

纤维加筋固化土抗冻性能试验研究

闫宁霞¹, 汪金龙²

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 湖南省怀化市水利电力勘测设计研究院, 湖南 怀化 418000)

摘要: 基于固化土抗冻性能较差导致其使用寿命下降的工程特性, 采用正交试验设计方法, 研究了聚酯纤维和土壤固化剂对土体冻融循环后质量损失率和强度损失率的影响。研究认为: MBER 土壤固化剂掺量为 9% 时, 质量损失率在 10 次循环后即超过 5%, 当固化剂掺量为 11% 或更大时, 质量损失率在 20 次循环后仍小于 5%, 纤维掺量对质量损失率影响较小; 当固化剂掺量为 13% 时, 纤维掺量为 $0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时, 强度损失率也达到最小值 28.51%。结果表明: 固化剂掺量对质量损失率和强度损失率影响都较大, 纤维掺量仅对强度损失率有一定影响。

关键词: 固化土; MBER 土壤固化剂; 聚酯纤维; 质量损失率; 强度损失率

中图分类号: TV443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7601(2013)06-0090-05

Experimental research on anti-freeze properties for the fiber reinforced solidified soil

YAN Ning-Xia¹, WANG Jin-long²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling Shanxi, 712100 China;

(2. Institute of Planning and Design for Water Resources and Hydropower, Huanhua, Hunan, 418000, China)

Abstract: Based on the engineering properties of poor anti-freeze performance of the solidified soil and led to decline the engineering life, adopted the orthogonal experimental design method, has researched the quality loss rate and strength loss rate for the soil which blended polyester fiber and stabilizer after freeze-thaw cycle. The research obtained that: When the MBER soil stabilizer content was 9%, the quality loss rate after 10 cycles was more than 5%, when the stabilizer content was 11% or higher, the quality loss rate after 20 cycles was less than 5%. But the fiber content had a small impact of the quality loss rate. When the stabilizer content was 13% and the fiber content was $0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, the strength loss rate has reached 28.51% which was the minimum. These results showed that: The stabilizer content had a large impact to the quality loss rate and strength loss rate, fiber content only had a certain impact to the intensity loss rate.

Keywords: solidified soil; MBER soil stabilizer; polyester fiber; quality loss rate; strength loss rate

土壤固化剂作为一种新型的土体固化材料近年在我国的应用越来越广,取得了良好的社会经济效益^[1],我国建设部也于 1998 年发布了土壤固化剂的行业标准(CJ/T3070—1998)。土壤固化剂在路基加固、堤坝防护、渠道防渗等方面得到的一些实际应用表明,在减少工程费用、提高路基强度、减少施工工期、增强土体稳定性等方面取得了一定的效果^[2-3]。目前,国内科研院所对土壤加固技术进行了大量研究,建材市场上也出现了不少我国自己开发研制的土壤加固剂。樊恒辉等^[4-5]研究了黄土理化性质的变化对固化黄土抗压强度的影响;王海龙等^[6]探讨了含沙量对固化土抗压强度的影响规律;

笔者借鉴聚丙烯纤维在混凝土中的桥接作用^[7],研究了纤维对固化土的增强作用^[8],王亚军等人^[9]的研究亦证明了这一点;周炜等^[10]探讨了纤维掺量对固化土抗渗性的影响。上述研究主要集中在固化剂加固土体的抗压强度和抗渗性能上面,而对固化土体中掺入纤维后抗冻性能的研究尚未见报道。

由于固化土的干缩特性使得土体易产生裂缝^[11],导致强度降低,抗渗和抗冻性较差,对其在寒冷地区的应用造成一定的限制。因此,如何提高固化土体的抗冻性能对于土壤固化剂的推广应用具有很强的实践意义。为此,本文开展了固化土掺入纤维后抗冻性能的变化研究,为今后纤维固化土耐久

性研究和工程应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验用土选用陕西关中地区的黄土,其流限 $W_L = 35.0\%$,塑限 $W_p = 17.3\%$,塑性指数 $I_p = 17.7$,在标准轻型击实条件下杨凌黄土固化土(固化剂掺量 12% 时)的最大干密度为 $1.722 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,最优含水率 18.5% ,固化剂采用 MBER 型土壤固化剂;聚酯纤维为白色、半透明、束状单丝 $L = 16 \text{ mm}$,抗拉强度 286 MPa ,密度 $0.9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,拉伸极限 12% ,不吸水,对皮肤无刺激。

1.2 试验方案

试验考查指标为质量损失率和强度损失率,其因素水平见表 1。

表 1 因素水平
Table 1 Factor level

因素 Factor	水平 Level			
固化剂掺量/% Stabilizer content	9	11	13	15
纤维掺量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) Fiber content	0.6	0.8	1.0	1.2

注:固化剂掺量是指固化剂质量和干土的质量之比。

Note: Curing agent content refers to the ratio of the curing agent quality and the quality of dry soil.

表 2 固化土质量损失率

Table 2 Quality loss rate of solided soil

试件编号 No.	质量损失率 Mass loss rate/%				
	1 次循环后 1 cycle	5 次循环后 5 cycles	10 次循环后 10 cycles	15 次循环后 15 cycles	20 次循环后 20 cycles
9-6	0.32	4.21	5.12	质量损失率大于 5%, 停止试验循环 Mass loss rate is more than 5%, stop the rest cycle	
9-8	0.42	4.00	5.05		
9-10	0.31	4.21	5.16		
9-12	0.31	3.78	5.16		
11-6	0.38	1.27	2.51	3.47	3.99
11-8	0.32	1.45	2.42	3.16	3.79
11-10	0.42	1.58	2.2	3.47	4.31
11-12	0.32	1.68	2.43	3.27	4.03
13-6	0.32	1.48	2.43	3.29	4.14
13-8	0.32	1.58	2.44	2.97	3.62
13-10	0.32	1.57	2.43	2.98	3.42
13-12	0.32	1.48	2.33	3.07	3.62
15-6	0.31	1.57	2.32	3.15	3.78
15-8	0.31	1.57	2.41	3.25	3.88
15-10	0.32	1.36	2.41	2.84	3.47
15-12	0.32	1.58	2.1	3.05	3.37

注:试件编号 9-6,9 代表固化剂掺量为 9% ,6 代表纤维掺量为 $0.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,其余含义类似。

Note: Specimen No.9-6, 9 refers to the curing agent content is 9% , 6 refers to the fiber content is $0.6 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. The rest have similar meanings.

1.3 试验方法

将固化土混合料的含水率控制在其最优含水率 18.5% 左右,在 $\Phi 100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 的智能压膜器和脱膜器上完成试件的制作。制作完毕后,将其放入养护箱中进行养护,养护温度为 $20^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$,相对湿度控制在 $98\% \pm 2\%$ 。养护至 28 d 后,开始进行冻融试验。其中每个不同组合下试件的个数为 6 个,3 个用来进行冻融试验,称为检验试件,另外 3 个用来做对照试件。每个循环后记录下其质量损失率,当质量损失率超过 5% 时,停止冻融试验,测定试件的抗压强度值。如果 20 次循环后,试件的质量损失率仍小于 5% ,则亦停止试验,测定冻融试件和检验试件的抗压强度,计算其强度损失率,强度损失率按下式计算:

$$D_n = \frac{f_0 - f_n}{f_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中, D_n 试件经 n 次冻融循环试件后抗压强度的损失率; f_0 为对照试件抗压强度(MPa); f_n 为冻融试件的抗压强度(MPa)。

2 试验结果与分析

2.1 质量损失率

试验测定了每个循环的质量损失率,由于篇幅所限,仅选取其中部分循环次数时的试验结果,见表 2。

2.1.1 极差分析 根据表 2 中的试验结果,进行极差计算,其结果见表 3。

(1) 因素主次分析

由表 4 可见,影响质量损失率的因素顺序为:A(固化剂掺量)→B(纤维掺量)→A×B(固化剂和纤维交互作用),即固化剂的掺量对质量损失率影响最大,纤维掺量次之,固化剂和纤维交互作用最小,基本可以忽略。

(2) 因素主效应趋势分析

为了分析方便,将质量损失率随着试验因素水平变化的关系绘成趋势图,如图 1 和图 2 所示。

由图 1、图 2 可知,当纤维掺量在 0.6 ~ 1.2 kg·m⁻³间变化时,质量损失率的变化并没有明显的规律,质量损失率随着纤维掺量的变化曲线比较集

中,可见固化土质量损失率的变化和纤维掺量之间(纤维掺量在 0.6 ~ 1.2 kg·m⁻³)并不存在着明显的关系。由图 2 可以看出,固化剂掺量为 9% 的试件在冻融 10 个循环左右,其质量损失率就超过了 5%,因此,其显然不满足实际工程的需要,而固化剂掺量为 11%、13%、15% 的试件均在 20 次循环后质量损失率仍然小于 5%,可见固化剂掺量对固化土体的质量损失率有着十分重要的影响。

2.1.2 方差分析 通过极差分析可以看出,交互作用的影响很小,因此在进行分析时予以舍去。其方差分析结果如表 4 所示。

由表 4 可知,固化剂掺量对质量损失率的影响极为显著,而纤维掺量对质量损失率并没有明显的影响,这与极差分析的结果是一致的。

表 3 10 次循环后的质量损失率极差分析表

Table 3 Analysis of very poor quality loss rate after 10 cycles

试验号 No.	因素 Factor			10 次循环后的质量损失率/% After 10 cycles of quality loss rate
	A(固化剂掺量) A(stabilizer content)	B(纤维掺量) B(fiber content)	A × B	y_{ij}
1	1	1	1	4.63
2	1	2	2	5.05
3	1	3	3	5.16
4	1	4	4	5.05
5	2	1	2	2.42
6	2	2	3	2.20
7	2	3	1	2.43
8	2	4	4	2.43
9	3	1	2	2.44
10	3	2	4	2.43
11	3	3	1	2.33
12	3	4	3	2.32
13	4	1	2	2.41
14	4	2	4	2.41
15	4	3	3	2.10
16	4	4	1	2.31
y_{j1}	4.972	2.975	3.025	
y_{j2}	2.370	3.022	3.022	
y_{j3}	2.380	3.003	3.021	
y_{j4}	2.307	3.028	3.005	
R_j	2.665	0.052	0.020	
最优水平 Optimal level	A ₄	B ₁		$\sum y_i = 48.12$
主次因素 Primary & secondary factors	A(固化剂掺量) → B(纤维掺量) → A × B A(Curing agent content) → B(Fiber content) → A × B			
最优组合 Optimal combination	A ₄ B ₁			

表 4 10 次循环后的质量损失率方差分析表

Table 4 Variance analysis of the quality loss rate after 10 cycles

方差来源 Variance source	自由度 DOF	SS	MS	F	显著性 Significance
A	3	20.6056	6.8685	226.77	**
B	3	0.0068	0.0023	0.07	
误差 S_e	9	0.2726	0.0303		
合计 Total	15	20.8849		$F_{0.01}(3,9) = 6.99$	

注: ** 代表显著性水平为 0.01。下同。

Note: ** refers to the significance at 0.01. The same as below.

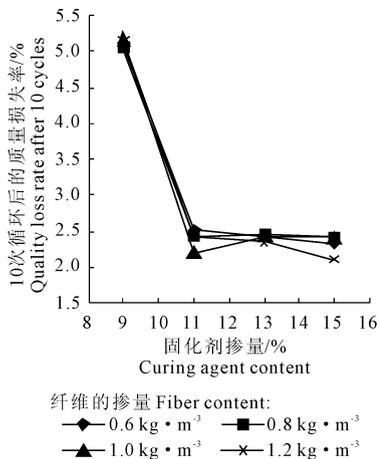


图 1 固化剂掺量与质量损失率的关系曲线

Fig.1 Relationship between the stabilizer content and quality loss rate

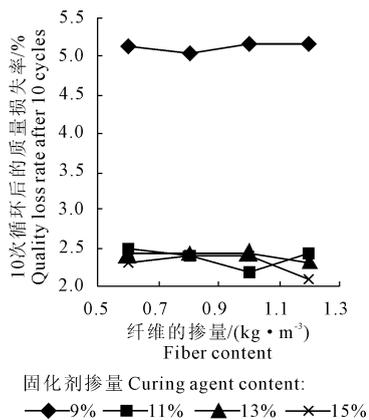


图 2 纤维掺量与质量损失率的关系曲线

Fig.2 Relationship between the fiber content and quality loss rate

2.1.3 回归分析 利用多元线性回归建立质量损失率与固化剂掺量和纤维掺量两因素之间的回归方程,回归系数的检验结果见表 5,方程显著性的检验结果见表 6。

$$Y_1 = 7.74 - 0.399A + 0.070B$$

式中, Y_1 为 10 次循环后的质量损失率(%); A 为固化剂掺量(%); B 为纤维掺量($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)。

表 5 回归系数表

Table 5 Regression coefficient table

自变量 Independent variables	系数 Coefficient	系数标准误差 Coefficient standard error	T 检验值 T Test	显著性 Significance
常量 Constant	7.736	1.341	5.77	0
A	-0.39925	0.08841	-4.52	0.001
B	0.07	0.8841	0.08	0.938

表 6 二元线性回归方程的方差分析

Table 6 Variance analysis of dual linear regression equation

方差来源 Variance source	自由度 DOF	SS	MS	F	显著性 Significance
回归 S_R	2	12.7560	6.3780	10.20	**
误差 S_E	13	8.1289	0.6253		
合计 Total	15	20.8849		$F_{0.01}(2,13) = 6.70$	

由上表可以看出,其检验结果十分显著,所以上述回归方程是有效的,说明了质量损失率与固化剂掺量和纤维掺量是相关的。

2.2 强度损失率分析

冻融循环 20 次时,强度损失率测定结果见表 7,为了比较直观地观察固化土的强度损失率与固化剂和纤维掺量之间的关系,图 3 和图 4 给出了其变化趋势。

表 7 固化土强度损失率

Table 7 The strength loss rate of solided soil

试件编号 No.	冻融后的强度平均值/MPa Average strength after freeze-thaw	原始强度的平均值/MPa Original average strength	强度损失率/% Strength loss rate
9-6	1.15	2.48	53.63
9-8	1.31	2.38	44.96
9-10	1.15	2.51	54.18
9-12	1.26	2.44	50.83
11-6	1.83	2.64	30.68
11-8	1.77	2.49	28.91
11-10	1.77	2.58	31.39
11-12	1.79	2.65	32.45
13-6	1.88	2.88	34.72
13-8	1.93	2.70	28.51
13-10	1.91	3.01	36.54
13-12	1.94	2.89	32.87
15-6	1.72	2.51	31.42
15-8	1.88	2.70	30.37
15-10	1.74	2.62	33.59
15-12	1.67	2.46	32.11

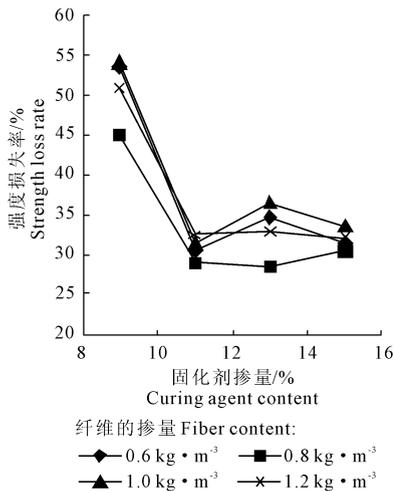


图 3 固化剂掺量与强度损失率的关系

Fig.3 The relationship between stabilizer content and strength loss rate

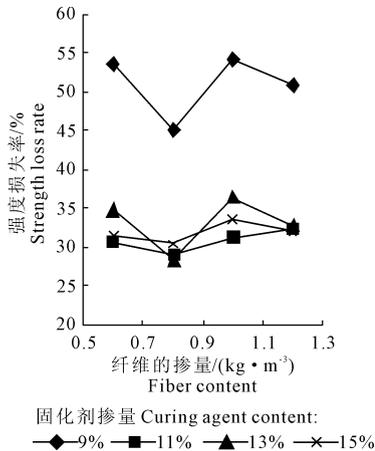


图 4 纤维掺量与强度损失率的关系曲线

Fig.4 The relationship between the fiber content and strength loss rate

由图 3 可以看出,当固化剂掺量为 11% 时,固化土体的强度损失率也达到了最小值,图 4 表明纤维掺量为 $0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,强度损失率达最小。可见,纤维的掺量和固化剂的掺量对固化土体的强度损失

率均有一定影响。为了保证一定的强度损失率要求,它们的掺量亦不宜过高。

3 结 语

1) 土壤固化剂的掺量对固化土体冻融循环后的质量损失率影响较大,当其掺量为 9% 时,10 次冻融循环后的质量损失率即大于 5%;而当掺量在 11% ~ 15% 之间时,其 20 次冻融循环后的质量损失率均小于 5%。聚酯纤维的掺量对固化土的质量损失率影响甚小。

2) 固化剂掺量为 11%、纤维掺量为 $0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,固化土的强度损失率达到最小。

3) 综合考虑质量损失率和强度损失率,最优固化剂掺量为 11% ~ 15%,纤维掺量为 $0.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

参 考 文 献:

- [1] 梁文泉,何真,李亚杰.土壤固化剂的性能及固化机理的研究[J].武汉水利电力大学学报,1995,28(6):675-679.
- [2] 葛立冬.土壤固化剂技术的应用[J].铁道标准设计,2000,20(5):5-8.
- [3] 谭文英,汪益敏,陈页开.土固化材料的研究现状[J].中外公路,2004,24(4):169-172.
- [4] 樊恒辉,高建恩,吴普特.土壤固化剂研究现状与展望[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(2):141-146.
- [5] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等.基于黄土物理化学性质变化的固化土强度影响因素分析[J].岩土力学,2011,32(7):1996-2000.
- [6] 王海龙,申向东,王萧萧.寒区水泥砂浆固化土力学特性试验研究[J].硅酸盐通报,2012,31(6):1539-1543.
- [7] 陈弘.聚丙烯纤维在混凝土抗裂中的应用[J].新型建筑材料,2002,(6):7-8.
- [8] 闫宁霞,姜宗科.掺纤维固化土强度变化的研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2006,34(8):146-148.
- [9] 王亚军,华苏东,姚晓.纤维补强增韧固化土的试验研究[J].非金属矿,2012,35(6):6-8.
- [10] 周炜,姜宗科,谭明.纤维固化土抗渗性试验研究[J].水资源与水工程学报,2008,19(6):96-98.
- [11] 柯结伟,庞有师,陈志勇.土壤固化剂技术研究与工程应用现状[J].华东公路,2007,(5):49-52.