

文章编号: 1007-2993(2026)03-0443-09

低温蠕变工况下硫酸盐渍土的长期强度研究

陈志斌¹ 张卫兵^{1,2} 王展展¹ 张晓玲¹

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 宁夏银川 750021; 2. 宁夏大学 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 750021)

【摘要】 为揭示低温蠕变下硫酸盐渍土长期强度演化规律, 以宁夏红寺堡地区硫酸盐渍土为对象, 采用 KTL-LDF-5 型三轴仪开展系列低温三轴蠕变试验(温度 $T = -1 \sim -15$ °C, 含盐量 $S = 0 \sim 5\%$, 围压 100 kPa), 结合稳态蠕变速率法分析长期强度特性。结果表明: (1) 蠕变曲线随偏应力呈阶梯状上升, 经历瞬时、衰减及稳定三阶段; (2) 盐-冻胀耦合效应主导蠕变行为, $T > -5$ °C 时盐胀效应显著, 含盐量越高, 蠕变越大; $T \leq -10$ °C 时冻胀填充增强稳定性, 含盐量越高, 蠕变越小。(3) 整体而言, 在低温蠕变工况下, 不同含盐量下试样的长期强度值随着温度的降低而升高。除 $T = -1$ °C 时, 随含盐量增大, 长期强度呈轻微下降趋势外, 其他含盐量条件下均以 2% 含盐量为界呈现为折线增大趋势, 其中 -5 °C 时, 呈先减小后增大的变化趋势, 在 2% 含盐量时达到最小值; -10 °C 呈现先缓慢增长, 后增长速率较快; -15 °C 则表现为先增大后趋于稳定的变化趋势。并且, 含盐土体的强度要高于不含盐土体。该研究可为硫酸盐渍土地区的工程建设提供参考。

【关键词】 硫酸盐渍土; 稳态蠕变速率法; 低温; 长期强度; 三轴蠕变试验**【中图分类号】** TU448**【文献标识码】** A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2025-0224

Long-term strength of sulfate saline soil under low-temperature creep conditions

CHEN Zhibin¹ ZHANG Weibing^{1,2} WANG Zhanzhan¹ ZHANG Xiaoling¹

(1. College of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia, China; 2. Engineering Research Center Funded by Ministry of Education for Effective Utilization of Water Resources in Modern Agriculture in Arid Areas, Yinchuan 750021, Ningxia, China)

【Abstract】 To reveal the long-term strength evolution of sulfate saline soil under low-temperature creep, a series of low-temperature triaxial creep tests were conducted on sulfate saline soil from Hongsibu, Ningxia, using a KTL-LDF-5 triaxial apparatus (temperature $T = -1 \sim -15$ °C, salt content $S = 0 \sim 5\%$, confining pressure 100 kPa). The steady-state creep rate method was used to analyze the long-term strength characteristics. The results show that: (1) Creep curves exhibit a step-like increase with deviatoric stress, progressing through instantaneous, decaying, and stable stages. (2) The salt-frost heave coupling effect dominates creep behavior. At $T > -5$ °C, salt expansion is significant, and higher salt content leads to greater creep deformation. At $T \leq -10$ °C, frost heave filling enhances stability, and higher salt content results in smaller creep deformation. (3) Overall, under low-temperature creep conditions, the long-term strength values of specimens with different salt contents increase as temperature decreases. Except at $T = -1$ °C, where the long-term strength shows a slight decreasing trend with increasing salt content, the long-term strength exhibits a piecewise increasing trend with 2% salt content as the boundary under other salt content conditions. Specifically: At $T = -5$ °C, the strength decreases first and then increases, reaching a minimum at 2% salt content. At $T = -10$ °C, it shows a slow initial increase followed by a faster rate of increase. At $T = -15$ °C, it initially increases and then tends to stabilize. Furthermore, the strength of the saline soil is higher than that of the non-saline soil. This study can provide a reference for engineering construction in sulfate saline soil areas.

【Key words】 sulphate saline soil; steady-state creep rate method; low temperature; long-term strength; triaxial creep test

0 引言

盐渍土泛指盐土、碱土及其盐化、碱化土壤, 集中分布于我国西北干旱区, 宁夏境内以硫酸盐渍土最

为典型。该类土含盐量高, 在低温长期荷载作用下因芒硝结晶($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$)与冰晶冻胀耦合而发生显著蠕变, 导致长期强度衰减, 对道路、桥梁及建筑物

基金项目: 宁夏自然科学基金项目(2024AAC03070); 宁夏高等学校一流学科建设(国内一流建设学科)项目(NXYLXK2024A03)

作者简介: 陈志斌, 男, 2000 年生, 在读硕士研究生, 主要从事特殊土性状及工程应用研究。E-mail: 485177063@qq.com

通信作者: 张卫兵, 男, 1973 年生, 博士, 教授, 主要从事土力学与基础工程方向的教学与研究。E-mail: zwb231@126.com

的耐久性构成威胁。因此,阐释低温蠕变条件下硫酸盐渍土的长期强度演化规律具有重要工程价值。

国内外学者已就温度^[1-2]、含盐量^[3-5]、孔隙水压力^[6-8]对盐渍土力学特性的影响开展了大量研究。蠕变研究方面,早期工作主要集中于—维蠕变^[9-11];随着试验技术进步,三轴蠕变逐渐成为研究热点。余云燕等^[12]通过三轴固结不排水蠕变试验探讨了应力水平、含盐量及压实度对蠕变行为的影响;罗崇亮等^[13]利用低温三轴试验揭示了河西地区盐渍土的强度特征与本构关系;Tang等^[14]则系统研究了含水率与压力对黄土蠕变特性的作用。上述研究不仅深化了对盐渍土蠕变机理的认识,而且为长期强度预测提供了试验依据。

然而,现有研究仍存在两点局限:(1)研究对象多以氯盐渍土为主,其低温力学行为主要受Cl⁻降低冰点引发的冻胀主导^[15],而对具有显著盐胀特性的硫酸盐渍土,尤其在-5~0℃区间因芒硝结晶导致剧烈体积膨胀,可达氯盐渍土冻胀的2~3倍^[16],这种独特的盐-冻胀耦合机制必然导致其蠕变特性及长期强度演化规律与氯盐渍土存在显著差异。(2)对长期荷载作用下盐渍土强度演化关注不足,且缺乏可靠的长期强度预测方法。直接法耗时低效,间接法中应力-应变等时曲线法易受冰晶塑性变形干扰,拐点识别困难^[17];稳态蠕变速率法通过建立稳态蠕变速率与偏应力的指数关系,有效规避拐点判读误差,更适用于含冰晶土体。尽管“切线法”等新方法被提出用以提高预测精度^[18],但其在硫酸盐渍土低温蠕变中的适用性与参数阈值仍需验证。

鉴于稳态蠕变速率法在本研究所有工况下拟合优度均高于0.95,因此本文采用该方法确定长期强度,并以宁夏红寺堡地区硫酸盐渍土为对象,开展含盐量条件下的低温三轴蠕变试验,系统探讨温度与含

盐量对蠕变变形及长期强度的耦合影响,以期为硫酸盐渍土区路基长期稳定性分析及防治提供试验依据与理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验土样

土样取自宁夏红寺堡地区,通过击实试验,测得土体最优含水率为13.68%,最大干密度为1.87 g/cm³。采用激光粒度分析仪测定土样的颗粒含量,其颗粒组成见表1。根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)可以确定本研究中使用的土壤属于粉质砂土类型。通过对原状土进行易溶盐分析试验,得到了表2中所示的易溶盐含量数据,参照《岩土工程勘察规范》(GB 50021—2018),可以判定所用试验土壤属于中亚硫酸盐渍土。

表1 颗粒组成
Tab. 1 Particle composition

粒径/mm	>2	2~0.25	0.25~0.075	0.075~0.05	<0.05
占比/%	11.86	6.37	49.07	12.68	20.02

表2 易溶盐离子含量
Tab. 2 Soluble salt ion content

离子	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺
含量/(g·kg ⁻¹)	0.036	0.161	3.607	5.608	0.612	0.455	0.077	6.7

1.2 试验设备

试验采用KTL-LDF-50型三轴仪,该仪器主要由力控制加载架、静态8通道数据采集仪、双通道气压控制器、高低温恒温槽及气泵组成。试验过程中,主要通过力控制加载架向试样施加轴向荷载,由双通道气压控制器及气泵提供试验所需围压,采用静态8通道数据采集仪进行数据监测与采集,采用高低温恒温槽控制试验处于恒温状态。工作原理见图1。

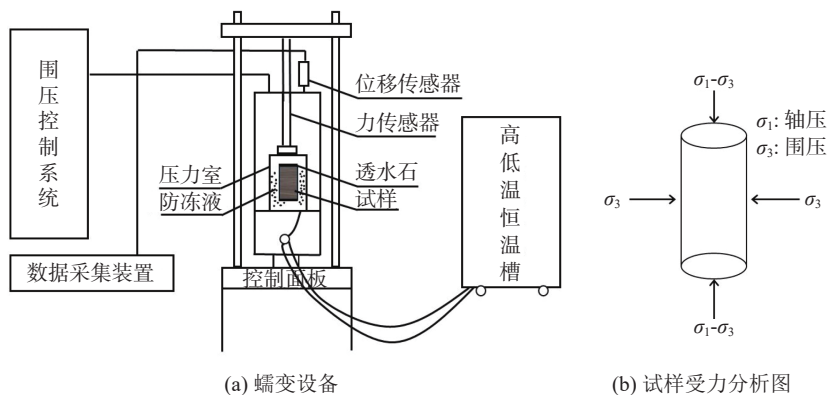


图1 试验设备原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test equipment principle

1.3 试验方案

先将土样去除杂物、洗盐、风干、碾碎、过 2 mm 筛后备用; 再将土配置成目标含水量、含盐量的样品, 用保鲜膜密封 24 h, 确保试样含水率均匀。试验采用分级加载蠕变方式进行三轴蠕变试验, 蠕变稳定标准为蠕变速率小于 0.01 mm/h。根据文献 [12], 蠕变荷载作用 24 h 后岩土已进入稳定蠕变阶段。因此每一级荷载的加载时间设置为 24 h。所有试验中土壤的含水率均采用了击实试验来确定的最佳含水率, 同时将压实度设置为 95%。通过三瓣膜将土样制成高为 100 mm, 直径为 50 mm 的圆柱体试样。根据该地区气候特点, 将试验温度设置为 -1, -5, -10, -15 °C, 含盐量设置为 0%, 2%, 5%, 加载应力设置为 50, 100, 150, 200 kPa, 不同试验条件下的围压均设置为 100 kPa, 试验工况如表 3 所示^[19]。参照《岩土工程试验规范》(GB/T 50123—2021), 三轴蠕变试验每组工况样本量 ≥ 2, 本研究总样本量为 4 温度 × 3 含盐量 × 4 荷载 × 2 平行组 = 96 个, 满足统计显著性要求。为深

入揭示盐胀-冻胀交互作用的微观机理, 本研究在蠕变试验结束后, 选取典型工况 (-5 °C 下的 0%, 2%, 5% 含盐量试样) 进行 SEM 试验。

表 3 三轴蠕变试验工况表
Tab. 3 Triaxial creep test conditions

温度 $T/^\circ\text{C}$	含盐量 $S/\%$	围压 σ_3/kPa	荷载 P/kPa
-1	0, 2, 5	100	50, 100, 150, 200
-5	0, 2, 5	100	50, 100, 150, 200
-10	0, 2, 5	100	50, 100, 150, 200
-15	0, 2, 5	100	50, 100, 150, 200

注: 每个工况设置 2 组平行试验 ($n=2$), 如 -1 °C、2% 含盐量条件下, 200 kPa 荷载的轴向应变终值分别为 0.99% 和 0.96%, 相对误差 < 3%, 取平均值作为结果。

2 硫酸盐渍土三轴蠕变试验结果分析

在围压为 100 kPa 的情况下, 对不同试验条件下的硫酸盐渍土试样进行了三轴蠕变试验, 得到了试样的蠕变全过程曲线后, 利用“陈氏加载法”^[20] 对其进行处理, 获得相应的应变时间曲线, 如图 2 所示。

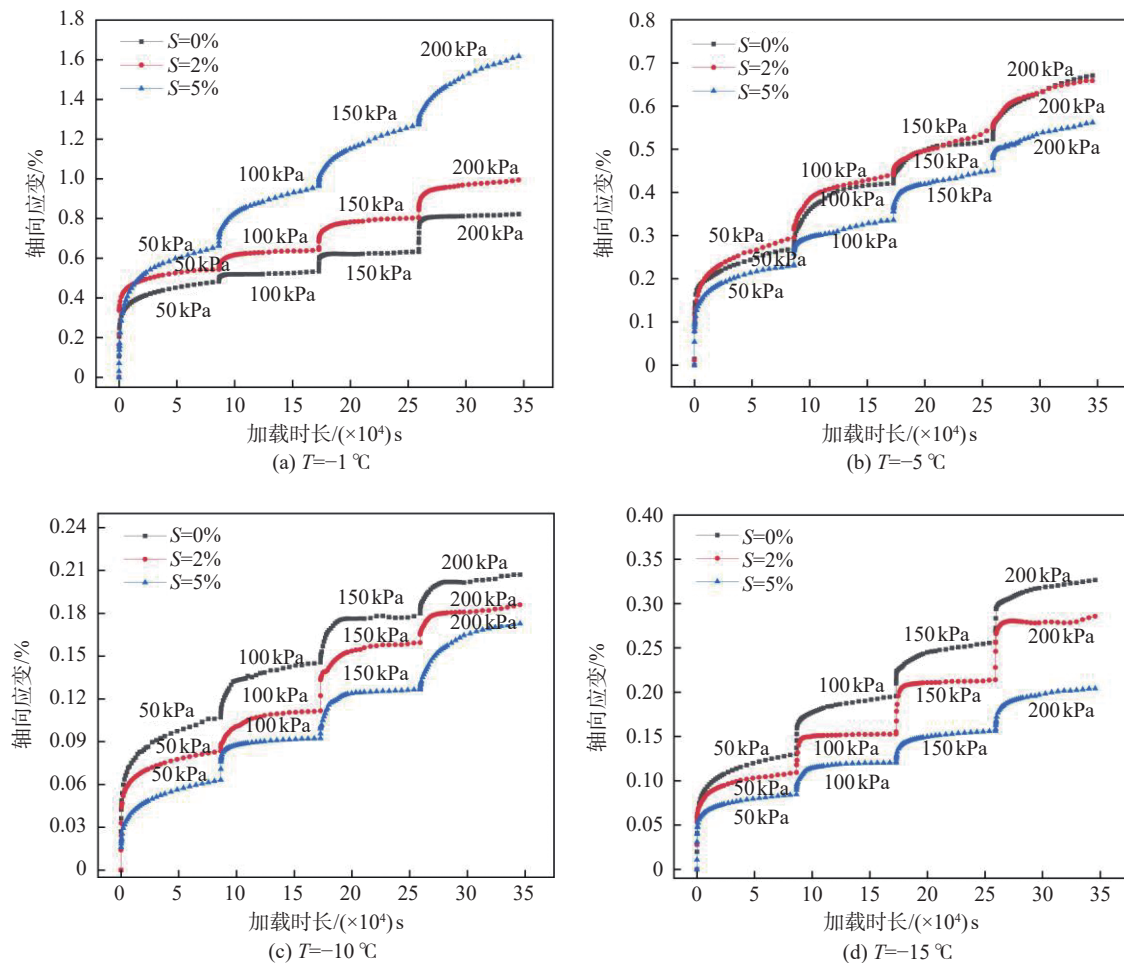


图 2 围压 100 kPa 时不同温度下试样的蠕变全过程曲线

Fig. 2 Creep process curves of specimens under different temperatures at confining pressure of 100 kPa

由图2可知:

(1)不同工况下试样的蠕变全过程曲线具有高度的相似性,即随着偏应力的增加,蠕变曲线均呈现出阶梯状增长。蠕变过程大致可分为3个阶段:第1阶段为瞬间蠕变。由于蠕变试验开始前,试样会经历24 h的恒温以达到试验温度,而当荷载施加的瞬间,土体在恒温阶段形成的冰晶结构会发生破坏,进而使得土体结构强度变低,变形量增大,导致瞬时变形速率较快。第2阶段为衰减蠕变。随着时间的推移,硫酸盐渍土逐渐被挤密压实,土体强度逐渐增大,进而使得土体变形速率减小,此阶段为衰减蠕变阶段。第3阶段为稳定蠕变。在加载后期,由于土体结构达到了新的平衡,蠕变的速率逐渐趋于零,最终变形趋于稳定。

(2)围压相同条件下,不同含盐量土体的蠕变受温度影响较大。当温度较高($T > -5\text{ }^{\circ}\text{C}$)时,如图2(a)所示,土体轴向应变随含盐量的增大而增大,且达到稳定状态的时间也越长。这是由于土体在该温度范围内尚未达到冻结,因土壤溶液中硫酸钠吸收水分子产生芒硝晶体,导致土体体积膨胀3.18倍,盐胀作用较明显,含盐量越高,盐胀率就越大,土体结构破坏显著,从而导致土体抵抗变形的能力降低,因此蠕变量较大,而且稳定的时间也会随之增加。当温度降低至 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不含盐的土体,由于孔隙溶液中大量的水分结冰导致土体结构发生冻胀破坏,在荷载作用下,变形相对较大。而含盐土体,因随含盐量的增大,冻结温度也在下降,所以当含盐量较低时($\leq 2\%$),大量的自由水结冰,土体的冻胀作用较显著,从而导致土体结构破坏,蠕变变形较大。而高含盐量时(5%),部分水分冻结后填充孔隙,相应的土体冻胀作用小,同时因部分未冻水存在而产生的盐胀作用也不明显,对土体的结构影响较小,故而此时的蠕变量相对较小(见图2(b))。当温度进一步降低,当 $T < -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,土体内部未冻水含量几乎全部转化为冰结晶,温度越低,土体的冻胀作用越明显,土体结构发生破坏的程度越大,从而导致蠕变量也越大,且含盐量越高,蠕变量相对越小,如图2(c)、图2(d)所示。

为探讨荷载及温度对硫酸盐渍土蠕变特性的影响,本文以2%含盐量为例,给出了不同荷载及温度影响下试样轴向应变-时间的关系曲线,如图3所示。

由图3可知,在相同含盐量条件下,在 $T \geq -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,由于盐胀与冻胀的共同作用,导致土体结构发生不同程度的破坏,所以各荷载下的轴向应变均呈现显著的变化趋势,且荷载越大,相应的应变终值也越大。

相比而言,在 $T \leq -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,各荷载下的应变并不显著。这是由于尽管低温时土体发生冻胀,但其体积变化没有盐胀剧烈,不足以引起土体结构大量破坏,相反孔隙中的冰填充了骨架,增强了抵抗变形的能力,所以应变值较小。以荷载50 kPa、加载时长20000 s为例,温度在 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时轴向应变分别为0.488%和0.228%,而在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的应变仅为0.093%和0.071%。

3 硫酸盐渍土的长期强度规律

3.1 硫酸盐渍土长期强度的确定方法

长期强度是指岩土体材料在持续荷载作用下的强度,通常小于其瞬时强度。获取长期强度的方法包括直接法和间接法。直接法是通过长期施加荷载来获得土体的长期强度,但由于试验周期较长,会导致试验结果出现偏差,因此很少采用直接法来求取长期强度。间接法是根据土体的蠕变和松弛曲线来推算长期强度,主要有稳态蠕变速率法和应力-应变等时曲线法。与应力-应变等时曲线法相比,稳态蠕变速率法在低温含冰盐渍土研究中的优势在于:①避免因冰晶融化导致的拐点偏移;②指数拟合精度较高(表4中 $R^2 > 0.95$),相比之下,低温下应力-应变等时曲线法的拟合度通常较低。

本文以 $T = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $S = 2\%$ 的硫酸盐渍土试样为例,采用稳态蠕变速率法来求取试样的长期强度值,并探究其变化规律。分析表明,该工况下的稳态蠕变阶段轴向应变速率与偏应力的关系可以通过指数函数来表示,函数式如式(1)所示。

$$y = y_0 + Ae^{-x/t} \quad (1)$$

采用该式拟合偏应力对应的稳态蠕变速率,即可得到轴向应变速率-偏应力的拟合曲线,如图4所示,该曲线的相关系数 R^2 为0.99,拟合度较高,因此,可采用稳态蠕变速率法求取长期强度。拟合曲线的具体关系式如式(2)所示。

$$\varepsilon = (1.7 \times 10^{-7}) + (2.1 \times 10^{-9})e^{q/43} \quad (2)$$

式中: ε 为稳态蠕变阶段轴向应变速率; q 为偏应力, $q/43$ 表示偏应力对蠕变速率的敏感系数,系数越小表明低温下土体抵抗变形能力越强。

通过对式(2)求导,得到式(3):

$$\varepsilon' = \frac{2.1 \times 10^{-9}}{43} e^{q/43} \quad (3)$$

数据表明,拟合曲线函数式的导数变化为正切函数的变化。在函数值小于1时,其增长相对平缓;

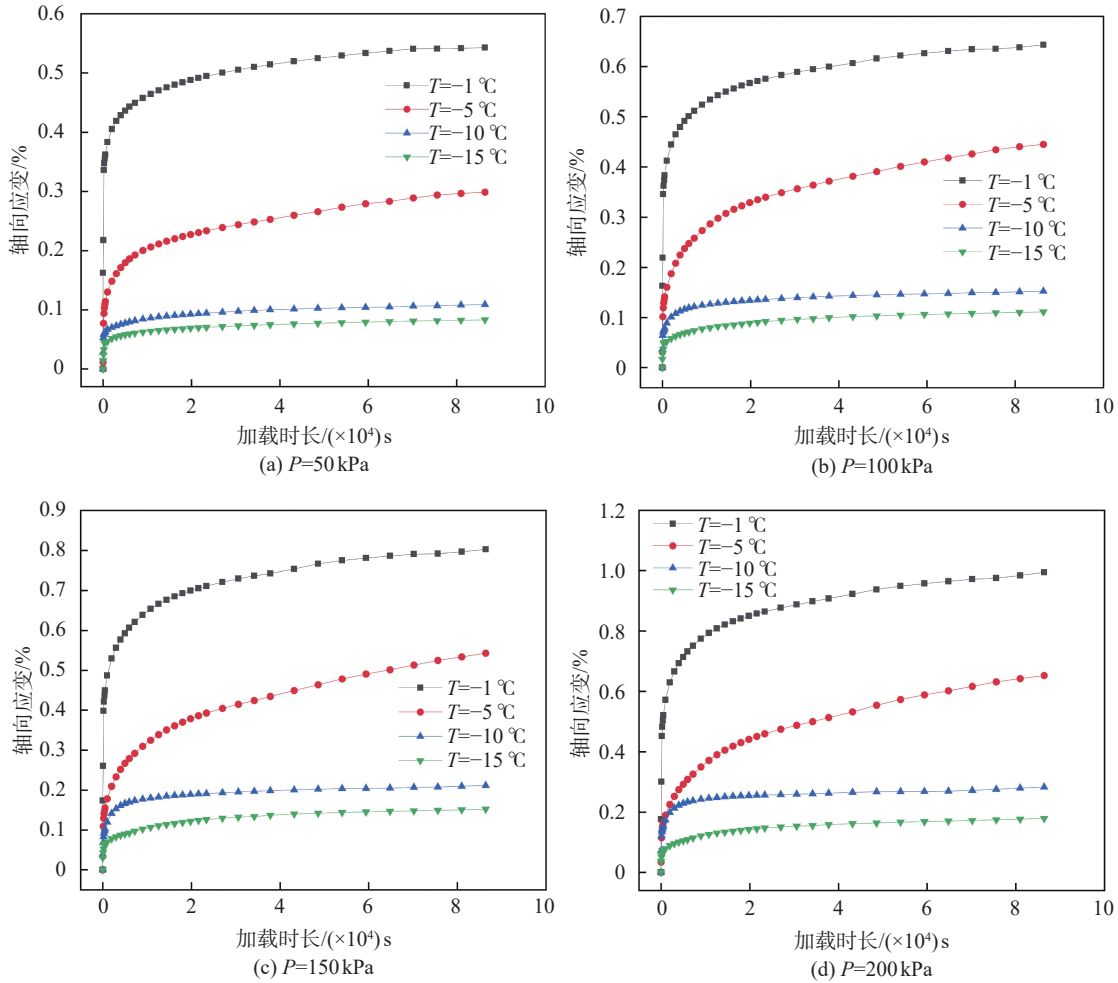


图3 含盐量 $S = 2\%$ 时不同荷载及温度下试样轴向应变-时间的关系曲线

Fig. 3 Axial strain-time relationship curves of specimens under different loads and temperatures at salt content $S = 2\%$

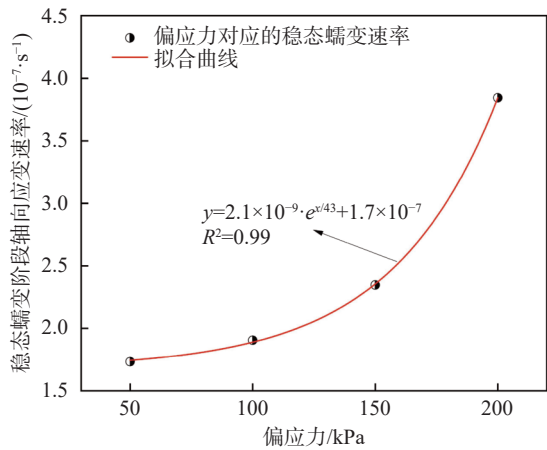


图4 $S = 2\%$, $T = -1\text{ }^\circ\text{C}$ 时试样的稳态蠕变速率-偏应力曲线
Fig. 4 Steady-state creep rate-deviatoric stress curve of specimen at $S = 2\%$ and $T = -1\text{ }^\circ\text{C}$

大于1时,正切函数便迅速增大。因此,可以认为导数值 $\epsilon' = 1$ 对应曲线的点就为拐点,拐点处的偏应力即为试样的长期强度值。

设定导数值 $\epsilon' = 1$, 见式(4):

$$\epsilon' = \frac{2.1 \times 10^{-9}}{43} e^{q/43} = 1 \rightarrow q = 1021 \text{ kPa} \quad (4)$$

即可得该工况下土体的长期强度为 1021 kPa。

需说明的是,导数值 $\epsilon' = 1$ 的阈值参考自文献 [17] 的原状黄土研究,其在含冰盐渍土中的适用性仍需后续通过原位监测验证。此外,本研究在确定长期强度时未考虑循环荷载与多离子耦合作用(如 Cl^- 与 SO_4^{2-} 的交互影响),这些因素可能对长期强度产生影响。未来研究可结合动三轴试验,进一步拓展对硫酸盐渍土长期强度的研究。

3.2 不同试验条件下硫酸盐渍土的长期强度变化规律

由于稳态蠕变速率法求取长期强度过程简便,数据易求,因此本文采用稳态蠕变速率法研究不同温度、含盐量在硫酸盐渍土的长期强度规律。经过验证,各工况下的轴向应变速率与偏应力曲线之间的拟合度均超过 0.95,因此稳态蠕变速率法可以准确应用于这些工况,以获取试样的长期强度值,结果见表 4。

为方便观察,对数据进行处理,得到不同试验条件下的长期强度见图5。

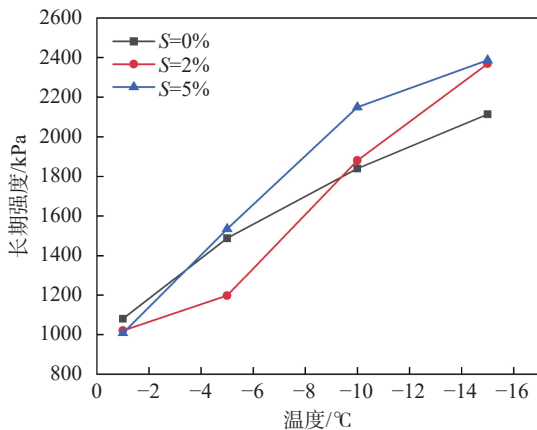
由图5(a)、图5(b)可以看出不同含盐量下试样的长期强度值随着温度的降低而升高。除 $T = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随含盐量增大,长期强度呈轻微下降趋势外,其他含盐量条件下均整体呈现为折线增大趋势。其中,

温度为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,0%,2%,5%含盐量下的长期强度值分别为1488,1198,1535 kPa(见表4),在2%含盐量时达到最小值; $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 呈现出先缓慢增长,含盐量大于2%后增长速率较快,并在5%含盐量时达到最大;温度 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 则表现为先增大后趋于稳定的变化趋势,在2%含盐量时达到最大,之后趋于稳定。

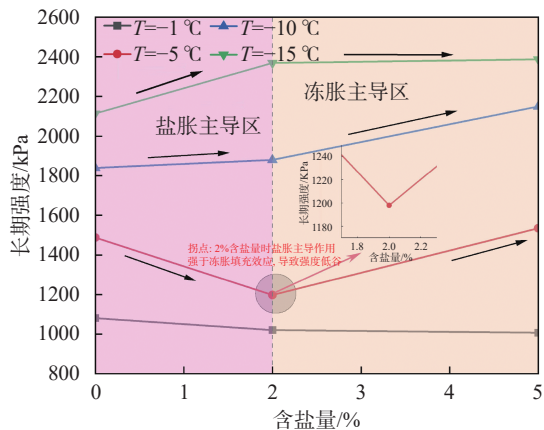
表4 不同试验条件下的拟合关系式和长期强度值

Tab. 4 Fitting relationships and long-term strength values under different test conditions

含盐量 $S/\%$	温度 $T/^{\circ}\text{C}$	拟合关系式	拟合度 R^2	长期强度/kPa
0	-1	$y = 4.96 \times 10^{-9} \cdot e^{x/47} + 1.76 \times 10^{-7}$	0.99	1081
	-5	$y = 3.1 \times 10^{-7} \cdot e^{x/77} + 4.2 \times 10^{-7}$	0.99	1488
	-10	$y = 7.76 \times 10^{-7} \cdot e^{x/98.6} + 6.2 \times 10^{-7}$	0.98	1840
	-15	$y = 5.67 \times 10^{-7} \cdot e^{x/125} + 6.7 \times 10^{-8}$	0.98	2114
2	-1	$y = 2.1 \times 10^{-9} \cdot e^{x/43} + 1.7 \times 10^{-7}$	0.99	1021
	-5	$y = 1.6 \times 10^{-7} \cdot e^{x/60.65} + 1.93 \times 10^{-7}$	0.99	1198
	-10	$y = 3.0 \times 10^{-8} \cdot e^{x/86.4} + 8.1 \times 10^{-8}$	0.99	1881
	-15	$y = 5.3 \times 10^{-7} \cdot e^{x/123} - 3.7 \times 10^{-7}$	0.99	2369
5	-1	$y = 6.97 \times 10^{-9} \cdot e^{x/44.66} + 1.44 \times 10^{-7}$	0.99	1008
	-5	$y = 4.95 \times 10^{-6} \cdot e^{x/91.75} + 4.34 \times 10^{-5}$	0.99	1535
	-10	$y = 4.18 \times 10^{-8} \cdot e^{x/99.61} + 2.04 \times 10^{-7}$	0.99	2150
	-15	$y = 9.52 \times 10^{-7} \cdot e^{x/127.4} - 4.16 \times 10^{-7}$	0.98	2387



(a) 不同温度下试样的长期强度



(b) 不同含盐量下试样的长期强度

图5 不同试验条件下的长期强度

Fig. 5 Long-term strength under different test conditions

由于温度降低初期($T \geq -5\text{ }^{\circ}\text{C}$),不含盐土体中的水分逐渐转化为冰晶,使得土颗粒间的结合力增强,而含盐土体伴随盐胀的发生,土体结构出现不同程度破坏,因此含盐土体强度要低于不含盐土体。其中温度 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,2%含盐量土体的长期强度最低。这是由于该温度下硫酸钠结晶行为的特殊性及其引发的盐胀效应。试验土样中 SO_4^{2-} 含量达 5.608 g/kg ,为硫酸钠结晶提供了充分的盐分来源。在此条件下,

硫酸钠充分结晶形成芒硝,引发显著盐胀,严重破坏土体结构并削弱其抵抗变形能力,导致长期强度降至最低点。相比之下,不含盐土体在此温度下主要表现为冻胀破坏;而5%含盐量时,较高的盐分浓度降低了冻结温度,部分抑制了芒硝的充分结晶和膨胀,同时部分水分形成的冰晶或未冻水有助于填充孔隙,使得盐胀破坏程度减轻,因此强度有所回升。

图6为 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 SEM 图,图像显示,2%含盐

量的土体中芒硝晶体的结晶更为充分,形成了大量的针状和柱状晶体,这些晶体在土颗粒间扩展,显著破坏了土体的原有结构。相比之下,5%含盐量试样中芒硝晶体数量减少,形态较小,且可见部分未冻水膜

或细小冰晶填充孔隙,结构破坏程度减轻。0%含盐量试样则以冰晶胶结为主,无盐晶破坏迹象。这表明低温下低含盐量土体的盐结晶更充分,与长期强度低谷现象一致。

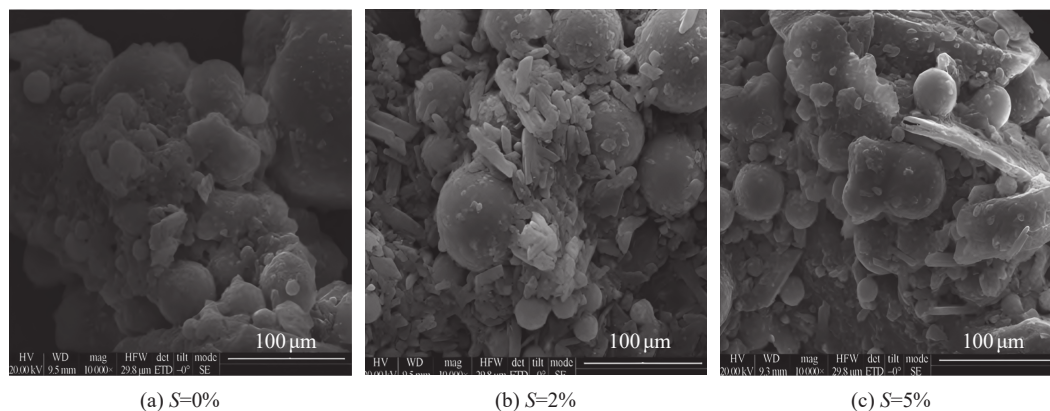


图6 $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的 SEM 图片
Fig. 6 SEM images under $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ condition

随着温度的继续降低达到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不含盐土体中冰晶的增量逐渐减小,所以其强度呈现缓慢增长趋势。含盐土体由于盐结晶过程逐渐趋于停止,但因未冻水的冰晶数量在增加并填充新结构的孔隙,使得其强度随温度降低近似呈线性增大趋势。含盐量越大,未冻水含量越高,所以相应的强度也越高。当温度进一步降至 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,含盐土体的冰晶数量有所减小,强度也有所下降。但2%含盐量土体是在之前因盐胀破坏后稳定的新结构上发生冻胀,其累计变形量小,因此强度降低幅度较小。而5%含盐量土体在盐胀和冻胀的共同作用下,累计变形量相对较大,导致其强度下降明显,但最终含盐土体的强度要高于不含盐土体。

上述关于硫酸盐渍土长期强度变化规律与前文蠕变变形规律相符合。温度与含盐量对长期强度的耦合作用呈显著区间性:当温度处于 $-1\sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,盐胀主导,含盐量增加会削弱结构,强度下降;当温度降至 $-5\sim -15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,盐分降低冰点并促使冰晶填充孔隙,结构强化,强度随之提升。

4 结论

本文以宁夏地区硫酸盐渍土为研究对象,首先开展了不同温度、含盐量、加载应力下的三轴蠕变试验,分析了温度、含盐量、加载应力对蠕变规律的影响,并基于蠕变试验数据,采用稳态阶段蠕变速率求取了不同试验条件下的长期强度变化规律,并进行分析。得出主要结论如下:

(1)低温三轴蠕变试验表明,硫酸盐渍土蠕变全

过程随偏应力增大呈阶梯状上升,依次经历瞬时、衰减与稳定三阶段;温度与含盐量通过盐化-冻胀耦合调控蠕变速率及最终应变。

(2)采用稳态蠕变速率法确定的长期强度随温度降低整体升高。当 $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,2%含盐量试样因芒硝晶体剧烈析出导致结构破坏最严重,长期强度降至1198 kPa,为所有工况最低;无盐及5%含盐量试样分别为1488 kPa与1535 kPa。 $T = -1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,长期强度随含盐量增大呈轻微下降; $T = -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 与 $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,长期强度随含盐量折线型增大,且含盐土强度始终高于无盐土。

(3)SEM观测证实: $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时2%含盐量试样中针状、柱状芒硝晶体发育充分,骨架结构破坏显著;5%含盐量试样晶体数量减少,孔隙被未冻水膜及细小冰晶填充,结构损伤较轻;无盐试样以冰晶胶结为主,未见盐晶破坏。

(4)建议宁夏红寺堡地区低温路基设计中,当温度 $T \leq -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,含盐量宜控制在2%以下,以利用冻胀填充效应提升长期强度;当 $T > -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,需通过换填或化学改良抑制盐胀,以规避工程风险(参考表4,温度为 $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时5%含盐量长期强度(1008 kPa)较0%含盐量长期强度(1081 kPa)降低6.7%)。

(5)本研究验证了稳态蠕变速率法在硫酸盐渍土低温蠕变长期强度预测中的适用性,所有工况拟合优度 $R^2 > 0.95$,结果可靠。后续工作将进一步结合微观机理与原位监测,探讨“切线法”等新方法在硫酸盐渍土长期强度评价中的适用边界与参数修正。

参 考 文 献

- [1] 张卫兵, 杨生财, 马君泽, 等. 单次降温条件下硫酸盐渍土盐冻胀试验研究 [J]. *地下空间与工程学报*, 2019, 15(4): 1017-1023. (ZHANG W B, YANG S C, MA J Z, et al. Experimental study on salt expansion and frost heaving characteristics of sulfate saline soil under the condition of unilateral cooling[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2019, 15(4): 1017-1023. (in Chinese))
- [2] 王 珺, 常立君. 温度和含水率影响下盐渍土力学特性试验研究 [J]. *青海大学学报*, 2023, 41(3): 80-87. (WANG J, CHANG L J. Experimental study on the mechanical properties of saline soil under the influence of temperature and water content[J]. *Journal of Qinghai University*, 2023, 41(3): 80-87. (in Chinese))
- [3] ZHOU J Z, WEI C F, LAI Y M, et al. Application of the generalized clapeyron equation to freezing point depression and unfrozen water content[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(11): 9412-9431.
- [4] 任亚军, 张卫兵. 单向冻结条件下硫酸钠盐渍土的冻结温度试验研究 [J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(3): 124-130,137. (REN Y J, ZHANG W B. Experimental study on freezing temperature of sodium sulfate saline soil under unidirectional freezing condition[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2023, 40(3): 124-130,137. (in Chinese))
- [5] 雷 过, 张卫兵, 李 晓, 等. 冻融-干湿循环下硫酸盐渍土强度劣化的宏微观响应 [J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(6): 154-159,165. (LEI G, ZHANG W B, LI X, et al. Macro-and-microscopic responses of strength deterioration of sulphate saline soils under freeze-thaw and dry-wet cycles[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(6): 154-159,165. (in Chinese))
- [6] 张蓬海, 马 巍, 杨成松. 冻融循环过程中土体的孔隙水压力测试研究 [J]. *岩土力学*, 2015, 36(7): 1856-1864. (ZHANG L H, MA W, YANG C S. Pore water pressure measurement for soil subjected to freeze-thaw cycles[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(7): 1856-1864. (in Chinese))
- [7] 王宁宁, 张 虎, 张建明, 等. 不同温度及排水条件下高温冻土孔隙水压力试验研究 [J]. *冰川冻土*, 2018, 40(6): 1167-1172. (WANG N N, ZHANG H, ZHANG J M, et al. Experimental study of pore water pressure of high temperature frozen soil under different temperatures and drainage conditions[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2018, 40(6): 1167-1172. (in Chinese))
- [8] 陈耀光, 杨 军, 彭芝平, 等. 饱和盐渍土地基处理孔隙水压力实测分析 [J]. *岩土工程学报*, 2010, 32(S2): 529-532. (CHEN Y G, YANG J, PENG Z P, et al. Test analysis on pore water pressure in ground treatment to saturated saline soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(S2): 529-532. (in Chinese))
- [9] 周凤玺, 王立业, 赖远明. 饱和盐渍土的一维蠕变试验与模型研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(1): 142-149. (ZHOU F X, WANG L Y, LAI Y M. One-dimensional creep tests and model studies on saturated saline soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(1): 142-149. (in Chinese))
- [10] 常留成, 王红雨, 王 亚, 等. 含砂量对砂-细粒混合土一维蠕变行为的影响 [J]. *岩土力学*, 2023, 44(12): 3370-3382,3511. (CHANG L C, WANG H Y, WANG Y, et al. Influence of sand content on one-dimensional creep behavior of sand-fines mixtures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(12): 3370-3382,3511. (in Chinese))
- [11] 胡长明, 汪芳芳, 朱武卫, 等. 考虑参数随机性的压实黄土蠕变变形不确定性分析 [J]. *计算力学学报*, 2024, 41(2): 226-232. (HU C M, WANG F F, ZHU W W, et al. Uncertainty analysis of creep deformation of compacted loess considering parameters randomness[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2024, 41(2): 226-232. (in Chinese))
- [12] 余云燕, 罗崇亮, 王 堃, 等. 非饱和盐渍土三轴蠕变试验与模型分析 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2022, 52(4): 704-711. (YU Y Y, LUO C L, WANG K, et al. Triaxial creep test and model analysis of unsaturated saline soil[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2022, 52(4): 704-711. (in Chinese))
- [13] 罗崇亮, 余云燕, 岳建平, 等. 河西盐渍土的低温冻土三轴试验与模型研究 [J]. *公路交通科技*, 2021, 38(6): 61-69. (LUO C L, YU Y Y, YUE J P, et al. Low-temperature frozen soil triaxial test and model study on saline soil in Hexi Area[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2021, 38(6): 61-69. (in Chinese))
- [14] TANG H, LUO J Z, DUAN Z, et al. Experimental investigation of the creep behaviour of remoulded loess under different levels of compactness[J]. *PLoS One*, 2022, 17(1): e0262456.
- [15] WANG C, LAI Y M, YU F, et al. Estimating the freezing-thawing hysteresis of chloride saline soils based on the phase transition theory[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 135: 22-33.
- [16] 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))
- [17] 刘 杰. 冻融循环作用后原状黄土的三轴蠕变特性研究 [D]. 西安: 西北大学, 2022. (LIU J. Study on triaxial creep characteristics of undisturbed loess after freeze-thaw cycle[D]. Xi'an: Northwest University, 2022. (in Chinese))
- [18] 赵 越, 牛心玉, 齐晓磊, 等. 水化-冻融耦合作用下大理岩蠕变长期强度 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 2025, 55(1): 188-198. (ZHAO Y, NIU X Y, QI X L, et al. Creep long-term strength of marble under coupling effect of hydration freezing-thaw[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2025, 55(1): 188-198. (in Chinese))
- [19] 王展展. 宁夏地区硫酸盐渍土低温三轴蠕变试验及模型研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2024. (WANG Z Z. Low temperature triaxial creep test and model study on sulfate saline soil in Ningxia region[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2024. (in Chinese))
- [20] 哈尔滨工业大学. 分级加载岩土三轴蠕变试验结果向分别加载的转化方法: 112284902A[P]. 2021-01-29. (Harbin Institute of Technology. Method for converting graded loading rock-soil triaxial creep test results into respective loading: 112284902A[P]. 2021-01-29. (in Chinese))

收稿日期: 2025-05-23