

亚硫酸盐渍土各冻融周期盐-冻胀规律试验研究

潘蕾, 张远芳, 陈敬知, 张运海

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要: 为研究罗布泊地区天然亚硫酸盐渍土盐-冻胀各冻融循环周期内的变化规律及影响因素,采用控制初始含水率和干密度的方法进行冻融循环试验。试验结果表明:亚硫酸盐渍土各周期的盐-冻胀率为先增后减的二次函数状,在冻融循环作用下盐溶液浓度降低,土体内部结构达到临界点,4周期后各周期的盐-冻胀率开始降低;前4周期的盐-冻胀率呈先减速后加速,且随含水率的增大表现明显,土体结构性损伤是盐-冻胀增长加速的主要原因;随初始干密度的增大,盐-冻胀作用在改变土体的孔隙和结构时所需的能量增加,试验中各周期的盐-冻胀率表现出波动性的变化。研究结果表明:亚硫酸盐渍土各冻融周期的盐-冻胀率与土体在各周期所呈现的结构状态有密切关系。

关键词: 亚硫酸盐渍土;盐-冻胀变化规律;各冻融周期;结构性

中图分类号: TU448

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)01-0220-05

Research on salt - frost expansion rules of sulfurous saline soil during each freeze - thaw cycle

PAN Lei, ZHANG Yuanfang, CHEN Jingzhi, ZHANG Yunhai

(College of Hydraulic and Civil Engineering of Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to analyze the Lop Nur area's sulfurous saline soil salt - frost expansion change rules and influences during each freeze - thaw cycle, we adopted the method of controlling initial water content and dry density to experiment the freeze - thaw cycle tests. The results indicate that the sulfurous saline soil's salt - frost expansion rate in each freeze - thaw cycle is a quadratic function, which firstly increases and then decreases. Under the influence of the freeze - thaw cycles, the salt solution's concentration decreases and the soil's interior structure reaches a critical point. The test indicates that after four cycles each cycle's salt - frost rate slows down. The growth rate of the early four circle stages for the salt - frost expansion accelerates after slows down, and this rule could be more obvious with the increase in water content. The damage of soil's structural could be the main reason for the early stage salt - frost heave rate increase. With the dry density increasing the energy for salt - frost which helps change the porosity and structure enlarged, and this experiment phenomenon shows the salt - frost heave rate of each cycle could be more unstable. The result proves that the sulfurous saline soil's salt - frost expansion in each freeze - thaw could have a close relation with the status of soil structure in different cycles.

Key words: sulfurous saline soil; salt - frost heave change rules; each freeze - thaw cycle; structural

1 研究背景

盐渍土是指含盐量达到一定数量的盐、碱化土的统称。与非盐渍土相比,盐渍土除固、液、气三相外还存在固液相可相互转换的易溶盐^[1],或可称之

为四相体,且易溶盐的成分繁多、含量各异,导致盐渍土具有极复杂的工程特性。

对于硫酸类盐渍土的盐胀规律和机理方面 Blaser 等^[2]、Nixon 等^[3]最早进行了研究,认为芒硝 ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) 是引起材料体积膨胀的主要原

收稿日期:2017-09-21; 修回日期:2017-10-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41262012);新疆农业大学研究生校级科研创新项目(XJAUGRI2016-031)

作者简介:潘蕾(1993-),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为岩土工程与灾害治理。

通讯作者:张远芳(1963-),女,江苏无锡人,教授,主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。

因。我国对盐渍土的危害防治研究开始于 20 世纪 50 年代,石兆旭等^[4]初步研究了硫酸盐渍土盐胀率与干密度、含水率、含盐量的关系;邓友生等^[5]指出盐溶液需具有一定的浓度是盐胀的前提条件;高江平等^[6]对硫酸盐渍土盐胀的影响因素做了交互作用分析。

近年来,牛玺荣等^[7]建立了硫酸盐渍土体积变化关系式;文桃等^[8]探讨了硫酸钠盐渍土的击实特性和压实度评价方法;万旭升等^[9]对硫酸钠溶液和盐渍土的冻结温度和晶体析出做出了试验研究;王宁等^[10]通过室内冻胀实验探讨了含水率、压实度、含盐量对盐渍土冻胀规律的影响。新疆地区的盐渍土研究方面,王海涛等^[11]、石群等^[12]对罗布泊、艾丁湖地区的天然盐渍土进行了盐-冻胀及水盐运移等研究;包卫星等^[13-14]探究了喀什等地区公路工程的天然盐渍土在冻融循环条件下的盐胀、水盐运移、强度变化规律。但盐渍土的工程特性即使在同一区域也存在较大的差异性,且对不同条件下的盐-冻胀增长速率和冻融循环各周期的变化规律分析较少。本文针对新疆罗布泊地区的天然亚硫酸盐渍土进行盐-冻胀试验,研究在多次冻融循环条件下,初始含水率和初始干密度对盐-冻胀特性的影响及相互作用关系,为罗布泊地区基础设施的盐渍土病害防治提供一定依据。

2 试验方法与方案

2.1 试验方法

2016 年 6 月对罗布泊地区省道 S235 沿线 K532 处天然盐渍土进行了取样分析,在此基础上选择深度 0.5 m 处土体取样作为本次试验研究对象。试验模拟了自然界冬季至回暖时期的冻融循环过程,考虑到罗布泊地区冬季平均气温,将试验土样放置于设定温度为 -20°C 的冰箱中模拟寒冻季节的气候环境;在温控空调的调节下,设定室内恒定温度为 20°C 模拟回暖升温时的气候环境,经反复试验证明在上述环境中各历经 12 h 后土体可达到完全的冻结与融化。

为保证土样的均匀性减少含水率和密度的误差,将充分拌和的土料置于塑料袋内闷样 24 h 成型,试验按照《土工试验方法标准》^[15]采用轻型击实法,土样共分 3 层采用单向分层法击实制备试样。试验装置如图 1 所示,试验仪器采用标准固结仪中的金属盒部件作为一个密封环境且不设补水装置,依次放入透水石、滤纸、环刀、大孔洞有机玻璃板及

百分表,为消除边界效应造成的误差,于玻璃板内壁涂抹凡士林减小摩擦作用。

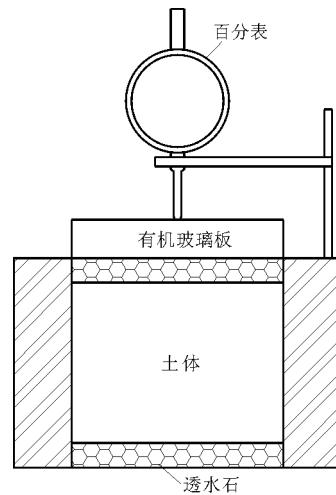


图 1 试验装置示意图

2.2 试验方案

为研究罗布泊地区盐渍土在多年季节性冻融环境下的盐冻胀规律,试验设定共计 7 个冻融循环周期,单次冻融循环周期设定为 48 h,降温 and 升温各 24 h,在每次冻融循环周期结束后,观察并记录百分表的示数作为试验数据。为研究盐-冻胀各冻融循环周期内的影响因素,采用控制初始含水率和干密度的方法进行试验,共计 12 组试验,参数设定及分组如表 1 所示。

表 1 试验分组

组号	干密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含水率/%
A1	1.5	10
A2		13
A3		16
A4		19
B1	1.6	10
B2		13
B3		16
B4		19
C1	1.7	10
C2		13
C3		16
C4		19

2.3 试验土体的基本性质

对试验地不同地点及深度的土样进行分析,发现当取土地点、深度发生很小变化时,盐渍土的基本物理性质都会发生改变。本次试验土样为埋深 0.5 m 处的亚硫酸盐渍土,土样参数及易溶盐离子含量如表 2、3 所示。

3 含水率对盐-冻胀的影响分析

试验采用冻融循环的方法模拟盐渍土的盐-冻胀过程,经前人试验证明冻融循环7周期后盐渍土的盐-冻胀作用已趋于平缓,故设计7个冻融循环周期,记录每个周期冻融循环结束后的累计盐-冻胀率作为原始试验数据。

3.1 累计盐-冻胀率变化规律分析

图2为干密度分组下不同含水率的盐-冻胀累计曲线。由图2可以看出,在含水率等差变化下盐

-冻胀率曲线的间距相近,可以直观地看出在控制相同压实度条件下含水率与盐-冻胀率呈正相关的近似线性关系,土体含水率由10%增大到19%,其累计盐-冻胀率可由最小3.23%上升至最大8.42%,盐-冻胀率大幅增加。分析原因,土体发生盐-冻胀现象主要是由于在超低温环境下易溶盐晶体的析出和冰晶体的形成导致粒间孔隙增加,故盐-冻胀率的大小与易溶盐含量和含水率有密切的关系,这与很多学者得出的结论一致,证明罗布泊地区亚硫酸盐渍土具有普遍的盐-冻胀特性。

表2 试验土样参数

深度/m	类型	含盐量/ %	最优含 水率/%	最大干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	天然干密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	天然含 水率/%
0.5	亚硫酸盐渍土	2.22	14.70	1.70	1.48	12.6

表3 试验土样易溶盐离子含量

取样 深度/m	各离子含量/($mmol \cdot kg^{-1}$)							含盐量 /%
	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$K^+ + Na^+$	
0.5	0.00	16.00	30.75	19.00	15.25	2.50	64.30	2.22

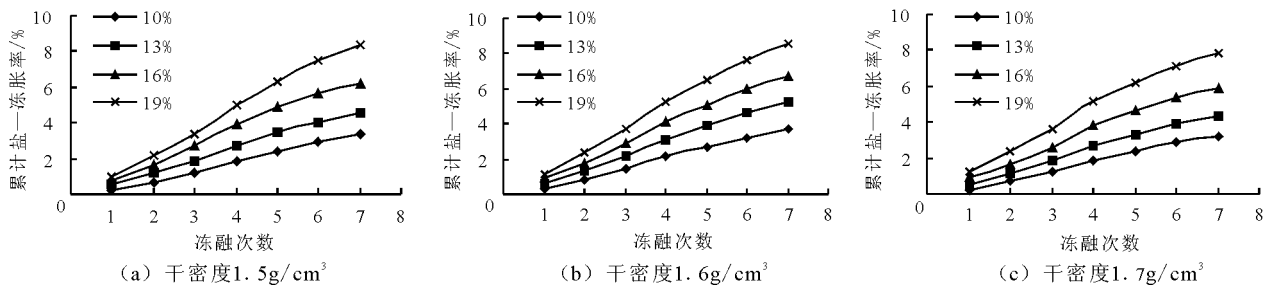


图2 干密度分组下不同含水率的盐-冻胀累计曲线

表4为干密度分组下不同含水率7周期后的累计盐-冻胀率比值。如表4所示当控制干密度为1.50和1.70 g/cm^3 时,盐-冻胀率与含水率呈较好的线性关系:含水率等差递增时,对应的盐-冻胀率比值在1.35~1.38之间,几乎没有发生变化。但当控制干密度为1.60 g/cm^3 的分组时,盐-冻胀率随含水率出现了一些波动性的变化:如表5所示,含水率从10%上升到19%的过程中累计盐-冻胀率比值分别为1.43、1.27和1.26,可以看出在初始干密度1.60 g/cm^3 下,含水率的增长对盐-冻胀的作用效果呈减弱趋势。

张莎莎等^[16]对硫酸类盐渍土的微观研究发现,硫酸类盐渍土的盐结晶体以包裹土颗粒的形式存在,填补了粒间孔隙。故分析在控制密度1.60

g/cm^3 时出现盐-冻胀增长速率变缓的原因:土体内部的孔隙结构容纳了一部分的盐结晶体或冰晶体,体积膨胀量相对减小,盐-冻胀宏观上表现为增长速率减弱。而密度过大(1.70 g/cm^3)土体过于密实孔隙结构不足,或密度过小(1.50 g/cm^3)土体结构相对疏松孔隙易膨胀,则不会表现出盐-冻胀率增长速率变缓的现象。天然亚硫酸盐渍土在某一干密度下,土体的内部结构性会影响含水率对盐-冻胀的作用效果。相应的王宁等^[11]同样指出同一压实度下,存在一界限含水率会影响其冻胀量和冻缩量。

3.2 各周期盐-冻胀率变化规律分析

图3所示为干密度分组下各冻融周期的盐-冻胀曲线。由图3可知,无论含水率和干密度如何改变,在单次冻融周期内的最大盐-冻胀率总是发生

在第 4 周期。

表 4 干密度分组下 7 周期后的累计盐 - 冻胀率(%)

干密度/ (g · cm ⁻³)	含水率/%			
	10	13	16	19
1.50	3.32	4.52	6.25	8.42
1.60	3.67	5.24	6.66	8.40
1.70	3.23	4.38	5.92	7.88

表 5 干密度分组下 7 周期后的累计盐 - 冻胀率比值

干密度/ (g · cm ⁻³)	不同含水率的盐 - 冻胀率比值		
	13%/10%	16%/13%	19%/16%
1.50	1.36	1.38	1.35
1.60	1.43	1.27	1.26
1.70	1.36	1.35	1.34

如图 3 所示,在前 4 次冻融循环周期内各周期的盐 - 冻胀率总体呈增加的趋势,在第 4 冻融周期

达到峰值后开始下降,说明在前 4 周期内土体的盐 - 冻胀处于发展期。这主要是因为在前 4 周期内,溶陷作用比盐 - 冻胀作用效果弱,土体孔隙率增大结构性降低,部分大孔隙结构形成,较为疏松的土体结构为下一冻融周期的盐 - 冻胀提供了有利的内部环境,如图 4(a)冻融循环过程中土样内部微观形态所示;当再次进入低温环境时,盐晶体析出(主要成份为 Na₂SO₄ · 10H₂O)加之冰晶体低温下重新生成,在有利的内部环境下,盐 - 冻胀率随之提高并形成 一个盐 - 冻胀发展的恶性循环过程。直到第四周期冻融循环结束时,土体内部的盐晶体在持续析出作用下,盐溶液浓度降低盐晶体析出数量开始变少、速率减缓,此外土体内部结构达到一定的临界点,溶陷时滑落的土颗粒和累计析出的盐晶体起到了填补大孔隙的作用,形成了不利于盐 - 冻胀再次发生的内部环境,因而在第 4 冻融周期后各周期内的盐 - 冻胀率开始降低,如图 4(b)所示。

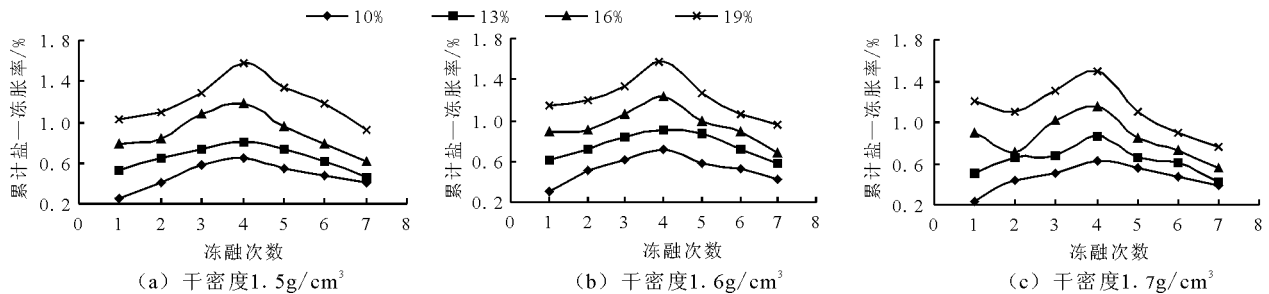


图 3 干密度分组下不同含水率各冻融周期盐 - 冻胀曲线

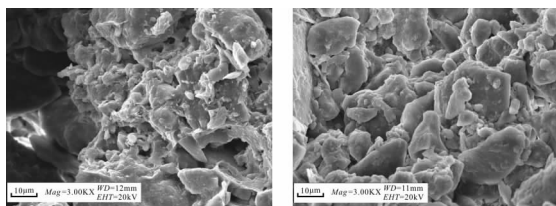


图 4 冻融循环过程中土样内部微观形态

4 干密度对盐 - 冻胀的影响分析

4.1 累计盐 - 冻胀率变化规律分析

图 5 为含水率分组下不同干密度的盐 - 冻胀累计曲线,可以看出当干密度控制在 1.60 g/cm³ 时,无论含水率如何变化,其盐 - 冻胀率始终大于其余两组,表现出了在某一干密度下盐 - 冻胀率增大的特殊性。可以初步认为,在设定试验密度下证明了罗布泊亚硫酸盐渍土存在某一最易发生盐 - 冻胀的初始干密度。

如图 5 所示,干密度 1.50、1.70 g/cm³ 两组的累计盐 - 冻胀率在含水率为 10% 和 13% 时近似相同,差值为 0.1% 左右;当含水率上升至 16% 和 19% 时,干密度 1.50 g/cm³ 的工况表现出盐 - 冻胀率增长速度加快,说明当干密度较低时,含水率大幅增加对盐 - 冻胀的增强作用显著,相对地在土体密实情况下,含水率的增加对盐 - 冻胀作用并无显著影响。

4.2 各周期盐 - 冻胀率变化规律分析

图 6 为含水率分组下不同干密度的各冻融周期的盐 - 冻胀率曲线。

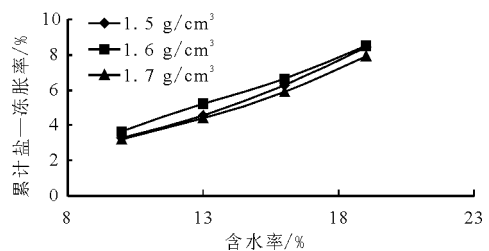


图 5 含水率分组下不同干密度的盐 - 冻胀累计曲线

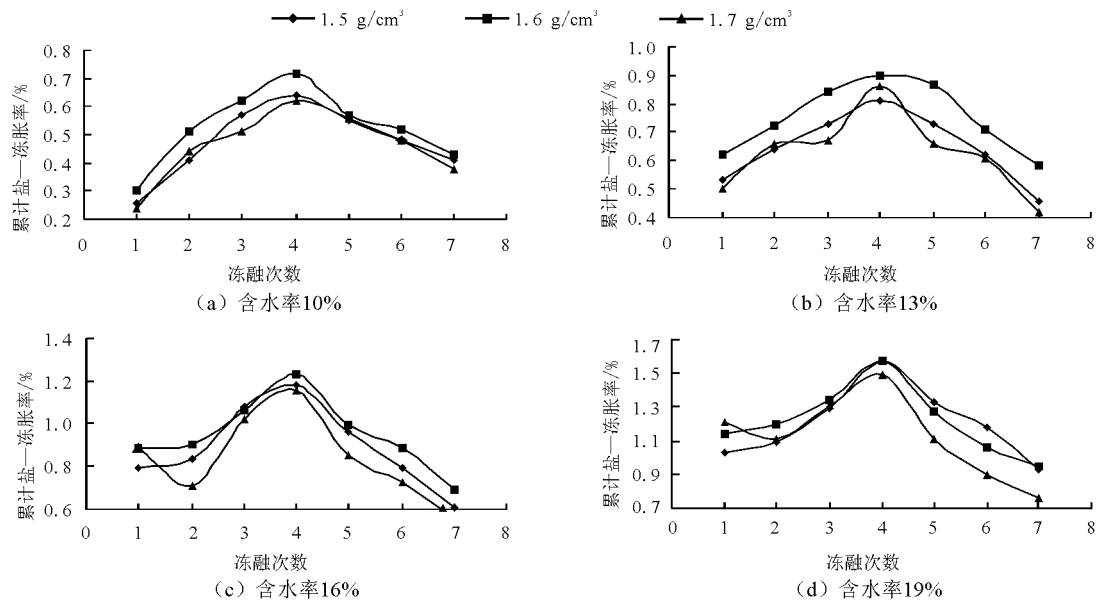


图6 含水率分组下不同干密度的各冻融周期盐-冻胀曲线

图6中的各曲线表现出不同程度的交叉关系,且曲线贴合较为紧密,说明相比含水率,干密度的变化对亚硫酸盐渍土的盐-冻胀率影响相对较小,且含水率分组下当土体达到最大干密度 1.7 g/cm^3 时,各冻融周期盐-冻胀曲线的波动幅度和频率都有较大提升。这是由于土体密实度增加,盐-冻胀作用在改变土体的孔隙、结构时所需的能量增加,各周期的盐-冻胀率表现出波动性的变化。

如图6所示,在第2次冻融循环周期时盐-冻胀率增长速度整体减缓,而在第3、第4冻融循环周期时,盐-冻胀率又呈现较大的增长速度。分析原因,首先第3、4周期时盐-冻胀率大幅提高,说明盐溶液浓度在前四周期是充足的;其次虽然第2周期时盐-冻胀率增长速度减缓,但总体仍保持上升的趋势,因此可以认为在第1、第2周期时土体盐-冻胀所处环境近似相同,即土体内部结构未发生明显的变化,盐溶液浓度足以维持一个均匀的结晶析出速度。由于第1、2周期的冻融循环作用使土体密度减小、结构性降低,土体抵抗盐-冻胀力的能力削弱,当进入第3、4次冻融循环周期后,盐-冻胀率增长速度大幅提升,土体结构性的损伤是前期盐-冻胀增长速度提升的主要原因。

随含水率的增加,上述第2次冻融循环周期时盐-冻胀率的增长速度降低的规律表现越明显。含水率较高时,土体中的自由水较多且以液相存在的易溶盐含量增多,在第1次冻融周期时盐-冻胀作用已较明显(初期盐-冻胀率较大),故初期土体结构性的损伤较严重,大孔隙相继出现。当进入第2

次冻融循环周期时,土中的大孔隙容纳了一部分重生成的冰晶体与析出的盐晶体,导致盐-冻胀增长速度减缓,且随含水率的增大而表现愈明显。

5 结论与展望

(1)亚硫酸盐渍土各周期的盐-冻胀率为先增后减的二次函数形状。在持续的析出作用下土体内部结构达到一定的临界点,大孔隙被部分填充,形成了不利于盐-冻胀发展的内部环境,表现为在第4次冻融周期后各周期盐-冻胀率开始降低。

(2)前4周期盐-冻胀率的增长呈先减速后加速趋势,且随含水率的增大表现明显,土体结构性损伤是前期盐-冻胀速率提升的主要原因。随土体干密度的增加,盐-冻胀作用在改变土体的孔隙和结构时所需的能量增加,各周期的盐-冻胀率表现为波动性的变化,表明亚硫酸盐渍土各冻融周期的盐-冻胀率与各周期土体所呈现的结构状态有密切关系。

(3)含水率与干密度对盐-冻胀的影响是相互促进、相互制约的过程:随含水率的增大,盐-冻胀对干密度的敏感性增强;相应地干密度决定了土体结构性,在特定干密度下含水率对盐-冻胀的影响效果也会发生变化。故在后续天然盐渍土的试验研究中,各因素之间的交叉耦合作用还有待进一步拓展。

参考文献:

- [1] 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993.

(下转第231页)

- [2] 陈有亮,代明星,索晓航,等. 酸性与高温环境下花岗岩力学性能试验研究[J]. 力学季刊,2013,34(1):49-53.
- [3] CHEN Youliang, WANG Suran, NI Jing, et al. An experimental study of the mechanical properties of granite after high temperature exposure based on mineral characteristics [J]. *Engineering Geology*, 2017,220:234-242.
- [4] 王伟,刘桃根,李雪浩,等. 化学腐蚀下花岗岩三轴压缩力学特性试验[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015,46(10):3801-3807.
- [5] 丁梧秀,冯夏庭. 渗透环境下化学腐蚀裂隙岩石破坏过程的 CT 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(9):1865-1873.
- [6] 丁梧秀,陈建平,徐桃,等. 化学溶液侵蚀下灰岩的力学及化学溶解特性研究[J]. 岩土力学,2015,36(7):1825-1830.
- [7] 丁梧秀,徐桃,王鸿毅,等. 水化学溶液及冻融耦合作用下灰岩力学特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2015,34(5):979-985.
- [8] 丁梧秀,冯夏庭. 化学腐蚀下裂隙岩石的损伤效应及断裂准则研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(6):899-904.
- [9] 杨金保,冯夏庭,潘鹏志,等. 三轴压应力-化学溶液渗透作用下单裂隙花岗岩裂隙开度演化[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(9):1869-1878.
- [10] 岳汉威,马振珠,包亦望. 酸腐蚀作用对岩石的接触变形和损伤的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版),2011,42(5):1282-1289.
- [11] TAKARLI M, PRINCE W, SIDDIQUE R. Damage in granite under heating & cooling cycles and water freeze-thaw condition[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008,45(7):1164-1175.
- [12] 韩铁林,师俊平,陈蕴生. 砂岩在化学腐蚀和冻融循环共同作用下力学特征劣化的试验研究[J]. 水利学报,2016,47(5):644-655.
- [13] 刘建,李鹏,乔丽萍,等. 砂岩蠕变特性的水物理化学作用效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(12):2540-2550.
- [14] 李鹏,刘建,李国和,等. 水化学作用对砂岩抗剪强度特性影响效应研究[J]. 岩土力学,2011,32(2):380-386.
- [15] 许江,吴慧,程立朝,等. 酸性条件下砂岩剪切破坏特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(S2):3897-3903.

(上接第 224 页)

- [2] BLASER H D, SCHERER O J. Simultaneous transport of solutes and water under transient unsaturated flow conditions[J]. *Water Resources Research*, 1973,9(4):975-986.
- [3] NIXON J F, LEM G. Creep and strength testing of frozen saline fine grained soils[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1984,21(3):518-529.
- [4] 石兆旭,李斌,金应春. 硫酸盐渍土膨胀规律及影响因素的试验分析[J]. 西安公路学院学报,1994,14(2):15-21.
- [5] 邓友生,周成林. 硫酸钠溶液的盐胀与冻胀[J]. 冰川冻土,2009,31(5):920-924.
- [6] 高江平,吴家惠,杨荣尚. 硫酸盐渍土盐胀特性各影响因素间交互作用规律的分析[J]. 中国公路学报,1997,10(1):10-15.
- [7] 牛玺荣,高江平. 综合考虑盐胀和冻胀时硫酸盐渍土体积变化关系式的建立[J]. 岩土工程学报,2015,37(4):755-760.
- [8] 文桃,米海珍,马连生,等. 硫酸钠盐渍土击实特性与压实度评价试验研究[J]. 岩土力学,2016,36(12):3455-3462+3471.
- [9] 万旭升,赖远明. 硫酸钠溶液和硫酸钠盐渍土的冻结温度及盐晶析出试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(11):2090-2096.
- [10] 王宁,王清,霍珍生,等. 盐分与压实度对盐渍土起始冻胀含水率的影响[J]. 工程地质学报,2016,24(5):951-958.
- [11] 王海涛,张远芳,成峰,等. 冻融循环作用下盐渍土抗剪强度变化规律研究[J]. 地下空间与工程学报,2016,12(5):1271-1276.
- [12] 石群,张远芳,李炎,等. 罗布泊天然盐渍土冻融循环条件下水盐迁移规律[J]. 工程勘察,2016,44(4):1-4+10.
- [13] 包卫星,李志农. 喀什地区不同盐渍土冻融变形特性试验[J]. 长安大学学报(自然科学版),2008,28(2):26-30.
- [14] 包卫星,杨晓华,谢永利. 天然盐渍土冻融循环时水盐迁移规律及强度变化试验研究[J]. 工程地质学报,2006,14(3):380-385.
- [15] 中华人民共和国交通部公路科学研究院. JTG E40-2007 公路土工试验规程[S]. 北京:人民交通出版社,2007.
- [16] 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.