

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2023.0013

SUN Binxiang, CHEN Jiaji, PAN Jianguang. Experimental study on frost heaving of coarse grained soil mixed with microencapsulated phase change materials[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2023, 45(1):178-185. [孙斌祥, 陈加集, 潘建光. 掺微胶囊相变材料粗粒土的冻胀试验研究[J]. 冰川冻土, 2023, 45(1):178-185.]

掺微胶囊相变材料粗粒土的冻胀试验研究

孙斌祥^{1,2}, 陈加集^{1,2}, 潘建光^{1,2}

(1. 绍兴文理学院 元培学院, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴文理学院 土木工程学院, 浙江 绍兴 312000)

摘 要: 微胶囊相变材料(PCM)是一种可以通过转变形态而影响温度变化的材料。为了研究相关材料对路基土冻胀的影响,对普通粗粒土及掺入不同含量(5%、8%、10%)微胶囊相变材料粗粒土进行单向冻胀试验。结果表明:与普通粗粒土相比,掺入微胶囊相变材料能延缓粗粒土的温度变化,且土体具有较高的温度终值;同时,能对土样冻结深度的发展产生影响,降低粗粒土最大冻结深度值;也能减弱粗粒土的水分迁移能力,土体的补水量以及最终含水率均有不同程度的减小;掺入微胶囊相变材料能抑制粗粒土冻胀的发展,冻胀量以及冻胀率均得到一定程度的减小。比较掺入5%、8%和10%含量微胶囊相变材料粗粒土冻胀试验结果发现,更高含量的微胶囊相变材料在影响粗粒土的温度、水分以及冻胀等方面表现出更佳的改善效果。因此,在冻土区高速铁路基土中掺入微胶囊相变材料,对改善路基冻胀的发生具有一定的工程意义。

关键词: 粗粒土; 冻胀试验; 微胶囊相变材料; 路基冻胀

中图分类号: P642.14; TB34 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2023)01-0178-08

0 引言

粗粒土在工程上通常被视为一种冻胀不敏感性材料,广泛用于寒区路基的回填^[1]。然而,实际工程应用表明^[1-5],在一定条件下粗粒土也可能产生明显的冻胀现象,从而对路基等线性工程构成危害。同时,我国高速铁路建设正处于快速发展时期,其中有不少路线位于季节冻土区,这对路基的防冻胀技术提出了更严格的要求^[5]。针对冻土区路基冻胀问题,国内外学者进行了系列研究,结果表明土质、水分、温度均是引起粗粒土冻胀的重要因素^[5-7]。赵洪勇等^[8]发现在5%细粒含量的情况下,从常温降至-5℃时土样会发生明显的冻胀,当温度继续降低至-20℃时土样冻胀率的变化趋于稳定,分析认为土样中含量较多的自由水和毛细水在-5℃情况下会结冰,结果导致较为明显的冻胀,而随着温度继续下降,除了已经结冰的自由水和毛细水外,土颗粒中少量的未冻结水不足以产生较明显的冻胀。Bai

等^[9]利用一维冻结实验,研究了冻结对非饱和粗粒土孔隙水汽迁移的影响,结果表明较高的冷却温度有利于土体水分迁移。高玉佳等^[10]通过野外测量土层不同深度的温度及含水率,研究不同深度土体含水率及温度变化对水分迁移的影响,证实了在季节冻土区地表温度降低容易促进水分迁移的发生。上述研究表明,温度是引起粗粒土冻胀的首要因素。

为防止降温引起土体冻胀的产生,工程上通常采用碎石、XPS等材料作为保温措施以减轻冻胀,但是这些措施面临季节性的置换或维修的需要^[5]。相变材料(phase change material, PCM)作为一种可以在形态转换过程中进行热量储存或释放的材料,在道路建设中得到了应用^[11-15]。Ma等^[11]通过室内模拟实验发现,在沥青混合料中掺入相变材料可以降低混合料的升温 and 降温速率,指出相变材料可以用于调节沥青混合料的工作温度,缓解环境温度变化对沥青混合料的负面影响。Mahedi等^[11]对PCM

收稿日期: 2022-04-29; 修订日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572305)资助

作者简介: 孙斌祥,教授,主要从事路基稳定性、岩土工程减灾防灾技术、结构损伤分析研究. E-mail: sbinxiang@263.net

在基础土温度变化中所起的作用进行了研究,认为在冻融条件下掺入 PCM 黄土的温度均高于未掺 PCM 黄土的温度,并能缩短试验过程中黄土的冻结期。Kravchenko 等^[13]、Rao 等^[14]基于室内试验对掺入不同含量及不同类型 PCM 的粉质黏土进行冻融试验,结果表明在添加了 PCM 之后土壤的降温速率会降低,并通过数值分析表明 PCM 会降低附近土壤的温度^[15],同时在模型温度接近相变材料温度范围时,温度变化率有减小的趋势,说明了在温度剧降地区使用 PCM 的可行性。黄英豪等^[16]、Chen 等^[17]通过对掺相变材料膨胀土进行热特性分析得出 PCM 相变释放和储存的热量能与外界温度相抵抗,能延迟土体中冰透镜体的形成,降低了土体的相变潜热,从而提升了膨胀土的热稳定性。综上,掺入相变材料总体上可以改善冻土区土体的抗冻胀能力,然而,针对掺微胶囊粗粒土的抗冻胀特性适应性研究还比较缺乏,尤其是研究不同相变温度范围的相变材料对粗粒土冻胀发展的影响规律将有助于路基中相变材料的应用。

考虑到季节冻土区的特殊环境和相变材料可调节工程结构温度性质,开展不同相变温度范围的相变材料对粗粒土冻胀特性的影响研究具有工程指导意义。通过对普通填料和相变材料改良粗粒土进行单向冻结试验,比较 2 类填料在正弦冻结试验后的温度变化、水分迁移及冻胀量的差异性,分析相变材料改良粗粒土的冻胀特性,从而研究掺相变材料粗粒土改善冻胀特性的可行性。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

1.1.1 粗粒土

本试验所用土料取自某施工道路路基填料,并进行筛分重塑。细颗粒土经界限含水率试验测定,得到其液限为 24.56%,塑限为 16.32%,塑性指数为 8.25,定为粉土。试验用土体颗粒级配以设计规范为参考依据,并结合现有材料得到试验土料级配曲线,如图 1 所示。室内冻胀试验按照《铁路工程土工试验规范》要求进行,在进行冻胀试验前通过击实试验确定试样最大干密度和最优含水率,以确保各试样压实度相同。

1.1.2 微胶囊相变材料

根据预设的温度变化区间,在市场上采购两种不同相变温度范围的相变材料,分别命名为 mPCM

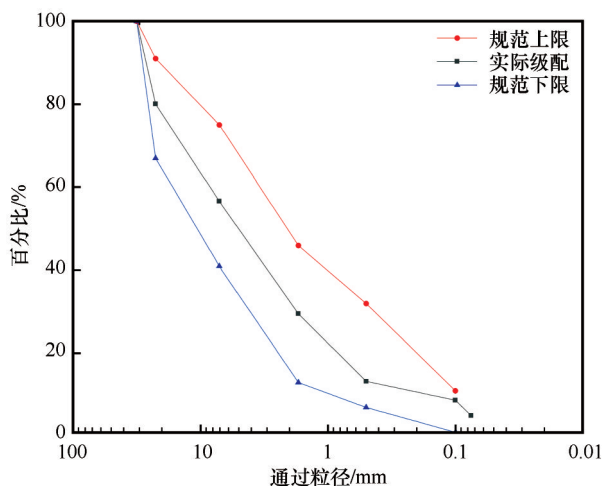
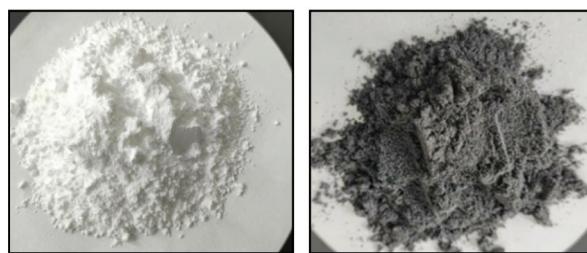


图 1 级配曲线

Fig. 1 Grading curves

(芯材为固-液相变)和 fPCM(芯材为固-固相变),实物照片如图 2 所示。两种微胶囊相变材料均以烷烃材料制成,具有较好的疏水性。其中, mPCM 物理外观为白色粉体[图 2(a)],其密度略大于水,由外壳材料和内核材料组成,芯材比例>60%,粒径为 40 μm 左右,其理论热焓值为 130 $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$; fPCM 芯材相变前后均为固态,其物理外观为黑色粉体[图 2(b)],其密度在 0.7~1.0 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 之间,粒径在 55~60 μm 之间,理论热焓值为 170 $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。



(a) mPCM

(b) fPCM

图 2 mPCM 和 fPCM 实物图

Fig. 2 mPCM and fPCM materials

采用差示扫描法(Differential scanning calorimetry, DSC)对 mPCM 和 fPCM 进行热特性分析,其 DSC 特征曲线具体如图 3 所示。

由图 3(a)可知, mPCM 的相变吸热温度区间为 1.39~11.27 $^{\circ}\text{C}$, 峰值温度为 6.17 $^{\circ}\text{C}$, 相变焓值为 108.68 $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$; 相变放热温度区间为 -7.55~3.56 $^{\circ}\text{C}$, 峰值温度为 0.17 $^{\circ}\text{C}$, 焓值为 112.11 $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。图 3(b)显示 fPCM 的相变吸热温度区间 4.99~10.07 $^{\circ}\text{C}$, 峰值温度为 7.37 $^{\circ}\text{C}$, 焓值为 175.26 $\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$; 其相变放热温度区间为 -0.30~5.56 $^{\circ}\text{C}$, 峰值温度为 3.00 $^{\circ}\text{C}$, 焓

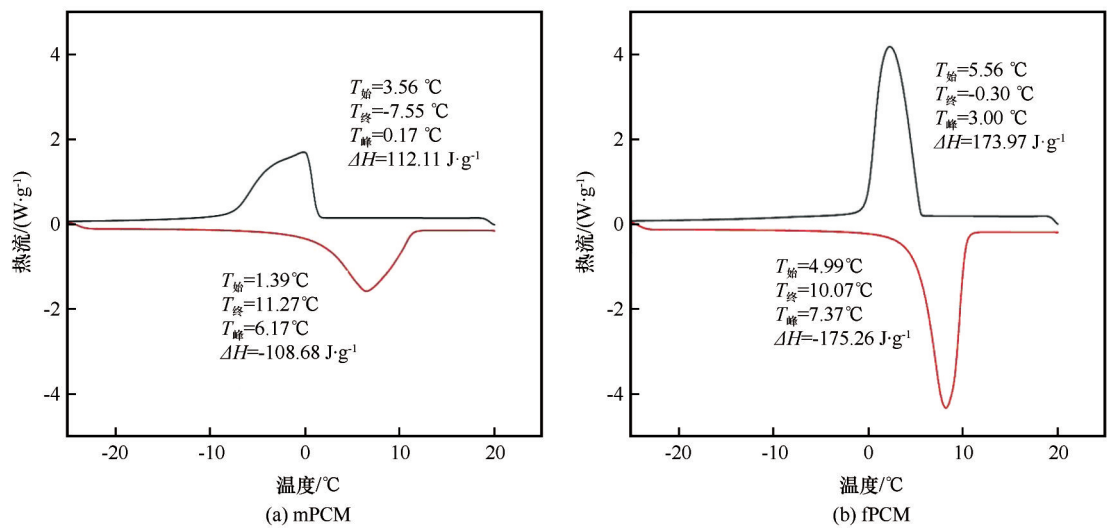


图3 DSC特征曲线

Fig. 3 DSC characteristic curves

值为 $173.97\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ 。上述分析可知,相变材料mPCM更适用于低温环境,而fPCM发生相变的焓值更大。

1.2 试验方案

通过普通粗粒土和掺相变材料粗粒土的对照实验研究相变材料对粗粒土冻胀的影响。试验采用正弦降温冻结模式,设置7组试样,各组试样预设初始含水率均为10%,细颗粒含量均为5%,为比较相变材料不同掺量的影响,设置相变材料掺量为5%、8%、10%(占干土质量),具体工况设置见表1所示。

表1 试验工况

Table 1 Test conditions

组别	含水率/%	细颗粒含量/%	相变材料 掺量/%	试验时间/h
CGS	10	5	0	72
CGS-F5	10	5	5	72
CGS-F8	10	5	8	72
CGS-F10	10	5	10	72
CGS-M5	10	5	5	72
CGS-M8	10	5	8	72
CGS-M10	10	5	10	72

注: CGS为粗粒土, F、M为相变材料类型(F=fPCM、M=mPCM), 数字代表相变材料含量。例如: CGS-F5为掺5% fPCM的粗粒土。

1.3 试验装置及步骤

本研究粗粒土冻胀试验装置主要部分如图4所示。10个温度传感器采用STT-R铂电阻式,温度范围为 $-50\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$,精度 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$;5个水分传感器为EC-5型,工作温度为 $-40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,测量精度为3%;位

移计采用KTR-C微型弹簧自复位式电阻尺,可由弹簧作用力自动复位,精度为0.1%;马氏瓶水量变化采用双弯曲梁式称重传感器读取;所有数据采集均通过DT80及其扩展模块CEM20进行。试样筒由直径200 mm的有机玻璃圆筒制成,并在冻胀试验箱中进行试验。

粗粒土体各组分质量按要求压实度、质量与体积关系称取。将土样与相变材料倒入小型搅拌机,并按要求含水率加水进行搅拌,取出静置浸润12 h后再进行一次搅拌,再静置12 h,取出部分土样进行初始含水率检测,以确保各试样水分充分均匀。本试验所制试样的高为20 cm,直径为20 cm,试验为气态水补水模式,因此,底部放置一个不锈钢开孔透水托盘。试样托盘上开始填筑,分5层进行击实。为模拟顶部不透水层情况,在土样顶部铺设一层保鲜膜。在试样制备过程中,从下至上依次插入温度传感器,制备好后顶端放置上冷浴板,并安装位移传感器。为减少环境温度对冻结过程中温度的影响,用保温棉包裹在试样筒的周围[图4(a)],调节补水马氏瓶直至内外水压相等,随后开始冻胀试验。冻胀试验包括恒温阶段和降温阶段,冻结试验开始前,调节上下冷浴板[图4(b)]温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,恒温24 h,保证试样内部温度均匀;待试样内部温度均达到 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,按正弦波动模式调节冷端顶板温度变化: $T=10\sin[2\pi t/(144\times 3600)+\pi/2]$, t的单位为s,顶板温度从 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下降到 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。试验结束后,将试样按2 cm一层取样,取每层代表土样进行烘干,测试最终含水率。

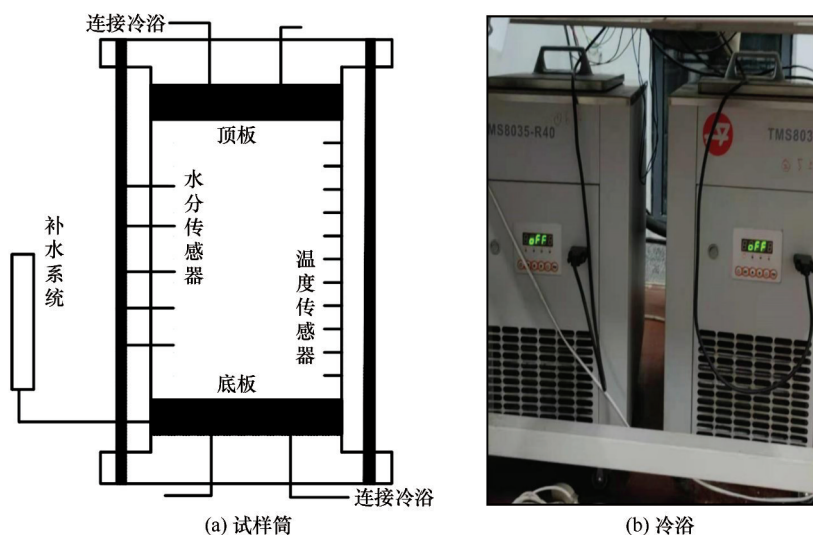


图4 试验装置

Fig. 4 Test equipments

2 结果与分析

2.1 温度监测

在正弦降温模式下,土体试验期间处于正冻

状态而不是处于恒温状态,更符合环境温度的波动模式。图5为不同掺量相变材料的粗粒土冻胀试验过程中各试样靠近冷端处(4 cm)的温度变化曲线。

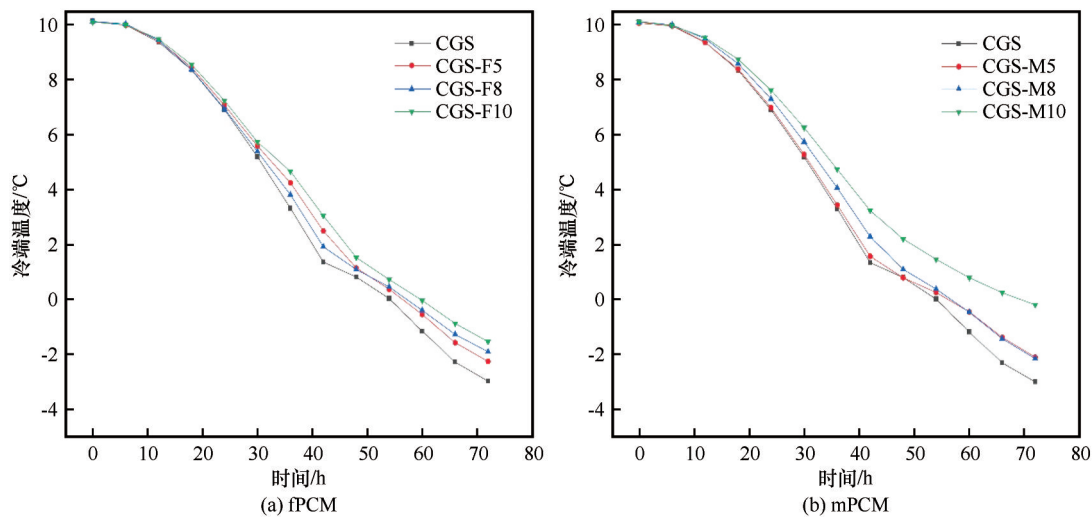


图5 掺相变材料粗粒土冷端降温曲线

Fig. 5 Cooling curves of coarse grained soils with fPCM and mPCM

由图5可知,各试样在降温过程中的整体走势相似,各试样在降温前期的温度差值区别不大。图5(a)标识处显示fPCM粗粒土和普通粗粒土的温差逐步拉大,因为该区域fPCM开始有相变效应。同样地,图5(b)中mPCM也于标识处开始相变。因此,fPCM和mPCM改良粗粒土在降温过程中的温度变化滞后于CGS,并且影响了试样的最终温度。试验结束时CGS的最终温度为 -2.97°C ,CGS-F5和

CGS-M5的最终温度分别为 -2.25°C 和 -2.06°C ,比CGS分别高了 0.72°C 和 0.91°C 。与此同时,通过分析发现CGS的降温速率大于两种相变材料改良的粗粒土,这使得CGS试样4 cm处的温度达到 0°C 需耗时为54.25 h,而CGS-F5和CGS-M5在该位置达到 0°C 用时分别为56.75 h和57.41 h,比CGS延后了2.50 h和3.16 h。以上结果说明掺入相变材料可以减小粗粒土的温度下降速率,延迟冻胀的发

生时间,并且提高了粗粒土的最终温度,有利于抑制冻胀的发展。

图 5(a)和 5(b)同样显示了不同掺量 5%、8% 和 10% 相变材料粗粒土试样的温度变化曲线,随着相变材料掺量的增加,相变所产生的热量也会更多,这使得试样的最终温度随之变大。如 CGS-F8、CGS-F10 最终温度为 -1.89°C 和 -1.54°C ,这表明随着相变材料含量的增加,越有利于抑制冻胀的发生。

对各测点的温度进行样条插值,可计算冻结过程中冻结锋面的位置,推算出各试样冻结深度发展起始时间以及最大冻深,具体数值见表 2。

表 2 试样的最大冻结深度

Table 2 Maximum freezing depth of different samples

试样组别	最大冻深/cm	起始时间/h
CGS	8.46	43.9
CGS-F5	7.23	48.2
CGS-F8	7.08	49.9
CGS-F10	6.78	53.6
CGS-M5	6.73	47.5
CGS-M8	7.30	49.8
CGS-M10	4.32	57.8

从表 2 可看出,普通粗粒土冻结深度发展的起始时间最早,其最终冻结深度也最大,达到 8.46 cm,而两类相变材料改良粗粒土的最终冻结深度均有所减小,为 7.23 cm 和 6.73 cm。此外,掺入两类相变材料之后粗粒土的冻结深度发展的起始时间有所延迟,其中,CGS-F5 和 CGS-M5 分别比 CGS 延迟了 4.3 h 和 3.6 h。随着相变材料掺量的增多,冻结深度发展的起始时间变得越晚,并且最终的冻结深度也越小,如试样 CGS-F8 和 CGS-F10 的冻结起始时间分别比 CGS-F5 晚了 1.7 h 和 5.4 h。这是因为冻结深度的发展与温度密切相关,相变材料在降温过程中释放热量以及其本身的低导热性,导致在同样的冷端温度变化下,试样温度下降较为缓慢,延缓了冻结深度向下发展。以上试验结果说明相变材料对粗粒土冻结深度的发展具有积极的作用,掺入两类相变材料均可延缓土体冻结深度的发展,减轻冻胀对路基深处的影响。总体而言,粗粒土掺入 mPCM 比 fPCM 能更好地改善抗冻胀性。

2.2 水分分布

图 6 为各试样补水量全程发展曲线(反映了整个试验中的补水过程,时间轴增加了 24 h 的恒温时

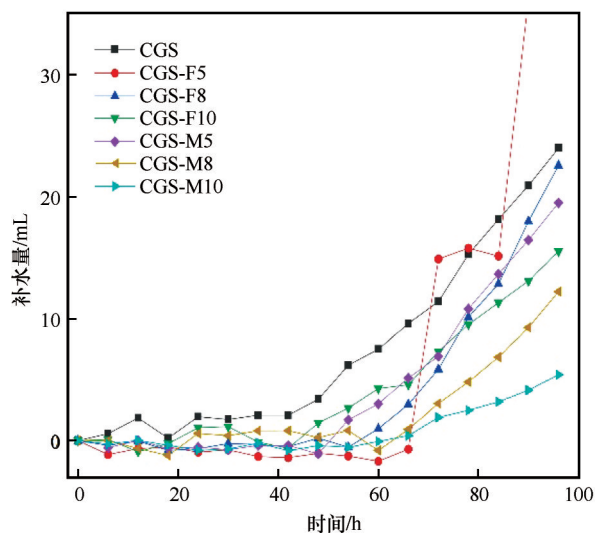


图 6 试样补水量变化曲线

Fig. 6 Curves of water replenishment amount of each sample

长),可以发现各试样的整体补水变化规律基本一致,需要特别说明的是 7 组试样的冻胀试验过程均正常,但 CGS-F5 试样试验过程中补水量的数据采集由于线路接触不良而出现数据异常,为了体现 7 组实验的整体性,CGS-F5 试样补水量相关数据还是放在图 6 中,这并不影响 CGS-F5 试样除补水量外的其他数据变化分析。从补水量的速率来看,试验前期(48 h 左右)仅有少量补水发生,后期表现为快速补水。结合温度变化分析其原因,在正弦降温模式下,前一半的降温时间内温度梯度较小导致少量的水分迁移。随着冷端温度降温速率增加直至预设温度 -10°C ,试样中某些位置的温度开始低于冻结温度并产生了冰晶,形成冻结缘,冻结缘会对下部未冻区内的水产生吸力,使得水分不断迁移至正冻区,因此,补水量持续增大。

对比普通粗粒土和两类相变材料改良粗粒土的补水量可以发现,普通粗粒土(CGS)的补水量最大,达到 24.21 mL,掺入两类相变材料之后,粗粒土的补水量有所减小。其中,CGS-F8、CGS-F10 补水量分别为 22.57 mL 和 16.27 mL,CGS-M5、CGS-M8 和 CGS-M10 的补水量为 17.85 mL、12.26 mL 和 5.25 mL。以上可以看出,mPCM 和 fPCM 改良粗粒土的补水量均小于普通粗粒土。

在试验结束后,将试样沿深度方向每 2 cm 为 1 层进行取样,烘干测试最终含水率,得到最终含水率分布,如图 7 所示。其中,0 cm 为试样上部靠近冷端处,20 cm 为底部靠近端处,虚线为土样初始含水率。从图 7 可以看出,试样冻结后的最终含水率呈

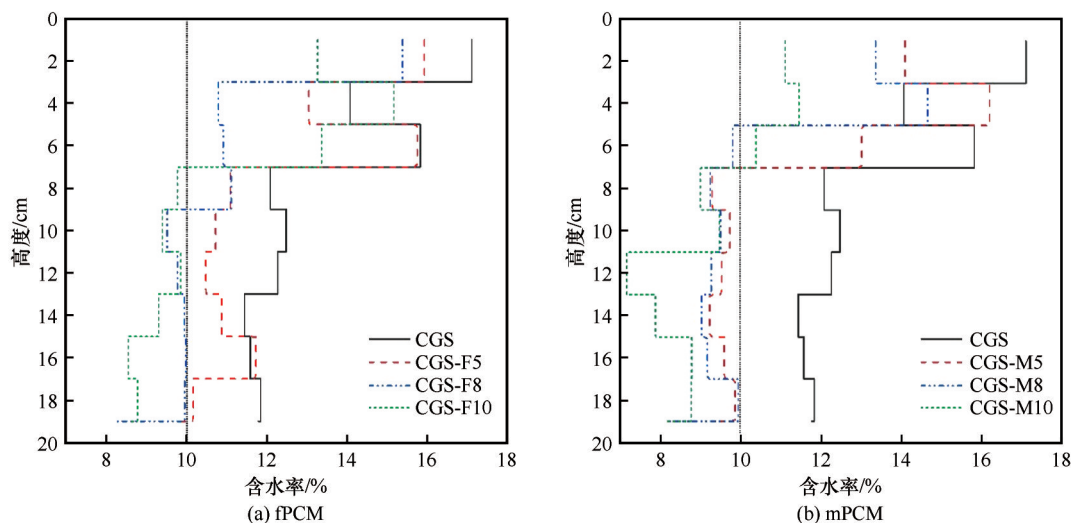


图7 试样含水率分布

Fig. 7 Moisture content distributions of each sample

现“上大下小”的模式,CGS的最大含水率为17.11%,出现在靠近冷端处,靠近底部处的含水率为11.78%。这是由于上部土样在低温条件下形成冻结区,因冻结过程中负压吸力作用,促使下部未冻区内的水不断迁移至已冻区,并且聚积在冻结缘附近。

对比普通粗粒土和两类相变材料改良粗粒土可以发现,各试样水分沿深度方向的分布规律总体上相似,不同的是相变材料改良粗粒土的最终含水率小于普通粗粒土,如CGS-F5、CGS-M5的冷端最大含水率分别为15.92%和14.10%。此外可以发现,不同掺量相变材料的试样最终含水率也有所不同,掺量越大,最终含水率在整体上呈现为最小值。结合补水量,这是因为掺入相变材料之后减小了水分的补给,例如,试样CGS-M10的补水量为5.25 mL,其靠近冷端处的最大含水率仅为11.12%。以上说明,微胶囊相变材料可能会减弱土体内部的水分迁移作用。

2.3 冻胀量变化

图8为利用位移计监测得到的各试样在冻结过程中的冻胀量变化情况。结合顶端温度变化来看,当温度在0℃以上,试样并未产生冻胀现象,当温度到达0℃之后,土体才逐渐产生冻胀。随着温度的进一步下降,土体的冻胀持续发展,直至冻胀试验结束。

从图中可以看出CGS的最终冻胀量是所有试样中发展最大的,达到了8.53 mm,CGS-F5和CGS-M5冻胀量分别为4.42 mm和6.70 mm,均有所减

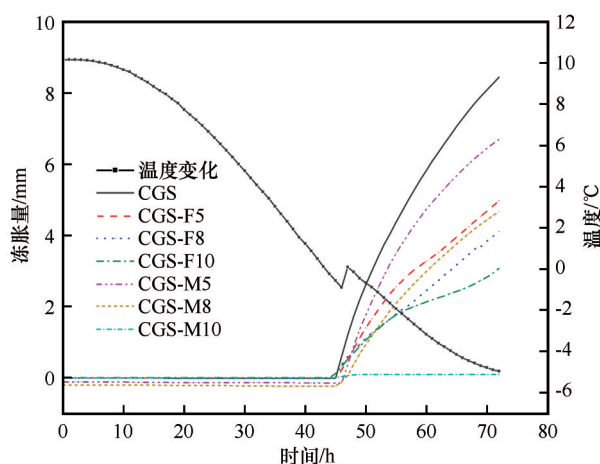


图8 试样最终冻胀量

Fig. 8 Final frost heave of each sample

小。fPCM和mPCM在土体的降温过程中发生了相变,所释放的热量延迟了土体到达冻结温度的时间,使得冻胀的产生受到了一定的抑制,因此,可以看到普通粗粒土在后面的冻胀量发展中比相变材料改良粗粒土的冻胀发展速度更快。

理论上,相变材料在试验过程中的相变作用会延迟冻胀的起始时间,但实际试验发现各试样起始冻胀的时间相差不大,且几乎都位于同一个微小的温度变化区间,可以认为这是由于试样表面形成了冰晶体导致土样隆起的原因。对比不同掺量相变材料的试样发现,一般情况下更大掺量相变材料的试样的冻胀量更小。通过对各试样冻结深度和冻胀量的提取,计算得到它们的冻胀率,具体见表3。

从表3可知,在正弦冻结模式下,普通粗粒土的冻胀率较大。普通粗粒土的冻胀率达到了9.30%,

表3 试样的最终冻胀率

Table 3 Final frost heaving rate of each sample

试样组别	冻胀率/%
CGS	9.30
CGS-F5	6.19
CGS-F8	4.33
CGS-F10	5.35
CGS-M5	8.57
CGS-M8	6.93
CGS-M10	0.20

在掺入相变材料之后,CGS-P5、CGS-P8、CGS-P10的冻胀率减小了3.11%、4.97%、3.95%,同时CGS-M5、CGS-M8和CGS-M10的冻胀率减小了0.73%、2.37%和9.1%。经过相变材料改良的粗粒土的冻胀率明显减小,这说明微胶囊相变材料的掺入可以改善粗粒土的冻胀敏感性。

3 结论

针对普通粗粒土和相变材料改良粗粒土开展室内冻胀试验,研究2类微胶囊相变材料对粗粒土冻胀的影响,得到如下结论:

(1)在冷端温度逐步下降的过程中,2类不同相变温度范围的微胶囊相变材料(mPCM、fPCM)均能影响土体降温速率,使得粗粒土的温度变化具有一定的滞后性,相变材料改良粗粒土的最终温度呈现出高于普通粗粒土的结果。随着相变材料掺量的增大,这种对温度变化的影响随之增强,同时,这也使得相变材料改良粗粒土的最大冻深更小。总体而言,粗粒土掺入mPCM比fPCM能更好地改善抗冻胀性。

(2)微胶囊相变材料在土体降温过程中发生相变并释放热量,延缓了土体水汽的迁移,使得相变材料改良粗粒土的最终补水量比普通粗粒土要小,且相变材料掺量越高,最终补水量也更小。通过最终含水率测量,发现相变材料改良粗粒土整体最终含水率比普通粗粒土低,相变材料减弱了粗粒土的水分迁移能力。因此,掺入微胶囊相变材料可以提高土体的抗冻性能。

(3)在正弦冻结模式下,普通粗粒土的冻胀量较大。微胶囊相变材料的掺入,使得粗粒土温度的变化受到影响,同时水分迁移受到抑制,这使得冻胀量呈减小的趋势。并且随着相变材料含量的增加,冻胀量也更小,其冻胀率明显减小,微胶囊相变材料可以起到改善路基土冻胀敏感性的作用。微

胶囊相变材料在寒区路基的建设中具有实际应用价值,但需要注意由于相变材料的经济成本较大,应该通过确定最佳掺入量、最佳掺入深度等方式达到节约资源的目的。

参考文献(References):

- [1] Chen Jing, Li Anyuan, Bao Chunyan, et al. A deep learning forecasting method for frost heave deformation of high-speed railway subgrade[J]. Cold Regions Science and Technology, 2021, 185: 103265.
- [2] Du Xiaoyan, Ye Yangsheng, Zhang Qianli, et al. Study on frost heaving law of filling featuring micro frost heaving for high speed railway subgrade[J]. Railway Engineering, 2016, 56(9): 82-85. [杜晓燕, 叶阳升, 张千里, 等. 高速铁路路基微冻胀填料冻胀规律研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(9): 82-85.]
- [3] Cai Degou. Test on frost heaving spatial-temporal distribution of high speed railway subgrade in seasonal frozen soil region[J]. China Railway Science, 2016, 37(3): 16-21. [蔡德钧. 高速铁路季节性冻土路基冻胀时空分布规律试验[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 16-21.]
- [4] Shi Gangqiang, Zhao Shiyun, Li Xianming, et al. The frost heaving deformation of high-speed railway subgrades in cold regions: Monitoring and analyzing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(2): 360-368. [石刚强, 赵世运, 李先明, 等. 严寒地区高速铁路路基冻胀变形监测分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(2): 360-368.]
- [5] Xu Junbing. Study on the frost heave characteristics of high-speed railway subgrade filler and the prevention measures of subgrade frost heave[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2020. [徐俊兵. 高速铁路路基填料冻胀特性及路基冻胀防治措施研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2020.]
- [6] Wu Peng, Luo Qiang, Yu Hao, et al. Multifactor progressive regression analysis on frost heave characteristics of well-graded gravel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(3): 767-776. [吴鹏, 罗强, 余浩, 等. 影响级配碎石填料冻胀特性的多因素渐进回归分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(3): 767-776.]
- [7] Wang Qingzhi, Liu Jiankun, Tian Yahu, et al. A study of orthogonal design tests on frost-heaving characteristics of graded crushed rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(10): 2825-2830, 2836. [王青志, 刘建坤, 田亚护, 等. 寒区级配碎石冻胀正交试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(10): 2825-2830, 2836.]
- [8] Zhao Hongyong, Yan Hongye, Zhang Qianli, et al. Study on frost-heave performances of filling material consisted of coarse grained soils for subgrade bed in seasonal frozen region[J]. Railway Engineering, 2014, 54(7): 92-94. [赵洪勇, 闫宏业, 张千里, 等. 季节性冻土区路基基床粗颗粒土填料冻胀特性研究[J]. 铁道建筑, 2014, 54(7): 92-94.]
- [9] Bai Ruiqiang, Lai Yuanming, Zhang Mingyi, et al. Water-vapor-heat behavior in a freezing unsaturated coarse-grained soil with a closed top[J]. Cold Regions Science and Technology, 2018, 155: 120-126.
- [10] Gao Yujia, Wang Qing, Chen Huie, et al. Effect of temperature on migration of water in seasonal frozen soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 698-702. [高玉佳, 王清, 陈慧娥, 等. 温度对季节性冻土水分迁移的影响研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 698-702.]

- [11] Ma Biao, Wang Shasha, Li Jun. Study on application of PCM in asphalt mixture [J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 168/169/170: 2625-2630.
- [12] Mahedi M, Cetin B, Cetin K S. Freeze-thaw performance of phase change material (PCM) incorporated pavement subgrade soil [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 202: 449-464.
- [13] Kravchenko E, Liu Jiankun, Chang Dan, et al. Study of the thermal field of a mixture of soil and PCM materials with simulation of the warming effect during a phase change [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 262: 120818.
- [14] Rao Youzhi, Liu Jiankun, Chang Dan, et al. Effects of micro-encapsulated phase change material characteristics on the thermal performance and mechanical behaviour of silty clay [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 29: 100584.
- [15] Kravchenko E, Liu Jiankun, Li Xue. Numerical modeling of the thermal performance of soil containing microencapsulated PCM [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 298: 123865.
- [16] Huang Yinghao, Chen Yong, Zhu Xun, et al. Experimental study and micro-mechanism analysis of freeze-thaw performance of expansive soils improved by phase-change materials [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(11): 1994-2002. [黄英豪, 陈永, 朱洵, 等. 相变材料改良膨胀土冻融性能试验研究及微观机理分析[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(11): 1994-2002.]
- [17] Chen Yong, Huang Yinghao, Wang Shuo, et al. Freeze-thaw performance of phase change material (PCM) incorporated canal foundation expansive soil [J]. *Research Square*, 2021: 1-25. DOI: 10.21203/rs.3.rs-401566/v1.

Experimental study on frost heaving of coarse grained soil mixed with microencapsulated phase change materials

SUN Binxiang^{1,2}, CHEN Jiaji^{1,2}, PAN Jianguang^{1,2}

(1. Yuanpei College, Shaoxing University, Shaoxing 312000, Zhejiang, China; 2. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, Zhejiang, China)

Abstract: Microencapsulated phase change material (PCM) is a material that can affect temperature changes by transforming its morphology. In order to study the effect of these materials on frost heave of subgrade soils, unidirectional frost heave tests were carried out on the ordinary coarse-grained soils and microencapsulated PCM coarse-grained soils mixed with different contents of 5%, 8% and 10%. The results show that compared with the ordinary coarse-grained soils, the temperature changes of the coarse-grained soil mixed the microencapsulated PCM can be delayed, and the final temperature of these soils also shows a higher value. Meanwhile, it can affect the development of the soil sample freezing depth and reduce the maximum freezing depth value of microencapsulated PCM coarse-grained soils. The water migration ability of coarse-grained soils are weakened, thus resulting in reducing the water replenishment amount and the final water content of the soil samples. The incorporation of microencapsulated PCM can mitigate the development of coarse-grained soil frost heave, and the frost heave amount and frost heave rate were both reduced to a certain extent. Comparing the frost heave test results of coarse-grained soil with 5%, 8% and 10% contents of microencapsulated PCM, it was found that the higher microencapsulated PCM content may show better improvement effects in terms of affecting the temperature, moisture and frost heave of coarse-grained soils. Therefore, the incorporation of microencapsulated PCM into the foundation soil of high-speed railway in cold regions has certain engineering significance for improving the occurrence of subgrade frost heave.

Key words: coarse grained soil; frost heaving test; microencapsulated phase change materials; subgrade frost heave

(责任编辑: 刘建坤)