文章编号:1674-2974(2025)09-0048-11 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025086

砾质硫酸盐渍土道基水盐迁移及变形特征

张莎莎[1,2†],钱宇[1,2],王利鑫[1],赵凯旋[1],赵彦虎[1]
(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064;
2. 西安市绿色智慧交通岩土工程重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:针对干旱-季节性冻土地区砾质硫酸盐渍土作为高填方道基填料的适用性问题,通过不同工况下的恒温试验和冻融循环试验,深入分析了含盐量、含水率、细粒土含量等因素对砾质硫酸盐渍土填料的水盐迁移和变形特性的影响规律.试验结果表明:含盐量(0.5%~0.9%)、含水率(3.07%~5.07%)和细粒土含量(0.3%~5%)的增加,对砾质硫酸盐渍土冻结温度的影响幅度分别为61.9%、20.9%和4.96%,试验土样的冻结温度范围为-1.15~-0.67 ℃;当试样的级配相同时,随着易溶盐含量的增加,冻结温度逐渐降低,可促进试样中水盐向冷端迁移;当试样的含盐量相同时,细粒土含量从0.3%增至5%,最大变形量提高了62.8%;细粒土含量和含盐量的增加,能促进砾质硫酸盐渍土由沉降变形转向隆起变形;3%细粒土含量试样的总变形量较小,水盐分布近似初始值,相对稳定,建议该地区砾质硫酸盐渍土高填路堤填料应控制细粒土含量不大于3%.

关键词:路堤;砾质混合土料;细粒土;水盐迁移;盐-冻胀变形
中图分类号:TU443 **文献标志码**:A

Water and Salt Migration and Deformation Characteristics of Gravelly Sulfate-saline Soil Embankment

ZHANG Shasha[1,2†], QIAN Yu[1,2], WANG Lixin[1], ZHAO Kaixuan[1], ZHAO Yanhu[1]
(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. Xi'an Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Green and Intelligent Transport, Xi'an 710064, China)

Abstract: To evaluate the suitability of gravelly sulfate soil as high embankment fill in arid regions with seasonally frozen ground, this study systematically investigated the effects of salt content, moisture content, and fine soil content on the water-salt migration and deformation characteristics of the gravelly sulfate soil through constant-temperature tests and freeze-thaw cycle tests under various conditions. The test results indicate that the increases in salt content (0.5%~0.9%), moisture content (3.07%~5.07%), and fine soil content (0.3%~5%) led to reductions in the soil's freezing temperature by 61.9%, 20.9%, and 4.96%, respectively. The freezing temperatures of the tested soil samples ranged from -1.15 to -0.67 ℃. With the increase of soluble salt content, the freezing temperature gradually decreased, which could promote the migration of water and salt to the cold end. When the salt

* **收稿日期**:2024-08-23
基金项目:国家自然科学基金资助项目(42101126), National Natural Science Foundation of China(42101126);西藏自治区科技计划资助项目(XZ202402ZD0003-02), Science and Technology Projects of Xizang Autonomous Region (XZ202402ZD0003-02)
作者简介:张莎莎(1982—),女,山西运城人,长安大学副教授,博士
† 通信联系人,E-mail: zss_lx@126.com

content of the sample was the same, increasing the fine soil content from 0.3% to 5% resulted in a 62.8% increase in maximum deformation. Higher fine soil content and salt content were found to facilitate a shift in deformation behavior from settlement to heave. The total deformation of the sample with 3% fine soil content was small, and the distribution of water and salt was close to the initial value, indicating relatively stable. It is suggested that the fine soil content controlled by the gravel sulfate soil high fill embankment in this area should not exceed 3%.

Key words: embankments; gravel mixture fill; fine soil; water and salt migration; salt-frost heaving deformation

在我国，硫酸盐渍土主要分布在西北干旱和半干旱地区，如新疆、甘肃等地，给当地的基础设施建设带来了重大挑战. 经检测，西北某机场改扩建工程待使用填料为砾质硫酸盐渍土，该项目填方量大，且填方高度远超利用盐渍土作为道基填料的既有工程. 现有研究表明[1]，气温降低时盐渍土道基可能出现盐胀破坏，进而导致道面鼓包甚至胀裂；升温时道基支撑作用减弱，道面容易产生泥泞、松软甚至塌陷等病害. 因此，研究盐渍土的工程特性，对合理预测道基结构的长期性能具有重大的现实意义.

盐渍土的盐-冻胀特性及其影响因素通常是学者们研究的重点. 盐渍土作为季节性冻土地区（季冻区）路基填料时，其盐胀率与多种因素密切相关. 高江平等[2]推导了盐胀率的计算公式，阐明了盐胀率与各影响因素（含水量、氯化钠含量、硫酸钠含量、初始干容重、上覆荷载）之间均呈二次抛物线关系，并提出了“盐胀台原”的概念. 张莎莎等[3]通过单因素和多因素交互作用试验，量化了硫酸盐、荷载、含水率以及它们之间的交互作用对盐胀率的影响权重.

除上述因素外，降温速率对硫酸盐渍土的盐胀变形也有显著影响，尤其是在温度敏感区间内，较慢的降温速率可以促进盐胀，且盐胀主要发生在冻结温度以上. 降温速率会影响硫酸钠晶体的析出，进而影响溶液的冻结温度[4]. 土质也是影响硫酸盐渍土冻结温度的关键因素[5]. 盐渍土变形与水盐迁移的理论研究集中于多场耦合下数值模型的建立，因此有学者基于室内降温试验，建立了水-热-盐相互作用计算模型，预测了硫酸钠盐渍土在降温过程中的多因素变化[6]. 这些研究为理解和预测盐渍土在低温条件下的盐胀行为提供了重要依据.

在季冻区，盐渍土内部的物理场相互作用、相互影响，结构及力学效应的变化往往造成路基结构损伤破坏. 国内外很多学者通过现场监测、室内外试验和数值分析等多种方法探究盐渍土盐-冻胀特性对路基变形的影响[7-11]. 李国玉等[12]发现，高含盐量的路基土变形主要由盐胀引起，而低含盐量的路基土变形主要由冻胀和融沉引起，可能存在盐胀. 冉武平等[13]通过室内动三轴试验明确了粗粒硫酸盐渍土路基受荷载、湿度及盐分影响下的动回弹特性.

尽管国内外学者针对盐渍土已经取得了一系列成果，但具体到干旱-季冻区工况，针对砾质硫酸盐渍土的研究相对较少，而含盐砾质混合料在西北地区又是一类不能忽略的道基填料. 在干旱-季冻区，机场道基的稳定性受到极端气候的影响，且项目填方高度达25~30 m，因此分析砾质硫酸盐渍土作为高填方道基填料的适用性对整个工程十分关键. 通过室内模拟试验（恒温试验和冻融循环试验），模拟实际工程所处的平均低温，根据工程实际将颗粒级配、含盐量、含水率设为研究变量，揭示不同工况下砾质硫酸盐渍土的水盐迁移规律和变形特征，探讨冻结温度、水盐迁移与盐-冻胀变形行为之间的关系. 通过一系列深入研究，为类似工况下的道基设计和维护提供基础数据.

1　试验方案

1.1　试验土样

试验土样为西北某机场改扩建项目的含硫酸盐砾质混合料，根据料场调研报告，现场填料硫酸盐含量（全文含量均为质量分数）为0.22%~0.57%，细粒土含量为0.74%~1.43%. 为明确试验土样的基本工程性质，根据《土的工程分类标准》（GB/T 50145—2007）[14]进行了颗粒分析试验，得到土样的不均匀系数C_u>5，曲率系数C_c介于1~3之间，试验结果如表1所示. 该土样天然级配下大于2 mm粒径的含量达

86.9%,大于砂粒组含量,为砾类土.根据《民用机场高填方工程技术规范》(MH/T 5035—2017)[15],判定该土样为砾质混合料.此外,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)[16]开展了比重试验、标准击实试验及硫酸盐测定试验,测得试验土样比重为2.72,最大干密度为2.2 g/cm³,最优含水率为5.07%.土样中硫酸盐总量为0.38%,试验土样与现场填料的离子含量和细粒土含量对比如表2所示.

表1 天然土样级配

Tab.1 Grading of natural soil samples

粒径/mm	[0,0.075)	[0.075,2)	[2,10)	[10,20)	[20,60)	[60,+∞)
通过率/%	0.3	12.8	38.6	25.5	18.4	4.4

表2 试验土样与现场填料硫酸盐与细粒土含量对比

Tab.2 Comparison of sulfate content and fine grained soil content between test soil sample and field filler

类别		各离子含量/%					硫酸盐总含量/%	细粒土含量/%
		SO_4^{2-}	Cl^-	HCO_3^-	Ca^{2+}	Na^++K^+		
现场填料	min	0.05	0.01	0.01	0.02	0.03	0.22	0.74
	max	0.18	0.06	0.06	0.06	0.06	0.57	1.43
试验土样		0.12	0.06	0.05	0.04	0.06	0.38	0.93

1.2 试验方案及仪器设计

根据料场调研报告可知,填料细粒土含量均小于1.5%,但是鉴于施工过程中可能出现级配差异化,本次试验在天然级配的基础上,结合已有研究成果[17],逐步增加细粒土含量至3%与5%,设置三种试验级配以充分考虑工程最不利情况.三种土样的级配曲线如图1所示.

由于项目当地秋季降雨较少,且当地标准冻结深度在1.4 m左右,3.0~3.2 m以下为恒温层,砾质土填料透水性好,故根据最优含水率为5.07%,设置了三种不同的含水率水平(3.07%、4.07%、5.07%).添加细粒土后,试样的最优含水率随颗粒级配相应改变为5.17%和5.24%.此外,依据现场填料试验报告,试验土样含盐量设置为0.5%、0.7%、0.9%,使试验结果更加具有参考性.为明确硫酸盐对试验结果的影响,添加盐分均为单一硫酸盐.针对不同级配特征和含盐量的试样,设计恒温试验7种工况,冻融循环试验9种工况,具体试验方案设计如表3所示.根据《民用机场高填方工程技术规范》(MH/T 5035—2017)[15]及《民用机场岩土工程设计规范》(MH/T 5027—2013)[18],本次试验统一采用固体体积率≥86%的压实标准.

通过恒温试验研究级配、含盐量、含水率对砾质硫酸盐渍土冻结温度的影响,并分析盐-冻胀率随温度的变化规律.在此基础上,开展冻融循环试验,以探明不同工况下道基填料的水盐迁移规律及变形特征.

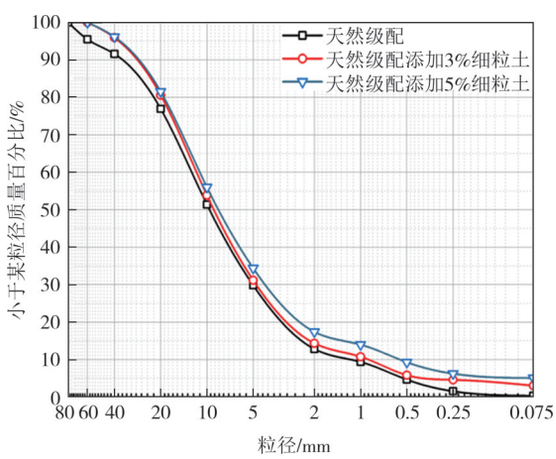


图1 三种试验土样的级配曲线

Fig.1 Grading curves of three test soil samples

1.2.1 恒温试验方案

根据近二十年的气象数据,该机场所在地区冬季的平均低温为-16~-8 ℃,考虑机场道路结构的复杂性,特别是水泥混凝土面层和沥青隔离层等结构会对填料与外界的热交换产生一定程度的阻碍.因此,设定温度变化范围为-10~25 ℃.这个范围既考虑了当地的气候条件,也涵盖了砾质硫酸盐渍土产生大部分盐胀变形的温度区间[3].此外,为保证试验结果的准确性和可靠性,设置降温速率为5 ℃/120 min,降到最低温度后维持20 h,待变形充分稳定.温度变化曲线见图2.试验过程中严格控制温度和湿度,并密切关注填料的内部温度和变形.

1.2.2 冻融循环试验方案

冻融循环考虑到现场实际环境和砾质硫酸盐渍

表 3　试验方案设计

Tab.3　Design of the experimental scheme

编号	级配	含水率 ω/%	含盐量 s/%
恒温试验 U1	天然级配	5.07	0.5
恒温试验 U2	天然级配	5.07	0.7
恒温试验 U3	天然级配	5.07	0.9
恒温试验 U4	天然级配	3.07	0.5
恒温试验 U5	天然级配	4.07	0.5
恒温试验 U6	添加 3% 细粒土	5.17	0.5
恒温试验 U7	添加 5% 细粒土	5.24	0.5
冻融循环 C1	天然级配	5.07	0.5
冻融循环 C2	天然级配	5.07	0.7
冻融循环 C3	天然级配	5.07	0.9
冻融循环 C4	添加 3% 细粒土	5.17	0.5
冻融循环 C5	添加 3% 细粒土	5.17	0.7
冻融循环 C6	添加 3% 细粒土	5.17	0.9
冻融循环 C7	添加 5% 细粒土	5.24	0.5
冻融循环 C8	添加 5% 细粒土	5.24	0.7
冻融循环 C9	添加 5% 细粒土	5.24	0.9

土填料特性,设定试验温度范围为-10~25 ℃. 为模拟现场实际气温变化过程,并与恒温试验保持一致,设置降温速率为 5 ℃/120 min. 根据以往对粗粒土力学性质与冻融循环次数的研究成果[7-8],每组试验设计 6 个循环过程,每个循环包括 48 h 的降温阶段和 48 h 的升温阶段,整个试验过程历时 576 h. 温度变化曲线见图 2.

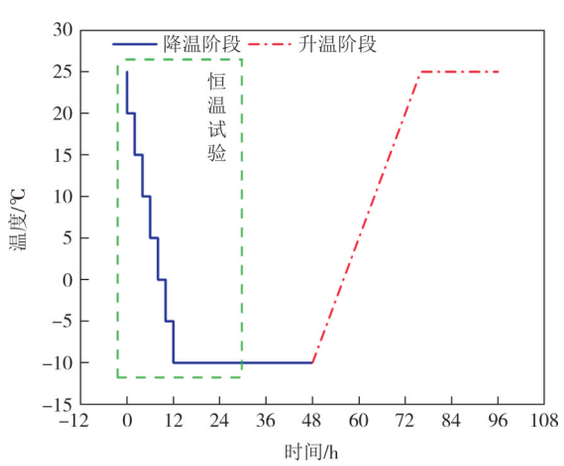


图 2　恒温试验及冻融循环试验温度变化曲线

Fig.2　Temperature change curve of constant temperature test and freeze-thaw cycle test

1.2.3　试验仪器设计

恒温试验利用自主设计的试验设备,由两台 DC-3015 型低温恒温槽和一台恒温试验箱组成. 钢制试筒内径为 280 mm,高为 230 mm,壁厚为 10 mm. 试验装置具体结构可参考文献[17,19].

冻融循环试验装置由 DC-3015 型低温恒温槽(有效工作温度范围:-30 ~ 100 ℃,控温精度:±0.05 ℃)、有机玻璃试筒(在筒壁高度分别为 100、300、500、600、700、750 mm 处开孔以便埋置传感器)、MTD-15 型土壤水分-温度-电导率传感器(工作环境范围:-40 ~ 60 ℃,体积含水量测量精度:±1%FS(full scale),温度测量精度:±0.001 ℃,体积电导率测量精度:25 μS/cm)、PT-100 型温度传感器(测量精度:±0.01 ℃)、高精度 KPZ-20 自复位式直线位移计(电压信号精度:±0.01 V,实测位移精度:±0.004 mm)及 CR1000 测量与控制数据采集器[模拟电压精度:±(测量值的 0.06%+偏移量)]组成. 土样高 800 mm,直径 300 mm. 冻融循环试验装置结构如图 3 所示.

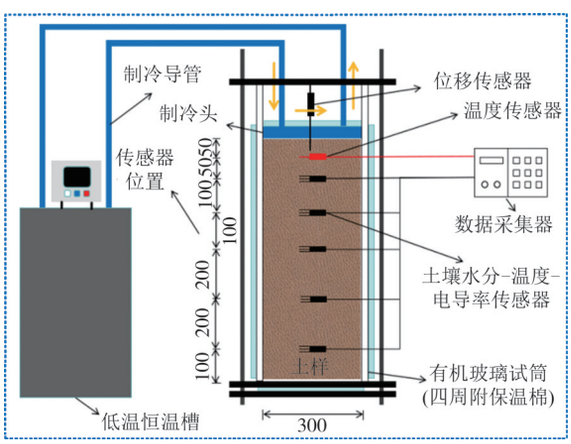


图 3　冻融循环试验装置示意图(单位:mm)

Fig.3　Schematic diagram of freeze-thaw cycle test device (unit:mm)

2　试验结果分析

2.1　恒温试验结果分析

试样冻结温度和不同工况下盐-冻胀率随温度变化的规律分别如图 4、图 5 所示.

从图 4 可知,在试验设计区间内,不同因素下含硫酸盐砾质混合料土样的冻结温度为 -1.15 ~ -0.67 ℃. 由冻结温度变化曲线可知,随硫酸盐含量增加,冻结温度出现了显著的下降趋势. 当含盐量由 0.5% 提升至 0.9% 时,冻结温度由 -0.71℃降至 -1.15℃,降幅达到 61.9%. 一方面,硫酸盐的加入降低了水的化学势,增加了水分的冻结难度[20];另一方面,随着溶液浓度的上升,部分硫酸盐结晶析出,释

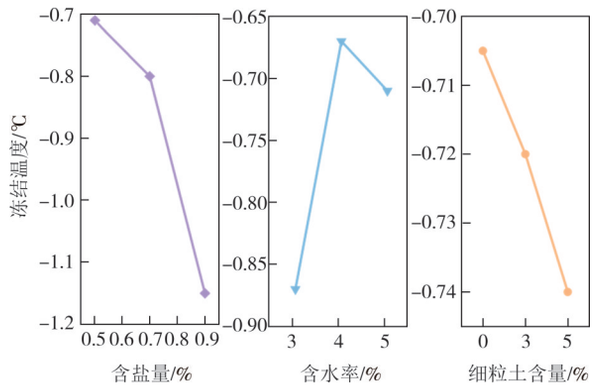


图4 冻结温度随含盐量、含水率、细粒土含量变化曲线

Fig.4 Freezing temperature changes with salt content, water content and fine soil content

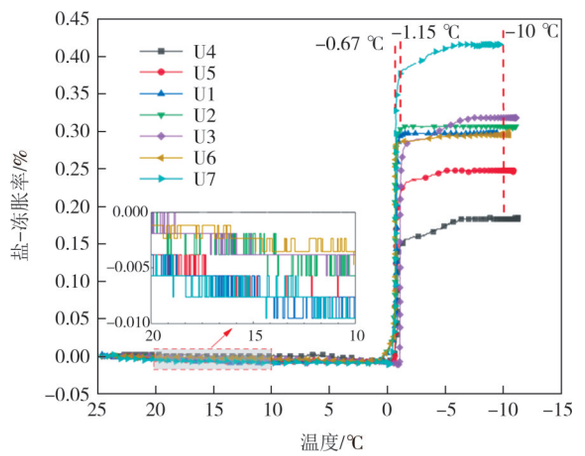


图5 不同工况下盐-冻胀率随温度变化曲线

Fig.5 Temperature variation curve of salt frost heave rate under different working conditions

放热量的同时,提升了溶液的过冷能力[21]. 当含水率从3.07%提升至5.07%时,冻结温度先升高后略微降低,影响幅度最大达到20.9%. 这一现象归因于孔隙溶液浓度和未冻水含量的变化[22]. 当含水率增加时,水分不能完全被盐分影响,冻结温度会有所上升. 此外,水分相变时释放的热量也会影响冻结过程[23].

细粒土含量对冻结温度亦有一定影响. 结果表明:当细粒土含量从0.3%增至5%时,冻结温度从−0.705 ℃略微降低至−0.740 ℃,降幅为4.96%. 细粒土的增加提高了比表面积,土颗粒对孔隙水的吸附作用阻碍了冻结过程[24]. 同时,细粒土还能够通过影响孔隙水的分布来影响冻结温度[25].

由图5可知,当温度在0 ℃以上时,所有工况均未发生宏观上的上拱变形,相反,土样呈现不同程度的“体缩”现象. 因为在温度势作用下,土样内的盐溶液经历相变结晶过程,破坏了土体的原始结构,进而影响了土颗粒的排列状态. 在温度低于0 ℃后,U3、U4两种工况盐-冻胀率较早达到稳定,而其余5种工况的土样依然会产生不同程度的变形,这可能是因为天然级配土样中大孔隙的占比较高,其可以吸收盐分结晶,降低土样对环境温度变化的敏感性,而细粒土含量的增加导致土的孔隙体积减小,容纳盐分结晶的能力降低,盐分结晶更容易达到引起宏观变形的程度.

根据7种工况下最大盐-冻胀率结果,天然级配土样在较低含水率(3.07%和4.07%)下的盐-冻胀率较低,分别为0.18%和0.24%. 随着含水率的增加,盐-冻胀率逐渐增大,这符合水分增多导致盐-冻胀效应增强的规律. 添加3%细粒土后,土中孔隙得到填充,并且细粒土还能够胶结粗颗粒,增加土骨架的结构强度,从而提高土体对变形的抵抗力,盐-冻胀率略微降低. 当提升细粒土含量至5%时,盐-冻胀率大大提高,相较于天然级配(U3)提升了约50%. 在天然级配土样中,随着含盐量的增加(U1~U3),盐-冻胀率呈现上升趋势. 当含盐量处于0.5%~0.9%水平时,盐分的增加导致未冻水含量增加,土中的水分首先被盐胀变形消耗,剩余的水分继续产生冻胀,盐-冻胀率随之提高[26].

2.2 冻融循环试验结果分析

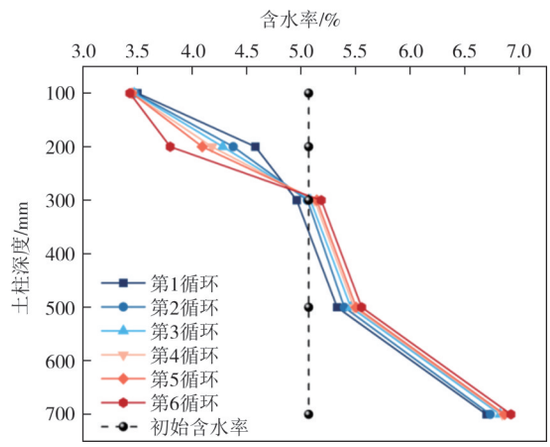
2.2.1 水盐迁移结果及其驱动机制分析

根据传感器数据,含盐量为0.9%的三种工况(C3、C6、C9)下土样各深度处含水率、含盐量在不同循环中的分布曲线分别如图6、图7所示.

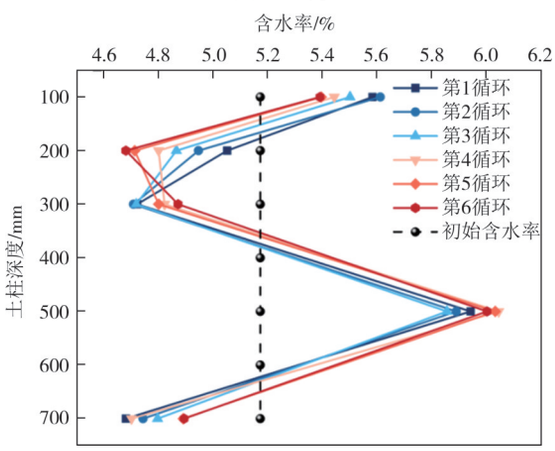
根据图6、图7得出,当含盐量为0.9%时,天然级配砾质硫酸盐渍土试样的含水率总体呈“上少下多”的规律分布,这表明水分从上向下迁移,在天然级配条件下,重力势的影响较显著. 盐分分布亦始终保持“上少下多”的规律,未见明显变化,与含水率的分布特征基本一致.

相较于天然级配土样,添加3%细粒土的土样,水分向冷端迁移的现象变得更为显著. 盐分表现出“上多下少”的分布规律,在100 mm和200 mm深度处的含盐量高于初始值. 当添加5%细粒土后,土样中水分的聚集更为明显,呈现“上下多,中间少”的分布规律,盐分向冷端迁移也更加显著,尤其是在0、100、400、700 mm深度处,含盐量均高于初始值,这种分布情况较为特殊.

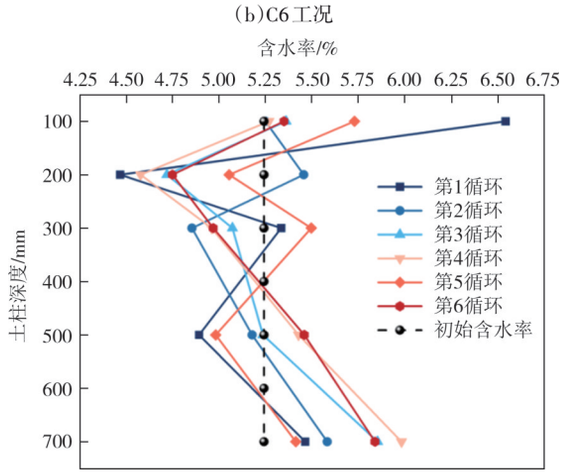
由此可见,在冻融循环试验中,含盐量为0.9%的土样,其盐分迁移与水分迁移规律总体一致;随着



(a)C3 工况



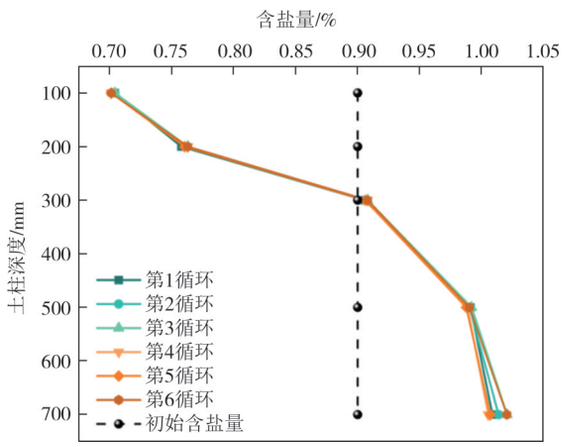
(b)C6 工况



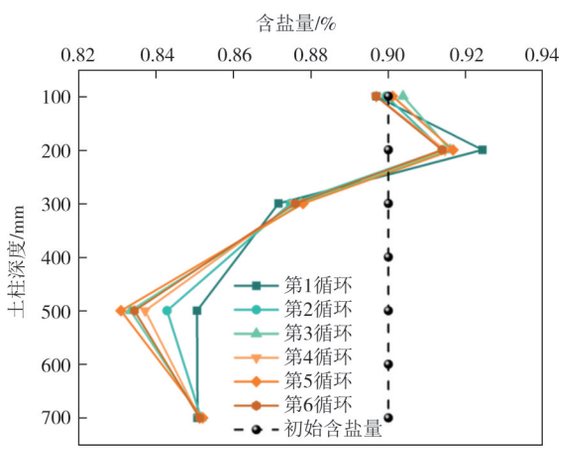
(c)C9 工况

图 6　含盐量为 0.9% 时三种工况下含水率分布曲线

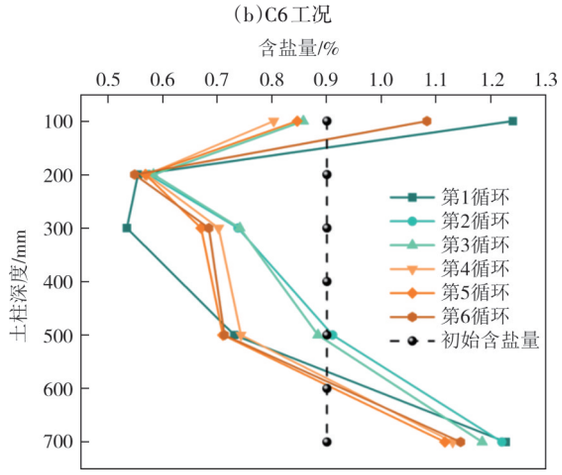
Fig.6　Water content distribution curves under three working conditions with a salt content of 0.9%



(a)C3 工况



(b)C6 工况



(c)C9 工况

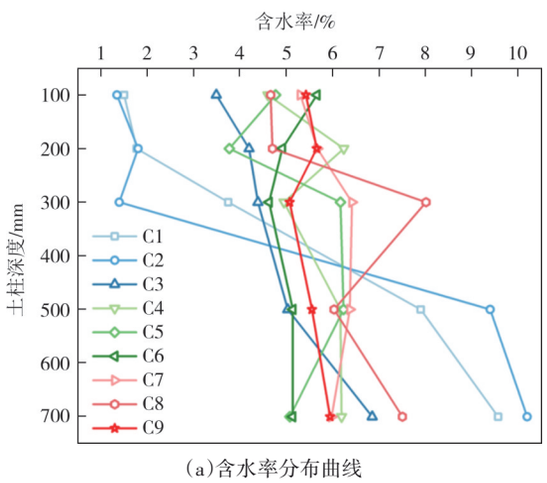
图 7　含盐量为 0.9% 时三种工况下含盐量分布曲线

Fig.7　Salt content distribution curves under three working conditions with a salt content of 0.9%

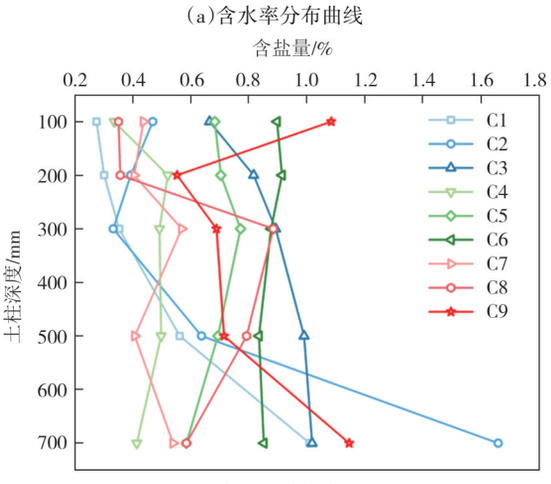
细粒土含量的增加,水分向冷端迁移积聚逐渐明显,盐分亦表现出近似的特点. 当细粒土含量较少时,土样中的液态水在温度梯度作用下以气态水的形式向冷端迁移,并在冷端重新凝结为液态,极少含量的细粒土无法形成足够的基质吸力,在重力作用下,液态水带着溶解在其中的硫酸盐向下迁移. 不过在此过程中仍会有水蒸气穿过孔隙向上迁移,在冷端形成冰晶[27]. 当细粒土含量增大时,土体的基质吸力增大,液态水可以留存在细粒土中,在靠近冷端区域,重力势作用相对减弱,温度梯度和基质吸力作用相对较强,水盐向冷端的迁移程度增大;在远离冷端区域,温度梯度作用弱于重力势作用,水盐向下迁移.

因此,细粒土含量为5%的土样水盐分布呈现“上下多,中间少”的分布规律.

冻融循环试验结束后,采用规范法和烘干法测定指定土柱深度处的含盐量与含水率,9种工况下最终实测含水率、含盐量分布如图8所示.



(a)含水率分布曲线



(b)含盐量分布曲线

图8 9种工况最终实测含水率、含盐量分布

Fig.8 Distribution of final measured water content and salt content in nine working conditions

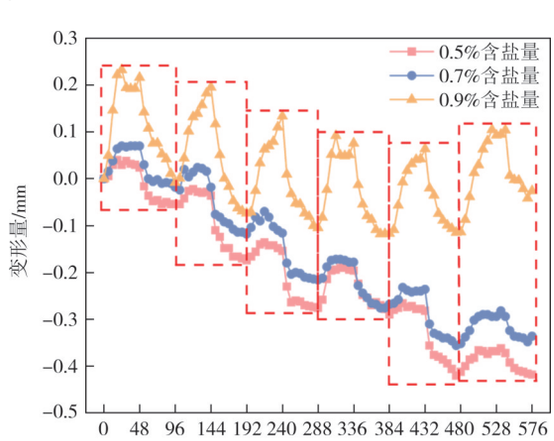
图8反映出,9种工况下土样的水分迁移趋势大致相同,最终形成“上少下多”的分布趋势.此外,添加5%细粒土工况的水分迁移模式比天然级配工况更为复杂,“上下少,中间多”或“上下多,中间少”的情况均有出现.盐分迁移模式与水分迁移模式虽有差异,但是具有关联性.在较低含盐量(0.5%和0.7%)下,二者相似,均呈现出“上少下多”的分布.当含盐量提升至0.9%时,盐分迁移模式出现了变化,特别是,在细粒土含量为3%的工况下,盐分最终在各深度处的分布较为均匀,接近初始含盐量.总体来看,随着含盐量与细粒土含量的增加,水分和盐分的迁移规模和高度均有所增加.

细粒土含量和含盐量对水盐迁移特性有显著影响,且不同工况下的水盐迁移规律存在差异.这些差异与土的孔隙结构、毛细作用、基质吸力以及冻融循环过程中的温度变化等因素有关.添加细粒土后,在一定程度上增强了土的毛细作用和基质吸力,从而提升了水分与盐分的迁移能力.当细粒土含量增加到5%时,水盐迁移变得显著且模式更为复杂.在这种工况下,提升含盐量对于水盐迁移高度及迁移规模有明显的促进作用.含盐量的增加促进了盐分的迁移,尤其是在土样的上部区域表现得更为明显.细粒土含量的提高增强了水盐的迁移能力,使水盐迁移现象更加显著.

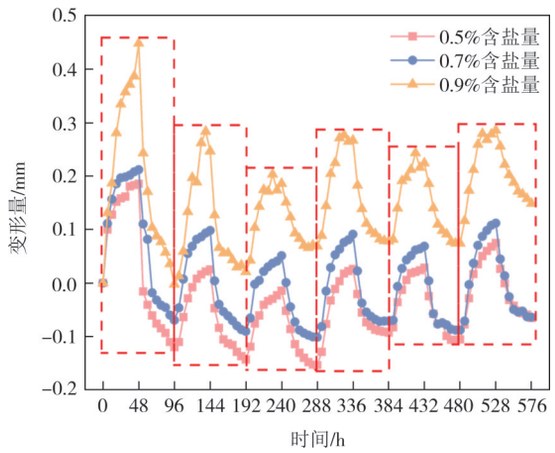
2.2.2 盐-冻胀试验结果分析

9种工况下变形量随时间变化规律和各循环中总变形量的对比分别如图9、图10所示.

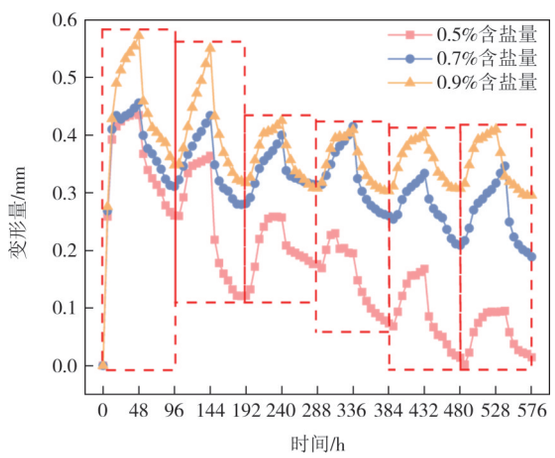
观察图9可知,砾质硫酸盐渍土填料在冻融循环中的变形表现为周期性的“降温隆起,升温沉降”模式.在降温阶段前期,土样隆起变形显著,且变形速率较大;到了降温阶段后期,变形速率大幅减小,部分工况变形直接稳定.升温阶段前期,土样发生急剧的沉降变形;而在升温阶段后期,变形曲线逐渐平缓,变形量趋于稳定.天然级配工况下的土样以沉降变形为主,当含盐量提升至0.9%时,第6循环有较为明显的隆起现象.对于添加了3%细粒土的土样,含盐量较低(0.5%和0.7%)时前期(第1~3循环)总体变形均为沉降变形,后期(第4~6循环)开始出现隆起变形,较高含盐量(0.9%)工况下以隆起变形为主.添加5%细粒土的土样在三种含盐量工况下均为隆起变形.



(a)天然级配



(b)添加3%细粒土



(c)添加5%细粒土

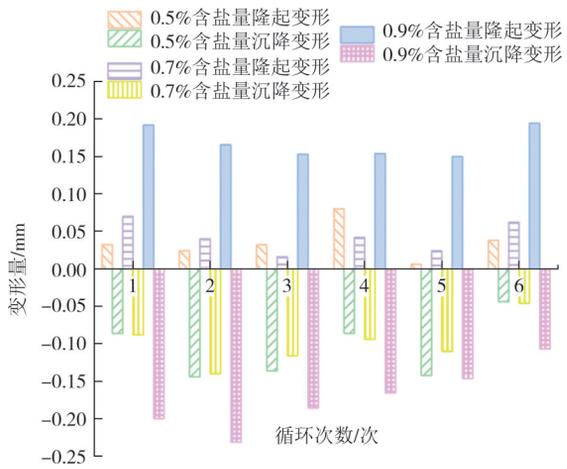
图9　9种工况下变形量随时间变化曲线

Fig.9　Time variation curve of soil deformation under nine working conditions

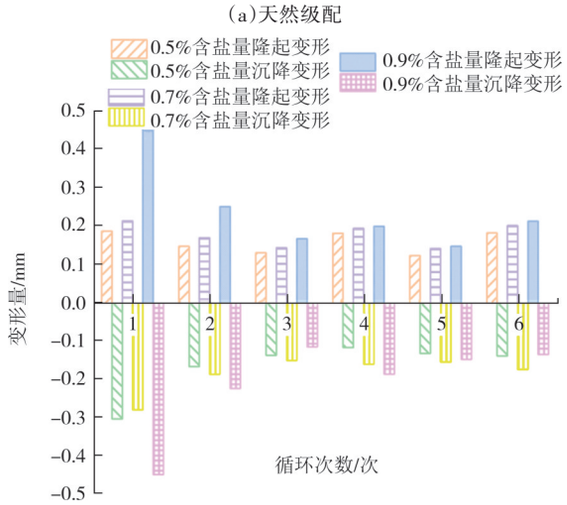
根据图10可知,各工况下盐-冻胀变形和溶陷-融沉变形均随冻融循环次数的增加呈现减小趋势.如添加3%细粒土的土样在0.9%含盐量时,沉降变形的谷值(循环3次)仅为峰值(循环1次)的24.5%;添加5%细粒土的土样在0.9%含盐量工况下,隆起变形的谷值(循环4次)与峰值(循环1次)相比下降了95.4%.这些现象表明,随着循环次数达到第3次或第4次时,变形量逐渐趋于稳定,变形速率也会逐渐减小.

3　讨论

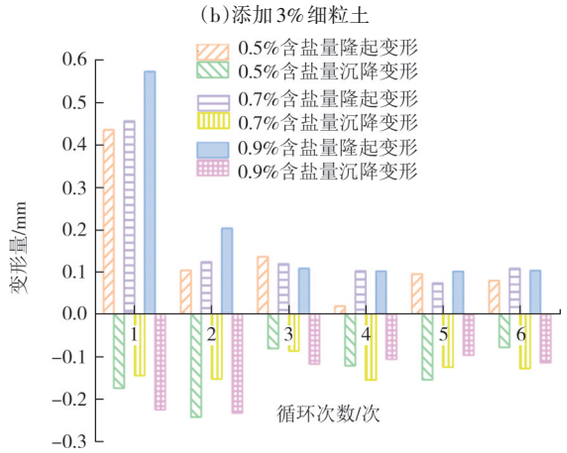
相较于以往研究中的粗粒盐渍土,砾质硫酸盐渍土的颗粒粒径较大且细粒土含量极少,天然级配土样中大于2 mm粒径的粗粒土含量为86.9%,分别添加3%和5%细粒土后,大于2 mm粒径的粗粒土含



(a)天然级配



(b)添加3%细粒土



(c)添加5%细粒土

图10　9种工况下各循环中总变形量对比

Fig.10　Comparison of total soil deformation in each cycle under nine working conditions

量依然分别为85.6%和82.0%,其决定了土试样的大孔隙结构和微弱的基质吸力.

恒温试验中硫酸盐含量的增加,导致土的冻结温度显著下降,与文献[28]中关于盐分晶体对水的化学势影响的研究相吻合.此外,含水率的增加导致

冻结温度先升高后降低,这与孔隙溶液浓度和未冻水含量的变化有关,与文献[20-30]中关于水分、盐分相变及热力学解释的研究结果一致.在试验设定的范围内,在三种因素中细粒土含量对冻结温度的影响相对较小.

冻融循环试验揭示了砾质硫酸盐渍土在不同工况下的水盐迁移与变形行为的关系.砾质硫酸盐渍土孔隙较大,孔隙连通性好,在细粒土含量较低时,水汽迁移较为显著;随着细粒土含量的增大,土样形成足够的基质吸力,液态水的迁移程度增大,从而促进了盐分的有效迁移,导致盐-冻胀率增大.

由冻融循环试验与恒温试验对比可知,冻结温度、水盐迁移、变形量之间存在内在关系.天然级配土样的含盐量分别为0.5%(C1)、0.7%(C2)、0.9%(C3)时,冻结温度分别为-0.71、-0.80、-1.15 ℃,靠近冷端的含水率相对初始值的变化量分别为-70.2%、-73.4%、-31.2%,靠近冷端的含盐量相对初始值的变化量分别为-69.5%、-48%、-26.2%.由于天然级配中细粒土含量仅为0.3%,水盐迁移过程中重力势作用显著,其总体向下迁移,但是从上述变化趋势依然可以看出,冻结温度的降低会增大水盐向冷端的迁移量.由盐-冻胀试验结果(图10和图11,其中最大变形量=最大隆起量-最大沉降量)可知,C2工况6个循环中的最大隆起量比C1工况提高了80%,C2工况6个循环中的最大沉降量比C1工况减小了12.8%,可知随着冻结温度的下降,水盐向冷端迁移量增大,土体隆起变形增大.由C1、C2工况的水盐分布规律比较可知,C3工况中靠近冷端区域的水盐含量相对较大,同时其向下迁移量亦明显减小,即水盐分布与其初始值基本接近,试样总体的水盐迁移量很小,导致其总变形量最小,但是其向上隆起变形已明显大于C1、C2工况.根据图11可知,在含盐量为0.9%的三种工况(C3、C6、C9)中,随着细粒土含量由0.3%增加至5%,最大变形量提高了62.8%.

综合以上分析可知,当细粒土含量增至5%时,水盐迁移变得显著且模式复杂,隆起变形趋势显著增大,相比之下,细粒土含量为3%的土样(C4、C5、C6工况)总变形量较小,水盐分布近似初始值,相对稳定.因此,为了控制水盐迁移和盐胀变形,在级配良好的前提下,建议该地区砾质硫酸盐渍土高填路堤填料应控制细粒土含量不大于3%.

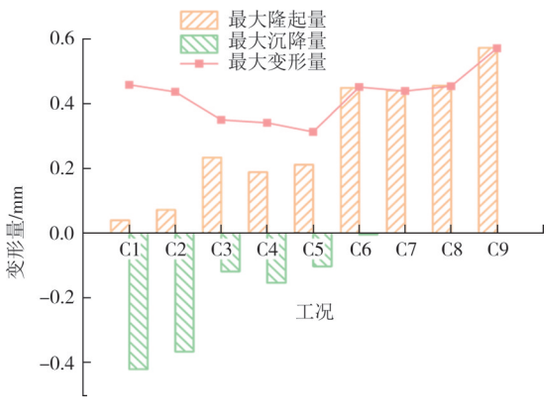


图11 9种工况下最大隆起量、沉降量、变形量汇总图

Fig.11 Summary of maximum uplift, settlement, and deformation of soil under nine working conditions

4 结 论

1)由恒温试验可知,含盐量的提升(0.5%~0.9%)可明显降低砾质硫酸盐渍土的冻结温度,降幅达到61.9%,而相比之下含水率(3.07%~5.07%)和细粒土含量(0.3%~5%)的提升对冻结温度的影响幅度仅为20.9%及4.96%.三因素在试验设定区间内变化时,试样的冻结温度最高为-0.67 ℃,最低为-1.15 ℃.

2)冻融循环试验结果揭示了细粒土含量、含盐量与砾质硫酸盐渍土水盐迁移特性之间的内在关系.当含盐量相同时,细粒土含量的提升,促进了液态水向冷端迁移,进而增强盐分向冷端的迁移程度,且水分迁移的敏感性高于盐分迁移;级配相同时,提升含盐量会增大冷端水盐含量,促进土样的隆起变形.

3)通过对比砾质硫酸盐渍土的恒温试验与冻融循环试验结果可知,当级配相同时,易溶盐含量的增加,可降低土体的冻结温度,从而增大水盐向冷端迁移的程度;当易溶盐含量一致时,随着细粒土含量由0.3%提升至5%,砾质硫酸盐渍土的最大变形量提高了62.8%.

4)由于砾质混合料的颗粒粒径较大,细粒土含量极少,最大含盐量为0.9%时,试验工况下总体变形量均较小,满足道基工程的填筑要求.通过分析不同工况下试样中的水盐迁移模式可知,细粒土含量为3%时,经过6次冻融循环后,水盐分布与初始值近似,总体变形量最小.考虑到高填方路堤在运营过程中存在不可控因素,建议本区域砾质硫酸盐渍土高填路堤填料应控制细粒土含量不大于3%.

参考文献

[1] 牛俊明,谭晓刚,崔玉其. 硫酸盐盐渍土地区机场道面设计浅析[J]. 民航经济与技术,1997(8):24-25.
NIU J M,TAN X G,CUI Y Q. An analysis of the airport surface design in northwest China [J]. Ciuil Aviation Economics & Technology,1997(8):24-25.(in Chinese)

[2] 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.
GAO J P,WU J H,YANG R S. Analysis of the interaction laws of all influeucing factors upon salt heaving properties of the sulphate salty soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 1997, 10(1):10-15.(in Chinese)

[3] 张莎莎,王永威,包卫星,等. 影响粗粒硫酸盐渍土盐胀特性的敏感因素研究[J]. 岩土工程学报, 2017,39(5):946-952.
ZHANG S S,WANG Y W,BAO W X,et al. Sensitive parameters of embankment deformation behavior for coarse-grained sulfate saline soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(5): 946-952.(in Chinese)

[4] 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.
WAN X S,LAI Y M. Experimental study on freezing temperature and salt crystal precipitation of sodium sulphate soulotion and sodium sulphate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2013,35(11):2090-2096.(in Chinese)

[5] WAN X S, LAI Y M, WANG C. Experimental study on the freezing temperatures of saline silty soils [J]. Permafrost and Periglacial Processes,2015,26(2):175-187.

[6] 路建国,万旭升,刘力,等. 降温过程硫酸钠盐渍土水-热-盐相互作用过程[J]. 哈尔滨工业大学学报,2022,54(2):126-134.
LU J G,WAN X S,LIU L,et al. Water-heat-salt interaction of sodium sulfate saline soil during a cooling process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54 (2) : 126-134.(in Chinese)

[7] BRONFENBRENER L. The modelling of the freezing process in fine-grained porous media: application to the frost heave estimation[J]. Cold Regions Science and Technology,2009,56 (2/3):120-134.

[8] 杨晓华,张莎莎,刘伟,等. 粗颗粒盐渍土工程特性研究进展[J]. 交通运输工程学报,2020,20(5):22-40.
YANG X H,ZHANG S S,LIU W,et al. Research progress on engineering properties of coarse-grained saline soil[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2020,20(5):22-40.(in Chinese)

[9] MUHEMAIER R,MAO W,LIU X J,et al. Study on evaluation and prediction model of long-term mechanical properties of fine-grained saline soil subgrade [J]. European Journal of Computational Mechanics,2024,33(5):483-506.

[10] 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.
TAN D S,SUN Y M,HU L X,et al. Salt expansion properties and mechanism of saline soil in Xinjiang section of Lanzhou-Xinjiang railway and preventive measures [J]. Journal of the China Railway Society,2011,33(9):83-88.(in Chinese)

[11] WANG D Y, LIU J K, LI X. Numerical simulation of coupled water and salt transfer in soil and a case study of the expansion of subgrade composed by saline soil [J]. Procedia Engineering, 2016,143:315-322.

[12] 李国玉,喻文兵,马巍,等. 甘肃省公路沿线典型地段含盐量对冻胀盐胀特性影响的试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(8):2276-2280.
LI G Y, YU W B, MA W, et al. Experimental study of characteristics of frost and salt heaves of saline highway foundation soils in seasonally frozen regions in Gansu Province [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2276-2280.(in Chinese)

[13] 冉武平,王金山,李玲,等. 粗粒硫酸盐渍土动态回弹模量试验及预估模型[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2022,49(3):154-166.
RAN W P,WANG J S,LI L,et al. Laboratory test and prediction model of dynamic resilient modulus of coarse-grained sulfate saline soil[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022,49(3):154-166.(in Chinese)

[14] 土的工程分类标准:GB/T 50145—2007[S]. 北京:中国计划出版社,2008.
Standard for engineering classification of soil:GB/T 50145—2007 [S]. Beijing:China Planning Press,2008.(in Chinese)

[15] 民用机场高填方工程技术规范:MH/T 5035—2017[S]. 北京:中国民航出版社,2017.
UAV cloud system interface data specification:MH/T 5035—2017 [S]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2017.(in Chinese)

[16] 土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S]. 北京:中国计划出版社,2019.
Standard for geotechnical testing method:GB/T 50123—2019[S]. Beijing:China Planning Press,2019.(in Chinese)

[17] 王旭超,张莎莎,赵凯旋. 细粒土含量对粗粒硫酸盐渍土路基填料盐胀特性的影响试验及分析模型[J]. 岩土力学,2022,43(8):2191-2202.
WANG X C, ZHANG S S, ZHAO K X. Salt expansion characteristics and analysis model of coarse-grained sulfate saline soil embankment fill material with increasing fines content [J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(8):2191-2202.(in Chinese)

[18] 民用机场岩土工程设计规范: MH/T 5027—2013[S]. 北京: 中国民航出版社, 2013.
Code for geotechnical engineering design of airports: MH/T 5027—2013 [S]. Beijing: China Civil Aviation Publishing House, 2013.(in Chinese)

[19] 韩进宝,王利鑫,张莎莎,等. 逐级降温工况下道基含盐砾质土

盐-冻胀特性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2024,44(1):36-46.
HAN J B,WANG L X,ZHANG S S,et al. Salt-frost expansion characteristics of salt gravel soil embankment under progressive cooling conditions[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2024, 44(1): 36-46.(in Chinese)

[20] 周凤玺, 周志雄, 赵文沧, 等. 寒旱区硫酸盐渍土特征温度及盐冻胀特性[J]. 中国公路学报, 2023,36(4):58-67.
ZHOU F X,ZHOU Z X,ZHAO W C,et al. Feature temperature and salt frost heave characteristics of sulfate saline soil in cold and arid regions[J]. China Journal of Highway and Transport,2023,36(4):58-67.(in Chinese)

[21] XIAO Z A, LAI Y M, ZHANG M Y. Study on the freezing temperature of saline soil[J]. Acta Geotechnica, 2018, 13(1): 195-205.

[22] 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.
WAN X S, LAI Y M, LIAO M K. Relationship between temperature and water content of sodium saline soils without phase transformation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(12): 2175-2181.(in Chinese)

[23] LOW P F, ANDERSON D M, HOEKSTRA P. Some thermodynamic relationships for soils at or below the freezing point:1. Freezing point depression and heat capacity[J]. Water Resources Research, 1968, 4(2): 379-394.

[24] 吴镇, 岳祖润,王天亮. 哈齐客专细圆砾土冻结温度测试分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013,26(1):37-40.
WU Z, YUE Z R, WANG T L. Test analysis on freezing temperature of fine round gravel soil in Harbin-Qiqihaer railway[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science), 2013, 26(1): 37-40.(in Chinese)

[25] 刘倩倩, 蔡国庆, 韩博文, 等. 基于核磁共振的级配土孔隙结构及冻结特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(增刊1):178-182.
LIU Q Q,CAI G Q,HAN B W,et al. Experimental study on pore structure and freezing characteristics of graded soil based on NMR[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(Sup.1): 178-182.(in Chinese)

[26] 黄佑芬,吴道勇,吴诗雨. 冻融循环条件下重塑硫酸盐渍土变形试验研究[J]. 冰川冻土,2022, 44(2):602-611.
HUANG Y F, WU D Y, WU S Y. Experimental stuy on deformation of remolded sulfate saline soil under freeze-thaw cycles[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2022,44(2):602-611.(in Chinese)

[27] WANG T L,ZHANG Y Z,WEI M,et al. Investigation of liquid and vapor migration in coarse-grained soil during open-system step-freezing test[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019,165:102816.

[28] ZHANG J, LAI Y M, LI S Y, et al. Numerical study on the spatial-temporal distribution of solute and salt accumulation in saturated sulfate saline soil during freezing-thawing processes: Mechanism and feedback[J]. Advances in Water Resources, 2023,177:104461.

[29] 孟祥传, 周家作, 韦昌富, 等. 盐分对土的冻结温度及未冻水含量的影响研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(3): 952-960.
MENG X C,ZHOU J Z,WEI C F,et al. Effects of salinity on soil freezing temperature and unfrozen water content[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(3): 952-960.(in Chinese)

[30] 王亚强,冉武平,阎首名,等. 粗粒盐渍土水盐迁移试验研究[J]. 大连理工大学学报,2020,60(4):402-410.
WANG Y Q,RAN W P,YAN S M,et al. Experimental study of water and salt migration in coarse saline soil[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2020, 60(4): 402-410.(in Chinese)