

邓友生,郑云方,王倩,等.冻融循环作用下纤维增强水泥改性黄土特性[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2023,38(3):26-33. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.004

DENG Y S, ZHENG Y F, WANG Q, et al. Properties of Loess Modified Through Fiber Reinforced Cement Under Freeze-thaw Cycle [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 38(3):26-33. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2023.03.004

冻融循环作用下纤维增强水泥改性黄土特性

邓友生^{1,3*}, 郑云方¹, 王倩¹, 李培鹏², 冯爱林³, 陈国军³, 章梦雨¹

(1.西安科技大学 建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054;2.武汉理工大学 土木工程与建筑学院,湖北 武汉 430070;
3.西安科技大学 桩承结构研究中心,陕西 西安 710054)

摘要:为了探究聚丙烯纤维和水泥共同改良黄土性能,通过无侧限抗压试验以及冻融循环试验,分析水泥掺量,聚丙烯纤维掺量与长度以及冻融循环次数对改性黄土无侧限抗压强度的影响.研究表明:改性黄土的无侧限抗压强度随着水泥掺量增多而提高,加入纤维则进一步提高其抗压强度.纤维的掺量和长度的增大会使改性黄土的无侧限抗压强度先提高后降低,聚丙烯纤维的最佳掺量为0.4%,最优长度为9 mm.水泥改性黄土经历15次冻融循环后,纤维增强水泥改性黄土经历10次冻融循环后强度损伤趋于平缓,变化幅度在3%左右.采用Lasso回归模型计算水泥-聚丙烯纤维改性黄土无侧限抗压强度回归预测模型,预测模型与试验结果吻合较好.

关键词:改性黄土;聚丙烯纤维;冻融循环;回归模型

中图分类号:TU377.1

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2023)03-0026-08

Properties of Loess Modified Through Fiber Reinforced Cement Under Freeze-thaw Cycle

DENG Yousheng^{1,3}, ZHENG Yunfang¹, WANG Qian¹, LI Peipeng²,
FENG Ailin³, CHEN Guojun³, ZHANG Mengyu¹

(1. School of Architecture & Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Civil Engineering & Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070 China;

3. Pile-Supported Structures Research & Test Center, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: In order to explore the properties of modified loess with polypropylene fiber and cement, the effects of cement content, polypropylene fiber content and length, and freeze-thaw cycle times on the unconfined compressive strength of modified loess are analyzed through unconfined compression test and freeze-thaw cycle test. Results show that the unconfined compressive strength of modified loess increases with the increase of cement content, and the addition of fiber can further improve its compressive strength. The unconfined compressive strength of the modified loess increases first and then decreases with the increase of fiber content and length. The optimal content of polypropylene fiber is 0.4% and the optimal length is 9 mm. After 15 freeze-thaw cycles of cement modified loess, the strength damage of fiber reinforced cement modified loess tends to be gentle after 10 freeze-thaw cycles, with a change range of about 3%. Lasso regression model is used to calculate the

收稿日期:2022-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51878554; 41672308);陕西省自然科学基金基础研究计划重点项目资助(2018JZ5012)

*通信作者, E-mail: dengys2009@126.com

unconfined compressive strength regression prediction model of cement polypropylene fiber modified loess. The prediction model is in good agreement with the test results.

Keywords: reinforced loess; polypropylene fiber; freeze-thaw cycles; regression model

黄土作为一种特殊土,因其结构疏松、垂直节理发育、透水性较强等特性,难以在实际工程中直接使用^[1],故需要采取一定的加固措施.常见的特殊土处理方法有物理法^[2-3]、化学法^[4-5]、综合法.水泥改性土作为典型化学改性法,因其具有低渗透率、低压缩性、施工方便等优点而广泛应用.MENGUE等^[6]发现经水泥处理的细粒红土试件初次固结速度比未经水泥处理的试件快0.5~1.5倍;SHARMA等^[7]认为在水泥土中添加5%的石灰可以获得较好的强度;CHOMPOORAT等^[8]提出了沉积土作为路面基层材料时水泥的最优掺量值.然而,我国广泛分布黄土的西北地区,同时存在大面积季节性冻土区,研究改性黄土的冻融特性是有必要的.孙韬^[9]认为随着冻融循环次数的增多,黏聚力和内摩擦角呈指数型和线性衰减的趋势,且冻融循环会造成水泥土中胶结物的损失,并使其密度降低;王天亮等^[10]研究了在冻融循环下水泥土和石灰土的应力-应变关系、静强度参数变化规律;LAKE等^[11]对比分析了3%和6%水泥含量的胶结土在3个冻融周期前后的变化,并通过光学显微镜和压汞法研究试样的形态变化;吴繁等^[12]利用GDS动三轴仪研究了冻融条件下水泥土的动应变、动弹性模量和动阻尼特性;赵安平^[13]发现在经过相同次数冻融循环后,掺入聚丙烯纤维后水泥土黏聚力和内摩擦角损失程度均小于普通水泥土;LI等^[14]分别研究了冻融作用对黏土、水泥改性黏土和水泥纤维改性黏土力学性能的影响;刘乐青等^[15]研究了原状、重塑黄土在不同冻融温度和冻融循环次数下的无侧限抗压强度和微观结构.

由上所述,将水泥改性土应用于黄土改良工程,亟须对其抗裂性和抗冻性进行深入研究.在水泥土中加入纤维能够抑制其裂隙发展,从而改善黄土的结构性,目前的研究多停留在水泥土的力学特性,对于纤维增强水泥黄土的研究还存在很多不足.因此,本文以中国西北地区黄土为例,采用水泥和聚丙烯纤维共同作用改性黄土,通过无侧限抗压试验和冻融循环试验,探究水泥-纤维共同作用改性黄土的最优掺量,分析冻融循环作用下改性黄土的力学特性.

1 试验内容

1.1 试验材料

试验所用黄土取自西安某工地,将取得土样碾散并过粒径5 mm的筛子,根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[16]测定黄土的基本物理性质指标,见表1.水泥采用尧柏牌P.O42.5级普通硅酸盐水泥,其物理力学参数见表2.根据《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T 233—2011)^[17]规定:水泥掺量一般在3%~25%,参照《铁路路基设计规范》(TB 10001—2016)^[18]要求:对细粒土,当采用水泥作为外掺料时其掺量不宜超过6%.本文根据现行规范并结合黄土地区水泥改性土相关研究,将水泥掺量定为3%,4%,5%.采用产地为湖南长沙的束状单丝聚丙烯纤维,其物理性能指标见表3.当纤维过短或过少时,若土体受到剪切破坏,土中的纤维无法约束土颗粒,加筋作用不明显;若纤维过长或过多时,纤维错综复杂地缠绕在土体周围形成一个团体,导致土体中有一个区域架空,削弱了纤维对土体的增强作用^[19-21].故取聚丙烯纤维长度分别为6,9,12 mm,纤维掺量分别为0.2%,0.4%,0.6%.结合水泥土规程中水泥土含水率要求,本文取不同水泥掺入量下改性黄土的最优含水率进行制样,试样制备按照《土工试验方法标准》进行,如图1所示的 $\Phi 39.1 \text{ mm} \times 80.0 \text{ mm}$ 的圆柱体试样.为保证试样的水分不受损失,将试样用保鲜膜密封保存.

表1 黄土基本物理力学参数

天然含水率/%	最优含水率/%	最大干密度/(g/cm ³)	液限/%	塑限/%	塑性指数	无侧限抗压强度/MPa
17.6	15.3	1.781	33.64	18.19	15.45	0.32

表2 水泥物理力学参数

抗压强度/MPa		抗压强度/MPa		凝结时间/min		细度	密度/(g/cm ³)	标准稠度用水量
3 d	28 d	3 d	28 d	初凝	终凝			
27.8	49.8	5.82	9.35	120	206	3.9	3.08	27.6

表3 聚丙烯纤维物理性能

直径/ μm	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	吸水性	抗低温性	抗酸性	导热性
18~48	>486	>4.8	无	强	高	低

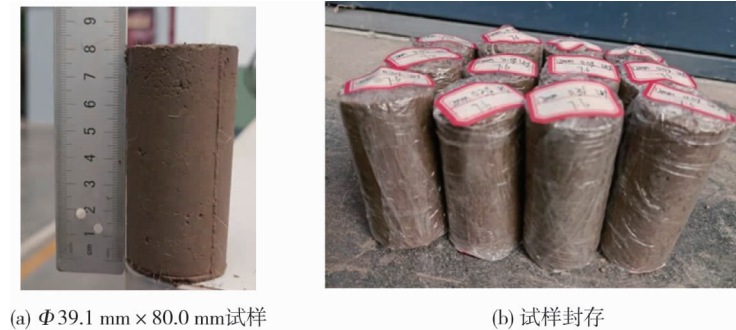


图1 试样制备与封存

1.2 试验设计

为探讨水泥用量、纤维长度和纤维掺量对黄土改性作用,如表4所列,采用10种不同纤维配合比,水泥掺量为3%,4%,5%。相同配合比时,1组制备3个平行试样取平均值以减小误差。

表4 无侧限抗压强度试验方案

编号	水泥掺量 C/%	纤维长度 L/mm	纤维掺量 M/%	编号	水泥掺量 C/%	纤维长度 L/mm	纤维掺量 M/%	编号	水泥掺量 C/%	纤维长度 L/mm	纤维掺量 M/%
C3	3	0	0	C4	4	0	0	C5	5	0	0
C3M0.2L6	3	6	0.2	C4M0.2L6	4	6	0.2	C5M0.2L6	5	6	0.2
C3M0.4L6	3	6	0.4	C4M0.4L6	4	6	0.4	C5M0.4L6	5	6	0.4
C3M0.6L6	3	6	0.6	C4M0.6L6	4	6	0.6	C5M0.6L6	5	6	0.6
C3M0.2L9	3	9	0.2	C4M0.2L9	4	9	0.2	C5M0.2L9	5	9	0.2
C3M0.4L9	3	9	0.4	C4M0.4L9	4	9	0.4	C5M0.4L9	5	9	0.4
C3M0.6L9	3	9	0.6	C4M0.6L9	4	9	0.6	C5M0.6L9	5	9	0.6
C3M0.2L12	3	12	0.2	C4M0.2L12	4	12	0.2	C5M0.2L12	5	12	0.2
C3M0.4L12	3	12	0.4	C4M0.4L12	4	12	0.4	C5M0.4L12	5	12	0.4
C3M0.6L12	3	12	0.6	C4M0.6L12	4	12	0.6	C5M0.6L12	5	12	0.6

注:水泥掺量、纤维掺量均为干土重量百分比,定义水泥掺量代号为C,纤维长度代号为L,纤维掺量代号为M。如:C3表示水泥掺量为3%的纯水泥改性黄土,C3M0.2L6表示水泥掺量为3%,6mm长的聚丙烯纤维掺量为0.2%的纤维增强水泥改性土

采用YYW-2型应变控制无侧限压力仪进行无侧限抗压试验。

采用低温养护箱对改性黄土进行冻融试验,以陕西极端气温统计图(见图2^[22])为依据,试样在-15℃的温度条件下放置12h,然后移至室温条件下(25±2)℃放置12h。根据《水泥土配合比设计规程》中水泥土养护龄期要求,将试样制备完成后均在标准养护箱中养护7d后再进行冻融。相关研究表明:冻融循环15次后土体强度趋于稳定^[23-25],因此,本试验选取的冻融循环次数为0,5,10,15,20次。

2 试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度

2.1.1 水泥与纤维

土的无侧限抗压试验是土体最基本的力学试验之一,常被用来反映土体的强度特性。通过单因子试验分析水泥掺量、聚丙烯纤维掺量、聚丙烯纤维长度对改性黄土抗压强度的影响规律,根据抗压试验数据判断改性黄土是否满足路基规范的要求。未经冻融改性黄土无侧限抗压试验结果如图3。

掺入水泥可显著提高黄土的抗压强度。研究表明,水泥掺量3%时可使黄土无侧限抗压强度提高186.6%,当水泥掺量5%时改性黄土抗压强度则提高282.5%。改性土的无侧限抗压强度随着水泥掺量的增

大而增大,但增长趋势逐渐减缓.因为水泥与土中水发生了水解、水化和离子交换等物理、化学反应,使土颗粒胶结在一起,进而改善了改性土的稳定性.水泥掺量过多时,抗压强度逐渐趋于稳定,土体脆性增大.

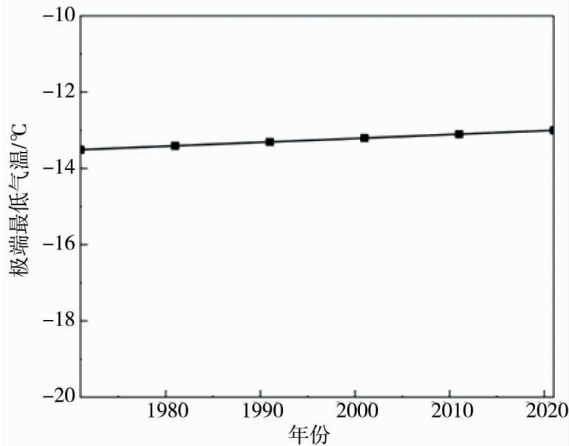


图 2 陕西省极端气温统计

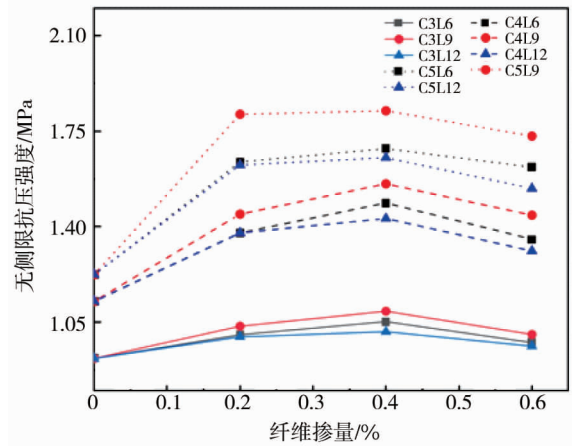


图 3 未经冻融改性黄土无侧限抗压强度

纤维掺量对改性黄土的抗压强度在不同纤维长度以及不同水泥掺量状态下的影响趋势大致相同,即随着纤维掺量的增加先增大后减小,在纤维掺量达到 0.4% 时,无侧限抗压强度最大.这是由于纤维掺量过少时,土体中的纤维不能成网,对整体强度影响不大;随着纤维掺量的增大,形成了一种有效的结构,土体的抗压强度得到提高,而纤维掺量过高,纤维会缠绕在土体中,产生局部架空,破坏土体稳定性,从而减弱纤维的增强效果.

保持水泥掺量、聚丙烯纤维掺量不变,随着纤维长度增加,抗压强度呈现出先上升后下降的趋势.在 9 mm 时表现出明显的优越性,其次是 6, 12 mm 时对无侧限抗压强度的提高作用最小.纤维太短,在土体受到外界压力时,不能很好地约束土体,随纤维长度的增加,纤维在土体中的弯曲程度不断增大,并与纤维的接触次数增多,交织点随之增多,从而形成一个稳定的结构,与此同时,土体的抗压强度会逐步增大,但如果纤维太长,则交织点会迅速增加,造成了纤维间的重叠,重叠的纤维在土与表面之间形成隔断,使得改性黄土无侧限抗压强度呈现下降趋势.

增加水泥掺量可大幅度提高土体强度,随着强度提高纤维对土体强度的影响在较高水泥掺量下变得更加明显.保持 0.4% 的纤维掺量,在水泥掺量为 3% 时,纤维长度 9 mm 比纤维长度 12 mm 的抗压强度提高了 7.39%;在水泥掺量 5% 时,纤维长度为 9 mm 比纤维长度为 12 mm 的无侧限抗压强度提高了 10.41%.保持纤维长度为 9 mm,在水泥掺量为 3% 时,0.2% 的纤维掺量使改性黄土的抗压强度提高了 12.9%, 0.4% 的纤维掺量使抗压强度提高了 18.9%;在水泥掺量为 5% 时,0.2% 的纤维掺量使抗压强度提高了 48.0%, 0.4% 的纤维掺量使抗压强度提高了 49.1%.由此可知:在改性黄土中采用的纤维和水泥会产生交互作用,水泥的水化会使土体颗粒胶凝在一起,纤维被胶凝的土颗粒包裹,两者间存在更大的界面摩擦力和黏结力,从而在较高的水泥掺量下,纤维可以更好地发挥加筋的作用.

由上述分析可知:在改性黄土中,聚丙烯纤维最优掺量为 0.4%,纤维的最优长度为 9 mm.水泥掺量越大土体强度越大,但在满足强度要求的前提下,还要兼顾经济性以及环保性.

2.1.2 冻融循环作用

不同掺量的水泥改性黄土和采用最佳纤维配比(纤维长度 9 mm,纤维掺量 0.4%)的纤维增强水泥改性黄土试样,经历一定次数的冻融循环后的无侧限抗压强度曲线如图 4.

纤维可有效增强水泥改性黄土的强度,在高掺量下表现得尤为明显.随着冻融循环次数的增加,

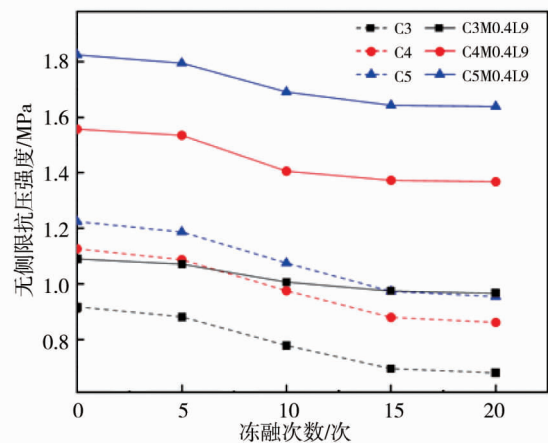


图 4 水泥纤维与冻融次数对无侧限抗压强度的影响

改性土的无侧限抗压强度均下降.水泥改性土以及纤维水泥改性土经历冻融循环后的强度变化趋势大致相同,在前5次冻融循环,改性黄土无侧限抗压强度的损伤程度很小.在20次冻融循环后,3%,4%,5%水泥掺量的改性黄土抗压强度分别降低了30.0%,23.5%,22.1%,掺加纤维组的改性黄土抗压强度分别降低了11.4%,12.1%,10.2%.纤维的加入可有效抑制冻融循环引起的强度损伤.掺加纤维的改性黄土基本上在经历10次冻融循环后抗压强度趋向稳定,无侧限抗压强度的降幅在3%左右;未掺加纤维组强度则在15次冻融循环后趋于稳定,降幅基本小于3%.分析结果可知:在冻融循环前期,随着土体温度的不断变化,内部水分在固态冰和液态水之间不断转化,这为水泥的水化反应提供良好环境,改性黄土中未充分反应的水泥会继续与土体中的水分发生作用,并且在经历冻融循环过程中,不断供给土体试样水分, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的生成抵御了部分冻融循环,导致其强度下降幅度不大.但也正是因为有限次的冻融循环使得这种水化反应提前结束,在融化过程中,由于水和冰的密度不同,冰转化为水时,体积变大,从而对周边土体粒子进行挤压,破坏了土体间的胶结.随着温度的升高,水分转变为液态时其体积减小,土体之间形成明显的孔隙,此时掺入纤维可填充土颗粒之间的孔隙,使得改性黄土的强度虽有降低,但降幅并不显著.

保持纤维长度9 mm不变,不同纤维及水泥掺量试验组在经历冻融循环后无侧限抗压强度的变化如图5.选定0.4%的最佳纤维掺量,不同纤维长度和水泥掺量试验组经历冻融循环后无侧限抗压强度如图6.

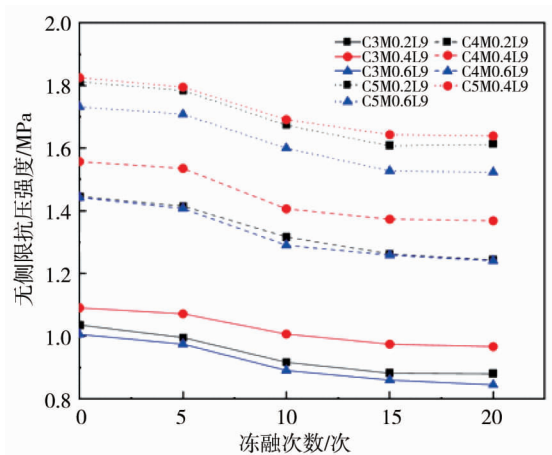


图5 纤维掺量对冻融循环下无侧限抗压强度的影响

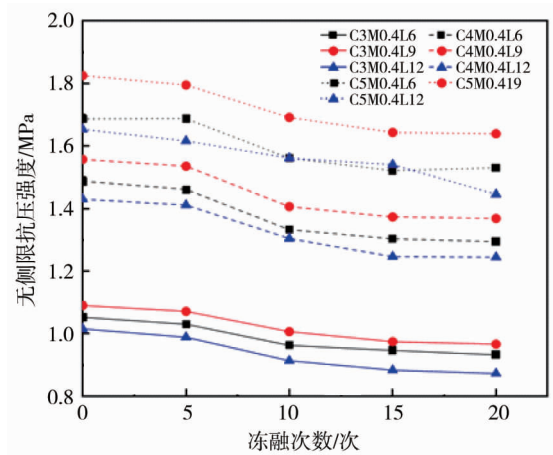


图6 纤维长度对冻融循环下无侧限抗压强度的影响

改性黄土的冻融强度损伤随着纤维掺量的增加呈现出先下降后上升的趋势.在3%水泥掺量下,0.2%,0.4%,0.6%的纤维掺量20次冻融循环后的无侧限抗压强度分别降低了15.1%,11.4%,16.0%.过少的纤维掺量无法约束土体颗粒,过多的纤维掺量则会在土体中缠绕抱团,导致土体中孔隙率增大,合适的纤维掺量可以使纤维在水泥改性黄土中发挥最大的作用.随着水泥掺量的提高,无侧限抗压强度的冻融损伤曲线逐渐趋于平稳.水泥掺量增大时,改性黄土的胶结土体增多,在内部更易形成稳定的骨架,加入纤维进一步抑制了微裂缝的发展,在冻融循环过程中不宜形成较大的裂缝,冻融损伤较少.

不同长度的纤维的改性黄土经历冻融循环后的无侧限抗压强度变化曲线大致相同,6,9 mm纤维改性黄土20次冻融循环后的强度损伤率大致相同,12 mm纤维的冻融损伤率相对较高.说明纤维长度对冻融强度损伤的影响不大,而纤维过长,在拌制过程中更容易产生结团现象导致土体内部的孔隙较多,在冻融循环作用后产生的无侧限抗压强度损伤也就较大.

2.2 破坏形态

当加载速度为负值或者试件破坏时,试验结束,观察未经冻融循环的改性黄土试样在单轴受压状态下的破坏形态如图7和图8.试件发生破坏时,纯水泥改性黄土的表层直接剥落,试件呈现出倒三角形的破坏形态,这是由于水泥的掺入量比较大,有些水泥还没有与土体中的水分发生反应.当水泥土试样受到应力时,外层土体会先承受一定的压力,然后再进行内部抗压,试件表面产生裂纹时,外部边缘已经发生破坏,出现了局部脱落的现象,达到其极限抗压强度后试块整体破坏,纯水泥土的脆性断裂是显而易见的.由图8可知:在水泥改性黄土中加入了纤维后,水泥土破坏形态得到了改善,此时的改性黄土试块在达到抗压强度峰值之前有明显的变形与裂隙预兆.这是因为,纤维掺入改性黄土之后,随机分散的纤维在水泥土中乱

向排列,并呈三维网状分布,在试件产生微小裂隙时,纤维起到连接作用,抑制黄土裂隙的进一步发育。

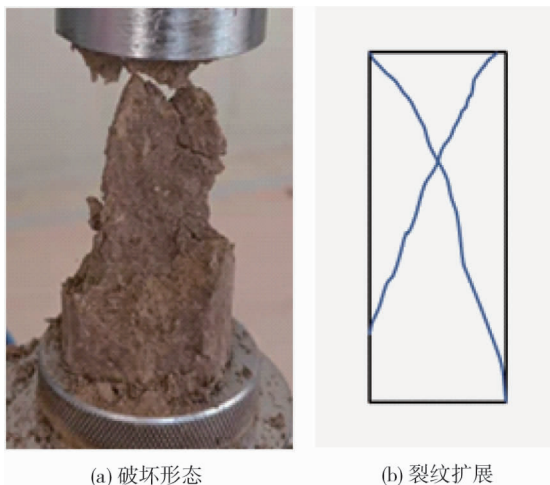


图7 水泥改性黄土破坏形态

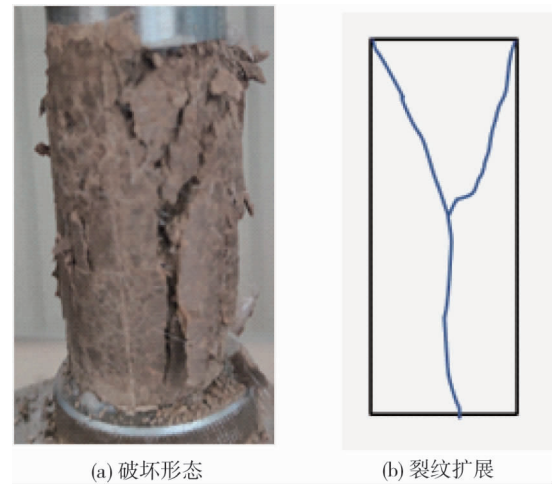


图8 纤维增强水泥改性黄土破坏形态

图9和图10是经过冻融循环后改性黄土试样在单轴受压状态下的破坏形态.水泥改性黄土经历冻融循环后破坏形态转变为斜向剪切破坏,此时有明显的剪切面.表明土体中未水化完全的水泥在冻融循环的过程中进一步反应,提高土颗粒间的胶结性能从而增强了土体的稳定性。

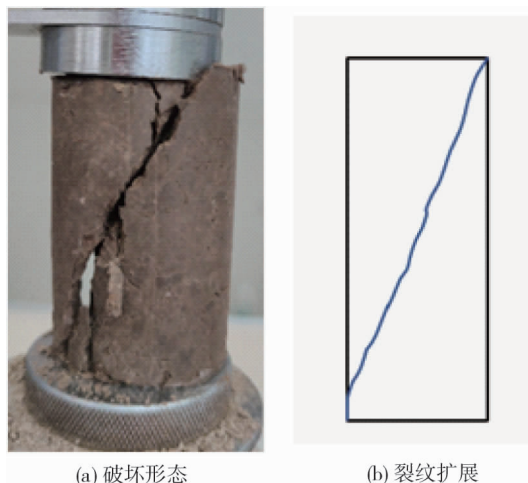


图9 冻融循环后水泥改性黄土破坏形态

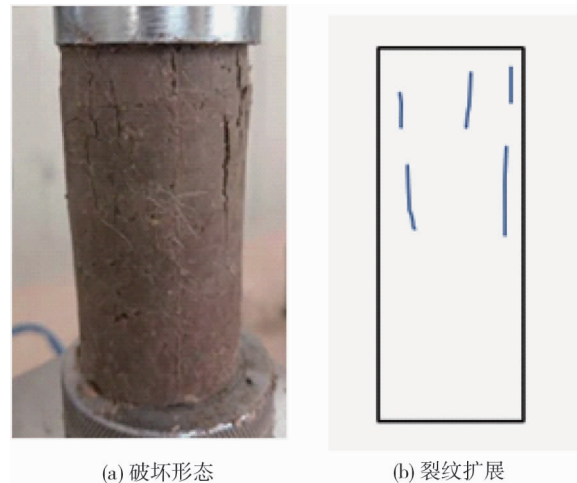


图10 冻融循环后纤维增强水泥改性黄土破坏形态

当选择合适的纤维掺量、纤维长度后,即改性黄土为最优掺入配合比($L=9\text{ mm}$ 、 $M=0.4\%$)时,改性黄土的破裂面变得更加微小.仅仅在试样上部产生微小的裂隙,裂隙间可看到纤维的桥连,试样完整性较好,破坏形式主要为压张破坏.改性黄土中的纤维可以代替土体颗粒承受一定的拉力,土体中的纤维丧失受力能力时试样破坏。

2.3 强度预测

采用 Lasso 回归模型进行分析改性黄土无侧限抗压强度与水泥掺量、纤维长度、纤维掺量以及冻融循环次数的关系.具体分析步骤:

- 1) Lasso 回归分析前需要根据标准化回归系数轨迹图确认 A 值,如图 11;
- 2) A 的选取标准是以各自变量的归一化回归系数大于稳定时的最小值,当 $A=0$ 时,表明变量之间不具有共线性;
- 3) A 值确定后,计算 Lasso 回归模型估计。

图 11 中自变量为水泥掺量、聚丙烯纤维长度、聚丙烯纤维掺量以及冻融循环次数,因变量为改性黄土无侧限抗压强度,进行 Lasso 回归分析后得到的轨迹图.最佳 A 值取为 0.01。

输入 A 值,计算 Lasso 回归模型分析结果,如表 5。

模型 R^2 为 0.858 8, 意味着水泥掺量、纤维长度、纤维掺量以及冻融循环次数可以解释改性黄土无侧限抗压强度的 85.88% 变化原因。

t 检验的目的是考察各因子的显著性, 若 $t > 2$ 或 $p < 0.05$, 则表示该变量前面的系数显著不为 0, 选的这个变量是有效的。

表 5 Lasso 回归分析结果

	系数值 B	标准误差 S	t	p	R^2	F
常数	0.003	0.053	0.059	0.953		
水泥掺量	0.298	0.011	26.463	**	0.858 8	$F(4, 145) = 220.532$ $p = 0.000$
纤维长度	0.013	0.003	4.609	**		
纤维掺量	0.007	0.005	2.277	**		
冻融循环次数	-0.008	0.001	-6.484	**		

注: ** 表示 $p < 0.01$

对模型进行 F 检验时发现模型通过 F 检验 ($F = 220.532, p = 0.000 < 0.050$), 也说明水泥掺量、纤维长度、纤维掺量以及冻融循环次数中至少一项会对改性黄土无侧限抗压强度 (unconfined compression strength, UCS) 产生影响关系。

Lasso 回归模型公式为

$$UCS = 0.003 + 0.298C + 0.013L + 0.007M - 0.008N.$$

图 12 为预测结果与试验结果的无侧限抗压强度数值对比, Lasso 回归模型预测的无侧限抗压强度与试验结果吻合较好。

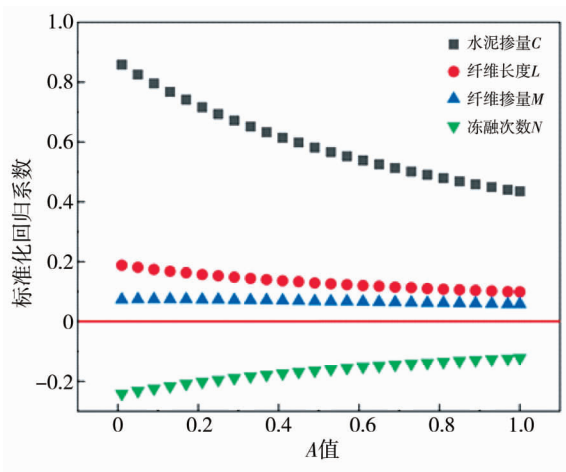


图 11 标准化回归系数轨迹

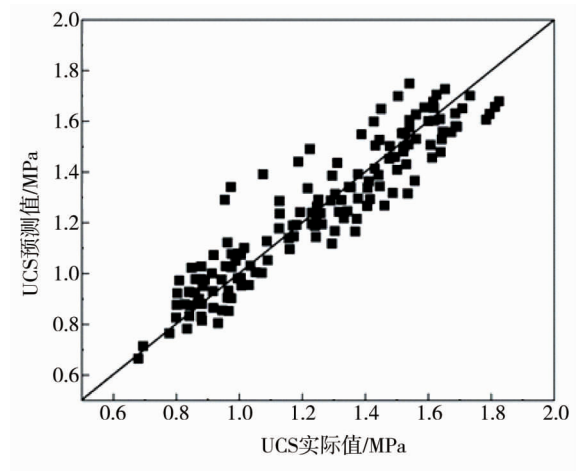


图 12 无侧限抗压强度数值的计算值与试验值对比

3 结论

1) 合适的聚丙烯纤维的长度和掺量才对改性黄土的无侧限抗压强度提高产生最佳作用. 本次试验其纤维最优配合掺量: 纤维长度 9 mm、纤维掺量 0.4%。

2) 在冻融循环作用下, 水泥掺量越高, 抗压强度损伤率越小. 加入纤维可以进一步减小抗压强度损伤率. 水泥改性黄土强度在冻融循环 15 次后基本保持稳定; 纤维增强水泥改性黄土强度在冻融循环 10 次后就基本保持稳定. 纤维的掺入改善了水泥改性黄土的脆性破坏, 水泥-聚丙烯纤维改性黄土试块在达到抗压强度峰值之前有明显的变形先兆。

3) 采用 Lasso 回归模型计算水泥-聚丙烯纤维改性黄土无侧限抗压强度回归预测模型, 可通过考虑水泥掺量、纤维长度、纤维掺量及冻融循环次数来估算改性黄土的无侧限抗压强度。

参考文献:

- [1] 谢婉丽,葛瑞华,郭倩怡,等.灌溉作用下黄土宏观力学响应及微观结构特性研究[J].水文地质工程地质,2017,44(2):82-89.
- [2] SHAMS B, ARDAKANI A, ROUSTAEI M. Laboratory investigation of geotextile position on CBR of clayey sand soil under freeze-thaw cycle[J]. Scientia Iranica, 2020, 27(6): 2808-2816.
- [3] 邓友生,吴鹏,赵明华,等.基于最优含水率的聚丙烯纤维增强膨胀土强度研究[J].岩土力学,2017,38(2):349-353.
- [4] 黄建华,严耿明,杨鹿鸣.水泥改良土地层联络通道冻结温度场分析[J].土木工程学报,2021,54(5):108-116.
- [5] 王叶娇,王有为,靳奉雨,等.石灰改良土的土水特征曲线及其冻结特征曲线[J].防灾减灾工程学报,2020,40(6):967-973.
- [6] MENGUE E, MROUEH H, LANCELOT L, et al. Mechanical improvement of a fine-grained lateritic soil treated with cement for use in road construction[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(11): 04017206.
- [7] SHARMA L K, SIRDESAI N N, SHARMA K M, et al. Experimental study to examine the independent roles of lime and cement on the stabilization of a mountain soil: A comparative study[J]. Applied Clay Science, 2018, 152: 183-195.
- [8] CHOMPOORAT T, MAIKHUN T, LIKITLERSUANG S. Cement-improved lake bed sedimentary soil for road construction[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2019, 172(3): 192-201.
- [9] 孙韬.冻融循环对水泥土三轴强度指标与裂隙演化规律的影响[J].长江科学院院报,2021,38(8):127-132.
- [10] 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.
- [11] LAKE C B, YOUSIF M A M, JAMSHIDI R J. Examining freeze/thaw effects on performance and morphology of a lightly cemented soil[J]. Cold Regions Science and Technology, 2017, 134: 33-44.
- [12] 吴繁,杨平,张雅琴.地铁荷载下宁波软黏土冻融水泥土动力学特性研究[J].防灾减灾工程学报,2020,40(5):818-827.
- [13] 赵安平,汤爱平.冻融循环作用下聚丙烯纤维增强水泥土强度试验研究[J].青海交通科技,2018(5):80-86.
- [14] LI L, SHAO W, LI Y D, et al. Effects of climatic factors on mechanical properties of cement and fiber reinforced clays[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2015, 33(3): 537-548.
- [15] 刘乐青,张吾渝,张丙印,等.冻融循环作用下黄土无侧限抗压强度和微观规律的试验研究[J].水文地质工程地质,2021,48(4):109-115.
- [16] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T 50123-2019 [S].2019.
- [17] 福建省建筑科学研究院,福建建工集团总公司.水泥土配合比设计规程:JGJ/T 233-2011 [S].2011.
- [18] 国家铁路局.铁路路基设计规范:TB 10001-2016 [S].2017.
- [19] TAJDINI M, BONAB M H, GOLMOHAMADI S. An experimental investigation on effect of adding natural and synthetic fibres on mechanical and behavioural parameters of soil-cement materials[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(4): 353-370.
- [20] TRAN K Q, SATOMI T, TAKAHASHI H. Tensile behaviors of natural fiber and cement reinforced soil subjected to direct tensile test[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 24: 100748.
- [21] YADAV J S, TIWARI S K, SHEKHWAT P. Strength behaviour of clayey soil mixed with pond ash, cement and randomly distributed fibres[J]. Transportation Infrastructure Geotechnology, 2018, 5(3): 191-209.
- [22] 郑小华,娄盼星,马永永.1961-2018年陕西极端气温时空变化特征[J].气象与环境学报,2021,37(3):81-87.
- [23] 崔宏环,张振寰,何静云,等.冻融循环下路基改良土力学特性及破坏应变能密度研究[J].安全与环境学报,2021,21(5):1957-1963.
- [24] ZAMAN M M, NAJI K N. Effect of freeze-thaw cycles on class C fly ash stabilized aggregate base [C] //Proceedings of the 82nd Annual Meeting of Transportation Research Board (TRB), 2003.
- [25] 陈四利,史建军,于涛,等.冻融循环对水泥土力学特性的影响[J].应用基础与工程科学学报,2014,22(2):343-349.