

DOI: 10.11779/CJGE20221540

温度影响下罗布泊盐岩路基填料变形特性研究

王朝辉¹, 陈绍昌¹, 宋亮^{1,2,3}, 问鹏辉¹, 陈浩宇¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 新疆交投建设管理有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830049;

3. 新疆交通规划勘察设计研究院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830006)

摘要: 为探明温度影响下盐岩路基填料变形特性, 保障盐岩路基稳定性, 促进盐岩在路基工程中资源化应用, 全面分析了卤水及盐岩相变特征, 基于正交试验方法探究了单次降温多因素交互作用下盐岩填料的变形规律, 系统研究了多次冻融循环后盐岩填料盐胀累积规律, 并基于试验段现场监测综合评价了盐湖区盐岩路基变形特征。结果表明: 不同浓度卤水降温曲线均未出现明显过冷阶段, 其降温曲线平衡及波动维持时间极为短暂, 同时卤水相变温度随浓度增加而升高。盐岩填料的降温曲线存在显著的过冷及温度跳跃阶段, 其相变温度随拌和卤水浓度增加而下降。单次降温作用下盐岩填料变形量介于 $-0.09\sim 0.18$ mm, 各因素对盐岩填料变形的影响顺序为: 上覆荷载 $>$ 含卤水率 $>$ 最大粒径 $>$ 压实度。冻融循环作用下拌合卤水浓度越低, 盐岩填料盐胀量越大; 上覆荷载对盐岩填料盐胀抑制作用较强。实体工程现场监测表明随着监测时间增长盐岩路基变形呈现正弦波式周期性变化, 且变形沿深度方向呈减小趋势, 同时盐岩路基变形与温度具有较强的线性相关性。

关键词: 路基; 盐岩填料; 拌和卤水; 相变温度; 变形监测

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2024)04-0716-12

作者简介: 王朝辉(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事道路新材料与新技术方面的研究工作。E-mail: wchh0205@163.com。

Deformation characteristics of Lop Nur salt rock subgrade filler under influences of temperature

WANG Chaohui¹, CHEN Shaochang¹, SONG Liang^{1,2,3}, WEN Penghui¹, CHEN Haoyu¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Xinjiang Communications Investment Construction Management

Co., Ltd., Urumqi 830049, China; 3. Xinjiang Transportation Planning Surveying and Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830006, China)

Abstract: To investigate the deformation characteristics of salt rock subgrade filler under the influences of temperature, ensure the stability of salt rock subgrade and promote the resource application of salt rock in subgrade engineering, the characteristics of phase transformation in brine and salt rock are analyzed. An orthogonal test method is used to investigate the deformation of salt rock filler under the interaction of multiple factors in a single cooling condition. The salt expansion accumulation laws of salt rock filler after multiple freeze-thaw cycles are studied. Based on the test section field monitoring, the deformation characteristics of salt rock subgrade in salt lake area are evaluated. The results show that the cooling curves of different brine concentrations do not exhibit any obvious subcooling stage, their balance and fluctuation are very short, and the brine phase transition temperature increases with the increasing concentration. The cooling curve of salt rock filler has an obvious stage of subcooling and temperature jump, and the phase transition temperature decreases with the increase of the mixed brine concentration. The deformation of salt rock filler under single cooling condition ranges from -0.09 mm to 0.18 mm. The order of influences of various factors on the deformation of salt rock filler is as follows: overburden load $>$ brine content $>$ maximum particle size $>$ compaction. The lower the concentration of mixed brine under the freeze-thaw cycle, the greater the salt expansion of salt rock filler. The overburden load has a strong effect on inhibiting salt swelling of salt rock fillers. The field monitoring of the entity engineering shows that with the growth of monitoring time, the deformation of the salt rock subgrade shows a sinusoidal cyclical variation and decreases along the depth direction, and it has a strong linear correlation with temperature.

Key words: subgrade; salt rock filler; mixing brine; phase

基金项目: 交通运输部重点科技项目(2019-MS1-024); 新疆维吾尔自治区交通运输行业科技项目(2019-ZD1-015); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2020-D01-A92)

收稿日期: 2022-12-13

transition temperature; deformation monitoring

0 引言

新疆罗布泊地区广泛分布着盐岩,其板结状况良好,易溶盐含量基本在20%以上,局部高达90%以上,环境敏感性较高^[1-2]。目前盐岩在罗布泊地区被尝试用于低等级公路填筑工程中,但将盐岩用作路面材料时,盐岩与大气直接接触后受水气及温度影响显著,易形成盐岩公路松胀、翻浆等病害,影响筑路工程的正常运营。考虑盐岩自身强度较高,将其用于不直接与外界环境接触的路基等结构层时,则可有效保障盐岩的强度特性并降低降水等因素对盐岩结构层的不利影响。现阶段关于温度影响下盐岩路基填料的变形特性仍尚不明确,这也制约着盐湖区盐岩公路的建设发展。

盐岩在温度及湿度影响下的相态变化及变形特征与一般盐渍土具有相似之处,但盐分含量的差异性也使得两者工程性质存在显著差异。目前针对盐岩作为路用材料的研究相对较少,仅部分学者开展了一系列有关盐岩路基填筑质量控制及路基病害等方面的研究。而对于温度影响下盐岩路基变形特征方面的研究鲜有报道。当前,关于盐渍土盐冻胀方面的研究主要涉及以下几个方面:

(1) 温度对盐渍土盐胀的影响: Feng 等^[3]根据温度场和土壤盐胀特性,对硫酸盐渍土公路地基的盐胀敏感深度进行估算。Lai 等^[4]指出硫酸钠盐渍土盐胀受温度和冷却速度的影响。Wan 等^[5]探索了不同温度对硫酸钠盐渍土盐胀的影响规律,发现随着温度的降低盐胀加剧并趋于稳定。

(2) 盐渍土盐冻胀特性的影响因素: Xiao 等^[6]、Genkinger 等^[7]指出硫酸盐渍土的盐冻胀量由含盐量与含水率控制。Zhang 等^[8]研究发现影响硫酸盐渍土盐胀的敏感因素有含盐量、含水率、温度等。

(3) 盐渍土盐冻胀机理模型: Zhang 等^[9]利用数值模拟研究了盐渍土的多场数学耦合水-热-盐-力学模型。Wu 等^[10]针对盐渍土多孔介质中流体流动、传热、结晶和变形之间的耦合效应,提出了饱和盐水冻土的水-热-盐-力耦合模型。针对温度影响下盐渍土路基变形的研究,也取得了一定的进展。卢炜等^[11]探究了高铁变形控制要求的盐渍土路基盐胀和溶陷系数阈值及季节交替及降水影响下砾类盐渍土路基的变形特征。杨晓华等^[12]以 DY 高铁施工现场的水分和温度监测为基础,采用自主设计的试验装置研究了温度变化对粗粒硫酸盐渍土路基变形的影响。

综上分析,既有研究多关注于盐分类型单一、含

盐量低的盐渍土盐冻胀特性,揭示了温度影响下盐渍土路基变形规律。然而目前针对盐岩相变特征,特别是针对盐岩填料盐胀变形特性及其影响因素等方面的研究鲜有报道,关于在自然气候条件下的盐岩路基现场监测试验和研究更鲜有涉及。

基于此,本文开展盐岩及卤水降温试验,全面分析卤水及盐岩相变特征,系统研究单次降温作用下盐岩填料盐胀变形规律及其敏感因素,及盐岩填料在冻融循环后的盐胀累积规律,并基于实体工程现场监测综合评价了盐湖区盐岩路基变形特征,以为后续盐岩路基稳定性提升及完善设计控制指标提供借鉴。

1 材料与试验

1.1 材料基本性质

试验盐岩及卤水均取自新疆罗布泊省道 S235 线 K401+500 附近,见图 1。盐岩取样时取表层向下 40 cm 以内的板结良好的盐岩,其主要易溶盐成分见表 1,易溶盐成分试验参照《公路土工试验规程: JTG 3430—2020》进行,依据《公路路基设计规范: JTG D30—2015》中盐渍土分类,取样盐岩属于氯盐渍土。卤水部分主要化学成分见表 2,化学成分试验参照《水工混凝土试验规程: SL/T 352—2020》。



(a) 盐岩



(b) 饱和卤水

图 1 试验盐岩及卤水取样位置

Fig. 1 Sampling location of test salt rock and brine solution

表 1 盐岩主要易溶盐成分

Table 1 Main soluble salt compositions of salt rock							
阴离子含量/%			阳离子含量/%			总盐 量/%	$c(\text{Cl})/$ $2c(\text{SO}_4^{2-})$
HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$		
0.02	35.69	4.55	0.88	0.23	23.86	65.18	10.61

注：表中 $c(\text{Cl}^-)$ 为 Cl^- 在 1 kg 土中所含毫摩尔数，下表同。

采用盐岩填筑路基时应满足《公路路基设计规范：JTG D30—2015》中对路基填料粒径的要求。因此，试验前对原状盐岩进行破碎处理，控制粒径为 40 mm 以下。盐岩填料级配按 40，20，10 mm 3 种最大粒径进行缩尺处理，设计 3 种级配的盐岩填料，级配曲线见图 2。对试验盐岩填料进行重型击实试验，得到 SC-10、SC-20、SC-40 级配盐岩填料的 最大干密度分别为 1.69，1.71，1.76 g/cm³，最佳含卤水率分别为 18.4%，16.9%，13.2%。

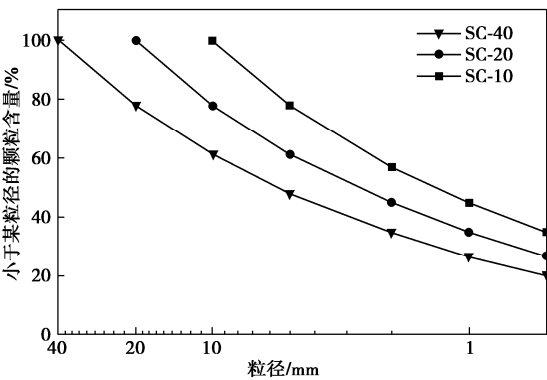


图 2 盐岩填料级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curves of salt rock filler

1.2 试验方案

首先对卤水及盐岩开展降温试验以明确两者相变特征，随后基于含卤水率、最大粒径、压实度及上覆荷载多因素影响下正交试验，研究单次降温作用下盐岩填料变形规律，并开展上覆荷载工况下不同浓度卤水成型盐岩试件冻融循环试验，探究盐岩填料在多次冻融循环后的盐胀累积规律，最后基于实体工程现场监测试验，利用应变、温度传感器进行盐岩路基变形、温度的长期监测，探明盐岩路基结构变形特征。

(1) 卤水降温试验

考虑到四季温度变化下罗布泊盐湖区卤水浓度会发生变化，因此为明确不同浓度卤水的结晶相变差异性，分别配制了 50%，70%，80%，90% 饱和浓度的卤水。同时考虑到卤水所含阴离子中 Cl^- 及 SO_4^{2-} 含

量相对较高，且既有研究表明含 Na_2SO_4 盐渍土盐胀较为严重，因此配制质量分数分别为 4%，8% 的 Na_2SO_4 溶液作为对照组。盐溶液降温试验方案见表 3。

将配制好的盐溶液，分别放置于容器中并安装温度传感器，并保证传感器与盐溶液充分接触，传感器精度为 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 。考虑盐分的溶解度并保证各盐溶液在降温前温度一致，先将盐溶液在 40°C 条件下恒温 1 d，同时为避免试验过程中液态水蒸发导致溶液浓度改变，容器采用隔水膜进行包裹。随后将容器放置于高低温试验箱内进行降温试验，单次试验持续约 2~4 h。

(2) 盐岩填料降温试验

为探明盐岩填料相变特征，首先设计了不同含卤水率下盐岩填料降温试验，含卤水率为 10%，12%，14%，16%，卤水浓度为 100%，级配类型为 SC-10，压实度取 89%；其次开展不同卤水浓度下盐岩填料降温试验，卤水浓度为 50%，70%，80%，90%，含卤水率为 14%，16%，级配类型为 SC-10，压实度取 89%。

压实成型设计级配及压实度的盐岩试件（试件尺寸：直径 5 cm，高度 5 cm），随后将温度传感器埋入盐岩试件内并用胶泥密封，同时采用隔水薄膜进行包裹避免水分散失。考虑到罗布泊地区最高温度为 40°C ，故将盐岩试件在 40°C 恒温环境养护 8 h，随后将其放置于 -20°C 高低温试验箱内进行降温试验。

(3) 单次降温作用下盐岩填料变形试验

实际工程中，盐岩填料盐胀变形是多因素交互作用的结果。开展单次降温作用下盐岩填料变形试验时考虑含卤水率、最大粒径、压实度及上覆荷载等因素的影响，采用四因素三水平正交表，试验设计见表 4。其中，上覆荷载设定水平参考《公路土工试验规程：JTG 3430—2020》T0195—2019 中盐渍土盐胀试验施加上覆荷载值及面层荷载取值，压实度取值范围参考《公路路基施工技术规范：JTG/T 3610—2019》中特殊干旱地区公路压实度控制要求为基准进行确定。

首先采用静压法制备不同技术参数下的盐岩试件（试件尺寸：直径 15.2 cm，高度 12 cm）。将盐岩试件养护 8 h，随后在顶部安装百分表并施加预定荷载，最后将其置于高低温试验箱。考虑到罗布泊地区温度区间为 $-10^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ ，且 $20^\circ\text{C} \sim 40^\circ\text{C}$ 温度区间盐胀变形较微弱，故温度设置采用单次梯度降温： $20^\circ\text{C} \rightarrow 10^\circ\text{C} \rightarrow 5^\circ\text{C} \rightarrow 0^\circ\text{C} \rightarrow -5^\circ\text{C} \rightarrow -10^\circ\text{C}$ ，每级降温结束后

表 2 卤水部分主要化学成分

Table 2 Main chemical compositions of brine							
主要离子	阴离子			阳离子			$c(\text{Cl}^-)/$ $2c(\text{SO}_4^{2-})$
	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{K}^+ + \text{Na}^+$	
含量/(mg·L ⁻¹)	177.6	196039.2	169108.8	37082.0	2685.4	285790.8	1.57

恒温 8 h, 并记录百分表变形量数据, 再进行下一级降温。

表 3 盐溶液降温试验方案

Table 3 Schemes of salt solution cooling tests			
溶液类型	降温环境	盐分浓度	试验前处理
卤水	-20℃恒温	50%饱和浓度	40℃恒温 1 d
		70%饱和浓度	
		80%饱和浓度	
		90%饱和浓度	
Na ₂ SO ₄ 溶液	-20℃恒温	质量分数 4%	40℃恒温 1 d
		质量分数 8%	

表 4 正交试验设计

Table 4 Design of orthogonal tests					
试验 编号	因素				水平组合
	含水 率 W/%	压实度 C/%	最大 粒径 G/mm	上覆荷 载 L/ kPa	
1	12	89	10	0	W12C89G10L0
2	12	93	20	1.415	W12C93G20L1.415
3	12	97	40	2.830	W12C97G40L2.830
4	14	89	20	2.830	W14C89G20L2.830
5	14	93	40	0	W14C93G40L0
6	14	97	10	1.415	W14C97G10L1.415
7	16	89	40	1.415	W16C89G40L1.415
8	16	93	10	2.830	W16C93G10L2.830
9	16	97	20	0	W16C97G20L0

(4) 冻融循环作用下盐岩路基变形试验

考虑到罗布泊地区的环境温度变化为季节逐渐变温和昼夜交替变温的叠加, 因此有必要依据新疆罗布泊地区气温特征, 开展盐岩填料在冻融循环作用下的变形特性研究。本部分开展上覆荷载工况下不同浓度卤水成型盐岩试件冻融循环试验, 试验方案见表 5。

表 5 盐岩填料冻融循环试验方案

Table 5 Freeze-thaw cycle test schemes of salt rock filler						
编号	卤水浓度	上覆荷载	工艺参数	循环次数	降温程序	
1	饱和浓度	0 kPa	最大粒径 40 mm 含卤水率 14% 压实度 89%	7 次	-10℃	
2	70%饱和浓度				12 h	
3	50%饱和浓度				→	
4	饱和浓度	1.415 kPa			40℃	
5	70%饱和浓度				12 h	
6	50%饱和浓度					

采用静压法制备不同技术参数下的盐岩试件(试件尺寸: 直径 15.2 cm, 高度 12 cm), 并依次编号为 1~6。将盐岩试件在恒温环境养护 8 h, 随后在顶部安装百分表并施加预定荷载, 最后将试件放入高低温试验箱内进行试验。由于罗布泊地区温度区间为-10℃~40℃, 因此温度设置以-10℃维持 12 h 再以 40℃升温 12 h 为一个冻融循环周期, 共进行 7 次冻融循环周期。

(5) 盐岩路基结构变形现场监测试验

在室内试验基础上, 依托新疆罗布泊省道 S235 线试验实体工程开展盐岩路基变形、温度监测。试验段位于新疆罗布泊省道 S235 线 (K401+250—

K401+500), 地处干盐湖湖心区, 为典型盐壳地貌。该区域常年干旱少雨, 蒸发强烈, 昼夜温差大, 属暖温带大陆性荒漠干旱气候。试验段监测周期为 1 a, 试验段长度为 250 m。试验段路基修筑工艺见文献[1]。

为充分研究不同路基断面的变形情况, 将应变传感器布设在道路中央断面和行车道中央断面(距道路中央断面 2 m), 共两个平行监测断面, 单个监测断面共布设 3 个监测点位, 分别在盐岩路基结构层上(防水土工布下侧)、中、下间隔 20 cm 各布设一个监测点位, 监测点位编号为 1D~6D。为探明路基变形与温度之间关联性, 将温度传感器仅布设在道路中央断面, 监测点位同应变传感器监测点位, 监测点位编号为 1T~3T。具体盐岩路基监测系统布设方案, 见图 3。

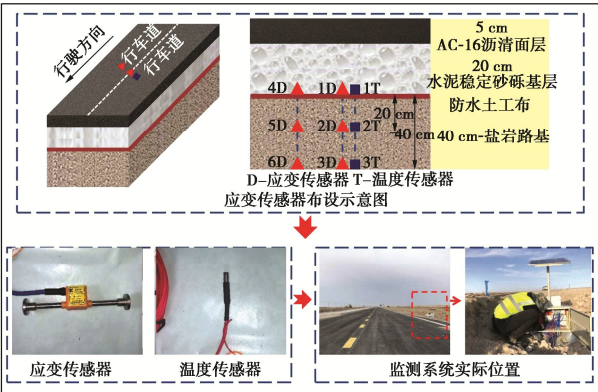


图 3 盐岩路基监测系统布设方案

Fig. 3 Layout of salt rock subgrade monitoring system

2 结果与讨论

2.1 卤水相变特征

不同浓度卤水及 Na₂SO₄ 溶液降温曲线, 见图 4。降温曲线的波动、恒定及跳跃反映了水盐在降温过程中盐分结晶析出和冰水相变释热情况, 可通过温度的变化规律来判断水盐在降温过程中的相变特征。Kozłowski^[13]认为只有当自由水在冻结前释放出足够的潜热时, 才能在降温曲线上观察到跳跃阶段。由图 4(a) 可知, 不同浓度卤水降温曲线均未出现明显的过冷现象, 且平衡及波动维持时间极为短暂。原因是卤水中 Cl⁻ 浓度较高, 而 NaCl 溶解度受温度影响较小, 饱和 NaCl 溶液在-21.1℃ 以下时才会产生冰晶^[14], 故在降温过程中卤水未冻结, 导致卤水在短时间内释放出的潜热有限。且卤水中的易溶盐组成复杂且各盐含量比例不同, 盐分溶解度受温度的影响不同, 势必使得某种盐分先相变释放潜热, 而后其他盐分再相变, 导致不同盐类结晶析出释放出潜热时间不同。因此, 卤水释放的潜热十分有限, 未能补偿体系向环境所散失的热量, 故降温曲线难以出现跳跃阶段及平衡阶段。

由图 4 (b) 可知, Na_2SO_4 溶液冻结特征显著, 降温曲线存在明显的跳跃及平衡阶段。原因是降温过程中 Na_2SO_4 溶液存在过饱和阶段, 其释放出大量潜热, 残余潜热使降温曲线上出现了明显的跳跃及平衡阶段。其中 4% Na_2SO_4 溶液仅发生一次相变, 在 -1.05°C 时出现跳跃, 当溶液温度升至 -0.72°C 左右时温度开始下降, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体未析出。而 8% Na_2SO_4 溶液发生了两次相变, 当溶液温度降到 -1.33°C 时, 出现短暂的跳跃发生冰水相变, 随着冰水相变的进一步发生, 导致剩余溶液浓度增大, $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体突然析出, 其在 -2.03°C 再次发生显著的温度跳跃, 释放的潜热使溶液温度最高达到 0.92°C , 然后降至 -1.19°C 左右保持稳定。这种差异性主要原因是 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体析出必须达到一定的过饱和和态, 否则不会析出^[15]。

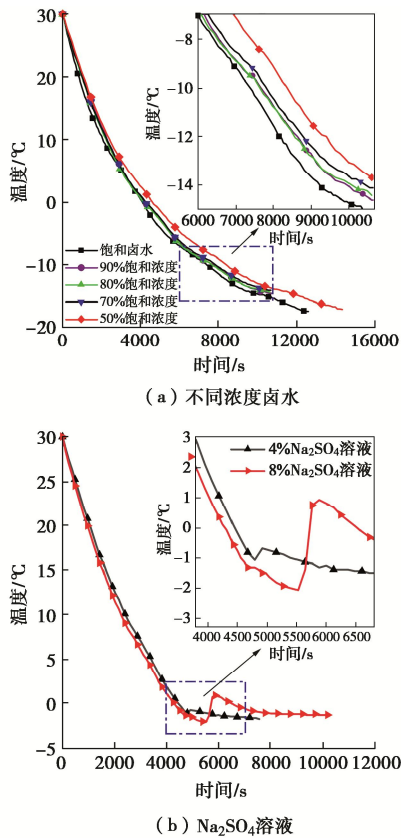


图 4 卤水及 Na_2SO_4 溶液降温曲线

Fig. 4 Cooling curves of brine and Na_2SO_4 solution

卤水在降温过程中潜热的释放造成降温速率出现突变或不连续, 且平衡阶段维持时间极为短暂, 其相变温度较难明确。因此, 参考 Han 等^[16]方法, 基于二维数据点, 计算从正温到负温曲线末端的切线斜率, 将切线斜率的突变视为相变温度, 见下式:

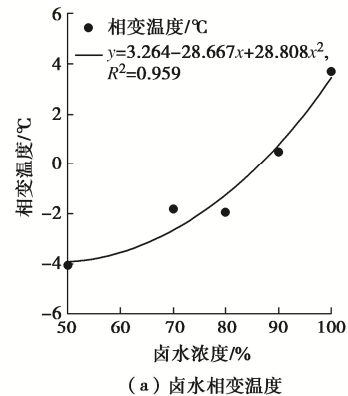
$$\lambda_i = \left| \frac{T_i - T_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \right| \quad (i > 1) \quad (1)$$

式中: λ_i 为降温曲线在某一时间点的斜率; T_i 为对应与时间点 t_i 的温度点 ($^\circ\text{C}$); t_i 为时间 (s)。

$$T_i = \begin{cases} T_i & \lambda_i = 0 \\ \frac{\sum_{k=1}^n T_k}{n} & \lambda_k = 0 \quad \lambda_k < \lambda_j, k \neq j \\ T_i & \lambda_i < \lambda_j \quad i \neq j \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_i 为相变温度, i, j, k 表示 T 和 λ 的下角标, 其中 $j \neq i$ ($j=1, 2, \dots; i-1, i+1, \dots$), k 对应拐点附近不连续的二维数据点, 并重新编号。

依据上述方法确定卤水相变温度, 结果见图 5。由图 5 (a) 可知, 随着卤水浓度升高, 相变温度呈上升趋势, 50%饱和浓度时最低, 为 -4.06°C 。可见, 卤水浓度越高, 其在一定程度内相变温度越高。原因是当温度降低时, 卤水中各易溶盐溶解度减小, 使各盐分浓度达到饱和状态并析出, 对于未饱和卤水由于自身浓度较低, 需降至更低温度方可快速结晶并释放大量潜热。此外, 初步判断卤水相变温度分布于 $-5^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$ 。



(a) 卤水相变温度

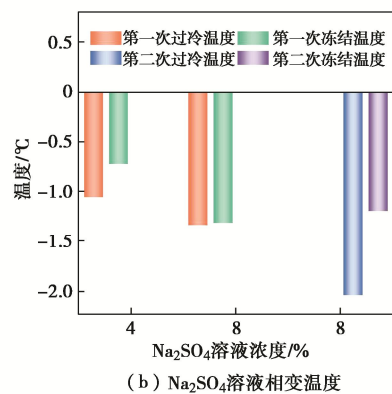


图 5 卤水及 Na_2SO_4 溶液相变温度

Fig. 5 Phase transition temperatures of brine and Na_2SO_4 solution

由图 5 (b) 可知, 浓度 4% 及 8% 的 Na_2SO_4 溶液第一次相变的过冷温度分别为 -1.05°C , -1.33°C , 冻结温度分别为 -0.72°C , -1.31°C 。可见, 各浓度 Na_2SO_4 溶液的第一次相变均发生于负温下, 且 Na_2SO_4 溶液浓度越大, 其过冷温度与冻结温度差距越小。原因是 8% Na_2SO_4 溶液第一次相变是冰水相变, 潜热释放不足且时间短。由图 5 (b) 还可知, 8% Na_2SO_4 溶液第二次相变的过冷温度为 -2.03°C 。可见, 8% Na_2SO_4 溶

液由于第一次相变后剩余溶液饱和度较高, 无多余水分, 使二次相变所需过冷温度不用过低即可达到低共熔冰盐合晶点。此外, 其二次相变是 $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 晶体析出释放大量潜热, 所以其冻结温度达到 -1.19°C 。

2.2 盐岩填料相变特征

(1) 含卤水率对盐岩填料相变的影响

不同含卤水率盐岩试件降温曲线及相变温度, 见图 6。由图 6 (a) 可知, 不同含卤水率盐岩试件降温曲线均出现显著的过冷及温度跳跃阶段, 均在负温时完成盐分相变结晶。此外, 盐岩填料与卤水降温曲线变化存在差异, 这是因为相较于卤水盐岩填料含盐量更高, 其易溶盐含量高达 60% 以上, 在拌合过程中盐岩与卤水进行大量离子交换, 进而颗粒间卤水中赋存更多的易溶盐, 在降温过程中易溶盐发生结晶相变, 潜热释放充足, 使得降温曲线在某一温度时突然升高。

由图 6 (b) 可知, 不同含卤水率盐岩试件过冷温度主要分布于 $-6^\circ\text{C} \sim -10^\circ\text{C}$ 。且随着含卤水率增加, 盐岩试件的相变温度与过冷温度的温度差整体呈上升趋势, 这是由于卤水掺量的增加, 土-水-盐体系中的易溶盐总量随着增加, 导致在降温过程中盐岩填料在孔隙中析出更多的结晶盐, 进而释放出更高潜热。

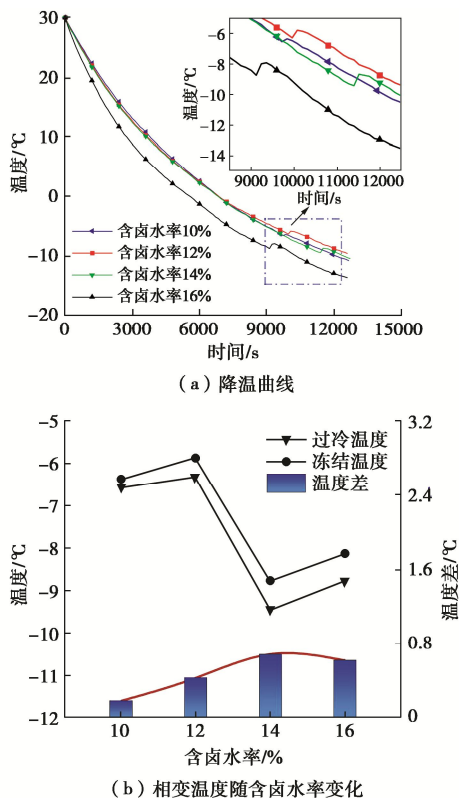


图 6 不同含卤水率盐岩试件降温曲线及相变温度

Fig. 6 Cooling curves and phase transition temperatures of salt rock specimens with different brine contents

(2) 卤水浓度对盐岩填料相变的影响

在含卤水率分别为 14%, 16% 工况下, 不同浓度卤水成型盐岩试件降温曲线见图 7。由图 7 可知, 不

同浓度卤水成型盐岩试件在降温过程中温度随时间变化趋势基本一致, 降温速率差异较低, 降温曲线均存在显著的温度突变点。其中含卤水率为 14% 的盐岩试件突变温度主要分布于 $-5^\circ\text{C} \sim -7^\circ\text{C}$, 温度区间略低于含卤水率为 16% 的各盐岩试件。可见, 含卤水率越高时, 盐岩填料的相变温度越高, 原因是含卤水率越高, 盐岩填料孔隙溶液量越大, 溶液中溶解的易溶盐也越多, 在降温过程中盐分晶体析出更多, 从而使其在降温过程中的相变温度整体偏高。

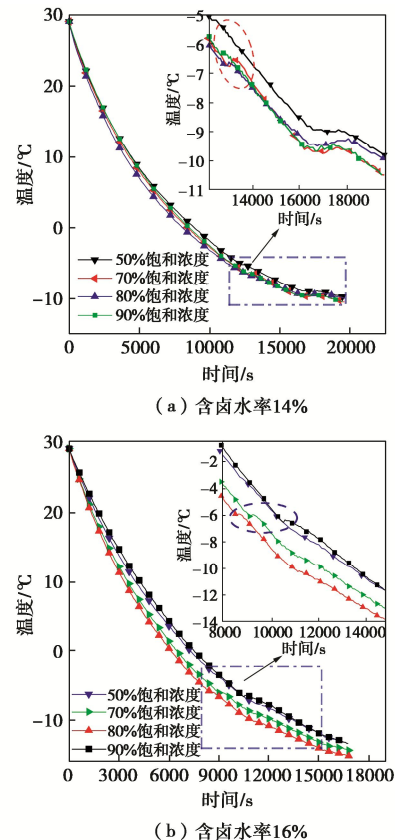


图 7 不同浓度卤水成型盐岩试件降温曲线

Fig. 7 Cooling curves of salt rock specimens formed with brine of different concentrations

进一步明确卤水浓度对盐岩填料相变特征的影响规律, 基于式 (1), (2), 计算各盐岩相变温度, 结果见图 8。由图 8 可知, 同一含卤水率工况下, 随着拌和卤水浓度升高, 盐岩相变温度整体呈下降趋势。其中盐岩最高及最低相变温度分别为 -3.1°C , -8.7°C 。根据多孔介质相变理论^[17]的研究结果, 此种情况是由孔隙半径对相变温度的影响所导致的。盐岩填料与卤水闷料过程中, 卤水与盐岩颗粒间发生离子交换, 初始拌合卤水浓度越低, 孔隙溶液量越大, 使得溶液溶解更多盐岩填料盐分, 稳定后盐岩填料孔隙半径较大, 导致在降温过程中盐分更易析出晶体释放出更高潜热, 故随着初始拌合卤水浓度升高, 相变温度呈下降趋势。因此在实际盐岩路基填筑施工过程中, 应保证

拌合卤水具有较高饱和度,从而有效降低盐岩填料盐胀剧烈温度区间,使路基具有良好的稳定性及耐久性。

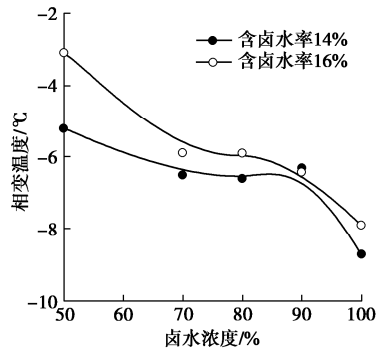


图8 不同卤水浓度成型盐岩试件相变温度

Fig. 8 Phase transformation temperatures of molded salt rock specimens with different brine concentrations

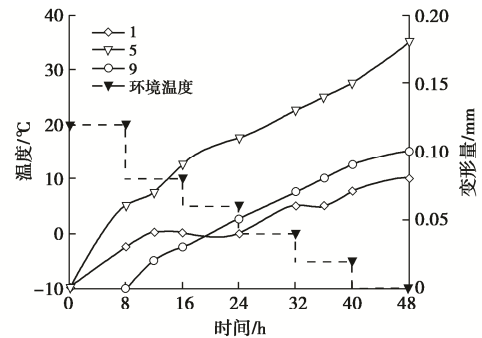
2.3 盐岩填料变形特性

(1) 单次降温作用下盐岩填料变形特性

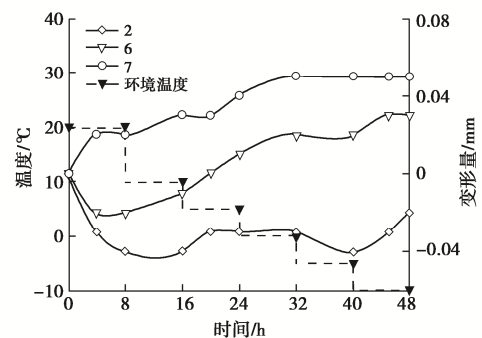
单次降温作用下多因素交互作用的各盐岩试件变形曲线及最终变形量,见图9。由图9(a)可知,温度逐级递减,试件内盐分结晶析出,温度越低盐胀量越大。试件5盐胀量较大,因为其制备时采用14%饱和卤水拌合最大粒径40 mm填料,而含卤水率越高含盐量越高,且粗颗粒盐岩颗粒嵌挤骨架更容易受到盐分结晶影响,故其盐胀变形较大,说明盐胀量在一定程度上由含卤水率和颗粒级配特点共同决定。在温度由20℃降至10℃时,试件9未产生盐胀变形,说明较高的压实度在一定程度上抑制了初期盐胀变形。由图9(b)可知,由于施加1.415 kPa的上覆荷载,试件盐胀变形均得到了不同程度抑制。试件2,6起胀温度降低,且20℃时为负变形状态,表明上覆荷载对盐胀的延缓作用明显甚至产生抑制作用。而试件7盐胀量最大,是因为其制备时采用16%饱和卤水拌合最大粒径40 mm填料,总体含盐量较高,盐结晶析出更多。由图9(c)可知,当上覆荷载提升至2.83 kPa时,试件盐胀变形得到较大程度的限制。其中20℃→10℃阶段是发生体缩的主要阶段,此阶段盐岩颗粒之间相互作用较弱、孔隙较大,在上覆荷载作用下颗粒产生了重分布现象。随着进一步降温,盐晶逐渐生长产生的盐胀使土体发生了膨胀变形导致试件体缩减小,但这种膨胀变形较微弱,表现为最终变形量为负值。综上所述,单次降温作用下盐岩路基填料变形并不是理想的单因素作用的结果,而是上覆荷载、含卤水率、最大粒径等多因素交互作用的结果。

由图9(d)可知,盐岩试件整体盐胀变形量较小,不同盐岩试件最终变形量介于-0.09~0.18 mm,这是由于盐岩成分以氯盐为主,硫酸盐含量较少,氯盐盐胀微弱,进而导致整体盐胀变形量较小。且盐岩试件

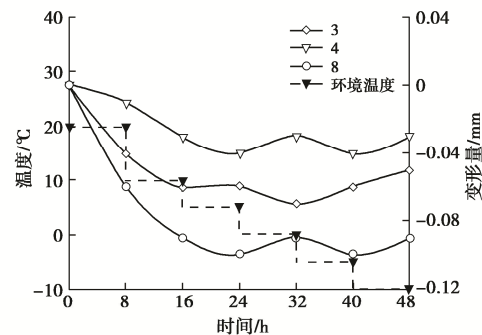
中盐胀主要受液相盐分影响,在降温过程中盐岩填料孔隙中卤水的盐分结晶析出和液相浓度的降低会使得盐岩间结晶与液相总体积增大,进而引起降温后盐岩填料盐胀变形量的增加,但盐胀增加程度微弱。



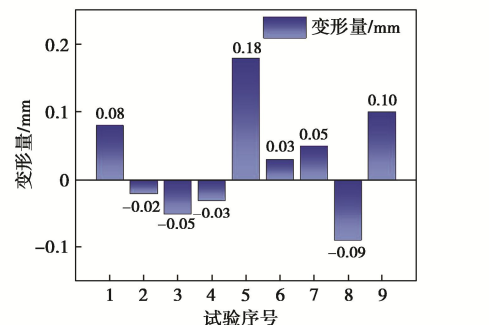
(a) 0 kPa上覆荷载



(b) 1.415 kPa上覆荷载



(c) 2.83 kPa上覆荷载



(d) 盐岩试件总变形量

图9 单次降温作用下各盐岩试件变形曲线及最终变形量

Fig. 9 Deformation curves and final deformations of each salt rock specimen under single cooling effect

综上所述,在盐岩填筑路基设计及施工时,按最佳含卤水率拌合盐岩填料并使压实度满足要求,盐岩

路基能具备较低的盐胀性同时保证良好的路用性能。

为考察上覆荷载、含卤水率、最大粒径及压实度因素对盐岩填料变形特性的影响程度, 对上述试验结果进行极差分析, 结果见图 10。由图 10 可知, 极差分析中含卤水率、压实度、最大粒径及上覆荷载极差值分别为 0.057, 0.01, 0.053, 0.177。即各因素对盐岩填料变形的影响顺序为: 上覆荷载>含卤水率>最大粒径>压实度, 其中上覆荷载对盐岩填料变形的影响最为明显。此外, 盐岩填料盐胀变形随最大粒径增加呈显著增长趋势, 因此在盐岩填料路基实际施工时应严格控制盐岩填料破碎的最大粒径满足规范要求。

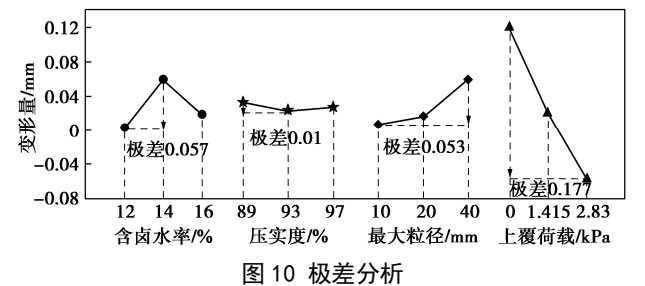


图 10 极差分析

考虑到在极差分析中, 压实度对盐岩填料变形影响较小, 故方差分析仅选取含卤水率、最大粒径及上覆荷载 3 种因素, 结果见表 6。由表 6 可知, 方差分析中 3 种因素 P 值分别为 0.030, 0.031, 0.003, 均小于 0.05, 故认为 3 种因素均对盐岩填料变形有影响, 影响大小顺序为: 上覆荷载>含卤水率>最大粒径, 这与极差分析结论一致。

表 6 方差分析

Table 6 Variance analysis					
方差来源	III类平方和	自由度	均方	F 值	显著性
修正模型	0.57	6	0.010	122.143	0.008
截距	0.007	1	0.007	89.286	0.011
含卤水率(W)	0.005	2	0.003	32.714	0.030
最大粒径(G)	0.005	2	0.002	31.000	0.031
上覆荷载(L)	0.047	2	0.024	302.714	0.003

(2) 冻融循环作用下盐岩填料变形特性

冻融循环作用下不同浓度卤水成型盐岩试件盐胀变形规律见图 11。由图 11 可知, 随着冻融循环周期增加, 试件盐胀变形量呈上升趋势。第 1 周期的盐胀量较小, 因为冻融作用使土体结构变得疏松, 孔隙率变大, 对盐胀有一定的缓解作用。第 2 周期到第 7 周期盐胀量逐步增加, 表现出盐胀累加性, 但盐胀量趋于稳定, 是因为盐岩逐渐达到平衡状态, 累积效应不存在无限叠加性质^[18]。此外, 饱和卤水、70%饱和浓度卤水及 50%饱和浓度卤水成型盐岩试件在 7 次冻融循环后的盐胀量分别为 0.38, 1.14, 1.81 mm, 可见随着拌和卤水浓度的降低, 试件盐胀量逐渐增大, 这是由于拌合后卤水会与盐岩颗粒产生离子交换, 导致

初始浓度较低的卤水其浓度及总含量逐渐增加, 进而在降温过程中卤水中可析出的盐结晶增加, 故随着冻结过程进行, 盐分结晶逐渐生长, 最终产生的盐胀变形也越大^[19]。在降温时盐结晶会使盐岩颗粒错动体积膨胀, 升温高时盐结晶溶解, 盐岩颗粒回落, 但仍存在部分盐岩颗粒虽失去了部分结晶盐支撑, 但还存在其他盐岩颗粒的相互嵌挤, 使得溶解期回落现象不显著, 表现为残余盐胀变形。

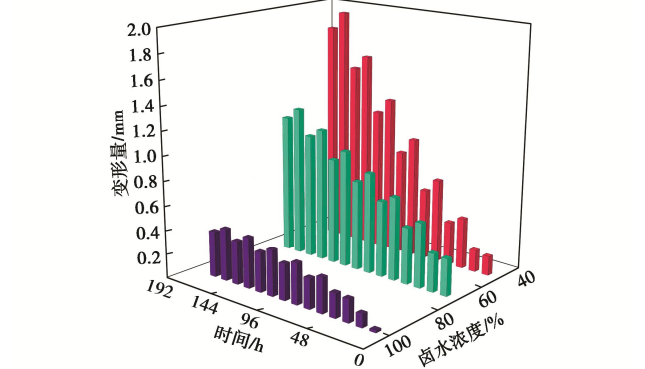


图 11 不同浓度卤水成型盐岩试件盐胀变形规律

Fig. 11 Salt-swelling deformation laws of salt rock specimens

formed by brine with different concentrations

为明确盐岩填料在冻融循环作用下卤水浓度与盐胀变形量的关系, 对所测定数据进行拟合分析, 表达式见下式:

$$z = 0.052 + 0.25 \times 2.323 \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{x - 104.521}{62.610\sqrt{2}} \right) \right) \cdot \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{y - 0.766}{-0.269\sqrt{2}} \right) \right) \quad (3)$$

式中: x 为卤水浓度 (%); y 为冻融循环时间 (h); z 为冻融循环结束后盐胀量 (mm)。

函数拟合效果见图 12, 由图 12 可知, 随着冻融循环周期增加, 不同卤水浓度成型盐岩试件盐胀变形量逐渐增加, 增加幅度随卤水浓度的减小而增大, 这与实际条件下盐岩填料盐胀变形量规律一致。

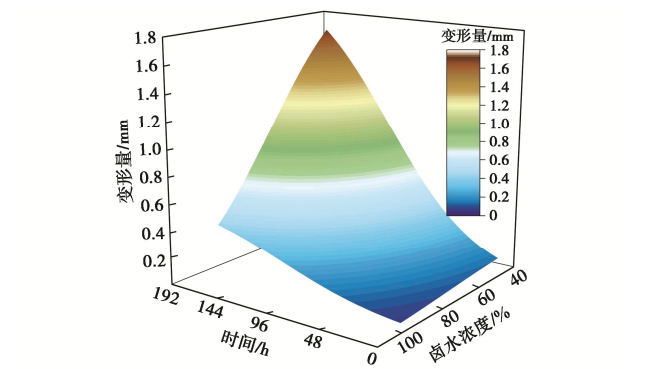


图 12 盐胀量与冻融时间、卤水浓度的拟合关系图

Fig. 12 Fitting relationship among salt expansion, freeze-thaw time and brine concentration

上覆荷载工况下不同浓度卤水成型盐岩试件盐

胀变形规律见图 13。由图 13 可知, 上覆荷载为 0 kPa 时, 饱和卤水、70%饱和浓度卤水及 50%饱和浓度卤水成型盐岩试件最终盐胀量分别为 0.38, 1.14, 1.81 mm; 上覆荷载为 1.415 kPa 时, 饱和卤水、70%饱和浓度卤水及 50%饱和浓度卤水成型盐岩试件最终盐胀量分别为 0.23, 0.33, 1.13 mm。对比无荷和有荷工况下盐胀量, 可知上覆荷载对盐胀变形有显著的抑制作用。原因是在冻融循环过程中, 上覆荷载能有效减小盐类晶体生成的数量且抑制晶体在增长过程中产生的结晶膨胀力, 使得最终盐胀量低于无荷载时的盐胀量。此外, 随着冻融循环周期增加, 盐胀衰减率曲线整体呈下降趋势, 说明上覆荷载对盐胀变形的抑制效果逐渐减弱, 但 70%饱和浓度卤水成型盐岩试件在 7 次冻融循环后的盐胀衰减率仍高达 71%, 表明上覆荷载对盐胀变形的抑制作用是显著的。

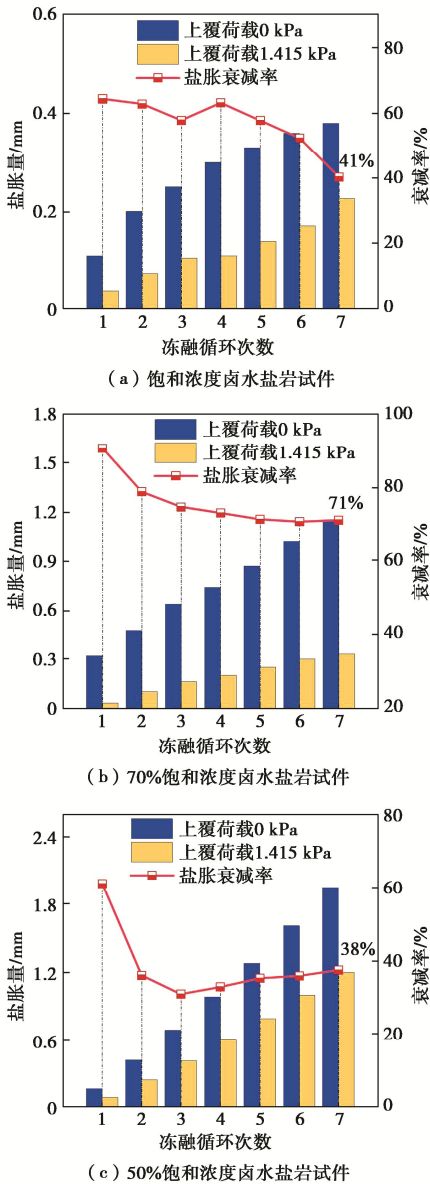


图 13 不同浓度卤水成型盐岩试件盐胀变形规律
Fig. 13 Salt swelling deformation laws of salt rock specimens formed by brine with different concentrations

进一步分析, 当上覆荷载为 0 kPa 时, 饱和卤水、70%饱和浓度卤水及 50%饱和浓度卤水成型盐岩试件在 7 次冻融循环后的盐胀率分别为 0.32%, 0.95%, 1.51%, 均满足《公路路基设计规范: JTG D30—2015》中针对二级及二级以下路基盐胀率要求 (盐胀率 $\leq 2\%$)。因此, 在进行盐岩路基设计与施工时, 应根据路基设计高度及盐胀深度进行路基防盐胀设计, 充分利用上覆荷载对盐胀的抑制作用, 同时施工时采用较高含盐量卤水, 以保证盐岩路基具有良好的使用性能。

2.4 基于现场监测的盐岩路基变形特性

(1) 盐岩路基变形规律分析

盐岩路基不同监测断面变形趋势, 见图 14。由图 14 可知, 道路中央断面与行车道中央断面盐岩路基变形规律一致, 变形量随时间的增加先减小后增大, 与温度趋势变化一致, 且应变值沿深度方向呈减小趋势。可见, 在监测周期内, 盐岩路基表现出明显的寒季期盐胀变形与温暖期沉降变形现象, 且整体变形量较小, 这与 2.3 节室内盐岩填料盐胀变形测试结果基本一致。

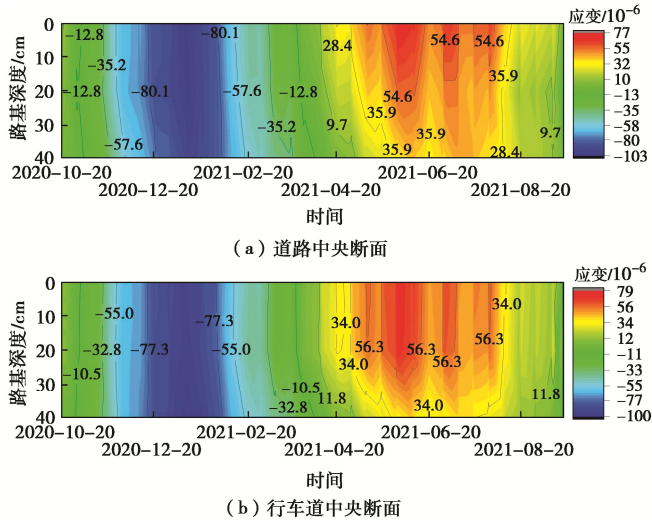


图 14 盐岩路基变形趋势

Fig. 14 Deformation trend of salt rock subgrade

盐岩路基不同深度变形随时间变化规律, 见图 15。由图 15 可知, 道路中央断面与行车道中央断面变形规律一致, 表现为变形量随着时间的增加先减小后增加再减小, 均呈现正弦波式的周期性变化。但在不同深度时, 二者的应变差存在差异。当路基深度为 0 cm 时, 在寒季期监测点 1D 应变值大于 4D, 应变差介于 $(0.98 \sim 6.17) \times 10^{-6}$, 原因是行车荷载抑制了部分盐胀变形; 在温暖期监测点 1D 应变值大于 4D, 原因是行车荷载使路基在寒季期盐胀时结构更为密实, 导致温暖期结晶盐溶解后回落量相对较小。当路基深度为 20 cm 时, 在寒季期监测点 2D 应变值大于 5D; 在温暖期监测点 2D 应变值小于 5D, 应变差介于

$(2.43 \sim 7.23) \times 10^{-6}$ 。而当路基深度为 40 cm 时, 在寒季期监测点 3D 应变值小于 6D; 在温暖期则相反, 应变差介于 $(1.02 \sim 5.89) \times 10^{-6}$ 。对比不同深度监测点位应变浮动范围可知, 由于温度梯度影响, 沿路基深度方向变形敏感性降低。

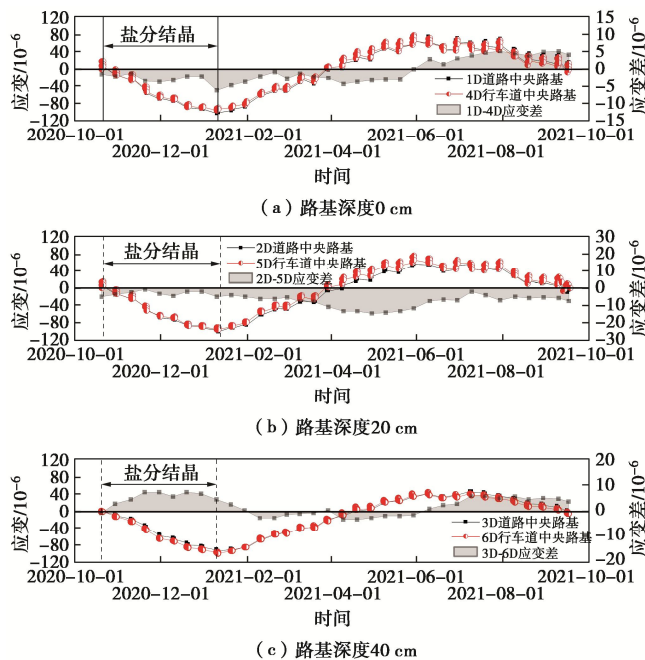


图 15 盐岩路基不同深度变形随时间变化规律

Fig. 15 Time-varying rules of deformation of salt rock subgrade at different depths

(2) 盐岩路基变形与温度相关性分析

为进一步揭示盐岩路基变形与温度相关性, 盐岩路基不同深度时, 道路中央断面变形与温度发展规律, 见图 16。由图 16 可知, 路基变形与温度发展规律相关性较高, 两者变化趋势同步, 表现为随着监测时间增加路基变形及温度均先减小后增加再减小, 均呈现正弦波式的周期性变化。在路基深度为 0, 20, 40 cm 时, 最大盐胀变形依次为 99.23×10^{-6} , 98.9×10^{-6} , 92.92×10^{-6} , 相应温度依次为 -4.9°C , -4.05°C , -2.6°C ; 最大沉降变形依次为 68×10^{-6} , 54.9×10^{-6} , 45.47×10^{-6} , 相应温度依次为 34°C , 33.5°C , 31°C 。可见, 随着盐岩路基深度增加, 路基变形与温度振幅均减小。同时盐岩路基结构层在季节冻融条件下的变形主要与温度相关, 且温度变化的影响随着深度增加逐渐减弱。这与室内试验中温度影响下盐岩填料变形发育规律基本一致, 即温度是影响盐岩路基变形的主要因素。

此外, 根据盐岩路基变形规律可将其分为 4 个阶段: 阶段 I 为盐胀变形阶段, 10 月至次年 1 月, 该阶段盐胀变形随温度降低呈增加趋势。阶段 II 为盐胀变形恢复阶段, 2 月初至 4 月, 结晶盐随着温度回升溶解,

但并未完全溶解, 部分结晶盐残留在路基中。阶段 III 为沉降变形阶段, 4 月初开始, 该阶段温度快速上升, 孔隙中充当骨架的结晶盐溶解消失, 土体在自重应力与水重力作用下, 自然沉降。阶段 IV 为变形稳定阶段, 自 7 月初开始历时 3 个月, 该阶段温度变化较小, 盐岩结构重新调整, 路基骨架达到平衡状态并趋于稳定。

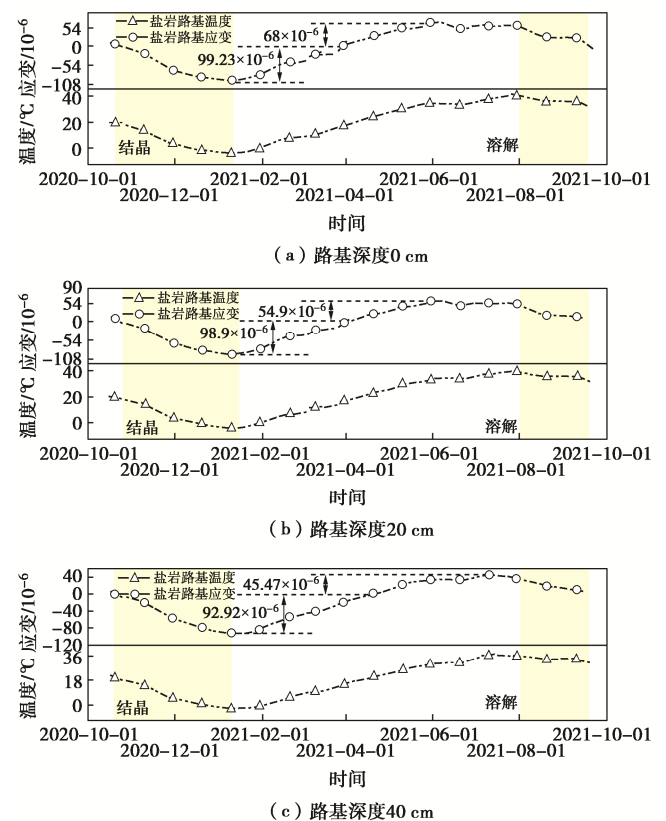


图 16 路基道路中央断面变形与温度关系

Fig. 16 Relationship between deformation of central section of subgrade road and temperature

进一步探究盐岩路基变形与温度之间的定量关系, 对路基变形与温度试验数据进行拟合, 结果见图 17。由图 17 可知, 盐岩路基变形与温度拟合相关系数 R^2 均在 0.94 以上, 拟合效果好, 说明路基变形与温度具有较强的线性相关性。图 17 (a) 为第一次负温结束前温度与变形拟合关系, 其中路基深度为 0 cm 时斜率值最高, 40 cm 时最小, 原因是在降温过程中路基浅层温度更低, 导致路基盐胀变形较为剧烈。图 17 (b) 为经历一次冻融循环后路基再次进入低温状态初期温度与变形拟合关系, 其中路基深度为 20 cm 时斜率值最高, 0 cm 时最小, 与上述规律存在差异, 原因是经历一次冻融后, 路基水分重分布, 20 cm 处路基的含水率最高, 故其在降温过程中的盐胀变形更为剧烈。

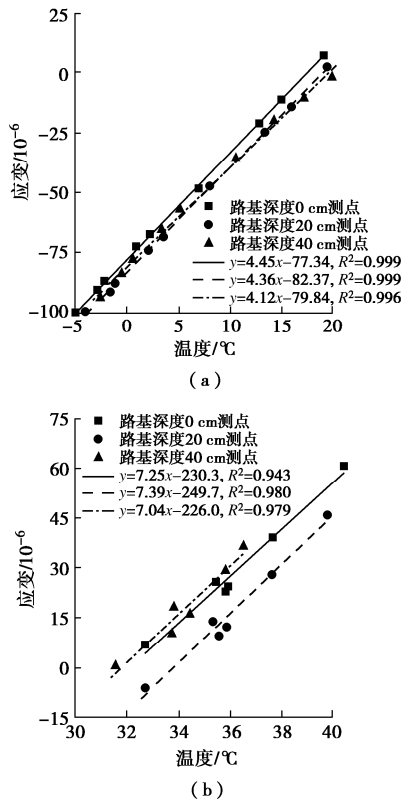


图 17 路基变形与温度拟合关系

Fig. 17 Fitting relationship between deformation and temperature

3 结 论

(1) 不同浓度卤水降温曲线均未出现明显的过冷阶段, 且降温曲线平衡及波动维持时间极为短暂, 卤水在 -20°C 环境中并未发生冻结现象, 且卤水相变温度随卤水浓度增加而升高。

(2) 盐岩填料的降温曲线存在显著过冷及温度跳跃阶段, 其相变温度与过冷温度的温度差随着含卤水率的升高呈上升趋势; 盐岩填料相变温度随卤水浓度增加而下降。

(3) 单次降温作用下盐岩填料最终变形量介于 $-0.09 \sim 0.18 \text{ mm}$; 极差及方差分析表明: 各因素对盐岩填料变形的影响顺序为: 上覆荷载 $>$ 含卤水率 $>$ 最大粒径 $>$ 压实度。

(4) 冻融循环作用下拌合卤水浓度越低, 盐岩填料盐胀量越大; 上覆荷载对盐胀变形抑制作用较强, 盐胀衰减率曲线随冻融循环周期增加呈下降趋势。

(5) 盐岩路基在道路中央与行车道中央断面变形规律一致, 均呈现正弦波式周期性变化, 且应变值沿深度方向呈减小趋势; 路基变形分为盐胀变形阶段、盐胀变形恢复阶段、沉降变形阶段、变形稳定阶段; 同时盐岩路基变形与温度具有较强的线性相关性。

参考文献:

- [1] 奚鹤, 陈浩宇, 宋亮, 等. 罗布泊盐岩路基施工工艺优化及稳定性监测[J]. 公路, 2022, 67(7): 21-27. (XI He, CHEN Hao-yu, SONG Liang, et al. Construction technology optimization and stability monitoring of salt rock subgrade in Lop Nur[J]. Highway, 2022, 67(7): 21-27. (in Chinese))
- [2] 宋亮, 牛亮亮, 王朝辉, 等. 盐岩路基工程特性研究进展[J]. 公路工程, 2021, 46(6): 156-162. (SONG Liang, NIU Liangliang, WANG Chaohui, et al. Advances in engineering characteristics in salt rock subgrade[J]. Highway Engineering, 2021, 46(6): 156-162. (in Chinese))
- [3] FENG R, WU L, WANG B. Numerical simulation for temperature field and salt heave influential depth estimation in sulfate saline soil highway foundations[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(10): 04020196.
- [4] LAI Y, WAN X, ZHANG M. An experimental study on the influence of cooling rates on salt expansion in sodium sulfate soils[J]. Cold Regions Science and Technology, 2016, 124: 67-76.
- [5] WAN X, LIAO M, DU L. Experimental study on the influence of temperature on salt expansion of sodium sulfate saline soil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 11(3): 1-7.
- [6] XIAO Z, LAI Y, YOU Z, et al. The phase change process and properties of saline soil during cooling[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, 42(9): 3923-3932.
- [7] GENKINGER S, PUTNIS A. Crystallisation of sodium sulfate: supersaturation and metastable phases[J]. Environmental Geology, 2007, 52(2): 329-337.
- [8] ZHANG S, ZHANG J, GUI Y, et al. Deformation properties of coarse-grained sulfate saline soil under the freeze-thaw precipitation cycle[J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 177: 103121.
- [9] ZHANG X, WANG Q, YU T, et al. Numerical study on the multifield mathematical coupled model of hydraulic-thermal-salt-mechanical in saturated freezing saline soil[J]. International Journal of Geomechanics, 2018, 18(7): 04018064.
- [10] WU D, LAI Y, ZHANG M. Thermo-hydro-salt-mechanical coupled model for saturated porous media based on crystallization kinetics[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 133: 94-107.
- [11] 卢炜, 陈伟志. 高速铁路路基用砾类盐渍土变形特征研

- 究[J]. 铁道学报, 2019, **41**(10): 84-92. (LU Wei, CHEN Weizhi. Study on deformation characteristics of gravel saline soil constructing subgrade of high-speed railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, **41**(10): 84-92. (in Chinese))
- [12] 杨晓华, 刘伟, 张莎莎, 等. 温度变化对粗粒硫酸盐渍土路基变形影响分析[J]. 中国公路学报, 2020, **33**(3): 64-72. (YANG Xiaohua, LIU Wei, ZHANG Shasha, et al. Influence of temperature change on deformation of coarse-grained sulfate saline soil subgrade[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, **33**(3): 64-72. (in Chinese))
- [13] KOZŁOWSKI T. Some factors affecting supercooling and the equilibrium freezing point in soil-water systems[J]. Cold Regions Science & Technology, 2009, **59**(1): 25-33.
- [14] 肖泽岸, 朱霖泽, 侯振荣, 等. 含 NaCl 和 Na₂SO₄ 双组分盐渍土的水盐相变温度研究[J]. 冰川冻土, 2021, **43**(4): 1121-1129. (XIAO Zean, ZHU Linze, HOU Zhenrong, et al. Study on water/salt phase transition temperature of saline soil containing sodium chloride and sodium sulfate[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, **43**(4): 1121-1129. (in Chinese))
- [15] 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 Xusheng, LAI Yuanming. Experimental study on freezing temperature and salt crystal precipitation of sodium sulphate solution and sodium sulphate saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(11): 2090-2096. (in Chinese))
- [16] HAN Y, WANG Q, KONG Y, et al. Experiments on the initial freezing point of dispersive saline soil[J]. Catena, 2018, **171**: 681-690.
- [17] XIAO Z, LAI Y, ZHANG M. Study on the freezing temperature of saline soil[J]. Acta Geotechnica, 2018, **13**(1): 195-205.
- [18] 高树森, 师永坤. 碎石类土盐渍化评价初探[J]. 岩土工程学报, 1996, **18**(3): 96-99. (GAO Shusen, SHI Yongkun. Preliminary study on salinization evaluation of gravel soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(3): 96-99. (in Chinese))
- [19] 应赛, 周凤玺, 文桃, 等. 降温过程中孔隙的结晶变形[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, **39**(增刊1): 2954-2963. (YING Sai, ZHOU Fengxi, WEN Tao, et al. Deformation of a pore induced by crystallization during cooling process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, **39**(S1): 2954-2963. (in Chinese))

2024 年黄文熙讲座（第 27 讲）学术报告会通知

2024 年黄文熙讲座（第 27 讲）学术报告会将于 2024 年 4 月 13 日（星期六）在南京举行，由河海大学承办。2024 年黄文熙讲座主讲人为华东建筑集团股份有限公司总工程师王卫东教授级高级工程师，讲座题目为“软土深基坑变形及环境影响分析方法与控制技术”，讲座文稿已刊登在《岩土工程学报》2024 年第 1 期黄文熙讲座栏目。黄文熙讲座学术报告会期间，还将邀请有关学者专家做学术报告，并召开《岩土工程学报》第十三届编委会第三次全体会议。

热烈欢迎全国岩土工程界的专家学者及各有关单位的代表参会。有意参会者请填写会议回执，于 2024 年 3 月 31 日前通过电子邮件发送至会务组，以便会议安排。有关本次学术报告会的最新信息请关注网站 www.cgejournal.com（岩土工程学报）。

会务组为《岩土工程学报》编委预定住宿，其他参会人员

请提前自行预定住宿，河海大学附近有隽恒酒店、华东饭店、西康宾馆、瑞迪大酒店等宾馆。

联系人：吴勇信：18951712465，姬建：18795463502，张飞：13675110680，孙逸飞：15850656968，代登辉：15151828872；会务联系邮箱：denghui_dai@163.com（代登辉）。

编委会会议：4 月 12 日下午 14:00~19:30，《岩土工程学报》编委在南京市鼓楼区西康路 1 号河海大学国际会议中心（隽恒酒店）报到，4 月 12 日晚 20:00 召开《岩土工程学报》编委会全体会议，地点在河海大学闻天馆 203 会议室。

黄文熙讲座学术报告会：4 月 13 日上午 8:00~9:00 学术报告会代表在河海大学闻天馆 108 会议室报到。请您务必在 2024 年 3 月 31 日前返回会议回执。回执请发送到：denghui_dai@163.com。

（本刊编辑部）