

多因素影响下砭砂岩的融沉特性试验研究

张强, 李晓丽, 刘李杰, 解卫东

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 探究融沉作用对砭砂岩结构改变, 揭示砭砂岩冻融侵蚀机理。[方法] 使用高低温交变湿热试验箱 H/GDWJS-100L 对砭砂岩进行不同含水率、不同冻结温度、不同干密度下的冻融试验。[结果] 含水率低于 11% 的砭砂岩, 冻胀量随着含水率的变化较小, 含水率大于 11% 后冻胀量随着含水率的增加变化显著; 在融化的过程中, 砭砂岩存在起始融沉含水率在 13% 附近, 当含水率大于起始融沉含水率发生融沉, 否则发生冻胀; 砭砂岩融化时最大位移变化量与干密度有关, 干密度 1.80 g/cm³ 对应试件的最大位移变化量最小; 相同含水率、干密度条件下的砭砂岩融化时的最大位移变化量, 随着冻结温度的降低而增大。[结论] 冻融过程中砭砂岩的位移变化引起颗粒间的重新排列, 使其孔隙特征发生变化, 从而导致砭砂岩结构的改变。

关键词: 砭砂岩; 融沉量; 含水率; 冻结温度; 干密度

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)01-0045-06

中图分类号: S157, TU44

文献参数: 张强, 李晓丽, 刘李杰, 等. 多因素影响下砭砂岩的融沉特性试验研究[J]. 水土保持通报, 2017, 37(1):045-050. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.008; Zhang Qiang, Li Xiaoli, Liu Jie, et al. Experimental study on thawing settlement performance of feldspathic sandstone subjected to various factors[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(1):045-050. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.01.008

Experimental Study on Thawing Settlement Performance of Feldspathic Sandstone Subjected to Various Factors

ZHANG Qiang, LI Xiaoli, LIU Jie, JIE Weidong

(College of Water Conservancy and Civil Engineering,

Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] In order to reveal the structural change of feldspathic sandstone caused by thaw collapse, the mechanism of the freezing and thawing erosion of feldspathic sandstone was discussed. [Methods] Freezing-thawing tests were conducted using high-low temperature heat chamber H/GDWJS-100L with different moisture content, different freezing temperature and different dry densities. [Results] The amount of frost heave changed slightly when the moisture content of feldspathic sandstone was below 11%, while it increased significantly when the moisture content was over 11%. In the process of thawing, the initial thawing settlement moisture content was about 13%. When the moisture content was higher than 13%, thaw settlement occurred, otherwise, frost heave occurred. The maximum displacement of the feldspathic sandstone was closely related to dry density, the variation of maximal displacement was the least when dry density was 1.80 g/cm³. With the same moisture content and dry density, the maximum displacement of the feldspathic sandstone during melting increased with the decrease of temperature. [Conclusion] In the process of freezing-thawing, the displacement of feldspathic sandstone can cause the rearrangement of particles and the change of the pore characteristic, resulting in the structure change of feldspathic sandstone.

Keywords: feldspathic sandstone; thaw settlement amount; moisture content; freezing temperature; dry density

收稿日期: 2016-01-20

修回日期: 2016-07-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“鄂尔多斯丘陵区砭砂岩风—冻融复合侵蚀力学机理研究”(41261070), “鄂尔多斯丘陵区砭砂岩水蚀动力学机理研究”(41561061); 教育部创新团队发展计划“寒旱区水文过程与环境生态效应”(IRT13069)

第一作者: 张强(1989—), 男(汉族), 河北省张家口市人, 硕士研究生, 研究方向为岩土环境力学研究。E-mail: 494779468@qq.com。

通讯作者: 李晓丽(1969—), 女(汉族), 内蒙古自治区赤峰市人, 博士, 教授, 主要从事岩土环境工程及结构工程方面研究。E-mail: nd-lxl@163.com。

砒砂岩是指发育在砒砂岩母质上的坡地栗钙土类的各种土壤,其母质主要为白垩、侏罗系砂岩、砂砾岩风化物,结构松散,胶结力差,易被水侵蚀,土壤质地为砂壤土,保肥保水能力较差,易受干旱^[1]。内蒙古砒砂岩地区位于东胜至准格尔旗一带,该区域地表存在大量风沙、碎石、岩屑,杂色紫色岩大量出露,水土流失极其严重,使得砒砂岩区成为黄河主要粗沙来源地之一^[2]。近年来砒砂岩侵蚀及治理研究已经成为国内研究的热点问题之一,国内许多学者从不同方面对砒砂岩易于侵蚀的内在原因开展研究^[3-8]。由于内蒙古砒砂岩区属典型的温带大陆性气候,四季分明。在冬春两季,白天在太阳辐射照耀下温度迅速升高,产生“融化”现象,冰融化成水,而留下的大孔隙又不能恢复成冻结前的细小孔隙。晚间温度快速下降产生“冻结”,由于土体孔隙中的水变成冰,并在土体中形成各种结构,土颗粒发生位移,土体冻胀。昼夜“融化”和“冻结”交替,“水”、“冰”相变频繁,使得土壤结构更加松散,胶结力变差,加剧砒砂岩的风化过程,地层因冻融而发生结构上的变异^[9]。

虽然冻融对土的物理性质、水理性质和力学性质的影响已有详细的描述^[10-13]。朱元林等^[13]得到了冻土地基在保持冻结状态下的沉降计算指标和方法;何平等^[14]、元喜忠^[15]分别研究了土质因素及其他水热状况对融沉和融沉系数的影响;针对土体的融沉特性^[16-17]、融沉计算模型^[18-19]也取得了较好的应用效果。但由于砒砂岩独特的性质,已有理论都不能很好反映其冻融机理。又由于冻融作用主要取决于 3 大因素:土质(含水量、密度、分散度等)、外界条件(温度、压力等)及冻融历时,因此本文在内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗,选择干密度、含水率和冻结温度多因素作用下,开展砒砂岩冻融性能试验,以期揭示融沉作用对砒砂岩结构改变,进而更深入探究砒砂岩冻融侵蚀机理。

1 材料与方法

1.1 砒砂岩物性指标

本试验研究的砒砂岩粒径组成见表 1。液塑限分别为 29.3% 和 19.6%。

表 1 砒砂岩的粒径组成

粒径 d/mm	$d < 0.01$	$0.01 \leq d < 0.05$	$0.05 \leq d < 0.1$	$0.1 \leq d < 0.25$	$0.25 \leq d < 0.5$	$0.5 \leq d < 0.1$	$d > 1$
质量百分含量/%	7.47	40.83	37.07	11.13	3.50	2.7	0.74

1.2 试件制备

土样制备满足 GB/T50 123—1999《土工试验方法标准》规定,将砒砂岩烘干后过筛(筛孔直径为 2 mm),取筛下足够土样放入干燥器。根据试样筒的容积和试验干密度计算所需干土,再由干土质量和含水率计算所需蒸馏水。利用两头压实法制得直径为 61.8 mm,高度为 145 mm 的试样。冻融试验的土样经验算,其干密度误差不大于 $\pm 0.01 \text{ g/cm}^3$,含水率误差不大于 0.5%。试样的均匀性主要表现在密度和含水率的均匀性上,要求密度和含水率不超过允许差值,以使试验结果离散型减小,每种试验处理设置 2 个重复。

1.3 试验方案

为系统全面的研究含水率、干密度、冻结温度对

砒砂岩冻融的影响,本试验采用全面的试验。含水率的数值范围:采用砒砂岩的天然含水率 8% 为含水率最小值,以试样的饱和含水率 16% 为含水率上限,以 1% 的幅度递增。冻结温度的考虑:由于在冻结温度高于土体的冻结温度时,土体不发生冻结。因此,本文在选取冻结温度范围时,同时考虑了土中水的冻结温度以及要注意几个冻结温度要具有一定的间距,以便使试验结果具有一定的普遍性和实用性;再综合考虑试验地区的温度条件,选取 -5, -10, -15, -20 °C 4 个不同的温度冻结,采用 20 °C 进行融化。干密度的取值:以自然干密度 1.74 g/cm^3 为下限,标准击实的最大干密度 1.85 g/cm^3 为干密度为上限,中间插入 $1.77, 1.80 \text{ g/cm}^3$ 。具体试验方案见表 2,剩余 3 个干密度重复上述试验。

表 2 测试土样的物理性质参数和试验方案

试验编号	干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/%	箱体冻结温度/°C	箱体融解温度/°C
No. 01-09	1.74	8,9,10,11,12,13,14,15,16	-5	20
No. 10-18	1.77	8,9,10,11,12,13,14,15,16	-10	20
No. 19-27	1.80	8,9,10,11,12,13,14,15,16	-15	20
No. 27-36	1.85	8,9,10,11,12,13,14,15,16	-20	20

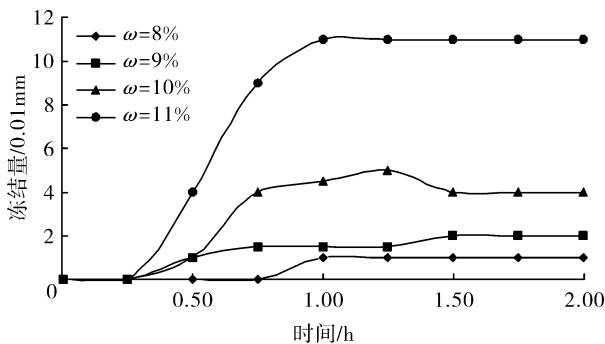
1.4 试验方法

试验在高低温交变湿热试验箱 H/GDWJS-100L 内进行,采用封闭系统(即无补水)、自由冻结。将试件放入表面包裹 3 cm 厚泡沫保温材料的不锈钢筒中,束缚其横向变形,保证在纵向上发生冻胀。试验箱制冷方式为风冷,在试样上部覆盖 0.3 mm 厚铁板,在传递冷源的同时避免试件含水率的损失。在铁板上部安装精度为 0.01 mm 的百分表测量其位移。在试件的上部、中部和下部各安装一个电热偶反映试件温度。将整个试验装置固定在固定架上置于试验箱内进行试验。当监测到冻胀稳定时,停止冻结,然后改变箱体温度,在 20 °C 进行融化,当监测到变形停止时,停止融化,完成一次冻融过程,观察各因素对砒砂岩冻融的影响。

2 结果与分析

2.1 含水率对砒砂岩冻胀量的影响

对 288 个试件进行冻胀试验后得出:在本试验研究的含水率范围内(如图 1 所示),当干密度为



1.77 g/cm³ 冻结温度为 -20 °C 时,含水率以 11% 为界限,当含水率低于 11% 时冻胀率很小,冻胀量最大值在 0.11 mm 范围内,随含水率减小冻胀愈不明显,最大冻胀都在 0.02~0.04 mm。当含水率达到 12% 时,发生冻胀的最值增加至 0.43 mm,然后随含水率增加冻胀量增加显著,当含水量到 16%,其最大冻胀量为 1.88 mm。出现这种现象的原因是:在干密度以及冻结温度不变的条件下,当含水率很小时,试件中有足够的孔隙去承担水份冻结膨胀引起的体积变化,所以在含水率较小的情况下试件的冻胀量很小;随着含水率的增大,没有改变试件的密度情况下却使试件的饱和度增加,在这种情况下水分冻结膨胀引起的体积变化对试件的影响增大,随着含水率的增大这种影响也越来越大,相应的冻胀量随着含水率的增大而增大。

相同降温速率下,随含水率增加达到冻胀最值的历时逐渐增大,当含水率 11% 以下,1.5 h 冻胀趋于稳定,16% 时 2.5 h 稳定,3.25 h 后所有的冻胀结束,冻胀量保持不变。

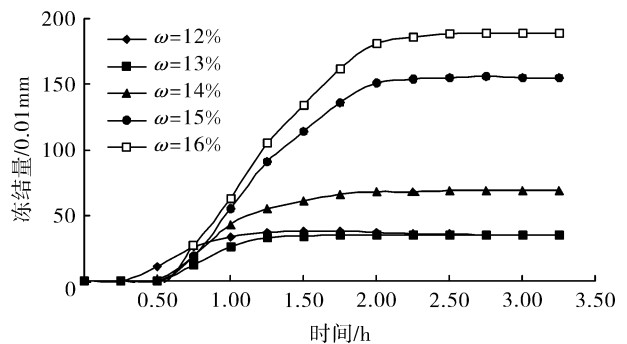


图 1 冻胀量随时间变化关系

2.2 含水率对砒砂岩融化过程中位移的影响

将试件继续冻结至 7 h,使其冻胀量达到充分稳定后,将试件在 20 °C 下融化。含水率是影响砒砂岩融沉性的重要指标。图 2 表示的为本次试验过程中冻结温度分别为 -5, -10, -15, -20 °C 时的砒砂岩融化过程中最大位移变化量(试件融化前后高度差)与含水率关系曲线。

从图 2 可以看出,虽然冻结温度、干密度不同,但均在 13% 含水率附近,发生融胀和融沉的转变:含水率低于 13% 时砒砂岩在融化过程中发生膨胀现象,当含水率高于 13% 时砒砂岩在融化过程中发生沉降现象。由此可知并非所有含水率的砒砂岩在融化过程中都产生融沉,只有当砒砂岩含水率增长到某一界限后才发生融沉现象。较小含水率的试件发生膨胀的原因是在一定含水量范围内,冻结过程中试样内只

有孔隙冰而没有结构冰,水变成冰对试件体积影响较弱,故土中冰融化不会导致融沉,相反还会因试样内部土颗粒及其集合体热胀而使其体积略有增大,从而产生融胀;而发生沉降的原因是土体融化过程中冰变成水体积变小,在土的自重下而进一步下沉。在这里将发生膨胀现象向发生沉降现象过渡的含水率称为砒砂岩的起始融沉含水率。

将融化过程中最大位移变化量与含水率关系进行拟合,得出表 3 冻结温度为 -5 °C 时,4 个干密度融化过程中最大位移变化量与含水率关系式。求得最大位移变化量为零时试件的含水量即为该土的起始融沉含水量,即 $\eta=0$ 时 4 个干密度在冻结温度为 -5 °C 时的起始融沉含水率表 3 所示。结合其他 3 个冻结温度所得的数据分析亦可得出:砒砂岩的起始融沉含水率在均在 13% 左右,基本上保持定值。

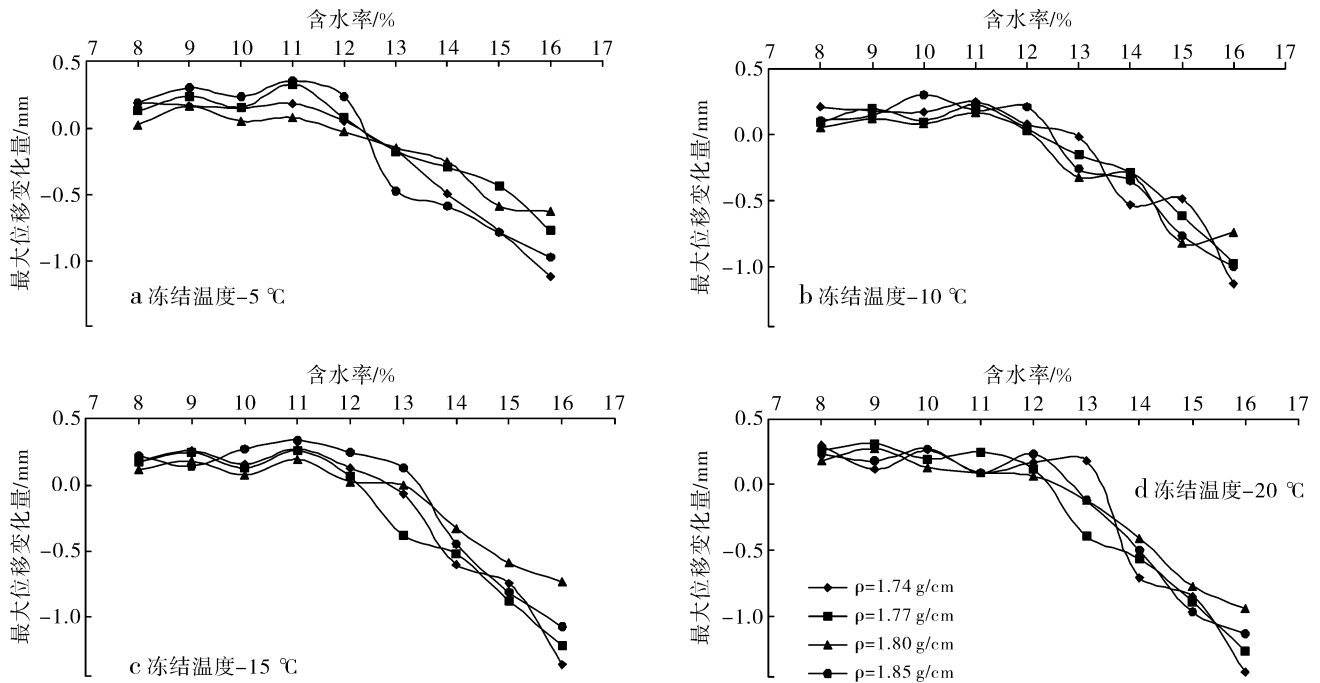


图 2 融化过程中最大位移变化量与含水率关系

表 3 融化过程中最大位移变化量 η 与含水率 ω 关系

干密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	二者关系式	相关系数	起始融沉含水率/%
1.74	$\eta = -0.0310\omega^2 + 0.6235\omega - 2.8795$	0.9955	12.93
1.77	$\eta = -0.0204\omega^2 + 0.3959\omega - 1.6038$	0.9599	13.65
1.80	$\eta = -0.0155\omega^2 + 0.3014\omega - 1.2549$	0.9431	13.40
1.85	$\eta = -0.0225\omega^2 + 0.1062\omega - 1.4885$	0.9069	12.94

2.3 干密度对砒砂岩融化过程中位移的影响

在含水率以及冻结温度一定时,干密度是影响砒砂岩融沉性的另一重要指标。以含水率为 8%, 10%, 12%, 14%, 16% 为例,当冻结温度分别为 -5 , -10 , -15 , -20 $^{\circ}\text{C}$ 时,砒砂岩融化过程中最大位移变化量与干密度的关系曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出干密度从 1.74 g/cm^3 变化到 1.85 g/cm^3 时,砒砂岩最大位移变化量大致呈先减小后增大趋势,干密度为 1.80 g/cm^3 时试件的最大位移变化量最小。将融化过程中位移变化量的转折点对应的干密度称为临界干密度,则砒砂岩的临界干密度为 1.80 g/cm^3 。当试验所取的干密度小于临界干密度时,试件中土颗粒之间的孔隙比较大,砒砂岩试件经过冻融后的最大位移变化量是由融化时土体自重引起的试件中孔隙减小,因此干密度较小时试件的融沉量相对较大。当试验所取得干密度大于临界干密度时,试件中孔隙率变小,融化时试件的自重对试件最大位移变化量的影响减弱,此时试件的饱和度却随着干密度的增大而增大。对于同一含水率的试

件,干密度较小的试件在冻结时,土体中有足够的空间容纳固态冰的自由膨胀,不会破坏土颗粒之间的连接;干密度较大时,冻结时土体中的孔隙不能满足固态冰的自由膨胀致使土体颗粒间连接作用产生破坏,使试件的冻胀量增大,相应的融化时位移变化量的增大。

2.4 冻结温度对砒砂岩融化过程中位移的影响

图 4 给出了 4 个干密度下砒砂岩在融化过程中最大位移与冻结温度的关系曲线。由图 4 中可以看出,随着冻结温度的降低融化时试件的最大位移变化量也增大。由于本次试验采用的是封闭系统(即无补水)、自由冻结,所以在试验过程中发生冻胀的主要原因是水冻结成冰时的体积变化。冻结温度较低时,土体发生冻结的过程中并非所有的水都发生冻结,只是一部分水发生冻结,仍存在一部分未冻结的水。随着冻结温度降低土体中的未冻结的水越少,发生冻结的水量就越多,这个过程中水结成冰引起的体积变化量就越大,从而试件的冻胀量就越大,相应的融化时试件的位移变化量就越大。

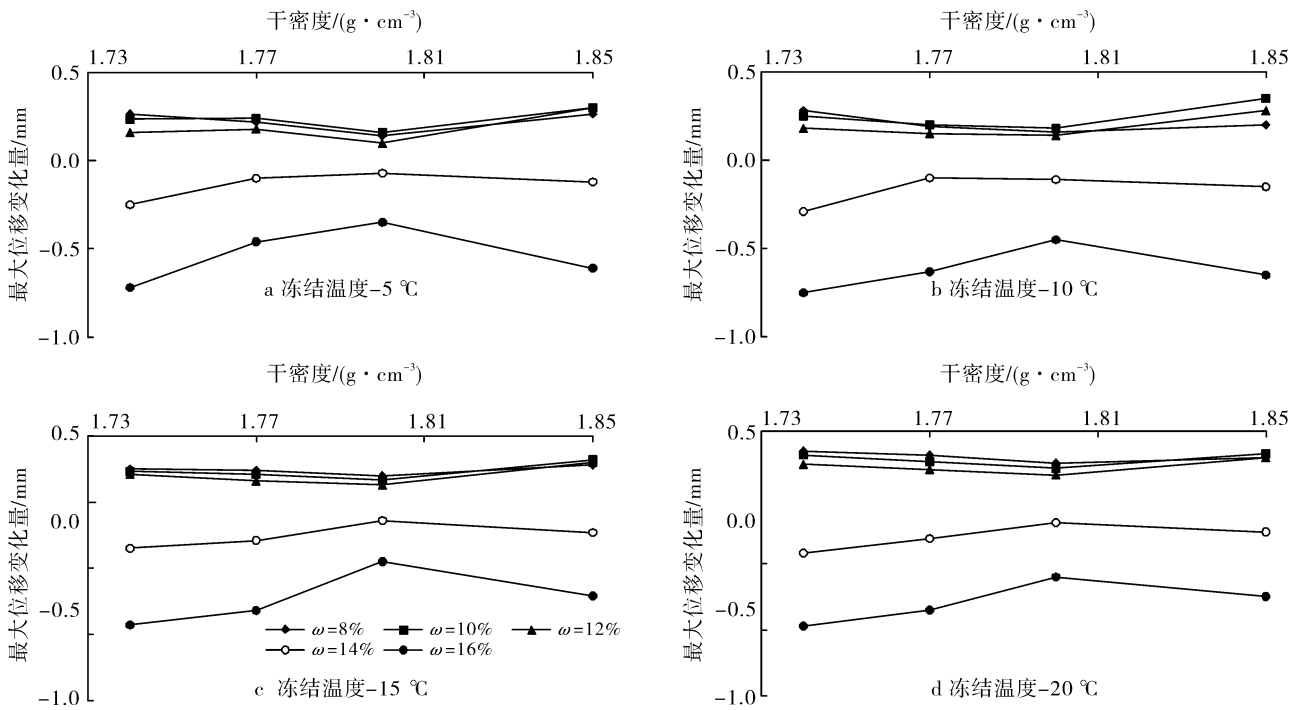


图 3 融化过程中最大位移变化量与干密度的关系

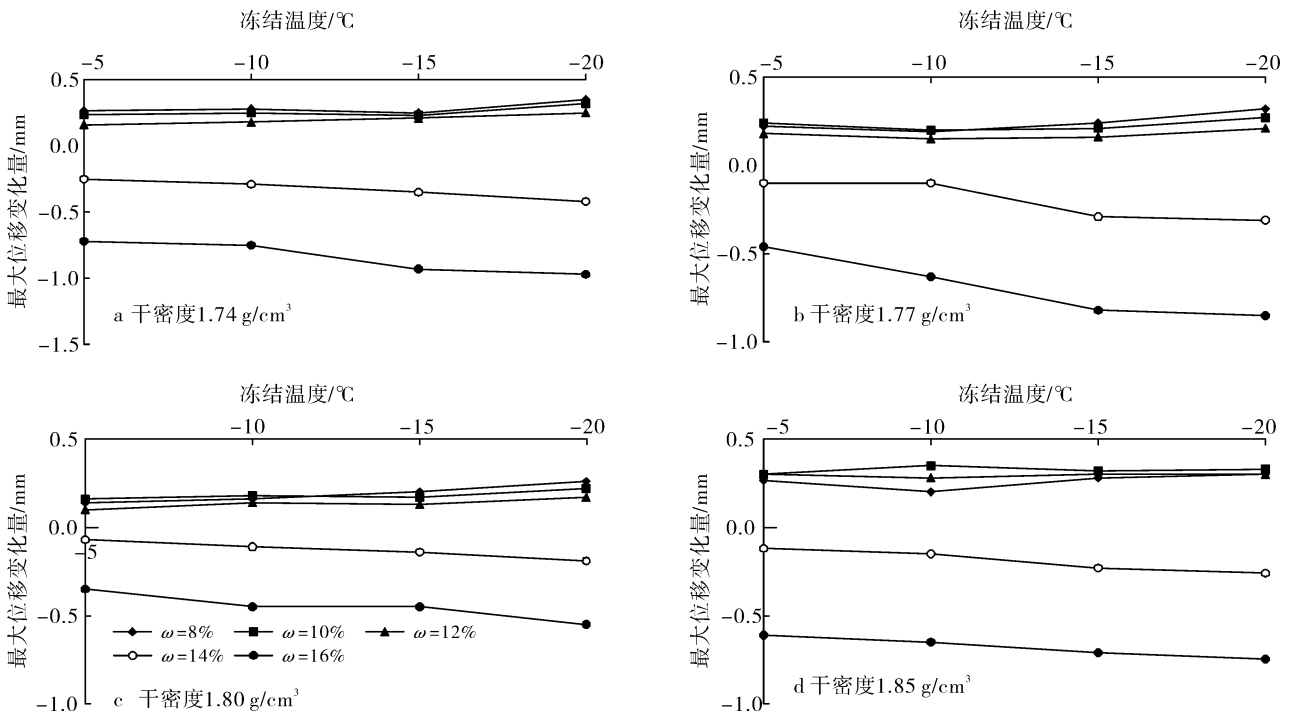


图 4 融化过程中最大位移变化量与冻结温度的关系

3 讨论与结论

(1) 冻结时,冻胀量与含水率有关,当含水率小于 11%时,冻胀量随着含水率的增大冻胀量变化不明显,最大值仅为 0.43 mm,当含水率大于 11%时随

着含水率的增加冻胀量变化越来越明显,最大值可达 1.88 mm。

(2) 砒砂岩结构性虽强,具有坚硬的岩性特征,但水对其作用极其敏感。在融解的过程中并非所有含水率的砒砂岩试件都发生融沉,低含水率下产生融

胀,高含水率则发生融沉。在这里将发生融胀现象向发生融沉现象过渡的含水率称为砒砂岩的起始融沉含水率,将最大位移变化量与含水率关系进行拟合,得出砒砂岩的起始融沉含水率均在 13%左右,基本上保持定值。

(3) 反复冻融的过程必然伴随砒砂岩内部结构的不断变化,同时砒砂岩在成岩的过程中,各处的密度并不完全相同,在试验过程中发现不同干密度的砒砂岩融解过程中的位移变化也不尽相同。砒砂岩试件融解时最大位移变化量与临界干密度有关,试验所测砒砂岩的临界干密度为 1.80 g/cm^3 ,当试验所取干密度小于临界干密度时,最大位移变化量随干密度增大而减小;大于临界干密度时,最大位移变化量随干密度增大而增大。

(4) 砒砂岩土体发生冻结时,并非所有土中水分都冻结,而是存在一部分未冻水,冻结温度越低,未冻水含量越少,发生冻结的水量越多,冻胀越强烈,相应的融解时试件的位移变化量就越大。对于同一含水率、干密度条件下的砒砂岩试件融化时的最大位移变化量随着冻结温度的降低而增大。

总之冻融作用会引起砒砂岩颗粒间的重新排列,使得砒砂岩土体的孔隙特征发生变化;而孔隙的变化必然导致岩土体骨架特征发生相应变化,使传力结构的体系发生内部位移,因此冻融循环作为一种温度变化的具体形式,可以被理解为一种特殊的强风化作用,对砒砂岩的结构有着强烈的影响。

[参 考 文 献]

- [1] 赵羽,金争平,史培军,等. 内蒙古土壤侵蚀研究[M]. 北京:科学出版社,1989:2-31.
- [2] 许炯心. 黄河中游多沙粗沙区 1997—2007 年的水沙变化趋势及其成因[J]. 水土保持学报,2010,24(1):1-7.
- [3] 叶浩,石建省,李向全,等. 砒砂岩岩性特征对抗侵蚀性影响分析[J]. 地球学报,2006,27(2):145-150.
- [4] 唐政洪,蔡强国,李忠武,等. 内蒙古砒砂岩地区风蚀、水蚀及重力侵蚀交互作用研究[J]. 水土保持学报,2001,15(2):25-29.
- [5] 叶浩,石建省,王贵玲,等. 砒砂岩化学成分特征对重力侵蚀的影响[J]. 水文地质工程地质,2006,33(6):5-8.
- [6] 毕慈芬,王富贵. 砒砂岩地区土壤侵蚀机理研究[J]. 泥沙研究,2008(1):70-73.
- [7] 吴利杰,李新勇,石建省,等. 砒砂岩的微结构定量化特征研究[J]. 地球学报,2007,28(6):597-602.
- [8] 石迎春,叶浩,侯宏冰,等. 内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J]. 地球学报,2004,25(6):659-664.
- [9] 李晓丽,于际伟,刘李杰. 鄂尔多斯砒砂岩土壤侵蚀与气候条件关系的研究[J]. 内蒙古农业大学学报:自然科学版,2014(3):105-109.
- [10] Chamberlain E J, Gow A J. Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils[J]. Engineering Geology, 1979,13(1/4):73-92.
- [11] Viklander P. Permeability and volume changes in till due to cyclic freeze-thaw[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1998,35(3):471-477.
- [12] Graham J, Au V C S. Effects of freeze-thaw and softening on a natural clay at low stresses[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985,22(1):69-78.
- [13] 朱元林,张家懿. 冻土的弹性变形及压缩变形[J]. 冰川冻土,1982,4(3):29-40.
- [14] 何平,程国栋,朱元林. 冻土融沉系数评价方法[J]. 冰川冻土,2003,25(6):608-613.
- [15] 元喜忠. 大兴安岭北部多年冻土地区路基沉降研究[J]. 冰川冻土,1999,21(2):155-158.
- [16] Klinova G, Aksenov V, Dzhakhangirova N. Thaw-induced deformation properties of frozen soils[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2010,47(3):102-107.
- [17] Tanaka T, Haung S, Fukuda M. A study on cold region pipeline design based on full-scaled field experiment[C]// 7th International Pipeline Conference. USA: American Society of Mechanical Engineers, 2009:211-219.
- [18] Morgenstern N R, Nixon J F. One-dimensional consolidation of thawing soils[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1971,8(4):558-565.
- [19] Shoop S, Affleck R, Haehnel R, et al. Mechanical behavior modeling of thaw-weakened soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2008,52(2):191-206.