

DOI: 10.11779/CJGE201510008

土遗址锚固用 PS-(C+F)浆液性能与结石体耐久性 室内试验

张景科¹, 谌文武¹, 李最雄², 郭青林², 孙满利³

(1. 西部灾害与环境力学教育部重点实验室(兰州大学土木工程与力学学院), 甘肃 兰州 730000; 2. 敦煌研究院国家古代壁画与土遗址
保护工程技术研究中心, 甘肃 敦煌 736200; 3. 西北大学文化遗产学院, 陕西 西安 710069)

摘要: 为科学揭示土遗址本体锚固用 PS-(C+F)浆液的凝结固化特征和结石体的长期性能, 针对标准稠度试验确定的最佳水灰比(0.39)的浆液, 通过龄期强度、龄期含水率、龄期波速、收缩特性等试验, 查明了浆液的凝结固化特征; 通过温湿度循环、冻融循环、水稳定性、安定性和耐碱性等耐候性试验手段, 研究了结石体的耐久性特征。试验结果表明, 本浆液龄期强度满足施工工艺的需求, 结石体在外观、密度、孔隙率、强度上和土体具有较好的兼容性, 较低的收缩率保证了锚固界面的性能, 结石体具有典型的弹脆性力学特征; 结石体具有优良的耐久性, 可以有效的抵御西北干旱半干旱区的气候, 但在硫酸钠高含量遗址土体中不适用。研究证明, 配合比为 C:F=1, PS:(C+F)=0.39 的 PS-(C+F)浆液适宜于中国西北地区土遗址本体锚固, 具有较强的兼容性和耐久性。

关键词: 土遗址; PS-(C+F)浆液; 凝结固化; 耐久性; 兼容性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)10-1802-08

作者简介: 张景科(1980-), 男, 副教授、硕士生导师, 主要从事古遗址保护加固等方面的教学和科研。E-mail: zhangjink@lzu.edu.cn。

Laboratory tests on property and durability of PS-(C+F) slurry used in anchoring conservation of earthen sites

ZHANG Jing-ke¹, CHEN Wen-wu¹, LI Zui-xiong², GUO Qing-lin², SUN Man-li³

(1. Key Laboratory of Mechanics on Environment and Disaster in Western China, School of Civil Engineering and Mechanics, Lanzhou
University, Lanzhou 730000, China; 2. National Research Center for Conservation of Ancient Wall Paintings and Earthen Sites, Dunhuang
Academy, Dunhuang 73620, China; 3. School of Cultural Heritage, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: To scientifically reveal the characteristics of the setting and long-term performance of PS-(C+F) slurry which is applied in the anchoring conservation of earthen sites, the slurry with the optimum mix ratio (0.39) is studied by means of aging strength, aging moisture, aging wave velocity and shrinkage tests, and its durability is investigated by using the temperature-humidity cycling, frozen-thaw cycling, water stabilizing, soundness and alkali resistivity tests. The test results indicate that the aging strength can firmly meet the requirements of the anchoring craft, and that the elastic-fragile mechanical performance of the slurry is compatible to the earthen sites on the appearance, density, void ratio and strength. Furthermore, the very low shrinkage guarantees the interfacial mechanical property. Besides them, the consolidation has a strong durability to resist the arid and semi-arid climate in Northwest China. However, the slurry is not suitable for the earthen sites with high-content sodium sulphate. In conclusion, with strong compatibility and durability, the PS-F slurry with mix ratio of (C:F=1, PS:(C+F)=0.39) can satisfy the need of the anchoring conservation of earthen sites in Northwest China.

Key words: earthen site; PS-(C+F) slurry; setting and solidification; durability; compatibility

0 引言

在中国西北干旱半干旱地区, 土遗址在数量、规模和功能类型上优于其他类型的文化遗产^[1-2]。受到自然、历史与人为因素的影响, 土遗址本体发育有裂隙、坍塌、冲沟、表面风化等众多病害, 严重威胁到土遗

址的安全保存^[3]。基于中国文物保护“最大兼容、最小干预、不改变原状”的理念, 锚固技术成为土遗址

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578272); 国家科技支撑计划课题项目(2013BAK01B01, 2014BAK16B02)

收稿日期: 2014-08-05

本体力学稳定性控制研究的重点之一^[4-5]。在杆材方面,先后出现了木锚杆^[6]、楠竹锚杆^[7]、楠竹加筋(钢绞线)复合锚杆^[8-11]、楠竹加筋(螺纹钢)复合锚杆^[12]、GFRP^[12]等杆材类型,并对以上锚杆的锚固性能和机理开展了基础性研究。以上锚固技术均属于全长黏结型锚固,浆体的性能对于锚固的长期性能至关重要。鉴于土遗址“抢险加固”的需求,目前更关注锚固技术的及时性,前期研究主要放在杆材的研发和短期锚固性能测试。然而对于浆体的研究,目前还处于经验型应用阶段。

大量的室内试验^[13]、现场试验^[14]、微观机理研究^[15]和工程实践^[16]证明,PS 溶液是中国西北干旱半干旱土遗址本体表面防风化、裂隙注浆、裂隙充填注浆等增强遗址耐久性措施较为理想的主要材料。PS-(C+F)(高模数硅酸钾溶液-(遗址土+粉煤灰))浆液是基于裂隙(充填)注浆加固而研发并得到了大规模的应用^[17-19]。随后,土遗址本体加固工程中尝试将该浆液引入锚固中,现场锚固试验^[6]证明该浆体与木锚杆、楠竹锚杆均具有较好的包裹力和摩阻力,表现出良好的锚固性能。锚固浆液在锚固系统中处于中间层,通过与周围介质的黏结作用发挥锚固系统力学作用,相应的水灰比、龄期、强度及耐久性不同于侧重充填作用的裂隙注浆浆液。因此,锚固浆液的性能研究对于推广应用和优化具有重要意义。

鉴于此,本文通过室内试验开展了针对 PS-(C+F)浆体的性能研究,通过龄期强度特征和环境稳定性两个方面测试,查明了该浆体在锚固中的凝结固化特征和长期稳定性。

1 试验方案

1.1 试验材料及试样制备

本试验用材料包括 PS 溶液、粉煤灰、遗址土和水。PS 溶液由甘肃省文物保护修复中心生产,模数为 3.8,浓度为 12%。试验所用粉煤灰来源于唐山陡河火力发电厂,其天然含水率为 0.15%,颗粒密度为 2.27 g/cm³,颗粒粒径多为 0.005~0.1 mm。遗址土选用甘肃省武威市古浪县明长城坍塌土体,土质为粉土,经过机械粉磨,其颗粒粒径小于 0.1 mm,主要矿物成分为石英、长石和方解石。试验用水直接采用室内符合饮用水标准的自来水。

土遗址加固工程中,PS-(C+F)锚固浆液的配合比^[20]为: C:F=1, PS:(C+F)=0.35~0.50。已有的研究和土遗址锚固实践表明^[18],标准稠度在 240 mm 时,浆液的可灌性最优。鉴于此,本文采用 JC/T958—2005 规定的标准稠度试验方法进行了不同水灰比的对比优

选,最终确定最优水灰比为 0.39。

试验制作 40 mm×40 mm×160 mm 的长方体试样,实验室的环境温度和相对湿度分别约为 20℃和 25%;试样成型 24 h 后编号脱模,在实验室内的试样柜中自然干燥。

1.2 试验方法及内容

作为非预应力全长黏结型锚固系统,锚固的失效往往是界面的失效诱发。连接杆体和遗址土体的浆体的性能无疑是制约界面性能的重要因子^[21]。决定界面力学特性的主要因子包括浆体的龄期强度、收缩性能和结石体的耐环境性能等。因目前还没有针对新型锚固浆材的试验规范和标准,本试验参照砂浆性能测试标准和岩土试验测试标准(GB11671—1999, GB/T50123—1999, WW/T0039—2012)开展。

(1) 浆体龄期性能测试

在室温开放条件下采用标准浆液结石体试样,分别测浆体 3, 7, 14, 28 d 龄期的三点抗折强度 R_f , 以及单轴无侧限抗压强度 R_c ; 运用 RSM 型声波仪测试浆体(尺寸: 70 mm×70 mm×70 mm)龄期 1~30 d 的弹性波速 V_p ; 并测试了浆体在龄期 3, 7, 14, 28 d 龄期的含水率; 采用配有电子千分表的比长仪进行测定收缩变形性能。

(2) 结石体耐环境性测试

a) 温湿度循环试验: 采用 ETH-1980-20-CP-AR 型恒温恒湿试验机。将 50 d 龄期的试样, 100℃加热 12 h, 然后在温度 25℃、RH90%的条件下放置 12 h, 如此反复循环 18 个周期后对试样进行抗折、抗压强度测试。

b) 冻融循环试验: 试验设备包括 DW-FL90 型超低温冷冻储存箱和 HBY-20 型恒温恒湿箱。先将 50 d 龄期的结石体在 -30℃低温下冻 12 h, 然后在温度 25℃、相对湿度 90%条件下融化 12 h, 如此反复冻融 18 个循环后对试样进行抗折、抗压强度测试。

c) 水稳定性试验: 将 50 d 龄期一组试样, 在室温水中浸泡 24 h, 取出后立即进行湿试块的抗折、抗压强度测试。将 50 d 龄期另一组试样, 在室温水中浸泡 24 h, 取出后在室内自然风干后进行抗折、抗压强度测试。

d) 安定性试验: 将 50 d 龄期试样, 先在饱和 Na₂SO₄ 溶液中浸泡 20 h, 取出后在 105℃温度下烘 4 h, 如此反复循环 5 次, 最后对试样进行抗折、抗压强度测试。

e) 耐碱性测试: 将 50 d 龄期的试样, 先在 2%NaOH 溶液中浸泡 12 h, 取出后在 105℃温度下烘 4 h, 最后对试样进行抗折、抗压强度测试。

试验中, 试样抗折强度测定采用 3 个平行试样,

试样抗压强度测定采用 6 个平行试样, 结果均取平均值; 弹性波速测定采用 3 个平行样品, 每个样品分别测定 3 对立面, 最终取平均值。

2 结果与分析

2.1 龄期强度

经测定, 浆液的初凝时间为 43 min, 终凝时间为 90 min。由龄期强度曲线 (图 1) 可知, 3 d 龄期浆体抗压强度已达 3.23 MPa, 7 d 和 14 d 龄期浆体抗压强度较 3 d 出现略微降低, 但 7 d 后随着龄期增加强度发生增长, 28 d 龄期浆体抗压强度达 3.36 MPa。3 d 龄期浆体抗折强度已达 0.65 MPa, 抗折强度始终处于增长状态, 最终 28 d 龄期浆体的抗折强度为 0.89 MPa。从 3 d 龄期到 28 d 龄期, 浆体抗压强度增长了 4.02%, 浆体抗折强度增长了 36.92%, 初步反映出在龄期 3 d 的时候浆液硬化过程大部分已经完成。

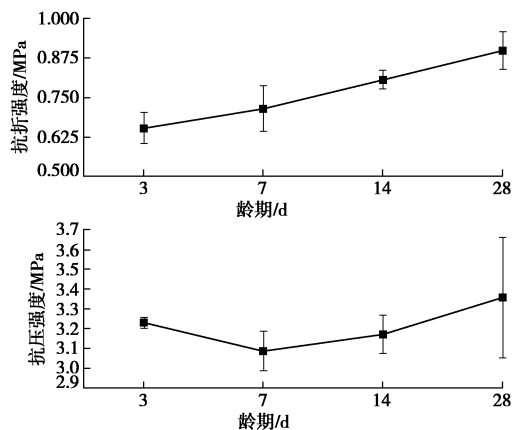


图 1 龄期强度曲线

Fig. 1 Variation of strength with different setting time

由不同龄期浆体的压缩曲线 (图 2) 可以看出, 在峰值强度之前, 不同龄期试样的压缩曲线近于直线, 即处于弹性变形状态; 在峰值强度之后, 很快试样发

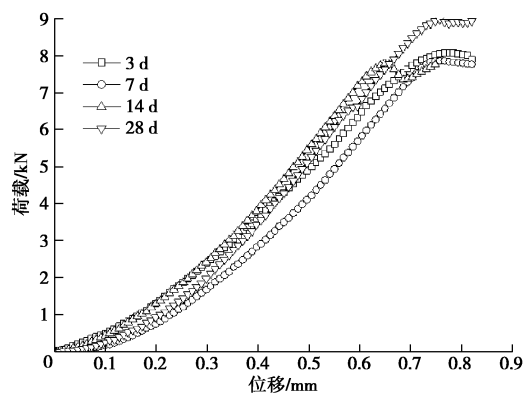


图 2 不同龄期抗压性能对比曲线

Fig. 2 Comparison among compression curves of samples under different setting time

生破坏。以上特点表明 PS-(C+F)浆体表现出较强的弹脆性。由不同龄期浆体的抗折曲线 (图 3) 可以看出, 不同龄期试样的曲线特征和趋势基本一致, 在起始端呈现较低的斜率, 随后斜率急剧增加直至破坏。以上特点同样表明, 浆体具有较强的弹脆性。

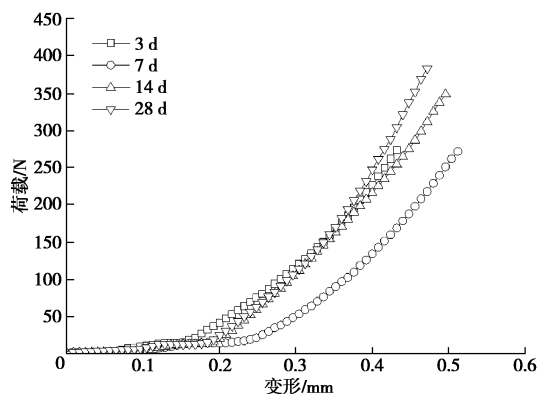


图 3 不同龄期抗折性能对比曲线

Fig. 3 Comparison among bending curves of samples under different setting time

2.2 龄期波速变化

从浆体在不同龄期的波速变化曲线 (图 4) 可以看出, 在 0~2 d 龄期内, 波速呈现增长趋势, 但 2~3 d 龄期内, 波速出现减小趋势, 3~12 d 龄期内, 浆体波速呈现快速稳态增加特征, 12 d 龄期后, 浆体波速增加缓慢, 23 d 龄期时, 浆体波速达到稳态, 后续几乎没有变化。以上特点表明 12 d 的时候浆液硬化进程基本结束。

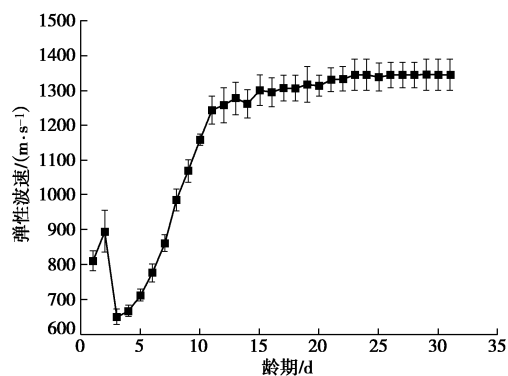


图 4 波速随龄期变化曲线

Fig. 4 Variation of wave velocity with age

2.3 龄期含水率变化与 28 d 龄期密度

从龄期含水率的变化曲线 (图 5) 看, 随着龄期的增长, 浆体含水率呈现明显的下降趋势, 其中 7 d 龄期内的含水率急剧下降, 7 d 龄期后浆体含水率降低速率降低, 直至 28 d 龄期含水率为 1.5%。经测定, 28 d 浆体的孔隙率为 39.66%, 相应的密度为 1.42 g/cm³。以上特征说明, 在 7 d 龄期内浆体水化反应剧

烈, 28 d 浆体具有一定的透水透气特征。

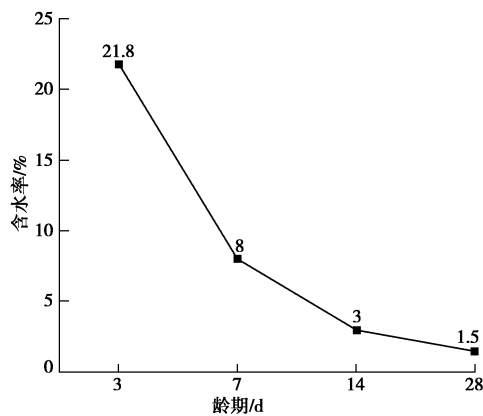


图 5 含水率随龄期变化曲线

Fig. 5 Variation of moisture with age

2.4 收缩变形特性

测试结果表明, 28 d 龄期浆体的收缩率为 0.85%, 可以看出本浆体凝结固化后的收缩率较低。

2.5 温湿度循环试验

试验前后外观对比表明, 试样没有外观上的改变。从结石体温湿度循环试验前后的强度对比看 (图 6), 试验前抗压强度为 3.04 MPa, 试验后抗压强度为 3.24 MPa, 可见试验后抗压强度增长了 6.58%; 试验前抗折强度为 0.76 MPa, 试验后抗折强度为 0.61 MPa, 可见试验后抗折强度减小了 19.74%。从量值上看, 变化量并不大。由试验前后浆体的压缩曲线 (图 7) 可以看出, 曲线的形态具有相似性, 即线性增长后达到峰值, 峰值过后试块快速发生破坏。但试验后试样的压缩曲线离散性大于试验前的试样。由试验前后浆体的抗折曲线 (图 8) 可以看出, 曲线形态具有相似性, 即起始段呈现较低的斜率, 随后斜率急剧增加直至破坏。但试验后试样的压缩曲线离散性小于试验前的试样。以上特点表明, 浆体具有较强弹脆性。

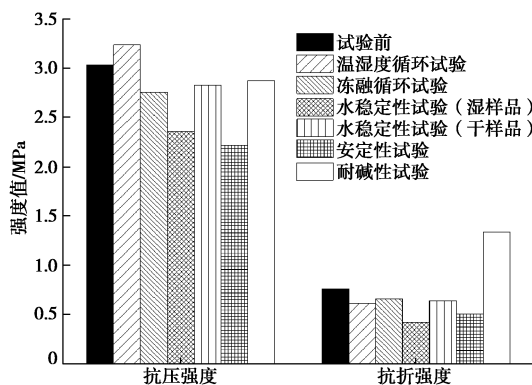


图 6 耐久性试验前后样品强度对比

Fig. 6 Comparison of strengths before and after the durability tests

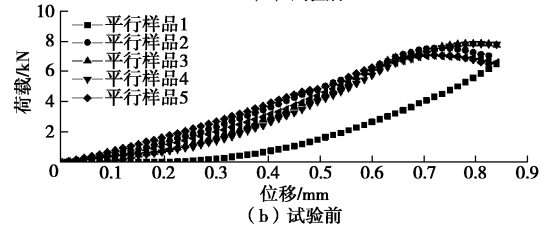
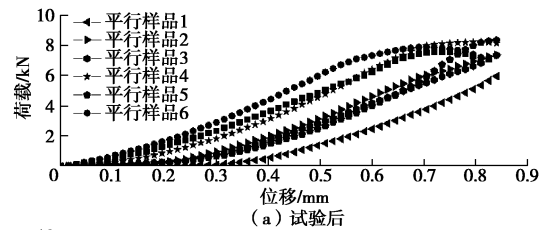


图 7 试验前后试样压缩曲线对比

Fig. 7 Comparison of compression curves

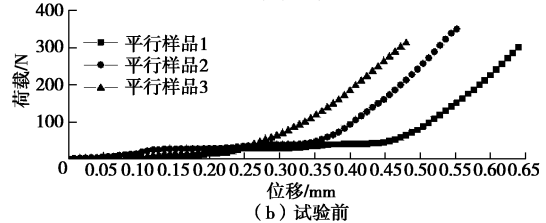
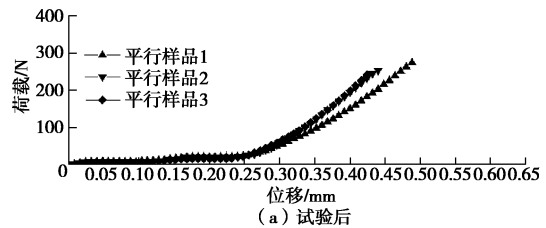


图 8 试验前后试样抗折曲线对比

Fig. 8 Comparison of flexural curves

2.6 冻融循环试验

试验前后外观对比表明, 试样没有外观上的改变。从结石体冻融循环试验前后的强度对比看 (图 6), 试验前抗压强度为 3.04 MPa, 试验后抗压强度为 2.76 MPa, 可见试验后抗压强度降低了 9.21%; 试验前抗折强度为 0.76 MPa, 试验后抗折强度为 0.66 MPa, 可见试验后抗折强度减小了 13.16%。从量值上看, 变化量并不大。由试验前后浆体的压缩曲线 (图 9) 可以看出, 曲线的形态具有相似性, 即线性增长后达到峰值, 峰值过后试块快速发生破坏。但试验后试样的压缩曲线离散性大于试验前的试样。由试验前后浆体的抗折曲线 (图 10) 可以看出, 曲线形态具有相似性, 即起始段呈现较低的斜率, 随后斜率急剧增加直至破坏。但试验后试样的压缩曲线离散性小于试验前的试样。以上特点表明, 浆体具有较强的弹脆性。

2.7 水稳定性试验

试验前后外观对比表明, 试样没有外观上的改变。从水稳定性试验结果看 (图 6), 试验前抗压强度为 3.04 MPa, 试验后湿试样抗压强度为 2.36 MPa, 试验后干

试样抗压强度为 2.83 MPa, 可见试验后对于湿试样强度降低了 22.37%, 对于干试块强度降低了 6.91%。抗折强度从试验前的 0.76 MPa 到试验后湿试样 0.42 MPa 和干试样 0.64 MPa, 相应的降低率分别为 44.74% 和 15.79%。由此可见水对结石体具有一定的影响。从试验前后试样的压缩曲线特征看 (图 11) (注: 因试验操作失误造成湿试块抗压试验曲线未获得), 曲线的形态具有相似性, 即线性增长后达到峰值, 峰值过后试块快速发生破坏。但试验后试样的压缩曲线离散性小于试验前的试样。由试验前后试验的抗折曲线 (图 12, 图 13) 可以看出, 曲线形态具有相似性, 即起始段呈现较低的斜率, 随后斜率急剧增加直至破坏。但试验后湿试样的曲线离散性远小于试验前试块和试验后干试块。以上特点表明, 浆体具有较强的脆性和较弱的塑性。

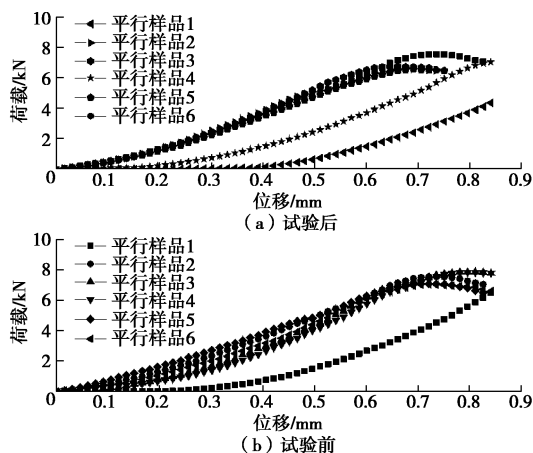


图 9 试验前后试样压缩曲线对比

Fig. 9 Comparison of compression curves

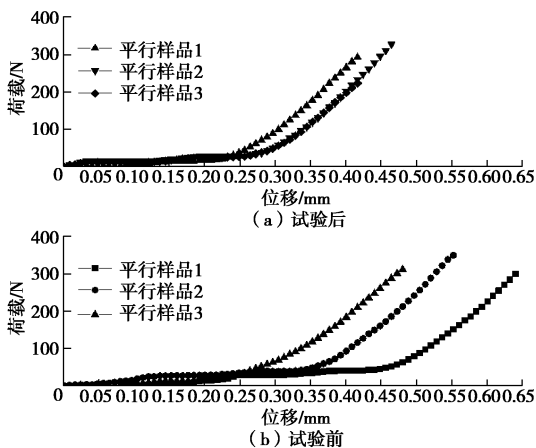


图 10 试验前后试样抗折曲线对比

Fig. 10 Comparison of flexural curves

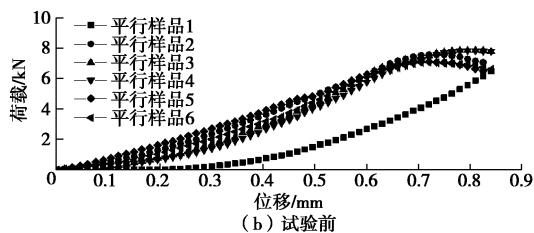
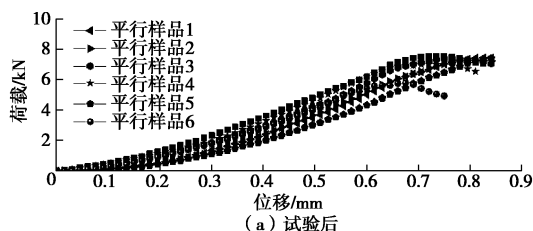


图 11 干试块试验前后抗压曲线对比

Fig. 11 Comparison of compression curves (Dry samples)

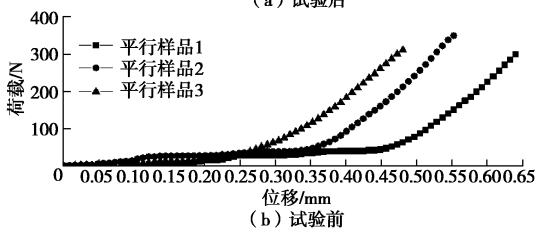
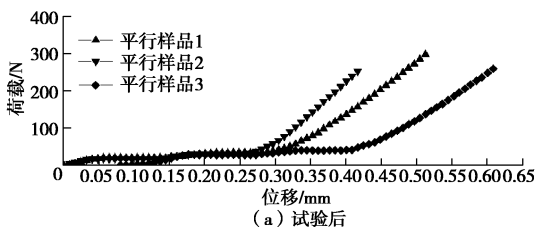


图 12 干试块试验前后抗折曲线对比

Fig. 12 Comparison of flexural curves (Dry samples)

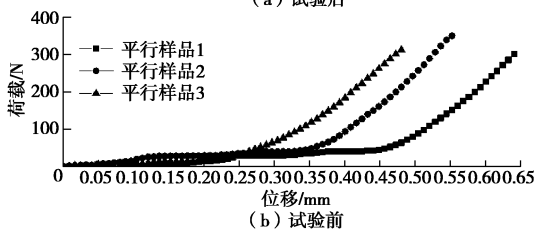
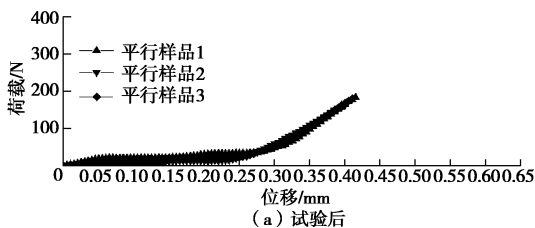


图 13 湿试块试验前后抗折曲线对比

Fig. 13 Comparison of flexural curves (Wet samples)

2.8 安定性试验

试验前后外观对比表明, 试样没有外观上的改变。从安定性试验前后的强度对比看 (图 6), 试验前抗压强度为 3.04 MPa, 试验后抗压强度为 2.22 MPa, 可见试验后抗压强度降低了 26.97%; 试验前抗折强度为 0.76 MPa, 试验后抗折强度为 0.51 MPa, 可见试验后抗折强度减小了 32.89%。可见 Na_2SO_4 溶液对浆体性能具有一定的弱化效应。由试验前后浆体的压缩曲线 (图 14) 可以看出, 曲线的形态具有相似性, 即线性增长后达到峰值, 峰值过后试块快速发生破坏。由试验前后浆体的抗折曲线 (图 15) 可以看出, 曲线形态具有相似性, 即起始段呈现较低的斜率, 随后斜率急

剧增加直至破坏。以上特点表明, 浆体具有较强的脆性和较弱的塑性。

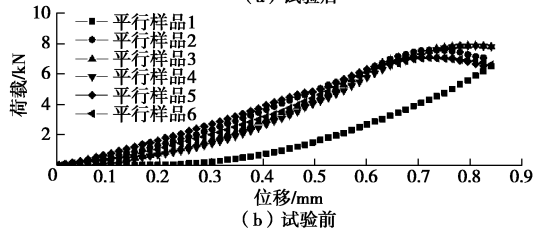
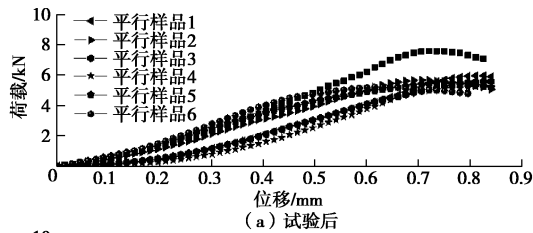


图 14 试验前后试样压缩曲线对比

Fig. 14 Comparison of compression curves

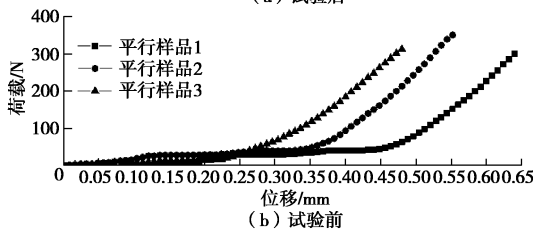
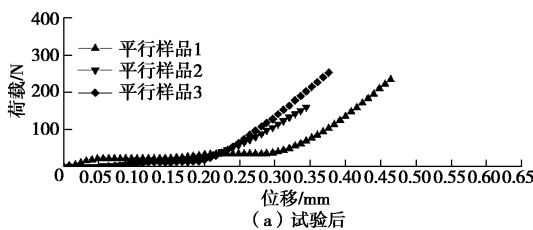


图 15 试验前后试样抗折曲线对比

Fig. 15 Comparison of flexural curves

2.9 耐碱性试验

试验前后外观对比表明, 试样没有外观上的改变。从耐碱性试验前后的强度对比看 (图 6), 试验后抗压强度降低了 5.26%, 抗折强度增加了 76.32%。可见 NaOH 溶液对浆体性能影响较小, 且对抗折性能有较大提升。

由试验前后浆体的压缩曲线 (图 16) 可以看出, 曲线的形态具有相似性, 即线性增长后达到峰值, 峰值过后试块快速发生破坏。但试验后试样的压缩曲线离散性大于试验前的试样。由试验前后浆体的抗折曲线 (图 17) 可以看出, 曲线形态具有相似性, 即起始段呈现较低的斜率, 随后斜率急剧增加直至破坏。以上特点表明, 浆体具有较强的脆性和较弱的塑性。

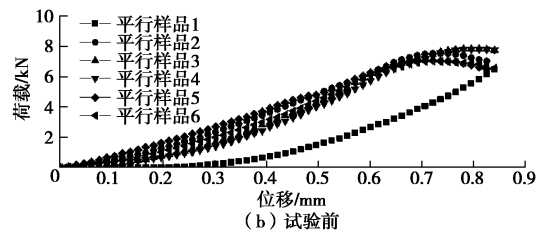
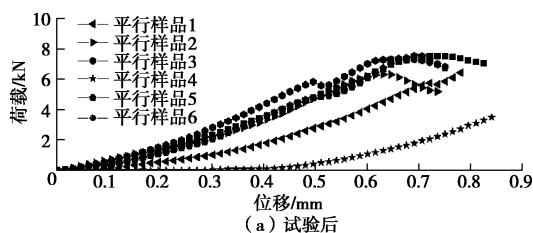


图 16 试验前后试样压缩曲线对比

Fig. 16 Comparison of compression curves

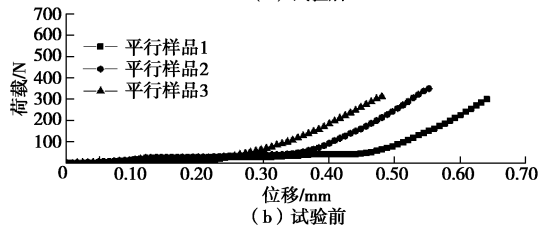
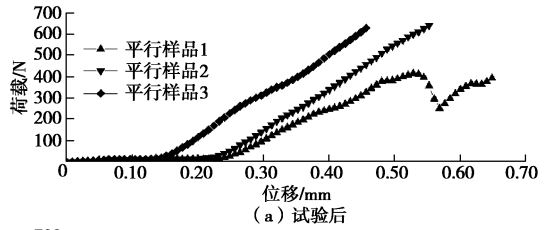


图 17 试验前后试样抗折曲线对比

Fig. 17 Comparison of flexural curves

3 讨 论

浆体初凝时间 (43 min) 与终凝时间 (90 min) 对土遗址锚固而言是较为理想的, 初凝时间完全满足浆液拌合后浆液运输、灌浆、锚杆的安设和锚孔的封堵等工序 (实践中一般历时 30 min), 初凝与终凝的间隙 (47 min) 为现场施工中的二次补浆提供良好的时机。从浆体凝结硬化过程中的强度、弹性波速和含水率变化特征, 不难看出, PS-(C+F) 浆体具有流动性好、快速硬化、硬化后结石体的强度较高等特点。浆体龄期抗压强度和弹性波速变化趋势均具有先增后减再增的特征, 但两者的时间点具有差异, 从宏观上看该特征非常异常, 与一般的浆体硬化规律不同。从抗压强度和弹性波速测定结果的离散性判断可以排除试验失误的可能, 该种变化趋势说明浆体早期强度较高, 但下跌现象的出现还难以解释, 需要深入的结石体微观结构和化学组分分析。28 d 龄期浆体的孔隙率为 39.66%, 反映出浆体具有一定的透气透水功能, 与遗址土体的孔隙率接近, 确保了浆体和遗址土体在水理性方面的兼容, 防止水汽运移中在界面出现水分集中而造成界面的劣化。0.85% 的收缩变形量对于浆体而言影响较小, 也意味着硬化凝结完成后, 浆体与杆体、土体两个界面没有发生解耦, 确保了两个界面的摩阻力和黏结力, 对于保证锚固系统的力学性能具有重要意义。PS-(F+C) 浆液属于气硬性灌浆材料, 由于粉煤灰的活化效应和 PS 的脱水固化^[17], 浆液结石体内部也

存在自收缩、化学减缩、凝缩、自干燥收缩、塑性收缩和碳化收缩^[19]，但最主要的仍是干燥条件下的收缩，它是PS-(F+C)浆液结石体在干燥环境下由于水分蒸发所引起的收缩。此外，28 d龄期结石体的密度 1.42 g/cm^3 ，而大多土遗址体的密度在 $1.4 \sim 1.6 \text{ cm}^3$ 之间，可见在密度上也具有较好的兼容性；结石体抗压强度大于 3 MPa ，适度大于土遗址体的抗压强度。综合之，本研究的浆体具有较好的施工操作性和物理性能兼容性，适用于土遗址锚固。

耐环境性能的试样是龄期50 d的结石体，硬化凝结过程基本完整。温湿度循环试验后结石体抗压强度增加而抗折强度减小，这一特征与高温作用下促进结石体的硬化凝结程度有关，相应的结石体脆性增加，表现出这种反常效应。冻融循环试验结果表明，浆体具有良好的耐冻融性，这点对于锚固性能的长期保障具有重要意义，因为在中国西北干旱半干旱区典型的气候特征之一就是日较差、年较差非常大。水稳定性试验表明浆体具有一定的耐水性，但湿试块的强度降低率明显高于干试块，可见在水环境中浆体的性能劣化较为严重，不过在中国西北干旱半干旱地区，土遗址主要分布于地表，遗址体中上部土体的含水率较低（ $<7\%$ ），加之浆体处于遗址土的内部，不受到大气降水的影响，因此相应对浆体的威胁较小。安定性试验结果表明，硫酸钠溶液对结石体具有较高的劣化效应，因此在实际工程应用中，要避免该浆体应用于遗址土体硫酸钠含量较高的土体中。耐碱性试验表明，结石体对于碱性环境具有较高的抵抗力，而中国西北地区土遗址土体基本是偏碱性的，无疑非常适应，值得一提的是，经过耐碱性试验试样的抗折强度得到了大幅度提高，具体原因与碱激发胶凝材料类似^[23]，NaOH碱性溶液起到催化剂的作用激发PS-(C+F)结石体的水化，提高结石体的胶凝程度。综合不同试验中试样的压缩曲线和抗折曲线特征可知，浆体具有较强的弹脆性，其断裂机制具有典型非线性或线性强化-应力跌落特征，该特征与中国西北地区土遗址的力学特性相似，从而形成较好的变形协调，具有较好的兼容性。综合之，本研究的浆体具有较好的耐环境性，适用于土遗址锚固。

4 结论与建议

本文通过开展室内试验研究了土遗址锚固用PS-(C+F)浆液的性能及结石体的耐久性。初步结论与建议如下：

- （1）配合比为C:F=1，PS:(C+F)=0.39的PS-(C+F)浆液适宜于土遗址锚固用，具有良好的兼容性。
- （2）浆体初凝和终凝时间可以满足锚固施工的工艺需求；浆体的龄期强度、收缩率、密度与遗址土

体具有良好的兼容性；结石体自身的透气透水性确保了锚固系统的整体兼容性。

（3）结石体温湿度循环试验、冻融循环试验、水稳定性试验、安定性试验和耐碱性试验均表明结石体具有良好的耐环境性能。相对而言，耐水性和安定性较弱；就应用而言，本浆液不适于土遗址体含水率较高和硫酸钠含量较高的部位锚固。

（4）鉴于本试验环境是较为开放的环境，而实际浆体是处于封闭环境中的，加之气硬性的机制，相应的龄期性能和结石体性能比室内略微滞后。

参考文献：

- [1] 李最雄. 丝绸之路古遗址保护[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 17 - 21. (LI Zui-xiong. Conservation of ancient sites along the silk road[M]. Beijing: Science Press, 2010: 17 - 21. (in Chinese))
- [2] 孙满利. 土遗址保护研究现状与发展[J]. 文物保护与考古科学, 2007, 19(4): 64 - 69. (SUN Man-li. Research status and development of the conservation of earthen sites[J]. Science of Conservation and Archeology, 2007, 19(4): 64 - 69. (in Chinese))
- [3] 孙满利, 王旭东, 李最雄. 西北地区土遗址病害[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2010, 46(6): 41 - 45. (SUN Man-li, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong. Issues concerning earthen sites in Northwest China[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2010, 46(6): 41 - 45. (in Chinese))
- [4] 黄克忠. 岩土文物建筑的保护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998: 5 - 9. (HUANG Ke-zhong. Conservation of heritage building of rock and soil[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998: 5 - 9. (in Chinese))
- [5] 王旭东. 土建筑遗址保护理念探索与实践-以交河故城保护为例[J]. 敦煌研究, 2010(6): 1 - 9. (WANG Xu-dong. Philosophy and practice of conservation of earthen architecture sites: a case study of the Jiaohe ancient site in Xinjiang[J]. Dunhuang Research, 2010(6): 1 - 9. (in Chinese))
- [6] 孙满利, 王旭东, 李最雄, 等. 木质锚杆加固土遗址研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(12): 2156 - 2159. (SUN Man-li, WANG Xu-dong, LI Zui-xiong, et al. Study on immature earthen sites reinforced with wood anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(12): 2156 - 2159. (in Chinese))
- [7] 张艳军, 张虎元, 吕擎峰, 等. 楠竹加筋复合锚杆应力传递理论模型[J]. 水文地质工程地质, 2008(5): 37 - 40. (ZHANG Yan-jun, ZHANG Hu-yuan, LÜ Qing-feng, et al. Stress transfer model of bamboo-steel composite anchor[J].

- Hydrogeology and Engineering Geology, 2008(5): 37 - 40. (in Chinese))
- [8] 孙满利, 李最雄, 王旭东, 等. 南竹加筋复合锚杆加固土遗址研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 2): 3381 - 3385. (SUN Man-li, LI Zui-xiong, WANG Xu-dong, et al. Study on reinforcement of earthen sites by bamboo-steel composite anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S2): 3381 - 3385. (in Chinese))
- [9] 张虎元, 王晓东, 王旭东, 等. 楠竹加筋复合锚杆内部界面黏结滑移模型[J]. 岩土力学, 2011, **32**(3): 789 - 796. (ZHANG Hu-yuan, WANG Xiao-dong, WANG Xu-dong, et al. Bond-slip model for bamboo-steel cable composite anchor[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 789 - 796. (in Chinese))
- [10] REN F F, YANG Z J, CHEN J F, et al. An analytical analysis of the full-range behaviour of grouted rockbolts based on a tri-linear bond-slip model[J]. Construction and Building Materials, 2010, **24**(3): 361 - 370.
- [11] 张景科. 全长黏结型锚杆锚固土遗址机理研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012. (ZHANG Jing-ke. Study on the anchorage mechanism of full-length bonded bolts in the consolidation for earthen sites[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. (in Chinese))
- [12] AGNEW N, PREUSSER F, DRUZIK J R. Strategies for adobe preservation[C]// 5th International Meeting of Experts on the Conservation of Earthen Architecture. ICCROM CRATERRE, 1987: 3 - 11.
- [13] 邵明申, 李 黎, 裴强强, 等. 环境因素对 PS 加固土遗址效果的影响[J]. 工程地质学报, 2010, **18**(3): 371 - 375. (SHAO Ming-shen, LI Li, PEI Qiang-qiang, et al. Laboratory soil test on impact of environmental factors to earthen ruins reinforced with PS [J]. Journal of Engineering Geology, 2010, **18**(3): 371 - 375. (in Chinese))
- [14] 李 黎, 陈 锐, 邵明申, 等. 经 PS 加固土遗址水饱和和强度及加固效果的环境影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(5): 1074 - 1080. (LI Li, CHEN Rui, SHAO Ming-shen, et al. Saturation strength of earthen ruins reinforced by potassium silicate and influence of environmental factors on reinforcement effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(5): 1074 - 1080. (in Chinese))
- [15] ZHANG De-xuan, WANG Tong-rui, WANG Xu-dong, et al. Laboratory experimental study of infrared imaging technology detecting the conservation effect of ancient earthen sites (Jiaohe Ruins) in China[J]. Engineering Geology, 2012, **125**: 66 - 73.
- [16] 李最雄, 张虎元, 王旭东. PS-F 灌浆材料的进一步研究[J]. 敦煌研究, 1996(1): 125 - 139. (LI Zui-xiong, ZHANG Hu-yuan, WANG Xu-dong. Further studies on the use of PS-F as a grouting mixture[J]. Dunhuang Research, 1996(1): 125 - 139. (in Chinese))
- [17] 杨 涛, 李最雄, 谌文武. PS-F 灌浆材料的物理力学性能[J]. 敦煌研究, 2005(4): 40 - 50. (YANG Tao, LI Zui-xiong, CHEN Wen-wu. Mechanical and physical properties of PS-F grouting material[J]. Dunhuang Research, 2005(4): 40 - 50. (in Chinese))
- [18] 杨 涛, 李最雄, 汪万福. 交河故城土体裂隙灌浆材料性能试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 2): 3782 - 3788. (YANG Tao, LI Zui-xiong, WANG Wan-fu. Performance test of compatible slurry grouting into soil fracture at ancient city of Jiaohe[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S2): 3782 - 3788. (in Chinese))
- [19] 李最雄, 赵林毅, 孙满利. 中国丝绸之路土遗址的病害及 PS 加固[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(5): 1048 - 1054. (LI Zui-xiong, ZHAO Lin-yi, SUN Man-li. Deterioration of earthen sites and consolidation with PS material along silk road of China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(5): 1048 - 1054. (in Chinese))
- [20] 孙满利. 吐鲁番交河故城保护加固研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2006. (SUN Man-li. A study of the protection and reinforcement about the ruins of Jiaohe in Turpan[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. (in Chinese))
- [21] HARAJLI M, ABOUNIAJ M. Bond performance of GFRP bars in tension: experimental evaluation and assessment of ACI 440 guidelines[J]. Journal of Composites for Construction, 2010, **14**(6): 659 - 658.
- [22] 郭青林, 王旭东, 范宇权, 等. 砂砾岩石窟灌浆材料 PS-F 机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(增刊 2): 3330 - 3335. (GUO Qing-lin, WANG Xu-dong, FAN Yu-quan, et al. Study on mechanism of PS-F grouting material for sandy conglomerate grottoes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(S2): 3330 - 3335. (in Chinese))
- [23] LI Hui, ZHUGE Li-jun, SHI Shi, et al. Hydration products of fly ash based cementing material activated by NaOH[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2012, **40**(2): 234 - 239.