

文章编号: 1000-7598(2009)03-0836-04

青藏铁路冻区盐渍土热特性及力学性能分析

王春雷^{1,2}, 谢强¹, 姜崇喜³, 胡启军¹

(1.西南交通大学 土木工程学院, 成都 610031; 2.铁道第三勘察设计院集团有限公司, 天津 300142;
3.西南交通大学 材料先进技术教育部重点实验室, 成都 610031)

摘要:路基冻胀、融沉是在青藏铁路经常遇到的现象,在盐渍土分布的冻区更为明显。运用TG-DSC技术对冻区盐渍土热特性进行分析并研究环境变化对冻土强度的影响,结果表明:易溶盐对盐渍土热特性有着重要影响,随含水率增大影响愈剧烈;冻结强度随着含水率的增大而增大,随冻结温度的降低而升高。所得结论对掌握青藏铁路盐渍土地区冻土工程冻胀、融沉特性有着指导意义。

关键词:青藏铁路;盐渍土;TG-DSC技术;热特性;冻结强度

中图分类号: TU 448

文献标识码: A

Analysis of thermal characteristics and mechanical properties of salty soil in frozen area of Qinghai-Tibet Railway

WANG Chun-lei^{1,2}, XIE Qiang¹, JIANG Chong-xi³, HU Qi-jun¹

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. The Third Railway Survey and Design Institute Group Corporation, Tianjin 300142, China; 3. Key Laboratory of Advanced Material Technology, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The frost-heaving and thawing-settlement of roadbed are often met in Qinghai-Tibet Railway, especially in salty soil area. Thermal characteristics of salty soil are researched by TG-DSC technique. The results show that soluble salts have great influence on thermal characteristics of salty soil; water content gets higher, phenomena gets acuter. Freezing force depends on water content and freezing temperature; the more water content or the less temperature is, the more intensive of freezing force is. The conclusion has guiding significance for mastering the characteristics of frost heaving and thawing-settlement in salty soil area of Qinghai-Tibet Railway.

Key words: Qinghai-Tibet Railway; salty soil; TG-DSC technique; thermal characteristics; freezing force

1 引言

在青藏铁路以盐渍土为主的冻区进行道路建设经常遇到的问题是冻胀和融沉,特别是在高温、高含冰量且含有较高易溶盐成分的多年冻土段,极易受工程的影响而产生冻胀抬升及融化下沉,这主要是因为土体的组构特征,如土的粒度、矿物成分、结构等造成土体在一定供水条件下由于温度场的作用引起其物理特性发生变化,另外由于盐渍土的三相与非盐渍土不同,故它的液相是盐溶液,固相包括土颗粒和结晶盐^[1]。固相结晶盐和液相盐溶液的变化导致盐渍土的工程性质的不确定性。因此,为控制路基质量,就需要对土体所处的环境特征及其热特性、力学特性进行研究。目前国内外鲜有学者

将TG-DSC分析用于土盐渍土,大多用于化工、冶金、生物质材料等^[2-5];在对冻土力学性能研究方面国内外学者大多研究非盐渍土或室温下进行研究^[6-8]。本文选取青藏线某段含盐量较高的盐渍土进行TG-DSC分析,研究含水率及易溶盐变化时盐渍土热学行为的变化特征;通过对不同温度、含水率土样的无侧限抗压强度试验,研究了环境变化对其强度的影响。研究结果对掌握盐渍土热特性及控制冻区工程冻胀融沉有着重要意义。

2 试验方法

试验样品取自青藏高原那曲河地区,该区地基土系由洪积、湖积和湖泊化学沉积的盐层及超氯盐渍土组成。土样最优含水率为10.61%,易溶盐含量

收稿日期: 2007-06-28

基金项目: 铁道部科技开发计划项目 (No. 2001G001-D-05)。

第一作者简介: 王春雷,男,1978年生,工程师,博士,主要从事道路设计与建设工作。E-mail: chunlei3000@163.com

为12.01%，颗粒分析结果如表1所示。

表1 颗粒分析
Table 1 Grain size analysis of the soil

| 粒组/mm | 含量/% |
|-------------|------|
| > 2.000 | 0.0 |
| 2.000~0.500 | 0.0 |
| 0.500~0.075 | 11.5 |
| 0.075~0.005 | 63.8 |
| < 0.005 | 24.7 |

参照国标GB的方法，利用NETZSCH449-C热分析仪及PROTUES ANALYSIS分析软件对不同含水率的原始土样（含盐样品）及经洗盐土样进行了升温 and 降温过程的TG-DSC分析。试验中原始土样编号为A_i，i=0, 5, 10, 15，表示样品含水率分别为0（低于0.1%），5%，10%，15%。经洗盐土样编号为B_i，i=0, 5, 10, 15。

3 试验结果及分析

图1为经洗盐后土样降温过程的TG-DSC曲线。图中TG曲线为一条水平直线，说明在整个温度范围内样品的质量未变。DSC曲线呈驼峰形状，表明环境温度以一定速率下降时，试样将释放所含热量以达到其温度与环境相一致，DSC曲线则表示了在这个过程中试样释热量的状态与特征。图中几条曲线形状大体相同，即不同含水率经洗盐土样的热过程相似，另外几条曲线上均未观察到明显的放热峰，说明在此过程中样品中液体未在一个明显的温度范围内发生盐晶析出或冰晶产生。分析原因是由于经洗盐后试样中盐的含量较低（< 1% w/w），土的颗粒性状（如表面羟基情况、颗粒结构等）影响了土中水的结晶行为。

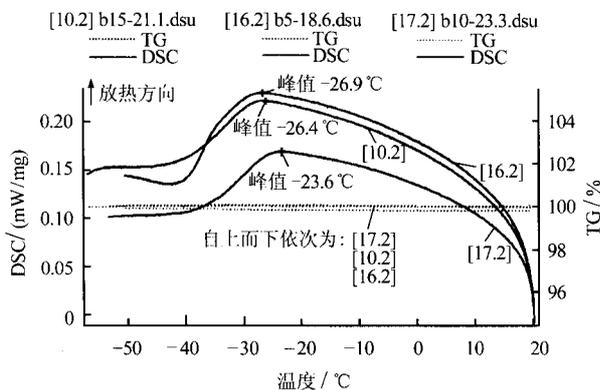


图1 经洗盐后土样降温过程 TG-DSC 曲线
Fig.1 TG-DSC curves of salty soil by salt washing in temperature declining process

图2为经洗盐后土样升温过程的TG-DSC曲线，同降温过程相似，不同含水率土样热过程相似，除b₀曲线外（试样水份接近于0），其他3条曲线均出现3次谷底现象，说明样品内水份均经历固、液、气三相转变，发生吸热反应。随温度的升高，在-9.7~-8.3℃时样品开始吸热，试样中液体开始融化；在5.8~7.9℃时曲线出现了谷底点，表明样品吸热过程逐渐停止，试样中液体融化完成；当温度达98.1~100.1℃时，b₅、b₁₀和b₁₅3条曲线有明显谷底现象，表明此时样品内部水份以气体形式蒸发。此后样品DSC曲线呈平滑状态，样品中热过程处于安定阶段。

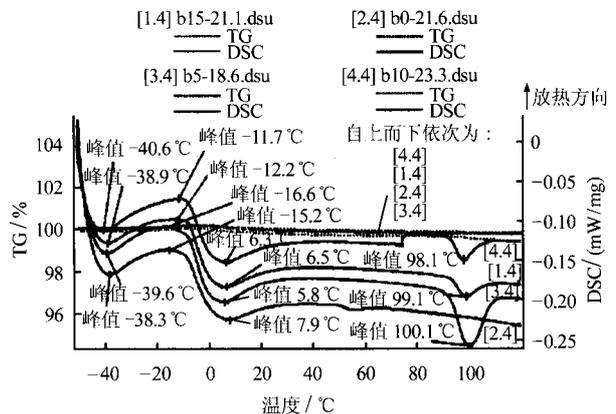


图2 经洗盐后土试样升温过程 TG-DSC 曲线
Fig.2 TG-DSC curves of salty soil by salt washing in temperature increasing process

图3为含盐土样降温过程时的TG-DSC曲线。与经洗盐土样的曲线（图1）相比较，有相似之处，也有明显的不同。在整个温度范围内样品的质量未发生变化，DSC曲线总的趋势呈现为上凸形状。不同的是每条曲线上可观察到两个放热峰，两个放热峰分别表征了土样中溶液在温度下降过程中两级结晶时发生的放热反应；另外可发现放热峰随着含水率的增加而愈明显，说明土中液体相变随含水率增加而剧烈。

图4为含盐土样升温过程时的TG-DSC曲线。可以看出，各含水率DSC曲线在-8.8~-8.1℃时样品开始吸热，试样中液体开始融化。与洗盐土样DSC曲线（图2）不同，此时曲线在较长阶段都呈向下倾斜的态势，没有明确的谷点，表明样品吸热过程没有立即停止。这是由于试样中易溶盐含量较高，使得其中的盐液体浓度高，在温度降低时存在大量过冷不冻液体，致使融化是在较长温度范围内完成。

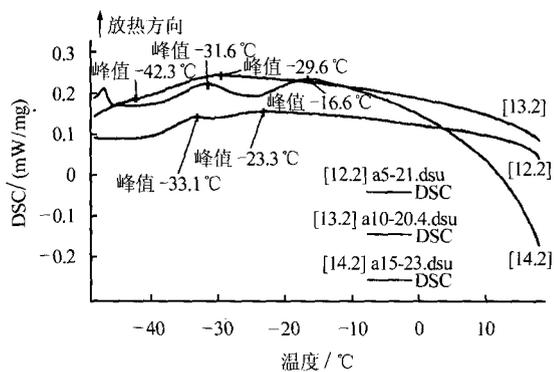


图3 含盐土样降温过程 TG-DSC 曲线
Fig.3 TG-DSC curves of salty soil in temperature declining process

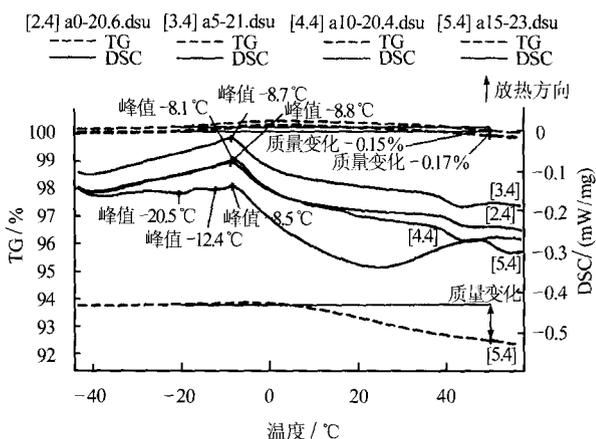


图4 含盐土试样升温过程 TG-DSC 曲线
Fig.4 TG-DSC curves of salty soil in temperature increasing process

4 含水率和温度变化对盐渍土冻结强度的影响

冻结强度是个很复杂的强度指标，决定其数值最重要的因素是冻土的含水率、冻结温度。根据前面的热特性分析，土样在不同环境温度将发生相变，内部结构将发生变化，进而导致土样物理力学性质的变化。因此，研究冻土强度与含水率、冻结温度的关系，对土的冻胀性评价、工程设计有着十分重要的意义。

4.1 试验方法、结果和分析

采用无侧限抗压强度指标，试样为直径 40 mm 高 80 mm 的圆柱体，将制好的试样套入保鲜膜进行冷冻，时间为 24 h；试验采用 GB4540-84 应变控制式静三轴剪切仪，将保温瓶内制备好的试样迅速放在加压板上进行试验。

由热特性分析及考虑实际工程应用，试验温度以 -8 °C 这一相变过渡点，通过不同含水率在 6 °C、-8 °C 和 -18 °C 3 种冻结温度下的无侧限抗压强度

试验，研究含盐土样的强度与含水率、温度的关系，试验结果如图 5、图 6 所示。

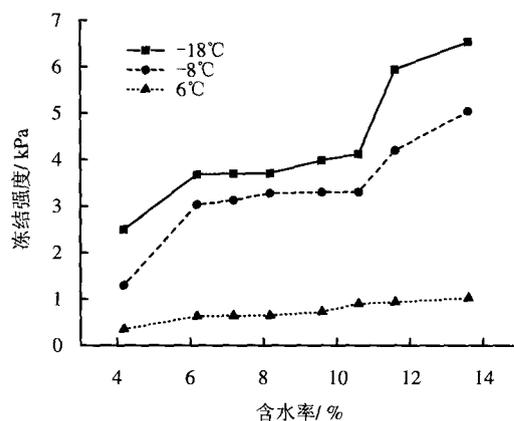


图5 不同温度下冻结强度与含水率关系曲线
Fig.5 Curves of freezing force-water content at different freezing temperatures

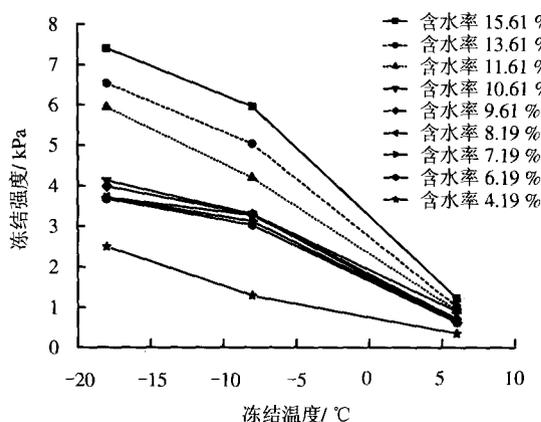


图6 不同含水率冻结强度与冻结温度关系曲线
Fig.6 Curves of freezing force- freezing temperature at different water contents

观察图 5，冻结强度与含水率的关系特别明显，冻结强度随着含水率的增加而增大，当达到最优含水率 10.61 % 时，土样的抗压强度并未出现峰值，随着含水率的增加，有继续且很显著的增加趋势。在含水率 6.19 %~10.61 % 这一段，随含水率的增加，曲线走向平缓，抗压强度变化很小，究其原因，经初步分析认为：当土样孔隙中盐溶液浓度增加时，土的冻胀系数显著减少，土的冻结强度也随之减少^[9]。本土样易溶盐含量为 12.01 %，随着含水率的增加，土样内部的易溶盐逐步溶解，盐溶液浓度增大，渗透到土体的孔隙溶液中，土的冻胀系数减少，土的冻结强度也随之减少，而该阶段随着土中水分的增加，因冻结引起的胶结能力也逐步增强，在二者的同时作用下，导致这一段变化幅度很小；在 -18 °C 和 -8 °C 的冻结温度下，含水率达到最优含水率并继

续增加时,土样的冻结强度有着很明显的增加趋势,尤其在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,曲线有个跳跃式的上升,初步分析认为:随着含水率的增加和冻结温度的降低,冰的饱和度增大,冻结强度由土颗粒构建的骨架向冰晶体构成的骨架转换^[10],因此,在出现了含水率10.61%到11.61%时冻结强度发生跳跃性增加的现象。

由图6可以看出,当土体含水率一定时,冻结温度对冻结强度有着重要的影响,冻结强度随着冻结温度的降低而升高,升高趋势呈非线性规律增大。冻结温度由 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,冻结强度变化十分明显,随着温度的降低,冻结强度变化开始缓慢,趋于平缓。

5 结 论

通过对盐渍土热特性及力学性能分析可以得出以下几点结论:

(1)易溶盐对盐渍土的热特性有着重要的影响,含盐量较高的盐渍土在环境温度降低(升高)时,会有两级放热(吸热)反应,且该现象随含水率增大愈剧烈,该现象将会是影响工程建筑融沉(冻胀)的一个重要因素。

(2)冻结强度随着盐渍土含水率的增大而增大,随冻结温度的降低而升高。在土内水分达到最优含水率并继续增大时,冻结强度有个跳跃式的上升,这种现象随着温度的降低而更加明显。

(3)冻结强度受土样孔隙中盐溶液浓度的影响,盐溶液浓度增加,冻结强度减小、因试验条件有限,今后由必要深入地对各种盐分,盐溶液浓度大小对冻结强度影响进行研究。

参 考 文 献

- [1] 徐攸在. 盐渍土地基[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 20—22.
- [2] 郭兴敏, 张允茂, 张梅, 等. TG-DSC 法对莱钢进口铁矿粉烧结性能的研究[J]. 钢铁, 2004, 39(8): 34—37.
GUO Xing-min, ZHANG Yun-mao, ZHANG Mei, et al. Study of TG-DSC method on sintering performance of iron ores imported in Laiwu steel[J]. *Iron and Steel*, 2004, 39(8): 34—37.
- [3] 何芳, 蔡均猛, 徐梁, 等. 几种生物质热解过程的 TG-DSC 分析[J]. 农机化研究, 2003, 3(2): 163—166.
HE Fang, CAI Jun-meng, XU Liang, et al. Investigation of biomass pyrolysis by simultaneous thermal analyzer[J]. *Agricultural Mechanization Research*, 2003, 3(2): 163—166.
- [4] INABA H, TU P. Evaluation of thermo physical characteristics on shape-stabilized paraffin as a solid-liquid phase change material[J]. *Heat and Mass Transfer*, 1997: 307—312.
- [5] TAN G H, HO C J. Experiments on thermal characteristics of a natural circulation loop with latent heat energy storage under cyclic pulsed heat load[J]. *Heat and Mass Transfer*, 2002, (1): 11—17.
- [6] 陈湘生. 人工冻土瞬时无侧限抗压强度特征的试验研究[J]. 建井技术, 1991, 6(2): 32—33.
CHEN Xiang-sheng. The instantaneous characteristic test of unconfined compression strength on artificially frozen soils[J]. *Mine Construction Technology*, 1991, 6(2): 32—33.
- [7] 雷华阳, 张文殊, 张喜发, 等. 超氯盐渍土的工程特性指标研究[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(1): 70—73.
LEI Hua-yang. Study on engineering property indexes of ultrachlorine saline soil[J]. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 2001, 31(1): 70—73.
- [8] 徐安花, 房建宏. 盐渍土抗剪强度变化规律的研究[J]. 公路工程与运输, 2005, 14(11): 54—59.
XU An-hua, FANG Jian-hong. Study on laws of anti-shearing intensity of salty soil[J]. *Communications Standardization Issue*, 2005, 14(11): 54—59.
- [9] 童长江, 管枫年. 土的冻胀与建筑物冻害防治[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 56—60.
- [10] 何平, 程国栋, 杨成松, 等. 非饱和冻土的强度分析[J]. 冰川冻土, 2002, 24(3): 260—263.
HE Ping, CHENG Guo-dong, YANG Cheng-song, et al. Analysis of strength of unsaturated frozen soil[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 260—263.