

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0079-06

# 战国秦时期夯土长城加固强度试验研究

赵海英<sup>1,2</sup>, 汪 稔<sup>1</sup>, 李最雄<sup>2,3</sup>, 韩文峰<sup>2</sup>, 谌文武<sup>2</sup>

(1.中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2.兰州大学 文物保护研究中心, 兰州 730000;  
3.敦煌研究院保护研究所, 敦煌 736200)

**摘 要:** 对已风化而面临危险的文物进行渗透加固保护以提高土的胶结强度, 是国际上普遍认可的科学加固方法。通过室内单轴抗压强度、抗剪强度和渗透试验研究发现, 抗压强度随浓度及加固次数增加而提高, 材料具有可重复使用性, 但加固剂的浓度增加不宜超过 7 %;  $\phi$  值随加固剂浓度和加固次数有明显增加趋势,  $c$  值有所提高但变化没有明显的规律性; 土经固化后的渗透系数略有降低, 但变化在同一数量级内, 不影响土的渗透性。综合分析试验结果, 对于密度为  $1.3 \sim 1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  风化墙面, 以浓度 5 %~7 % 的 PS 材料多次加固为宜; 密度为  $1.5 \sim 1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  的风化墙面适宜以 3 %~5 % 浓度的 PS 材料多次加固。加固后强度和渗透性满足文物保护特殊要求。

**关 键 词:** 土遗址; 长城; 夯土; 加固; PS 材料  
**中图分类号:** O 319.56 **文献标识码:** A

## Tentative research on the consolidated Great Wall of Qin Dynasty at the Warring States

ZHAO Hai-ying<sup>1,2</sup>, WANG Ren<sup>1</sup>, LI Zui-xiong<sup>2,3</sup>, HAN Wen-feng<sup>2</sup>, CHEN Wen-wu<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. The Cultural Relic Conservation Centre of Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;  
3. Conservation Institute of Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, China)

**Abstract:** The Great Wall was announced as the first batch of key cultural relic unit under State Protections by State Department in 1961, and was listed as the world cultural heritage by UNESCO in 1987. And these constructions are humankind's precious cultural heritage, and their valuable artistic value is rare worldwide. Through the compression test, the shear strength test and the infiltrate test, the results of test indicate that the compression strength and the shear strength increases with the PS material consistency and the reinforcement times, and that the PS materials can be multiple application. At the same time, the results show that the 7 % PS materials is the best consistency to consolidating the soil of the Great Wall. In addition, the permeability coefficient of the reinforced sample decreases and the permeability meets the requirements of preservation of cultural relics. By a comprehensive analysis, the 3 %—5 % of PS is suitable for consolidating the wall whose dry density is  $1.5 \sim 1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , but 5 %—7 % of PS is fit for consolidating the wall whose dry density is  $1.3 \sim 1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . In sum, the key to protecting ruins is choosing the suitable PS consistency material and consolidation times in order to enhancing penetrability of PS material. So this reinforced method could be effective in protecting the Great Wall of Qin Dynasty in the Warring States in Northwest China.

**Key words:** ancient sites; Great Wall; the ramming wall; consolidation; PS material

### 1 引 言

从公元前 7~6 世纪的战国时期开始, 直至公元 17 世纪的明朝末年, 长城的修筑先后经历了 2 000 多年的时间, 史学家称战国时期修建的长城为“先

秦长城”或“战国长城”<sup>[1-3]</sup>。秦国长城始建于公元前 6 世纪左右, 距今已 2 000 多年的历史, 为我们研究战国时期历史、考古、人文地理、历史地理、环境变迁、历史地震、军事等学科的研究提供了极好的参考<sup>[1,2]</sup>, 具有极高的历史价值、科学价值和艺

收稿日期: 2007-03-26

基金项目: 国家科技支撑重点项目资助 (No. 2006BAK30B02)

作者简介: 赵海英, 女, 1974 年生, 博士, 在站博士后, 主要从事文物保护及地质工程方面的研究工作。E-mail: sinbarhy@163.com

术价值。据甘肃省文物局岳帮湖等人多年调查研究表明(甘肃省文物局报告),战国秦长城由甘肃省临洮县城西北三十里墩的望儿台上开始出现的,经渭源、陇西、通渭、静宁、镇远、环县、华池 8 个县。在静宁和镇原之间,经过宁夏自治区的西吉、固原和彭阳三县。从华池元城乡的林沟梁营要峁进入陕西省,到陕西的郿县、延安、绥德,止于黄河边<sup>[1,4]</sup>。受所在地区工程地质条件、水文地质条件、环境诸因素和人为因素的影响,破坏严重,夯层清楚的城墙、城障及烽火台遗迹大都已残缺不全。遗存少量长 200~500 m,高 1~3 m 不等的长城遗址,风化剥蚀及坍塌等破坏严重,危及遗址的保存甚至彻底毁灭遗址<sup>[1,5]</sup>。目前,国家文物局成立专门的长城保护小组,拟开展大规模的长城保护工程,首先在山东和甘肃两省开展长城保护试点工程,为长城保护提供了前所未有的机遇。

对土遗址的防风化加固,国际上普遍认可的科学方法是对已风化而濒临危险的文物进行渗透加固保护,以提高它们的胶结强度,而且必须具有一定的渗透深度,确保土质内部起到了加固作用,否则会在加固的表层形成结壳现象,反而带来更大的破坏<sup>[6-9]</sup>。PS(高模数钾水玻璃)材料应用于西北地区石窟遗址和土遗址的保护加固,多年室内试验和近年来的工程实践证明,加固后遗址强度提高程度、遗址外观完全满足文物保护的特殊要求<sup>[7,10,11]</sup>。本文以甘肃省战国秦长城保护工程为依托,按照《中国文物古迹保护准则》新材料需经过前期试验和研究、加固强度不宜过高的要求,开展了 PS 材料加固遗址的强度试验研究,研究材料的适宜性和最有效性,为全国范围内长城保护工程的开展提供前期理论和试验依据。

## 2 试验材料与样品制备

配制适宜模数、浓度 5 % 的 PS 溶液备用,并对其参数进行测定。测得 PS 材料的 pH 值为 10.4~11.2。黏度随浓度的升高略有升高,浓度在 7 % 以内时,其黏度小于 1.5 MPa·s。适宜模数的 PS 材料微观结构为较规则的球形,粒度较分散,直径主要在 0.5  $\mu\text{m}$  以下,个别直径达到 2  $\mu\text{m}$  左右。

土样取自定西地区战国秦长城夯土,物理性质试验结果显示,表面风化层的干密度多集中在 1.3~1.5  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  左右,内部未风化墙体干密度为 1.53~1.75  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;力学性质试验结果显示,夯土单轴抗压强度为 1.8~3.18 MPa,平均值为 2.4 MPa,遗址夯土抗剪强度  $c$  值为 59.33~116 kPa,  $\phi$  值集中于

20~35°,试样密度大于 1.6  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。为避免取样对遗址造成保护性破坏和样品的不均一性带来的误差,加固试验样均为重塑样。

## 3 抗压强度试验

强度是加固土性能的主要评价指标,文物保护准则要求遗址加固后强度不能过高,应与未风化夯土强度接近为宜。试验使用仪器为 WE-30 型液压力万能材料试验机,按 0.6 mm/min 的应变速度加荷。根据试验结果设计干密度为 (1.30±0.05), (1.50±0.05), (1.70±0.05)  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,制成 7 cm×7 cm×7 cm 的立方体,用 PS 材料滴渗加固,PS 加固溶液入渗量按最大饱和度  $S_r=85\%$  准确控制,用滴管抽汲相应加固液,分 6 个面均匀点滴完所要求的加固液,放在室内自然养护风干。试验共制重塑试样 42 组,每组试样一般为 3 个,共制作可测定抗压强度的试块 63 个,试验结果见表 1。

表 1 无侧限抗压强度(单位: MPa)  
Table 1 Unconfined compressive strength (unit: MPa)

密度 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	未加 固样	浓度(加固一次)/%			浓度(加固三次)/%		
		3	5	7	3	5	7
1.30±0.05	0.320	0.340	0.580	0.480	0.580	1.280	1.200
1.50±0.05	0.800	0.930	1.200	1.330	1.620	2.251	2.411
1.70±0.05	2.094	2.251	2.361	2.521	2.801	3.208	2.671

结果表明,PS 固化试样抗压强度有明显增高,对中、低密度加固效果显著,以 5 % 浓度加固 3 次强度最好,加固后强度与原状样最为接近,强度提高满足文物保护要求。

PS 材料浓度不同,抗压强度提高程度不同,随浓度增加加固体的抗压强度呈增长趋势, (1.70±0.05)  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  试样在浓度为 5 % 时达到最大值, (1.30±0.05), (1.50±0.05)  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  试样以 5 %, 7 % 加固强度理想,见图 1。加固剂的有效利用率与加固次数正相关(见表 2),相同加固次数试样开始时随浓度的增加而增加,在 5 % 浓度时达到最大强度增长率,随后逐渐减小。结果表明,加固剂的浓度不宜超过 7 %。图 2 以 (1.50±0.05)  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  为例评价了材料重复使用的可行性和效果,试验结果表明,相同浓度 PS 材料,多次加固后强度高于 1 次加固后强度,材料具有可重复使用性。图 3 表明,经加固后土的应力-应变关系出现明显峰值,开始时压应力随垂直位移增大明显,达到峰值后应力随应变下降也表现明显,多次加固样这种趋势尤为突出。

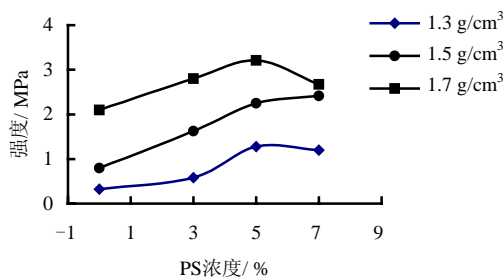


图 1 强度与浓度的关系  
Fig.1 Strength and consistency

表 2 强度增长率 (单位: %)  
Table 2 Growth rate of strength (unit: %)

密度 / $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	浓度 / %					
	3		5		7	
	加固 1 次	加固 3 次	加固 1 次	加固 3 次	加固 1 次	加固 3 次
1.3	6.25	81.25	81.25	300.00	50.00	275.00
1.5	16.25	102.50	50.00	181.38	66.25	201.38
1.7	7.50	33.76	12.75	53.20	20.39	27.55

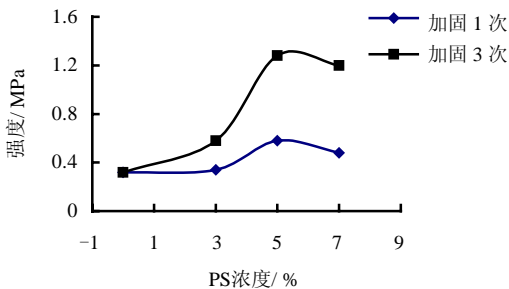


图 2 强度与加固次数的关系  
Fig.2 Strength and consolidation times

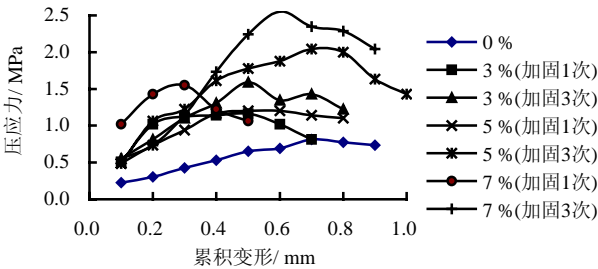


图 3 应力与变形关系  
Fig.3 Stress and deformation

4 抗剪强度试验

土的抗剪强度是土重要的力学指标之一，细粒土其抗剪强度主要决定于粒间连结强度，其次是结合水的黏滞阻力<sup>[6, 9]</sup>。经 PS 加固后的遗址土，改变了土粒间的连结力和微观结构，引起土的抗剪强度的改变，因此，研究加固前后土的抗剪强度变化是必要的。

试验用应变控制盒式直剪仪，采用直接快剪试验。多年研究表明，遗址破坏首先是表面的剪切破

坏，物性试验结果表面风化层土的密度为 1.3~1.5 g/cm<sup>3</sup>。故设计制样密度为 1.5 g/cm<sup>3</sup>，称好土重后以含水率 12 % 左右拌匀，并轻轻压实装入环刀，室内自然风干后，滴渗定量的 PS 材料，再风干待测。

4.1 垂直压力与剪切位移关系特征

试验采用不固结快剪，不同浓度加固试样的 7 组试验的剪应力与水平位移关系为图 4~10。从图中可以看出，未加固样和 3 % 浓度 PS 材料加固 1 次试样试验中没有明显峰值，其余试样有峰值，以 5 % 和 7 % 加固 3 次试样峰值最为明显。由于 PS 材料增强了土颗粒间的胶结，试验过程中垂直压力较低不足以限制其体胀，剪切应力随剪切位移增大而增加，当达到极限值后加固材料的胶结作用遭破坏，剪应力下降，故剪应力有峰值，高浓度和多次加固胶结作用较强，所以峰值越明显。

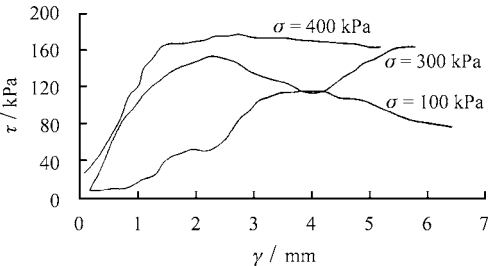


图 4 未加固样剪应力随水平位移的变化  
Fig.4 Shear stress vs. horizontal displacement of unreinforcement soil

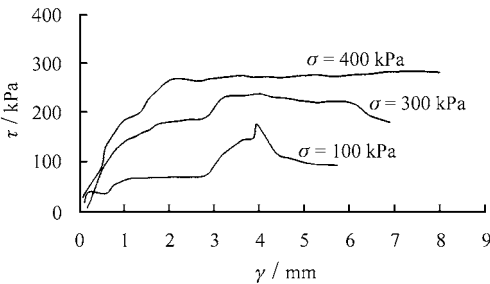


图 5 3 %PS 加固 1 次剪应力随水平位移的变化  
Fig.5 Shear stress vs. horizontal displacement of single reinforcement soil by 3 % PS consistency

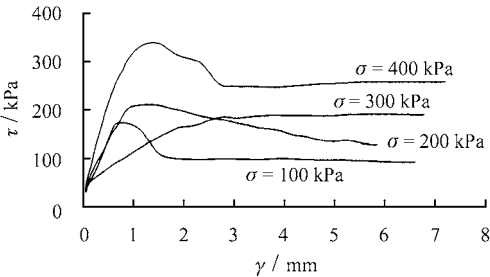


图 6 3 %PS 加固 3 次剪应力随水平位移的变化  
Fig.6 Shear stress vs. horizontal displacement of multiple reinforcement soil by 3 % PS consistency

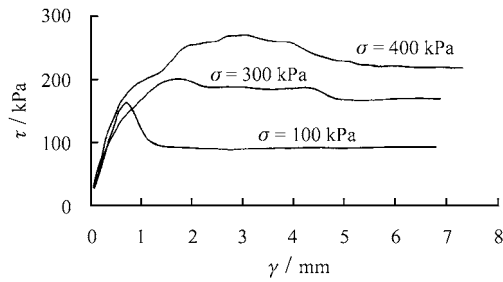


图7 5%PS加固1次剪应力随水平位移的变化

Fig.7 Shear stress vs. horizontal displacement of single reinforcement soil by 5 % PS consistency

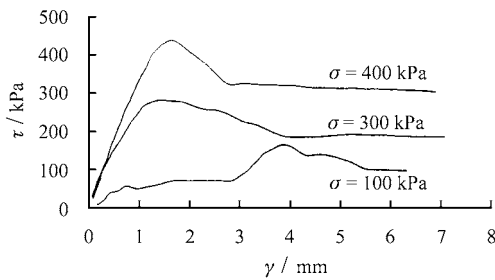


图8 5%PS加固3次剪应力随水平位移的变化

Fig.8 Shear stress vs. horizontal displacement of multiple reinforcement soil by 5 % PS consistency

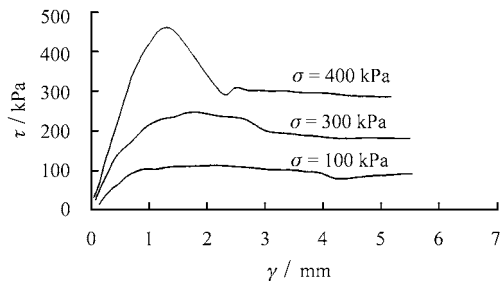


图9 7%PS加固1次剪应力随水平位移的变化

Fig.9 Shear stress vs. horizontal displacement of single reinforcement soil by 7 % PS consistency

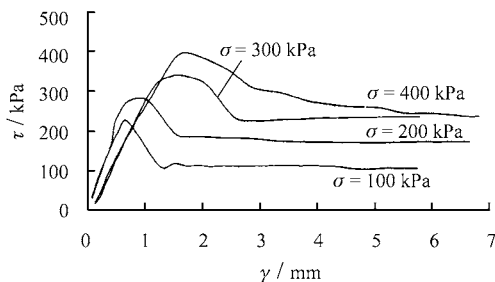


图10 7%PS加固3次剪应力随水平位移的变化

Fig.10 Shear stress vs. horizontal displacement multiple reinforcement soil by of 7% PS consistency

#### 4.2 强度指标关系特征

根据库仑公式, 土的剪切强度表示式为

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中:  $\tau$  为抗剪强度;  $c$  为凝聚力或咬合力;  $\sigma$  为垂直压力;  $\varphi$  为内摩擦角。

从式中可以看出, 土的强度由两部分组成:  $c$  和  $\tan \varphi$ ,  $c$  为土颗粒凝聚力,  $\tan \varphi$  为摩擦强度。

取曲线峰值处剪切应力与垂直压力, 按式 (1) 利用最小二乘法进行拟合, 求得抗剪强度  $\tau$  与垂直应力  $\sigma$  的关系 (图 11、图 12), 从图中可知, 各个试样相关性较好。

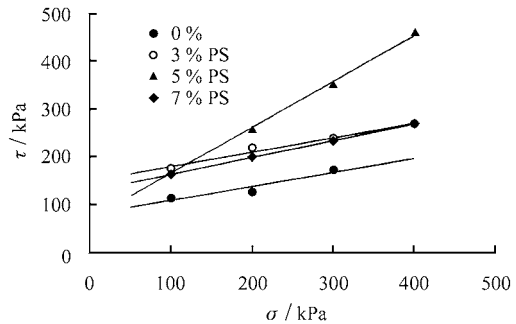


图11 PS材料加固1次强度

Fig.11 Shearing strength of single consolidated soil by PS material

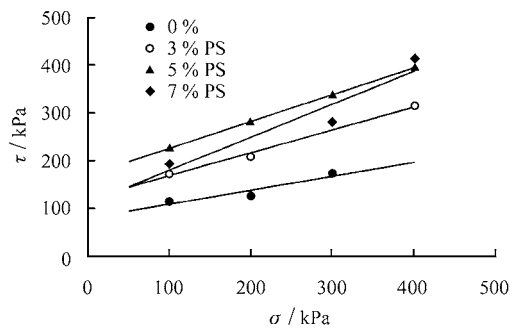


图12 PS材料加固3次强度

Fig.12 Shearing strength of multiple consolidated soil by PS material

根据图 11、图 12 的拟合结果, 得出各试样咬合力、摩擦角与加固次数和材料浓度变化关系 (图 13、图 14), 结果显示, 强度指标受加固次数与浓度的影响较大。

(1)  $\varphi$  值随加固次数、加固剂浓度增加而增大。当加固剂浓度较低及单次加固时其固含量较低, 土颗粒间胶结提高程度不大, 不足以使颗粒充分接触咬合, 使得  $\varphi$  值较小; 随着加固剂浓度和加固次数的增大, 土中胶结物的固含量逐渐增大, 使颗粒间胶结程度渐强使得  $\varphi$  值不断增大;

(2) 在加固剂浓度为 3 % 和 5 % 时, 加固一次的  $c$  值高于多次加固, 单次加固  $c$  值在浓度为 3 %

时达到最大值, 3 次加固  $c$  值随浓度增加而增大,  $c$  值增幅表现为加固后  $c$  值提高, 但随浓度及加固次数变化无明显规律性。

通过分析认为, 试验结果显现了浓度对强度的贡献, 同时也反映了材料可多次重复使用, 使用后可使土的凝聚力和内摩擦角改变, 增强土的抗剪强度、增强整体性及稳定性。

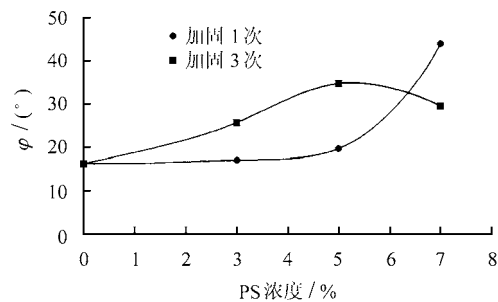


图 13  $\varphi$  值与浓度、加固次数关系  
Fig.13 Relationship between  $\varphi$  and PS material consistency and consolidation times

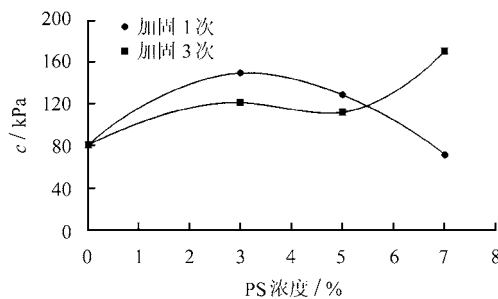


图 14  $c$  值与浓度、加固次数关系  
Fig.14 Relationship between  $c$  and PS material consistency and consolidation times

5 渗透试验

强度试验表明, 遗址土经 PS 加固后土粒间的连结力增强, 强度提高, 对于是否改变了土的渗透性, 需进行必要的试验研究。

渗透性试验采用南京土壤仪器厂生产的南 55 型渗透仪测定。渗透试验试样制备为, 先按设计密度  $1.5\text{ g/cm}^3$  称好土重, 再掺入一定量的 PS 材料拌和均匀, 装入环刀, 自然养护至干。然后测定加固土的渗透性, 试样渗透系数由以下公式计算:

$$k = 2.3 \frac{aL}{AT} \lg \frac{H_2}{H_1} \tag{2}$$

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 ( $\text{cm}^2$ )。

土的渗透系数值见表 3 和图 15。土经固化后渗

透性变化不大, 未加固样的渗透系数为  $4.595 \times 10^{-6}\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 加固土的渗透系数为  $3.360 \times 10^{-6} \sim 4.489 \times 10^{-6}\text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ , 加固土的渗透系数略有降低, 随加固次数增加渗透系数降低, 但变化在同一数量级内, 都具弱透水性。这说明, 土经 PS 加固以后, 未改变土的孔隙连通性, 加固后的样品仍能保持较多的孔隙, 不会明显改变土的渗透性。这样, 经 PS 材料加固后的土遗址可保证水汽内外自由交换, 不会因水汽被封闭而对遗址造成保护性破坏。

表 3 土的渗透系数 (单位:  $\text{cm/s}$ )  
Table 3 The permeability coefficient of the soil (unit:  $\text{cm/s}$ )

加固次数 / 次	浓度 / %			
	0	3	5	7
1	$4.60 \times 10^{-6}$	$4.29 \times 10^{-6}$	$4.29 \times 10^{-6}$	$4.49 \times 10^{-6}$
3	/	$4.36 \times 10^{-6}$	$3.70 \times 10^{-6}$	$3.36 \times 10^{-6}$

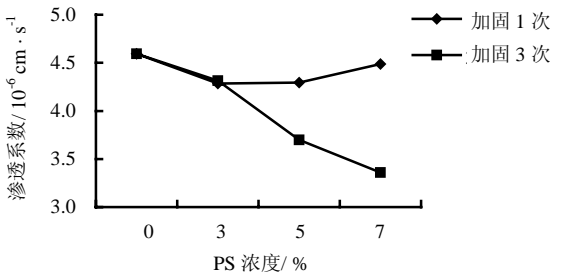


图 15 加固土的渗透性  
Fig.15 Permeability of the soil

6 结 论

按照文物保护的特殊要求, 通过对 PS 材料加固战国秦时期夯土的强度试验, 可以得出以下几点结论:

- (1) 单轴抗压强度试验中, 抗压强度随加固剂浓度增加而提高, 但加固剂的浓度增加不宜超过 7%; 相同浓度 PS 材料, 多次加固后强度高于 1 次加固后强度, 压应力-垂直位移关系峰值明显, 说明材料具有可重复使用性;  $(1.70 \pm 0.05)\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  试样在浓度为 5 % 时达到最大值,  $(1.30 \pm 0.05)$ ,  $(1.50 \pm 0.05)\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  试样的理想加固强度为 5 %, 7 % 多次加固后强度。
- (2) 抗剪强度试验中, 随加固材料浓度和加固次数增加, 剪应力-水平位移关系峰值逐渐明显, 7 % 加固 3 次试样试验曲线最理想; 由于加固剂浓度、加固次数增加, 土颗粒间的胶结力得到增强,  $\varphi$  值随加固剂浓度和加固次数有明显增加趋势,  $c$  值有所提高, 但变化没有明显规律性。
- (3) 土经固化后的渗透系数略有降低, 随加固

次数增加渗透系数降低,但变化在同一数量级内,未改变土的孔隙连通性,不会影响土的渗透性,可保证水汽内外自由交换,不会对遗址造成保护性破坏。

(4)综合分析试验结果,对于 $(1.3\sim 1.50)\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 风化墙面,以浓度 $5\%\sim 7\%$ 的PS材料多次加固为宜; $(1.5\sim 1.7)\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的风化墙面适宜以 $3\%\sim 5\%$ 浓度的PS材料多次加固;加固后强度和渗透性满足文物保护特殊要求。

**致谢:**兰州大土木工程学院博士研究生和法国、任非凡两位同学在试验制样过程中给予大力协助,在此深表感谢!

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 罗哲文. 长城[M]. 北京: 北京出版社, 1982.
- [3] 赵海英, 李最雄, 韩文峰, 等. 甘肃境内长城遗址主要病害及保护研究[J]. 文物保护与考古科学, 2007, (1): 28—32.  
ZHAO Hai-ying, LI Zui-xiong, HAN Wen-feng, et al. Study of the main disease of the Great Wall and its conservation in Gansu Province[J]. **Sciences of Conservation and Archaeology**, 2007, (1): 28—32.
- [4] 赵海英, 魏厚振, 胡波. 夯土长城的主要病害[A]. 第二届全国岩土与工程学术大会论文集[C]. 北京: 科学出版社, 2006. 10: 896—899.
- [5] 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): 2 875—2 880.  
ZHAO Hai-ying, LI Zui-xiong, HAN Wen-feng, et al. Main diseases and their causes of earthen ruins in arid regions of northwest China[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(Supp.2): 2 875—2 880.
- [6] 王旭东. 中国西北干旱环境下石窟与土建筑遗址保护加固研究[博士学位论文 D]. 兰州: 兰州大学, 2002.
- [7] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 科学出版社, 2003.
- [8] Agnew N, Preusser F, Druzik J R. Strategies for Adobe Preservation[A]. **5th international meeting of experts on the conservation of earthen architecture**[C]. [s. l.]: [s. n.], 1987.
- [9] 国际古迹遗址理事会中国国家委员会. 中国文物古迹保护准则[R]. [s. l.]: 盖蒂保护研究所, 2004.
- [10] 赵海英, 王旭东, 李最雄, 等. PS材料模数、浓度对西北干旱区土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 Zuixiong, et al. The impact of PS modulus and concentration on consolidating the earthen architecture sites in the arid region[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 557—562.
- [11] ZHAO Hai-ying, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong, et al. Experimental study of wind erosion of the consolidated ancient earthen site by PS material in Northwest China[A]. **The 11th International Symposium for Rock Mechanics**[C]. [s. l.]: [s. n.], 2007.