

# 通古斯巴西古城遗址土体特性及 PS 加固试验

徐桂玲, 李春长

(新疆文物古迹保护中心, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 通古斯巴西古城遗址是新疆重要的土遗址之一, 原为唐龟兹驻兵的安西都护府所在地。遗址中曾出土大批文物, 对于研究西域的屯垦历史和古代城址布局等有重大意义。为了系统地研究了通古斯巴西古城遗址土的工程特性, 在实地调查的基础上, 通过室内试验对通古斯巴西古城遗址土的物理、力学、水理和化学性能进行测试。此外, 还测定了不同 PS 浓度加固后遗址土重塑土块抵抗风蚀雨蚀能力的差异, 进一步确定了 PS 的渗透加固措施对土质文物的防风化及雨蚀效果。结果表明, 7% 的 PS 溶液防风化抗雨蚀效果要更为显著。研究结果可为 PS 的施工应用提供依据。

**关键词:** 通古斯巴西古城; 土体特征实验; PS 加固

**中图分类号:** K928.5 **文献标识码:** A

## 0 引言

通古斯巴西古城遗址位于新疆阿克苏地区新和县, 曾是唐龟兹兵驻守的安西都护府所在地。通古斯巴西古城遗址规模宏大、保存相对完好、制式清晰, 专家推断其建于 647 ~ 692 年。遗址平面呈方形, 南北长 250m, 东西宽 230m, 面积约 5.75 万 km<sup>2</sup>。遗址土体的结构形式主要为夯土, 局部为土坯砖砌筑。城内散见陶片、方砖、残磨盘、铁器等, 曾出土大量宝贵历史文物, 对于研究西域屯垦历史有重要意义。2006 年 5 月, 通古斯巴西古城遗址被国务院公布为第六批全国重点文物保护单位。



图 1 通古斯巴西古城遗址航拍图

Fig. 1 Aerial map of Tonggusibaxi ancient city sites

目前, 通古斯巴西古城遗址受自然和人为因素影响, 出现墙体坍塌、开裂、基础掏蚀凹进等病害现象, 保存现状堪忧。为了科学合理的对遗址进行保护和规划, 从遗址的多个部位选取试样在实验室中对通古斯巴西古城遗址土的物理、力学、水理和化学性能进行测试, 深入了解遗址的土体工程特性<sup>[1]</sup>。此外, 还测定了不同浓度的 PS 加固后遗址土重塑土块抵抗风蚀雨蚀能力的差异, 进一步确定了 PS 的渗透加固措施对土质文物的防风化及雨蚀效果。

## 1 土体实验分析

### 1.1 土体取样

根据城区墙体及地形地貌特点以及墙体裂隙、冲沟、基础掏蚀和堆积物的展布特征, 以墙体和墙基为主要取样位置, 进行了全面系统的取样及试验工作。详见表 1。

### 1.2 试验结果分析

土样的各项物理性质见表 2。

**1.2.1 土的基本物理性质** 主要从 4 个方面进行分析。

1) 含水率分析。经测试, 通古斯巴西古城遗址墙体土样的含水率为 0.96% ~ 2.14%, 含水率相对较低(表 2)。通常, 含水率越低对 PS 渗透加固越有利, 土的毛细负压越高, 越有利于 PS 浆液向地层深部扩散。另一方面, 太阳辐射在墙体中形成温度

表 1 通古斯巴西古城墙体及墙基取样位置一览表

Table 1 Sampling Location of Tonggusibaxi ancient city sites' wall and wall base

序号	样号	取样位置	样品类型	野外描述
1	EP	东墙墙体外侧基础附近	坍塌土坯	坍塌极为严重,土坯风化雨蚀较严重。
2	EH	东墙墙体外侧基础附近	坍塌夯土	坍塌极为严重,坍塌块体较坚硬。
3	WP	西墙墙体外侧基础附近	坍塌土坯	坍塌极为严重,多为新近坍塌块体,未经雨水浸泡。土坯尺寸为 45cm × 24cm × 10cm。
4	WH	西墙墙体外侧基础附近	坍塌夯土	坍塌极为严重,多为新近坍塌块体,未经雨水浸泡,土体结构破坏不大。
5	S	南墙墙体外侧基础附近	坍塌夯土	整体性较好,土块较坚硬。
6	NP	北墙墙体外侧基础附近	坍塌土坯	坍塌较严重,为新近坍塌块体,土坯尺寸为 45cm × 24cm × 10cm。
7	NH	北墙墙体外侧基础附近	坍塌夯土	坍塌较严重,为新近坍塌块体,土体较密实。

表 2 遗址土样含水率、密度、自由膨胀率、液限、塑限、塑限指数指标

Table 2 Moisture content, density, free expansion, liquid limit, plastic limit, plastic limit index of the earth of Tonggusibaxi ancient sites

序号	土样编号	含水率/%	密度 ( $\rho$ )/(g · cm <sup>-3</sup> )	自由膨胀率 ( $\delta$ )/eI/%	液限 ( $W_L$ )/%	塑限 ( $W_P$ )/%	塑性指数
1	WP	0.40	1.77	-	25.4	14.8	10.6
2	EH	1.80	1.72	-	25.6	15.6	10.0
3	WH	1.49	1.72	0.00	24.8	15.3	9.5
4	S	0.33	1.58	10.00	25.6	16.0	9.6
5	NH	2.14	1.73	0.00	26.4	16.1	10.3
6	NP	0.96	1.65	19.00	24.3	14.5	9.8

梯度,迎光面温度升高快,此时进行 PS 渗透加固,使得已经进入墙体的 PS 溶液会在温度梯度的作用下,由内向外反向扩散。因此,在干燥、日温差较大的新疆南疆地区,PS 渗透加固尽量避免阳光直射。

2) 土的颗粒分析试验。遗址土多为粉质粘土(图 2、图 3 为颗分曲线),表 3 为试样各粒组的百分含量以及曲率系数和不均匀系数。根据 20% 累积百分含量对应的粒径  $D_{20}$  可估算遗址土的渗透系数  $K$  约为  $1 \times 10^{-5}$  cm/s。不均匀系数  $C_u$  大于 5,曲率系数  $C_c$  在 1~3 之间,这两个条件同时满足时为良好级配的土,即非均粒土。表 3 的结果表明,试样多为良好级配的土,即各粒组含量相差不是太大。总体来看遗址土的渗透性较好,为了达到更好地加固效

果,PS 渗透加固以少量多次为宜<sup>[2]</sup>。由于墙面直立,需要控制喷洒用量,防止出现表面流沥现象。

3) 密度试验。通古斯巴西古城遗址墙体的密度为  $1.58 \sim 1.77$  g/cm<sup>3</sup>(表 2)。各墙体密度不一,其风化程度也各异。根据实验数据可以得知:西墙土坯块体的密度较大,对墙体的加固可以有重点地进行加固。

4) 自由膨胀率试验。试验结果表明,通古斯巴西古城遗址土样的自由膨胀率差异较大(表 2),这与粘土矿物成分、胶粒含量、化学成分和水溶液性质等有着密切的关系<sup>[3]</sup>,由于地表水流和风蚀作用等使得地表松散的坡积物中的颗粒含量发生变化,从而使得自由膨胀率也有较大的差异。

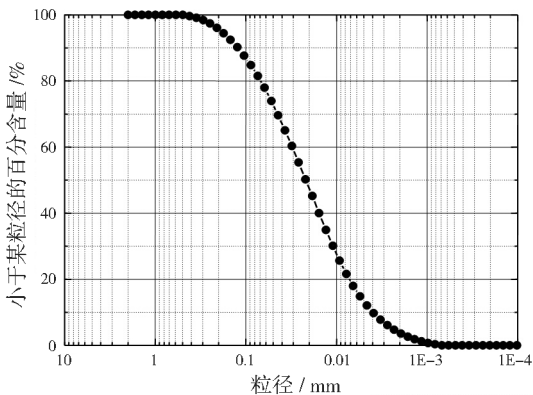


图 2 试样 EH 粒分曲线

Fig. 2 EH curve grain sample points

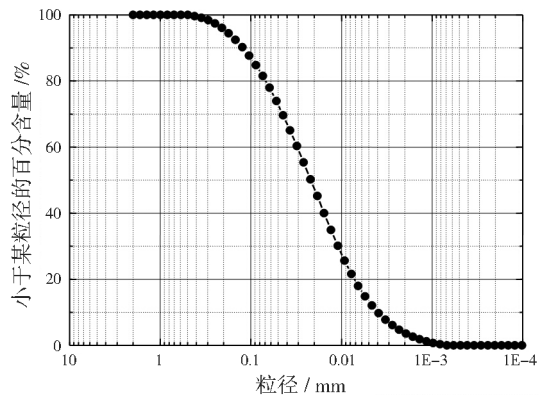


图 3 试样 NP 颗分曲线

Fig. 3 NP curve grain sample points

表3 颗粒分析试验结果  
Table 3 Particle analysis results

序号	试样编号	砾粒 ( >2mm) 含量/%	砂粒 (0.05 ~ 2mm) 含量/%	粉粒 (0.005 ~ 0.05mm) 含量/%	粘粒 ( <0.005mm) 含量/%	$d_{20}$ /mm	不均匀 系数 (Cu)	曲率系数 (Cc)	级配	土的工程 分类
1	EH	0	45	47	8	0.015	7.84	1.03	良好	低液限粘土
2	EP	0	47	46	7	0.016	7.50	1.01	良好	低液限粘土
3	WH	0	45	47	8	0.011	10.00	0.79	不良	低液限粘土
4	WP	0	35	53	12	0.007	9.30	0.84	不良	低液限粘土
5	NH	0	22	63	15	0.007	6.67	0.94	不良	低液限粘土
6	NP	0	27	60	13	0.007	7.89	1.26	良好	低液限粘土
7	S	0	42	49	9	0.010	10.58	0.90	不良	低液限粘土

1.2.2 土的水理性质(界限含水率试验) 通古斯巴西古城遗址土的液限和塑限都较低(表2),液限在 24.3% ~ 26.4% 之间,塑性在 14.5% ~ 16.1% 之间,塑性指数在 9.5 ~ 10.6 之间,可塑性比较差,属于低塑性土。

1.2.3 土的力学特征 主要分析抗压强度和抗剪强度。

1) 抗压强度试验。表4中试验结果显示:通古斯巴西古城遗址墙体土样的抗压强度较小,在 0.17 ~ 0.71MPa 之间,其强度随风化程度的加深

而减小,由此可知,整个古城墙体风化程度都较高。

2) 抗剪强度试验。通古斯巴西古城遗址墙体遭受风化严重,其抗剪强度指标  $c$  值在 25 ~ 70kpa 之间, $\varphi$  值在 40°左右(表4)。从试验结果可以看出通古斯巴西古城遗址土体由于施工时间、位置的不同和遭受风化程度各异,其抗剪强度指标分布较广,特别是粘聚力  $c$  均小于 70kPa,抗剪强度随风化程度的加深而不断减小,土体的内摩擦角  $\varphi$  值在 40°左右。

表4 通古斯巴西古城遗址土体抗压强度、内摩擦角、粘聚力

Table 4 Soil compressive strength, internal friction angle, cohesion of Tonggusibaxi ancient city sites

序号	样号	破坏荷载/N	试件面积/mm <sup>2</sup>	试件高度/mm	抗压强度/MPa	内摩擦角/ $\varphi$ /°	粘聚力/ $c$ /kPa
1	S	980	2782	51	0.35	46	49
2	E	470	2642	51	0.17	49	25
3	N	2050	2867	52	0.71	42	70
4	N	910	2788	48	0.32	34	53
5	W	1390	2672	51	0.51	38	62
6	W	740	3353	50	0.22	35	33

### 1.3 易溶盐化学成分

为了测定通古斯巴西古城遗址土体中易溶盐的种类及含量,采用水化学分析法进行测试。易溶盐化学分析试验结果表5显示:通古斯巴西古城遗址所在地层易溶盐化学组成与地貌单元的关系密切,

浸出液的水质类型主要为 Na - K - Cl - NO<sub>3</sub> 型。现场调查的结果表明,由于降水淋滤沿地表汇聚,易溶盐富集明显,出现白色、黄色盐层,并且在部分墙体根部出现酥碱现象<sup>[4]</sup>。

表5 通古斯巴西古城遗址土样易溶盐化学分析结果

Table 5 Chemical analysis of soil samples soluble salts results of Tonggusibaxi ancient city sites

样号	类型	pH	EC/ ms · cm <sup>-1</sup>	阳离子浓度/mg · L <sup>-1</sup>				阴离子浓度/mg · L <sup>-1</sup>		
				Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
EH	东墙坍塌夯土浸出液	7.16	1.57	264.36	23.30	12.86	328.58	343.80	321.08	867.29
EP	东墙坍塌夯土浸出液	7.41	1.50	365.08	31.49	20.30	314.98	735.40	821.18	357.27
WP	西墙坍塌夯土浸出液	7.29	1.30	166.73	13.27	8.02	227.63	293.04	47.17	497.42
WH	西墙坍塌夯土浸出液	6.84	1.53	356.13	38.34	36.40	1308.17	1314.93	4151.80	87.79
S	南墙坍塌夯土浸出液	6.74	1.56	90.41	22.47	5.12	143.80	221.73	105.27	151.04
NP	北墙坍塌夯土浸出液	7.14	1.03	1885.56	135.32	66.37	1041.92	4056.34	2266.62	591.74
NH	北墙坍塌夯土浸出液	6.70	1.50	305.86	49.21	19.27	554.27	960.33	1501.13	230.60

### 1.4 矿物成分测试

X-射线衍射试验结果表明,通古斯巴西古城遗址土的物质成分中石英和白云母含量最高,占总量 50% 以上,其次是方解石,绿泥石,占总量 20% 左右,此外还含有少量白云石、白云母、正长石、钠长

石、地开石等矿物(表 6),整个遗址墙体的主要矿物成分基本一致。剥落或坍塌体的形成并没有改变土的基本矿物成分,而仅表现为土体颗粒成分、易溶盐成分及结构的变化。所以,水盐迁移、热致劣化等物理风化过程,是干旱区土遗址劣化的根本原因。

表 6 通古斯巴西古城遗址土样 X 射线衍射半定量分析结果

Table 6 Soil samples semi-quantitative X-ray diffraction analysis of Tonggusibaxi ancient sites (%)

样号	石英	方解石	绿泥石	白云石	白云母	岩盐	正长石	钠长石	地开石	镁方解石
EH	29	15	7	4	32	—	6	5	3	—
WP	29	14	11	3	33	—	—	4	6	—
WH	31	13	7	4	34	—	—	7	4	—
S	31	9	15	6	—	—	—	7	9	18
NH	22	11	9	6	35	1	8	3	5	—
NP	20	12	10	6	35	—	6	4	7	—

### 1.5 波速特征

分别测试试样长、宽、高三个方向的波速,得到的结果如表 7 所示。长度及宽度方向为平行夯土层方向,高度方向与夯土层垂直。声波测试结果显示,

通古斯巴西古城遗址土的纵波波速  $V_p = 757 \sim 1061 \text{ m/s}$ ,同一试样同一长度的不同方向上的波速也有明显的不同,说明垂直于夯土层与平行于夯土层的波速有显著差异。

表 7 通古斯巴西古城遗址土样声波纵波波速

Table 7 Acoustic longitudinal wave velocity of soil samples of Tonggusibaxi ancient city sites

样号	长/cm	波速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	宽/cm	波速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	高/cm	波速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
EH	5.1	879	5.2	1000	5.1	773
WH	5.5	859	5.8	795	5.5	873
WP	5.4	931	5.3	757	5.2	1061
NH	5.3	746	5.3	828	5.2	828
NP	5.0	962	5.3	981	5.2	1040

## 2 PS 加固试验

目前,对我国西北干旱和半干旱地区土遗址的加固保护,主要是预防风蚀破坏和强降雨雨蚀破坏,大量试验和实践证明土质文物的防风化及防雨蚀采用 PS 渗透加固措施效果良好<sup>[5]</sup>。如新疆的交河故城、高昌故城、石头城遗址、米兰遗址以及南疆地区的长城和烽燧,甘肃凉州、敦煌境内的长城烽燧等<sup>[6]</sup>,其防风化效果显著。为了确定合适的 PS 加固工艺,本次试验测定了不同浓度 PS 加固后遗址土重塑土块抵抗风蚀和抗雨蚀能力的差异。

土体中的粘土矿物遇水膨胀是土遗址风化的主要原因。粘土矿物的土体之间具有大量空

隙,PS 作用于粘土矿物后,粘土颗粒与 PS 中钾离子之间的相互交换和吸附,使得分散的粘土小颗粒形成体积较大的团粒,构成了整体的胶结,从而改变了粘土颗粒中分离的、片状的晶态粘土矿物的微观结构,形成一种致密的非晶态凝胶网状结构,这种结构的变化使土体的物理强度和抗风化能力大大提高<sup>[7]</sup>。

按照《土工试验方法标准》的要求,采用静力压实制样法,选择与原状样相近干密度的土样,将压实样切成  $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$  的立方体,分别做风蚀和雨蚀试验,每种试验所用试样分别为:不加固试样、浓度为 3% PS 加固试样和浓度为 7% PS 加固试样。试样制备参数参见表 8。

表8 通古斯巴西古城遗址土风蚀试样制样参数

Table 8 Soil erosion sample preparation parameters of Tonggusibaxi ancient city sites

试样	初始含水率/%	密度/cm <sup>3</sup>	干密度/g · cm <sup>-3</sup>	重塑样含水率/%	重塑样密度/g · cm <sup>-3</sup>
EH	1.80	1.72	1.69	8.50	1.84
WP	0.40	1.77	1.76	8.23	1.91
WH	1.49	1.72	1.70	6.68	1.81
S	0.33	1.58	1.58	8.48	1.71
NH	2.14	1.73	1.69	8.13	1.83
NP	0.96	1.65	1.63	9.46	1.79

2.1 抗风蚀试验

风蚀试验前测量试样迎风面面积并拍照、称重,方便风蚀后进行对比。试样迎风面距出风口 9m,试样底面距沙面 4 cm,试样间距 5 cm,试样背风面抵以钢板,防止试样被吹翻。试验上方安置毕托管测量风速,1 号管距沙面 59 cm,二号管距沙面 64cm。风蚀试验过程中,试样以挟沙风吹蚀 10min,风速 18m/s,每次风蚀后补沙。每批试样风蚀结束后进行称重和拍照,试样过程如图 4 所示。

试验结果如表 9 显示:当以 18m/s 挟沙风吹蚀时,未加固试样的风蚀量分别为 3.775g 和 9.759g;经 3% PS 加固试样的风蚀量分别为 1.886g 和 3.501g;而经 7% PS 加固试样的风蚀量分别为 0.349g 和 1.170g,其抗风蚀能力随加固所用 PS 溶液浓度增大而增强。

试样风蚀效果对比如图 5 所示,未加固的试样迎风面破坏严重,形成深浅不一的风蚀洞;3% PS 加固的试样迎风面形成了较浅的风蚀坑;7% PS 加固的试样外观无明显变化,可以直观地看出经过 PS 溶

固过的试样有非常好的抗风蚀性。



图4 风蚀过程

Fig.4 Erosion process

表9 通古斯巴西古城遗址重塑试样挟沙风蚀试验

Table 9 Remodeling laden sand erosion test sample of Tonggusibaxi ancient city sites

样号	吹蚀面积/cm <sup>2</sup>	历时/min	吹蚀风速/m · s <sup>-1</sup>	风蚀前重/g	吹蚀后重/g	风蚀量/g	吹蚀模数/g · h <sup>-1</sup> · cm <sup>-2</sup>
WH-0	24.00	10	18	244.663	240.888	3.775	0.9
WH-3	24.50	10	18	232.064	230.178	1.886	0.5
WH-7	24.99	10	18	227.611	227.262	0.349	0.1
NH-0	25.00	10	18	236.957	227.198	9.759	2.3
NH-3	24.99	10	18	244.395	240.894	3.501	0.8
NH-7	29.16	10	18	251.238	250.068	1.170	0.2



a) 风蚀前不同加固土样



b) 风蚀后不同加固土样

图5 重塑土块试样风蚀前后对比图

Fig.5 Remodeling soil erosion sample before and after comparison chart

## 2.2 抗雨蚀试验

液加制备边长约 5 cm 的立方体土样,分别用浓度为 3%、7% 的 PS 溶液进行加固。利用雨蚀装置模拟降雨对试样的冲蚀,试验时设定恒定水头,并称量试样冲蚀前后质量及烘干后残土质量,记录冲蚀时间,最终以质量损失率衡量不同

PS 浓度的加固效果。

雨蚀试验结果如表 10 所示:历时 3 min 的雨蚀后,未加固试样质量损失率平均为 26.06%;3% PS 加固试样质量损失率平均为 21.78%;而 7% PS 加固试样质量损失率更低,平均为 3.08%,可见 PS 加固对于原状土块的抗雨蚀能力有很大提高<sup>[8]</sup>。

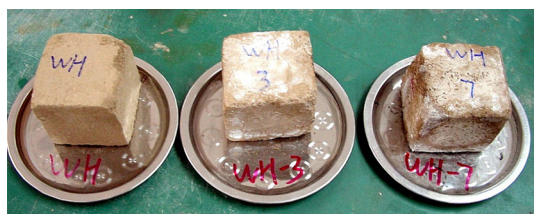
表 10 通古斯巴西古城遗址重塑试样雨蚀试验记录表

Table 10 Remodeling rain erosion test sample of Tonggusibaxi ancient city sites

样号	雨蚀前重/g	历时/min	雨蚀后重/g	烘干后重/g	吸水量/g	质量损失率/%	吸水率/%
WH-0	234.165	3	157.228	142.081	15.147	39.32	10.66
WH-3	231.101	3	243.334	221.289	22.045	4.25	9.96
WH-7	252.219	3	279.543	247.414	32.129	1.91	12.99
NH-0	243.394	3	238.001	212.230	25.771	12.80	12.14
NH-3	254.319	3	157.228	142.081	15.147	39.32	10.66
NH-7	252.187	3	243.334	221.289	22.045	4.25	9.96

遗址土重塑土块试样雨蚀对比如图 6 所示,从图中可以明显看出未加固的试样质量损失几乎达到 50%,而 3% PS 溶液加固过试样质量损失较少,7% PS 溶液加固试样外观基本没有变化。雨蚀试验表

明,对于重塑土块试样,加固所用 PS 溶液浓度越大抗雨蚀能力越强,但 7% PS 溶液加固试样抗雨蚀效果比 3% PS 溶液加固试样提高不大<sup>[9]</sup>。



a) 雨蚀前不同加固土样



b) 雨蚀后不同加固土样

图 6 重塑土块试样雨蚀前后对比

Fig. 6 Remodeling rain erosion clods samples before and after comparison

## 3 结论

通古斯巴西古城遗址的土体结构主要为夯土,局部为土坯砌筑。经实地调查和试验分析,遗址土多为粉土和粘土,含水率相对较低,土体密度小,渗透性强;土体的主要矿物成分基本一致,遗址所在地层浸出液的水质类型主要为 Na-K-Cl-NO<sub>3</sub> 型,即土中易溶盐主要以 KCl、KNO<sub>3</sub>、NaCl、NaNO<sub>3</sub> 等存在。由于遗迹所在地的特殊气候条件,干燥,多风,瞬时强降水等,使得遗址表面风化程度较高,土体的抗压和抗剪强度较低。通过抗风蚀和抗雨蚀试验得出:对于重塑土块试样,加固所用 PS 溶液浓度越大其抗风蚀、抗雨蚀能力越强,但并不是越大越好,本次试验采用的是 3% 和 7% 两种浓度,7% 的 PS 溶液防风化抗雨蚀效果更为显著。考虑到室内实验受缩尺效应影响以及环境的差异,建议在现场开展相应

的工艺性实验,进一步确定 PS 的最佳浓度以及渗透加固措施对土质文物的防风化及雨蚀效果,为 PS 的施工应用提供依据。

最后,在新疆南疆干旱半干旱地区,以通古斯巴西古城遗址为代表的同类遗址在基于良好的试验结果的前提下,建议选择 PS 作为遗址表面抗风蚀雨蚀的加固材料,加固前还需做现场试验进一步确定实验结果。

## 参考文献:

- [1] 梁涛. 新疆苏巴什佛寺遗址保护加固研究[D]. 兰州大学, 2010. LIANG Tao. A study on the protection and reinforcement of the ruins of Subashi Temple, Xinjiang, China [D]. Lanzhou University, 2010.
- [2] 邵明申. PS 加固对非饱和遗址土的渗透特性影响研究[D]. 兰州大学, 2010. SHAO Ming-shen. Influence of PS consolidation on permeability of unsaturated soil from earthen sites [D]. Lanzhou University, 2010.

- [3] 张湧,谢宝玉,郝中海. 膨胀土路基处理技术研究[J]. 公路. 2001, (7): 58-61.  
ZHANG Yong, XIE Bao-yu, HAO Zhong-hai. Expansive soil subgrade treatment technology research [J]. Road, 2001, (7): 58-61.
- [4] 王锦芳,严耿升,杨善龙. 莫高窟崖体可溶盐分布特征研究[J]. 水文地质工程地质, 2010, (6): 116-120.  
WANG Jing-fang, YAN Geng-sheng, YANG Shan-long, Distribution of soluble salts in the cliff strata of the Mogao Grottoes [J]. Hydrogeology and Engineering Geology. 2010, (6): 116-120.
- [5] 邵明申. 交河故城文物本体环境与加固研究[D]. 兰州大学. 2007  
SHAO Ming-shen, Study of environment and reinforcement of main part of the ancient ruins of Jiaohe [D]. Lanzhou University, 2007.
- [6] 王旭东. 中国干旱环境中土遗址保护关键技术研究新进展[J]. 敦煌研究. 2008, (6): 6-12.  
WANG Xu-dong. New progresses on key technologies for the conservation of Chinese earthen sites in arid environment [J]. Dunhuang Res, 2008, (6): 6-12.
- [7] 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. The preliminarily discussion on PS and earthen sites mechanism of action [J]. Dunhuang Research, 2000, (1): 30-35.
- [8] 和法国, 谌文武, 张景科, 等. PS 材料加固交河故城土体试验研究[J]. 敦煌研究, 2007, (5): 32-35.  
HE Fa-guo, CHEN Wen-wu, ZHANG Jing-ke, et al. Study on the experiment of Jiao He ancient city reinforcement by PS [J]. Dunhuang Research, 2007, (5): 32-35.
- [9] 裴强强, 邵明申, 陆立成, 等. PS 加固不同含水率遗址土体的特性研究[J]. 敦煌研究. 2009, (6): 59-65.  
PEI Qiang-qiang, SHAO Ming-shen, LU Li-cheng. PS material reinforcement strength characteristics of sites soil in different moisture contents [J]. Dunhuang Res, 2009, (6): 59-65.

## Soil characteristics of Tonggusibaxi ancient city and site reinforcement using potassium silicate solution

XU Gui-ling, LI Chun-chang

(Center of Conservation of Xinjiang Cultural Heritage, Xinjiang 830000, China)

**Abstract:** Abstract: Tonggusibaxi Ancient City, one of the most important earthen sites in Xinjiang, was a military stronghold of Anxi Frontier? Command in Qiuci during the Tang Dynasty. A large number of cultural relics, having great significance for studies of the cultural history and city layout in the Western Regions in the ancient times, have been unearthed from the site. As described in this paper, during an onsite survey the physical, chemical, mechanical and hydrological properties of the soil were tested in Tonggusibaxi Ancient City. In addition, the anti-erode properties of the soil were tested, after it had been reinforced concentration using potassium silicate(PS) solutions of various concentrations, under rainy and windy conditions. The experiments confirmed that PS could be used to reinforce earth sites and on-site reinforcement projects.

**Keyword:** Tonggusibaxi Ancient City; Experiment of Soil characteristics; PS reinforcement

(责任编辑 潘小伦)