

文章编号:1671-8879(2014)04-0013-07

滨海氯盐渍土溶陷及盐胀特性

魏 进¹,杜秦文¹,冯成祥²

(1. 长安大学 公路学院,陕西 西安 710064; 2. 天津市市政工程研究院,天津 300051)

摘 要:为了深入研究滨海氯盐渍土的溶陷和盐胀特性,在不同初始含水量、含盐量及上覆荷载条件下,进行了室内溶陷试验研究,完成了 4 次降温-升温循环下的盐胀试验,得到了不同含盐量试样的冻融循环盐胀规律,并通过改变荷载条件,对比分析了无荷和有荷情况下的盐胀规律。研究结果表明:影响氯盐渍土溶陷性质的主要因素是初始含水量和含盐量,初始含水量较小时,土样溶陷的敏感度更强,其溶陷系数较大;随着含盐量增大,不同荷载条件下的溶陷系数均表现为抛物线趋势,当含盐量为 10% 时,溶陷系数曲线出现明显的峰值;5℃~ -10℃ 的降温区间是盐胀量迅速增大期;冻融循环条件下,盐渍土出现残余盐胀量,并表现盐胀累加性,累加性随着冻融循环次数的增多而减弱;上覆荷载对盐胀有明显的抑制作用,荷载作用使起胀温度大大提高,说明荷载对盐胀的发展有延缓作用。

关键词:道路工程;氯盐渍土;冻融循环;上覆荷载;溶陷;盐胀

中图分类号:U416.16

文献标志码:A

Melt sinking and salt-heaving characteristics of coast chlorine saline soil

WEI Jin¹, DU Qin-wen¹, FENG Cheng-xiang²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Tianjin Municipal Engineering Institute, Tianjin 300051, China)

Abstract: In order to explore the melt sinking and salt-heaving characteristics of coast chlorine saline soil, the laboratory collapsibility tests were carried out under conditions of different initial water content, different salt content, different freezing and thawing cycles and different loads; the salt-heaving tests under four freezing and thawing cycles were carried out to get the salt-heaving laws under freezing and thawing cycles of soil samples which have different salt content; the salt-heaving laws under load and non-load were compared and analyzed. The results show that the major influence factors of the melt sinking are initial water content and salt content. The sensitivity of melt sinking is lower and the coefficient of collapsibility is bigger when the initial moisture content is lower. The coefficient of collapsibility curves is parabola with the increase of the salinity. The curves of subsidence coefficient achieves to obvious peaks when the salt content is 10%. The rapid increasing period of the salt-heaving quantity was 5℃ to -10℃ cooling period, the residual salt-heaving capacity and the accumulateness of salt-heaving are found after freezing and thawing cycles, and the accumulateness is found which weakens with the increase of

收稿日期:2013-07-15

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1211011)

作者简介:魏 进(1972-),男,河南郑州人,讲师,工学硕士,E-mail:changanwei jin@163.com。

freezing and thawing cycle times. The load can obviously depress the salt-heaving, and can also delay the salt-heaving because it raises the salt-heaving temperature. 4 tabs, 9 figs, 16 refs.

Key words: road engineering; chlorine saline soil; freezing and thawing cycle; load; melt sinking; salt-heaving

0 引言

滨海地区受海水浸渍和海岸退移影响,地下水水位高且水体矿化度高,经过蒸发作用和毛细作用,水中盐分凝聚于地表或地表下不深的土层中,即形成滨海盐渍土。滨海地区特殊的地理位置以及自然环境和气候条件(降水量大、地面水多、地下水位高),造成了该地区盐渍土表现出特有的工程特性(盐胀性及溶陷性),而道路工程的修建,在一定程度上阻塞了地下水补给和排泄的通道,使路基产生次生盐渍化。近年来,随着滨海地区工业和经济开发力度不断加大,盐渍土病害以及处治措施的盲目性已成为制约该地区基础设施建设发展的瓶颈。

道路盐渍土病害治理的成功与否,是建立在对其工程性质准确分析和研究基础上的^[1]。迄今为止,人们对硫酸盐渍土的性质已有较全面地认识,并逐步形成了较为完善的盐渍土盐胀理论^[2-3],冯忠居等对板块状硫酸盐渍土的盐溶和盐胀特性进行研究,结果表明盐胀起胀温度随着硫酸钠含量的增加有较大幅度的提前^[4];高江平等通过试验研究,提出了硫酸盐渍土盐胀率随含水量、氯化钠含量、硫酸钠含量、初始干重度和上覆荷载等 5 个因素变化的计算公式^[5];包卫星等研究了天然盐渍土在多次冻融循环时的水分和盐分迁移规律及强度变化特征^[6];张莎莎等通过试验分析了含水量(质量分数)、含盐量(质量分数)、温度及上覆荷载等条件对粗粒盐渍土盐胀特性的影响,得

到了起胀温度区间和剧变温度区间^[7]。目前中国对氯盐渍土的盐胀和溶陷特性研究较少,且研究对象大多为内陆区域性盐渍土,而且由于地域性条件(气候、水文地质等)对盐渍土的工程特性影响很大,不同地域及土类的盐渍土工程性质差别较大,对滨海盐渍土的研究仅局限于改性技术方面,对其工程特性缺乏深入分析,从而导致盐渍土处理技术具有一定盲目性^[8-13]。为此,本文结合天津市滨海新区南港工业区道路建设工程,通过室内模拟试验,研究和分析了不同含盐量和含水量条件下氯盐渍土的盐溶特性,以及多次冻融及加荷条件下的盐胀规律。

1 盐渍土基本性质

天津市滨海新区南港工业区位于渤海湾顶端,濒临渤海。年平均降水量 560 mm,降水随季节变化显著,冬、春季少,夏季集中;全年平均气温 12.3 ℃,高温极值 40.9 ℃,低温极值-18.3 ℃。大部分地区属于地下水微淡化区,地下水位较高,矿化度高达 10~35 g/L,含盐量很大。高矿化度和较高的含盐量使得地表水在蒸发过程中盐分通过毛细水作用不断向地表聚集,部分在地表形成盐霜或盐壳,并形成相当程度的盐渍土层。为详细了解研究区内的盐渍土发育状况及盐渍化程度,采取代表性试样进行盐渍土(易溶盐)含量测试,结果如表 1 所示。

表 1 试样主要可溶盐含量
Tab. 1 Ion content of test saline soil

土样编号	各种离子含量/%							总盐量/%	Cl ⁻ 与 SO ₄ ²⁻ 质量比
	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ₃ ²⁻	Mg ²⁻	K ⁺ +Na ⁺		
1	0.001 5	0.024 4	1.223 0	0.151 3	0.016 0	0.027 4	0.805 8	2.25	8.08
2	0.003 0	0.033 6	2.134 4	0.240 2	0.030 1	0.054 7	0.727 6	3.22	8.89
3	0.004 5	0.038 1	4.134 4	0.120 1	0.010 0	0.036 5	0.730 5	5.07	34.42
4	0.003 3	0.035 7	5.128 4	0.228 2	0.034 1	0.052 5	0.734 6	6.22	22.47

从表 1 中可以看出,南港工业区盐渍土中氯硫比均大于 2,依据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)对盐渍土的分类,南港地区为典型的氯盐渍土^[14]。盐渍土易溶盐含量多在 1.5%~5.0%之间,

按其盐渍化程度来看,为中盐渍土。
2 溶陷试验
当地基浸水后,盐渍土地基遇水将发生溶陷,从

而引起道路附加沉降。为了分析盐渍土的溶陷特性,配制不同初始含水量及含盐量的试样,通过室内溶陷试验测定其溶陷系数。

2.1 试验方案

为模拟不同初始含水量的盐渍土的溶陷特性,进行不同初始含水量条件下的溶陷试验。现场地基土的含盐量为 1.5%~5.0%,天然含水量为 12%~18%,故配制具有代表性的含盐量为 4%,初始含水量分别为 12%、14%、16%、18% 的 4 组试样,分别在 100~600 kPa 的 6 种模拟道路填土荷载条件下进行溶陷试验。

为模拟不同含盐量的盐渍土的溶陷特性,进行不同含盐量条件下的溶陷试验。现场土样天然含水量接近 14%,故配制初始含水量为 14%,含盐量分别为 2%、4%、6%、8%、10%、12% 的 6 组试样,分别在 100~600 kPa 的 6 种模拟道路填土荷载条件下进行溶陷试验。

2.2 不同含水量条件下氯盐渍土的溶陷系数

不同初始含水量试样的溶陷系数如图 1 所示。

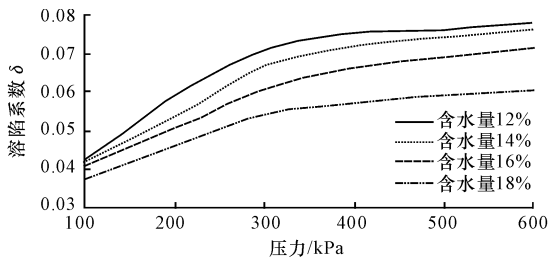


图 1 不同初始含水量试样的溶陷系数

Fig. 1 Subsidence coefficient of different initial water contents

由图 1 可以看出,在含盐量相同(4%)的条件下,不同初始含水量土样的溶陷系数随着试验压力的增大呈增大趋势,试验压力相同的条件下,初始含水量越小,其溶陷系数越大。在压力小于 280 kPa 范围内溶陷系数增加速率较快,压力大于 280 kPa 后,随着压力的增加溶陷系数增速逐渐减缓,在压力小于 280 kPa 范围内,初始含水量越大,溶陷系数增加速率越快。分析原因认为,盐渍土土体的溶陷和试验压力有着直接的关系。首先,易溶盐的溶解度随着压力增大而增大;另外,土颗粒的移位、塌落的程度也与压力直接相关,因此,土体溶陷系数随着试验压力增大而增大。初始含水量较小的土样未溶盐含量相对较大,故在相同压力作用下,其溶陷系数较大,初始含水量较小时,土样溶陷的敏感度更强,其溶陷系数亦较大。

各初始含水量的盐渍土中易溶盐以及胶结体的溶解过程相似,土体结构强度随着上覆压力增大而发生溶陷破坏。可以看到,不同初始含水量的土样当压力大于 280 kPa 时,土样的结构均随着易溶盐的溶解逐渐破坏,土样的溶陷系数表现为增速变缓,由于土样的初始含水量比较接近,故含水量不同的 4 组土样的临界试验压力均为 280 kPa 左右。

2.3 不同含盐量条件下氯盐渍土的溶陷系数

不同含盐量试样的溶陷系数如图 2 所示。

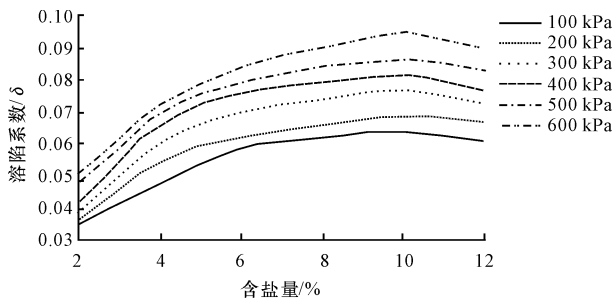


图 2 不同含盐量试样的溶陷系数

Fig. 2 Subsidence coefficient of different salt content

由图 2 可以看到,试样的溶陷系数随着含盐量的增大而增大,不同荷载条件下的溶陷系数表现为抛物线趋势。分析认为,在峰值点(含盐量 10%)之前,土样的溶陷量随着易溶盐的溶解而增大,试验曲线表现为上升趋势;在峰值点之后,试验曲线表现为下降趋势,这是因为溶陷量不是无限增大的,当土体颗粒孔隙率因溶陷降至极限,即使易溶盐继续溶解,土体的溶陷也不随之发展,并且由于土体颗粒的蠕动和变位而接近平衡状态,故其溶陷量随之降低。

另外,土样的溶陷系数随荷载增大而增大,原因是盐分的溶解率是随荷载增大而增大的;不同荷载条件的土样均在含盐量 10% 时表现出溶陷系数的峰值,说明在此含水量和干密度条件下,不同荷载条件的土样有着相似的溶陷规律。

3 盐胀试验

3.1 试验方案

采用室内模拟试验,模拟自然界冬季的降温过程及春季升温过程,降温过程为(试样顶端温度/试样底端温度):20℃/20℃、5℃/5℃、0℃/5℃、-5℃/0℃、-10℃/0℃、15℃/-5℃、-20℃/-5℃,单次降温梯度持续 8 h,共历时 48 h,升温过程反序进行。为了使试样的边界条件与自然条件相似,

在试样筒周围包以保温材料,以防止试样与周围环境的热交换。将按最佳含水量配制好的土料在 20 ℃ 条件下成型,准备好的土料分 5 次装入高 40 cm、内径 11.6 cm 的试样筒中,分层击实到最大干密度。在顶端制冷头顶面垂直安置百分表,用以量测土样盐胀量,顶端制冷头上覆重物并安装反力装置,用以模拟土体上覆荷载和量测盐胀力,试验装置如图 3 所示。

表 2 试样颗粒分析

Tab. 2 Grain size distribution of test saline soil

试样编号	颗粒组成质量分数/%				
	>0.074 mm	0.074~0.01 mm	0.01~0.005 mm	0.005~0.002 mm	<0.002 mm
1	4.52	42.17	15.78	17.90	19.63
2	5.17	42.79	15.32	18.12	18.60
3	5.25	42.32	16.03	18.13	18.27

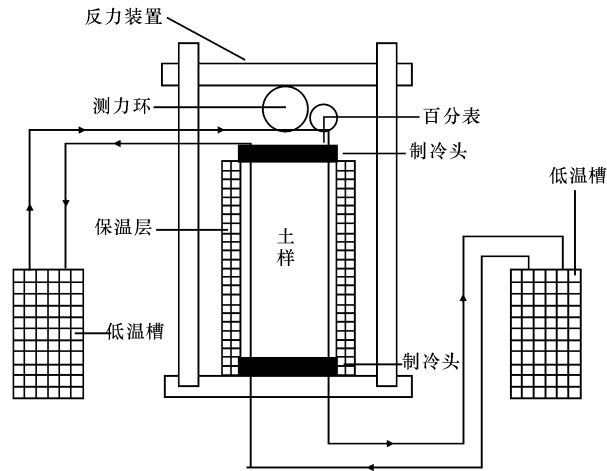


图 3 盐胀试验装置
Fig. 3 Test devices for salt heaving

3.3 试验结果分析

3.3.1 冻融循环条件下的盐胀性状

为准确模拟天然盐渍土在季节性温度变化下的累积盐胀特性,在试验中使土样完成 4 次降温-升温循环,得到不同含盐量的试样盐胀量规律,如图 4~图 6 所示。

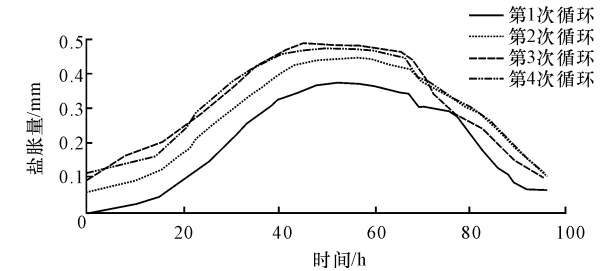


图 4 含盐量 2% 土样冻融循环盐胀量
Fig. 4 Amount of salt expansion of 2% salt content sample

3.2 试样基本性质

选取天津滨海新区南港工业区天然盐渍土为试验土样。采用重型标准击实,得到土样的最大干密度为 1.92 g/cm³,最佳含水量为 15.6%。土样液限变化范围在 29.2%~35.5%之间,塑限变化范围在 17.6%~20.3%之间,塑性指数变化范围在 11.9%~14.6%之间,为粉质粘土。颗粒分析结果见表 2。

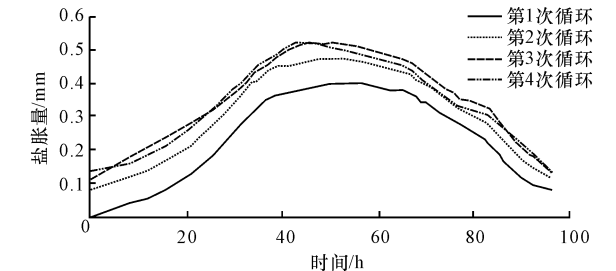


图 5 含盐量 3% 土样冻融循环盐胀量
Fig. 5 Amount of salt expansion of 3% salt content sample

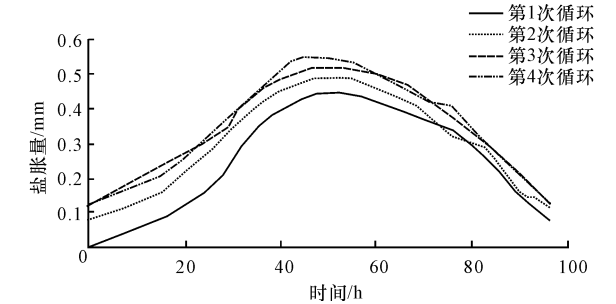


图 6 含盐量 4% 土样冻融循环盐胀量
Fig. 6 Amount of salt expansion of 4% salt content sample

从图 4 中可以看到,土样的盐胀量随着温度的降低而增加,当温度达到最低时,盐胀量到达峰值;随着温度的升高,盐胀量又逐渐减小,但当温度回升至 20 ℃ 时,盐胀量并不回落至 0,即出现残余盐胀量。在下次冻融循环过程中,盐胀量在第 1 次循环盐胀量基础上继续增加,表现出明显的盐胀累加性。出现残余盐胀量及累加盐胀量的原因是:土中氯盐在降温过程中结晶并且体积增大,晶体对土颗粒施加较大的膨胀力,从而使土颗粒发生移动、错位,土体体积随之膨胀,即称之为盐胀^[15]。在温度回升过

程中,氯盐晶体逐渐溶解,施加在土颗粒上的膨胀力随之降低直至消失,土颗粒的空间位置将重新排列,大部分小粒径颗粒回落到空隙中;另一部分粒径较大的颗粒在与其他颗粒的相互作用中达到了新的受力平衡,并不恢复至其初始应力状态,因此土样表现出升温后的残余盐胀量。再进行下一次冻融循环时,土颗粒在新的应力状态和位置产生进一步的盐

胀,即表现出冻融循环下的盐胀累积效应。2 次冻融循环完成后土体较松,因而使降温过程中消耗在土体内部的盐胀量增加,土体盐胀累积效应减弱,最终总盐胀量趋于稳定值,土颗粒达到较稳定的平衡状态,说明累积效应不存在无限叠加性质^[16]。

不同含盐量盐渍土最大盐胀率见表 3,盐胀率与冻融周期的关系如图 7 所示。

表 3 不同含盐量盐渍土最大盐胀量及盐胀率

Tab. 3 Salt expansion ratio of different salt content samples

冻融周期/次	含盐量 2%		含盐量 3%		含盐量 4%	
	最大盐胀量/mm	盐胀率/%	最大盐胀量/mm	盐胀率/%	最大盐胀量/mm	盐胀率/%
1	0.37	0.092	0.40	0.100	0.45	0.112
2	0.45	0.111	0.47	0.118	0.49	0.123
3	0.48	0.120	0.51	0.128	0.52	0.123
4	0.48	0.119	0.50	0.125	0.55	0.137

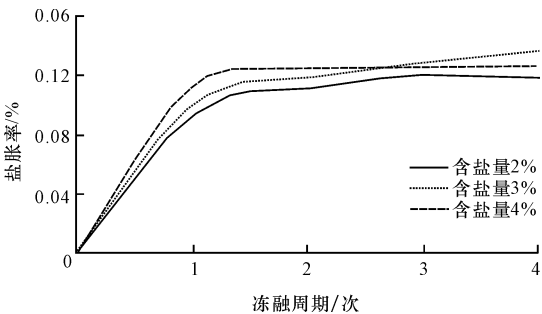


图 7 盐胀率与冻融周期关系曲线

Fig. 7 Curves of salt expansion ratio vs. freezing and thawing cycles

由图 7 可见,不同含盐量盐渍土的盐胀率与冻融周期之间的关系近似符合抛物线变化规律,因此采用抛物线进行回归分析。

含盐量 2% 的盐渍土盐胀率与冻融周期回归方程为

$$Y=0.005\ 4x^3-0.046\ 3x^2+0.129x+0.000\ 9$$
$$R^2=0.994\ 2$$

(1)

含盐量 3% 的盐渍土盐胀率与冻融周期回归方程为

$$Y=0.005\ 8x^3-0.050\ 3x^2+0.139\ 1x+0.001\ 1$$
$$R^2=0.992\ 9$$

(2)

含盐量 4% 的盐渍土盐胀率与冻融周期回归方程为

$$Y=0.008\ 4x^3-0.065\ 7x^2+0.162\ 6x+0.001\ 3$$
$$R^2=0.991\ 0$$

(3)

式中:Y 为盐胀率(%);x 为冻融循环周期(次);R 为相关系数。

依据盐胀试验结果,经多次不同形式拟合,进

行非线性回归分析,得到了盐胀率与含盐量及冻融周期的合并关系式为

$$Y=0.056\ 97+0.006\ 02x_1+0.027\ 88x-0.000\ 26x_1x+0.000\ 32x_1^2-0.003\ 7x^2$$

(4)

式中: x_1 为含盐量(%)。

从图 7 中可以看出,不同含盐量盐渍土的盐胀率随冻融循环次数的增加不断增大,但到第 3 次循环时区域平缓,说明了盐胀累积效应的非无限叠加性质。

3.3.2 无荷和有荷条件下的盐胀性状对比分析

通过反力装置对试验土样分别施加 50、100、150 kPa 的荷载,从而模拟土体在受荷状态下的盐胀特性。不同含盐量土体荷载和无荷载状态的盐胀量如下页图 8、图 9 所示,盐胀特性对比见下页表 4。

从图 8、图 9 可以看出,不同含盐量的盐胀量具有类似的规律,盐胀量分布曲线可以大致分为 3 个阶段:第 1 个阶段温度区间为 20 ℃~5 ℃,为盐胀量缓慢增大期,这个阶段的盐胀量大约为最大盐胀量的六分之一;第 2 个阶段温度区间为 5 ℃~-10 ℃,为剧烈上升期,大部分盐胀量产生在该阶段;第 3 个阶段温度区间为 -10 ℃~-20 ℃,为平稳期,盐胀量增大较为缓慢。分析认为:①土体中盐分分布是不均匀的,由于是人工制备土样,其水分分布可认为是均匀的,在缓慢增大期,土体内一部分高浓度盐分随温度降低开始结晶膨胀,而其他大部分盐分并未开始析出,析出的结晶体充填在土体孔隙中,对土体体积的膨胀贡献不大;②在剧烈上升期内,温度的进一步降低是产生剧烈盐胀的主要因素,同时,土体中部分

含盐量较少的空间也会由于游离水的冻结而产生冻胀,这更加大了土体的膨胀量;③在平稳期内,大部分盐分已经结晶,土体中可产生盐胀的盐分十分有限,盐胀量已增大至极限值。

表 4 有荷及无荷条件下盐胀特性对比
Tab. 4 Salt-heaving characteristics of samples

含盐量/%	不同荷载(kPa)的起胀温度/℃				不同荷载(kPa)的最大盐胀量/mm				不同荷载(kPa)的盐胀剧烈区间/℃			
	50	100	150	无荷	50	100	150	无荷	50	100	150	无荷
2	5	4	3	20	0.10	0.07	0.06	0.37	0~-20	0~-20	0~-20	5~-10
3	7	5	4	20	0.13	0.09	0.08	0.40	-5~-20	-5~-20	-5~-20	5~-11
4	6	5	4	20	0.21	0.16	0.16	0.45	-5~-20	-5~-20	-5~-20	5~-11

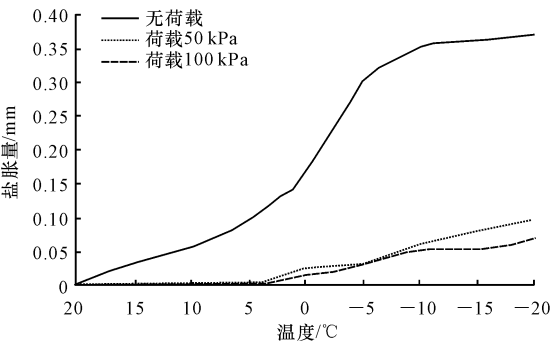


图 8 含盐量 2% 土样荷载对盐胀量的影响
Fig. 8 Influence of load to 2% salt content sample

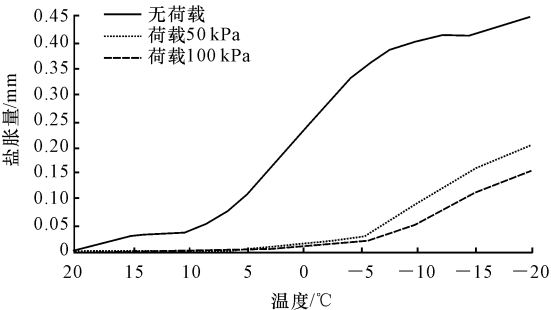


图 9 含盐量 4% 土样荷载对盐胀量的影响
Fig. 9 Influence of load to 4% salt content sample

由表 4 分析得到,荷载对盐胀量的影响体现在 2 个方面:一是对盐胀量的影响,2 种含盐量土样在 50 kPa 荷载条件下盐胀量分别减低 73% 和 54%,说明荷载对盐渍土盐胀的抑制作用明显;二是对盐胀量分布区间的影响,从图中可以看到,加荷情况下,土体的起胀温度为 5℃~3℃,大大高于无荷情况下的起胀温度,说明荷载对盐胀的延缓作用明显。

4 结 语

(1)氯盐渍土的溶陷系数随着荷载的增大呈增大趋势,在压力小于 280 kPa 范围内溶陷系数增加速率较快,且初始含水量越大,溶陷系数增加速率越快;溶陷系数随着含盐量增大而增大,当含盐量为 10% 时,溶陷系数出现明显的峰值。

(2)在降温-升温循环结束时,盐胀量并不回落至 0,出现残余盐胀量;在下次冻融循环过程中,盐胀量在第 1 次循环盐胀量基础上继续增加,表现出明显的盐胀累加性,但累加性随着冻融循环次数的增多而减弱。

(3)在 50 kPa 上覆荷载作用下盐胀量分别减低 73% 和 54%,说明荷载对盐渍土盐胀的抑制作用明显;土体的起胀温度高于无荷载情况下的起胀温度,说明荷载对盐胀的延缓作用明显。

(4)土体中的热状况、水分状况与变化规律及由此引起的应力重分布是引起盐胀及溶陷的重要因素,其热量传输和水分迁移是相互作用、相互影响的复杂过程,因此关于氯盐渍土热传导性质、水分迁移规律的综合理论模型还需进一步研究和完善。

参考文献:
References:

[1] 李 芳,李 斌,陈 建.中国公路盐渍土的分区方案[J].长安大学学报:自然科学版,2006,26(6):12-14,89.
LI Fang,LI Bin,CHEN Jian. Highway-related dividing scheme of salty soil[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(6): 12-14, 89. (in Chinese)
[2] 《中国公路学报》编辑部.中国道路工程学术研究综述·2012[J].中国公路学报,2012,25(3):2-50.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's road engineering research; 2012 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(3): 2-50. (in Chinese)
[3] 徐学祖,王家澄,张立新,等.土体冻胀和盐胀机理[M].北京:科学出版社,1995.
XU Xue-zu, WANG Jia-cheng, ZHANG Li-xin, et al. Mechanism of frost heave and salt expansion of soil [M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)
[4] 冯忠居,乌延玲,成 超,等.板块状盐渍土的盐溶和

- 盐胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(9): 1439-1442.
- FENG Zhong-ju, WU Yan-ling, CHENG Chao, et al. Salt-dissolution and salt-heaving characteristics of plate-like saline soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(9): 1439-1442. (in Chinese)
- [5] 高江平, 吴家惠. 硫酸盐渍土盐胀特性的单因素影响规律研究[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(1): 37-42.
- GAO Jiang-ping, WU Jia-hui. Study on laws of the single factor effect upon heaving properties of the sulphated salty soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997, 19(1): 37-42. (in Chinese)
- [6] 包卫星, 谢永利, 杨晓华. 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.
- BAO Wei-xing, XIE Yong-li, YANG Xiao-hua. A Laboratory test study on water and salt migration in natural saline soils and associated shear strength changes under freezing and thawing cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(3): 380-385. (in Chinese)
- [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.
- ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li, et al. Salt-expansion laws of coarse-grained salty soil in road subgrade[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(1): 20-25. (in Chinese)
- [8] 包卫星, 杨晓华, 谢永利. 典型天然盐渍土多次冻融循环盐胀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(11): 1991-1995.
- BAO Wei-Xing, YANG Xiao-Hua, XIE Yong-Li. Research on salt expansion of representative crude saline soil under freezing and thawing cycles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(11): 1991-1995. (in Chinese)
- [9] 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.
- YANG Bao-cun, LIU Xin-rong, HE Xing-hong, et al. Test study on saline soil subgrade salt-frost deformation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(3): 594-603. (in Chinese)
- [10] 王延伟, 徐慧芬, 文进, 等. 新疆地区盐渍土的盐胀特性研究[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2006, 30(3): 531-534.
- WANG Yan-wei, XU Hui-fen, WEN Jin, et al. Research on property of salt expansion of saline soil in Xinjiang area[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2006, 30(3): 531-534. (in Chinese)
- [11] 王沛, 柴寿喜. 固化滨海盐渍土路用性能的室内试验与现场测试[J]. 工程地质学报, 2011, 19(3): 440-446.
- WANG Pei, CHAI Shou-xi. Laboratory and in-situ tests on solidified saline soils for highway fillings[J]. Journal of Engineering Geology, 2011, 19(3): 440-446. (in Chinese)
- [12] 程寅, 李战国, 邓晓轩, 等. 一种新固化材料固化滨海氯盐渍土的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(8): 1240-1245.
- CHENG Yin, LI Zhan-guo, DENG Xiao-xuan, et al. Experimental study on a new stabilizer for stabilizing coastal chlorine soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(8): 1240-1245. (in Chinese)
- [13] 周琦, 邓安, 韩文峰, 等. 固化滨海盐渍土耐久性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(6): 1129-1132.
- ZHOU Qi, DENG An, HAN Wen-feng, et al. Durability of stabilized coastal saline soils: water stability and freeze-thaw resistance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(6): 1129-1132. (in Chinese)
- [14] JTG E40-2007, 公路土工试验规程[S].
- JTG E40-2007, Test methods of soils for highway engineering[S]. (in Chinese)
- [15] 张莎莎, 杨晓华, 戴志仁. 天然粗颗粒盐渍土多次冻融循环盐胀试验[J]. 中国公路学报, 2009, 22(4): 28-32.
- ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, DAI Zhi-ren. Freezing-thawing cycles and salt expansion test of crude coarse grain clay salty soil[J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(4): 28-32. (in Chinese)
- [16] 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 Shu-sen, SHI Yong-kun. Research on the properties for saline soil of sand angular gravels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 96-99. (in Chinese)

