

A Summary of Research on Improvement of Engineering Characteristics of Saline Soil

Ruipu Zhou¹, Weibing Zhang^{1,2*}

¹School of Civil Engineering and Water Conservancy, Ningxia University, Yinchuan Ningxia

²Engineering Research Center of Modern Agricultural Water Sources, Ministry of Education, Ningxia Arid Region, Yinchuan Ningxia

Email: 276296612@qq.com, *zwb231@126.com

Received: Apr. 22nd, 2019; accepted: May 7th, 2019; published: May 14th, 2019

Abstract

Saline soil is widely distributed in the northwest and eastern coastal areas of China. Because of its engineering characteristics such as corrosion, salt expansion and dissolution, the foundation engineering construction in saline soil areas is damaged to varying degrees. At present, a lot of researches have been done on the strength and salt swelling of saline soil, and more fruitful results have been achieved. In this paper, the strength characteristics, salt expansion characteristics and inhibition mechanism of salt swelling inhibition of the improved saline soil are reviewed. The deficiencies in various researches are comprehensively reviewed, and the future research on improved saline soil is proposed.

Keywords

Saline Soil, Engineering Characteristics, Salt Swelling Inhibition, Improvement

盐渍土工程特性改良研究综述

周瑞璞¹, 张卫兵^{1,2*}

¹宁夏大学土木与水利工程学院, 宁夏 银川

²宁夏旱区现代农业水源高效利用教育部工程研究中心, 宁夏 银川

Email: 276296612@qq.com, *zwb231@126.com

收稿日期: 2019年4月22日; 录用日期: 2019年5月7日; 发布日期: 2019年5月14日

摘 要

盐渍土广泛存在于我国西北、东部沿海等地区, 因为其具有腐蚀、盐胀、溶陷等工程特性, 使得含盐渍

*通讯作者。

文章引用: 周瑞璞, 张卫兵. 盐渍土工程特性改良研究综述[J]. 土木工程, 2019, 8(3): 596-604.

DOI: 10.12677/hjce.2019.83070

土地的基础工程建设受到不同程度的损害。目前国内外已对盐渍土的强度、盐胀等特性进行了大量研究, 并取得了较为丰硕的成果。本文从改良后盐渍土的强度特性、盐胀特性及盐胀抑制机理等角度, 对国内外的研究进行较为全面的总结, 对各类研究中存在的不足, 如盐渍土耐久性问题、腐蚀性问题、溶陷性问题以及改良剂的优化问题等, 进行综合性的评述, 并对改良盐渍土今后的研究提出展望。

关键词

盐渍土, 工程特性, 盐胀抑制, 改良

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

盐渍土是指易溶盐含量(质量分数)大于等于 0.3%的盐碱化土, 并具有腐蚀性、盐胀性和溶陷性。常见的类型有碳酸盐渍土、氯化盐渍土和硫酸盐渍土[1]。我国的盐渍土面积分布很大, 据统计面积共有 3~4 亿亩, 相当于我国现有耕地的五分之一, 主要分布在西北、华北、东北和滨海地区的平原及盆地。盐渍土的盐-冻胀等特性, 会引起道路, 房建, 机场等发生鼓包、开裂、地基(路基)强度大幅衰减等工程病害[2]。随着我国西部经济建设不断推进, “一带一路”战略的大力实施, 各类公路、铁路等工程项目不断深入盐渍土地区, 令盐胀、盐溶、耐久性问题在盐渍土地区的工程建设中变得尤为突出。目前已有有人对盐渍土的强度、盐胀性等特性进行了大量研究[3]-[12], 并取得了较为丰硕的成果。而在一些改良盐渍土的试验中, 虽然盐渍土的强度得到了提升, 但改良剂引发的污染问题日益凸显。并且国内学者在盐渍土改良时, 多对盐渍土进行短期室内试验研究, 并未对改良后盐渍土的耐久性问题展开研究, 而耐久性又影响着工程的长期价值。因此对使用合理的改良剂及合理改良后的盐渍土进行耐久性问题的分析就显得尤为重要。为了进一步探索盐渍土改良过程中存在的不足, 本文针对盐渍土的强度特性、盐胀特性及盐胀抑制机理的研究进行综述。

2. 改良盐渍土的特性研究

2.1. 改良后盐渍土的强度特性研究

循环往复的季节性冻融以及较大的昼夜温差均会导致盐渍土发生盐胀, 已有对硫酸盐渍土盐胀特性所做的研究大多是基于变温条件(单次降温、单次升温、多次冻融循环等)下的盐胀模拟试验以及改良后盐渍土的强度特性研究[13]-[20]。Sherwood (1993)等[21]通过研究认为, 硅粉和钙粉在稳定土时的反应完全发生在第一次干湿循环时, 并且硅粉和钙粉的掺入可以使土体强度更大, 脆性更大。Rao (2000)等[22]则通过研究认为, 干湿循环现象可以导致土的膨胀变形, 这或许会进而影响到建筑地基, 排水沟渠等等。Konrad (2009)等[23]认为在反复冻融循环下会破坏土体结构。Zaimoglu (2010)等[24]的研究还认为在冻融循环条件下, 土的无侧限抗压强度随着纤维掺量的增加而增大。Olgun (2013)等[25]认为土体在冻融循环下的耐久性取决于稳定该土的掺和物。白江平(2014)等[26]在水泥改良盐渍土的力学性能研究中, 通过掺入不同掺量的水泥对盐渍土进行改良, 测试改良前后盐渍土的黏聚力、内摩擦角、无侧限抗压强度以及抗压回弹模量, 发现了水泥的掺入能够使改良盐渍土的 7 d 抗压强度和抗压回弹模量大幅度提高, 盐渍土抵抗外部荷载以及变形能力逐渐增加; 当盐渍土中水泥掺量为 4%时, 黏聚力、内摩擦角、无侧限抗压

强度以及抗压回弹模量的增大幅度均最为明显。总体来说,改良后的盐渍土的强度均有不同程度的提升,基本满足使用强度需求。李宏波(2015)等[27]在粉煤灰固化超盐渍土的抗剪强度及耐久性的相关研究中,通过三轴试验,研究7 d和28 d龄期压实系数为90%、93%、96%固化盐渍土的抗剪强度,发现同掺量粉煤灰超盐渍土,随着压实度的增加,其抗剪强度指标均有增强的趋势;定性观察分析365 d龄期的固化超盐渍土的耐久性,认为在实际工程中利用粉煤灰固化超盐渍土时,建议粉煤灰掺量控制在10%~15%;在利用粉煤灰改良固化超盐渍土时,应慎重考虑其耐久性。吕擎峰(2016)等[28]在水玻璃固化硫酸盐渍土强度特性及固化机制研究中,通过无侧限抗压强度试验、X射线衍射试验、化学成分分析和扫描电镜试验研究了石灰粉、煤灰、水玻璃联合固化硫酸盐渍土的强度特征,认为水玻璃具有良好的盐渍土改性效果。当石灰含量小于8%时,石灰粉、煤灰、水玻璃联合固化土的抗压和抗剪强度较石灰粉、煤灰固化土有大幅度提升,随水玻璃浓度的增加,固化土的强度几乎呈线性增长;水玻璃的碱激发粉煤灰作用和水玻璃与盐渍土化学成分的吸附作用生成的凝胶的填充和包裹作用将固化盐渍土黏结成为一个紧密的空间网状整体结构,使得土体强度得以提高。张卫兵(2018)等[29]通过对冻融(变温)条件下硫酸盐渍土的强度特性的研究,发现对于硫酸盐渍土的抗剪强度参数黏聚力 c ,含水率与冻融次数影响极显著,压实度及含盐量影响显著,对内摩擦角,冻融次数影响一般,其他因素影响不显著。通过国内外专家对改良后盐渍土强度的试验研究,取得了较为丰硕的成果,使得盐渍土的强度问题得到了不同程度的改善。

2.2. 盐渍土的盐胀抑制机理研究

由于季节性因素,中国西北局部地区,降雨季节性鲜明,导致土体的干湿循环加剧,使盐渍土的腐蚀、盐胀、盐溶等工程特性更加显著,进而影响到工程建设。因此仍需探索盐渍土的盐胀盐溶等特性的抑制机理,从而达到提高改良盐渍土的工程特性,加快盐渍土地区的工程建设的目的。Chen(1988)等[30]认为,改良土的膨胀特性的方法主要有化学改良剂、多次干湿循环后再击实、土体换填、含水率控制以及超荷加载等。最近,一些学者研究了干湿循环对于土体的膨胀特性研究。Basma(1996)等[31]认为当土体发生干湿循环时,反复烘干到初始含水率后他们的膨胀能力减弱。硫酸盐渍土在单次降温下的盐胀率均高于含水率单次递减下的盐胀率,但随着含盐量的升高,含水率递减条件下的硫酸盐渍土亦表现出很强的盐胀性,且两种试验条件下的盐胀率差值趋于一常数。李斌(1998)等[32]通过硫酸盐渍土多次冻融循环试验,认为砂类亚硫酸盐渍土常呈现架空的点接触或胶结接触,具有不稳定的结构性,土体的孔隙度较大,盐胀过程中盐渍土结晶膨胀不仅填充了砂类亚硫酸盐渍土之间的孔隙,而且还破坏了其土体结构。包卫星(2016)等[33]通过对路用砂类盐渍土盐胀及融陷特性试验研究,发现砂类亚硫酸盐渍土比砂类硫酸盐渍土的盐胀起胀温度和敏感温度区间低约 5°C ;对于4类硫酸盐渍土,含盐量不大于1%时,盐胀率小于1.5%;对于砂类亚硫酸盐渍土,含盐量小于2.3%~2.5%时,盐胀率小1%;在冻融循环作用下,砂类亚硫酸盐渍土具有较强的融(溶)陷特性;路面容许变形量取2 cm,下路堤填筑厚度为2.0 m时,砂类硫酸盐渍土的含盐量极限值为1.0%,砂类亚硫酸盐渍土的含盐量极限值为2.3%。姜宇波(2016)等[34]在四种因素对纤维加筋盐渍土抗压性能的影响的研究中,通过对聚丙烯纤维加筋土的无侧限抗压试验,发现了对纤维加筋土抗压性能影响程度的大小依次为含水率、干密度、质量加筋率、加筋长度。进行盐渍土的加筋处置施工时,在优先保证土的含水率和干密度的条件下,可以适当地改变加筋长度和质量加筋率,加筋长19 mm、质量加筋率0.2%为最适宜的加筋条件。张莎莎(2018)等[35]在火山灰改良粗粒硫酸盐渍土路基填料及其作用机理研究中,针对硫酸钠含量为2%的砾砂类硫酸盐渍土,开展了在不同石灰配比、石灰+火山灰配比工况下的击实试验、盐胀试验、溶陷试验、无侧限抗压强度试验。在此基础上,分析其改良机理和微观特性,认为采用石灰掺量高于11%时或采用石灰+火山灰不少于15%时,改良后土体的盐胀和溶陷变形率均小于1%,7天饱和无侧限抗压强度均不小于0.35 MPa。并且通过分析得到主要有如

下五种作用机理存在: 1) 石灰改良盐渍土原理。在盐渍土中加入熟石灰, 会产生一系列物理化学反应, 主要包括生成微溶盐硫酸钙、离子交换作用、氢氧化钙的结晶反应、火山灰作用和氢氧化钙的碳酸化作用; 2) 生成石膏结晶。当盐渍土中含有硫酸根离子较多, 土中硫酸根离子与石灰水解出的钙离子发生反应, 生成硫酸钙, 硫酸钙微溶于水, 具有良好的强度, 能减少盐渍土中游离硫酸根离子含量, 减小盐渍土盐胀变形和溶陷变形; 3) 离子交换作用。石灰在水中部分水解产生的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等高价阳离子, 吸附能力强, 会把土层中一价的 Na^+ 和 K^+ 置换出来。离子交换反应导致集聚和凝结, 这个过程是改良盐渍土初期强度的主要原因; 4) 氢氧化钙的结晶反应。土中的氢氧化钙受土中的水、矿物成分及孔隙气体的影响, 绝大部分不会产生离解, 而是会吸收水分形成含水晶格。氢氧化钙的结晶反应会使生成的晶体相互连接, 土颗粒也由于胶结力的作用凝聚成一个整体, 从而改善盐渍土的强度, 水稳定性也得到提高; 5) 火山灰作用石灰中氢氧化钙离解出的 OH^- , 给土体提供了碱性环境。盐渍土中硅铝矿物在水的作用下, 与氢氧化钙发生反应, 生成水化硅酸钙(CSH)和水化铝酸钙(CAH), 从而抑制了盐胀反应。文桃(2018)等[36]进行了恒温且含水率单次递减条件下盐胀特性的研究, 认为含盐量升高时, 起胀温度区间逐渐升高, 盐胀敏感温度区间的区间逐渐扩大。在含水率单次递减的试验条件下, 硫酸盐渍土的起胀含盐量约为 1.2%。当硫酸盐渍土的含盐量 $< 1.2\%$ 时, 土体发生干缩。含盐量 $\geq 1.2\%$ 时, 土体发生膨胀, 且盐胀率与含盐量近似呈线性增大规律。目前已有一些针对盐渍土盐胀机理的研究, 基本上在满足使用需求的范围内, 使人们认识到了盐渍土的盐胀抑制机理, 为工程建设提供了较为有效的指导。

2.3. 不同改良剂稳定盐渍土的特性研究

国内外学者对改良盐渍土的工程特性已经做了大量研究[37], 但是对改良盐渍土的物理力学性质的研究仍处于不断探索阶段。柴寿喜(2005)等[38]通过进行氯盐含盐量对石灰固化滨海盐渍土力学强度、物理及水理性质影响的试验研究, 发现了随着含盐量的增加, 石灰固化滨海盐渍土的无侧限抗压强度和抗剪强度均降低, 盐分不断结晶导致粗大颗粒越来越多, 总比表面积越来越小, 吸附水膜较薄, 总体上导致液限、塑限和塑性指数越来越低, 土悬液的电导率随固化土含盐量的增加在同步增加, 氯盐没有参与石灰的固化反应。Atis (2005)等[39]认为尽管硅粉是一种工业应用的废料, 但它由于自身的活性和高火山灰特性, 已经变成了一种最具价值的副产物, 可以用来提升盐渍土的强度, 改善盐胀。Kameib (2009)等[40]认为, 试验土随着硅粉掺量的提高, CEC 和 SSA 值减小并且 PH 值增加, 液限和塑性指数也随之减小; 塑限随着增加的硅粉掺量而提高; 在同样的击实条件下, 持续增加硅粉, 将导致最大干重度减小, 最佳含水率增加; 连杰(2012)等[41]通过石灰水泥改良硫酸盐渍土盐胀特性的研究, 认为对于中硫酸盐渍土(硫酸钠含量 1%)可选取石灰 6%、水泥 6%作为中硫酸盐渍土的改良材料对于强硫酸盐渍土(硫酸钠含量 2%), 可选取石灰 6%、水泥 9%作为中硫酸盐渍土的改良材料对于过硫酸盐渍土(硫酸钠含量 4%), 可选取石灰 6%、水泥 9%, 作为过硫酸盐渍土的改良材料。屈波(2013)等[42]在硫酸盐渍土盐胀的抑制措施研究中, 通过氯化钠和氯化钙对硫酸盐渍土进行改良试验, 发现了氯离子对硫酸盐渍土的盐胀性有较好的抑制效果, 并当 $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ 为 4-6 时, 效果最为明显; 当氯化钙掺量较低时, 氯化钙对硫酸盐渍土的盐胀具有双重抑制效果, 但当氯化钙掺量较高时, 由于氯化钙和硫酸钙的吸水膨胀, 抑制效果会有一定程度的减弱。谢玉洁(2018)等[43]通过采用简单易行的直剪试验, 研究了其抗剪强度最大时对应的最佳含盐量以及在多种不同固定含盐量下的最佳含碱量。发现在不加生石灰情况下, 添加一定硫酸盐能够提高盐渍土的抗剪强度, 其最佳含盐量为 1%不同固定含盐量下添加生石灰, 其抗剪强度增大且抗剪强度最大时各最优含碱量不同; 其最佳组合为含盐量为 1%时碱含量为 4%, 含盐量为 5%时碱含量为 8%。张佳兴(2018)等[44]通过利用自主研发的抗盐胀固化剂与水泥复配对盐渍土进行改良, 探讨含盐量和固化剂对固化土膨胀性与力学性能的影响, 认为在中盐渍土加固中, 低掺量抑制膨胀性强; 强盐渍土中, 高掺量抑制膨胀率强。

通过盐溶液稳定性试验和冻融试验对膨胀特性进行了研究,认为固化剂能够有效提高加固土的抗膨胀性,降低强度的损失率;在抗冻稳定性上,对冻胀有一定抑制作用,而对强度的稳定作用一般,表现为温度相应“迟滞”。Alik 等[45]认为同时掺加烧石膏和粉煤灰可以明显提高稳定土的强度和耐久性,而只掺加粉煤灰对强度的提升有不利的影 响。无侧限抗压强度随着烧石膏和粉煤灰的含量的提升而提升。吕擎峰(2018)等人[46]通过含盐量对固化硫酸盐渍土抗压强度的影响的研究,认为含盐量在 0.3%~5.0%范围内,不同石灰粉煤灰固化硫酸盐渍土的强度随含盐量的增加先增大后减小,峰值强度对应的含盐量是 1.8%;同一含盐量时,当含盐量低于 2.8%时,固化土强度随石灰粉煤灰含量的增加先增大后减小,当含盐量高于 2.8%时,固化土强度随石灰粉煤灰的含量的增大而增大。张朝晖(2018)等[47]研究了石灰粉煤灰水泥改良高速公路盐渍土地区路基地基的改良,认为掺加石灰粉煤灰水泥可以使高速公路路基地基满足强度要求,达到良好的效果。砂类硫酸盐及亚硫酸盐渍土广泛分布于中国西部地区,研究其作为路堤填料的可用性,可充分利用当地资源和节约建设资金。通过对不同改良剂稳定硫酸盐渍土的各类研究,基本认识到了盐渍土在改良剂作用下的强度参数及各类指标变化。

3. 目前研究存在的不足

3.1. 改良剂的优化问题

由于盐渍土的腐蚀、盐胀、冻胀、盐溶等问题,需要对盐渍土进行土质改良,国内专家学者多使用石灰,水泥,火山灰, CaCl_2 等材料对盐渍土进行改良,取得了良好的固化效果。有学者认为同时掺加烧石膏和粉煤灰可以明显提高稳定土的强度和耐久性;还有研究团队研究认为 SD 固化剂能够有效提高加固土的抗膨胀性,降低强度的损失率。但同时可能会存在诸多问题。比如,在利用 CaCl_2 进行土体改良时,虽然改良土的短期性能有一定的提升,但会引入 Cl^- 。长此以往,可能会污染土体,进而污染地下水,威胁到人类的饮用水安全。因此,目前亟需探索一些既能抑制盐渍土盐胀、冻胀、腐蚀、盐溶等问题,又能对生态环境没有污染的环保型高效改良剂,为工程建设提供良好的建设基础。

3.2. 改良后土体耐久性问题

因道路, 房建等工程项目存在使用要求,需其具有一定的耐久性能。如国内四级公路设计年限为 6 年,三级公路设计年限为 8 年,二级公路设计年限为 12 年高速公路、一级公路设计年限为 15 年。房屋桥梁等的使用寿命多为几十年甚至上百年。而目前国内外专家学者大多有一个共同点,就是在改良盐渍土时,进行短期室内试验研究。众所周知,各类工程项目的设计或使用年限少则几年,多则几十年上百年,但只对试样进行 7 天, 28 天的相关试验或许并不能体现出该改良后土体长期的强度和稳定性。而工程项目建设的长期强度和稳定性又至关重要。比如在在路用砂类盐渍土盐胀及融陷特性试验相关研究中,利用融(溶)陷试验,经历 10 个冻融周期(每个周期 24 小时);在多次冻融循环下硫酸盐渍土盐 - 冻胀特性试验的一些研究中,利用 5 次,每次 24 小时的冻融循环实验,来研究硫酸盐渍土盐 - 冻胀特性。我国是土壤盐渍化比较严重的国家,盐渍化土壤面积大,分布广,对区域农业发展构成了严重的威胁。这就需要在进一步完善现有土壤盐渍化研究内容的基础上对盐渍土研究出现的新问题和新挑战给予更多的重点关注[48]-[54]。因此还需加大对改良盐渍土的耐久性问题加大研究力度。

3.3. 盐渍土的腐蚀性问题

在我国盐湖众多的西北地区,土壤和水中含有大量硫酸根离子 SO_4^{2-} 和氯离子 Cl^- ,会对混凝土产生严重腐蚀,危及结构物安全并造成巨大经济损失。如 Cl^- 对混凝土的腐蚀主要集中在 Cl^- 会使钢筋锈蚀等[55]。硫酸盐离子会对与土壤直接接触的地下设施及结构基础构成很强腐蚀环境,对混凝土结构的腐蚀性

非常明显, 影响其耐久性, 安全性从而影响其使用寿命[56]。目前国内外已有学者进行了少量研究, 取得了一些进展, 但盐渍土的腐蚀性仍然没有得到广泛的解决[57]-[71]。因此仍在盐渍土的腐蚀性问题上加大研究力度。

3.4. 盐渍土的溶陷性问题

盐渍土的溶陷性是指土浸水后, 由于盐分的溶解, 土体产生的附加变形。在以往研究中, 考虑了盐渍土的盐冻胀性, 忽略了其溶陷性。随着西部开发, 盐渍土的溶陷性对该地区的交通、工业、建筑、水利工程都会带来严重的危害, 特别是渠道工程带来破坏性灾难[72]。这种现象不管在石油、铁路还是电力行业均屡见不鲜[73]。针对粗粒盐渍土的溶陷性问题, 目前国内外已取得一些研究成果[74] [75] [76] [77], 但关于细粒盐渍土的研究仍较少, 细粒土地区的盐渍土问题仍未得到解决。因此还需继续针对细粒盐渍土展开不同的试验研究, 解决细粒盐渍土地区存在的各类问题。

4. 展望

目前, 国内外已有很多关于恒、变温条件下盐渍土的特性研究, 干湿循环条件下盐渍土的特性研究以及不同改良剂稳定盐渍土的特性研究, 但仍有很多未知的规律和值得探索的地方。如选取更有针对性且对环境无污染的改良剂; 优化盐渍土改良方法; 改善盐渍土对构筑物的腐蚀性; 在改良后对盐渍土的长期强度和稳定性进行试验研究等。因此, 仍需对盐渍土进行大量研究。同样, 因为我国西北地区广泛分布着大量的硫酸盐渍土, 为了经济、合理地解决盐渍土问题提供理论依据, 减轻盐渍土对社会带来的经济损失, 也仍需对盐渍土展开进一步的研究与探索。这对工程建设及可持续发展同样具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] 吕擎峰, 贾梦雪, 王生新, 周刚, 王庆栋. 含盐量对固化硫酸盐渍土抗压强度的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(3): 718-724.
- [2] 文桃, 曹亚鹏, 应赛, 王升. 多次冻融循环下硫酸盐渍土盐-冻胀特性试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2): 49-54.
- [3] 温利强. 我国盐渍土的成因及分布特征[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学土木与水利工程学院, 2010: 2-3.
- [4] 高江平, 吴家惠. 硫酸盐渍土盐胀特性的单因素影响规律研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1): 37-42.
- [5] 周永祥, 阎培渝. 固化盐渍土经干湿循环后力学性能变化的机理[J]. 建筑材料学报, 2006, 9(6): 735-741.
- [6] 包卫星, 杨晓华. 冻融条件下盐渍土抗剪强度特性试验研究[J]. 公路, 2008(1): 5-10.
- [7] 吴廷荣, 贾锦绣, 王都兴. 石灰粉煤灰改良盐渍土填料力学特性研究[J]. 路基工程, 2010(1): 57-59.
- [8] 周琦, 韩文峰, 邓安, 等. 滨海盐渍土作公路路基填料试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1177-1180.
- [9] 李靖. 电石灰粉煤灰改良滨海盐渍土做底基层填料可行性研究[J]. 公路交通科技, 2012(6): 98-101.
- [10] 于天佑, 吴亚平, 司培国, 张磊, 孔令楠, 蒲增钢. 细粒硫酸钠盐渍土盐冻胀特性试验研究[J]. 冰川冻土, 2019, 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P.20190426.1554.002.html>
- [11] Mejía, J.M., Rodríguez, E., de Gutiérrez, R.M. and Gallegob, N. (2015) Preparation and Characterization of a Hybrid Alkaline Binder Based on a Fly Ash with No Commercial Value. *Journal of Cleaner Production*, **104**, 346-352. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.044>
- [12] 车宝, 吴亚平, 张磊, 蒲增钢, 唐科行. 伊朗德伊高铁沿线高中溶盐粗颗粒盐渍土的渗透特性[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(9): 187-192.
- [13] Borja, R. and Kavazanjian, E. (1985) A Constitutive Model for the Stress-Strain-Time Behaviour of "Wet" Clays. *Geotechnique*, **35**, 283-298. <https://doi.org/10.1680/geot.1985.35.3.283>
- [14] Yin, J.-H. and Graham, J. (1989) Viscous-Elastic-Plastic Modelling of One-Dimensional Time-Dependent Behavior of Clays. *Canadian Geotechnical Journal*, **26**, 199-209. <https://doi.org/10.1139/t89-029>

- [15] 王俊臣, 李劲松, 王常明. 硫酸(亚硫酸)盐渍土单次盐胀和冻胀发育规律研究[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(3): 410-416.
- [16] 中华人民共和国交通部. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [17] 包卫星, 杨晓华, 谢永利. 典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1991-1995.
- [18] 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.
- [19] 余云燕, 赵德安, 彭典华, 等. 南疆铁路路基填料改良盐渍土的盐胀冻胀试验研究[J]. 兰州交通大学学报, 2009, 28(1): 1-5.
- [20] 陈再, 彭述权, 胡毅夫, 等. 上隔下疏型硫酸盐渍土路基盐胀模型试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2015, 46(1): 248-254.
- [21] Sherwood, P.T. (1993) Soil Stabilization with Cement and Lime. In: *Transportation Research Laboratory State of the Art Review*, Her Majesty Stationary Office, London.
- [22] Rao, K.S.S., Rao, S.M. and Gangadhara, S. (2000) Swelling Behavior of a Desiccated Clay. *Geotechnical Testing Journal*, **23**, 193-198. <https://doi.org/10.1520/gtj11043j>
- [23] Konrad, J.M. (1980) Physical Processes during Freeze-Thaw Cycles in Clayey Silts. *Cold Regions Science and Technology*, **16**, 291-303.
- [24] Zaimoglu, A.S. (2010) Freezing-Thawing Behavior of Fine-Grained Soil Reinforced with Polypropylene Fibers. *Cold Regions Science and Technology*, **60**, 63-65. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.07.001>
- [25] Olgun, M. (2013) The Effects and Optimization of Additives for Expansive Clays under Freeze-Thaw Conditions. *Cold Regions Science and Technology*, **93**, 36-46. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.06.001>
- [26] 白江平. 水泥改良盐渍土的力学性能研究[J]. 内蒙古公路与运输, 2014(2): 16-18.
- [27] 李宏, 波沈晖, 沈杰. 粉煤灰固化超盐渍土的抗剪强度及耐久性[J]. 兰州理工大学学报, 2015, 41(3): 140-144.
- [28] 吕擎峰, 申贝, 王生新, 孟惠芳, 常承睿. 水玻璃固化硫酸盐渍土强度特性及固化机制研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(3): 687-693+727.
- [29] 钱晓明, 张卫兵, 郑子昂, 袁鹏. 冻融条件下硫酸盐渍土强度特性试验研究[J]. 中外公路, 2018, 38(1): 268-271.
- [30] Chen, F.H. (1988) Foundations on Expansive Soils. Elsevier, Amsterdam.
- [31] Basma, A.A., Al-Homoud, S.A., Malkavi, H. and Al-Bashabshah, M.A. (1996) Swelling-Shrinkage Behavior of Natural Expansive Clays. *Applied Clay Science*, **11**, 211-227. [https://doi.org/10.1016/s0169-1317\(96\)00009-9](https://doi.org/10.1016/s0169-1317(96)00009-9)
- [32] 褚彩萍, 李斌. 硫酸盐渍土在多次冻融循环时的盐胀累加规律[J]. 冰川冻土, 1998, 20(2): 108-111.
- [33] 包卫星, 张莎莎. 路用砂类盐渍土盐胀及融陷特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 734-739.
- [34] 姜宇波, 柴寿喜, 魏丽, 郑娇娇. 四种因素对纤维加筋盐渍土抗压性能的影响[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1): 233-239.
- [35] 张莎莎, 谢山杰, 杨晓华, 陈伟志. 火山灰改良粗粒硫酸盐渍土路基填料及其作用机理研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 41(3): 1-6.
- [36] 曹亚鹏, 文桃, 米海珍, 周凤玺, 杨鹏. 硫酸盐渍土含水率单次递减条件下的盐胀特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(3): 881-888.
- [37] Akoto, B.K. and Singh, G. (1986) Behavior of Lime Stabilized Laterite under Repeated Loading. *Australian Road Research*, **16**, 259-267.
- [38] 柴寿喜. 固化滨海盐渍土的强度特性研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [39] Atis, C.D., Ozcan, F., Kilic, A., Karahan, O., Bilim, C. and Severcan, M.H. (2005) Influence of Dry and Wet Curing Conditions on Compressive Strength of Silica Fume Concrete. *Building and Environment*, **40**, 1678-1683. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.12.005>
- [40] Shibi, T. and Kamei, T. (2014) Effect of Freeze-Thaw Cycles on the Strength and Physical Properties of Cement-Stabilised Soil Containing Recycled Bassanite and Coal Ash. *Cold Regions Science and Technology*, **106-107**, 36-45.
- [41] 连杰, 顾强康, 乔栋, 姜乐, 梁磊. 石灰水泥改良硫酸盐渍土盐胀特性研究[J]. 四川建筑科学研究, 2012, 38(4): 197-199.
- [42] 屈波, 顾强康, 李强, 等. 硫酸盐渍土盐胀的抑制措施[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2013, 33(3): 32-36.
- [43] 谢玉洁. 石灰改良硫酸盐渍土盐碱量优化研究[C]//《工业建筑》编委会, 工业建筑杂志社有限公司. 工业建筑

- 2018年全国学术年会论文集(下册): 2018年卷. 北京: 《工业建筑》杂志社, 2018: 4.
- [44] 张佳兴, 裴向军, 韦璐. 硫酸盐渍土水泥加固盐胀抑制剂研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 155-161.
- [45] Ali, K., Asghar, G.V. and Farshad, R. (2015) Quantitative Assessment of Parameters that Affect Strength Development in Alkali Activated Fly Ash Binders. *Construction and Building Materials*, **93**, 869-876. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.078>.
- [46] 吕擎峰. 水玻璃固化硫酸盐渍土强度特性及固化机制研究[C]//中国无机盐工业协会无机硅化物分会. 2016年全国无机硅化物行业年会暨创新发展研讨会论文集: 2016年卷. 2016: 7.
- [47] 张朝晖, 师百垒, 李宗利. 高速公路盐渍土地区路基地基改良研究[J]. 公路工程, 2018, 43(3): 52-56.
- [48] 李建国, 濮励杰, 朱明, 张润森. 土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1233-1245.
- [49] 樊自立, 马英杰, 马映军. 中国西部地区的盐渍土及其改良利用[J]. 干旱区研究, 2001, 18(3): 1-6.
- [50] 马君泽. 冻融条件下盐渍土工程特性的研究[J]. 山东工业技术, 2017(12): 128.
- [51] 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.
- [52] 陈洁, 张卫兵, 钱晓明. 粉煤灰改良硫酸盐渍土强度特性试验研究[J]. 宁夏工程技术, 2015, 14(2): 152-154+158.
- [53] 张文, 张彬, 慎乃齐. 盐渍土岩土工程特性研究现状与进展[J]. 勘察科学技术, 2008(3): 7-11.
- [54] 吕擎峰, 周刚, 王生新, 霍振升, 马博. 固化盐渍土核磁共振微观特征研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 245-249.
- [55] 黎玉婷, 张肖峰, 叶盛. 高原地区盐渍土硫酸盐强腐蚀性环境防腐设计[J]. 南方能源建设, 2018, 5(3): 102-105.
- [56] 曹雁峰, 曾力, 王旭, 刘绍彦. 矿物掺合料对西北盐渍土地区混凝土耐腐蚀性影响研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 1-6. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20180521.1100.020.html>
- [57] 张伟勤, 刘连新, 王潘芳, 黄梓平. 青海高原盐渍土对建筑物腐蚀性的研究[J]. 建筑技术, 2004, 35(4): 254-256.
- [58] 徐树青. 鱼卡煤矿新矿区盐渍土腐蚀性分析及盐胀性分析[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(9): 11-14.
- [59] 李波. 盐渍土地区耐腐蚀混凝土研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2007.
- [60] 韩劲草. 青海盐渍土地区半埋混凝土耐久性研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2012.
- [61] 杨军田. 新疆东部地区道路工程盐渍土的腐蚀性探讨[J]. 新疆农垦科技, 2012, 35(12): 41-42.
- [62] 赵金东. 盐渍土地区耐腐蚀性的半埋混凝土研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 长安大学, 2013.
- [63] 黄飞. 盐渍土腐蚀性研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [64] Wang, Z., Zhao, G., Gao, M., Chang, C., Jia, J. and Li, J. (2014) Characteristics and Spatial Variability of Saline-Alkaline Soil Degradation in the Typical Yellow River Delta Area of Kenli County, China. *Journal of Environmental Protection*, **5**, 1053-1063. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.512104>
- [65] 郭莉英. 改良盐渍土对混凝土的腐蚀性的研究综述[J]. 科技视界, 2016(12): 34+36.
- [66] 郝贞洪, 江南, 樊金承, 刘永利, 曹海龙. 盐渍土环境下混凝土的抗腐蚀性能研究[J]. 混凝土, 2016(8): 8-10+15.
- [67] 程克强. 新疆典型盐渍土特征及腐蚀性对输气管道工程的影响研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会. 2016年全国工程地质学术年会论文集: 2016年卷. 北京: 《工程地质学报》编辑部, 2016: 8.
- [68] Jie, R., et al. (2018) Spatial Distribution of Heavy Metals, Salinity and Alkalinity in Soils around Bauxite Residue Disposal Area, *Science of the Total Environment*, **628-629**, 1200-1208. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.149>
- [69] 王晋伟, 周茗如, 杨鑫, 薛凯丽, 巩位. 盐渍土地区水泥基浆液最优配比及早期耐腐蚀性研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(5): 55-60+99.
- [70] Aliasgharzad, N., Rastin, N.S., Towfighi, H. (2017) Erratum to: Occurrence of Arbuscular Mycorrhizal Fungi in Saline Soils of the Tabriz Plain of Iran in Relation to Some Physical and Chemical Properties of Soil. *Mycorrhiza*, **27**, 415. <https://doi.org/10.1007/s00572-017-0772-1>.
- [71] 李东, 方浩亮, 钱明, 张志豪. 伊拉克复合双高盐渍土对钢筋的腐蚀性特征试验分析研究[J]. 石油工程建设, 2018, 44(1): 51-54.
- [72] 李永红. 无粘性盐渍土的溶陷性研究[C]//中国岩石力学与工程学会. 岩石力学新进展与西部开发中的岩土工程问题——中国岩石力学与工程学会第七次学术大会论文集: 2002年卷. 西安: 中国科学技术出版社, 2002: 3.
- [73] 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.
- [74] 张琦, 顾强康, 张俐. 含盐量对硫酸盐渍土溶陷性的影响研究[J]. 路基工程, 2010(6): 152-154.

- [75] 程东幸, 刘志伟, 柯学. 粗颗粒盐渍土溶陷性影响因素研究[J]. 工程地质学报, 2013, 21(1): 109-114.
- [76] 李耀杰, 亓振中, 杨志刚, 秦明亮, 田汉儒. 粗颗粒盐渍土溶陷性室内外试验研究[J]. 工程勘察, 2016, 44(10): 22-27.
- [77] 刘梦瑶, 冯怀平. 高铁盐渍土地区溶陷特性的预测模型及因素敏感性分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 1-7.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2326-3458, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: hjce@hanspub.org