

潮湿环境土遗址的 防水与加固保护研究

周 环 张秉坚 李最雄 王旭东

土遗址是一种保护难度较大的历史遗迹。由于土遗址往往暴露在室外又直接与大地相连,长年遭受到各种自然因素的侵蚀破坏,包括雨水冲刷和浸蚀、地震、风沙、微生物作用、盐结晶和冻融等,导致大多数土遗址都难以长期保持原状。在我国南方,雨水的冲刷和浸蚀是最重要的破坏因素。已经报道的我国土遗迹的保护研究和有关工程主要集中在西部地区,即气候相对干燥少雨地区,至今很少见到关于潮湿地区土遗迹保护的相关报道。

硅酸盐是土的主要成分, SiO_2 含量为 40%~60%, 硅以硅氧四面体结构存在, 土粒表面存在过剩的键价力。目前已报道的用于土遗迹加固保护的材料主要有 3 类, 分别是高模数的硅酸钾溶液(简称 PS)、甲基三氯硅烷为原料醇解后得到的有机硅氧烷预聚体(简称 TB)、常温自交联丙烯酸树脂非水分散体(简称 BC 或 BA)。但是这些材料对于潮湿环境的土遗迹难以发挥作用。

有机硅材料用于文物保护已有 30~50 年历史, 其中硅酸乙酯和聚硅氧烷类在实际应用中最为普遍, 其突出优点是具有较好的抗紫外线能力和透水汽性。另外, 硅酸乙酯对土和石头的渗透性好、不易被盐破坏、可提高基底的抗压强度; 而聚硅氧烷类防水性好, 不易被微生物侵蚀, 易于化学降解或者机械去除, 因而具有可逆性; 还有, 聚硅氧烷类的聚合可以水作为固化剂, 因而有可能利用和适宜于潮湿环境。所以我们考虑综合硅酸乙酯和聚硅氧烷两者的特性, 恰当地设计配方和聚合过程, 将其应用于潮湿环境土遗址的保护。

一、实验

1. 试剂与仪器：硅链数为 8 ~ 12 的短链羟基封端聚硅氧烷 (SCHTIPS) 基础聚合物；正硅酸乙酯；金属锡类催化剂 I 和 II；乙酸乙酯。

2. 样品制备

(1) 标准潮湿土样 (CS)：土取自良渚遗址区内距地面约 1m 深处，土黄色，弃去石块后称重，置烘箱 (100℃ ~ 105℃) 烘干再次称重，敲细，过 20 目筛。20 目以上的为泥，以下为砂，平均泥砂比例为 70 : 30 (7 次结果平均值)。为保证标准土样中砂颗粒的一致性，选用 20 ~ 60 目之间的砂制作土样。按比例 (圆柱体，泥：砂：水 = 70 : 30 : 25) 混合搅拌均匀，用 5.0 × 2.5cm (直径 × 高) 圆柱体模具脱模后制得湿样，称重后放入 100℃ ~ 105℃ 烘箱中，每间隔一定时间取出，迅速称重，直至土样至恒重，计算出不同烘干时间对应的土样的含水量，由此可制得 3 种具有不同潮湿度范围的土样。

(2) 野外实地：选取良渚遗址区内较为平整，且能作出立面的野外区域作为实验区。

3. 加固试验及性能测定

将土样以浸泡或从实验面滴加的方式使加固剂 (20g) 充分渗透，放置 2 ~ 5 周，至加固剂中的溶剂完全挥发，进行性能测试。

性能测定包括：(1) 外观：主要观察是否出现颜色加深以及裂纹等，并用 400 万像素单位数码照相机拍摄记录；(2) 防水性：测定滴水后的接触角 (JC2000A 静滴接触角仪)；(3) 加固程度：测量标准土样的抗压强度；(4) 渗透性：测定土样横断面不被滴加水所润湿的厚度，即渗透防水深度；(5) 耐水性：浸没在水槽中，观察记录在水中的变化。

二、结果与讨论

由烧杯实验确定基础聚合物 + 正硅酸乙酯与溶剂的最佳比为 3 : 7 (重量比)；催化剂用量为 0.01%。然后分别进行了 5 种 SCHTIPS 和正硅酸乙酯不同比例，2 种金属锡类催化剂 I 和 II，即十种配方 (RTV) 在 3 种不同潮湿度范围土样的实验。

1. 11.7% ~ 13.9% 含水量标准潮湿土样实验

如表 1 所示，土样使用 RTV - I 类的吸收量均大于 RTV - II 类，因为后者的固化时间短。同样，RTV - I 类的渗透防水深度也优于 RTV - II 类。对有机硅类材料来说，固化时间是一个重要指标，在很大程度上影响了其渗透到样品中的深度。数据说明固化时间越长，渗透越深入。正硅酸乙酯比例最低的 RTV - I - 5 和 RTV - II - 5 的抗压强度

都是最差的。从综合效果来看, RTV - I - 5 渗透最佳且强度稍增强; RTV - I - 3 明显改善强度且有一定的渗透能力。

表 1 加固处理标准潮湿土样 (含水量 11.7%~13.9%) 实验结果

样品编号	加固剂名称	加固剂吸收量 (g)	渗透防水深度 (cm)	抗压强度 (MPa)	接触角 (°)
1	RTV - I - 1	3.6	0.45	0.65	120
2	RTV - I - 2	3.1	1.00	0.65	120
3	RTV - I - 3	3.7	0.60	0.70	110
4	RTV - I - 4	4.9	0.55	0.50	125
5	RTV - I - 5	4.2	1.35	0.45	110
6	RTV - II - 1	1.9	0.25	0.60	120
7	RTV - II - 2	1.8	0.75	0.50	125
8	RTV - II - 3	2.0	0.55	0.60	125
9	RTV - II - 4	1.6	0.25	0.65	125
10	RTV - II - 5	2.7	0.50	0.40	125
11	Blank	-	-	0.40	-

注: RTV - I (II) - 1, RTV - I (II) - 2, RTV - I (II) - 3, RTV - I (II) - 4, RTV - I (II) - 5, SCHTPS: 正硅酸乙酯依次为 5:5, 6:4, 7:3, 8:2, 9:1。

2. 含水量 15.6%~16.2% 标准潮湿土样实验

从表 2 可以发现, 使用 RTV - I - 5 的土样其抗压强度和渗透防水深度都是最好的, 但如果只要求强度稍微增强, 可选择渗透也不错的 RTV - II - 5。

表 2 加固处理标准潮湿土样 (含水量 15.6%~16.2%) 实验结果

样品编号	加固剂名称	加固剂吸收量 (g)	渗透防水深度 (cm)	抗压强度 (MPa)	接触角 (°)
1	RTV - I - 1	2.6	0.50	0.50	110
2	RTV - I - 2	2.9	0.35	0.40	85
3	RTV - I - 3	2.7	0.25	0.40	90
4	RTV - I - 4	4.4	0.95	0.75	120
5	RTV - I - 5	5.0	1.00	0.80	100
6	RTV - II - 1	4.6	0.25	0.60	125
7	RTV - II - 2	3.1	0.70	0.65	125
8	RTV - II - 3	3.3	0.20	0.40	125
9	RTV - II - 4	3.1	0.25	0.40	125
10	RTV - II - 5	3.4	0.80	0.45	125
11	Blank	-	-	0.40	-

3. 含水量 21.0%~21.7% 标准潮湿土样实验

很明显地, 表 3 中的数据普遍小于表 1 和表 2 中相对应的数据, 这可能归因于土样含水量的增加阻碍了有机硅材料的进一步渗透。但是表 3 中最佳的抗压强度说明土样中

的水反而促进了有机硅网络结构的形成。从综合效果来看, RTV - II - 2 会明显改善强度且有一定的渗透能力, RTV - I - 4 的渗透能力最好。

表3 加固处理标准潮湿土样(含水量 21.0%~21.7%) 实验结果

样品编号	加固剂名称	加固剂吸收量 (g)	渗透防水深度 (cm)	抗压强度 (MPa)	接触角 (°)
1	RTV - I - 1	3.0	0.25	0.70	110
2	RTV - I - 2	1.4	0.15	0.80	110
3	RTV - I - 3	1.6	0.20	0.45	110
4	RTV - I - 4	2.7	0.90	0.80	110
5	RTV - I - 5	2.9	0.05	0.60	110
6	RTV - II - 1	1.0	0.25	0.50	135
7	RTV - II - 2	0.3	0.30	1.10	125
8	RTV - II - 3	0.6	0.20	0.60	125
9	RTV - II - 4	0.2	0.10	0.60	125
10	RTV - II - 5	0.7	0.35	0.60	125
11	Blank	-	-	0.40	-

4. 耐水性

由于土遇水膨胀的特性, 加固剂处理过的土样完全浸没在水中, 一般会出现 4 种情况。首先, 入水后立即崩解, 说明加固剂本身不防水; 其次, 入水后从表面某处脱粉、膨胀, 但其他部位短期内(几天)无变化, 说明加固剂本身防水, 但未完整渗透土样所有的外表面; 第三, 入水后短期内(几天)无变化, 渐渐产生裂纹, 但裂开后的各部分仍保持完好, 说明加固剂本身防水, 且完整渗透土样所有的外表面, 但未将土样完全渗透, 存在浓度突变区域。第四, 入水后长期(3 个月以上)保持完好。本实验土样用有机硅材料加固后到目前浸泡了 10 个月, 仅表现为后两种情况, 说明其具有突出的耐水性能。

5. 抗压强度

在表 3 中, 土样抗压强度增加了 0.1~1.7 倍, 其中, 使用 RTV - II - 2 的增加幅度最大。抗压强度的增加范围与文献结果一致, 而文献中 2 种丙烯酸树脂 B72 和 ACS 则分别增加了大约 3 倍和 4 倍。适度的强度增加会起到加固效果, 但明显的强度差反而会使被保护基底产生强度突变区, 在外力作用下很容易受到破坏。

6. 野外实地实验和外观

在良渚遗址范围选择野外较平整且有边坡立面的区域, 经过 4 次取样测得该区域表面土层平均含水量为 21.6%, 介于 21.0% - 21.7% 之间。根据 RTV - I - 4 和 RTV - II - 2 分别是本工作防水加固材料系列中最好的, 将其用于实地加固保护实验。由左至右依次选取 1m² 地面区域, 分别施加 RTV - I - 4 和 RTV - II - 2, 定时拍照对比。目前已经过 4 个月时间的日晒雨淋, 防水加固效果基本无变化。很明显的是下雨以后, 加固保护区域仍然保持

干燥,说明保护后的土壤有明显的防雨水冲淋作用;而在晴天时,无法用肉眼分辨出加固过的区域,说明本有机硅保护材料的使用并未改变原土层的外貌。

三、结论

从以上实验结果可得到:

由短链羟基封端聚有机硅氧烷、正硅酸乙酯、金属有机催化剂等组成的 RTV 有机硅类加固剂不含可能对土基质造成破坏的成分。被加固的土样不改变外观,具有良好的防水性和耐水性,有一定的加固作用,且渗透性强,是一种较好的具有保护性能的加固材料,可试用于潮湿土基质的表层加固和防水。

参考文献

- [1] 张宗仁、刘林学、刘致和、樊北平、张淑霞、李庆萍、李科友、曹发海:《古代土遗迹保护的试验》,西北大学学报,1990年第3期。
- [2] 李最雄、王旭东:《古代土建筑遗址保护加固研究的新进展》,《敦煌研究》,1997年第4期。
- [3] 苏伯民、李最雄、胡之德:《PS与土遗址作用激励的初步探讨》,《敦煌研究》,2000年第1期。
- [4] 李最雄、王旭东、张志军、周铁、何帆:《秦俑坑土遗址的加固试验》,《敦煌研究》,1998年第4期。
- [5] 李最雄、王旭东、郝利民:《室内土建筑遗址的加固试验——半坡土建筑遗址的加固试验》,《敦煌研究》,1998年第4期。
- [6] 李最雄:《PS加固土质石质文物的稳定性和强度问题》,《敦煌研究》,1996年第3期。
- [7] 李最雄、王旭东、田琳:《交河古城土建筑遗址的加固试验》,《敦煌研究》,1997年第3期。
- [8] 李最雄、张虎元、王旭东:《古代土建筑遗址的加固研究》,《敦煌研究》,1995年第3期。
- [9] 周双林、原思训、郭宝友:《几种常温自交联丙烯酸树脂非水分散体的制备》,北京大学学报(自然科学版),2001年第6期。
- [10] J. Delgado Rodrigues, Consolidation of decayed stones. A delicate problem with few practical solutions. P. Roca (Eds.), In: Historical constructions, P. B. Lorencó, 2001, pp. 3-14.
- [11] David Erhardt, Removal of silicone adhesives, Journal of the America institute for conservation, 1983, Vol. 22, No. 2. pp. 100-100.
- [12] A. E. Charola, A. Tucci, & R. J. Koestler, On the reversibility of treatments with acrylic/silicone resin mixtures, Journal of the America institute for conservation, 1986, Vol. 25, No. 2. pp. 83-92.
- [13] Reiner Mansch et al., Microbial colonization of silicone treated mortar at schloss weissenstein in pommersfelden/Germany, Contract ENV4-CT98-0707.

(作者单位:浙江大学 敦煌研究院)