

# PS 加固黄土力学特性试验研究

刘海宁<sup>1</sup>, 于怀昌<sup>1</sup>, 刘汉东<sup>1</sup>, 王思敬<sup>2</sup>, 王四巍<sup>1</sup>

(1. 华北水利水电学院 岩土工程与土工结构研究所, 郑州 450011; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

**摘 要:** 通过对不同含水率、不同密度的黄土 PS 加固前后的直接剪切试验和渗透试验研究, 认为 PS 加固效果受土体的初始含水率、密度的影响明显。对相同干密度、不同含水率下的 PS 加固效果进行研究, 含水率为 9 % 左右时强度提高效果最显著。同一干密度的土体, 随着含水率的变化, 土的渗透性能呈现非线性的变化。试验表明, 含水率在 8.5 %~11 % 之间时, PS 加固土体效果最好。

**关 键 词:** 黄土; 直接剪切试验; 渗透试验; PS

**中图分类号:** TU 411

**文献标识码:** A

## Test study of mechanical properties of loess reinforced by PS

LIU Hai-ning<sup>1</sup>, YU Huai-chang<sup>1</sup>, LIU Han-dong<sup>1</sup>, WANG Si-jing<sup>2</sup>, WANG Si-wei<sup>1</sup>

(1. North China University of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The reinforcing effect with PS shows that the initial water content and density of loess have influences on test result through the direct shear test and seepage test. It can be easily found through the test with various water contents and different densities samples. The results show that the strength can be enhanced evidently with the 9 % water content sample, when all the samples have the same density. But the seepage tests have a different results that the permeability varies nonlinearly with the water content. It is found that the PS has the best reinforced effect when the water content varying between 8.5 % and 11 %.

**Key words:** loess; direct shear test; seepage test; PS

## 1 引 言

PS (高模数钾水玻璃) 材料经过敦煌研究院多年来的研究和应用, 已经在西北地区多处土遗址防风蚀及加固工程中发挥了巨大的作用。工程实践表明, PS 加固后的土体防风蚀能力明显提高。多年室内试验和工程实践证明, 加固后遗址土体抗风蚀能力提高程度和遗址外观保护完全满足文物保护“修旧如旧”的原则<sup>[1-3]</sup>。前期试验研究和现场加固试验表明, 材料模数、浓度对加固效果的影响比较显著。随着 PS 材料应用地区越来越广, 区域差异影响成为其中一个很重要的影响因素; 不同区域之间土体类型、含水率和干密度的差异是区域差异的主要表现之一, 开展 PS 材料关于土体含水率和密度的适宜性研究, 既能在一定程度上解决工程实际问题, 又能丰富 PS 材料理论探讨和试验研究, 因此, 是

一个很有实际意义和理论意义的研究课题。

## 2 土体的基本性质及试样制备

### 2.1 地层与土体基本性质

地处西北的交河古城土遗址, 采用原地黄土建造, 资料显示地层构成为上更新统 ( $Q_2$ ) 地层和中更新统 ( $Q_3$ ) 地层<sup>[4]</sup>。上更新统 ( $Q_2$ ) 地层分布厚度为 2 526 m, 从上到下层颗粒由细到粗, 上部厚 15~16 m, 地层岩性以粉土、粉质黏土、粉细砂互层为主。颜色以淡黄、灰褐色为主。从上到下含斑状氧化铁逐渐增多, 含钙质结核逐渐减少, 含水率逐渐增高。下部厚 10 m 左右地层以细砂、含砾粗砂、卵砾石为主。其成分主要为石英、长石, 暗色矿物次之, 含水率由湿过渡到饱和状态。

中更新统 ( $Q_3$ ) 地层, 埋藏深度在 25~26 m 以下, 以含砾粉土、粉质黏土、黏土夹薄层粉细砂

组成，底部以粉细砂为主。地层普遍含有斑状氧化铁及少量钙质结核。

土体基本物理性质指标见表 1，黄土取样见图 1。

表 1 土体的基本物理力学性质指标  
Table 1 Physico-mechanical properties of soils

| 土体类型 | 含水率/%   | 天然密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 干密度/(g/cm <sup>3</sup> ) | 土体相对密度 | 孔隙比       | 液限/%      | 塑限/%      | 级配 |
|------|---------|---------------------------|--------------------------|--------|-----------|-----------|-----------|----|
| 原状土  | 0.9~2.6 | 1.51~1.76                 | 1.45~1.71                | 2.7    | 0.62~0.89 | 23.1~30.8 | 16.1~18.9 | 良好 |
| 夯土   | 1.3~2.7 | 1.53~1.71                 | 1.52~1.70                | 2.7    | 0.58~0.81 | 26.6~29.9 | 15.8~18.8 | 良好 |



(a)



(b)

图 1 黄土取土照片  
Fig.1 The soil in site

2.2 试样制备与 PS 溶液用量控制

试验中由于现场原状土体和夯土成样困难，室内试验在控制含水率和干密度相同的条件下制作重塑样，采用重塑土样进行土体的强度、渗透和固结对比试验。

PS（高模量的硅酸钾）溶液的初始浓度为 24.09%，在本试验中采用稀释后的两种浓度 3%和 5% 的浓度进行试验。由于土体具有一定的微膨胀

性（见图 2），给 PS 的加固处理带来了技术困难。据经验和多次反复试验的结果，采取分次分段的加固处理措施，先用 3% 的 PS 溶液喷洒试样，在保证土样的含水率不变的情况下喷洒试样两次，中间时间间隔为 7 d，共用时 14 d。然后用 5% PS 溶液进行土样的滴渗，在保证试样的含水率不变的情况下进行 3 次土样的滴渗，时间间隔为 10 d，共用时 30 d。

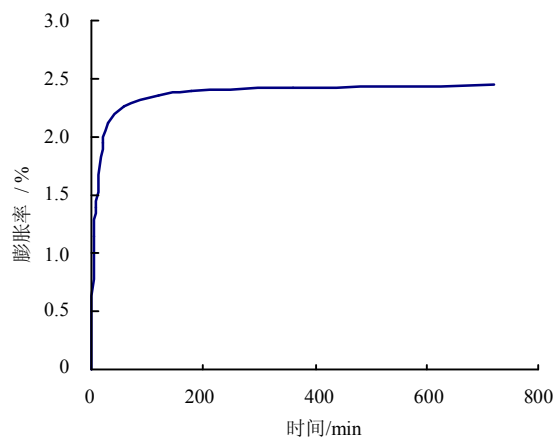


图 2 膨胀试验  
Fig.2 The test of expandability

在土样的滴渗过程中，要严格地控制 PS 溶液的使用量。试验表明，用量过多或者过少对土样的加固效果都有影响。土样的滴渗遵循下述的原则：对环刀内的薄层试样，先从试样的外围滴起，滴速要匀速，由外至内，最后滴渗试样中部。对较厚的圆柱状试样，可以适宜地进行双向双重匀速滴样，也要保持由外至内的原则，土样滴渗过程见图 3。

3 加固前后直剪试验结果对比分析

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。经 PS 加固后的遗址土体，改变了土粒间的连结力和微观结构<sup>[5-7]</sup>，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。



(a)



(b)

图3 PS 溶液加固试样图  
Fig.3 The soil reinforced by PS

试验用应变控制盒式直剪仪, 采用直接快剪试验。在直接剪切试验中, 分别控制土样的含水率为 3.9 %、7 %、9 %、11 % 和 15 %, 含水率的取值参阅交河古城土遗址和郑州殷商遗址土体原始含水率, 将两处土遗址含水率作为参考点, 这样含水率的分布基本涵盖了北方地区的土遗址的含水率范围值。试验的干密度取交河古城土遗址试样干密度范围值中的  $1.40$ 、 $1.59 \text{ g/cm}^3$ , 并考虑到试样制作的方便性。对上述不同含水率、不同干密度的试样进行 PS 加固处理后, 进行直接剪切试验的对比分析, 试验结果见图 4。

图 4 (a) ~ (e) 是干密度为  $1.59 \text{ g/cm}^3$  时, 含水率在 3.9 %、7 %、9 %、11 % 和 15 % 时的 PS 加固前后的剪切强度对比图, 从图中可以看出: ①在同一含水率、同一垂直压力条件下, PS 加固后的土体的抗剪强度明显大于未加固土体的强度; ②在同一含水率, 当垂直压力增加时, 加固后土体比未加固土体的抗剪强度直线斜率大, 即 PS 加固后的土体的抗剪强度增加值大于未加固土体的强度的增加值; ③不同含水率条件下, 垂直压力增加量相同时, 试样的极限抗剪强度增加值逐渐增加, 即 PS 加固后土体的强度直线截距增加, 土体凝聚力增加, 直

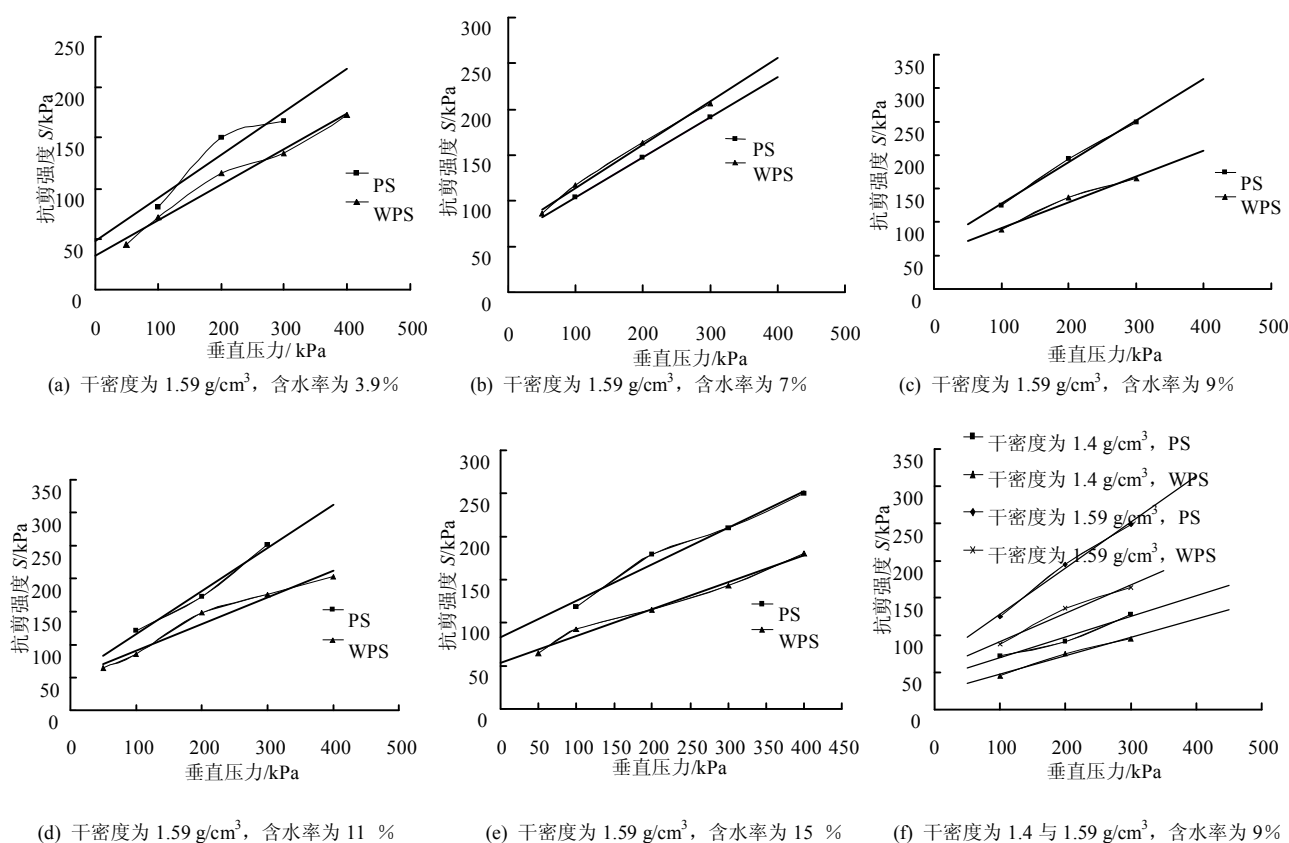


图4 PS 加固前后的直接剪切试验对比图

Fig.4 The comparative data of direct shear test in lab

线斜率有变陡的趋势,说明 PS 加固后引起土体的内摩擦角增大。但从图中可以看出,内摩擦角的增量没有黏聚力的增量明显,说明 PS 加固后土体抗剪强度的增加是由于凝聚力和内摩擦角增大引起,只是凝聚力对抗剪强度的贡献要大于内摩擦角;④在各种含水率的对比试验中,含水率为 9 % 左右时,相应的抗剪强度的增加量是最大的,即 PS 加固的土体的力学性能最好,PS 作用最强。从图 4 (f) 可以看出:①干密度为  $1.40 \text{ g/cm}^3$  土体的抗剪强度明显小于  $1.59 \text{ g/cm}^3$  的土体的抗剪强度,说明土体的干密度的增加直接提高了土体抗剪强度;②PS 加固后  $1.59 \text{ g/cm}^3$  的土体的抗剪强度增加值高于  $1.40 \text{ g/cm}^3$  土体的抗剪强度增加值,说明  $1.59 \text{ g/cm}^3$  的干密度土体加固效果较好。

#### 4 加固前后渗透试验结果对比分析

渗透试验在应力、应变非饱和渗透三轴仪上进行(图 5)。在直接剪切试验中,分别控制土样的含水率为 3.9 %、7 %、9 %、11 %、15 %。试验的干密度取交河古城土遗址原装土重塑试样  $1.40$ 、 $1.59 \text{ g/cm}^3$ ,夯土重塑试样的干密度  $1.60$ 、 $1.77 \text{ g/cm}^3$ 。试验结果见图 6。

从图 6 中看出:①同一含水率的土体,干密度越小,土体的渗透性能越好;②同一含水率、同一干密度的土体,PS 加固后土体的总体渗透性能是变差的,但是渗透性能减小量不大,基本在同一数量级内变化;③同一干密度的土体,随着含水率的变化,土的渗透性能呈现非线性的变化。含水率从 3 % 增加到 9 % 附近时土体的渗透性能越来越好,当含水率从 9 % 增加到超过 11 % 后,土的渗透性能又开始逐渐变差。从 PS 加固前后土体的渗透性能分析,含水率在 8.5 %~11 % 之间时,加固后的土体渗透

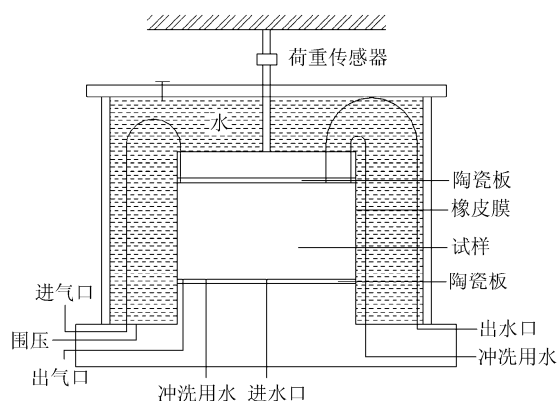
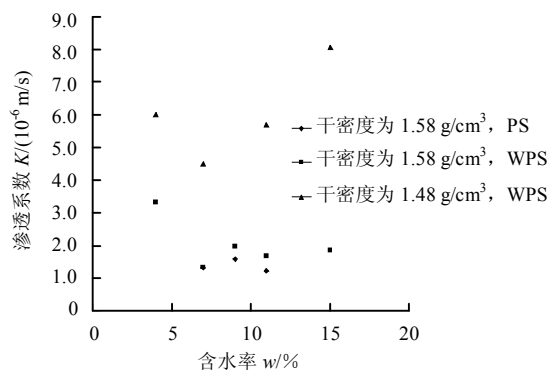
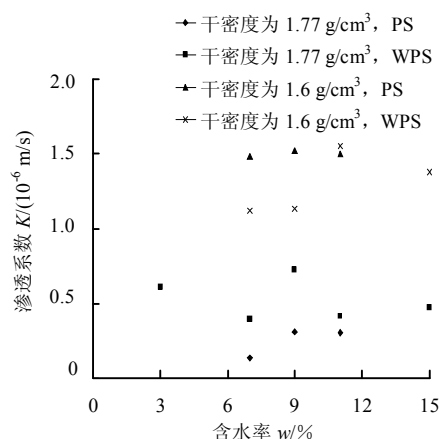


图 5 非饱和渗透三轴仪

Fig.5 Pressure chamber of triaxial test for the unsaturated soil



(a) 原装土重塑样



(b) 夯土重塑样

图 6 PS 加固前后的渗透对比图

Fig.6 The comparative data of permeability test in lab

性能最好,即在这个区间加固后土体的渗透性改变最小。

#### 5 结 语

通过 PS 加固前后土体的直接剪切试验和渗透试验研究,得出如下结论:在同一含水率下,垂直压力增加量相同时,试样的极限抗剪强度增加;含水率为 9 % 左右时,相应的抗剪强度的增加量是最大的,即 PS 加固的土体的力学性能最好,PS 作用最强。同一含水率的土体,随着干密度的增加,加固前后土体的渗透性能总体是变差的;同一干密度的土体,随着含水率的变化,土的渗透性能不是呈现非线性的变化。含水率从 3 % 增加到 9 % 附近时土体的渗透性能变得越来越好;当含水率从 9 % 增加到超过 11 % 后,土的渗透性能又开始逐渐变差。初步结果认为,含水率在 8.5 %~11 % 之间时,加固后的土体渗透性能最好。