

文章编号: 1007-2993(2026)02-0297-09

不同掺合料对流态固化土崩解特性影响的试验研究

李向阳 高 策

(陕西建工第五建设集团有限公司, 陕西西安 710000)

【摘要】 黄土因其特殊的物理化学性质, 在冻融循环的自然环境作用下, 易发生崩解, 进而影响工程建设的安全与耐久性。针对此问题, 选取了水泥、生石灰、粉煤灰、聚丙烯纤维及仿钢纤维等 5 种不同的材料制备流态固化土, 通过室内模拟冻融循环试验, 分析在不同材料、不同冻融循环次数下的崩解特性, 评估改良效果。研究表明: 水泥、生石灰和水泥-仿钢纤维改良效果较好, 崩解率、崩解速率均有不同幅度的下降; 仅在未冻融情况下, 粉煤灰和聚丙烯纤维对崩解速率有减缓作用; 水泥-仿钢纤维复合材料改良效果优于单一材料(水泥); 冻融循环对土体崩解有促进作用。

【关键词】 黄土; 流态固化土; 崩解; 冻融循环

【中图分类号】 TU411

【文献标识码】 A

doi: 10.20265/j.cnki.issn.1007-2993.2024-0456

Experimental study on the influence of different admixtures on the disintegration characteristics of fluid-consolidated soil

LI Xiangyang GAO Ce

(Scegc No.5 Construction Engineering Group Company Ltd., Xi'an 710000, Shaanxi, China)

【Abstract】 Due to its special physical and chemical properties, loess is prone to disintegration under natural conditions of freeze-thaw cycles, which in turn affects the safety and durability of engineering construction. To address this issue, five different materials—cement, quicklime, fly ash, polypropylene fiber, and steel fiber-reinforced polymer—were selected to prepare fluidized solidified soil. Through indoor simulated freeze-thaw cycle experiments, the disintegration characteristics under different materials and different numbers of freeze-thaw cycles were analyzed to evaluate the improvement effects, leading to the following conclusions: Cement, quicklime, and cement-steel fiber composites showed relatively good improvement effects, with varying degrees of reduction in disintegration rate and disintegration speed; fly ash and polypropylene fiber only slowed the disintegration rate in the absence of freeze-thaw cycles; the cement-steel fiber composite material had better improvement effects than a single material (cement). Freeze-thaw cycles have a promoting effect on soil disintegration.

【Key words】 loess; fluid-consolidated soil; disintegration; freeze-thaw cycles

0 引言

黄土以粉粒为主, 富含钙质和盐类, 土质疏松多孔, 具有垂直节理, 透水性强, 抗水性弱^[1]。崩解性是指土体在浸水后土粒间的联结弱化和强度丧失, 使土体分成块状或粒状的现象^[2]。黄土因其特殊结构与成分组成, 在遇水后极易发生崩解。黄土的强崩解性不仅加剧边坡侵蚀、崩塌和潜蚀, 而且斜坡体崩解造成土体透水性增强, 改变边坡土体的含水率、降低土体力学参数, 不利于边坡稳定^[3]。土壤崩解是发生土壤侵蚀的必要条件之一^[4]。土壤侵蚀破坏了土壤结

构和植被, 造成土地资源流失, 严重影响农业生产和生态环境。

黄土的崩解特性及其改良已有大量研究。李喜安等^[5]通过自行研制的大试块黄土崩解仪, 结合原位崩解试验, 对黄土的崩解性进行试验研究, 发现黄土的崩解主要以崩离、迸离和解离 3 种作用方式进行。高建伟等^[6]利用自制崩解试验仪对 32 种不同干密度、不同初始含水率的黄土试样进行崩解试验, 探究了重塑黄土崩解速率与干密度、初始含水率、有效空隙率的关系。王 健等^[7]采用 Richards 模型对土壤崩解

过程进行了模拟,发现随干湿交替次数的增加,土壤崩解速度逐渐降低,其崩解过程可划分为缓慢崩解阶段、指数崩解阶段和崩解完成阶段。Wang等^[8]采用自行改进的崩解仪测试了不同因素对黄土崩解的影响,发现黄土崩解速率在一定范围内与水温呈正相关,而土样尺寸和初始含水量则相反,矿化度对崩解速率影响不大。朱皓轩^[9]将粉煤灰、路液掺入渭南地区的马兰黄土,开展室内物理力学试验及模型试验,找到了粉煤灰与路液材料的最佳掺量及养护时间的最优组合情况。

随着城市建设的发展,各类工程建设产生的工程淤泥质渣土日益增加,传统处置方法利用效率低且成本高昂。预拌流态固化土作为一种新型环保材料,具有高强度、低渗透性、高流动性、施工进度快等特点,被广泛应用于溶洞处理、淤泥处理、回填工程、路基工程等,可以有效提高工程材料的利用率和工程质量^[10]。预拌流态固化土的研究和应用有助于减少填土开挖对生态环境的破坏,同时减少碳排放,促进“双碳”战略目标的实现^[11]。

对于预拌流态固化土,高 强^[12]通过对水与回填土的配比、固化剂与回填土的配比、水泥基流土固化剂的组分等的研究,确定最优的水泥基流土固化剂用量。刘丽娜等^[13]研究了不同的固化剂掺入比和龄期对预拌流态固化土强度的影响,建立并验证了强度预测模型。任铁钺等^[14]选择水泥和石粉作为固化剂,再生砂作为骨料,设计出符合工程要求的预拌流态固化土配合比。钟维军等^[15]研究发现采用矿渣基复合固化剂,所制备的流态固化土可满足各种工程要求。

目前对黄土崩解的研究主要关注于加固材料的种类和掺入比,以及干密度、含水率、压实度等对土体崩解性的影响^[16-20],对预拌流态固化土则是主要研究固化剂种类和配合比对强度的影响,缺乏对预拌流态土试样崩解性能的研究^[12-14]。本研究采用水泥、生石灰、粉煤灰、聚丙烯纤维和仿钢纤维等5种材料,按不同掺量制备预拌流态固化土,经不同次数的冻融循环,进行崩解试验,以探索改良耐崩解性的最优掺入比,为黄土地区的土壤侵蚀工程实践提供参考。

1 试验设计

1.1 试验材料

试验所用黄土取自西安某工程,去除杂质,过2 mm筛后备用。表1为按照《土工试验规范》测定土样的基本物理性质。水泥选用标号为P·O 42.5的普通硅酸盐水泥。生石灰为粉末状,有少量结块,氧化钙(CaO)含量超过80%。粉煤灰选用一级粉煤灰,粉

状,无结块,化学成分见表2。试验中聚丙烯纤维选用长度为4~4.5 mm,白色,类型为束状单丝。仿钢纤维长度为30 mm,直径0.8 mm,将其剪为8~10 mm备用。

表1 黄土基本物理性质

Tab. 1 Basic physical properties of loess

最大干密度/(g·cm ⁻³)	孔隙比	初始含水率/%	塑限/%	液限/%
1.72	1.06	15.2	16.1	28.3

表2 粉煤灰化学成分

Tab. 2 Chemical composition of fly ash

化学成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
含量/%	43	23	5.6	2.5	0.95	0.8

1.2 试验方案

试验选用体积为60 cm³的圆形饼状的标准环刀样。在黄土中分别掺入不同配比的改良材料(见表3),搅拌均匀,增加含水率至流态,将其装入环刀,并用保鲜膜密封,3 d后揭开保鲜膜,控制试样的含水率为15%~20%,室温下养护28 d后,分别进行一定次数的冻融循环,最后进行崩解试验。

表3 改良材料配比

Tab. 3 Improved material proportion

改良材料	材料掺量
水泥	5%, 10%, 15%
生石灰	10%, 15%, 20%
粉煤灰	10%, 15%, 20%
聚丙烯纤维	0.2%, 0.4%, 0.8%
水泥+仿钢纤维	水泥5%+纤维0.2%
	水泥5%+纤维0.4%
	水泥5%+纤维0.8%
	水泥10%+纤维0.2%
	水泥10%+纤维0.4%
	水泥10%+纤维0.8%
	水泥15%+纤维0.2%
	水泥15%+纤维0.4%
水泥15%+纤维0.8%	

采用室内冻融箱模拟冻融循环,参考当地温度将冻融温度设置为±20℃,设置冻融循环次数为3, 7, 15, 30次,冻结、融化时间均为4 h。试验装置如图1。崩解试验采用可自动读数并记录的自制崩解装置,见图2和图3,包括数据采集系统、质量传感器、不锈钢工作台、吊篮、水桶,网兜采用1 cm×1 cm的网格,



图1 冻融箱图

Fig. 1 Freeze-thaw chamber

数据采集系统每 0.5 s 记录一次数据,当传感器示数 24 h 内无变化时,认为崩解完成。

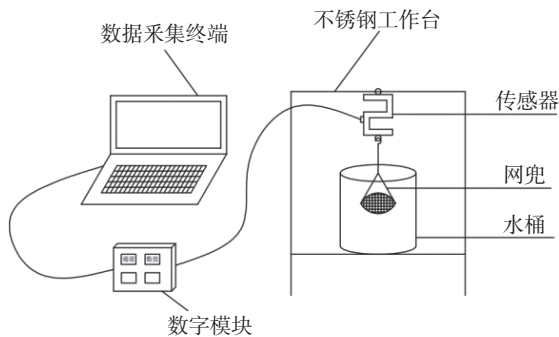


图2 崩解试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the disintegration test apparatus



图3 崩解装置图

Fig. 3 Disintegration device

2 崩解特性分析

2.1 水泥改良崩解特性

由图4可知,经水泥改良后的试样,其最终崩解率介于 2%~25%,与素黄土相比,崩解率显著降低,降幅达 75%~98%,这是因为硅酸盐水泥是一种由 CaO、SiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃ 和 SO₃ 等成分构成的材料,其在固化过程中水化反应,生成多种类型的胶凝材料,并形成网络状,增强土体的黏结力,从而提高了黄土的耐崩解性。

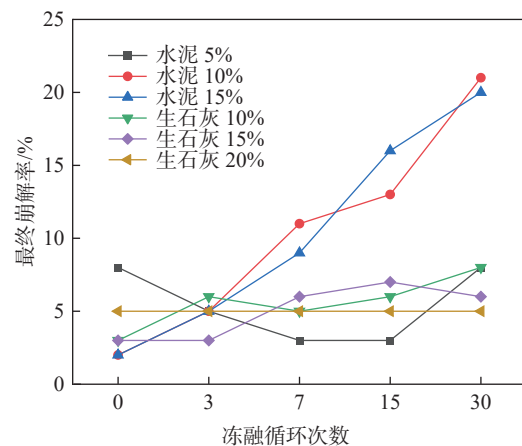


图4 未完全崩解组的最终崩解率

Fig. 4 Final disintegration rate of the incompletely disintegrated group

图5为不同冻融循环次数下不同配比水泥改良黄土的崩解过程曲线。由曲线可知,随着冻融循环次数的增加,最终崩解率提高,开始崩解时间提前,但崩解速率并无显著变化。水泥改良试样在崩解发生时表现出迅速和量少的特点,由此形成一种台阶状的崩解曲线。由曲线可知,在同一冻融循环次数下,与素黄土相比,水泥的掺入显著降低了最终的崩解率。在没有经历冻融循环的情况下,含有 10% 水泥的试样显示出最晚开始崩解的时间和最低的最终崩解率;在进行过 3 次冻融循环时,不同水泥掺入比的试样展现出相同的最终崩解率,其中掺入 15% 水泥的试件开始崩解的时间最晚;而当冻融循环次数超过 3 次时,掺入 5% 水泥的试样出现了最晚开始崩解的时间以及最低的最终崩解率。试验数据表明,增加水泥掺加量并未有效抑制冻融循环对试样崩解的影响,反而可能导致其影响程度加剧。对于未经冻融的黄土样本而言,10% 的水泥掺入比能够有效改善其耐崩解性,而 5% 的水泥配比则对于冻融循环条件下土体的耐崩性改良具有更佳效果。

2.2 生石灰改良崩解特性

从图4可知,通过掺入生石灰对黄土进行改良

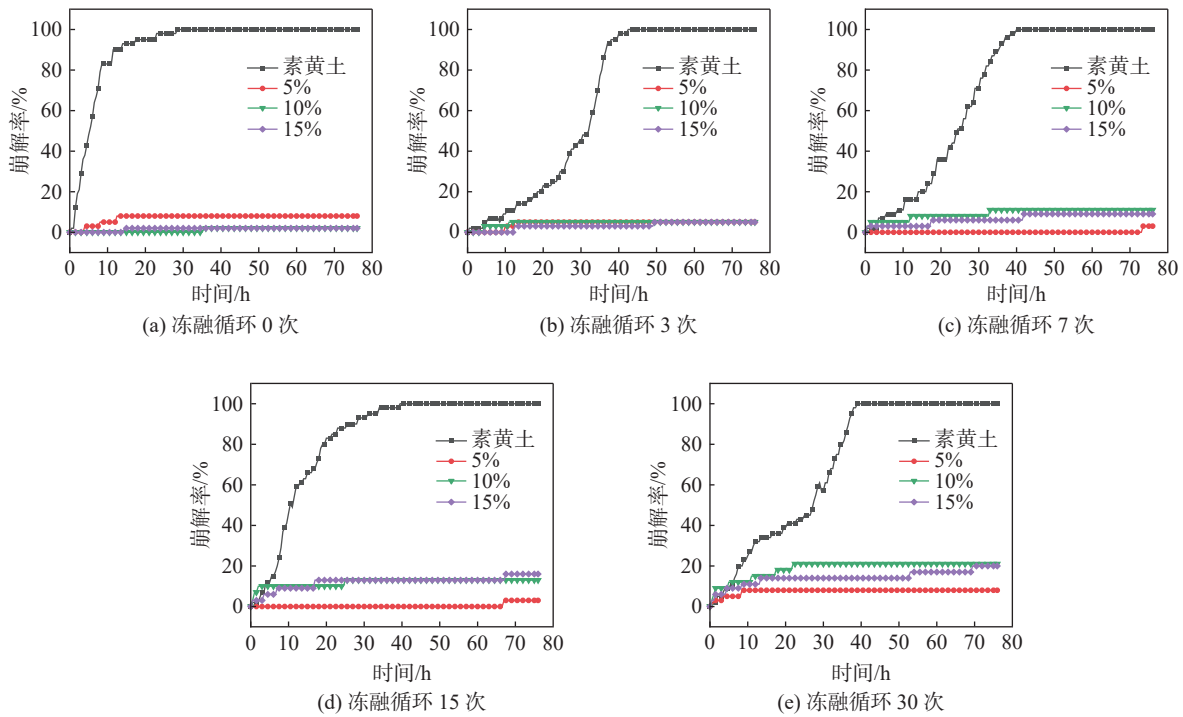


图5 不同水泥掺入比试样的崩解曲线

Fig. 5 Disintegration curves of specimens with different cement content

后,其最终崩解率为2%~10%,崩解率均未超过10%,这是因为石灰水化反应生成的胶结物质粘附在土壤颗粒表面和空隙间,从而增强了土颗粒之间的胶结程度,大大降低了黄土的崩解性。图6为不同冻融循环次数下不同配比生石灰改良黄土的崩解过程曲线,由于崩解发生迅速并且崩解量较小,导致崩解曲线呈现台阶式的特征。随着冻融循环次数的增加,

试样崩解的开始时间提前,但并不显著影响崩解速率及最终的崩解率。

进一步分析崩解曲线,发现在同一冻融循环次数条件下,加入生石灰使得试样的最终崩解率明显下降。在未进行冻融循环的情况下,当使用10%生石灰配比的试样时,其开始崩解的时间较晚,相应的最终崩解率最低;若使用10%,15%的生石灰配比,试

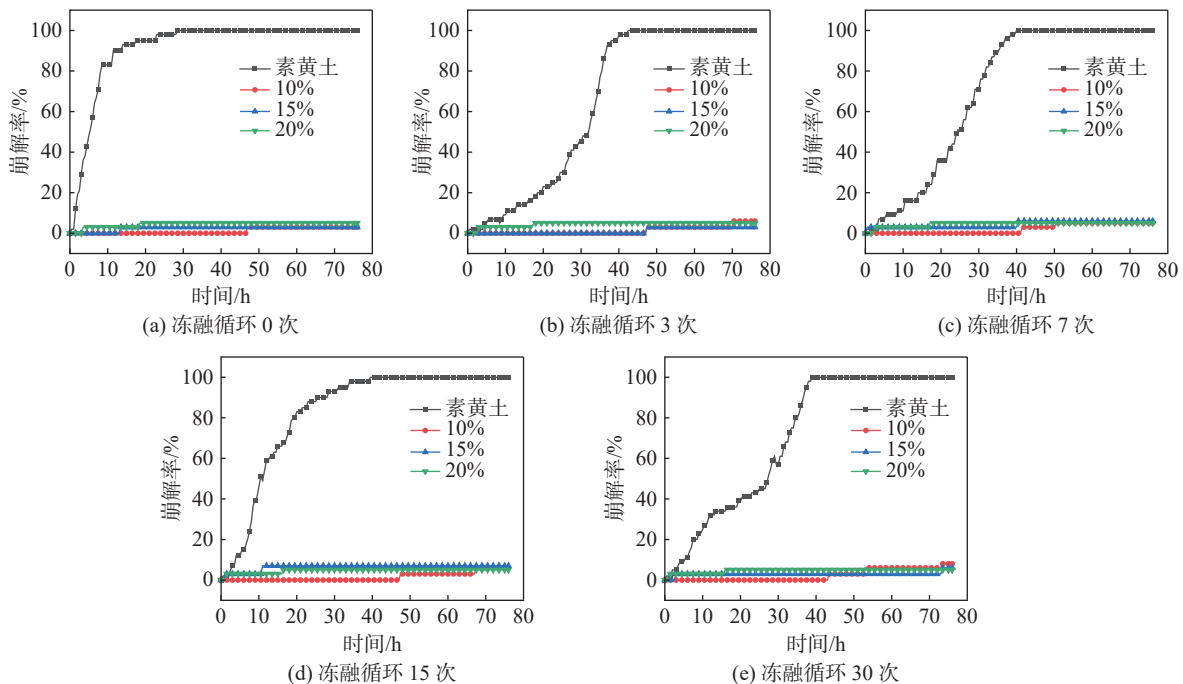


图6 不同生石灰掺入比试样的崩解曲线

Fig. 6 Disintegration curves of samples with different quicklime admixture ratios

样的最终崩解率同样最低。当冻融循环达到 3 次时, 10% 和 15% 生石灰配比的试样开始崩解的时间最晚, 且 15% 生石灰配比的试样的最终崩解率最低。当冻融循环 7 次后, 10% 水泥配比的试样比 20% 水泥配比的试样更晚开始崩解, 后者的最终崩解率最低。冻融循环达 15 次后, 10% 水泥配比的试样的崩解开始时间最晚, 相应的 20% 水泥配比的试样的最终崩解率亦为最低。试验结果表明, 增加生石灰掺入比并不能有效抑制冻融循环对黄土崩解的影响。因此, 为了提高黄土的耐崩解性, 最佳的掺入比为 10%。

2.3 粉煤灰改良崩解特性

由图 7 可知, 在不同冻融循环次数条件下, 黄土试样速率均呈现不同的特征。图 8 为不同冻融循环次数下不同配比粉煤灰改良黄土的崩解过程曲线。由曲线可知, 粉煤灰改良的黄土试样均经历了完整崩解的过程。未经历冻融循环的试样崩解曲线表现为

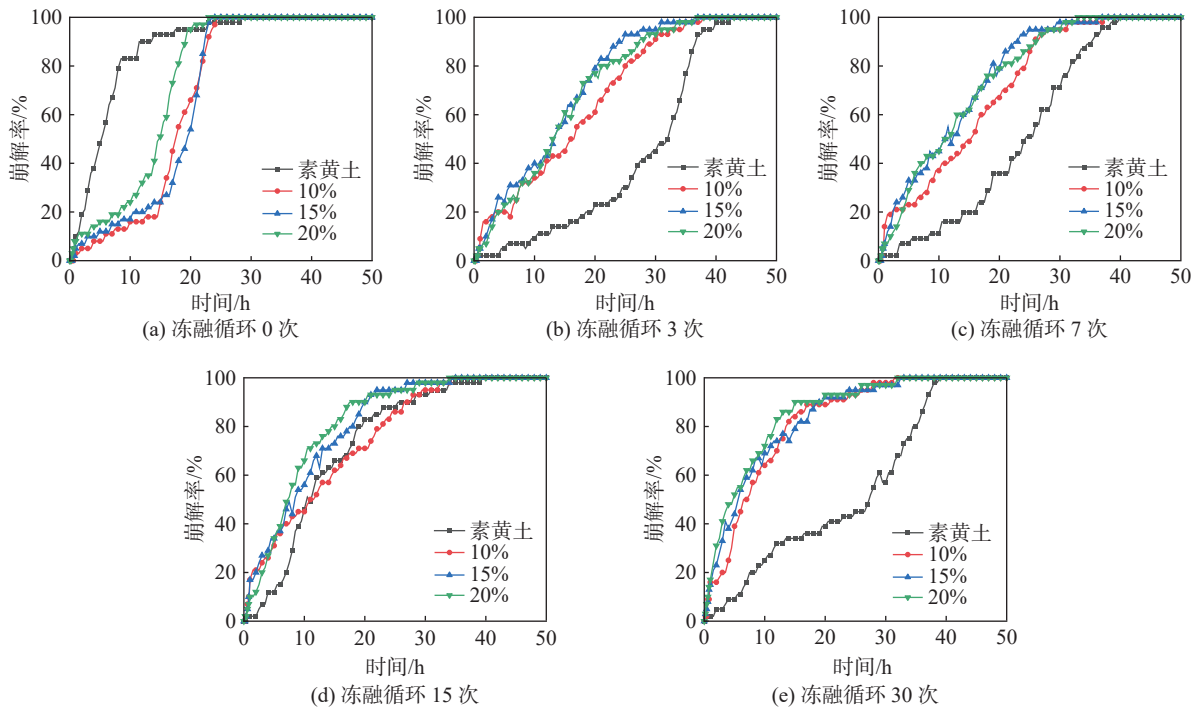


图 8 不同粉煤灰掺入比试样的崩解曲线
Fig. 8 Disintegration curves of specimens with different fly ash content

在同一冻融循环次数条件下, 粉煤灰的掺入并未对试样的最终崩解率产生改良作用, 所有试样的崩解率均保持为 100%。在未进行冻融循环的情况下, 掺入 10% 粉煤灰比例的试样显示出较晚的时间点开始崩解, 粉煤灰的掺入对黄土的崩解速率产生了不同程度的减缓效果; 而在经历冻融循环后, 掺入粉煤灰的试样显示出更高的崩解速率。结果表明, 虽然增加粉煤灰的掺入比可能不足以显著改良黄土的耐崩解性, 但对于不经历冻融循环的黄土, 使用粉煤灰作为

典型的“S”形; 而经过冻融循环的试样崩解曲线则呈现出双曲线形式。随着冻融循环次数的增加, 崩解速率加快, 开始崩解的时间点提前, 这是因为冻融循环改变了土壤本身结构, 水分渗入加快, 使其更易崩解。

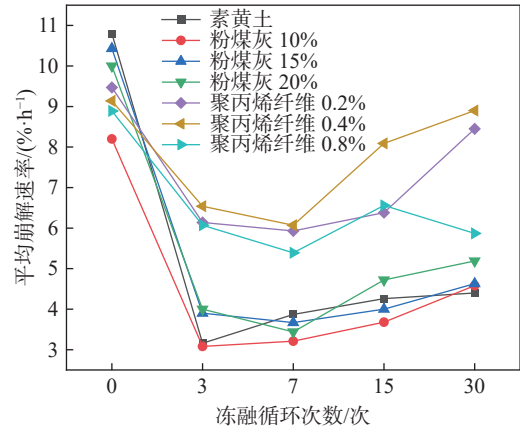


图 7 完全崩解组的崩解速率
Fig. 7 Disintegration rate of the fully disintegrated group

改良材料时, 最佳的掺入比例为 10%。

2.4 聚丙烯纤维改良崩解特性

图 9 为不同冻融循环次数下不同配比聚丙烯纤维改良黄土的崩解过程曲线。从崩解曲线中可以得到, 聚丙烯纤维改良的黄土试样均表现出了完全崩解的现象。在未经历冻融循环的情况下, 崩解曲线呈现典型的“S”形; 当试样经过冻融循环时, 其崩解曲线呈双曲线形态。从图 7、图 9 中可以看出, 不同冻融循环次数对试样开始崩解时间及速率的影响不同, 崩

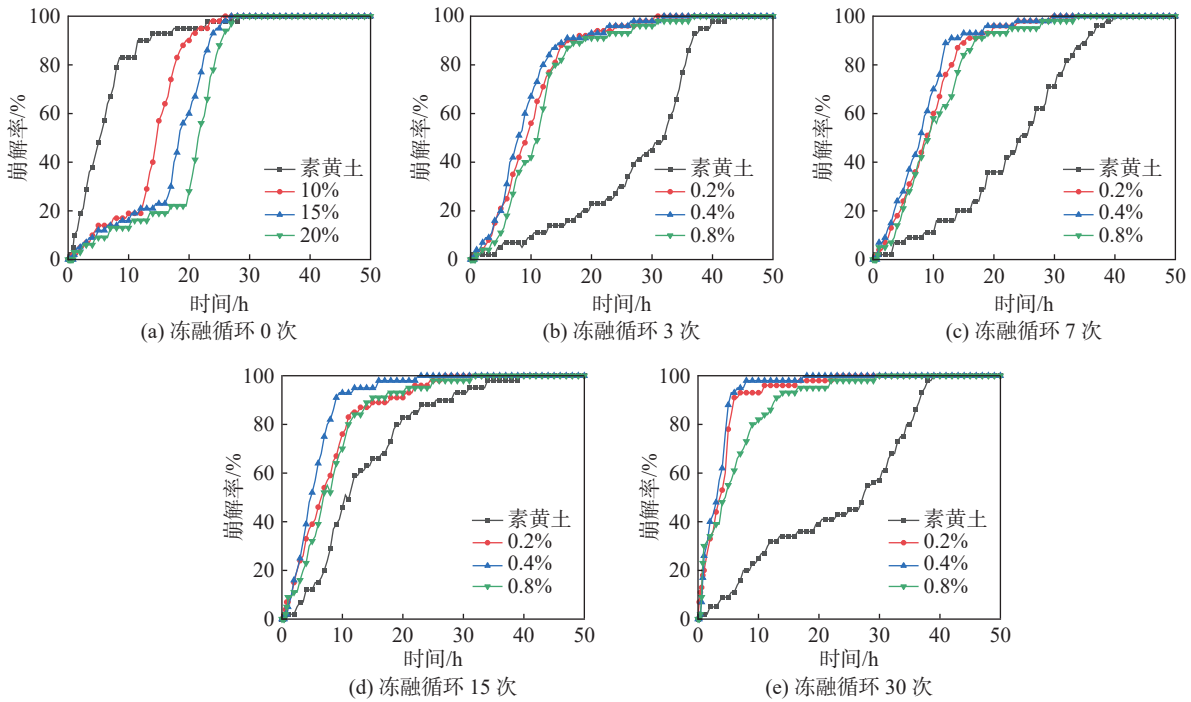


图9 不同聚丙烯纤维掺入比试样的崩解曲线

Fig. 9 Disintegration curves of specimens with different polypropylene fiber content

解速率受到纤维掺入量和冻融循环次数的共同作用。总体来说,随着纤维掺入比例的增加,崩解现象变得不太显著;而冻融循环次数增多则导致崩解速率加快。

根据崩解曲线,发现在同一冻融循环次数条件下,聚丙烯纤维的加入并未能对最终崩解率产生改良效果,所有试样的崩解率均达到100%。在未进行冻融循环时,0.8%粉煤灰掺入比的试样显示出较慢的崩解起始时间点,聚丙烯纤维的加入对黄土崩解速率也有一定程度的减缓效果,且掺入比越高减慢程度越明显,这是因为随着聚丙烯纤维掺入量的增大,纤维在土体中交织作用增强,与土颗粒紧密相接,减弱了孔隙的连通,从而水分难以侵入试样内部。而经过冻融循环后,掺入聚丙烯纤维的试样相比素黄土试样展现出更高的崩解速率,冻融作用破坏了纤维与土颗粒之间的联结,导致孔隙增大,水分更易侵入试样。试验表明,仅通过增加聚丙烯纤维的掺入比例并不能显著改善黄土的耐崩解性。因此,对于不受冻融循环的黄土,最佳的聚丙烯纤维掺入比为0.8%;对于进行冻融循环的黄土,不建议使用聚丙烯纤维改良耐崩解性。

2.5 水泥-仿钢纤维改良崩解特性

由上文可知,在黄土试样中加入水泥提高耐崩解性效果突出,在冻融和未冻融情况下,水泥最优掺比分别为10%和5%,为进一步提高改良效果,在5%和10%的水泥中分别混合不同掺入比的仿钢纤维。

图10、图11为不同冻融循环次数下5%、10%水泥+不同掺入比仿钢纤维改良黄土的崩解结果图。

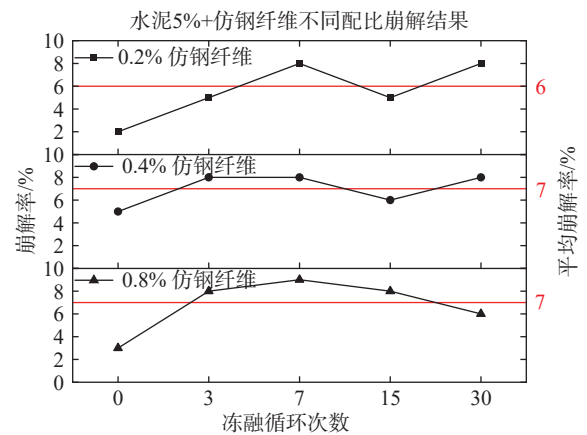


图10 5%水泥-仿钢纤维改良黄土最终崩解率

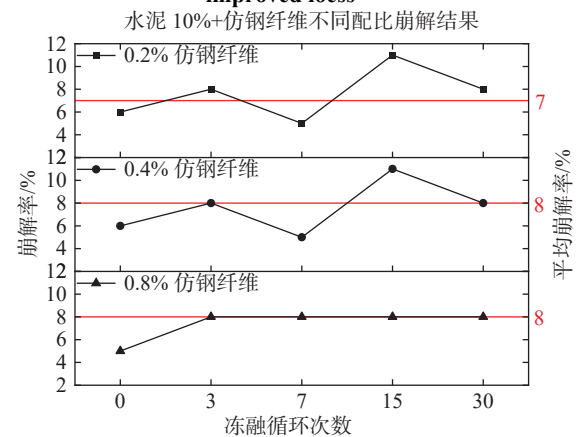


图11 10%水泥-仿钢纤维改良黄土最终崩解率

由图可知,经改良后的试样崩解率在2%~11%,与素黄土相比降低了89%~98%,与水泥改良的试样崩解率降幅最高可达13%。不同冻融循环次数下5%、10%水泥+不同掺入比仿钢纤维改良黄土的崩解曲线见图12、图13,崩解曲线呈台阶状,这是由于崩解量小且迅速。随着冻融循环次数增加,试样崩解率整体呈缓慢上升,而试样崩解开始时间和崩解速率并无

明显差距。

在同一冻融循环次数下,仿钢纤维的加入,试样崩解率有不同程度的改良。未进行冻融循环时,5%水泥+0.2%仿钢纤维的试样崩解率最低;进行冻融循环后,5%水泥+0.8%仿钢纤维的试样崩解率最低。从整体上看,随着仿钢纤维掺入比的增加,试样崩解率呈缓慢上升的趋势,这是由于仿钢纤维的加入增加

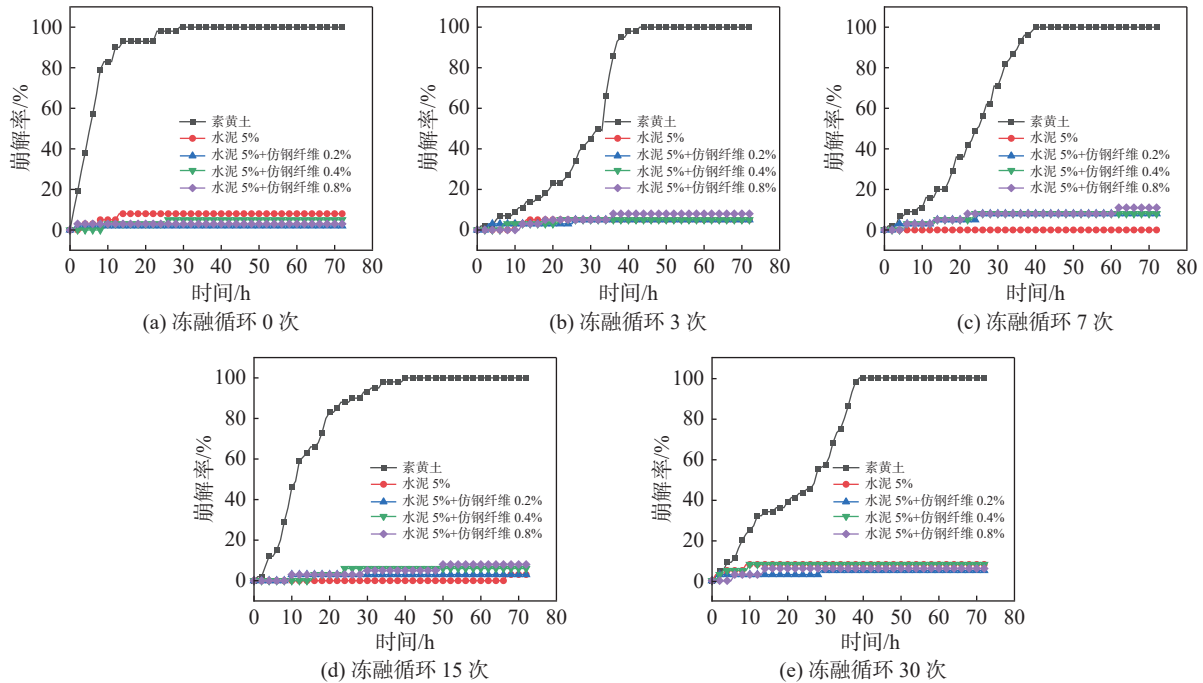


图 12 5% 水泥+不同掺入比仿钢纤维试样的崩解曲线

Fig. 12 Disintegration curves of specimens with 5% cement and different proportions of simulated steel fibers

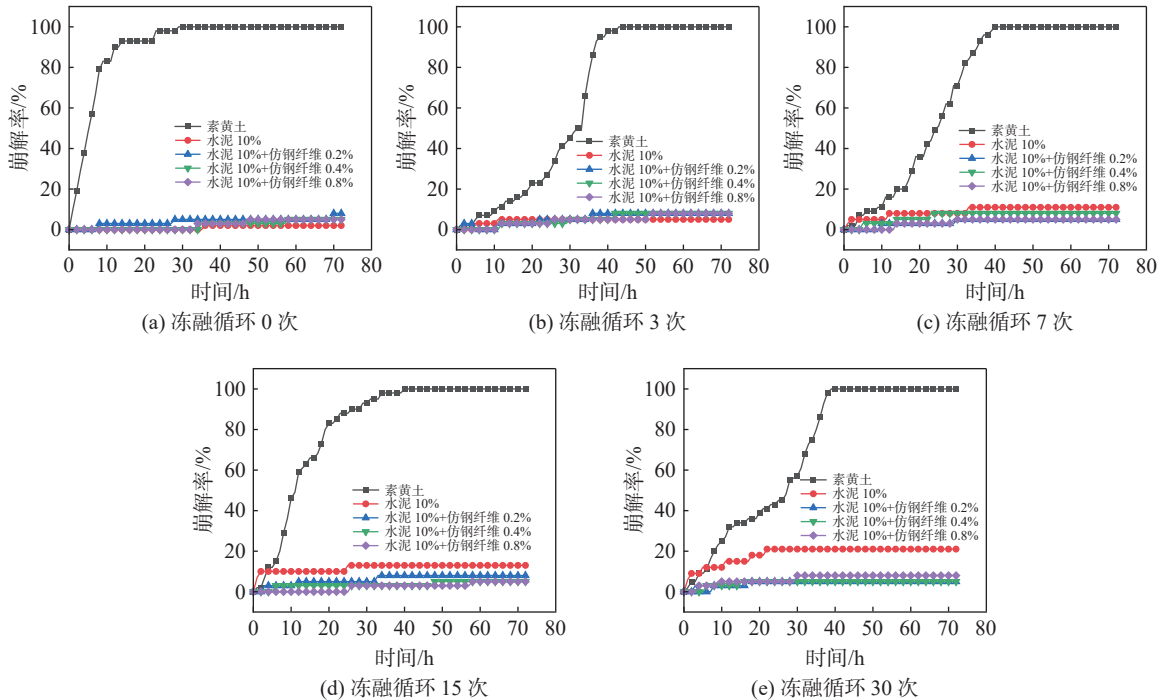


图 13 10% 水泥+不同掺入比仿钢纤维试样的崩解曲线

Fig. 13 Disintegration curves of specimens with 10% cement and different proportions of simulated steel fiber

了土体的渗透通道,试样更易破坏。因此,对于改良黄土的耐崩解性,水泥+仿钢纤维改良与水泥改良黄土相比,改良效果有所增强,并且在水泥改良黄土耐崩解性时,仿钢纤维的最优掺入量为0.2%。

3 结论

(1)水泥和生石灰通过增强土壤中胶结作用提高土体结构稳定性,从而改良其耐崩解性,使其崩解率大幅降低。同一次数冻融循环下,崩解率变化与掺量并无明显关联,但随冻融次数增加,同一掺量土壤崩解率普遍提高。

(2)粉煤灰、聚丙烯纤维的单独掺入对土壤崩解率并无明显改良效果,需结合其他材料使用。但在未冻融时,聚丙烯纤维通过物理交织延缓水分渗透,对崩解速率有一定改良。

(3)采用水泥-仿钢纤维复合材料的改良效果优于单一材料(水泥),崩解率降幅最高可达13%,但随着仿钢纤维掺入比的增高,渗透通道增加,试样崩解率上升。在采取水泥+仿钢纤维作为加固材料时,可减少水泥用量,兼顾成本与性能。

(4)水泥和生石灰通过增强土壤中胶结作用提高土体结构稳定性,从而改良其耐崩解性;聚丙烯纤维则是物理交织延缓水分渗透,对崩解速率有一定改良。

(5)在冻融循环频繁地区,推荐采用10%生石灰、低掺量水泥(5%)或水泥-仿钢纤维(0.8%)复合改良;非冻融区可选用水泥(10%)或生石灰(10%)。

(6)水泥和生石灰通过增强土壤中胶结作用提高土体结构稳定性,从而改良其耐崩解性;聚丙烯纤维则是物理交织延缓水分渗透,对崩解速率有一定改良。

参 考 文 献

- [1] 袁亮. 黄土崩解特性试验研究[D]. 西安: 西北大学, 2017. (YUAN L. The experimental study on disintegration of loess[D]. Xi'an: Northwest University, 2017. (in Chinese))
- [2] 谢定义, 邢义川. 黄土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016. (XIE D Y, XING Y C. Soil mechanics for loess soils[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016. (in Chinese))
- [3] 宁瑞浩. 黄土崩解特性及其界面效应试验研究[D]. S 西安: 长安大学, 2023. (NING R H. Experimental study on the characteristics of loess disintegration and interface effects[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023. (in Chinese))
- [4] 保锐琴, 和贵祥, 黄广杰, 等. 土壤崩解研究进展[J]. 贵州农业科学, 2022, 50(1): 30-41. (BAO R Q, HE G X, HUANG G J, et al. Research progress on soil disintegration[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2022, 50(1): 30-41. (in Chinese))
- [5] 李喜安, 黄润秋, 彭建兵. 黄土崩解性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S1): 3207-3213. (LI X A, HUANG R Q, PENG J B. Experimental research on disintegration of loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 3207-3213. (in Chinese))
- [6] 高建伟, 余宏明, 钱玉智, 等. 重塑黄土崩解特性试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(10): 146-150,155. (GAO J W, YU H M, QIAN Y Z, et al. Experimental study on disintegration characteristics of remolded loess[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2014, 31(10): 146-150,155. (in Chinese))
- [7] 王健, 马璠, 张鹏辉, 等. 干湿交替对黄土崩解速度的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1273-1279. (WANG J, MA F, ZHANG P H, et al. Effect of wet-dry alternation on loess disintegration rate[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(6): 1273-1279. (in Chinese))
- [8] WANG J D, GU T F, ZHANG M S, et al. Experimental study of loess disintegration characteristics[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2019, 44(6): 1317-1329.
- [9] 朱皓轩. 粉煤灰和路液(Roadyes)改良黄土的崩解冲刷特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020. (ZHU H X. Study on disintegration and scourability of loess improved by fly ash and roadyes[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020. (in Chinese))
- [10] 苏悦, 闫楠, 白晓宇, 等. 预拌流态固化土的工程特性研究进展及应用[J]. 材料导报, 2024, 38(9): 23070212. (SU Y, YAN N, BAI X Y, et al. Research progress and application on engineering characteristics of ready-mixed fluid solidified soil[J]. Materials Reports, 2024, 38(9): 23070212. (in Chinese))
- [11] 高子琛. 预拌流态固化土的路用性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2023. (GAO Z C. Study on road performance of premixed fluid solidified soil[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023. (in Chinese))
- [12] 高强. 水泥基流态土固化剂的试验研究[J]. 中国建材科技, 2021, 30(4): 68-73. (GAO Q. Technology and application of cement-based fluidic soil curing agent[J]. China Building Materials Science & Technology, 2021, 30(4): 68-73. (in Chinese))
- [13] 刘丽娜, 高文生, 徐彤, 等. 预拌流态固化土强度特征及其模型研究[J]. 建筑科学, 2023, 39(9): 98-103. (LIU L N, GAO W S, XU T, et al. Study on strength

- characteristics and models of ready-mixed fluidized solidified soil[J]. *Building Science*, 2023, 39(9): 98-103. (in Chinese))
- [14] 任铁钺, 陈玉龙, 曲胜满, 等. 预拌流态固化土配合比设计及应用研究 [J]. *建筑技术*, 2024, 55(11): 1405-1407. (REN T Y, CHEN Y L, QU S M, et al. Study on mixing proportion design and application of ready-mixed fluidized stabilized soil[J]. *Architecture Technology*, 2024, 55(11): 1405-1407. (in Chinese))
- [15] 钟维军, 赵雅雯, 陈雪梅, 等. 矿渣基复合固化剂对预拌流态固化土力学强度的影响 [J]. *新型建筑材料*, 2023, 50(3): 46-50.
- [16] 朱龙祥, 范昊明, 马仁明. 冻融循环和土壤含水率对棕壤崩解特性的影响 [J]. *土壤学报*, 2023, 60(1): 77-88. (ZHU L X, FAN H M, MA R M. Effects of freeze-thaw cycles and soil water contents on disintegration characteristics of brown earth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60(1): 77-88. (in Chinese))
- [17] 赵雪, 谷天峰, 范楠楠. 水泥改良黄土崩解试验研究 [J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 2024, 54(1): 18-25. (ZHAO X, GU T F, FAN N N. Experimental study on disintegration of loess improved by cement[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 54(1): 18-25. (in Chinese))
- [18] 祝艳波, 李红飞, 巨之通, 等. 黄土抗剪强度与耐崩解性能综合改良试验研究 [J]. *煤田地质与勘探*, 2021, 49(4): 221-233. (ZHU Y B, LI H F, JU Z T, et al. Improvement of shear strength and anti-disintegration performance of compacted loess[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2021, 49(4): 221-233. (in Chinese))
- [19] 许天驰, 张浩男, 贾苍琴, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀改良黄土的崩解性试验研究 [J]. *硅酸盐通报*, 2023, 42(2): 674-681, 707. (XU T C, ZHANG H N, JIA C Q, et al. Experimental study on disintegration properties of microbially induced calcite precipitation modified loess[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 42(2): 674-681, 707. (in Chinese))
- [20] 李善梅, 吴孟, 蒙剑坪, 等. 压实度与初始含水率对红黏土崩解特性的影响 [J]. *河南科技大学学报 (自然科学版)*, 2021, 42(4): 54-59. (LI S M, WU M, MENG J P, et al. Effects of compactness and initial water content on disintegration characteristics of red clay[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science)*, 2021, 42(4): 54-59. (in Chinese))

收稿日期: 2024-10-08