

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2022.0034

PENG Liyun, HUA Xiaoning, LIU Dexin, et al. Study on frost heaving characteristics of silt reinforced with anticorrosive treated straw [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(1):241-250. [彭丽云, 华小宁, 刘德欣, 等. 秸秆加筋粉土的冻胀特性研究[J]. 冰川冻土, 2022, 44(1):241-250.]

秸秆加筋粉土的冻胀特性研究

彭丽云^{1,2}, 华小宁^{1,2}, 刘德欣³, 齐吉琳^{1,2}

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 大型多功能振动台阵实验室, 北京 100044;
3. 清华大学建筑设计研究院有限公司, 北京 100084)

摘要: 粉土在中国分布广泛, 工程中大量涉及, 常表现为冻胀敏感性, 在冻土地区工程建设中需重点考虑其冻胀特性。为减少粉土冻胀对工程的影响, 基于环保的理念, 以防腐处理后的麦秸秆作为加筋材料, 将其切断后随机掺入粉土中; 并对粉土和秸秆加筋粉土试样分别进行了开敞系统下的一维冻胀试验, 重点研究了秸秆掺量和长度对粉土冻胀特性的影响。结果表明: 秸秆加筋对粉土的冻胀有明显的抑制作用, 少量的掺加(0.2%、0.4%)可将接近强冻胀的粉土改良为弱冻胀或不冻胀; 在其他条件相同的情况下, 试验范围内粉土的冻胀率随秸秆掺量的增加而线性增大, 但总体远小于未改良土; 秸秆掺量一定时, 存在最优秸秆长度, 在该长度下, 秸秆加筋粉土的冻胀变形量和冻胀率均最小。

关键词: 粉土; 冻胀特性; 秸秆加筋; 冻胀变形; 冻胀率

中图分类号: TU445 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2022)01-0241-10

0 引言

粉土在黄河中下游地区分布广泛, 它具有颗粒细小、级配均匀、黏聚力低和水稳定性差等特点^[1-2]。大量研究表明^[3-7], 在有充足地下水补给的情况下, 粉土冻胀敏感性强, 易发生冻胀融沉, 严重影响当地的工程建设。然而, 随着经济建设的发展, 大量的工程建设中涉及粉土, 对其进行改良来抑制冻胀, 是一种较为经济、有效的措施。

现有研究表明, 掺加无机结合料对土体冻胀有抑制作用。韩春鹏等^[8]指出掺加石灰能在一定程度上抑制黏土冻胀; 张立新等^[9]认为石灰掺量12%~15%对细颗粒土冻胀抑制作用最显著, 但高掺量的石灰会影响土体以及地下水的pH值, 不利于其上植被的生长, 有悖于绿色环保的工程理念。除石灰外, 掺加水泥也能抑制土体冻胀^[10], 然而当土中水泥含量过高时, 除具有上述问题外, 土体还将呈现出脆性特征而易开裂^[11], 导致水分渗入量大, 对冻胀也不利。因此, 需要探寻环保的土体冻胀抑制新

方法。

在新方法的探索中, 人工合成纤维由于具有较好的分散性和较高的抗拉强度, 引起了人们的关注。Khattak等^[12]研究表明, 人工纤维素纤维能够增强黏土和粉土的抗拉伸开裂能力。而这个能力, 正如Gilpin^[13]所述是冻结过程中新的冰透镜体形成时需要克服的; 也如Konrad^[14]所述, 当冻结缘内某点的线性应变达到冻土的即时拉伸破坏应变时, 新的透镜体出现需要克服的。据此推断, 人工纤维素纤维既然能增强土体的抗拉伸开裂能力^[12], 那么也会对土体冻胀起到抑制作用。陈轮等^[15]的研究证明了上述推断, 指出0.3%的聚酯纤维加筋将使粉土的冻胀量减小27%, 冻胀抑制效果显著。此外, $0.8\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的聚酯纤维加筋也使黄土的抗冻性能得到改善, 减小了冻融循环下土体的质量和强度损失^[16]。

综上, 除掺加无机结合料外, 人工合成纤维加筋也对土体冻胀有一定的抑制作用, 但人工合成纤维

收稿日期: 2021-06-02; 修订日期: 2021-08-12

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFF0306302); 国家自然科学基金项目(42172299; 41972279)资助

作者简介: 彭丽云, 副教授, 主要从事特殊岩土体加固和处理研究. E-mail: pengliyun@bucea.edu.cn

通信作者: 齐吉琳, 教授, 主要从事寒区岩土工程和特殊土力学研究. E-mail: jilinqi@bucea.edu.cn

维难降解,且多是从天然气、石油、煤和石灰石等物质中经过复杂的提炼、化学合成和纺丝工艺制成,制备成本高,且有一定的环境污染。相比之下,天然纤维绿色环保、成本低廉,是否可作为人工合成纤维的替代材料用于土体冻胀抑制,需进一步研究。

天然纤维中的典型代表,麦秸秆也具有一定的抗拉强度和较好的分散性,理应会对冻胀起到抑制作用。然而,目前相关研究缺乏,仅有的少量研究也主要针对从麦秸秆中提取出来的物质展开,且主要集中在抗冻性能的研究方面。如陈诚等^[17]指出木质素纤维掺量为0.75%时,软黏土的弹性模量、破坏强度和黏聚力均达到最大值,内摩擦角变化最稳定,抵抗冻融劣化能力最强。邓宗才等^[18]研究则表明,秸秆中的纤维素纤维对混凝土抗冻性能的改善优于人工合成聚丙烯纤维。此外未见其他研究。可见,与人工合成纤维一样,天然纤维掺入土体是否也会抑制土体冻胀,有待进一步研究。

基于此,本文将以粉土为研究对象,以防腐处理后的麦秸秆作为加筋材料,分别对粉土和秸秆加筋粉土进行了开敞系统下的一维冻胀试验,研究掺加秸秆对土体冻胀特性的影响。研究结果将为冻土区冻害的防治提供新的方法和依据,为冻胀理论的发展提供支撑,为工程设计提供指导。

1 试验方案

1.1 试验仪器

试验仪器为土体冻胀试验仪,主要由试样筒、温度控制系统、补水系统以及数据采集系统组成,示意如图1所示。其中,试样筒为内径20 cm、壁厚

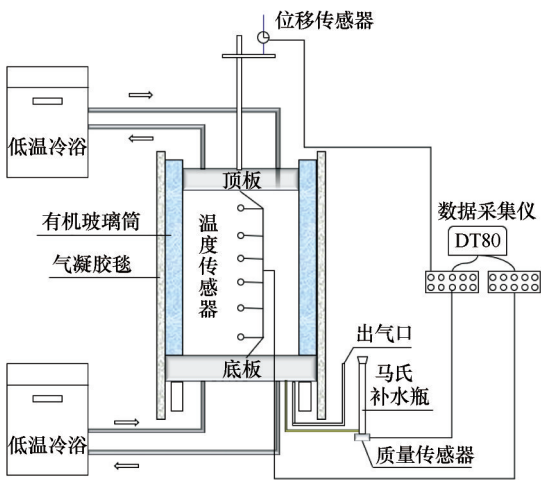


图1 土体冻胀仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of soil frost heaving apparatus

1 cm的有机玻璃筒;温度控制系统采用二级控温,其中一级控温为高精度的低温恒温箱(控温精度 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$),二级控温系统(控温精度 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$)由试样顶底部冷板、冷板外界恒温冷浴(控温精度 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$)和周围的保温系统组成。补水系统为马氏补水瓶(量程为380 mL)与冻胀试验筒底板相连组成。数据采集系统由高精度温度探头(精度为 $\pm 0.001\text{ }^{\circ}\text{C}$)、位移传感器(精度为 $\pm 0.001\text{ mm}$)、质量传感器(精度为 $\pm 1\text{ g}$)分别与dataTaker DT80数据采集仪相连,分别用来监测试样内温度、土体冻胀变形和试验过程中的补水量。

1.2 试验材料

试验材料选自黄河中下游地区广泛分布的粉土,其基本物理性质指标如表1所示。该土粉粒含量高、黏粒缺乏,级配严重不良,根据《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)^[19]可判定为低液限粉土。

表1 粉土的基本物理指标
Table 1 Basic physical indicators of the silt

最优含水率/%	最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	颗粒级配/%						塑限/%	液限/%	塑性指数	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
		细砾 2~5 mm	粗砂 0.5~2 mm	中砂 0.25~ 0.5 mm	细砂 0.075~ 0.25 mm	粉粒 0.005~ 0.075 mm	黏粒 $\leq 0.005\text{ mm}$					
14.6	1.742	1.74	1.86	1.21	2.12	92.88	0.19	16.7	20.3	3.6	3.15	2.86

试验用麦秸秆选自河北省,其基本性质如表2所示。由于秸秆茎节部分的抗拉强度较低且变异性较大,为保证试验结果的可比性,选用除去茎节、粗细均匀的麦秸秆,并按需对其进行切断处理。

1.3 试验设计

设计冻胀试验方案(表3),重点研究秸秆长度和掺量对粉土冻胀的影响。土样制样时的含水率采用路基填筑工程中常用的最优含水率14.6%,压实中采用的压实度为90%。由于目前对秸秆加筋

表2 秸秆的基本情况

Table 2 Basic information of the wheat straw

指标	数值
平均直径/mm	2~4
秸秆长度/mm	15、20、25、30
秸秆壁厚/mm	0.4~0.6
抗拉强度/N	169.8
伸长率/%	2
纵横比	4~15

表3 冻胀试验方案

Table 3 Program of the frost heaving tests

土样	秸秆长度/mm	秸秆掺量/%	温度/℃
粉土	未掺加	未掺加	-3、-5、-10
秸秆加筋粉土	15、20、25、30	0.2、0.4、0.8	-3

土冻胀相关研究的缺乏,就秸秆长度和掺量的选择,采用了其在力学性能测试中常用的长度和掺量^[20-21];同时较短长度的选择,使秸秆在土中的分布更加均匀、更具随机性,增加了不同试样结果之间的可比性。

1.4 试验方法

(1)材料准备。由于麦秸秆易在水的腐蚀下丧失抗拉强度,影响冻胀抑制作用的发挥。因此先将麦秸秆按照长度15 mm、20 mm、25 mm和30 mm剪断,并将其放置在10%的聚乙烯醇溶液中防腐处理4天,此时秸秆的防腐性能最优,即具有较强的防水腐蚀能力和较高的抗拉强度,将其掺入土中后,即使受到长时间降雨的影响,其抗拉强度降幅很小^[20]。之后,模拟自然风干条件,将浸泡后的麦秸秆置入烘箱中在40℃的温度下烘干处理10 h,以排出水分的影响。

(2)试样制备。以最优含水率为配料控制指标,分别计算出试验设计方案中各试样所需水、粉土和秸秆的质量,分别将其拌和均匀后,焖料24 h,使水在土中均匀分布。以压实度90%为制样时的控制指标,计算出所需土料的质量,称取土料并将其分层填筑到直径20 cm的试样筒内,每层单独击实,达到要求高度后对接触面处进行刮毛处理,成型试样总高度14 cm。每组制备两个试样以进行平行试验。

(3)调节马氏补水瓶中的自由液面和试样底部补水孔齐平,关闭马氏补水瓶的进水管。将试样连同顶部冷板一同放置到低温恒温箱中,在试样顶部冷板上部安装位移传感器。将温度传感器通过

试样筒侧壁的圆孔由试样筒底部沿土样高度每隔2 cm插入试样中。设置数据采集仪采集频率为5 min/次。在试样筒的周围包裹二氧化硅气凝胶毯进行保温。

(4)关闭低温恒温箱箱门,调节试样顶底板连接的低温恒温冷浴和低温恒温箱温度对土样进行恒温,待试样温度降至1℃后恒温24 h。之后,保持底部冷板和周围环境温度不变,仅调节顶部冷板温度,使土样顶面温度降至试验设计的冷却温度后,打开马氏补水瓶的进水管;进行试样在设计顶端冷却温度下,开敞系统中的一维冻胀试验。试验过程中全程采集试样内的温度、试样的冻胀变形和补水量。

(5)当试样冻结完成后,将试样从恒温箱中取出,在低温环境下用切样器将土样从试样筒中推出,并沿高度方向每隔2 cm进行切割,每个切面取3个试样采用烘干法测定其含水率。

2 粉土的冻胀特性分析

图2为开敞系统下相同初始含水率(14.6%)、压实度(90%),不同顶端冷却温度下粉土冻结深度曲线和冻胀变形曲线。

从图2(a)可以看出,当顶端冷却温度一定时,土样的冻结深度随冻结时间先增加,至某一深度后逐渐稳定;随顶端冷却温度的降低,土样冻结速率逐渐增大,最大冻结深度也增加,但冻结稳定时间减小。从图2(b)可以看出,土样的冻胀量随冻结时间的增长而不断增大,最终趋于稳定;不同顶端冷却温度下,总冻胀量随温度的升高而增大,即-3℃、-5℃和-10℃土样的总冻胀量分别为5.99 mm、3.46 mm和2.23 mm,计算得到的冻胀率分别为5.22%、3.05%和1.74%,根据《冻土地区建筑地基基础设计规范》(JGJ 118—2011)^[22]中粉土的冻胀性分类,-3℃时的冻胀率5.22%介于3.5%和6%之间,可判定为冻胀,且为接近6%的强冻胀。

3 秸秆加筋对粉土冻胀特性的影响

试验粉土在-3℃时具有较强的冻胀性,用该温度作为秸秆加筋粉土冻胀试验的控制温度,重点从秸秆掺量和长度两个方面研究秸秆加筋对粉土冻胀特性的影响。

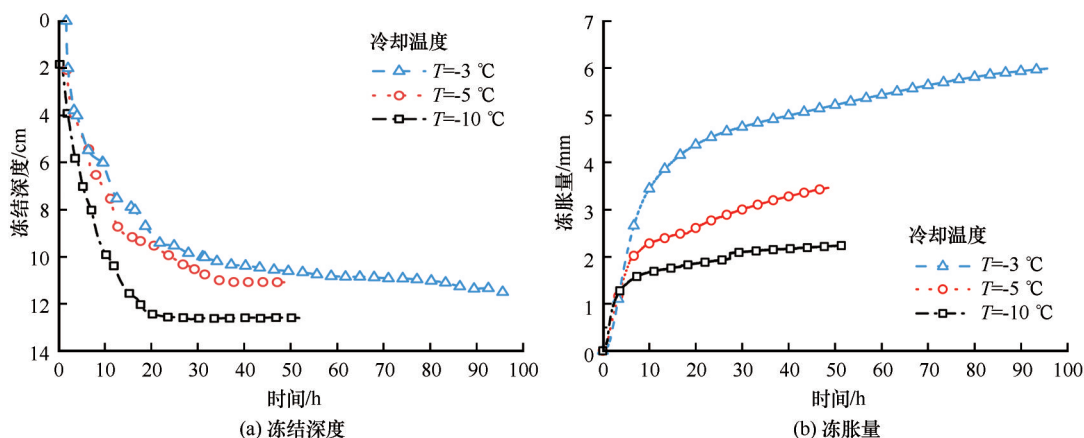


图2 不同顶端冷却温度下粉土的冻胀曲线

Fig. 2 Frost heaving curves of silt with various top cooling temperatures: frost depth with time (a) and amount of frost heaving with time (b)

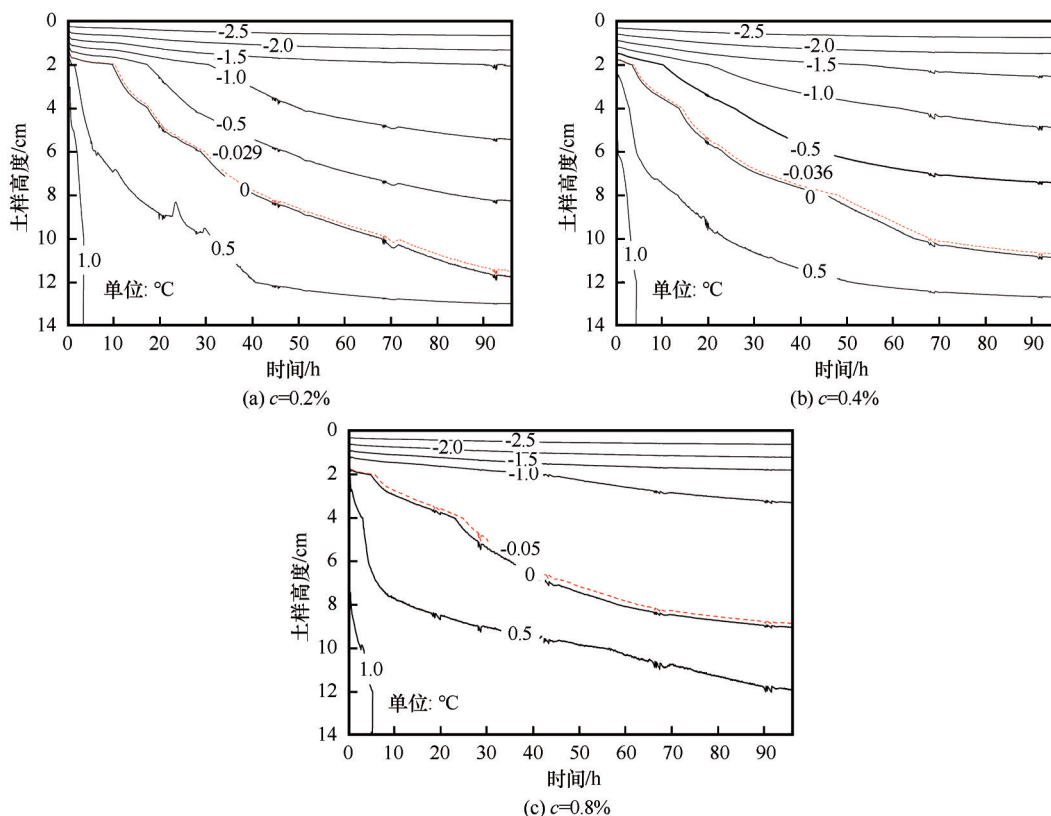
3.1 不同秸秆掺量下粉土的冻胀特性

3.1.1 秸秆掺量对土样内温度和冻结深度的影响

图3显示的是不同秸秆掺量下、不同土样高度内的温度随时间变化曲线,图中虚线为各掺量下的冻结深度随冻结时间变化曲线。其中 $-0.029\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.036\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-0.050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别为0.2%、0.4%和0.8%

掺量下粉土的冻结温度。

可见,秸秆加筋试样在不同秸秆掺量下的土样内温度总体变化趋势基本相同,即距冷端不同深度处试样内的温度随冻结时间的增长而降低,最终趋于稳定。不同之处在于,高秸秆掺量下,试样内冻结深度线的位置出现了上移。



注: 图中红线表示土样实际冻结温度

图3 不同秸秆掺量下不同土样高度处温度随时间的变化($T = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l = 15\text{ mm}$)

Fig. 3 Variations of soil temperature with time at different heights with various straw contents: $c = 0.2\%$ (a), $c = 0.4\%$ (b) and $c = 0.8\%$ (c) ($T = -3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l = 15\text{ mm}$)

从图3中提取出各试样的冻结深度随时间的变化曲线,如图4所示。

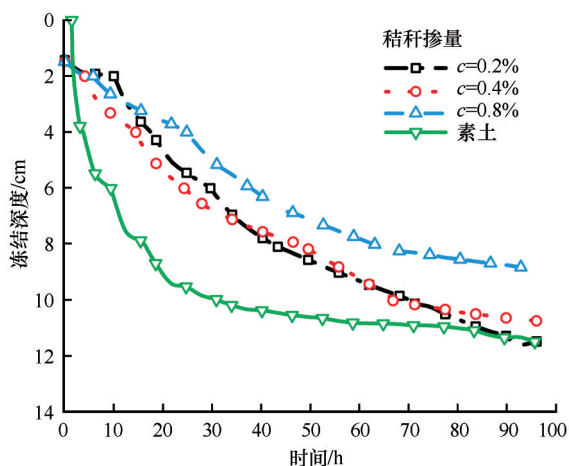


图4 不同秸秆掺量下土样冻结深度随时间的变化
($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

Fig. 4 Variations of frost depth of soil samples with time and various straw contents ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

可见,素土在冻结初期的冻结速率较秸秆加筋土大,后期差异减小。高掺量下,秸秆对土体冻结深度的影响较明显,当秸秆掺量为0.2%和0.4%时,其冻结深度曲线接近,最大冻结深度和素土相差不大;而当秸秆掺量从0.2%增大到0.8%,最大冻结深度减小了26.4 mm,降幅较大。

3.1.2 秸秆掺量对土样冻胀变形和冻胀率的影响

图5为相同初始含水率(14.6%)、压实度(90%)、顶端冷却温度($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$)和秸秆长度($l=15\text{ mm}$)条件下,不同秸秆掺量粉土试样的冻胀曲线。图6为秸秆掺量和土体冻胀关系曲线。图7为

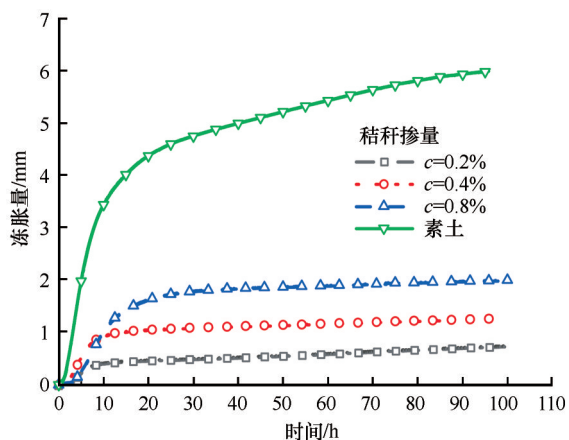


图5 不同秸秆掺量下土样冻胀量随时间的变化
($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

Fig. 5 Variations of amount of frost heaving of soil samples with time and various straw contents ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

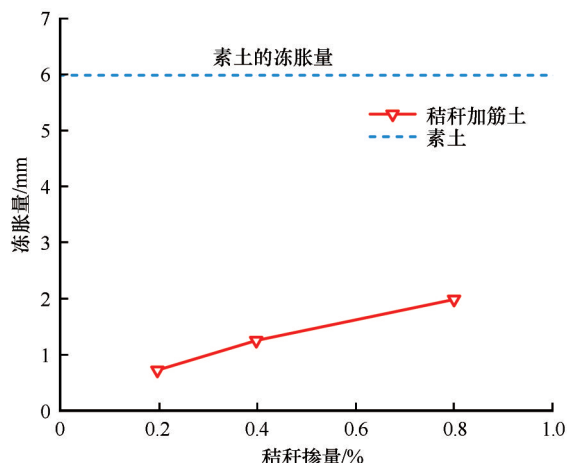


图6 秸秆掺量和土体冻胀量的关系($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

Fig. 6 Relationship between straw content and amount of frost heaving of soil samples ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

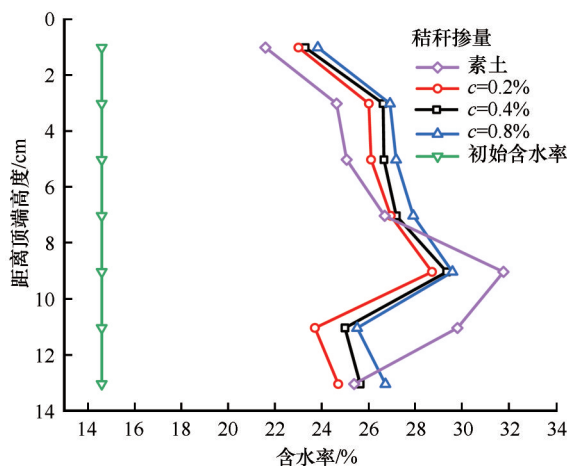


图7 土样含水率随高度的变化($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

Fig. 7 Variations of soil moisture content of soil samples with height ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

冻结完成后不同掺量下土样内的含水率沿试样高度的分布曲线。

从图5可以看出,秸秆的参加对土体冻胀有明显的抑制作用。当掺量为0.2%时,土体冻胀量仅为0.74 mm,相比素土5.99 mm的冻胀,大幅降低。但上述抑制作用并不随秸秆掺量的增大而增强,而是呈现图6所示冻胀量随秸秆掺量的增加呈近似线性增大的趋势。具体原因如下:在冻结过程中,随着土中的水分相变成冰,土骨架受拉分离。冰的生长需要克服秸秆加筋土的抗拉强度,而秸秆的参加对土体抗拉强度有提高作用,从而抑制冻胀。较小掺量对土体冻胀的抑制作用比较大掺量下显著,原因在于随着掺入量的增加,抗拉强度增长较慢,但秸秆外表面比较光滑,掺量增加后,土中水分通过

麦秸秆和土颗粒的接触面向冷端迁移的途径增多,迁移的水量增大,冻结过程中产生的冰晶更多,从而产生较大的冻胀。此时尽管冻胀抑制作用减弱,但总体上均远小于素土的冻胀量。此外可以看出,较小掺量下加筋粉土的冻胀量更小,说明少量掺加秸秆即可抑制土体的冻胀。

从图7可以看出,在冻结锋面以下,素土试样中的含水量较大;但在冻结锋面以上,秸秆掺量越大,土体中的含水量越高,说明掺加秸秆后冻结过程抽吸至冻结锋面以上的水量越多,冻胀量相应也就增加。

土体冻胀率随时间变化曲线如图8所示。可以看出,掺加秸秆后粉土的冻胀率整体小于素土;且随着冻结时间的增长,各试样的冻胀率都呈现先增大后减小的趋势,原因在于冻结初期的冻胀变形量相比冻结深度增加快;随着冻结时间的增长,尽管冻胀变形总量增加,但冻结深度很深,致使冻胀率有所下降。因此,冻结稳定时的冻胀率不是曲线上最大值,此时土样冻结深度、冻胀变形量最大。

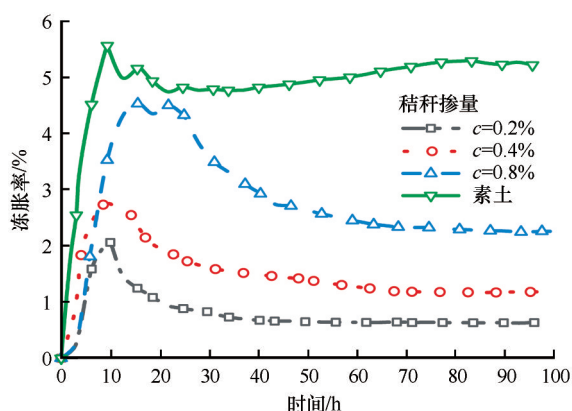


图8 不同秸秆掺量下土样冻胀率随时间的变化
($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

Fig. 8 Variations of frost heaving ratio of soil samples with time and various straw contents ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

冻结稳定时土样的冻胀率和秸秆掺量关系曲线如图9所示。可以看出,冻结稳定时的冻胀率和秸秆掺量间呈线性关系,原因在于随着麦秸秆掺量的增加,试样的最大冻结深度减小,而最大冻胀量增加,因此冻胀率增大。但值得注意的是,尽管冻胀率增加了,但均小于素土5.22%的冻胀率,且在较小掺量下的冻胀率更小,即少量掺加秸秆就会使得粉土进入弱冻胀和不冻胀的范围。

3.2 不同秸秆长度下粉土的冻胀特性

除秸秆掺量外,秸秆长度也会影响秸秆加筋土

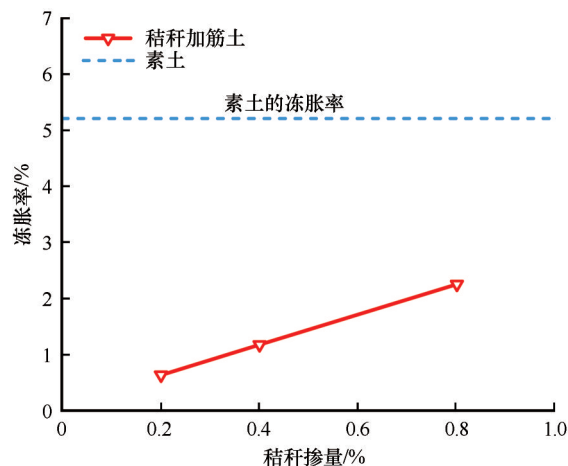


图9 秸秆掺量和土体冻胀率的关系($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

Fig. 9 Relationship between straw content and frost heaving ratio of soil samples ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $l=15\text{ mm}$)

的抗拉强度,从而影响冻胀,下面重点就这方面的内容进行研究。

3.2.1 秸秆长度对土样内温度和冻结深度的影响

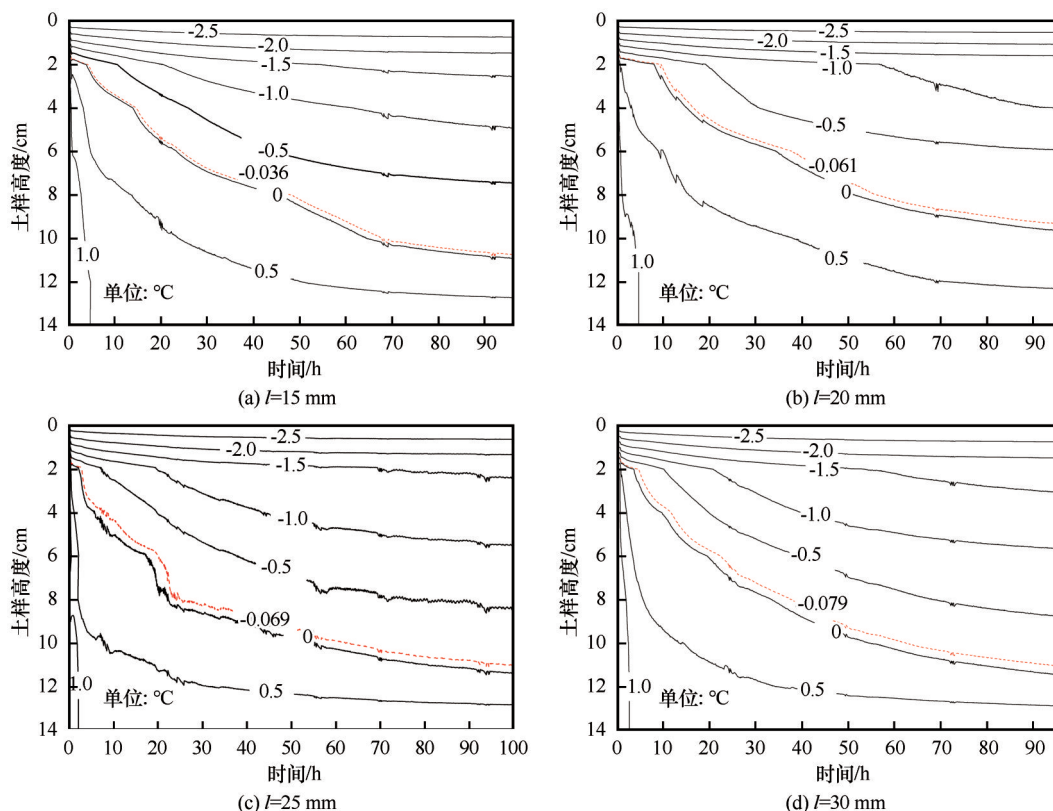
图10显示的是不同秸秆长度下、不同土样高度内的温度随时间变化曲线,图中虚线为各长度下的冻结深度随冻结时间变化曲线。其中 $-0.036\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.061\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.069\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-0.079\text{ }^{\circ}\text{C}$ 分别是秸秆长度为15 mm、20 mm、25 mm、30 mm下加筋粉土的冻结温度。

通过对比分析发现,四个试样温度的总体变化趋势基本相同,距离冷端不同位置处土体温度随时间降低,并最终趋于稳定,且在冻结过程中土内逐渐形成沿竖向自上而下递增的温度分布。

从图10中提取出各试样的冻结深度曲线,如图11所示。可以看出,掺加秸秆后土体的冻结深度均小于素土冻结深度,其中当秸秆长度为15 mm、25 mm和30 mm土体的冻结深度分别为107.3 mm、110.0 mm和110.6 mm,略小于素土;而当秸秆长度为20 mm时,土体冻结速率较慢、冻结深度最小为93.8 mm。

3.2.2 秸秆长度对土样冻胀变形和冻胀率的影响

图12为相同初始含水率(14.6%)、压实度(90%)、顶端冷却温度($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$)和秸秆掺量($c=0.4\%$)时,不同秸秆长度下粉土试样的冻胀曲线。图13为不同秸秆长度下不同时刻的粉土冻胀率曲线。从中可见,冻结稳定时,秸秆长度为15 mm、20 mm、25 mm和30 mm的试样冻胀量分别为1.26 mm、0.82 mm、1.73 mm和1.99 mm,冻胀率



注: 图中红线表示土样实际冻结温度

图 10 不同秸秆长度下不同土样高度处温度随时间的变化 ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c=0.4\%$)

Fig. 10 Variations of soil temperature with time at different heights with various straw lengths: $l=15\text{ mm}$ (a), $l=20\text{ mm}$ (b), $l=25\text{ mm}$ (c) and $l=30\text{ mm}$ (d) ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c=0.4\%$)

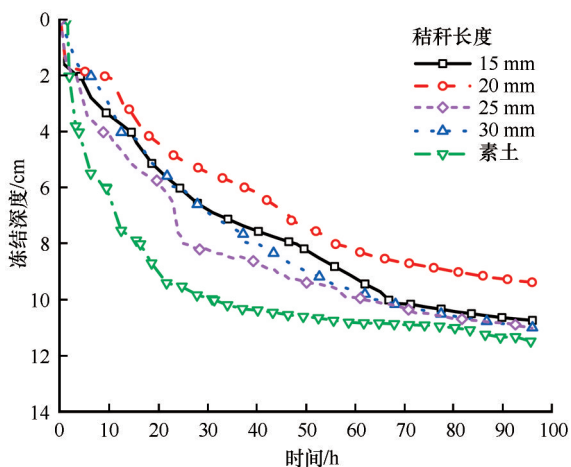


图 11 不同秸秆长度下土样冻结深度随时间的变化 ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c=0.4\%$)

Fig. 11 Variations of frost depth of soil samples with time and various straw lengths ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c=0.4\%$)

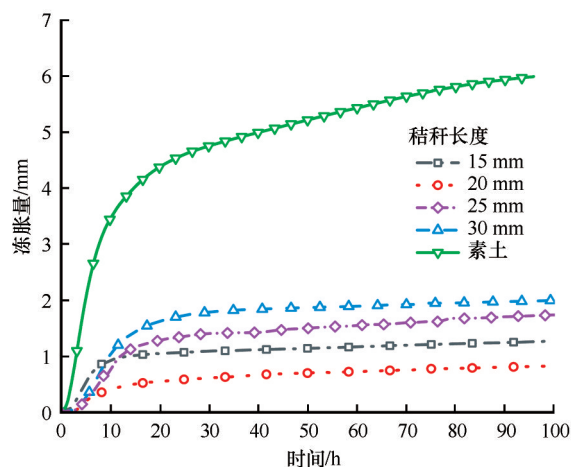


图 12 不同秸秆长度下土样冻胀量随时间的变化 ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c=0.4\%$)

Fig. 12 Variations of amount of frost heaving of soil samples with time and various straw lengths ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c=0.4\%$)

分别为 1.18%、0.88%、1.57% 和 1.74%，根据《冻土地区建筑地基基础设计规范》(JGJ 118—2011)^[22]，冻胀率为 0.88% 小于 1%，为不冻胀；冻胀率为 1.18%、1.57% 和 1.74% 大于 1% 小于 3.5% 为弱冻胀，说明上述秸秆长度下粉土的冻胀得到了较好的

抑制。同时可以看出，试样冻胀量和冻胀率随秸秆长度的增加呈先减小后增大的趋势，判定存在一个最优长度，此时试样的冻胀变形量、冻胀率均获得最小值。

图 14 给出了相同掺量 ($c=0.4\%$)、温度 ($T=$

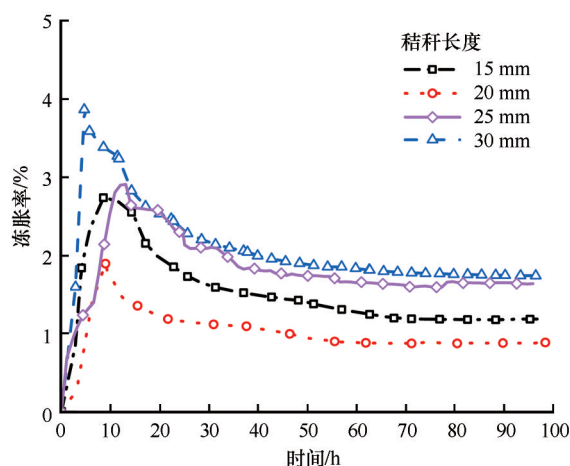


图 13 不同秸秆长度下土样冻胀率随时间的变化
($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c=0.4\%$)

Fig. 13 Variations of frost heaving ratio of soil samples with time and various straw lengths ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c=0.4\%$)

$-3\text{ }^{\circ}\text{C}$)和压实度(90%)时,不同秸秆长度加筋土试样的纵剖图。从中可以看出,随着秸秆长度的增

加,秸秆在土中的分布逐渐趋于不均匀。当秸秆长度较短时,如图 14(a)中所示,土样剖面处可见的秸秆根数较少,秸秆在土中的分布较随机,秸秆交叉搭接数量少,对土体的约束作用较弱,土体抗拉强度的提升不明显。当秸秆长度太长,如图 14(d)中所示,秸秆分布杂乱,且筋土分离现象严重,影响抗拉强度的发挥。当长度适中时,秸秆与土体的结合紧密,秸秆在土样内分布均匀,如图 14(b)中所示,此时秸秆在土体中会形成较稳定的网架结构,使秸秆的抗拉强度达到最大,对土体的约束作用最强,冻胀抑制相应较明显。

4 结论

本文基于秸秆加筋粉土在相同温度、开敞系统中的一维冻胀试验,重点研究了秸秆掺量和长度对粉土冻胀特性的影响,通过冻结深度、冻胀量和冻胀率等指标的对比分析,得出如下结论:

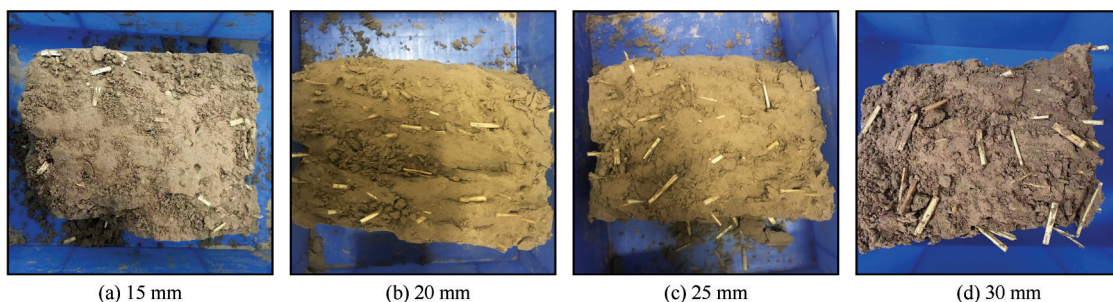


图 14 不同秸秆长度下的试样剖面($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c=0.4\%$)

Fig. 14 Profiles of soil samples with various straw lengths ($T=-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $c=0.4\%$)

(1) 秸秆的掺加对粉土冻胀具有较强的抑制作用,对接近强冻胀的粉土,低掺量如 0.2%、短长度如 15 mm 的秸秆掺加就会使其进入不冻胀范围。

(2) 秸秆的掺加对粉土的冻结深度有影响,其他条件相同的情况下,冻结深度随秸秆掺量的增加而减小;随秸秆长度的增加先减小后增大,但均小于不掺加秸秆时粉土的冻结深度。

(3) 在试验范围内,其他条件相同的情况下,秸秆加筋粉土的冻胀量和冻胀率均随秸秆掺量的增加而线性增大,均随秸秆长度的增加呈先减小后增大,但均远小于素土的冻胀量和冻胀率。本试验条件下,存在一个最优掺量 0.4% 和最优长度 20 mm,该组合对秸秆加筋粉土的冻胀变形具有显著的抑制作用,可在实际工程中推荐使用。

参考文献(References):

- [1] Zhou Qiaoyong, Xiong Baolin, Yang Guangqing, et al. Micro-structure of low liquid limit silt[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(Suppl 2): 439-444. [周乔勇,熊保林,杨广庆,等. 低液限粉土微观结构试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(增刊2): 439-444.]
- [2] Wu Qingxiang, Peng Liyun, Long Peiheng. Study of modifying silt by lime and cement[J]. Highway, 2015, 60(9): 14-19. [武庆祥,彭丽云,龙佩恒. 石灰、水泥对粉土的改良研究[J]. 公路, 2015, 60(9): 14-19.]
- [3] Wei Houzhen, Zhou Jiazuo, Wei Changfu, et al. Experimental study of water migration in saturated freezing silty soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(9): 2547-2552. [魏厚振,周家作,韦昌富,等. 饱和粉土冻结过程中的水分迁移试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2547-2552.]
- [4] Sheng Daichao, Zhang Sheng, He Zuoyue. Assessing frost susceptibility of soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 594-605. [盛岱超,张升,贺佐跃. 土体冻胀敏感性评价[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(3): 594-605.]
- [5] Zhou Jiazuo, Wei Changfu, Wei Houzhen, et al. Experimental

- and theoretical characterization of frost heave and ice lenses [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2014, 104/105: 76-87.
- [6] Qi Jilin, Ma Wei. State-of-art of research on mechanical properties of frozen soils [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(1): 133-143. [齐吉琳, 马巍. 冻土的力学性质及研究现状 [J]. *岩土力学*, 2010, 31(1): 133-143.]
- [7] Li Siqi, Yang Ping, Zhang Ting, et al. Experimental study on frost heave and thaw settlement properties of silty clay cement-improved soil [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, 43(4): 1-8. [李思齐, 杨平, 张婷, 等. 粉质黏土水泥土冻胀融沉特性研究 [J]. *冰川冻土*, 2021, 43(4): 1-8.]
- [8] Han Chunpeng, He Dongpo, Jia Yanmin, et al. Frost heave properties of lime modified subgrade soil [J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2013, 33(3): 27-31. [韩春鹏, 何东坡, 贾艳敏, 等. 石灰改良路基土的冻胀特性 [J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2013, 33(3): 27-31.]
- [9] Zhang Lixin, Wang Jiacheng. Experimental study on frost heaving behaviors of lime soil [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2002, 24(3): 336-339. [张立新, 王家澄. 石灰土冻胀特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2002, 24(3): 336-339.]
- [10] Hu Xiangdong. Laboratory research on properties of frost heave and thaw settlement of cement-improved Shanghai's grey-yellow silty sand [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(3): 334-339. [胡向东. 上海灰黄色粉砂水泥改良土冻胀融沉性质实验 [J]. *煤炭学报*, 2009, 34(3): 334-339.]
- [11] Wang Tianliang, Liu Jiankun, Tian Yahu. Static properties of cement- and lime-modified soil subjected to freeze-thaw cycles [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(1): 193-198. [王天亮, 刘建坤, 田亚护. 冻融作用下水泥及石灰改良土静力特性研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 32(1): 193-198.]
- [12] Khattak M J, Alrashidi M. Durability and mechanistic characteristics of fiber reinforced soil-cement mixtures [J]. *The International Journal of Pavement Engineering*, 2006, 7(1): 53-62.
- [13] Gilpin R R. A model for the prediction of ice lensing and frost heave in soils [J]. *Water Resources Research*, 1980, 16: 918-930.
- [14] Konrad J M. Sixteenth Canadian geotechnical colloquium: frost heave in soils: concepts and engineering [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1993, 31: 223-245.
- [15] Chen Lun, Guo Ruiping, Li Guangxin, et al. Study on prevention of frost heave with reinforcement [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1996(3): 84-88. [陈轮, 郭瑞平, 李广信, 等. 用土工加筋防治土冻胀的研究 [J]. *水利学报*, 1996(3): 84-88.]
- [16] Yan Ningxia, Wang Jinlong. Experimental research on anti-freeze properties for the fiber reinforced solidified soil [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, 31(6): 90-94. [闫宁霞, 汪金龙. 纤维加筋固化土抗冻性能试验研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2013, 31(6): 90-94.]
- [17] Chen Cheng, Guo Wei, Ren Yuxiao. Properties and microscopic analysis of lignin fiber-reinforced soils under freeze-thaw cycles [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(Suppl 2): 135-140. [陈诚, 郭伟, 任宇晓. 冻融循环条件下木质素纤维改良土性质研究及微观分析 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(增刊2): 135-140.]
- [18] Deng Zongcai, Zhang Yongfang. Experimental study on frost resistance of cellulose fiber concrete [J]. *China Concrete and Cement Products*, 2012(12): 44-47. [邓宗才, 张永方. 纤维素纤维混凝土抗冻性试验研究 [J]. *混凝土与水泥制品*, 2012(12): 44-47.]
- [19] Code for design of building foundation: GB 50007—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. [建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.]
- [20] Peng Liyun, Wang Dongyong, Qi Jilin. Study on anti-corrosion of PVA-treated wheat straw and its application in reinforcement of a silty soil [J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 291: 123305.
- [21] Wei Li, Chai Shouxi, Cai Hongzhou, et al. Triaxial shear strength and deviatoric stress-strain of saline soils reinforced with wheat straws [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(1): 109-114. [魏丽, 柴寿喜, 蔡宏洲, 等. 麦秸秆加筋滨海盐渍土的抗剪强度与偏应力应变 [J]. *土木工程学报*, 2012, 45(1): 109-114.]
- [22] Code for design of soil and foundation of building in frozen soil region: JGJ 118—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. [冻土地区建筑地基基础设计规范: JGJ 118—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.]

Study on frost heaving characteristics of silt reinforced with anticorrosive treated straw

PENG Liyun^{1,2}, HUA Xiaoning^{1,2}, LIU Dexin³, QI Jilin^{1,2}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Multi-Functional Shaking Tables Laboratory, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Architectural Design & Research Institute of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Silt is widely distributed in China and heavily involved in various engineering applications. The soil is high sensitive to frost heaving, hence the frost heaving characteristics should be taken into account when engineering is constructed in frozen regions. In order to restrain the impact of frost heaving of silt and reduce the carbon footprint, the randomly distributed short-cut anticorrosive wheat straw is used to reinforce silt. Frost heaving tests are carried out on unreinforced and reinforced silt via one-dimensional freezing in the open system. The influence of straw content and straw length on the frost heaving characteristics of silt are investigated. The results suggested that straw reinforcement can significantly inhibit the frost heaving of silt. A small amount (0.2%, 0.4%) of the straw content can change the soil from strong frost heaving silt to weak frost heaving or non-frost heaving silt; for a given test condition, the frost heaving ratio of the soil increases linearly with the increase of straw content in the test range, but the values of reinforced soil are much smaller than that of the unreinforced soil, and a small amount of straw content can inhibit the frost heaving; an optimum straw length can be found for a given straw content, at which both the frost heaving deformation and frost heaving ratio of reinforced soil reach the minimum value.

Key words: silt; frost heaving characteristics; reinforced with anticorrosive treated straw; frost heaving deformation; frost heaving ratio

(责任编辑: 温智)