

DOI: 10.11779/CJGE201508023

基于 SH 加固材料的土遗址夯土试样室内滴渗试验研究

谌文武^{1, 2}, 郭志谦^{1, 2}, 徐彦荣^{1, 2}, 陈鹏飞^{1, 2}, 张 帅^{1, 2}, 叶 飞^{1, 2}

(1. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 兰州大学土木工程与力学学院, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 表面严重风化是中国西北干旱地区土遗址的主要病害之一。目前解决防风化问题的主要方法是通过研制的防风化加固材料进行工程加固和修复, 然而防风化加固材料的研制尚无法满足实际工程的要求。系统研究了不同浓度 SH 滴渗夯土试样表面渗透半径和渗透速率的分布变化规律, 及渗透加固后试样波速和崩解性的变化。试验结果表明, 单孔最优注浆量为 30~40 mL, 此时滴渗时间约为 300 min, 最终表面渗透半径为 3~4 cm。渗透后试样波速升高, 抗崩解性能明显提高, 以 1.0%SH 渗透后最为明显。

关键词: 夯土; SH; 渗透性; 波速; 崩解

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)08-1517-07

作者简介: 谌文武(1966-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事地质工程、岩土工程、文物保护工程科研与教学工作。E-mail: sungp@lzu.edu.cn。

Laboratory tests on rammed earth samples of earthen sites instilled by reinforcement material SH

CHEN Wen-wu^{1, 2}, GUO Zhi-qian^{1, 2}, XU Yan-rong^{1, 2}, CHEN Peng-fei^{1, 2}, ZHANG Shuai^{1, 2}, YE Fei^{1, 2}

(1. Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou University, Ministry of Education, Lanzhou

730000, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The earthen sites in the northwest arid area of China are suffering from surface weathering heavily. Currently, the main way to solve the difficulty depends on the researches on anti-weathering materials and their engineering reinforcement and repair. However, the researches on anti-weathering materials cannot satisfy the practical engineering at present. The penetration diameter and the distribution and changing characteristics of penetration rate on the surface of the rammed samples are studied when they are instilled by different concentrations of SH as well as the change of wave velocity and the disintegration on the wall after penetration. The test results indicate that the optimal grouting capacity of a single hole is 30~40 mL, the instilling penetration at this time is about 300 min, and the final surface penetration radius is 3~4 cm. After instilled by SH, the wave velocity and the anti-disintegration of the samples obviously increase, especially for the 1.0% SH.

Key words: rammed earth; SH; penetration; wave velocity; disintegration

0 引 言

中国古丝绸之路, 遗留有大量夯土遗址, 如长城烽燧, 其修建历史悠久, 夯筑时间确定, 行经地域辽阔, 为历史、考古、地理、古地震、军事等学科的研究提供了极好的参考^[1]。其所承载的历史价值、艺术价值、科学价值和社会价值是自身所固有的, 是不可替代的^[2-3]。土遗址作为人类社会活动的产物, 是历史信息的载体, 一旦破坏, 将不可再造^[4]。

表面严重风化是中国西北干旱地区土遗址的主要病害之一, 而其防风化加固一直是文物界的难题, 目前国内外研究的重点在于防风化加固材料的研究^[5]。防风化加固材料的应用面临两个关键的问题, 一是材料, 即材料本身的特性能否满足土遗址保护的要求;

二是施工工艺, 即材料的施工工艺是否简单可行、科学规范, 并能否达到大面积推广使用的要求^[3]。

进入“十一五”中后期, 国家对文化事业的巨大投入, 使得土遗址的保护工作取得了长足的进展, 有关土遗址病害发育机理和保护对策的研究吸引了众多学者的目光。王旭东等通过对西夏王陵 3 号陵的保护研究, 初步分析了夯土的物理、力学性质^[3]; 赵海英等对甘肃境内部分秦长城、汉长城遗址的夯土展开了较为全面的工程地质特性研究^[6]; 孙满利等通过对多

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAK01B01); 国家科技支撑计划项目(2010BAK67B16)

收稿日期: 2014-10-28

*通讯作者

处于干旱区土遗址展开的研究,初步建立土遗址的病害分类体系和总结了病害发育机理^[7-8];崔凯等提出了干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀耗能效应理论^[9];其它学者也通过试验确定 PS 材料加固土遗址的效果及其作用机理,并且在工程中取得良好的加固效果^[10-13]。然而,土遗址是一个复杂开放而特殊变化的系统,是不断接受环境直接改造的特殊岩土体,必须研制更适合的材料对其实施科学而合理有效的保护。

通过野外调查和已有工程实践表明,土遗址表面的强风化层厚度可达到 3~5 cm,采用常规的喷洒方式无法达到足够的加固深度,故采用钻孔滴渗的方式进行试验,研究高分子新材料 SH 对土遗址加固的适用性。系统研究了不同浓度 SH 滴渗夯土试样表面渗透半径和渗透速率的分布变化规律,及渗透加固后试样波速和崩解性的变化。

1 土遗址保护材料

土遗址是遗址文物中最难保存的一类文物。对于土质文物,由于土本身易在水中崩解、松散,力学强度极低,时刻都遭受水、风和可溶盐的侵蚀破坏。特别是那些幸存在西北戈壁滩上的土遗址,常年遭受风蚀和暴雨冲刷的严重破坏。因此,对土遗址的抢救保护,是中国文物工作者一项十分艰巨的任务^[14]。

土遗址作为文物,有其特殊性,根据“保持原貌,修旧如旧”的保护原则,土遗址保护材料的选用和研制需具备一些特殊要求^[15-16]。目前,用于土遗址防风化加固的材料类型较多,按化学成分分为无机材料、有机材料和有机-无机杂化材料三大类^[16]。

本试验所用的新材料 SH 是兰州大学依据国家 863 课题“固沙植被用新材料及低成本制备技术”所研制出低成本的固沙材料,具有良好的物理、力学性能。

SH 为液体状的改性聚乙烯醇,固含量为 6%,遇水可无限稀释,固化后不再溶于水,分子量在 20000 左右,密度为 1.09 g/cm^3 ,外观为透明的无色水溶液,黏度不大,适宜喷洒,已在室内外试验中不断完善其固沙性能^[17-18]。王银梅等研究探讨了 SH 加固黄土后强度变化及作用机理^[19],柴寿喜等研究了 SH 加固滨海盐渍土后其物理力学性能变化^[20]。鉴于以上研究,尝试将 SH 应用于土遗址防风化加固,研究其在土遗址中的滴渗性能和渗透加固后波速及崩解性的变化。

2 滴渗试验研究

2.1 试样制备及基本性质

试验所用天然原状夯土试样取于山丹县明长城新河镇段,此处夯土可作为西北地区夯土遗址的典型代表,保存完整,数量较多。参考美国 ASTM 有关水泥

土规程及中国土工和水工混凝土试验规程,并结合前期初步试验结果,通过现场切割,室内细磨将试块制成 $10.0 \text{ cm} \times 10.0 \text{ cm} \times 10.0 \text{ cm}$ 立方体。

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—1999)、《土工试验规程》(SL237—1999)和《公路土工试验规程》(JTJ051—93)进行土的基本性质试验,夯土试样性质:含水率为 2.55%,天然密度为 1.538 g/cm^3 ,比重为 2.72,液限为 30.07%,塑限为 18.80%,塑性指数为 11.27%,土类别为粉质黏土,崩解速度为 15.31 g/min 。

2.2 试验原理

根据溶液在土体中的渗透理论,为确保 SH 溶液渗透的完整性,并结合现场施工方法,采取在试样中部钻注浆孔,采用注浆孔从试样内部向外部无压自由渗透的方法。通过试样表面渗透半径的大小和渗透时间来确定材料渗透性。

2.3 试验方案

试验分为 9 组,前 8 组分别滴渗浓度为 0.1%, 0.3%, 0.5%, 0.7%, 0.9%, 1.0%, 1.3% 和 1.5% 的 SH 溶液;每组设置 5 块试样,分别注入 10, 20, 30, 40 和 50 mL SH 溶液。第 9 组为对照组,设置 2 块样,未滴渗任何材料。

试验所用 SH 溶液采用浓度为 5% 的 SH 原液配制。试验前,确定试样初始顶底面,在试样顶面中心钻成直径约为 5 mm,深度为 5 cm 的注浆孔,然后将渗透材料通过注浆管进行连续渗透,同时记录渗透时间和测量表面渗透半径,试验过程如图 1~3 所示。



图 1 钻孔

Fig. 1 Drilling



图 2 滴渗

Fig. 2 Instilling

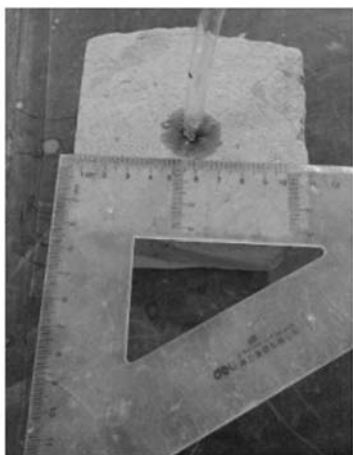


图 3 渗透半径测量

Fig. 3 Penetration radius survey

2.4 试验结果及分析

(1) 渗透半径与注浆量关系

土遗址防风化加固主要是针对表面风化层的加固,理想加固效果以渗透材料渗透超越未风化层 2~3 cm 的深度为宜。对于滴渗,因其渗透深度可人为控制(控制钻孔深度),较容易超过风化层,故单孔渗透范围是关键,本文以渗透半径进行评价^[21]。渗透半径和注浆量的关系见图 4, 5。

渗透半径的变化与注浆量和注浆浓度相关。由图 4, 5 可知,不同浓度 SH 渗透试样后,试样表面渗透半径随注浆量的增大而相应增加,其关系可表示为

$$y = \frac{x}{a \cdot x + b}, \quad (1)$$

式中, a , b 为拟合参数。

当注浆量大于 30~40 mL 时,渗透半径增加速率明显减缓,渗透半径相对增加量虽有一定的波动,但波动幅度不大,说明渗透半径已趋于稳定,主要集中于 3.0~4.0 cm,继续增加注浆量时对实际工程意义不大。

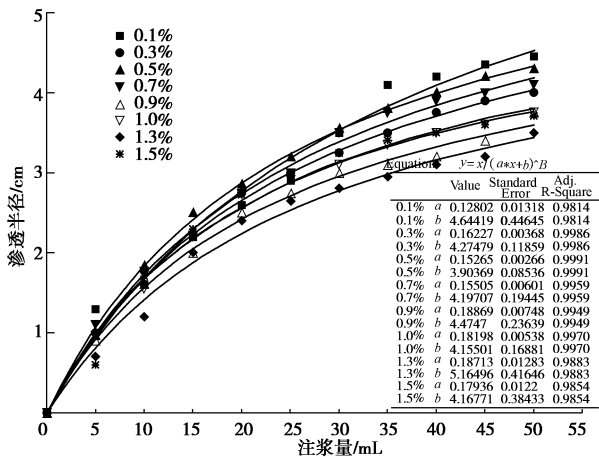


图 4 渗透半径与注浆量关系图

Fig. 4 Relation between penetration radius and grouting capacity

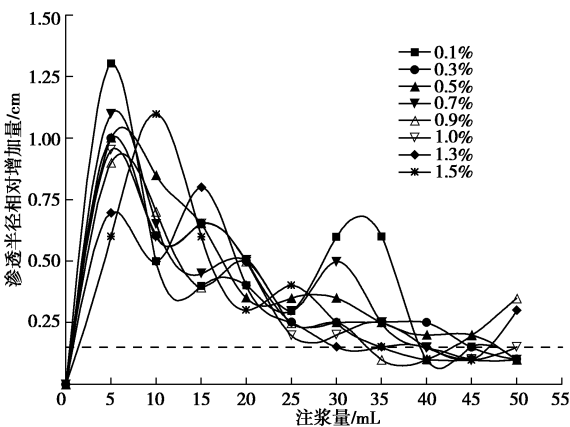


图 5 渗透半径相对增加量与注浆量关系图

Fig. 5 Relation between relative increase in penetration radius and grouting capacity

(2) 渗透时间与注浆量关系

渗透时间是决定材料渗透性的一个重要指标,也是决定材料是否适用的一个主要考虑因素。渗透时间和注浆量关系如图 6 所示。

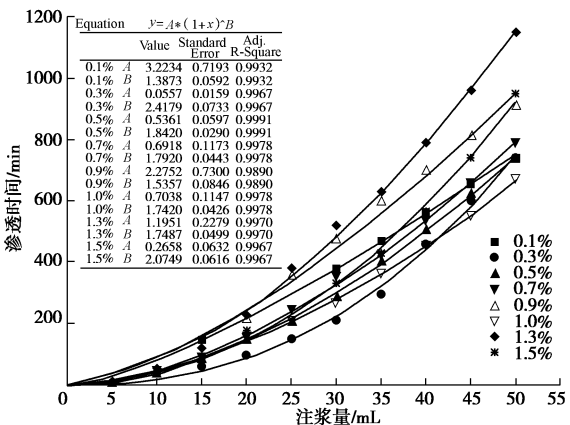


图 6 渗透时间与注浆量关系图

Fig. 6 Relation between penetration time and grouting capacity

渗透时间的变化与注浆量和注浆浓度也密切相关。由图 6 可知,随着注浆量的增加,各浓度 SH 的渗透时间也随之增加,其关系可表示为

$$y = A \cdot (1 + x)^B, \quad (2)$$

式中, A , B 为拟合参数。

当注浆量大于 30~40 mL 以后,不同浓度 SH 材料渗透时间差异增大,此时渗透时间为 300~400 min。随着 SH 浓度的增大,相同注浆量时渗透时间逐渐增加。特别是注浆量大于 30~40 mL 以后,渗透时间急速增长,即增大渗透半径需要更长的渗透时间。

(3) 渗透半径与渗透时间关系

对于土遗址防风化加固来说,加固材料的渗透加固范围至关重要,同时,渗透加固所需的时间也不可忽视。渗透半径与渗透时间关系如图 7 所示。

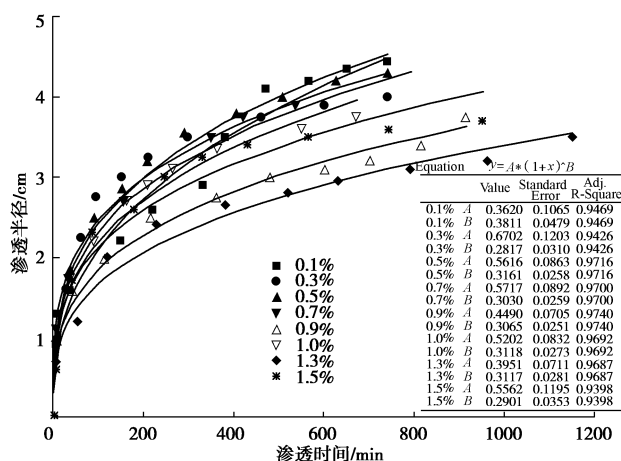


图7 渗透半径与渗透时间关系图

Fig. 7 Relation between penetration radius and penetration time

由图7可知,当渗透时间大于300 min以后,渗透半径随渗透时间的增加较小,继续渗透对渗透范围的增加微乎其微。因此,可选择300 min作为最优加固时间,既能节约时间,也能达到加固效果,此时可达到的渗透半径为3.0 cm左右。

(4) 渗透速率与注浆量关系

渗透性是评价防风化加固材料的一个重要指标,其渗透性能的高低,直接决定材料的适用性。为便于试验数据分析和渗透性的表示,本文引用渗透速率的概念来表示SH材料在单位时间内表面渗透半径的增加量:

$$v = \frac{r}{t}, \quad (3)$$

式中, v 为渗透速率 (cm/min), r 为渗透半径 (cm), t 为渗透时间 (min)。

v 数值越大,表示材料渗透性越强,在试样中渗透更快,反之亦然。渗透速率与注浆量关系见图8。

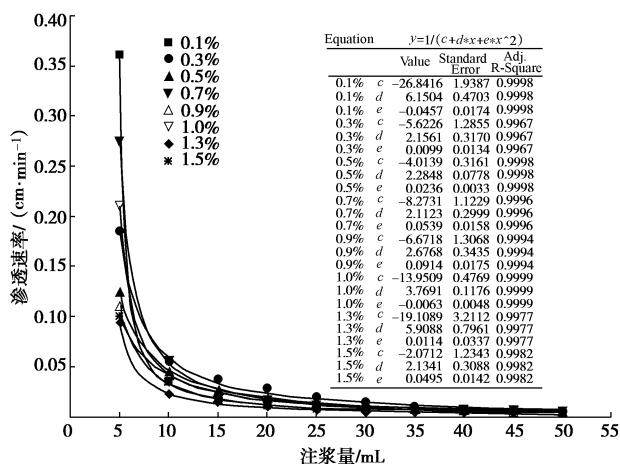


图8 渗透速率与注浆量关系图

Fig. 8 Relation between penetration rate and grouting capacity

由于试样之间存在一定密度差异,对渗透速率对比有一定影响。为消除密度差异带来的影响,将对渗透速率进行修正:

$$v_m = \frac{v \cdot \rho}{I}, \quad (4)$$

式中, v_m 为修正渗透速率 (cm/min), 用以表征不同浓度SH的渗透性能, v 为渗透速率 (cm/min), ρ 为对应试样密度 (g/cm^3), I 为单位密度 1 (g/cm^3)。

由图8,9可知,随着注浆量的增加,渗透速率逐渐降低,其关系可表示为

$$y = \frac{1}{c + dx + ex^2}, \quad (5)$$

式中, c , d , e 为拟合参数。

当注浆量大于30~40 mL以后,此时随着注浆量的增加,渗透速率减小较为缓慢,逐渐稳定于0.0075 cm/min左右,且不同浓度SH之间渗透速率差异较小。

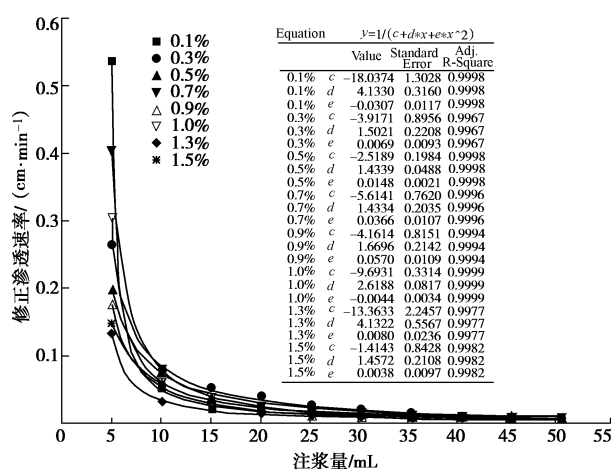


图9 修正渗透速率与注浆量关系图

Fig. 9 Relation between modified penetration rate and grouting capacity

(5) 渗透剖面

渗透加固以后,试样外观上显示为一近似圆形渗透范围,其内部渗透剖面如图10所示。

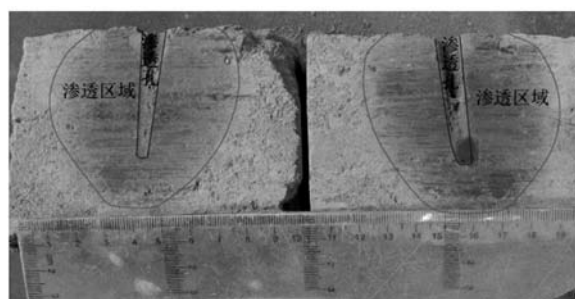


图10 渗透剖面图

Fig. 10 Profile of penetration

通过测量图10可知,试样渗透剖面并非规则,而近似“水桶”状,中间大,两头小。因此,在现场防风化加固时,只要表面渗透半径相互接触,则遗址体内已完全渗透;同时保证注浆孔穿过表层风化层,则渗透深度即可满足防风化加固要求。

根据以上渗透试验分析可知,当注浆量大于 30~40 mL 以后,各浓度 SH 渗透半径和渗透时间之间差异较大,而渗透速率相差无几,基本趋于稳定。因此,对与试样相近的土遗址进行加固时,单孔注浆量可采用 30~40 mL,注浆时间约为 300 min,可达到 3.0~4.0 cm 的加固范围。

3 声波测速试验研究

介质弹性波速是反映介质物理力学状态的一个综合性指标:波速高,说明介质弹性强、力学强度高;波速低,反映介质弹性差,力学强度低。因此,通过测定块体的波速即可获知块体内部的强度状态^[22]。

3.1 试验仪器

为测试试样在注浆前后波速的变化规律,采用武汉中岩科技有限公司生产的 RSM-SY5 (T) 非金属声波检测仪进行波速测试。

3.2 测试方法

由于试样为正方体,且表面比较平整,所以采用对测方法测其纵波波速。声波仪发射频率 50 kHz,接收频率 50 kHz,采样间隔 1 μs,每个测试部位测试 3 次,仪器自动判读初至波并求其波速平均值。

3.3 试验结果及分析

注浆前测试试样纵波波速,注浆后立即测其波速,然后放置于室内,常温无措施养护 20 d,每天测其波速直至养护期结束。试验结果如图 11, 12 所示。

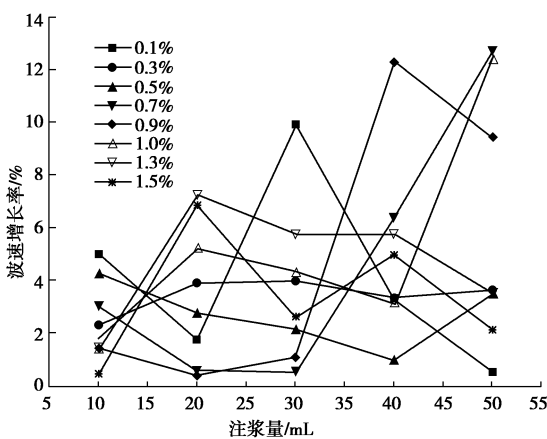


图 11 各试样波速增长率
Fig. 11 Growth rates of wave velocity of samples

由图 11, 12 可知,试样波速增长率与浆液浓度和注浆量密切相关。不同浓度和不同注浆量的 SH 材料滴渗后,试样的波速增长率差异较明显。当注浆量为 20~40 mL 时,波速增长率较高,且随着浆液浓度的增大而增长率增高,最高可大 12.70%;当浆液浓度为 0.7%~1.3%时,试样波速平均增长率较高,且相互之间差别不大,以浓度为 1.0%时值最大。

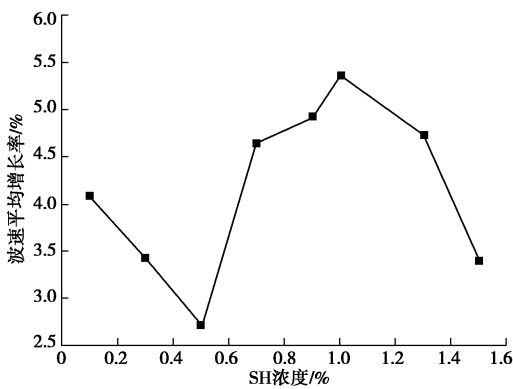


图 12 不同浓度 SH 试样波速平均增长率
Fig. 12 Average growth rates of wave velocity under different concentrations of SH

根据以上分析,当注浆浓度为 1.0%,注浆量为 20~40 mL 时,试样的波速增长率最大,此浆液可尝试用于与试样相近的土遗址防风化加固。

4 崩解试验

土的崩解是指黏性土由于浸水后而发生碎裂、散体的现象。崩解是由于土体浸入水中后,由于水进入孔隙中的情况不均匀,引起粒间扩散层增厚的速度不平衡,致使土粒间斥力超过吸力产生应力集中情况,使土体沿着斥力超过吸力最大的面塌落下来^[23]。

借鉴前人的研究,采取定性描述和定量计算方法,即将测量质量后的规则土样浸入静水中,观察并描述试样在静水中的崩解反应,记录试样完全崩解时所需时间,即为崩解时间,然后将试样质量比崩解时间即可求得其崩解速率 (g/min)。

根据渗透试验的分组,结合崩解试验的实际情况,选择部分试样进行试验,试验结果如表 1 所示。

表 1 崩解试验结果

Table 1 Results of disintegration tests					
试样 编号	崩解速率/(g·min ⁻¹)		试样 编号	崩解速率/(g·min ⁻¹)	
	渗透前	渗透后		渗透前	渗透后
4-4	13.94	10.16	6-5	17.52	7.38
4-5	18.63	11.85	7-4	17.47	3.92
5-4	13.34	11.37	7-5	16.62	6.28
5-5	10.61	6.04	8-4	12.97	9.29
6-4	9.74	5.77	8-5	22.26	13.77

由表 1 可知,经 SH 渗透加固后试样的崩解速率有明显降低,即其抗崩解性能提升。同时,对于浆液浓度相同的试样,随着注浆量的增加,其抗崩解性能越高;对于注浆量相同的试样,随着注浆浓度的增大,其抗崩解性能也随之提高。加固前试样的平均崩解速率为 15.31 g/min,加固后达到 8.58 g/min,抗崩解性能提升了 42.63%。

以 0.9%SH 试样为例,崩解过程如图 13 所示。图中 1, 3 为未加固试样, 2 为滴渗 40 mL, 0.9%SH 试样, 4 为滴渗 50 mL, 0.9%SH 试样。

由图 13 可知,当试样浸入水中,未加固试样迅速冒出大量气泡;浸入水中 30 s 后,未加固试样四周出现裂隙和少量坍塌,而加固的试样依然完好;90 s 后,未加固试样已完全破坏,而加固试样出现大面积坍塌。由此可以看出,经 SH 加固后的试样其水理性能有所改善,抗崩解性能明显提升。

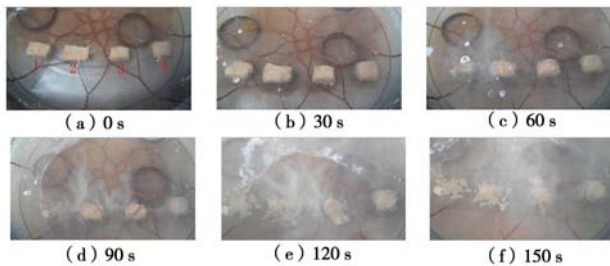


图 13 崩解试验过程

Fig. 13 Process of disintegration tests

5 结论与建议

从文中对不同浓度 SH 滴渗夯土试样表面渗透半径和渗透速率的分布变化规律,及渗透加固后试样波速和崩解性的变化结果分析,可得出以下 6 点结论。

(1) 选择中国西北地区典型夯土试样进行试验,试验结果具有一定得代表性和参考性。

(2) 采用 SH 对与试样相近的土遗址进行加固时,单孔最优注浆量可取 30~40 mL,此时注浆时间约为 300 min,表面渗透半径可达到 3.0~4.0 cm。

(3) 经滴渗加固后,试样内部渗透区域呈“水桶”状。因此,在现场防风化加固时,若相邻注浆孔表面渗透半径相互接触,则遗址体内部已完全渗透。同时保证注浆孔穿过风化层,则渗透深度即可满足防风化加固要求,此方法可作为防风化加固施工控制指标。

(4) 经过 SH 材料渗透加固后,试样波速有所增高。当注浆量为 30~40 mL,浆液浓度为 1.0%时波速增长率最高,可达 12.70%。

(5) 加固前试样的平均崩解速率为 15.31 g/min,经 SH 材料渗透加固后达到 8.58 g/min,试样抗崩解性能明显提高,平均提升了 42.63%。

(6) 滴渗性能是评价土遗址防风化加固材料极其重要的指标之一,但是对于一种新材料能否应用于工程实践,还需进行科学、系统、详尽的室内试验和现场试验。

参考文献:

[1] 李最雄,赵海英,韩文峰,等. 甘肃境内长城保护研究[J].

敦煌研究, 2006, 100(6): 219 - 228. (LI Zui-xiong, ZHAO Hai-ying, HAN Wen-feng, et al. Study on conservating the Great Wall in Gansu province[J]. Dunhuang Research, 2006, 100(6): 219 - 228. (in Chinese))

[2] LI Zui-xiong, WANG Xu-dong, SUN Man-li, et al. Conservation of Jiaohe ancient earthen site in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2011, 3(3): 270 - 281.

[3] 王旭东. 中国西北干旱环境下石窟和土遗址保护加固研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2003. (WANG Xu-dong. The Conservation and Consolidation of the Grottoes and the Earthen Architecture Sites in the Arid Region of Northwestern China[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2003. (in Chinese))

[4] 赵海英, 李最雄, 韩文峰, 等. 西北干旱区土遗址的主要病害及成因[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊 2): 2875 - 2880. (ZHAO Hai-ying, LI Zui-xiong, HAN Wen-feng, et al. Main diseases and their causes of earthen ruins in arid region of northwestern China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(S2): 2875 - 2880. (in Chinese))

[5] 周双林. 土遗址防风化保护概况[J]. 中原文物, 2003(6): 78 - 83. (ZHOU Shuang-lin. Preliminary discussion on earthen sites anti-weathering protection[J]. Cultural Relics of Central China, 2003(6): 78 - 83. (in Chinese))

[6] 赵海英. 甘肃境内战国秦长城和汉长城保护研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2005. (ZHAO Hai-ying. Study on conservating the Great Wall of the Qin Dynasty at the Waring States Period and the Han Dynasty in Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2005. (in Chinese))

[7] 孙满利. 土遗址保护初论[M]. 北京: 科学出版社, 2011. (SUN Man-li. Preliminary discussion on earthen sites protection[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))

[8] 孙满利, 王旭东, 李最雄, 等. 交河故城的裂隙特征研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 612 - 617. (SUN Man-li, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong, et al. Study on cranny characteristics of the ruins of Jiaohe[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 29(4): 612 - 617. (in Chinese))

[9] 崔凯, 谌文武, 韩琳, 等. 干旱区土遗址掏蚀区土盐渍劣化与风蚀耗能效应[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(9): 1412 - 1418. (CUI Kai, CHEN Wen-wu, HAN Lin, et al. Effects of salinized deterioration and aeolian ullage on soils in undercutting area of earthen ruins in arid region[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(9): 1412 - 1418. (in Chinese))

- [10] 苏伯民, 李最雄, 胡之德. PS 与土遗址作用机理的初步探讨[J]. 敦煌研究, 2000(1): 30 - 35. (SU Bo-min, LI Zui-xiong, HU Zhi-de. Preliminary discussion on earthen sites and PS[J]. Dunhuang Research, 2000(1): 30 - 35. (in Chinese))
- [11] 赵海英, 李最雄, 汪 稔, 等. PS 材料加固土遗址风蚀试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 392 - 396. (ZHAO Hai-ying, LI Zui-xiong, WANG Ren, et al. Wind erosion experiment of ancient earthen site consolidated by PS material[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(2): 392 - 396. (in Chinese))
- [12] 赵海英, 王旭东, 李最雄, 等. PS 材料模数、浓度对干旱区土建筑遗址加固效果的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 557 - 562. (ZHAO Hai-ying, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong, et al. Impact of modulus and concentration of potassium silicate material on consolidation earthen architecture sites arid region[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(3): 558 - 562. (in Chinese))
- [13] 和法国, 谌文武, 赵海英, 等. PS 材料加固遗址土试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(3): 1132 - 1138. (HE Fa-guo, CHEN Wen-wu, ZHAO Hai-ying, et al. Experimental research of PS reinforcing earthen architecture[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(3): 1132 - 1138. (in Chinese))
- [14] 中国文化遗产研究院. 中国文物保护与修复技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009. (Chinese Academy of Cultural Heritage. Conservation and restoration techniques of Chinese cultural heritage[M]. Beijing: Science Press, 2009. (in Chinese))
- [15] 黄克忠. 岩土文物建筑的保护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (HUANG Ke-zhong. The conservation of geotechnical heritage architecture[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese))
- [16] 李小洁. 新型土遗址保护材料的制备、表征和应用[D]. 成都: 成都理工大学, 2007. (LI Xiao-jie. Preparation, performance study and application of a new consolidation material for earthen archaeological site[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [17] 和法国. 岩土工程加固新材料试验研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006: 34 - 51. (HE Fa-guo. Study on the experimentation of new reinforced materials in geotechnical engineering[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006: 34 - 51. (in Chinese))
- [18] 和法国, 谌文武, 韩文峰, 等. 高分子材料 SH 固沙性能与微结构相关性研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(12): 3803 - 3807. (HE Fa-guo, CHEN Wen-wu, HAN Wen-feng, et al. Correlation of microstructure indices and performance of sand solidified with polymer material SH[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(12): 3803 - 3807. (in Chinese))
- [19] 王银梅, 杨重存, 谌文武, 等. 新型高分子材料 SH 加固黄土强度及机理探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2554 - 2559. (WANG Yin-mei, YANG Zhong-cun, CHEN Wen-wu, et al. Strength characteristics and mechanism of loess solidified with new polymer material SH[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(14): 2554 - 2559. (in Chinese))
- [20] 覃银辉, 何 玮, 柴寿喜, 等. 滨海盐渍土固化后物理力学性能试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2007, 39(3): 408 - 413. (QIN Yin-hui, HE Wei, CHAI Shou-xi, et al. Experimental study on the physical and mechanical capability of solidified inshore saline soil[J]. Journal of Xi'an University Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2007, 39(3): 408 - 413. (in Chinese))
- [21] 张景科, 谌文武, 孙满利, 等. 不同浓度 PS 滴渗夯土墙表面渗透直径的分布规律[C]// 第十届全国岩石力学与工程学术大会论文集. 北京: 中国电力出版社, 2008: 437 - 443. (ZHANG Jing-ke, CHEN Wen-wu, SUN Man-li, et al. The permeability diameter distribution characteristic on the surface of the rammed wall instilled by different solution of PS[C]// Underground Engineering Branch. 10th National Rock Mechanics and Engineering Conference Proceedings. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 437 - 443. (in Chinese))
- [22] 李静坡. 岩土体弹性波速测试及岩土体波速与物理参数的相关性研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2005. (LI Jing-po. Test research on relationships between elastic wave velocities and physical parameters of rock and soil mass[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2005. (in Chinese))
- [23] 张 抒. 广州地区花岗岩残积土崩解特性研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2009. (ZHANG Shu. A study on disintegration behavior of granite residual soil in Guangzhou[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2009. (in Chinese))