

吉林西部碳酸盐渍土冻胀力研究

李栋国¹, 王清^{2*}, 张莹³

(1. 长春工程学院 土木学院, 吉林 长春 130012; 2. 吉林大学 建设工程学院; 3. 吉林农业大学 信息技术学院)

摘要: 吉林西部分布着大面积的碳酸盐渍土,在温度降低时盐—冻胀性比较明显,该地区的挡土墙、桥涵台墙等建筑物,经常出现强度破坏,为此开展了水、热、盐等多因素耦合作用的法向冻胀力模拟试验。试验结果显示:冻胀力变化剧烈的温度区间为 $0\sim-15\text{ }^{\circ}\text{C}$,之后冻胀力几乎不再增长,冻胀力随含水率而增大的值域范围接近 300 kPa ,含盐量和击实度对冻胀力有着不同的影响特点。以此分析了水、热、盐等因素对冻胀力的作用规律,探讨了其影响机制和原理。采用粗糙集计算冻胀力影响因素的权重系数排序为:击实度 $>$ 含水率 $>$ 温度 $>$ 含盐量。

关键词: 碳酸盐渍土; 法向冻胀力; 影响因素; 粗糙集

吉林西部分布着大范围的碳酸盐渍土,而且有愈来愈严重之趋势,部分土层含盐量已达 3% 以上。而这些盐渍土区属于典型季冻区,盐渍土的盐—冻胀破坏成为该地区盐渍土工程的一个重要破坏形式。国内外学者对广泛分布的硫酸盐渍土和氯盐渍土开展了大量研究,并取得了从现象到机理等一系列的成果。该文主要针对吉林省西部农安县的碳酸盐渍土进行相关的冻胀特性分析。

土的冻胀性指标除了变形指标——冻胀量之外,还有力学指标——冻胀力。对碳酸盐渍土的冻胀研究目前主要集中在水分迁移、冻胀量两方面,还有学者利用灰关联度和粗糙集理论对碳酸盐渍土的粒度成分、击实度、含盐量等因素与冻胀量之间的关系进行了研究,建立了BP神经网络冻胀模型。但碳酸盐渍土的冻胀力研究很少,冻胀力相对于冻胀量的研究影响因素更多,研究手段更复杂,测试结果的稳定性不易保证。建筑地基基底下土层的冻胀力既有正下方土柱的法向冻胀力,也有基础周边土层的切向冻胀力,基础受到的总法向冻胀力是二者的合力。受试验条件的限制,室内试验研究主要偏重于基底正下方土柱的法向冻胀力分析,而室外试验进行切向冻胀力的研究更方便。还有研究认为基础受到的冻胀力值是由基础底面的接触冻胀力和土壤内部的冻胀应力组成,基础接触冻胀力是通过双层地基理论计算确定的,而冻胀应力

是由基底下土柱的冻胀力试验测得。该文选取与加压板相同直径的圆柱体试件作为基底下的土柱,在冻胀力试验机内进行室内单循环冻胀应力测试,由此探讨土体冻胀影响因素和机制。分析水、热、盐等与未冻水含量的变化关系,揭示碳酸盐渍土在不同含水率、击实度、含盐量和温度情况下的耦合冻胀规律及值域范围,进一步丰富碳酸盐渍土的冻胀研究。

1 试验材料与条件

1.1 试验材料

研究用土取自吉林省农安县敖宝图泡的一处旱地,其坐标位置为 $N:44^{\circ}20'45.94''$, $E:124^{\circ}58'07.78''$ 。地表呈极度干燥状态,白色盐碱斑块较多。

浅层样品,深度 $0\sim0.8\text{ m}$ 。其粒度成分和基本物理化学性质试验结果如表1、2所示。由表1、2及地矿部DT92,确定农安盐渍土为弱碱性、非有机质、级配良好、中液限、易溶盐含量较高的粉质亚黏土。

由表2可以看出,硫酸根和重碳酸根的含量较大,氯根含量较少。由此可知农安盐渍土是一种硫酸盐和碳酸盐混合型盐渍土,而吉林省西部盐渍土主要是碳酸盐为主的碳酸盐渍土,所以在研究农安盐渍土冻胀特性时一方面要重点考虑碳酸盐的作用;另一方面还要综合考虑硫酸盐的作用。

收稿日期:2019-10-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:41372267,41302247);吉林省教育厅“十二五”规划项目(编号:120150041)

作者简介:李栋国,男,博士,副教授。E-mail:ldg731109@163.com

* 通信作者:王清,女,博士,教授。E-mail:wangqing@jlu.edu.cn

表 1 试验土样基本性质

指标				单位	平均值	指标				单位	平均值
粒度成分	砂粒(2~0.075 mm)		%	7.12	易溶盐总量		%	0.95			
	粉粒(0.075~0.005 mm)		%	76.89	塑性指数			20			
	黏粒(<0.005 mm)		%	15.99	液限		%	43			
	天然密度		g/cm ³	1.88	有机质		%	0.88			
	阳离子交换量		mmol/(100 g)	15.25	酸碱度(pH 值)			8.17			

表 2 易溶盐含量情况

指标	平均值/%	指标	平均值/%
K ⁺	0.03	CO ₃ ²⁻	0.00
Na ⁺	0.39	HCO ₃ ⁻	0.13
Ca ²⁺	0.01	Cl ⁻	0.05
Mg ²⁺	0.01	SO ₄ ²⁻	0.17

1.2 试验条件

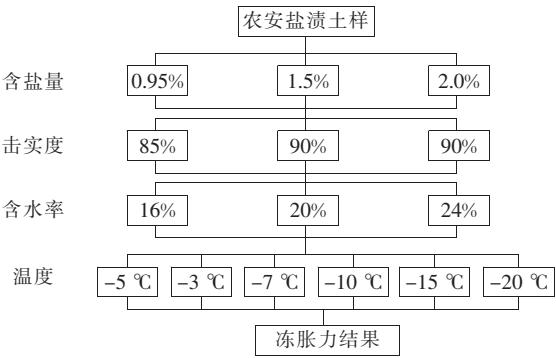
采用可调温力学性能试验机,最低温度可降至-20℃,控温精度0.1℃,加载精度1N。试验时由微机控制,试验数据和成果可以自动成图。在有机玻璃管内制备直径10cm、高5cm的试样,如图1所示,装入测力仪内,按照规范要求进行冻胀力试验。



图 1 测试试件

研究发现基底下土柱在冻胀过程中,其内部水分不但不会增加反而有向四周迁移的趋势,所以在试验中采用了没有水分补给的封闭系统测试方法。取样表层最小含水率为9.9%,最大含水率在80cm深度处为30%,平均含水率21%。试验测得该土最优含水率为18%,结合工程施工,该试验土样含水率定为16%、20%和24%几种情况。表层最大的含盐量为1.5%,随深度增加含盐量基本呈下降趋势。随着季节不同易溶盐含量有一定浮动,所以将试验土样含盐量设计为0.95%(天然含盐量)、1.5%和2.0%共3种情况。土木工程中击实度要求一般都在85%以上,所以此次试验击实度取85%、90%和95%共3种情况。制定正交试验方案,如图2所示。其中1.5%和2.0%含盐量是

由天然含盐量盐渍土加重碳酸钠配制而成,主要考虑吉林西部盐渍土盐分经广泛而大量的测试研究发现,其成分主要是重碳酸根。试验中共制定27种工况,81个试件,每种工况试件按1、2、3编号,如1.5%含盐量、90%击实度、20%含水率,为1号试件。



注:该试验土样最大干密度1.70g/cm³,最优含水率18%,调整含盐量时掺配碳酸氢钠。

图 2 冻胀试验因素水平

2 试验结果及分析

2.1 含水率与冻胀力

几种盐渍土的冻胀力随温度降低基本都成线性增大,到-15℃时冻胀力几乎不再增长,最大值约为300kPa左右,如图3所示。这主要因为土样中的毛细水等自由水和薄膜水中的部分弱结合水到-15℃时其冻胀作用几乎全部完成,而其余未冻水需要极低的温度(-76℃)才会产生冻胀,在一般气候条件下是不会参与冻胀作用的,其冻胀力可以忽略不计,所以冻胀力随温度的主要变化区间为0~-15℃。图3中几种盐渍土的冻胀力与含水率都成正比关系(16%含水率时冻胀力都为0,所以将其省略),20%含水率时冻胀力比较明显,说明碳酸盐渍土的冻胀力产生的最低含水率应该大于16%。因为含水率越低时,水分的冻胀作用和土粒间水分的润滑作用越弱,而土粒间的内摩阻力、黏聚力和引力等约束力反而增大,限制了土体膨

胀,造成冻胀力不显著。随着含水率增大,水分冻胀作用增强,而相关约束力减小,所以20%以上含水率时冻胀力显著增大。黑龙江北安二龙山灌渠土在含水率大于18%时冻胀力略有下降;新疆含盐量5.7%的天然氯盐渍土在最优含水率时冻胀力最大。

含水率在不同含盐量时,作用有较大的差异,由图3可知:天然含盐量盐渍土各含水率土样的冻胀力差别较大,而1.5%和2.0%含盐量时不同含水率土样的冻胀力差别逐渐减小。可见随着含盐量的提高,含水率变化对碳酸盐渍土冻胀力的影响作用在下降。分析其机理主要是盐分中 Na^+ 具有吸附水分子形成结合水的作用,增加了未冻水中不能参与冻胀的水分含量,从而减弱了水分的冻胀作用。

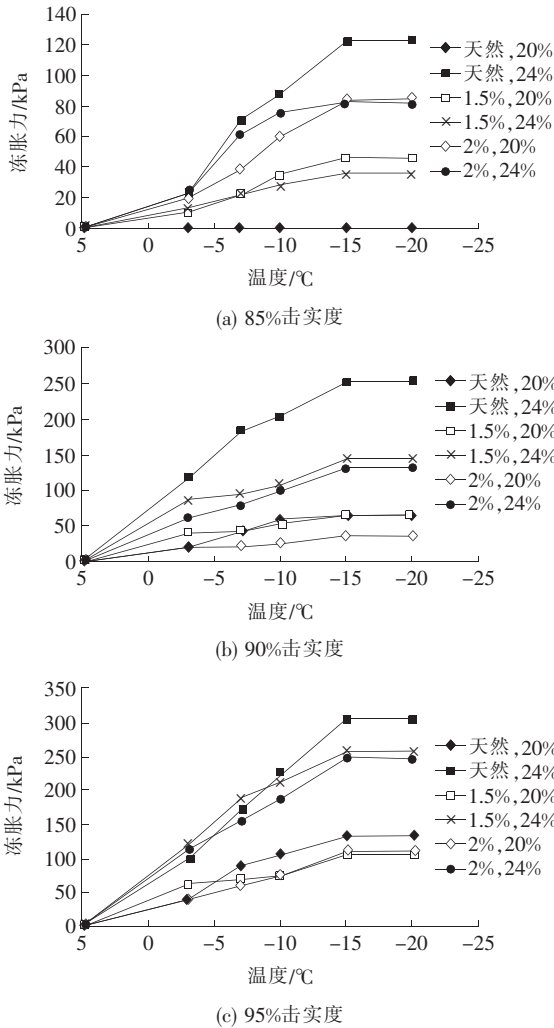


图3 不同击实度盐渍土含水率影响冻胀力比较

2.2 击实度与冻胀力

几种盐渍土土样的冻胀力与土样的密实度都成正比关系,95%密实度土样产生的冻胀力明显更大,如图

4所示。新疆含盐量5.7%的天然氯盐渍土的盐一冻胀力也呈现出伴随干密度的增加而增加的规律。密实度决定着土样孔隙的大小和多少,土样越密实土孔隙就越少、越小。大孔隙中以薄膜水为主,土水势弱,所以参与冻胀的未冻水较少;而小孔隙中以毛细水为主,土水势强,未冻水含量大。据此,土样的密实度越大其冻胀性越好。从图4中还可以看出:几种盐渍土在不同含水率条件下击实度的影响程度是不同的,含水率越高,击实度的影响力越大,其冻胀力的差别越大;而含盐量变化对击实度与冻胀力的关系影响不大。因为含水率越高击实度大的土样中未冻水含量越多,二者起到互相促进的作用。而土的密实度越高土颗粒越紧密,对盐胀会有较强的束缚作用,所以含盐量变化对击实度与冻胀力的关系影响不大。

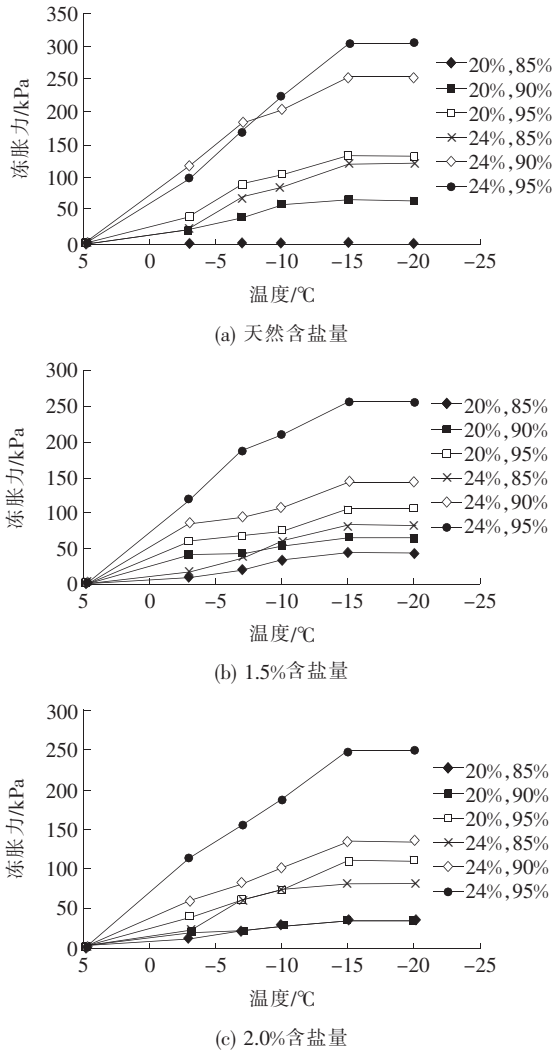


图4 不同含盐量盐渍土击实度影响冻胀力比较

2.3 含盐量与冻胀力

农安盐渍土的冻胀力和含盐量总体成反比关系,

即从天然含盐量开始含盐量越大冻胀力越小,如图 5 所示。多数情况下 1.5%~2.0%含盐量土样的冻胀力比较接近,与天然含盐量盐渍土的冻胀力差别较大。这也表明 1.5%含盐量是盐分抑制冻胀显著与否的一个界限含盐量,在 1.5%含盐量以下冻胀力与含盐量的反比关系明显,1.5%含盐量以上增大含盐量对冻胀力的抑制作用不再显著。盐渍土中盐分对冻胀的作用是双向的,既有盐结晶的促进作用也有离子吸附结合水的削弱作用。但碳酸盐结晶引起盐胀的作用力较小,在很多情况下几乎没有表现。反而由于 Na^+ 吸附较多的结合水,减少了参与冰胀的未冻水含量,降低了冻胀作用,所以冻胀力在天然~1.5%含盐量范围内与盐含量成反比;当含盐量达到一定值后,部分离子被其他离子包裹在里面,不再具有吸附结合水的能力,所以含盐量继续增大对冻胀力的抑制作用不再显著。在图 5 中,天然含盐量盐渍土是冻胀力最大的一种情况,这主要因为天然盐渍土中硫酸盐的成分比重较大,芒硝体积膨胀较大,所以其盐胀作用显著;另一方面天然含盐量盐渍土由于含盐量少,吸附不参与冻胀的结合水膜较少。

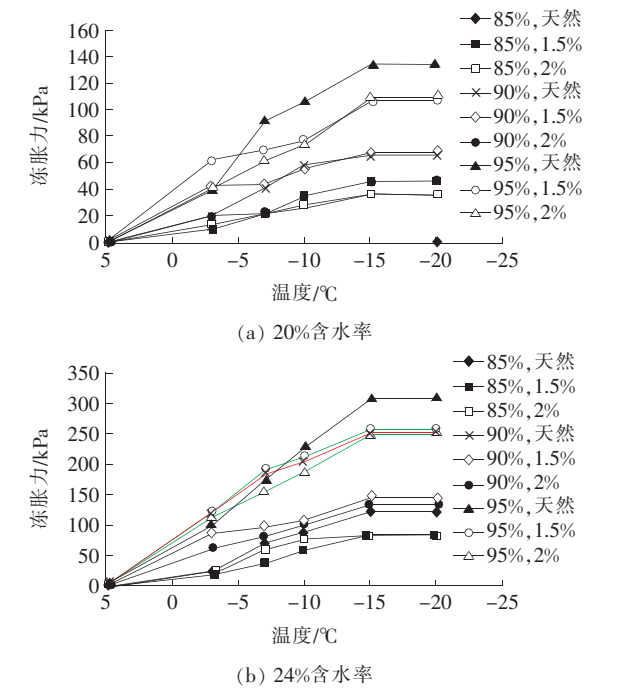


图 5 不同含水率盐渍土含盐量影响冻胀力比较

3 冻胀力影响因素评价

上文分析表明:含水率、击实度、含盐量和温度对冻胀力均有一定的影响,但这些影响是动态的、模糊

的。为了进一步评价各因素对冻胀力的影响程度,该文通过粗糙集理论进行重要度和权重系数计算,确定冻胀力各因素的影响大小。首先根据表 3 分析原始数据,对其值进行分类。含盐量、含水率和击实度分别分成 3 类,用 1、2、3 表示;温度分成 4 类,用 1、2、3、4 表示,建立条件属性集 C 。对冻胀力以 50 kPa 为一个等级,共分成 7 个等级,用 1、2、3、4、5、6、7 表示,建立决策属性集 D 。最后形成决策信息表,如表 4 所示。利用粗糙集公式 $\alpha_i = \sigma_D(C_i) / \sum_{i=1}^n \sigma_D(C_i)$ 对条件属性进行权重计算,结果如表 5 所示。

表 3 原始数据

含盐量/ %	击实度/ %	含水率/ %	温度/ ℃	冻胀力/ kPa
0.95	85	16	-3	0
0.95	85	16	-7	0
0.95	85	16	-10	0
0.95	85	16	-15	0
...
1.50	90	20	-3	42.00
1.50	90	20	-7	43.95
1.50	90	20	-10	55.41
1.50	90	20	-15	66.88
...
2.00	95	24	-3	113.38
2.00	95	24	-7	155.41
2.00	95	24	-10	187.90
2.00	95	24	-15	249.68

表 4 基于粗糙集的冻胀力决策信息

含盐量	击实度	含水率	温度	冻胀力
1	1	1	1	1
1	1	1	2	1
1	1	1	3	1
1	1	1	4	1
...
2	2	2	1	1
2	2	2	2	1
2	2	2	3	2
2	2	2	4	2
...
3	3	3	1	3
3	3	3	2	4
3	3	3	3	4
3	3	3	4	5

表5 基于粗糙集的冻胀力影响因素权重

影响因素	重要度	权重系数	影响因素	重要度	权重系数
含盐量	0.541 7	0.173 3	含水率	0.888 9	0.284 4
击实度	0.916 7	0.293 3	温度	0.777 8	0.248 9

表5结果显示,4种因素的重要度和权重系数大小排序为:击实度>含水率>温度>含盐量,击实度对冻胀力的影响最大,含盐量对冻胀力的影响最小。土体密实度越高,其毛细水比例也越大,所以未冻水含量越多,冻胀作用也越强。密实度小的土体在外荷载作用下,冻胀先向未冻土和土体松散部分发展,从而压缩土体内部结构,造成冻胀力不明显;相反内部密实的土体,冻胀主要向外部发展,冻胀力明显。由此可见虽然水是冻胀之根本,但在外荷载作用下,水的冻胀作用很大程度上取决于土体密实度大小。由于盐胀受外荷载制约作用明显,盐胀力很小,盐分主要通过对未冻水含量的影响间接影响冻胀力。因为温度对冻胀力的影响是通过水分的冰冻作用产生的,开始阶段未冻水主要是毛细水,冻胀迅速,造成冻胀力突然上升。在温度降到-10~-15℃以后,未冻水主要是薄膜水,冻胀缓慢,所以温度是通过水分产生影响,且只发生在局部阶段。以上原因最终导致了几种影响因素的排序。研究黑龙江北安二龙山灌渠土(不含盐)时认为冻胀温度对冻胀力影响最显著,含水率影响比较显著,土样孔隙率对冻胀力影响不显著。出现这种差别的原因一方面主要是盐分的作用;另一方面可能是此次试验的温度区间较小造成的。

在盐渍土区的土木工程中,由于大气温度、含水率、密实度和含盐量的不断变化,如渠道底部的混凝土衬砌在土层的竖向冻胀力作用下产生拱裂、扩大浅基础由于切向冻胀力被抬起、桩基产生上拔等。为了减少这些破坏,根据上述研究成果要重点控制好土体的密实度和含水率。在满足工程质量的前提下,应适当降低土体的密实度和含水率以缓解其冻胀力效应。

4 结论

(1) 碳酸盐渍土的冻胀力随温度降低基本都成线

性增大,到-15℃时冻胀力增长缓慢;冻胀力的最低含水率在16%以上,随含水率增大而增大,24%含水率时冻胀力达到300 kPa;冻胀力与密实度成正比关系,与含盐量总体成反比关系。

(2) 粗糙集计算冻胀力4种影响因素的权重排序为:击实度>含水率>温度>含盐量。

(3) 该文未考虑水源补给和冻融循环作用,下一步需要考虑模拟地下水源补给和增加冻融循环次数。

参考文献:

[1] 王文华. 吉林省西部地区盐渍土水分迁移及冻胀特性研究[D]. 吉林大学博士学位论文,2011.

[2] 张艳鸽. 吉林省西部盐渍土的水-热-物质迁移转化及其冻胀特性研究[D]. 吉林大学硕士学位论文,2011.

[3] 张静. 吉林省西部地区分散性季冻土的分散机理研究[D]. 吉林大学硕士学位论文,2010.

[4] 周长庆. 粘土切向冻胀力的试验研究[J]. 低温建筑技术, 1979(1).

[5] 刘鸿绪. 冻胀量与冻胀力关系分析[J]. 低温建筑技术, 1982(1).

[6] 刘鸿绪. 季节冻土地基冻胀力的计算[J]. 低温建筑技术, 1983(1).

[7] 吕书清. 影响土体冻结的主要因素及冻胀力分析[J]. 低温建筑技术,2009(7).

[8] 徐学祖,王家澄. 冻土物理学[M]. 北京:科学出版社, 2010.

[9] 张俊,翁兴中,刘军忠,等. 和田地区道面损坏机理与盐渍土工程特性研究[J]. 中外公路,2014(5).

[10] 温小平,翁兴中,张俊,等. 道面基层抗硫酸盐侵蚀性能及防范措施[J]. 公路交通科技,2015(9).

[11] 葛建锐,郑鑫,刘少东,等. 东北季冻区灌渠渠底土冻胀力影响因素分析[J]. 人民黄河,2015(8).

[12] 那姝姝. 新疆某地区天然强氯盐渍土的盐-冻胀力规律研究[J]. 山西建筑,2018(1).

[13] 徐学祖. 土体冻胀和盐胀机理[J]. 地球科学进展,1998(6).

[14] 李栋国. 农安盐渍土冻胀及反复冻融强度衰减特性研究[D]. 吉林大学博士学位论文,2015.

[15] 赵艳南,牛瑞卿,彭令,等. 基于粗糙集和粒子群优化支持向量机的滑坡变形预测[J]. 中南大学学报(自然科学版),2015(6).