

# 潮湿环境下的土遗址加固保护材料筛选试验研究 ——以福建昙石山遗址为例

王有为, 李国庆

(福建省昙石山遗址博物馆, 福建福州 350100)

**摘要:** 长期以来, 关于潮湿环境下土遗址加固保护的适用材料问题一直是困扰我国文物保护和考古界的难点, 至今尚没有成熟的规范可以参考。福建昙石山遗址作为我国东南沿海地区典型潮湿环境下的土遗址, 近年来在遗址本体加固保护过程中, 在加固材料的选取上, 按照基础成分的不同分别对四类主要加固剂进行施工试验, 通过大量的室内和现场局部试验, 证明基本成分为长链烷基、烷氧基硅氧烷小分子和主要成分为含有乙氧基团的聚硅酸乙酯混合物以及主要成分为水玻璃和硅氧烷共聚物的加固剂材料加固效果较好, 可用于潮湿环境下昙石山遗址的本体加固保护, 这对推进我国潮湿环境下土遗址保护工作的全面发展无疑也是一次有益的尝试和探索。

**关键词:** 潮湿环境; 昙石山遗址; 加固; 保护; 材料筛选

**中图分类号:** K854.3      **文献标识码:** A

## 0 引言

土遗址是指以土作为主要建筑材料的人类历史上生产、生活等各种活动遗留下来的古遗迹, 是一种重要的文物资源。我国常见的土遗址种类较多, 有墓葬、城址、城墙、建筑基址以及各种窑址等, 但从文物保护的角度来看, 土遗址通常可分两种: 一种是露天性土遗址, 如河南的郑韩故城、陕西的统万城、新疆的交河故城及高昌故城等; 另一种则是由考古发掘出来的土遗址, 如常见的车马坑、古墓葬、古窑址等。相对古建筑、器物等具体文物的保护, 土遗址的保护起步较晚, 国际上真正意义上的土遗址保护始于20世纪60年代, 而土遗址保护作为文物保护的一个重要分支, 由于受环境和社会影响非常大, 又涉及到多学科的交叉, 因此一直都是个世界性难题, 虽然很多国家都进行了大量研究, 但至今尚未形成完整的科学体系<sup>[1]</sup>。相对而言, 我国的土遗址保护工作起步更晚, 上世纪80年代末才开始在少数几个地方进行土遗址的科学保护研究试验<sup>[2]</sup>。虽然在广大文物保护工作者的不懈努力下, 至本世纪初我国的土遗址保护工作取得了长足进展, 所涉及的研究内容也越来越广泛, 某些方面甚至已达较高水平; 但是由于土遗址所面临的病害问题除了与其本身构成土质的性质有关外, 往往还与其所处地理位置、气候环境等外部因素密切相关, 长期以来关于潮湿环境下

土遗址的加固保护材料问题一直是困扰我国文物保护和考古界的难点, 尽管国内很多学者对此都有一定研究, 也取得了一些进展, 但总体而言, 这些技术和方法目前大都处于试验阶段, 尚未达到工程应用程度。

根据一般材料的分类方法, 土遗址加固材料主要分为有机类、无机类及复合材料三大类。首先, 在有机材料方面, 我国陕西师范大学与南京博物院文物保护研究所合作, 通过实验结果表明: 正硅酸乙酯预聚物加固后的土样各项性能都比较理想, 能满足土遗址保护的要求<sup>[3]</sup>。而北京大学周双林研制的BW系列加固剂——有机硅改性丙烯酸非水分散体系, 经过在多个土遗址实验, 证明该材料具有较好的防风化加固保护效果<sup>[4]</sup>。西安建筑科技大学则合成了多功能的有机硅改性丙烯酸乳液加固材料, 并利用FTIR等方法对合成材料进行了表征, 结果表明有机硅主要以共聚形式参与聚合<sup>[5]</sup>。陕西理工大学通过用新型建筑材料硅丙乳液加固陕西省榆林市榆林区明长城和汉长安城两处遗址试样, 结果表明硅丙乳液加固土体的无侧限抗压强度适当提高, 耐水性能和耐盐腐蚀性能明显改善, 可直接用于土遗址加固保护<sup>[6]</sup>; 西北工业大学和玲对偏氟聚合物加固土质文物的保护进行了研究, 通过对半坡遗址的加固实验表明15%~30%的氟带烷基多元共聚物在土质文物的加固保护中具有良好的性能<sup>[7]</sup>; 同时, 也有研究者通过试验证明氟硅改性材料能够满

足潮湿环境下土遗址保护材料的一般性能要求<sup>[8]</sup>。其次,在无机材料方面,主要是我国敦煌研究院研制出的PS加固材料,目前该材料已广泛应用于北方干旱地区的土遗址和砂岩的加固保护,而中国科学院地质与地球物理研究所王彦兵的研究则证明PS对潮湿地区的土遗址也具有一定的加固效果<sup>[9]</sup>。最后,在复合材料方面,同样由西安建筑科技大学研制而成的BS系列复合材料曾对高昌故城土样进行过室内加固实验,结果表明加固后土体能有效抵抗风蚀、雨蚀等因素对土遗址的破坏,有较好的加固效果,具有广阔的应用前景<sup>[10]</sup>。由成都理工大学与金沙遗址博物馆合作研制,采用自由基溶液共聚合和溶胶-凝胶法制备了丙烯酸-有机硅-环氧树脂三元体系的新型有机/无机杂化材料已应用于成都金沙遗址土样的加固,效果良好<sup>[11]</sup>。浙江大学周环等学者则采用由短链烷基封端聚硅氧烷、正硅酸乙酯、金属锡类催化剂等组成的RTV有机硅材料,证明应用于潮湿环境下土遗址时兼具加固剂和防水剂的特点,RTV材料可试用于潮湿环境土遗址的加固保护<sup>[12]</sup>。同时,周环、张秉坚、陈港泉等还通过选择PS、WD-10(十二烷基三甲氧基硅烷)、WD-S(低聚甲氧基硅烷)、RTV(聚有机硅氧烷+硅酸乙酯)4种保护材料对浙江良渚文化的塘山遗址进行了保护加固实验研究,结果表明RTV-1具有较好的加固和防水效果,且加样量越大,强度提高越多<sup>[13]</sup>。另外,浙江大学魏国峰通过对钙基液态水硬性加固剂的研制,对潮湿环境土遗址的加固保护进行了探索性研究,结果证明钙基水硬性加固剂对潮湿土样的加固效果较为明显,有望成为一种适合于潮湿环境土遗址加固的新型材料<sup>[14]</sup>;另外,南京博物院李克彪也发明了一种潮湿环境下土遗址异地保护加固方法,解决了遗址饱水环境和遗址基层不稳定状态下,安全实施搬迁保护工程的技术难题,为遗址、墓葬异地保护探索了新的技术方法<sup>[15]</sup>。

由于土遗址在我国西北干旱区分布广泛,对该地区土遗址防风化加固材料的研究起步也较早,所以,目前对该地区土遗址防风化加固材料的研究已经较为成熟,PS材料就是其中的典型代表。但是,对于我国南方潮湿地区的土遗址来说,由于其所在地区年降雨量大,高温高湿,土遗址大多保存较差,此方面的研究起步也相对较晚,大都尚处于实验室研究阶段。事实上,国外对潮湿环境下土遗址保护的研究案例也不多,主要是日本的一些工作,典型案例是日本国立文化财研究所对Yokohama遗址的保护<sup>[16]</sup>。显然,相对干燥土遗址的保护,潮湿环境下的土遗址保护难度更大,一些在干燥土遗址上适用

的加固保护材料,用到潮湿土遗址时就比较困难,甚至可能不再有效,如PS材料用在潮湿土遗址的保护中,就容易出现泛白现象<sup>[17]</sup>。从目前国内几个重要的潮湿环境下的土遗址,如从四川金沙遗址、湖南里耶遗址和城头山遗址以及浙江良渚遗址等的保护状况来看,病害情况都比较复杂,主要是潮湿环境下的土遗址容易产生软化坍塌、风化霉变等问题,而在干燥状态下又容易出现收缩开裂,以致严重影响潮湿环境下的土遗址保护工作的开展。

昙石山遗址位于福建东部沿海、闽侯县城近郊,福建最大河流——闽江下游北岸一处相对孤立的低缓小山丘上,东距福州市区约20公里,遗址面积约3万多m<sup>2</sup>。该遗址自1954年初被发现以来,迄今已先后进行了十次正式考古发掘,揭露面积共约2000m<sup>2</sup>,清理出新石器至商周时期墓葬89座、壕沟2条、陶窑12座、陶灶及大量灰坑遗迹,出土石、陶、骨、玉和牡蛎器等各类重要文物2000余件,综合这些文化遗迹和遗物等考古资料,可以反映出该遗址具有丰富的文化内涵和鲜明的地域海洋性文化特色<sup>[18]</sup>,以其为代表的“昙石山文化”,也是新中国成立后我国东南沿海地区最早被认定、最具代表性的原始文化之一。目前,遗址保护展示的是1996年昙石山遗址第八次考古发掘现场(图1),共有墓葬18座、壕沟2条(段),窑址5座和部分灰坑、祭祀遗迹。遗址所在地福建省闽侯县依山傍水,气候宜人,属亚热带季风暖湿气候,常年温暖湿润、雨量充沛、年均降水量为900~2100mm,年相对湿度约为77%。可见,该遗址属于典型的潮湿环境下的土遗址。近年来,昙石山遗址在本地加固保护过程中,通过大量的室内和现场局部试验,在适用材料的筛选研究、操作方法和步骤等方面都取得了一定的经验和成效,可以说是对我国潮湿环境下的土遗址保护工作的一次有益尝试和探索。



图1 昙石山遗址全景

Fig. 1 Panorama of Tanshishan Site

## 1 研究方法

### 1.1 病害分析

**1.1.1 土遗址矿物成分** 福建沿海地区土壤的主要粘土矿物成分为高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石和三水铝石等,其中又以高岭石、石英、蒙脱石和伊利石为主。以高岭石为主的土壤,结构松散、颗粒细小、比表面积大,具有很大的比表面能,对水分子和水中阳离子的吸附能力强,遇水后矿物产生层间滑动,使土体软化,导致凝聚力和抗剪强度降低。以蒙脱石和伊利石等强亲水性矿物为主的土壤被称为膨润土或胀缩土,具有显著的吸水膨胀和失水收缩两种变形特征。胀缩土在失水状态下,收缩率可达10%~35%;遇水后,发生明显膨胀,膨胀力达 $(0.5 \sim 3) \times 105\text{Pa}$ ,同时,凝聚力、内摩擦角、抗剪强度、承载力等将明显下降。在雨季,土体吸水膨胀;在旱季,土体失水收缩;这种过程反复进行,最终导致土体结构松散,地面开裂而形成地裂缝和地面不均匀沉降等环境灾害。

经X-射线衍射分析,昙石山土遗址的主要矿物组成有:高岭石40%,石英约40%,其余20%为钠蒙脱石、伊利石、钾长石等。根据对不同矿物成分土性能的分析,昙石山遗址区的土壤中高岭石和蒙脱石的含量均较高,遇水之后容易产生裂缝、沉降、坍塌。

**1.1.2 主要病害** 目前,昙石山遗址本体主要病

害有裂隙发育,局部土体开裂、风化,块状剥落,霉菌、地衣、苔藓等微生物滋生,局部边坡垮塌等,这些病害的存在对遗址的长期保存构成了较大威胁,尤其是局部开裂及崩塌,将直接导致历史信息的破坏和丢失,也将影响遗址的展示效果,降低遗址展示应有的社会效益。同时,遗址区局部地势低洼处还伴有间歇性渗水现象,水对遗址本体的破坏作用是致命的,并且也是其他一切破坏作用的媒介。一方面,土体内部水及水含量会直接降低土体强度;另一方面,水及蒸汽凝露在土体内,在毛细压力下移动,土粒遇水膨胀、脱水收缩、循环冰融膨胀等均能诱发土体结构性破坏;最后,水的毛细压力使可溶性盐向表面迁移,溶盐富集导致溶解膨胀—结晶收缩—再溶解—再结晶,循环作用致使土体结构受到破坏,在土体表层凝聚泛碱产生风化脱落。长此以往可使边坡强度降低,造成土体破坏、失稳甚至坍塌。

1) 墓葬壕沟的土壤病害。墓葬壕沟侧壁斜坡出现较严重的开裂、坍塌及青苔,其主要原因可能侧壁较高,故多处发生拉力破坏,若不及时处理,甚至会产生块体滑落等现象(图2)。同时,壕沟内不同部位出现不同程度的渗水现象(图3),由于地下水可与土遗址中的盐类矿物发生作用,使土体变得酥松,造成颗粒被冲刷流失或产生风化剥落。这不仅可使墓地侧面遭受破坏,而且还可使斜坡强度降低,造成土体破坏,以至失稳。



图2 侧壁开裂  
Fig. 2 Wall cracking

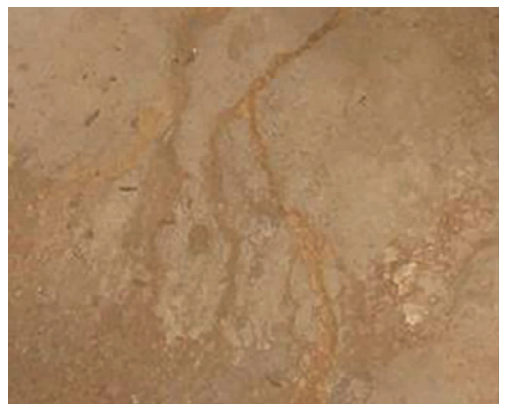


图3 表面渗水  
Fig. 3 Surface water seepage

2) 水出露点的土壤病害。遗址区局部青苔滋生,并出现土体剥落坍塌现象(图4)。造成这种现象的原因是展区外围雨水渗入,造成展区内土壤局部水出露点,使土壤松软,剥落,坍塌(图5)。同时,渗水点周围有一定高度的毛细水,其存

在将对土遗址产生一定的风化作用,当风化到一定程度时,就有可能使毛细水高度范围以内的岩体逐渐风化剥落,影响内部应力分布,最终影响土体的稳定性,而且遗址区水出露点常年处于浸湿状态,甚至枯水季节也有浸湿,长期下去,势必加

速其风化速度并造成破坏。

3) 土体龟裂。遗址区土体龟裂现象较严重(图6~7), 裂缝宽1~2cm, 深3~5cm, 呈放射状分布。土遗址本身由于应力作用会产生荷载裂隙, 这些荷



图4 青苔滋生  
Fig.4 Lichen breeding

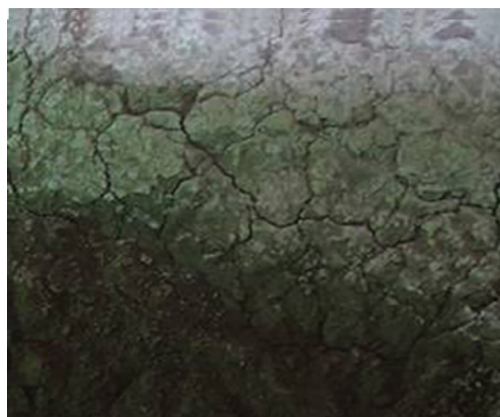


图6 墓葬区土壤裂缝  
Fig.6 Burial area soil crack

载裂隙与原有构造裂隙相互交叉, 将土遗址的土体切割成许多大小不等破碎块。在地震、风蚀、雨蚀等外部因素作用下, 破碎的土体将沿应力裂隙的断面剪切或拉断, 产生严重开裂直至坍塌。



图5 水出露点  
Fig.5 Water dew point out



图7 壕沟边缘土壤裂缝  
Fig.7 Ditch edge soil crack

## 1.2 室内加固保护试验

1.2.1 材料选取 针对昙石山遗址土体现场加固工程需要, 首先对遗址现场所取土样进行了前期加固试验研究, 并进行了物理、化学等性能测试, 同时选取土遗址加固保护材料, 进行性能对比和筛选。在遗址土体加固保护试验研究中, 对于加固材料的选取, 按照基础成分的不同主要分四类加固剂分别进行施工试验:

1) 硅氧烷为基础成分的渗透型加固剂。选用了4种加固剂和1种保护液。

(1) BYG1001 加固剂。基本成分为正硅酸乙酯及其低聚物, 无色透明, 高渗透性。遇水逸出乙醇后化学固化, 在岩体结构表面分子结合形成-Si-O-Si-化合键, 封固并强化土岩体表面层, 允许水蒸汽透过。加固剂处理后的岩面颜色同未处理岩面比

较无显著差别, 或在几周或几个月后应观察不到差别。

(2) BYG1002 加固剂。主要成分为含有乙氧基团的聚硅酸乙酯的混合物, 是一种低粘度的无色液体, 不溶于水, 可在酸或碱的活化下发生水解形成胶体。能与天然石材、玻璃、陶瓷和填料等多种无机矿物基材发生键合, 提高基材的化学稳定性、热稳定性和机械强度。

(3) BYG1008 加固剂。基本成分为长链烷基、烷氧基硅氧烷小分子, 双组分化学固化, 它可以和潮气反应形成硅胶状物质, 形成一种耐酸雨效果非常好的无机粘接剂, 结合牢固, 保护效果持久, 用于石头或其它建筑材料, 形成硅胶状物质, 以增强基材强度。

(4) BYG-0302 加固剂。基本成分为含羟基

硅氧烷,无色透明,高渗透性。双组分化学固化,在岩体结构表面分子结合形成 $-Si-O-Si-$ 化合键,形成高硬度的封护和强化层,具有憎水性低表面能,允许水蒸气透过,加固剂处理后的岩面颜色同未处理岩面比较无显著差别。

(5) BYB1002 岩石保护液。主要成分为氟改性硅氧烷,无色透明,单组分,溶剂型,低气味液体。渗透性强,防水性好,能有效防止外界液态水渗入岩体毛孔内,处理后对岩面不造成任何色差。

2) 无机钾盐为基础成分的渗透型加固剂。选用了2种加固剂。

(1) PS 材料。主要成分为高模数硅酸钾。它是一种土遗址保护用途的无机加固材料,低粘度,可再处理性好,能提高土遗址土体的抗风蚀能力及力学强度。可用于岩体裂隙灌浆和土体裂隙灌浆,加固效果良好。

(2) 无机-有机改性 BYG1009 加固剂。主要成分为水玻璃和硅氧烷共聚物,为无色、透明低粘度的水溶液,与土中的硅氧键发生作用后可以改变粘土的结构,使原来松散、晶态的粘土变成一种非晶态的胶凝体,大大提高土体的力学强度和耐水性能,减少土壤的流失。

3) 高分子为基础成分的加固剂。选用2种加固剂。

(1) 环氧树脂。A、B 组分,无色、透明,粘度较大,有良好的粘接效果。

(2) 聚氨酯材料。水性聚氨酯乳液,粘接力较好,无色、透明。

4) 其它处理剂。选用了2种。

(1) BY-401 杀藻处理剂。无色透明,单组分,溶剂型,低气味液体,能有效杀死青苔、地衣等孢子生物病害,处理后对土体不造成任何色差。

(2) BYB1007 抗藻岩石保护液。主要成分为氟硅烷与硅氧烷的混合物,能长久抑制藻类、青苔等的生长,避免微生物生长、代谢对岩石、砖瓦类文物的影响。

5) 辅助材料。采用清洗剂、溶剂、pH 试纸、抹布等。

**1.2.2 实验方法及操作步骤** 由于原状土密度变异较大,而且密度的变化会引起土的一系列工程性质变化,因而可能干扰和掩盖加固剂加固后对土的性质改良的判断,所以统一采用密度为 $1.87\text{g}/\text{cm}^3$ 的土样块做试样,使加固及未加固试样具有相同的初始状态和力学性质,以增强试验

结果的可比性。

试样的制备:采用从遗址区现场所取的原状土块,根据试验要求,用刀锯将其切割成一定尺寸的立方体试块,分别进行三次加固,加固后在室内放置一个月养护至自然风干后进行应用对比试验。

应用试验的施工方式:以滴注或连续喷洒三次加固剂的方式处理样块。

1) 主要试验设备仪器。(1) WE-30 型液压式万能材料试验机,(2) 南 55 型渗透仪,(3) QKL 型涂层抗裂性试验机,(4) 荷兰飞利浦 FEI 公司,Quanta 400 热场发射扫描电镜,(5) 紫外老化箱,(6) QFS-A 型涂层耐洗刷性测定仪,(7) 数码相机,(8) 游标卡尺、电子天平、保湿器、烘箱、注射针管、喷壶等。

2) 测试及表征。

(1) 空白试样及处理试样的无侧限抗压强度(参照标准 SL237-020-1999)加固方法采用滴注渗透,对土试样采取三次加固,加固后在室内养护一个月。采用 WE-30 型液压式万能材料试验机测其无侧限抗压强度。

(2) 空白试样及处理试样土体的渗透性(参照标准 SL237-014-1999),先按设计密度 $1.87\text{g}/\text{cm}^3$ 称好土重,再掺入一定量的加固剂拌和均匀,装入环刀,放置室内自然养护至干,采用南 55 型渗透仪测定加固土的渗透性。

3) 空白试样及处理试样的抗冻融。土样块尺寸为 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 20\text{mm}$ ,将加固后的试样烘干,称重。加入一定量的水密封保存,使其充分浸湿,含水量约为 15%,放入冰箱( $-10 \pm 0.5^\circ\text{C}$ )冷冻 4 小时后,取出后在保湿器( $16 \pm 1^\circ\text{C}$ )融化 4 小时为一个冻融循环。试验达到要求的冻融循环次数后,将试样放入烘箱烘干,测其干质量和抗压强度,并计算质量损失和强度损失。

4) 加固剂处理试样的渗透深度。样块为 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 40\text{mm}$ 的长方体,3 个一组平行。方法是将样品放入烘箱( $105^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ )干燥 48 小时,取出干燥器冷却至室温。用加固剂处理试样,养护一周。再将样块截断,用卡尺测量。测量结果为渗透深度。

5) 处理试样的色差变化。目测(在肉眼能够观察到的情况下尽量不改变遗址土体原貌以达到不影响展示的特定目标,所以未选择更为精确而相对复杂的色差计进行实验),试样尺寸为 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的样块 3 个一组,将样品放入烘箱

( $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ )干燥48小时,取出干燥器冷却至室温,以肉眼观察其颜色变化,以判定处理前后色差的变化。

6) 处理试样的重量变化。试样为  $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 20\text{mm}$  的样块,3个一组。首先,将样品放入烘箱( $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ )干燥48小时,取出干燥器冷却至室温。其次,用电子天平测定试样的质量  $m_0$ ,再用加固剂处理试样,养护4周,重测试样的质量  $m_1$ 。最后,按公式计算质量变化  $M\% = (m_1 - m_0)/m_0$ 。

7) 耐老化试验。试样为  $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 20\text{mm}$  的样块,3个一组。将加固处理和未加固处理的样块置于距离两个300W的紫外线碳弧灯正下方30cm位置的耐老化试验箱中,试验采用紫外光间断辐照方式测试,间断辐照模拟实际日照情况。照射通常为白天,约12小时,夜间停止实验。连续辐射从开始照射至试验结束,除了意外停电,一般不间断。试样表面空间温度  $45^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ,恒温照射300小时后,测其抗压强度。观察随着老化时间的延长,未处理和处理样品的强度损失变化。

8) 空白试样及处理试样的抗崩解试验(参照标准 SL237-008-1999)。取加固或未加固土块50~100g,放入清水中的铁丝网上面,放入即开始计时,记录开始崩解时间,并观察其在崩解过程中的各种现象,至完全崩解。铁丝网上若有残留物,烘干后称其质量。本试验通过测试土在水中的崩解速度和崩解量,来反映试样经加固材料处理前后抗崩解能力的变化。

9) 空白试样及处理试样的耐冲刷试验。采用 QFS-A 型涂层耐洗刷性测定仪测其耐冲刷试验。将加固和未加固样块并排固定,调节刷子与样块之

间的同一水平高度,使刷子能充分摩擦样块表面。试验采用连续来回洗刷样块,测单位面积的质量损失量。一个来回计一个循环,总共进行5000个循环。

10) 空白试样及处理试样的微观形貌。试样为10~20mm边长截面试样,空白和处理样各1个。将样品放入烘箱( $105^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ )干燥48小时,取出干燥器冷却至室温。然后用加固剂处理试样,养护4周。再对试样喷金,然后用电镜观察空白和处理样的微观结构,确定孔隙状况,保护材料结合情况,并根据电镜照片对状况进行描述。

## 2 室内实验结果

1) 室内实验测试发现,BYG1002、BYG1008及BYG1009具有良好的应用性能。这里仅选择两种应用性能最好的加固剂BYG1002和BYG1008为例,来微观分析加固处理与原状土之间的区别。从不同放大倍数的SEM电镜照片(图8~10)可以看出未经加固的昙石山土遗址原状土体呈松散的片状。该片状结构不稳定,受自然风化、雨水冲刷及其他自然因素的侵蚀时容易开裂、坍塌。而加固后的土体结构较未加固的片状结构有较明显的区别,加固后的土体在片状土结构空隙之间分布有晶状胶结物,颗粒间紧密堆积。在颗粒间有均匀分布的新的类似膜层的物质,其中有些胶结物包裹在片状土结构表面,并且与空隙间的有机物连接起来,形成一个有机整体。这是由于加固剂与土之间形成键式网状结构后,网状结构填补了土壤之间的孔洞,起到支撑作用,并将土壤中的矿物颗粒胶结在一起,起到强化固结的作用,提高土体结构的抗压强度等力学性能。

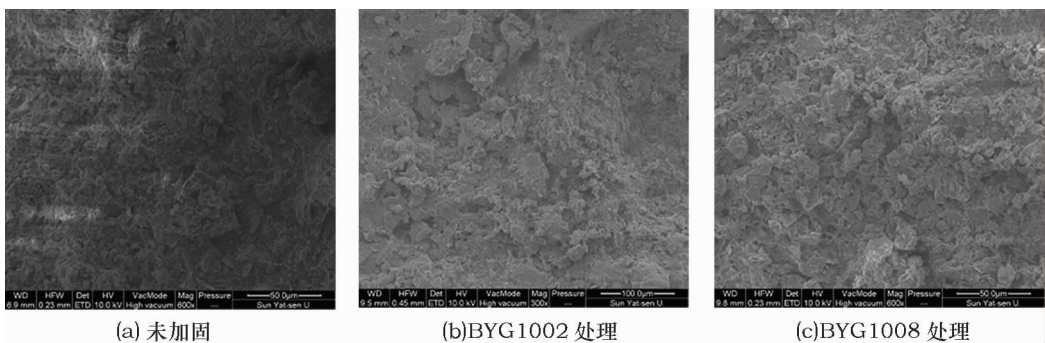


图8 加固与未加固处理土样电镜照片( $\times 600$ )

Fig.8 Reinforcement and unreinforcement soil sample electron micrograph

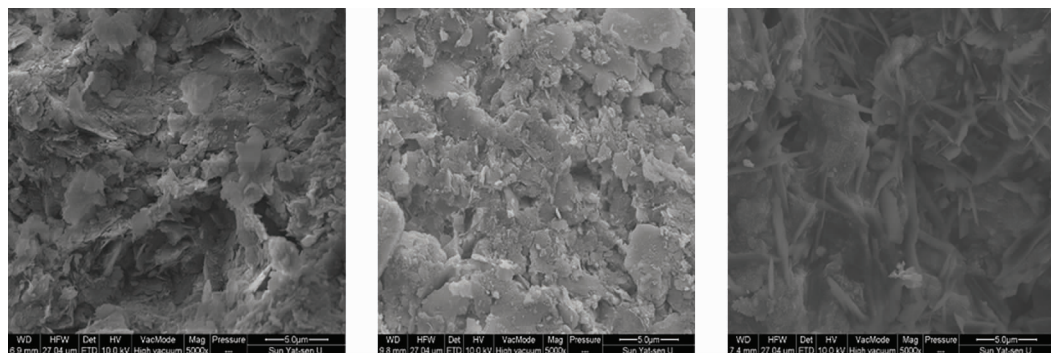


图 9 加固与未加固处理土样电镜照片(×5000)

Fig. 9 Reinforcement and unreinforcement soil sample electron micrograph

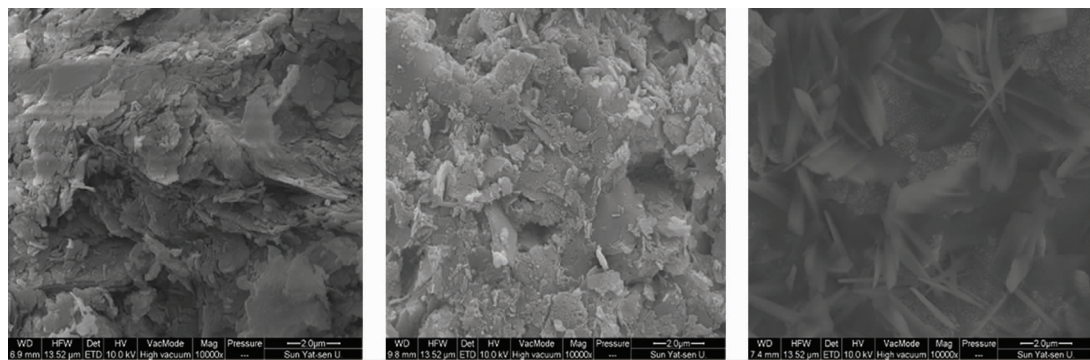


图 10 加固与未加固处理土样电镜照片(×10000)

Fig. 10 Reinforcement and unreinforcement soil sample electron micrograph

2) 由于聚氨酯(PU)、聚醋酸乙烯(PVAc)及聚丙烯树脂(B-72)等材料在遗址土体前期加固保护试验过程中证明其渗透效果不理想,滴注或喷洒后土壤表面明显出现结皮、色差及眩光等问题,而且可再处理性较差,所以不适宜此类土壤渗透加固,首先被排除进行下一步的筛选对比试验。

### 3 室内实验结果讨论

#### 3.1 无侧限抗压强度对比

各加固剂加固前后土的无侧限抗压强度试验结

果见表 1 所示。由表 1 可以看出:加固后原状土的抗压强度较空白都有较明显提高。加固效果按强弱比较排列如下:BYG1008, BYG1002, BYG1009, BYG0302, PS, BYG1001, 其中 BYG1008 加固效果最佳,强度提高一倍多,其它加固剂的加固程度都比较适中,且 BYG1001、BYG0302 仅发生边角开裂,整体性保持较好。按照土遗址文物的加固保护原则,要求所选的加固剂强度不宜过大,否则会在加固与内层未加固交接界面上形成断层,以上数据将为昙石山土遗址的现场加固工程提供参考依据。

表 1 各加固剂加固前后土的无侧限抗压强度试验

Table 1 The reinforcing agent before and after reinforcement soil of unconfined compressive strength test( $S \leq 0.005$ Kpa)

试验特性	空白	BYG1009	BYG1008	BYG1002	BYG1001	BYG0302	PS
无侧限抗度/kPa	0.604	0.927	1.315	0.934	0.676	0.703	0.682
试验现象	边角裂	边角、中间裂	中间裂	边角、中间裂	边角裂	边角裂	边角、中间裂

#### 3.2 渗透性

为了验证加固剂加固后对土粒间的连接力和微观结构的变化,进行了加固剂加固土的渗透试验,并与加固前做对比,得出各加固剂对土的渗透性影响。试样的渗透系数由以下公式计算(标准偏差 $\leq 0.15 \times 10^{-6}$ ):

$$K = 2.3a \cdot L / (A \cdot t) \lg H_2 / H_1$$

式中, $L$ 为试样高度(cm), $a$ 为试样截面积( $\text{cm}^2$ ), $t$ 为渗透时间(s), $H_2/H_1$ 为渗透前后的水头高度(cm), $A$ 为变水头管的断面积( $\text{cm}^2$ )。试验结果见表 2。结果表明,原状土经过加固后,其渗透性变化很小,BYG1002 不但没有降低,反而略有

加大。总体而言,加固 3 次比加固 1 次的渗透性降低更多,但幅度都不大。尽管加固剂降低了土的抗渗能力,但从文物保护角度来说,加固剂材料没有阻塞土中的孔隙和毛细管,可以使土体具有良好的透气和渗透性。使土体易于排水排气,不会

发生破坏,尤其是对于潮湿环境下的土遗址保护更具有积极效果。

由于试验条件有限,试样风干后可能产生收缩以及人为因素等可能会影响试验结果,这有待于进一步研究。

表 2 各加固剂加固后土的渗透系数

Table 2 The coefficient of soil permeability each agent after reinforcement is obtained ( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )

加固次数	空白	BYG1009	BYG1008	BYG1002	BYG1001	BYG0302	PS
1	$5.725 \times 10^{-6}$	$3.852 \times 10^{-6}$	$4.214 \times 10^{-6}$	$5.962 \times 10^{-6}$	$5.721 \times 10^{-6}$	$4.816 \times 10^{-6}$	$4.978 \times 10^{-6}$
3		$3.230 \times 10^{-6}$	$3.599 \times 10^{-6}$	$5.108 \times 10^{-6}$	$4.998 \times 10^{-6}$	$4.025 \times 10^{-6}$	$4.315 \times 10^{-6}$

### 3.3 耐冻融

各加固剂加固前后的冻融试验 10 个循环的结果见表 3。试验结果表明, BYG1002 材料的冻融质量损失率最小,冻融强度损失率也最

小,经过 10 次冻融循环后试样都能保持其完整性,说明此材料抗冻性能比较强。BYG1008 的冻融质量损失率最大,且冻融强度损失率也最大。

表 3 各加固剂加固前后的冻融试验 10 个循环结果

Table 3 The freezing and thawing test results of each agent after and before reinforcement is obtained (10 cycle)

测试项目	空白	BYG1009	BYG1008	BYG1002	BYG1001	BYG0302	PS
冻融质量损失率/%	-3.87	-2.04	-23.26	-1.90	-20.12	-15.63	-1.20
冻融后抗压强度/kPa	0.323	0.298	0.486	0.231	0.457	0.416	0.245
冻融强度损失率/%	-5.123	-3.571	-10.421	-3.254	-7.865	-7.141	-3.125
备注	第 2 个循环产生小裂纹	第 3 个循环产生小裂纹	第 4 循环产生小裂纹	完整	第 4 个循环产生小裂纹	第 3 个循环产生小裂纹	第 5 个循环产生小裂纹

注:冻融质量损失率偏差小于 0.1%,冻融后抗压强度标准偏差  $S \leq 0.005 \text{KPa}$ ,冻融强度损失率偏差小于 0.01%。

### 3.4 渗透深度

渗透深度是土遗址加固要求的重要指标,若渗透深度太低,只能表层加固而达不到深层内部加固,容易导致土遗址在加固的表层形成结壳现象。加固的部分,力学强度增大,未加固的部分仍然酥松而在表层结壳,日久会引起大面积的剥落,反而带来更大

的破坏。各加固剂加固后土的渗透深度见表 4。由表 4 可以看出,采用浸泡处理方式比滴注处理的渗透深度高,基本都达到 4 ~ 7cm 左右(偏差小于 0.1cm)。根据实际情况,建议现场施工采取多次喷洒,使加固剂充分渗透,吸收完全,保证一定的渗透深度。

表 4 各加固剂加固后土的渗透深度

Table 4 The earth penetration depth of each agent after reinforcement is obtained (cm)

加固剂	BYG1009	BYG1008	BYG1002	BYG1001	BYG0302	PS	备注
滴注法深度	4.80	5.51	4.89	3.71	3.35	4.92	滴注 3 次
浸泡法深度	7.21	7.48	7.17	5.43	4.12	5.67	浸泡 15min

### 3.5 色差变化

各加固剂加固前后目测的土的颜色变化见表 5。由表 5 可以看出,除了 BYG1008、BYG1002 及

BYG0302 稍有色差外,其它加固剂基本没色差,加固后土体的质感和颜色与原土体基本保持一致,这样可以达到不影响文物原貌展示的目的。

表 5 各加固剂加固前后目测的土的颜色变化

Table 5 The soil color change each agent after and before reinforcement is obtained (eyeballing)

加固剂	BYG1009	BYG1008	BYG1002	BYG1001	BYG0302	PS	备注
颜色变化	无色差	稍有加深	稍有加深	无色差	稍有加深	无色差	养护 15 天



### 3.6 质量变化

各加固剂加固前后土的质量变化率见表 6。土壤经加固剂处理后,随着溶剂的逐渐挥发,固化物也同时形成。三周后,形成的胶化物已基本

稳定,采用不同固化剂,所形成的固化物也不同。一般而言,吸收量越大,固化效果越好。由表 6 可看出,加固剂 BYG1008 的吸收量最大,固化效果最好。

表 6 各加固剂加固前后土的质量变化率(标准偏差 $\leq 0.1\%$ )

Table 6 The reinforcing agent before and after reinforcement soil quality rate( $S \leq 0.1\%$ )

加固剂	BYG1009	BYG1008	BYG1002	BYG1001	BYG0302	PS	备注
质量变化率/%	1.93	2.29	2.21	1.89	1.95	2.01	养护 21 天

### 3.7 耐紫外光老化对比

由于福州市夏天时日照强,太阳辐射较强,紫外线对材料长时间照射可能会引起材料的老化,为了检测高强度太阳辐射对加固材料的影响,进行了各加固剂加固后土的耐老化试验,结果见表 7。由表 7

可以看出经 300 小时老化后,空白样的强度基本没变化,而加固样的强度稍微有所降低,但强度损失率都很小。损失最大的是 BYG1002,损失最小的是 PS 材料。损失率越小说明加固材料的抗老化性能越好。

表 7 各加固剂加固后土的耐老化试验

Table 7 The reinforcing agent reinforcement and earth resistance to aging test

试验结果	空白	BYG1009	BYG1008	BYG1002	BYG1001	BYG0302	PS
辐照时间/h		300	300	300	300	300	300
强度损失率/% (标准偏差 $\leq 0.1$ )		-8.18	-7.25	-8.45	-4.26	-7.22	-4.07
颜色变化		无	无	无	无	无	无

### 3.8 耐水性对比

各加固剂加固前后土的崩解试验结果见表 8。由表 8 可以看出未加固试样放入后立刻开始崩解,崩解为 5 ~ 120s,崩解量高达 100%,完全崩解。而经加固剂处理后的所有试样开始崩解的时间都有所

延长,抗崩解能力明显增加。其中 BYG1008 的耐水性最强,三个月以后才完全崩解,而且崩解量很少,只有 2.45%,基本保持原形,只是裂纹贯通。其它各加固剂的耐水性由强至弱依次排列如下: BYG1009, BYG1002, PS, BYG0302, BYG1001。

表 8 各加固剂加固前后土的崩解试验

Table 8 The reinforcing agent before and after reinforcement soil disintegration test(标准偏差 $\leq 0.1\%$ )

崩解特性	空白	BYG1009	BYG1008	BYG1002	BYG1001	BYG0302	PS
崩解开始时间	5s	45h	34d	76h	120s	120s	300s
崩解最终时间	120s	15d	71d	15d	1h	1.5h	3h
崩解量/%	100	20.16	2.45	27.42	47.56	50.12	38.15
最终崩解状态	完全崩解 呈泥状	崩解为 2cm 块状	裂纹贯通	崩解为 2cm 块状	泥状夹碎块	泥状夹碎块	厚约为 1cm 块状表皮

### 3.9 耐冲刷对比

各加固剂加固前后土的耐刷洗试验结果见表 9。耐冲刷性能是检测土遗址加固强度程度的又一衡量指标,耐冲刷试验中单位面积质量损失量越小,说明

其加固效果越好。由表 9 可以看出,未加固过的试样耐冲刷性能比较差,单位面积的质量损失为 5.45%。而经过加固处理后的试样其耐冲刷性能都有较明显提高,这与前面表 1 的抗压强度的试验结果基本相一致。

表 9 各加固剂加固前后土的耐刷洗试验

Table 9 The reinforcing agent before and after reinforcement soil resistance to scrub test

质量损失	空白	BYG1009	BYG1008	BYG1002	BYG1001	BYG0302	PS
试验后质量损失率/%	5.45	0.83	0.52	0.92	1.91	2.32	1.87
单位面积质量损失/ $(g \cdot m^{-2})$	32.94	8.27	3.70	8.48	20.56	25.03	20.32

注:试验后质量损失率标准偏差 $\leq 0.1\%$ ,单位面积质量损失标准偏差 $\leq 0.1g/m^2$ )

## 4 现场加固保护试验

为考察不同加固和微生物防治材料在遗址现场的实际应用效果、用量、施工条件及现场环境条件对材料使用效果的影响,2012年9月,中国文化遗产研究院、福建省昙石山遗址博物馆及广州市白云文物保护工程有限公司共同对昙石山遗址本体进行了现场加固保护试验,从适用性、有效性、可靠性等多方面对加固材料进行全面科学的评价分析。

### 4.1 化学试剂和试验工具

**4.1.1 化学试剂** 除室内实验所用BYG1002、BYG1008、BYG1009加固剂,BY-401杀藻处理剂和BYB1007抗藻岩石保护液外,另外还增加三种制剂。

1) BYJ1003保护液。主要成分为氟碳树脂,本产品无色透明,能够阻止空气的氧气、二氧化硫等氧化性和腐蚀性的气体发生反应,延缓文物的老化。

2) BYB1001保护液。本产品为有机硅氟材料,主要成分为含氟硅烷、烷基硅烷及其低聚物,通过短链段的合理搭配和添加渗透促进剂,达到保护液既能起到抵御外界腐蚀性污染的侵入,又能深入文物内部的目的,从而延长保护效果,增加文物寿命。

3) BCO-2 抗菌防霉剂。本产品无色透明,单组分,溶剂型,低气味液体,是一种安全、高效的干膜防霉剂,能有效杀灭霉菌、酵母菌、藻类和细菌,对真菌有特效。

**4.1.2 试验工具** TYD-1型土壤硬度计、美纹纸、卷尺、剪刀、漏斗、喷壶、毛刷、漏斗、橡胶手套、塑料薄膜。

### 4.2 遗址土体渗透加固试验

**4.2.1 典型病害试验点的选取** 由于展厅外有雨水渗入展厅内,造成展厅内部土遗址土体局部有水渗出,使土体松软、坍塌、剥落,同时,露点周围有一定高度的毛细水。它的存在将对土遗址产生一定的风化作用,当风化到一定程度时,就有可能使毛细水高度范围以内的岩体逐渐风化剥落,影响内部应力分布,最终影响土体的稳定性。而且某些地方常年处于浸湿状态,甚至枯水季节也有浸湿,长期下去,必将加速其风化速度并造成破坏。试验选择在土遗址两处典型而隐蔽的潮湿环境区(图11)。



A区



B区

图11 土遗址土体渗透加固试验选区  
Fig.11 Infiltration of soil reinforcement test selection of Tanshishan site

**4.2.2 试验方法及操作步骤** 加固方式采取喷洒加固处理,为了保证充分渗透和提高加固效果,采用低浓度加固剂多次喷洒的工艺,操作步骤如下:

1) 清洁表面。先将选定区域的试验点分为三部分,分别用毛刷将试验区域表面的浮土轻刷干净。

2) 配制加固剂。依据区域的面积大小设定所用加固剂的量,并分别配制如下浓度的加固剂装入喷壶中:20%的BYG1002,30%的BYG1008及20%的BYG1009,然后分别添加一定比例的固化剂,混合后以备加固。

3) 土遗址土体加固。每次以喷壶均匀喷洒3~4遍,每遍喷洒至土遗址表面不再吸收为准。待24小时加固剂完全反应后,再重复上述方法喷洒,共计喷洒3次。

4) 养护。喷洒加固剂后,用塑料薄膜覆盖土遗址表面养护,以防止加固剂过快挥发。24小时后加固剂完全反应,可将塑料薄膜去掉。

5) 现场清理。加固工艺结束后,除去塑料薄膜并清理现场。

**4.2.3 试验结果** 本次对昙石山土遗址土体仅用

BYG1002、BYG1008 及 BYG1009 加固剂进行了试验,结果如下:

1) 喷洒 BYG1002 加固剂试验结果。(1) 渗透速度比较慢,仔细观察发现有少量加固剂从土体表面的低处流出,可见喷洒的加固剂并未完全渗入到土遗址内部空间。(2) 土遗址外观颜色有所加深。(3) 土体表面严重泛白,但防水和加固效果较明显。因此,BYG1002 加固剂用于昙石山土遗址土体的保护还有待进一步研究。

2) 喷洒 BYG1008 加固剂试验结果。(1) 渗透速度比较快,仔细观察没有发现四周有任何加固剂流出,可见喷洒的加固剂已经完全渗入到土遗址内部空间。(2) 土遗址外观颜色开始时稍

有加深,2 个月后观察基本无色差。(3) 土体表面有霉菌,但防水和加固效果较明显。因此, BYG1008 加固剂用于昙石山土遗址土体的保护有良好的加固和防水效果,但防霉试验有待进一步研究。

3) 喷洒 BYG1009 加固剂试验结果。(1) 渗透速度一般,仔细观察没有发现四周有微量加固剂流出,可见喷洒的加固剂还有小部分没渗入到土遗址内部空间。(2) 土遗址土体表面稍有泛白现象,颜色加深,有色差。(3) 土体表面干净,无霉菌,有防水和加固效果。

**4.2.4 试验分析** 土体加固后 A、B 区的情况见图 12~13。具体分析情况如下:

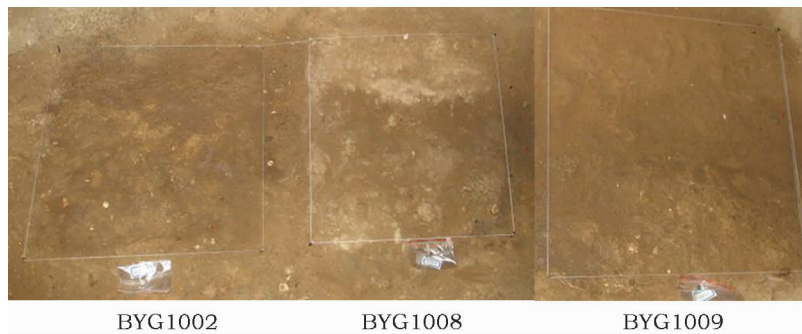


图 12 土体加固后 A 区的状态

Fig. 12 State of A area after the soil consolidation



图 13 土体加固后 B 区的状态

Fig. 13 State of B area after the soil consolidation

1) A 区由于环境太潮湿,在加固过程中因下雨渗水严重,这种潮湿环境会造成加固剂固化速度慢、不完全固化、加固效果等不良试验结果,同时外观颜色也有所改变。

2) B 区试验正常。采用 BYG1002 加固剂时,加固剂的用量为  $1200\text{mL}/\text{m}^2$ ;采用 BYG1008 加固剂时,用量为  $3000\text{mL}/\text{m}^2$ ;采用 BYG1009 加固剂时,用量为  $2300\text{mL}/\text{m}^2$ 。

3) 根据 B 区现场加固后取样进一步测试,

各加固剂的渗透深度如下:BYG1002 为  $2.1\text{cm}$ ; BYG1008 为  $5.3\text{cm}$ ; BYG1009 为  $3.3\text{cm}$ 。综合各加固剂的渗透深度、外观颜色及加固效果, BYG1008 加固剂比较适合昙石山土遗址土体的加固保护。

4) 对昙石山现场加固后的土遗址做了防水测试(以 BYG1008 加固剂为例),先在加固过和未加固过的土遗址表面洒水,发现被加固过的土遗址表面的水呈珠状滚动,有“荷叶水珠效果”;而在没加固的表面,水呈润湿状态,渗透至土遗址内部(图 14)。



图14 BYG1008 加固后土遗址的防水效果示意图

Fig. 14 The waterproof effect diagram of the site after reinforcement of BYG1008

5) 为了观察昙石山现场加固试验的强度效果, 将现场加固保护后的土遗址切块, 在实验室先将不规则的土样块用钢锯和铲刀削平上下两个平面, 然

后以土壤硬度计测其土壤表面硬度。测得未加固面的土壤表面硬度为  $28\text{kg}/\text{cm}^2$ ; 加固面的土壤表面硬度为  $36\text{kg}/\text{cm}^2$ 。切块测试情况见图 15 所示。



图15 现场加固试验测试

Fig. 15 Reinforce the test site

6) 经 BYG1008 和 BYG1002 加固剂加固过的土体开始时较原土体的颜色稍有加深, 但放置一段时间后表面颜色稍有变浅, 估计这是暂时存在的问题, 从长远看, 并不会影响外观和加固效果, 基本符合文物保护原则。但尽量避免在雨季的气候状况下进行施工, 否则雨水的渗入会影响加固剂的渗透、加固和外观效果

7) 以同一加固剂加固不同密度的土样块时, 发现渗透深度却不同。建议加固密度大的土样块时, 可采用水或溶剂稀释加固剂后使用, 在不影响加固效果的情况下可提高渗透深度。

8) 试验采用 BYG1008 加固剂后, 色差小、有防水及加固效果, 但无抗霉菌生长作用。建议采用 BYG1008 加固剂加固保护后, 再选择一种同溶剂的杀霉、防霉保护液处理土遗址表面, 以防阴暗潮湿环境中的土遗址长霉菌。

9) BYG1009 水性加固剂的渗透效果不太理想, 操作工艺要求缓慢喷洒, 否则土体容易发生崩

塌。为保证一定的渗透深度, 建议现场施工采用多次喷洒的方式进行, 并采用溶剂型加固剂加固保护土遗址土体。

10) 由于土遗址遭受地下水作用, 毛细水旺盛, 易滋生青苔。加固后可采用 BY-401 杀藻剂处理, 然后再以 BYB1007 抗藻剂预防保护。

## 5 结 论

1) 室内试验中所选的 6 种加固剂加固工艺简便, 对人体无害, 不会造成环境污染, 适合一般土遗址的加固保护, 加固后的原状土抗压强度都有较明显提高, 加固效果按强弱比较排列如下: BYG1008 > BYG1002 > BYG1009 > BYG0302 > PS, BYG1001。就福建昙石山遗址而言, 由于要求加固剂是在潮湿环境下对土遗址有较好的加固效果, 所以加固剂的耐水性能是另一个重要参数。按照抗崩解试验评价耐水效果好坏排列如下: BYG1008 > BYG1009 > BYG1002 > PS, BYG0302 > BYG1001。

2) 可以看出, 县石山遗址土体经加固后其渗透性降低很少, 其中 BYG1009 不但没有降低, 反而略有增大, 这说明此加固材料没有阻塞土中的孔隙和毛细管, 可以使土体具有良好的透气和渗透性, 使土体易于排水排气, 不会发生破坏。

3) 经过对试验结果进行比较分析, 可以很明显看出加固后的县石山遗址土体具有较好的耐冲刷性。

4) 试验证明, 用 BYG1008, BYG1002 及 BYG1009 加固过的县石山土遗址能保持原状土的质感和外观, 且土遗址的力学强度均有所增加, 这符合文物保护原则。

5) 综合抗压强度、抗崩解能力、耐冻融、渗透性、耐磨损冲刷及耐老化等性能测试结果表明, BYG1008, BYG1002 及 BYG1009 可用于潮湿环境下县石山土遗址土体的加固。其中尽管 BYG1008 的抗冻融性能较差, 但南方冰雪天气较少, 可以不考虑。而 BYG1001, BYG302, PS 不太适合县石山潮湿环境下的土遗址土体加固。

自 2012 年 10 月县石山遗址本体保护工程正式启动以来, 经过半年多的观察, 从采用 BYG1008 加固剂对遗址本体进行加固保护后的效果看, 各项指标均基本正常, 应用性能较好, 有望进一步推广使用。

## 参考文献:

- [1] 孙满利. 土遗址保护研究现状与进展[J]. 文物保护与考古科学, 2007, 19(4): 64-69.  
SUN Man-li. Soil site protection and research status and progress [J]. Sci Conserv Archaeol, 2007, 19(4): 64-69.
- [2] 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]. 兰州大学学位论文, 2003.  
WANG Xu-dong. China's northwest drought environment grottoes and soil site protection strengthening research [D]. Lanzhou university degree thesis, 2003.
- [3] 张慧, 李玉虎, 万俐, 等. 土遗址防风化加固材料的研制及加固性能比较研究[J]. 东南文化, 2008, (2): 91-96.  
ZHANG Hui, LI Yu-hu, WAN Li, et al. Ruins of soil weathering proof development and reinforce the performance comparison of reinforcement materials [J]. Southeast Cult, 2008, (2): 91-96.
- [4] 周双林, 杨颖亮, 原思训. 潮湿土遗址加固保护材料的初步筛选 [M]// 文物科技研究, 第二辑, 2004, (12): 64-69.  
ZHOU Shuang-lin, YANG Ying-liang, YUAN Si-xun. The preliminary screening of wet soil site materials for protection [M]// Institute of Science and Technology (programme two), 2004, (12): 64-69.
- [5] 黄建辉, 江元汝, 秦竹丽, 等. 遗址抗风化硅丙乳液合成的初步研究[J]. 辽宁化工, 2007, (10): 652-654.  
HUANG Jian-hui, JIANG Yuan-ru, QIN Zhu-li, et al. Ruins of weather resistant silicone acrylic emulsion synthesis of a preliminary study [J]. Liaoning Chem Ind, 2007, (10): 652-654.
- [6] 王赞. 硅丙乳液加固土遗址的实验研究[J]. 低温建筑技术, 2010, (1): 58-59.  
WANG Yun. The experimental study of the site of silicone acrylic emulsion reinforced soil [J]. Low Temp Archit Technol, 2010, (1): 58-59.
- [7] 和玲, 梁国正. 含氟聚合物应用于土质类文物的加固保护[J]. 中国历史文物, 2002, (5): 80-85.  
HE Ling, LIANG Guo-zheng. Containing fluorine polymer applied to the soil type of strengthening protection of cultural relics [J]. China's Hist Relics, 2002, (5): 80-85.
- [8] 汪海港. 潮湿环境土遗址的新型保护材料制备与初步应用模拟实验[D]. 中国科学技术大学学位论文, 2009.  
WANG Hai-gang. Damp soil sites in the new environment protection material preparation and preliminary application simulation experiment [D]. Dissertation University of Science and Technology of China, 2009.
- [9] 王彦兵, 王思敬, 李黎, 等. PS 对潮湿环境土遗址加固潜力探讨[J]. 桂林理工大学学报, 2012, (4): 537-542.  
WANG Yan-bing, WANG Si-jing, LI Li, et al. PS reinforce in damp environment site potential is discussed [J]. J Guilin Univ Sci Eng, 2012, (4): 537-542.
- [10] 赵胜杰, 陈平, 熊兵, 等. BS 保护土建筑遗址初探[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, (4): 127-129.  
ZHAO Sheng-jie, CHEN Ping, XIONG Bing. Study on protection for Earth Ruins with BS [J]. J Water Res Archite Eng, 2008, (4): 127-129.
- [11] 李小洁, 万涛, 林金辉, 等. 金沙土遗址加固材料的制备及性能研究[J]. 材料科学与工艺, 2009, (2): 163-169.  
LI Xiao-jie, WAN Tao, LIN Jin-hui, et al. The preparation and performance study of reinforcement materials of JinSha Site [J]. Mat Sci Technol, 2009, (2): 163-169.
- [12] 周环. 潮湿环境土遗址的加固保护研究[D]. 浙江大学学位论文(博士), 2008.  
ZHOU Huan. The reinforcement protection and research of the site in the wet environment [D]. Doctor Dissertation of Zhejiang University, 2008.
- [13] 周环, 张秉坚, 陈港泉, 等. 潮湿环境下古代土遗址的原位保护加固研究[J]. 岩土力学, 2008, (4): 954-961.  
ZHOU Huan, ZHANG Bing-jian, CHEN Gang-quan, et al. The ruins of ancient soil in situ damp environment protection strengthening research [J]. Rock Soil Mech, 2008, (4): 954-961.
- [14] 魏国峰, 张秉坚, 杨富巍, 等. 钙基液态水硬性加固剂用于潮湿土遗址的加固保护[J]. 岩土力学, 2012, (3): 702-712.  
WEI Guo-feng, ZHANG Bing-jian, YANG Fu-wei, et al. Calcium base liquid water rigid reinforcing agent in wet soil reinforcement protection site [J]. Rock Soil Mech, 2012, (3): 702-712.
- [15] 李克彪. 土遗址搬迁保护技术研究——南京市“江东门遗址”搬迁保护技术[C]// 中国文物保护技术协会第四次学术年会论文集, 2005: 228-237.

- LI Ke - biao. Soil site relocation protection technology research——  
The relocation protection technology of Remains of site of Jiang-  
DongMen in NanJing city [ C ] // Cultural Relics Protection and  
Technology of China Association of Academic Essays for the Fourth  
Time, 2005: 228 - 237.
- [ 16 ] 日本东京国立文化财研究所. 东京国立文化财概要 [ M ]. 东  
京, 1993: 17.  
National Research Institute for Cultural Properties, Tokyo, Japan.  
Tokyo National Research Institute for Cultural Properties [ M ],  
Tokyo, 1993: 17.
- [ 17 ] 张志军. 秦始皇陵兵马俑文物保护研究 [ M ]. 西安: 陕西人民  
教育出版社, 1998: 107.  
ZHANG Zhi - jun. Emperor Qinshihuang Terracotta Warriors  
cultural relic protection and research [ M ]. Xi ' an: Shaanxi  
People's Education Press, 1998: 107.
- [ 18 ] 林公务. 昙石山遗址与昙石山文化 [ J ]. 福建文博, 2006, ( 4 ) :  
36 - 42.  
LIN Gong - wu. Tanshishan site and Tanshishan culture [ J ].  
Fujian Museol, 2006, ( 4 ) : 36 - 42.

## Experimental study on the selection of materials for reinforcement and protection of earthen archaeological sites in humid environments ——On the Fujian Tanshishan site

WANG You - wei, LI Guo - qing

( Fujian Tanshishan Site Museum, Fuzhou 50100, China )

**Abstract:** The selection of materials for reinforcement and protection of earthen archaeological sites located in humid environment has been a big problem in China for a long time. Currently, there are no standard procedures to follow. The Tanshishan Site in Fujian in southeast China is a typical coastal region earthen archaeological site in a humid environment. During the process of site protection in recent years, four kinds of reinforcement materials have been used according to the various base compositions. After a great deal of indoor and local field testing, it is found that long chain alkyl alkoxysiloxane, polysilicic acid ethyl ester mixture which contains oxygen group and sodium silicate and siloxane copolymer are good reinforcing agents and are effective in the humid environment of the Tanshishan site. This is a beneficial attempt and exploration for protection development of archaeological sites under humid environment in China.

**Key words:** Humid environment; Tanshishan Site; Reinforcement; Protection; Choice of material

( 责任编辑 潘小伦 )