

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2018.05.028

盐渍土试验研究进展与相关问题探讨

孙小平

(中铁建甘肃投资有限公司, 甘肃 兰州 730060)

摘要: 盐渍土试验研究是盐渍土力学特性及工程问题研究的一个重要方面,为深入认识及总结盐渍土试验研究成果,分别从盐渍土室内试验、现场试验、盐渍土力学强度研究及新技术应用等方面简要回顾、分析了盐渍土试验研究的现状、结果及问题。具体探讨了能够反映盐渍土盐胀特性影响因素效应的单向控制盐胀试验和能综合反映盐渍土变形、水盐迁移分布特征的冻融循环试验的发展过程和主要成果结论,指出水热盐力四场耦合因素下的试验研究是未来盐渍土研究的方向;重点介绍了基于自然环境下的现场盐胀试验所取得的盐胀变形规律、土层温度场变化特征、水盐迁移分布特征等方面的研究成果。

关键词: 盐渍土;盐胀;力学强度;温度;水盐迁移

中图分类号: TU448

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2018)05—0147—06

Progress and Related Problems of Experimental Study on Saline Soil

SUN Xiaoping

(CRCC Gansu Institute Co., Ltd, Lanzhou, Gansu 730060, China)

Abstract: The experimental study of saline soil is an important aspect of the study on the mechanical properties and engineering problems of saline soil. In order to deeply understand and summarize the experimental results of saline soil. The present situation, results and problems of saline soil test research are reviewed and analyzed from indoor test, field test, and mechanical strength study of saline soil and application of new technology, respectively. The development process and main results of the freeze-thaw cycle test which can reflect the deformation of saline soil and the distribution characteristics of water and salt migration, the one-way controlled salt expansion test which can reflect the influence factors of salt swelling characteristics of saline soil are discussed specifically in detail. It is pointed out that the experimental study under four field of water, heat, salt and force coupling factors is the future research direction. The research results of salt expansion deformation law, soil temperature field change characteristics and water and salt migration distribution characteristics based on natural environment salt expansion test were introduced as well.

Keywords: salty soil; salt-expansion; mechanical strength; temperature; migration of moisture and salt

盐渍土作为一种特殊土,在我国西北干旱地区广泛分布,如新疆、青海、甘肃、宁夏、内蒙古等地^[1-2]均有分布。盐渍土是一种对温度变化比较敏感的地质体^[3],由于温度变化所引起的盐渍土地基盐胀、溶陷变形对建(构)筑物产生了严重损害,严重影响着工农业生产和国民经济的正常发展,盐渍土地基的处理和改良业已成为工程建设中密切关注和亟需解决的难题。多年来,学者们^[4-12]对盐渍土进行了大量研究,研究方向主要集中在盐渍土的水热场变化规律、水盐运移规律、盐胀特性以及力学强度

四个方面,另外在冻土区还存在着盐渍土冻胀与盐胀耦合研究的问题。其中室内冻融循环盐胀试验以及土工三轴剪切试验等对于定量化研究盐渍土与水、盐及温度的关系特征具有一定意义;同时随着盐渍土地区重大基础设施建设对盐渍土地质地基处理的迫切理论和技术指导需要,以及基于自然条件的室外试验研究对于揭示自然气候条件下的盐渍土力学和工程特性具有较大的应用价值^[3],针对于不同区域的自然条件盐渍土盐胀变形试验研究逐渐增多。建立考虑多场耦合条件的盐渍土盐胀变形计算

理论方法始终是学者们不断探索的重要方向。提出基于隔水阻热条件的盐渍土地基处理及盐胀变形控制方法成为不可避免的盐渍土工程实践关键技术难题。

本文尝试对近年来盐渍土的盐胀特性、温度场分布及水盐分布特征试验研究成果进行总结、对比分析,特别在综合比较室内试验和现场试验的基础上,指出盐渍土研究中现存的关键性问题并对其进行探讨,以期对盐渍土的进一步研究提供参考。

1 盐渍土盐胀特性室内试验研究

1.1 盐渍土盐胀特性影响因素研究

已有研究表明,盐渍土盐胀变形的产生需要最基本的温度、水分和盐分条件,其中水分和盐分是盐胀变形的内在先决因素,温度则是盐胀发生的外在因素和直接诱因。对于盐胀特性的研究应该从最基本的因素效应分析出发,现有的盐渍土研究也的确如此,国内学者首先从定性的角度,既以对盐胀变形发展起抑制或促进作用为判断基准,对影响盐胀变形的各因素进行了单因素控制下的盐胀特性室内研究试验。随着认识水平和测试试验技术的提高,研究深度逐步从定性的层面发展到定量的水平,并且结合实际工况下的水、热、盐、力四场耦合室内盐胀试验也正加深着研究人员对于盐渍土盐胀特性的认识。从黄雪峰等^[4-5]、张莎莎等^[7-8]和董晓明等^[9]的现有研究成果来看,对盐渍土盐胀特性影响因素的效应分析基本达成以下共识:

(1) 盐渍土地基盐胀变形的产生条件和发展程度受温度、水分、初始干密度、含盐量和上覆荷载的变化所影响。其中盐胀变形的温度效应表现为在不同温度区间上,盐渍土的盐胀发展速度以及所产生的盐胀量不尽相同。盐胀变形主要发展的适宜温度区间为 $15^{\circ}\text{C} \sim -5^{\circ}\text{C}$,此温度范围与盐分(硫酸钠)的相变温度和盐渍土水分相态变化温度相关联,而在 -5°C 以下或 15°C 以上时,盐胀作用较为平缓。其机理在于当温度高于 15°C 时,盐渍土土样内部所形成的温差幅值较小,水分迁移过程因而相对趋于平缓,硫酸钠溶液结晶活动受限,生成结晶体较少;而当温度降至 -5°C 以下时,盐渍土内部硫酸钠溶液浓度以及毛细水的相变(冰晶体生成)都会影响硫酸钠溶液得吸水结晶发展,因此综合表现为盐胀变形速率减缓。

(2) 水分对盐渍土盐胀变形的影响效应体现在两个方面:① 一般情况下,硫酸盐渍土的盐胀率随

含水率的增加而增加,而当一旦达到最佳含水率后,盐胀率反而呈现降低,即盐胀率的峰值一般出现在最佳含水率附近^[9];② 水分对盐渍土的盐胀变形影响与温度场不可独立分析,因为水分的相态以及迁移变化受温度场的耦合影响,近年来关于非饱和土介质的“锅盖效应”揭示了其中重要特性^[13],值得盐渍土研究者的重视。

(3) 盐渍土初始干密度和硫酸钠含盐量的增加均对盐胀变形产生促进作用,而上覆荷载与盐胀变形保持着反比关系。其中干密度的影响机理在于:随着盐渍土干密度增大,其土粒间的接触联结密切,土粒净距减小。当温度降低后,盐渍土硫酸钠晶体生成填充粒间孔隙,对盐渍土的骨架结构产生破坏力,使其结构损伤,发生体变,进而在宏观上表现为盐渍土盐胀变形发展。干密度对盐渍土盐胀的促进作用从现场试验结果中也得以证实^[14]。

值得注意的是,对于盐渍土盐胀特性的影响因素效应分析不应局限于单因素控制下的试验研究。原因在于,虽然上述因素的单独变化会对盐渍土的盐胀发展起到了一定的促进或抑制作用,然而在各因素同时发生变化之时,会存在主要的盐胀变形控制因素,研究表明随着上覆荷载压力的增加或含水率的减小,含盐量的促进作用会有所降低^[7],说明各因素之间存在着耦合影响。因此研究水、热、盐、力等因素耦合作用下的盐胀变形对于更好的揭示和认知盐渍土的盐胀特性将具有重要的理论意义和实践价值。

1.2 盐渍土盐胀冻融循环试验研究

为了模拟外界气候温度循环条件下的盐渍土地基盐胀变形特性,探讨温度交替变化下的水盐运移规律,国内学者^[8,10-12,15]开展了基于不同试验条件的室内冻融循环试验研究。如张莎莎等^[8]对粗粒盐渍土进行了室内大尺寸多次冻融循环盐胀试验;李炎等^[10]对罗布泊地区亚硫酸钠盐渍土在开放系统中进行了多次冻融循环试验。已有冻融循环试验研究表明:

(1) 在盐渍土冻融循环初期,盐胀变化特征主要以盐胀累加为主,而在经历多次冻融循环后期,盐胀变形速度明显趋缓,以盐胀回落或以溶陷累加为主;降温初期盐胀变形增长速度持续增加,而后保持一个较为平稳的盐胀发展速率^[16],升温后盐胀变形停滞,而土体出现盐胀量消沉回落现象。

(2) 冻融循环过程中,水盐运动呈现多态变化。对冻融循环前后的盐渍土水盐分布变化进行试验对

比发现,水盐整体具有从热端向冷端迁移和富集规律特征,表明温度(差)是驱动水盐运移的主要动力。然而水盐的分布不具有完全对应的分布关系,即盐分场迁移速率低于水分迁移速度,在迁移高度上,盐分迁移高度低于水分活动层高度。同时盐分也对盐渍土冻结特性(冻结温度)存在影响^[17]。

目前,针对不同类盐渍土的试验表明,盐渍土的盐胀特性受土样类别、土粒颗粒分布级配、含盐种类及对应含盐量等的影响而具有一定的差别特征,如盐渍土中细粒土含量对其体变(体缩现象)特征的影响。上述盐渍土盐胀特性影响因素对于深入分析温度(冻融)循环条件下的盐渍土盐胀特性和水盐迁移分布规律固有不可言喻的研究意义,然而现有的冻融循环试验存在几点值得关注的问题:

(1) 为量化研究硫酸钠盐对盐胀变形的影响规律,排除土体中原有其他类别盐分对试验结果的干扰。试验所用盐渍土多经人工洗盐等工序后定量掺加硫酸钠盐而配制成的试验用土。因此对于含氯盐较高的盐渍土而言,试验所得盐渍土盐胀量往往较实际工况下的盐胀量大,原因在于氯盐对于盐胀发展具有一定的抑制作用。因此在有关盐渍土冻融循环试验中,应合理考虑实际工况下的盐渍土盐分构成及含量,以期得到反映多盐分耦合条件下的盐渍土盐胀变形规律特征。

(2) 试验所设计的冻融循环主要是通过控制土样上下端面温度变化而实现的,降温具有单向性。降温的速率较自然气候温度对土体温度变化的影响速度快得多,因此当温度以一个较快的水平快速降至负温以下时,极易在盐渍土内引起冰晶体的形成,堵塞土体内部联通孔隙及毛细孔道,阻碍水盐从热端向冷端的迁移活动,进而影响了试验对于揭示盐胀变形和水盐迁移分布规律的客观性。因此开发设计具有全天候条件下的冻融循环试验装置,开展对应试验研究具有重要意义。

2 盐渍土盐胀特性现场试验研究

由于盐渍土室内试验研究在试验开展方面具有易于进行、量化研究的优势而成为盐渍土盐胀特性、温度状态分布规律、水盐迁移分布规律研究的主要方式。但是面对重大工程的需要,基于特殊自然气候条件的盐渍土地基变形特征现场试验研究具有不可替代性和紧迫性。以期反映完全真实诸多不确定自然气候条件(如自然风力、季节性降水和蒸发等)下的现场盐胀变形及水分、盐分及温度场变化特

征监测试验不断出现,加深了对盐渍土诸多力学和工程特性的认识。因此基于室外实际自然条件下的现场盐渍土盐胀特性和水、热、盐状态分布试验研究将具有重要的理论研究价值,更对于特定的盐渍土地区的工程建设应用而言具有不可替代的现实指导意义。

近年来,学者对不同地区的盐渍土现场盐胀特性及相关问题进行了试验研究。其中,张彧等^[18]对察尔汗盐湖多年水热和蒸发量变化情况进行了分析总结,并在寒季对气温、地温和现场土体不同深度位置含水率和含盐量进行了试验和研究。杨保存等^[19]对新疆某盐渍土病害路段进行了盐胀变形监测。张沛然等^[3]在宁夏干旱盐渍土地区进行了为期1年的盐渍土地基(盐胀)变形、温度和水份动态监测试验,对自然环境条件下盐渍土的水-热传递变化规律及其对盐胀变形的耦合影响特征进行了分析研究。综合现有现场试验成果,可以初步得到以下结论和认识:

(1) 现场盐渍土地基温度场分布整体随季节性更替而呈现规律性变化。值得关注的是,温度传递存在深度效应,即浅层土体温度随外界气候温度变化更为剧烈。随着深度加深,温度变化幅值减小^[20],而对应变化周期延长。例如,从文献^[3]可以看出,大致以盐渍土地基土层深度1.8 m左右为界,土层温度变化随气候温度变化可以分为两个状态区,在1.8 m以下土层温度变化相对较为平稳,而1.8 m以上至地面土层温度变化剧烈。即浅层土体的热效应变化剧烈,随着深度的下降温差幅值在减小^[18]。并且沿土层深度方向所形成的温差幅值在寒期随着降温期的深入而不断增大,浅层土体较其以下土层对于外界自然温度变化的响应速度更快、程度更大。上述关于盐渍土温度场的变化规律揭示结果对于盐渍土地基工程的处理应用具有重要现实意义。

(2) 盐渍土水分分布规律受多方面因素影响,其中包括气候温度、湿度、日照(蒸发)强度及持续时间、降雨等。与盐渍土地基土温度变化特征规律类似,其水分分布也表现出深度效应,即靠近地表土体的水分变化幅度及变化周期较其它土层而言更为显著。在西北等地寒季期,盐渍土靠近地表一定深度范围内出现冻土层,冻胀变形不可避免与盐胀变形同时产生,但是冰晶体在土体内的产生抑制了一定程度的盐胀变形发展^[20]。土体水分迁移沿深度方向表现出分带现象。

(3) 从上述分析可以得知,盐渍土的变形受温度场、水分场及盐分场^[21]的影响,其中在自然气候条件下还受降水、蒸发等的影响。从现有试验结果可以看出,盐渍土盐胀变形以及融陷变形存在深度效应,即盐渍土的盐胀变形主要发生在距地表的浅层土体内^[10],这与温度场在盐渍土地基中的分布变化规律相关联,浅层土体的热效应更加明显,盐胀变形的产生主要受土体热状态和水分迁移的耦合影响^[22],在土体温度为 10℃ ~ -5℃ 时盐胀变形发展最为明显^[23]。盐胀变形存在明显的时间效应,其中在寒季主要发生盐胀变形,而温度回升盐渍土地基以融陷变形为主,盐渍土长期变形是盐胀变形和融陷变形交替发展变化的累积结果。

对于盐渍土的水、热、盐分布规律和盐胀变形的现场试验研究总体上相较室内模拟试验而言更能准确反映自然气候环境下的盐渍土地基相关特性。其中所得出的盐胀变形发展的主要土层深度对于工程上用于地基土换填或改良而言具有直接的指导意义;温度传递变化特征、水盐迁移分布规律对于盐渍土地基的隔热、隔水、阻盐处理同样具有积极的工程应用价值^[24]。值得关注的是,温度对水盐迁移分布的驱动力影响从室内外试验结果中都有所体现,水热盐三者的耦合效应分析应当成为盐渍土研究中的一个热点问题,许多学者^[25-30]对此也进行了一些试验研究和分析。

3 盐渍土力学强度研究及新技术应用

3.1 盐渍土力学强度研究

目前,对于盐渍土的力学强度研究可分为三个方面:

(1) 对影响盐渍土力学强度的基本因素(如含盐量、含水率、温度)进行(量化)研究探析^[31-32],如陈炜韬等^[31]研究了含盐量及含水率对氯盐盐渍土抗剪强度参数的影响。试验结果表明:随着 CaCl_2 含量的增加,氯盐盐渍土的抗剪强度参数值先减小后增大。含水率在低水平状态变化时,盐渍土黏聚力和内摩擦角降低程度比较大,而在高水平时,衰减程度降低。其中盐分对抗剪强度参数的影响主要在于其土中易溶盐相态的变化。

(2) 研究冻融循环条件下的盐渍土力学强度变化特征,如文献^[33]研究了冻融条件下的盐渍土抗剪强度特性。结果表明,经历冻融循环后盐渍土土体的黏聚力随着冻融次数的增加而降低;同时土体黏聚力随冻融次数的变化特征与土体中氯盐的浓度

存在关联^[34]。对盐渍土强度参数造成影响的主要因素有冻融循环次数、水分迁移、晶体析出等。在温度变化过程中,盐分会发生相态变化,从而导致起土体内部结构的变化,引起土体抗剪强度变化^[34]。

(3) 对改良加固盐渍土力学强度变化特征进行比较研究,并以此作为盐渍土地基加固改良的理论基础,提出相应盐渍土变形和强度控制处理技术,如王沛等^[35]通过三轴压缩试验研究了滨海盐渍固化土的偏应力应变特性,试验结果表明,掺入固化剂后的固化盐渍土达到盐渍土对应偏应力峰值所需的应变增加,说明经固化处理后盐渍土的抗变形能力提高。魏丽等^[36]研究了麦秸秆加筋滨海盐渍土的抗剪强度及偏应力应变关系,研究表明,加入麦秸秆后盐渍土的黏聚力增大,而内摩擦角加筋(麦秸秆)处理前后变化较小。同时随加筋长度和质量加筋率的增加,纤维加筋盐渍土的抗剪强度提高,抗变形能力同比增强。

至今为止,对于盐渍土力学强度和固化改良盐渍土的力学强度的研究达成了一些基本的共识^[37],但与此同时还存在着一些值得探讨和解决的试验研究问题:

(1) 冻融循环条件下的盐渍土力学强度变化,可以基于盐分含量、水盐相态变化特征以及盐胀和冻胀变形发展程度等方面进行分析。其中盐分含量和盐分相态对力学强度的影响分析还应与冻融循环程度紧密结合起来,原因在于盐分在冻融循环过程中的含量和相态会直接影响土体结构及其所含胶结物的含量;另外二者还对盐渍土力学强度^[38]和盐胀的发展发挥着控制因素的作用。水分相态变化会影响盐胀和冻胀变形的累加量,并且水分相态的变化控制着土体内易溶盐含量和冰晶体数量的多少,如冰晶体的产生将导致土体体积膨胀,土体结构遭到破坏,导致抗压强度降低。盐胀和冻胀的产生使土体结构扰动,土体孔隙增多,结构趋于疏松,导致其力学强度降低。因此通过试验研究,揭示盐渍土力学强度在多重因素耦合影响条件下的变化特征具有重要意义^[39],可为相关盐渍土地基的处理提供理论指导和技术支持。

(2) 对于固化改良盐渍土的冻融循环和剪切试验研究表明,经固化后的盐渍土力学强度较原盐渍土得到了提升,抗变形性能增强。然而固化土在经历浸湿作用后或者受泛盐渍化的影响,其力学强度会产生折损。因此对于固化土的工程应用应该结合完善的隔水工程处理措施,阻止水盐迁移,同时研究

可提高抗冻融性能的固化改良土,以增强固化土的强度寿命,发挥其应有的工程效用。通过试验研究,特别是微宏观试验技术的联合,探析加固处理对盐渍土的结构、土粒联结的影响,揭示加固处理的微观机理,从而从改变盐渍土的结构性出发改善其力学强度。

(3) 受剪切试验速度的影响,盐渍土的力学强度会产生差异变化。剪切速度较快时所得到的盐渍土强度较低,而速度较慢时则反之,因此应以实际工程的力学简化特征为基,建立与研究问题相匹配的试验加载、剪切试验标准^[40],完善盐渍土土工试验方法。

(4) 不同地区的盐渍土由于所处的气候环境、水环境等因素的不同,使其力学特征表现不一,因此对于不同区域或不同类别的盐渍土力学强度应予以区别性对待和研究。

3.2 CT技术在盐渍土力学强度研究中的应用

由于岩土微宏观试验研究可以全面揭示岩土(石)的强度、变形等变化特征及其机理而逐渐备受关注和推崇,不断受到重视。而CT技术可以动态、定量和无损地量测岩土(石)材料在受力过程中的内部结构变化特征,近年来,CT技术在岩土工程中的应用发展较快^[41],亦逐步引入到盐渍土的力学特征研究中^[42]。其中邓友生等^[43]率先利用CT技术对冻结过程中盐渍土的结构变化特征进行了试验研究,认为土的类型和含盐量是决定盐渍土盐胀的主要因素。张伟等^[44]利用与CT机配套的多功能土工三轴仪,对硫酸钠盐渍土在三轴剪切试验过程中的内部结构进行了动态量测,得到了硫酸钠盐渍土结构演化的CT图形和数据,包括不同围压及含盐量下盐渍土土样不同断面在剪切过程中的所得CT扫描图像,并利用所得CT数值(灰白值)分析了盐渍土土样的剪切结构变化规律。

关于CT三轴等新试验技术在盐渍土力学强度研究中的应用,进一步的研究应明确建立微观定量参数与宏观力学强度之间的关联性,建立盐渍土微宏观土力学。通过新试验技术观察、记录及统计分析盐渍土内部水分、盐分的迁移变化特征,探讨温度变化条件下的孔隙通道结构尺寸变化,丰富盐渍土的力学强度和结构特征研究。

4 结论

(1) 盐渍土盐胀变形的产生需要最基本的温度、水分和盐分条件,其中水分和盐分是盐胀变形的

内在先决因素,温度则是盐胀发生的外在直接诱因。水、热、盐、力等因素下的耦合效应研究应成为盐胀特性研究的新方向。

(2) 冻融循环条件下的盐渍土特性研究定量地揭示了盐渍土的变形和水盐迁移特征。冻融循环初期,主要以盐胀累加为主,经历多次冻融循环后,盐胀变形速度趋缓。

(3) 反映自然气候条件的现场盐胀变形及水分、盐分及温度场变化特征监测试验不断出现,加深了对盐渍土诸多力学和工程特性的认识。盐渍土长期变形是盐胀变形和融陷变形交替发展变化的累积结果。

(4) 冻融循环条件下的盐渍土力学强度变化,可以基于盐分含量、水盐相态变化特征以及盐胀和冻胀变形发展程度等方面进行分析。应进一步建立与研究问题相匹配的试验加载、剪切试验标准,完善盐渍土土工试验方法。同时对于不同区域或不同类别的盐渍土力学强度应予以区别性对待和研究。

CT三轴技术在盐渍土研究方面的应用为更加细观的研究盐渍土结构特征提供了先进手段。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国铁道部.铁路工程特殊岩土勘察规程:TB 10038—2012[S].北京:中国铁道出版社,2012.
- [2] 徐攸在.盐渍土地基[M].北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [3] 张沛然,黄雪峰,杨校辉,等.盐渍土水-热场耦合效应与盐胀变形试验[J].岩土力学,2018,39(5):1619-1624.
- [4] 黄雪峰,张沛然,杨校辉,等.盐渍土盐胀特性与水热状态变化特征试验研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):184-189.
- [5] 黄雪峰,邱爽,付正锋,等.宁南黄河灌区硫酸盐渍土盐胀规律及特性研究[J].四川建筑科学研究,2010,36(6):114-117.
- [6] 邱爽.宁夏扶贫扬黄灌溉地区盐渍土地基隆胀及其变形规律的研究[D].兰州:兰州理工大学,2010.
- [7] 张莎莎,杨晓华,谢永利,等.路用粗粒盐渍土盐胀特性[J].长安大学学报(自然科学版),2009,29(1):20-25.
- [8] 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.
- [9] 董晓明,谢永利.砾类硫酸盐渍土单向冻胀试验特性研究[J].广西大学学报(自然科学版),2011,36(4):582-586.
- [10] 李炎,张远芳,石群,等.罗布泊地区天然盐渍土多次冻融循环试验研究[J].科学技术与工程,2015,15(36):194-197.
- [11] 万旭升,廖孟柯,杜立群.温度对硫酸钠盐渍土盐胀影

- 响的试验研究[J].公路交通科技,2016,33(8):44-50.
- [12] 李 哲,邢艳如,尹睿捷.盐渍土中盐胀含盐量及竖向分布的关系研究[J].路基工程,2014(2):102-107.
- [13] 李 强,姚仰平,韩黎明,等.土体的“锅盖效应”[J].工业建筑,2014,44(2):69-71.
- [14] 谭冬生,孙毅敏,胡力学,等.新建兰新铁路新疆段沿线盐渍土盐胀特性、机理与防治对策[J].铁道学报,2011,33(9):83-88.
- [15] 董晓明,谢永利, Aaron Daniel MWANZA, 等.粗粒硫酸盐渍土冻融循环盐胀性研究[J].郑州大学学报(工学版),2011,32(2):75-79.
- [16] 邴 慧,马 巍.盐渍土冻结温度的试验研究[J].冰川冻土,2011,33(5):1106-1113.
- [17] 邴 慧,何 平.不同冻结方式下盐渍土水盐重分布规律的试验研究[J].岩土力学,2011,32(8):2307-2312.
- [18] 张 戩,房建宏,刘建坤,等.察尔汗地区盐渍土水热状态变化特征与水盐迁移规律研究[J].岩土工程学报,2012,34(7):1344-1348.
- [19] 杨保存,刘新荣,贺兴宏,等.盐渍土路基盐胀性试验研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(3):594-603.
- [20] 高玉佳,王 清,陈慧娥,等.温度对季节性冻土水分迁移的影响研究[J].工程地质学报,2010,18(5):698-702.
- [21] Yang P, Liu Y F, Mi H Z, et al. Study on deformation property of coarse particles (sulfate) saline soil with field test[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014,580-583:329-333.
- [22] Taylor G S, Luthin J N. A model for coupled heat and moisture transfer during soil freezing[J]. Revue Canadienne De Géotechnique, 1978,15(4):548-555.
- [23] 刘 毅.罗布泊地区粗粒盐渍土盐胀特性影响因素试验研究[J].工程勘察,2014,42(2):12-16.
- [24] Ma Q, Lai Y, Zhang M, et al. Model test study on the anti-saline effect of the crushed-rock embankment with impermeable geotextile in frozen saline soil regions[J]. Cold Regions Science & Technology, 2017,141:86-96.
- [25] 虞卫国,房建宏.盐渍土中固相相态变化规律的研究[J].公路工程,2013,38(4):94-98.
- [26] 万旭升,赖远明,廖孟柯.硫酸盐渍土未相变含水率与温度关系研究[J].岩土工程学报,2015,37(12):2175-2181.
- [27] 赵 刚,陶夏新,刘 兵.原状土冻融过程中水分迁移试验研究[J].岩土工程学报,2009,31(12):1952-1957.
- [28] 赵 刚,陶夏新,刘 兵.重塑土冻融过程中水分迁移试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2009,40(2):519-525.
- [29] 王铁行,陆海红.温度影响下的非饱和黄土水分迁移问题探讨[J].岩土力学,2004,25(7):1081-1084.
- [30] 唐丽娟,王福龙,杨英杰,等.孔隙比与饱和度对粉质黏土导热系数影响的试验研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2015,36(3):58-62.
- [31] 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.
- [32] 程东幸,许 健,刘志伟,等.粗颗粒盐渍土大型剪切强度试验研究[J].水利与建筑工程学报,2017,15(5):149-153.
- [33] 陈炜韬,王 鹰,王明年,等.冻融循环对盐渍土黏聚力影响的试验研究[J].岩土力学,2007,28(11):2343-2347.
- [34] 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.
- [35] 王 沛,王晓燕,柴寿喜.滨海盐渍土的固化方法及固化土的偏应力-应变[J].岩土力学,2010,31(12):3939-3944.
- [36] 魏 丽,柴寿喜,蔡宏州,等.麦秸秆加筋滨海盐渍土的抗剪强度与偏应力应变[J].土木工程学报,2012,45(1):109-114.
- [37] 杨西锋,尤哲敏,牛富俊,等.固化剂对盐渍土物理力学性质的固化效果研究进展[J].冰川冻土,2014,36(2):376-385.
- [38] Lai Y, Liao M, Kai H. A constitutive model of frozen saline sandy soil based on energy dissipation theory[J]. International Journal of Plasticity, 2016,78:84-113.
- [39] Zhang Y, Yang Z, Liu J, et al. Impact of cooling on shear strength of high salinity soils[J]. Cold Regions Science & Technology, 2017,141:122-130.
- [40] 任秀玲,张 文,刘 昕,等.西北地区盐渍土盐胀特性研究进展与思考[J].土壤通报,2016,47(1):246-252.
- [41] 王路君,左永振,孔宪勇,等.CT技术在岩土工程研究中的应用[J].地下空间与工程学报,2009,5(S2):1754-1756,1775.
- [42] 洪明海,黄介生,曾文治,等.基于 CT 成像技术的盐渍土壤孔隙结构识别与分析[J].中国农村水利水电,2016(9):1-4,9.
- [43] 邓友生,蒲毅彬,周成林.冻结过程对盐渍土结构变化的试验研究[J].冰川冻土,2008,30(4):632-640.
- [44] 张 伟,陈正汉,黄雪峰,等.硫酸盐渍土的力学和微观特性试验研究[J].建筑科学,2012,28(1):49-54.