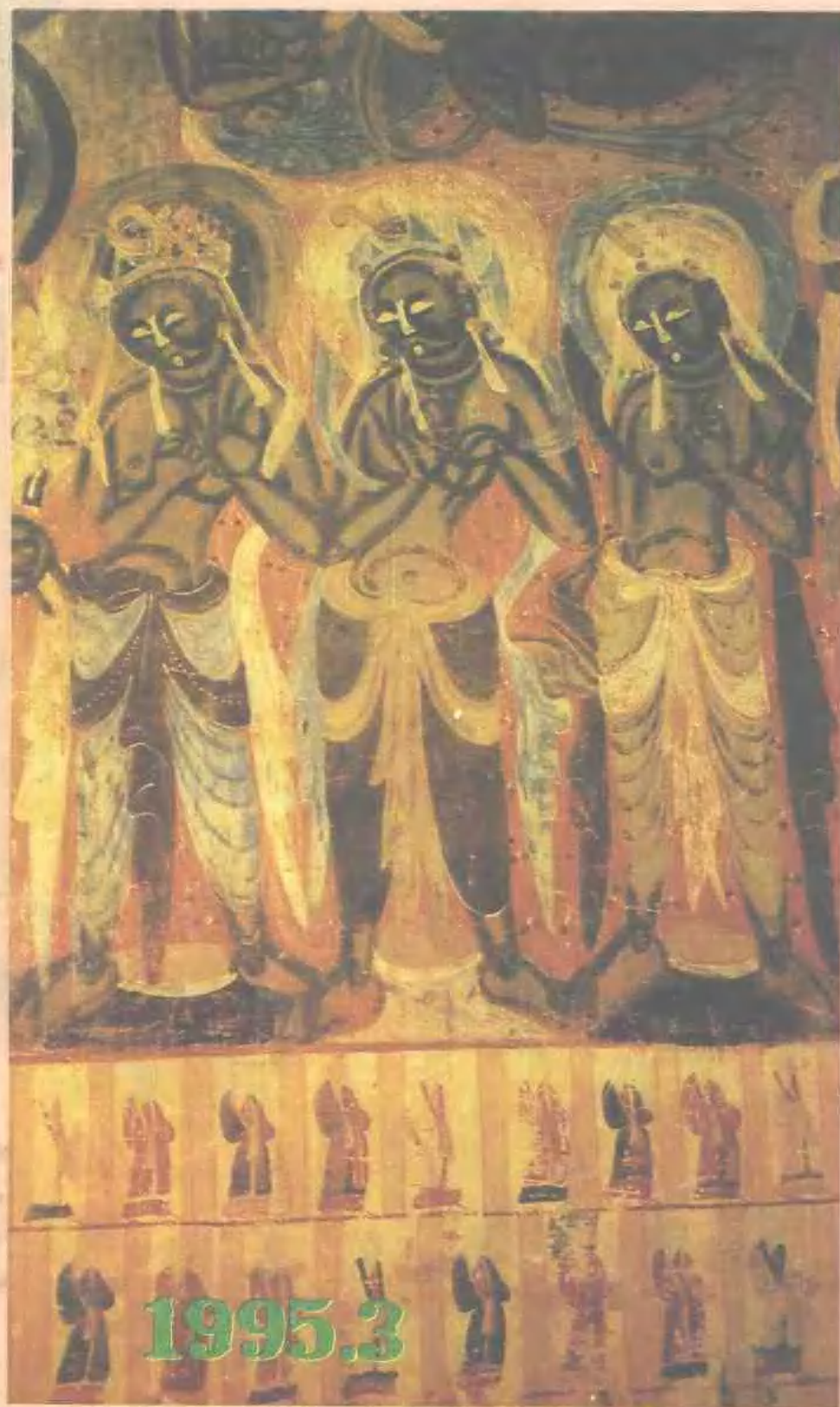


敦煌研究



敦 煌 研 究

DUNHUANG STUDIES

1995 年
第 3 期
总第 45 期

No. 3 1995
(Total 45)

敦煌研究院 主办
Edited and Published Dunhuang Academy



敦煌研究 DUNHUANG RESEARCH
1995 年第 3 期(总第 45 期) NO. 3 1995(Total 45)

编辑出版:《敦煌研究》编辑部

(甘肃省敦煌市莫高窟)

邮政编码:736200

电话:22113—47

1995 年 8 月 15 日出版

印刷:甘肃省地矿局遥感印刷厂

国内发行:兰州市邮电局

国外发行:中国国际图书贸易公司
北京 399 信箱

Edited and Published by Editorial Department
of Dunhuang Studies

Add: Mogao Caves, Dunhuang, Gansu Province

Postcode: 736200

Tel: 22113—47

Published on August 15, 1995

Printed by Remote Sensing Press of Gansu,
Lanzhou

Distributed at Home by Lanzhou Post Office

Distributed Abroad by China International
Book Trading Corporation

统一刊号 ISSN 1000—4106
CN 62—1007/K

国内代号 54—62
国外代号 Q994

定价 4.50 元

主 编 段文杰

EDITOR IN CHIEF: DUAN Wenjie

编辑委员会 (以姓氏笔划为序)

史苇湘 SHI Weixiang
李永宁 LI Yongning
段文杰 DUAN Wenjie
施萍亭 SHI Pingting
樊锦诗 FAN Jinshi

EDITORIAL BOARD

孙儒桐 SUN Rujian
李正宇 LI Zhengyu
贺世哲 HE Shizhe
梁尉英 LIANG Weiying

本期编辑 梅 林

摄 影 宋利良

封面设计 马 强

EDITOR FOR THIS ISSUE: MEI Lin

PHOTOGRAPHERS: SONG LiLiang

DESIGNER OF COVER: MA Qiang

本刊 1994 年第 4 期中第 93、94 页的插图说明应对换, 即插图 3 为第 361 窟窟形图, 插图 4 为第 158 窟窟形图。另第 91—94 页的四幅插图均由孙毅华绘制, 特此说明。

本刊 1995 年第 1 期封面彩图系万庚育先生临摹作品, 由于工作疏忽, 未予载明, 谨向作者致歉。

本刊编辑部

目 录

石窟保护研究专栏

古代土建筑遗址的加固研究	李最雄 张虎元等(1)
薄顶洞窟窟顶加固实验	李最雄 王旭东(18)
莫高窟地仗物质成分及微结构特征	张明泉 李最雄(23)
敦煌壁画中胶结构材料的定量分析	李实(29)
敦煌莫高窟颜料色彩稳定性及其相关问题的研究	郭宏 段修业(47)
东千佛洞壁画颜料色彩规律及壁画病害治理的研究	郭宏 段修业(59)
敦煌壁画、彩塑青金石颜料的初步研究	王进玉等(74)
莫高窟十六国时期洞窟颜料使用特征及颜色分布	王军虎等(87)
陕西耀县药王山——天门庙宇壁画揭取保护方法研究及处理实施	樊娟等(100)
北山石窟风化产物可溶盐形成的水文地球化学机理	张赞勋 谢本立等(107)
文物保护短译两则	赵崇民译(86、91)



供养人画像与石窟	段文杰(113)
莫高窟北朝五佛造像试释	贺世哲(117)
莫高窟第 280 窟普贤菩萨来现图考释	刘永增(125)
——兼谈“乘象人胎”的图像来源	马德(131)
敦煌壁画交通工具史料述论(下)	

敦煌吐蕃番文书中所见唐官文书“行判”的几个问题

..... 向群(137)

敦煌所出粟特语古信札与两晋之际敦煌姑臧的粟特人

..... 刘波(147)

《敦煌唐人诗集残卷(P. 2555)》新校 张先堂(155)

《景教创世颂》(拟题)非宋人诗..... 王宗祥(169)

从中国书法史看敦煌汉文文书(一) (日)伊藤 伸著 赵声良译(190)

敦煌美术与犍陀罗·印度美术

..... (日)宫治 昭著 顾虹译(190)

《沙州回鹘及其文献》评介 苏北海(200)

第二届中印石窟艺术研讨会简介..... 李崇峰(204)

CONTENTS

Papers on the Preservation of Grottoes

Research on the Conservation of Ancient Earth—Structure Sites	
..... by LI Zuixiong, ZHANG Huyuan & WANG Xudong (1)	
Use of Geosynthetics at the Mogao Grottoes for Reinforcing and Capping	
..... by LI Zuixiong et al (18)	
Geological Structure of the Mogao Caves	
..... by ZHANG Mingquan & LI Zuixiong (23)	
Quantitative Analysis of Cementing Materials of the Dunhuang Murals	
..... by LI Shi (29)	
Stabilization of Colour of Mogao Grottoes and concerned Problems	
..... by GUO Hong & DUAN Xiuye (47)	
A Preliminary Study of Lapis Lazuli and Ultramine Dyestuff	
Applied to Murals and Painted Sculptures in Dunhuang Grottoes	
..... by WANG Jinyu et al (74)	
On the Characteristics of Pigments and the Distribution of	
Colours during sixteen Kingdoms at the Mogao Grottoes, Dunhuang	
..... by WANG Junhu et al (87)	
Problems of Peservation of Space Murals in Yaowangshan—Tianmen,	
Yaoxian, Shanxi	 by FAN juan et al (100)
Formed Dissoluble Salt Hydrogeochemical Mechanism in	
Weathering Product of Grotto in Beishan, Dazu	
..... by ZHANG Zanzun, Wang Dongyun, et al (107)	



The Donor Figures and Grottoes	 by DUAN Wenjie (113)
--------------------------------	----------------------------

- Five Buddha Statues in the Mogao Caves of the Northern Dynasties
 by HE Shizhe (117)
- Note on the Samantabhadra Figure in the Mogao Cave no. 280
 by LIU Yongzeng (125)
- On Means of Communication in Dunhuang Murals, II
 by MA De (131)
- Notes on “*Xing—pan* 行判” in the Dunhuang—Turpan Manuscripts
 by XIANG Qun (137)
- The Sogdian Letters from Dunhuang and the Sogdians in
 Dunhuang and Guzang during the Jin Dynasties
 by LIU Bo (147)
- Dunhuang Chinese Manuscripts from Angle of Calligraphical History of China
 by ITO Shen, Tr. ZHAO Shengliang (171)
- Dunhuang Fine Arts and Gandhara—Indian Arts
 by MIYAJI Akira, Tr. GU Hong (190)
- A Review of Shazhou Uighurs and Concerned Documents Written
 by YANG Fuxue and NIU Ruji by SU Beihai (200)
- A Brief Introduction of the Second Seminar on Cave Art of
 India and China by LI Chongfeng (204)

古代土建筑遗址的加固研究

李最雄 张虎元 王旭东

一、前言

我国西北地区的新疆、甘肃、宁夏和陕西境内,遗存下许多古代土建筑遗址,如著名的新石器时代人类居住遗址——西安近郊的半坡村和甘肃秦安县的大地湾遗址;新疆吐鲁番地区的交河古城、高昌古城以及甘肃安西县的锁阳城等古城遗址;敦煌的阳关、玉门关等关隘及附近一座座的烽燧、土塔等;还有敦煌、嘉峪关及河西走廊的汉、明长城等。这些土建筑遗址历史久远,有很高的考古学和历史价值。

西北地区的古代土建筑遗址大部分是由夯土筑成的。敦煌附近的烽燧、汉长城是一层沙土,再加一层芨芨草、芦苇和灌木枝条,这样一层一层筑成的,这正如现代混凝土建筑中的钢筋,起着增强土建筑物理力学强度的作用。有些古城和居住遗址,先以夯土筑造为基础,上砌土坯墙体建造而成。由于我国西北地区气候干燥、少雨,而干燥的夯土有较好的力学强度,使得许多古建筑遗址能保存到今天。

但是,千百年来,由于自然风化,雨水冲刷及其他自然因素的侵蚀破坏,特别是西北地区风沙的严重风蚀作用,大批古代土建筑遗址都已不同程度的遭到严重的风蚀和风化的破坏。虽然西北地区少雨干旱,但由于夯土在水中非常容易崩解,在漫长岁月中偶尔的大雨对古代土建筑遗址的破坏也是非常严重的。另外,还有裂隙渗漏雨水及地震等自然因素的破坏,许多古代土建筑遗址大面积坍塌,正遭到一种毁灭性的破坏。

西安近郊的半坡村遗址,在五十年代考古发掘后立即新建了保护性的建筑物掩体,很好的防止了雨水对遗址冲刷破坏,起到了有效的保护作用。但是由于温湿度的频繁变化和地下渗水所引起的土壤中易溶盐的溶解——结晶——再溶解——再结晶,这样反复的循环活动,使遗址遭受到十分严重的风化破坏。早在六十年代初,保护工作者采用钠水玻璃进行过防风化加固试验,但没有取得成功。近几年又采用有机硅等一类有机加固材料进行加固试验,也没有获得明显的防风化效果。我国的文物保护工作者,近几年用轻型锚杆对一些有坍塌危险的古代土建筑遗址进行了锚固加固,这样仅仅解决土建筑遗址的坍塌危险,但对于古代土建筑遗址的风化和风蚀破坏的保护问题一直没有解决。

甘肃秦安县仰韶时期的居住遗址——大地湾遗址,在八十年代初考古发掘后,也立即建造了保护性的附加建筑物掩体,防止了雨水冲刷和冻融破坏,但是遗址严重的风化问题没有解决。1983年,我们用PS加固的方法,成功的将一座新石器时代的陶窑从秦安

县搬至兰州的甘肃省博物馆,之后又进一步用 PS 加固复原,在博物馆展出至今已有十余年,确实证明了 PS 对土建筑遗址有良好的加固效果。后来又对秦安大地湾居住遗址——F901 房址的墙体、灶炕和柱洞等做了 PS 渗透加固,随后进行的观测也证明了防风化加固效果明显。

PS 加固干燥环境中的风化砂砾岩石窟石雕,该项技术已通过国家文物局面组织的专家鉴定,同时也获得文化部的文物保护科技成果奖。目前,在国家文物局和甘肃省文化厅的大力支持下,已在甘肃和新疆的石窟加固工程中大量推广应用。但是,用 PS 加固古代土建筑遗址,我们过去在大地湾仅仅做过一些尝试性的防风化加固试验,一直没有进行系统的研究。

1992 年,国家文物局立项,我们以 PS 为主,同时选用了有机硅(甲基三乙氧基硅烷,即 PL)及硅酸锂(即 LS),对古代土建筑遗址开展了系统的试验研究。此项研究得到安西县博物馆的支持,选择甘肃省安西县以南 20 公里处的汉代古城遗址——破城子做为试验现场。(封二彩版 1)

二、实验

2.1 破城子夯土的化学组成和矿物质成分

表 1 是夯土的化学组成,表 2 是夯土中易溶盐和难溶盐含量。夯土颗粒细小,含有大量粘土矿物,其中伊利石占 33%,绿泥石占 19%,另外含有 18%的石英,8%长石,10%方解石,9%白云石。图 1 是破城子夯土的 X 射线衍射谱图。可以看出,破城子夯土是一种颗粒细小,呈微碱性,以伊利石和绿泥石粘土矿物为主的硅酸盐。

表 1 破城子夯土的化学成分 (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O
46.19	11.55	2.741	2.336	4.759	15.87	1.107
K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	TiO ₂	烧失重	H ₂ O	
3.05	0.124	0.214	0.875	12.86	0.595	

表 2 破城子夯土中盐分含量 (%)

PH	Ca (HCO ₃) ₂	CaSO ₄	Na ₂ SO ₄	MgSO ₄
8.03	0.9530	0.0048	0.0658	0.0232
NaCl	KCl	总易溶盐	中溶盐	难溶盐
			CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaCO ₃
0.0278	0.0104	0.1820	0.1062	8.585

2.2 破城子夯土的物理性质

采用蜡封法实测了破城子夯土的干密度。对实测的 39 组数据进行统计,得出夯土的干密度介于 1.419——1.679g/cm³ 之间,平均值为 1.547g/cm³。图 2 是夯土干密度概率分布直方图。总的来看,破城子夯土密度变化较大,每一夯层上部密实,而下部较为疏松,干密度分布总体上接近正态分布。

破城子夯土液限含水量 W_L=28.2%,塑限含量 W_p=20.0%,塑性指数 I_p=8.2,属中塑性粉质粘土。

2.3 试样的制备及 PS 加固

试验所用试样分原状夯土试样和室内重塑击实试样两大类。原状夯土密度变异较大,密度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 PS 加固以后对土的性质改良的判断。选用击实试样,可以严格控制试样的密度,使加固及未加固试样具有相同的初始状态和力学性质,增强试验结果的可比性。

室内重塑击实样的控制密度以原状夯土的实测密度为标准,即按低密度、中密度和高密度三组制样。低密度组干密度尽可能接近实测到的最小密度,中密度组干密度尽可能接近实测到平均密度,高密度组干密度尽可能接近实测到的最大密度。

2.3.1 室内重塑击实样制备

将所取原状夯填土碾碎,过4mm筛孔,按塑限 $W_p-20\%$ 加水制备成含水量20%的湿土,装入塑料袋,放入保湿器中静置4昼夜,让水份充分分散均匀。

称取1kg湿土,采用单层法,在单锤能量为 $2.5 \times 0.3\text{kg} \cdot \text{M}$ 的情况下分10,15,20,23,25,35,45和50次分别进行击实试验,确定干密度与击实次数之间的关系(图3)。根据实测的最大、最小和平均干密度,查阅图3,得知击实试样所用的击实次数分别是50次、10次和23次。

采用同样的击实程序,按上述确定的击实次数,制备成三组共36块击实试样。每一组击实样干密度实测值平均误差不超过2%,可以认为同一组击实样物理状态相同。

2.3.2 试样的PS加固

所用PS溶液的模数为4.1,浓度选用5%和10%两种,为了对比,同时选用已推广于文物保护加固的有机硅(PL)溶液。

加固溶液经计算后准确控制。考虑到采用注射器人工滴注加固不可能使试样完全饱和,按毛细饱和最大饱和度 $S_r=85\%$ 计算,试样孔隙体积为

$$V_u = \left(1 - \frac{U_d}{G_s \cdot U_w}\right) \cdot V$$

U_d ——试样干密度, g/cm^3 ;

V ——试样总体积, cm^3 ;

G_s ——试样土的比重,取 $G_s=2.70$;

U_w ——水的密度,取 $U_w=1.00\text{g}/\text{cm}^3$;

则加固溶液用量为

$$U = \left(1 - \frac{U_d}{2.7}\right) V \times 85\% \quad (\text{ml})$$

将原状夯土及室内重塑击实样手工切制成 $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 立方体样,50℃烘干,测定准确尺寸,计算试样干密度及体积,按上式计算加固液用量。用注射器抽吸相应的加固液,分六个面共两遍均匀点滴完所要求的加固液的体积。

表3,4,5和表6,分别是击实样及原状样的加固情况。

2.4 加固前后试样强度变化

按0.6%/min的应变速度加荷,测定试样的单轴抗压强度,加荷方向与击实样的击实方向或原状样的夯实方向一致。

图4,5,6和7分别是击实样低密度、中密度、高密度试样及原状夯土试样抗压强度与密度关系散点图。图8,9和10分别是击实样低密度、中密度及高密度试样典型的应力—应变曲线。表7是抗压强度分组统计结果。

由图4及表7可知,对于低密度试样,PS加固后强度有明显提高:经5%PS加固后,强度明显提高59%,经10%PS加固后强度提高302%即PS可使低密度土得到有效加固。PS浓度增大,加固效果越明显。与之相比,PL反而降低了土原有的强度。这种异常现象的出现尚不清楚,估计低密度土样孔太大,有机硅起不到加固作用是其中原因之一。

表 3 室内击实样（低密度组）加固情况

样号	干密度 (g/cm ³)	加固液	试样体 积 V (cm ³)	加固液用量 U (cm ³)	U/V (%)
L1	1.432	—	137.768	—	—
L2	1.444	—	137.773	—	—
L3	1.440	—	144.259	—	—
L4	1.444	5%PS	133.677	52.856	39.54
L5	1.446	5%PS	143.767	56.756	39.48
L6	1.453	5%PS	141.911	55.711	39.26
L7	1.450	10%PS	141.862	55.852	39.37
L8	1.452	10%PS	144.724	56.860	39.29
L9	1.458	10%PS	130.000	52.003	39.10
L10	1.444	PL	149.756	59.215	39.54
L11	1.432	PL	131.544	52.510	39.92
L12	1.437	PL	138.980	55.260	39.76

表 4 室内击实样（中密度组）加固情况

样号	干密度 (g/cm ³)	加固液	试样体 积 V (cm ³)	加固液用量 U (cm ³)	U/V (%)
M1	1.562	—	135.937	—	—
M2	1.556	—	133.928	—	—
M3	1.559	—	135.336	—	—
M4	1.547	5%PS	134.852	48.949	35.30
M5	1.571	5%PS	135.758	48.252	35.54
M6	1.561	5%PS	140.360	50.329	35.86
M7	1.561	10%PS	137.061	49.146	35.85
M8	1.560	10%PS	139.328	50.003	35.89
M9	1.562	10%PS	133.369	47.781	35.83
M10	1.568	PL	141.187	50.315	35.64
M11	1.548	PL	126.763	45.973	36.26
M12	1.547	PL	128.121	46.506	36.30

样号	干密度 (g/cm ³)	加固液	试样体 积 V (cm ³)	加固液用量 U (cm ³)	U/V (%)
H1	1.683	—	133.958	—	—
H2	1.684	—	137.979	—	—
H3	1.671	—	136.900	—	—
H4	1.676	5%PS	134.080	43.223	32.24
H5	1.673	5%PS	144.288	46.650	32.33
H6	1.685	5%PS	137.886	44.053	31.95
H7	1.671	10%PS	127.742	41.381	32.39
H8	1.681	10%PS	134.964	43.296	32.08
H9	1.677	10%PS	136.776	44.049	32.21
H10	1.680	PL	137.997	44.312	32.11
H11	1.671	PL	134.630	43.613	32.39
H12	1.655	PL	138.148	45.448	32.90

表 5 室内击实样（高密度组）加固情况

样号	干密度 (g/cm ³)	加固液	试样体 积 V (cm ³)	加固液用量 U (cm ³)	U/V (%)
1#	1.460	—	145.441	—	—
2#	1.455	—	138.907	—	—
3#	1.580	—	139.206	—	—
4#	1.562	5%PS	136.849	49.027	35.83
5#	1.614	5%PS	135.851	46.446	34.19
6#	1.514	5%PS	143.083	53.423	37.34
7#	1.542	10%PS	133.816	48.783	36.46
8#	1.632	10%PS	141.840	47.690	33.62
9#	1.473	10%PS	140.953	54.447	38.63
10#	1.522	PL	136.477	50.613	37.09
11#	1.419	PL	140.129	56.511	40.33
12#	1.425	PL	139.401	55.954	40.14

表 6 原状夯土试样加固情况

表 7 室内击实样加固前后强度变化统计结果

样号	干密度 (g/cm ³)	加固液	单轴抗压强度 Mpa	加固后强度变化 (%)
L1, L2, L3	1.439	—	0.333	—
L4, L5, L6	1.448	5%PS	0.528	+58.6
L7, L8, L9	1.453	10%PS	1.339	+302.1
L10, L11, L12	1.438	PL	0.254	-23.7
M1, M2, M3	1.559	—	0.647	—
M4, M5, M6	1.360	5%PS	1.224	+89.2
M7, M8, M9	1.561	10%PS	2.075	+220.7
M10, M11, M12	1.554	PL	0.746	+15.3
H1, H2, H3	1.679	—	1.722	—
H4, H5, H6	1.678	5%PS	1.578	-8.4
H7, H8, H9	1.676	10%PS	1.745	+1.3
H10, H11, H12	1.669	PL	1.445	-16.1

表 8 原状夯土加固前后崩解特性变化

样号	加固液	浸入静水中崩解特征
A1	—	17 秒开始掉粒崩解, 完全崩解后呈软泥状。
A2	—	15 秒开始掉粒崩解, 完全崩解后呈软泥状。
A3	5%PS	2 分钟出现表面裂隙, 并从裂隙中掉粒, 完全崩解后, 呈软泥夹碎块。
A4	5%PS	2 分 20 秒出现表面裂隙, 并从裂隙中掉粒, 完全崩解后, 呈软泥夹碎块。
B1	—	10 秒开始掉粒崩解, 完全崩解后呈软泥状。
B2	—	13 秒开始掉粒崩解, 完全崩解后呈软泥状。
B3	10%PS	32 分出现表面裂隙, 36 小时尚无掉粒, 完全崩解后呈软泥状。
B4	10%PS	38 分出现表面裂隙, 36 小时尚无掉粒, 完全崩解后呈软泥状。
C1	—	23 秒开始掉粒崩解, 完全崩解后呈软泥状。
C2	—	20 秒开始掉粒崩解, 完全崩解后呈软泥状。
C3	PL	16 秒开始掉粒崩解, 完全崩解后呈软泥状。
C4	PL	20 秒开始掉粒崩解, 完全崩解后呈软泥状。

由图 5 及表 7 可知, 中密度试样经 PS 加固后强度亦有明显的提高: 经 5%PS 加固后强度提高 89%, 经 10%PS 加固后强度提高 221%, 即 PS 也可使中密度土得到有效加固, 加固效果与浓度成正相关。与之相比, PL 可使中密度土得到一定程度加固。

图 6 和表 7 可知, 高密度试样经 5%PS 和 10%PS 加固后强度变化不大。根据加固前后试样加荷破坏的特点可以看出, 高密度试样渗透性很小, 加固后溶液渗入深度约 2~4mm, 从而仅在试样表面形成一个薄的加固外壳。试样受力时, 该外壳模量大于其内部的未加固土, 从而优先破坏, 对试样整体强度影响不大, 甚至因外壳破坏减小了试样受力面积, 试样的表观强度反而下降。

由图 7 可知, 原状夯土经 PS 加固后强度也明显提高, 定性来看, 10%PS 加固效果优于 5%PS。由于原状夯土试样初始干密度差别较大, 干密度与 PS 加固材料两者对强度的影响共同存在, 因此, 难以区分出 PS 材料加固后的强度增长量到底是多少。

由图 8 和图 9 可知, 经 PS 加固后, 低密度和中密度试样的比例极限明显增大, 弹性模量也有所提高, 表现在应力—应变曲线的线性段变长和斜率增大。图 10 说明, 高密度试样经 PS 加固前后材料性能基本相似。

综合来看, PS 溶液对低密度和中密度夯土有明显的补强作用, 对高密度夯土影响不大。夯土成层状, 软层与硬层相间, 软层自身强度低, 是补强加固的重点, 硬层自身强度高, 无需进一步补强, PS 材料正好能适应这一要求。至于 PS 溶液的浓度, 可根据土体可灌性, 防止墙体表面风化、增强土体水稳性等具体加固要求选择, 不宜仅从补强的角度一味的增大 PS 溶液浓度。

表 9 破城子夯土试样经加固后风洞模拟实验

试样编号	胶结剂种类	吹蚀面积 cm ²	起止时间 min	Δh	吹蚀速度 V (m·s ⁻¹)	吹蚀前重 G ₀ (g)	吹蚀后重 G ₁ (g)	吹蚀量 ΔG (g)	吹蚀模数 kg/m ² hrs	备注
A	10%PS	25	20	6.86	10	239.5	239.5	0		以净风吹蚀
B	5%PS	25	20	6.86	10	204.5	204.5	0		
C	5%LS	25	20	6.86	10	237.0	237.0	0		
D	有机硅	25	20	6.86	10	215.7	215.7	0		
E	原状样	25	20	6.86	10	215.4	215.4	0		
F	重塑样	25	20	6.86	10	202.0	201.8	0.2	0.24	
A	10%PS	25	20	3.44	7.0	239.5	239.4	0.1	0.12	挟沙风吹蚀
B	5%PS	25	20	3.44	7.0	204.5	204.0	0.5	0.6	
C	5%LS	25	20	3.44	7.0	237.0	236.7	0.3	0.36	
D	有机硅	25	20	3.45	7.0	215.7	215.4	0.3	0.36	
E	原状样	25	20	3.45	7.0	215.4	214.65	0.75	0.9	
F	重塑样	25	20	3.45	7.0	261.8	199.6	62.2	74.54	
A	10%PS	25	30	6.86	10	226.3	226.3	0		以净风吹蚀
B	5%PS	25	30	6.86	10	201.0	201.0	0		
C	5%LS	25	30	6.86	10	210.3	210.3	0		
D	有机硅	25	30	6.86	10	221.0	221.0	0		
E	原状样	25	30	6.86	10	191.3	191.3	0		
F	重塑样	25	30	6.86	10	189.0	189.0	0		

表9续

试样编号	胶结剂种类	吹蚀面积 cm ²	起止时间 min	Δh	吹蚀速度 V (m/s)	吹蚀前重 G ₀ (g)	吹蚀后重 G ₁ (g)	吹蚀量 ΔG (g)	吹蚀模数 kg/m ² hrs	备注
A	10%PS	25	20	6.913	10	226.3	226.1	0.2	0.24	以挟沙风吹蚀
B	5%PS	25	20	6.913	10	201.0	200.0	1.0	1.2	
C	5%LS	25	20	6.913	10	210.5	209.5	0.8	0.96	
D	有机硅	25	20	7.00	10	221.0	217.5	3.5	4.2	
E	原状样	25	20	7.00	10	191.5	187.0	4.3	5.16	
F	重塑样	25	20	7.00	10	189.0	179.5	9.5	11.4	
A	10%PS	25	10	15.85	15	226.1	225.0	1.1	2.64	挟沙风吹蚀
B	5%PS	25	10	15.85	15	200.0	198.6	1.4	3.36	
C	5%LS	25	10	15.85	15	209.5	208.5	1.0	2.4	
D	有机硅	25	10	15.85	15	217.5	212.5	5.0	12.0	
E	原状样	25	10	15.85	15	187.0	178.5	8.5	20.4	
F	重塑样	25	10	15.85	15	179.5	157.5	22.0	52.8	
A	10%PS	25	4	28.05	20	225.0	224.0	1.0	6.0	挟沙风吹蚀
B	5%PS	25	4	28.05	20	198.6	196.5	2.1	12.6	
C	5%LS	25	4	28.05	20	208.5	208.0	0.5	3.0	
D	有机硅	25	4	28.15	20	212.5	207.0	5.5	33.0	
E	原状样	25	4	28.15	20	178.5	168.0	10.5	63.0	
F	重塑样	25	4	28.15	20	157.5	130.0	27.5	165.0	

2.5 加固前后试样水稳性变化

细粒土的抗水稳定性与土的活动性紧密相关。同一种土加固前后水稳变化能很好的反映加固材料的加固效果。选用原状夯土，切成四块，两块加固，另两块未加固，共同构成一组，对比在水中的崩解特征。表 8 是三组崩解对比试验结果。由于夯土密度的变异特性，不同组别夯土密集度稍有不同，故开始崩解时间也有差别。但同一组四块试样取自同一位置。密度相近，崩解时间可以对比。

从表 8 可知，经 PS 加固后，原状夯土开始崩解的时间明显延长，5%PS 加固后初始崩解时间延长 6 倍，10%PS 加固后初始崩解时间延长 174 倍。证明 PS 加固后的试样，具有很好的抗水崩解性。相比之下，经 PL 加固的试样，水稳性未有提高的迹象。以高温（一般 100℃左右）高压（一般 6kg/cm²）备制的 PS 水溶液，当渗透在夯土中凝固后，在通常条件下，有很好的耐水性，雨水不可能使其崩解。因此，用 PS 溶液喷涂加固的夯土墙有很好的耐雨水冲刷性。

2.6 夯土试样经加固后风蚀的风洞模拟实验

对破城子夯土墙试样，人工做成 50×50×50mm 的试块。分别以 5%PS, 10%PS, 5%LS 和 10%PL 进行渗透加固，待试块自然干燥后和未经加固的原始试块一同进行风蚀的风洞模拟实验。

风蚀的风洞模拟实验在中国科学院兰州沙漠研究所风洞中进行。沙风洞是一直流闭口吹气式低速风洞。风洞全长 38.78 米，其中实验段长 16.23 米，截面积 1×0.6m²，风速从 2—35 米/秒连续可调，紊流强度在 0.4% 以下。实验中将试样水平置于可任意升降的样品槽中，样品槽位于实验段入口下风向 12 米处，这样便可以起风做试样风蚀的风洞模拟实验。实验结果见表 9、图 11。

实验的结果表明，当 10 米/秒挟沙风吹蚀时，分别以 5%PS, 10%PS, 5%LS 和 10%PL 加固试样的吹蚀量分别为 1.0 克，0.2 克，0.8 克和 3.5 克，未经加固的破城子夯土样和重塑样吹蚀量分别为 4.3 克和 9.5 克。当以 20 米/秒挟沙风吹蚀时，分别以 5%PS, 10%PS, 5%LS 和 10%PL 加固试样的吹蚀量分别为 2.1 克，1.0 克，0.5 克和 5.5 克，未经加固的破城子夯土试样和重塑样的吹蚀量分别为 10.5 克和 27.5 克。

对实验结果进行比较，可以明显看出经 PS 加固的破城子夯土有很好的耐风蚀性，经 10%PS 加固的夯土耐风蚀性更好。用 5%LS（硅酸锂）加固的破城子夯土的耐风蚀性也非常好，但硅酸锂在我国较昂贵，同时生产也很少，因此对硅酸锂加固石质文物和土质文物的系统研究一直未能进行。用 10%有机硅加固的破城子夯土试样的耐风蚀性也明显提高，但有机硅十分昂贵，在戈壁沙漠炎热环境中的耐候性远不如高模数的硅酸钾和硅酸锂，因此，在规模宏大的土建筑遗址上进行保护加固的可能性也不大。

三、现场加固实验

在实验室内进行大量实验的基础上，于 1993 年秋，我们分别在安西县的破城子古城遗址和吐鲁番的交河古城进行了现场加固实验。

破城子实验位置选在城南面夯土墙上。将夯土墙以不同的风化程度分成小块，以不同浓度的 PS 水溶液和不同的施工工艺进行喷涂渗透加固试验。

交河古城的现场试验选在城中心大殿南侧的夯土墙、生土墙龛和土坯墙体上进行(封二彩版2)。

现场喷涂加固分别以3%、5%和7%三种浓度的PS溶液进行试验。

喷涂工艺采取以下几种:

3.1 先以净水喷涂渗透,再做PS溶液喷涂渗透加固。

根据我们以前用PS溶液进行化学固沙的经验,先在夯土墙水喷洒水使渗透3cm左右。稍等片刻,等墙体半干时,再喷涂PS溶液,这样做的目的是为了获得较好的渗透效果。因为做PS喷涂渗透加固都在气温较高的条件下进行的,这样PS凝固的速度适中,加固效果好。但是,当气温较高时,墙体表面的温度就更高。另外,古代土建筑遗址的墙体由于长期经雨水冲刷,混有泥浆的雨水在墙体表面流刷而形成一层较致密的壳皮,这种致密的壳皮渗透性较差。当夯土墙体表面温度较高,又有致密壳皮的情况下,PS溶液在墙体表面凝固过快,这样大量PS凝固在墙体表面,大大降低PS溶液继续渗透。如果先用净水将墙体喷洒潮湿,就可以防止上述问题产生。

3.2 较高浓度的PS溶液一次性喷涂加固和较低浓度多次喷涂加固。

进行现场试验时,我们采用了两种喷涂加固的方法。根据夯土墙的致密程度,即渗透性好坏。我们在此现场试验中,一次性喷涂加固,所选PS溶液的浓度为7%。

另一种加固方法是,先喷涂较低浓度的PS溶液进行第一次加固。喷涂时注意观察,当PS溶液明显不渗透时,第三次喷涂完毕。待第一次喷涂的PS溶液完全凝固干燥后,根据夯土的疏松程度,以相同的方法做第二次、第三次或更多次的喷涂加固。在天气正常的情况下,一般每次喷涂间隔时间为三天。喷涂在晴天,气温在25℃左右进行为最佳条件,因此我们的现场试验都在春秋两季进行。同时,进行多次喷涂时,逐渐提高PS溶液的浓度。此现场试验的PS溶液的浓度为:第一次为3%,第二次为5%,第三次为7%。

3.3 喷涂工具

根据现场条件,我们一般采用手动农药喷雾器和电动空压机喷枪进行喷涂。电动空压机喷枪的分散性好,喷涂均匀,手动喷雾器分散性差,喷涂的均匀程度也差。但许多古代土建筑遗址都在偏僻的戈壁沙漠上,无供电条件,这种情况下用手动喷雾器喷涂加固也十分简便,喷涂时按程序细心操作,也能获得好的加固效果。

四、结论

古代土建筑遗址的保护主要应解决两个关键性的问题,一是防止风沙的风蚀破坏作用。因为在我国西北戈壁沙漠中,风沙对土建筑遗址的风蚀是最主要的破坏因素。另外,雨水冲刷也是一个重要的破坏因素。因沙土中含有一定量的膨胀性粘土,这种情况下,夯土遇水最容易崩解。虽然我国西北地区干旱少雨,但偶尔的暴雨也会对土建筑遗址造成十分严重的破坏。

试验证明用PS加固的夯土有很好的耐风蚀性和耐水的崩解性。

PS溶液对中、低密度的夯土渗透性很好,加固过的夯土能基本保持原夯土的质感和外观,且夯土的力学强度成倍增加,这符合文物保护原则。

现场试验还证明:选用净水将夯土墙喷涂潮湿,尔后做PS溶液喷涂加固,这样PS