- [31] Cornelis, W.M. and Gabriels, D. (2004) A Simple Model for the Prediction of the Deflation Threshold Shear Velocity of Dry Loose Particles. *Sedimentology*, **51**, 13. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2004.00609.x>
- [32] 陈明莲. 微生物对黄铜矿表面性质的影响及其吸附机制研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [33] Kaiser, M., Ellerbrock, R.H. and Sommer, M. (2009) Separation of Coarse Organic Particles from Bulk Surface Soil Samples by Electrostatic Attraction. *Soil Science Society of American Journal*, **73**, 2118-2130. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0046>
- [34] Kheirfam, H., Sadeghi, S.H., Homaei, M. and Darki, B.Z. (2017) Quality Improvement of an Erosion-Prone Soil through Microbial Enrichment. *Soil & Tillage Research*, **165**, 230-238. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.021>