

## 聚丙烯酸钠改性红黏土工程特性试验研究

王家全, 刘宏志, 林志南, 唐 毅

## Experimental study on engineering properties of red clay modified by sodium polyacrylate

WANG Jiaquan, LIU Hongzhi, LIN Zhinan, and TANG Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305036>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 改性纳米硅材料加固松散砂土的工程特性研究

A study of the engineering characteristics of reinforced loose sand by modified nano-Si materials

徐岗, 裴向军, 袁进科, 陈杰, 任和 水文地质工程地质. 2019, 46(4): 142-149

#### 瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲蚀试验研究

An experimental study of the engineering properties and erosion resistance of guar gum-reinforced loess

杨万里, 石玉玲, 穆鹏雪, 贾卓龙, 曹怡菡 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 117-124

#### 云母影响水泥软黏土强度的试验研究

Experimental research on the influence of mica on strength of cement-reinforced soft clay

张亚玲, 赵晓彦, 严群 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 101-108

#### 改性糯米灰浆固化黄土的微观机理试验研究

A test study of the microscopic mechanism of modified glutinous rice mortar solidified loess

贾栋钦, 裴向军, 张晓超, 周立宏 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 90-96

#### 人工制备结构性软黏土长期变形特性试验研究

An experimental study of the long-term deformation characteristics of artificial structured soft clay

杨爱武, 郑宇轩, 肖敏 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 133-133

#### 上海黏土压缩回弹变形的微观机理

Micro-mechanism of compression and rebound of clay in Shanghai

顾迪, 严学新, 张云, 白杨, 杨天亮 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 123-131



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202305036

王家全, 刘宏志, 林志南, 等. 聚丙烯酸钠改性红黏土工程特性试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(3): 110-117.  
WANG Jiaquan, LIU Hongzhi, LIN Zhinan, et al. Experimental study on engineering properties of red clay modified by sodium polyacrylate[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(3): 110-117.

## 聚丙烯酸钠改性红黏土工程特性试验研究

王家全<sup>1,2</sup>, 刘宏志<sup>1,2</sup>, 林志南<sup>1,2</sup>, 唐 毅<sup>1,2</sup>

(1. 广西科技大学广西高校防灾减灾与预应力技术重点实验室, 广西 柳州 545006;  
2. 广西壮族自治区岩土灾变与生态治理工程研究中心, 广西 柳州 545006)

**摘要:** 为研究聚丙烯酸钠改性红黏土的工程特性, 利用聚丙烯酸钠对柳州重塑红黏土进行固化处理, 开展变水头渗透试验和三轴剪切试验, 分析改性红黏土的渗透特性和力学性能, 确定聚丙烯酸钠的最适掺量, 并通过对最适改性土开展崩解试验和扫描电镜试验, 确定改性红黏土的抗崩解性能, 揭示聚丙烯酸钠改性红黏土的微观作用机理。结果表明: 随聚丙烯酸钠掺量的增加, 改性土的渗透系数呈现逐步下降的趋势, 并在达到 3% 后逐渐趋于稳定, 此时渗透系数为  $8.1379 \times 10^{-7}$  cm/s, 相对素红黏土降低了 90.78%; 而改性红黏土的抗剪强度呈现先增大后减小的趋势, 并在 2% 时达到峰值, 相对素红黏土提高了 394.21%。综上确定聚丙烯酸钠的最适掺量为 3%, 此掺量下改性土的抗崩解性能提高了 42.86%, 土颗粒间的孔隙被聚合物链所填充, 碎散的颗粒状红黏土变为连续状, 排列结构与致密程度均优于素红黏土。经聚丙烯酸钠改性后, 红黏土的防渗性能、力学性能与抗崩解性均存在明显提高, 可以为实际工程提供理论指导。

**关键词:** 聚丙烯酸钠; 红黏土; 渗透性; 抗剪强度; 抗崩解性; 微观机理

中图分类号: TU446

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)03-0110-08

## Experimental study on engineering properties of red clay modified by sodium polyacrylate

WANG Jiaquan<sup>1,2</sup>, LIU Hongzhi<sup>1,2</sup>, LIN Zhinan<sup>1,2</sup>, TANG Yi<sup>1,2</sup>

(1. Guangxi University Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation and Prestress Technology, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China; 2. Guangxi Zhuang Autonomous Region Engineering Research Center of Geotechnical Disaster and Ecological Control, Liuzhou, Guangxi 545006, China)

**Abstract:** To study the engineering properties of red clay modified by sodium polyacrylate, the Liuzhou remodeled red clay cured by sodium polyacrylate was selected for the permeability test with variable head and triaxial shear test to analyze the permeability and mechanical properties of the modified red clay and to determine the optimum amount of sodium polyacrylate. The disintegration resistance and microscopic mechanism of the modified red clay were determined by the disintegration test and scanning electron microscope test, respectively.

收稿日期: 2023-05-18; 修订日期: 2023-07-07

投稿网址: [www.swdzcgdz.com](http://www.swdzcgdz.com)

基金项目: 广西自然科学基金重点项目(2022GXNSFDA035081); 国家自然科学基金项目(41962017); 广西高等学校高水平创新团队及卓越学者计划项目(桂教人才[2020]6号); 广西科技大学研究生教育创新计划项目(GKYC202328)

第一作者: 王家全(1981—), 男, 博士, 教授, 主要从事加筋土结构、地基基础工程、土木工程灾害防治等方面的研究。

E-mail: [wjquan1999@163.com](mailto:wjquan1999@163.com)

通讯作者: 林志南(1987—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: [zhinan\\_lin@gxust.edu.cn](mailto:zhinan_lin@gxust.edu.cn)

The results show that the permeability coefficient of the modified soil decreases gradually with the increase of sodium polyacrylate, and gradually stabilizes after reaching 3% with the permeability coefficient of  $8.1379 \times 10^{-7}$  cm/s, 90.78% lower than that of the plain soil. In contrast, the shear strength of the modified red clay shows an increasing trend firstly, then decreases, and then keeps stable at 2%, which is 394.21% higher than that of the plain soil. The optimal dosage is 3%, and in such situation, the anti-disintegration performance of the modified soil is improved by 42.86%. The pores between the soil particles filled by polymer chains lead to the continuous fragmented granular red clay. The arrangement structure and denseness are better than those of the plain red clay. The impermeability, mechanical properties, and disintegration resistance of the red clay modified by sodium polyacrylate are significantly improved. This study can provide theoretical information for the practical engineering.

**Keywords:** sodium polyacrylate; red clay; permeability; shear strength; disintegration resistance; microscopic mechanism

红黏土是碳酸盐岩系、玄武岩和花岗岩等母岩经红土化作用之后形成的一种特殊高塑性黏土, 广泛分布于广西、贵州、两湖和福建等地区<sup>[1]</sup>。红黏土具有高天然含水率、高塑性、较低压缩性等特性<sup>[2]</sup>。由于红黏土较为复杂的工程性能, 使得其在实际工程应用中容易引起地基不均匀变形、边坡失稳、建筑物变形等工程病害<sup>[3-4]</sup>。因此, 需要对红黏土进行改性处理, 使土体满足实际工程的需求。然而, 由于红黏土在不同地区的发育程度、成分以及工程性质存在显著差异, 因此对于不同地域红黏土的研究和改性方法也存在一定的差异。

常见的土体改性方法有 3 种, 分别是物理改性、生物改性、化学改性。物理改性通常是通过添加各种物理材料使土体致密化, 如侯正伟等<sup>[5]</sup>采用天然纤维材料来改性土体, 发现纤维增加了软土的抗压和抗剪强度, 减少了土体收缩; Tamassoki 等<sup>[6]</sup>使用活性炭和椰壳纤维来改性红土, 研究两者对土力学性能的影响, 结果表明椰壳纤维可以显著提高红土的抗压强度与抗剪强度。常见的生物改性有 2 种, 分别是微生物诱导碳酸钙沉淀 (microbial induced carbonate precipitation, MICP) 与酶诱导碳酸钙沉淀 (enzyme induced carbonate precipitation, EICP)<sup>[7-8]</sup>。余梦等<sup>[9]</sup>指出, MICP 形成的碳酸钙可能会形成一层低渗透的薄膜来降低土体渗透性, 而 EICP 更是无需培养微生物即可快速形成碳酸盐沉淀<sup>[10]</sup>, 但这 2 种改性方式在改性红黏土方面尚未得到充分研究, 此外, 这种固化剂耐久性能较弱, 容易生物降解<sup>[11]</sup>。化学改性即向土体中加入有机化合物 (如羧甲基纤维素钠<sup>[12]</sup>、黄原胶<sup>[13]</sup>、甘蔗糖蜜<sup>[14]</sup>、瓜尔豆胶<sup>[15]</sup>)、无机化合物 (如石灰<sup>[16]</sup>、粉煤灰<sup>[17]</sup>、稻壳

灰<sup>[18]</sup>)、离子化合物<sup>[19-20]</sup> 等对土体进行改性, 相比于其他改性方法, 化学改性操作简单, 效果也比较好的, 而且不易受外界环境影响<sup>[21]</sup>。聚丙烯酸钠就属于一种化学改性剂, 它是一种高吸水性树脂, 而且已被公认为属于环境友好型土壤稳定剂<sup>[22]</sup>, 在提高高含水率土壤强度方面表现出良好的性能<sup>[23-25]</sup>。它是一种具有大量羧基和羟基等亲水基团的水溶性交联聚合物, 其性质稳定, 加热处理、中性盐类、有机酸类等对其影响很小, 目前被广泛应用于食品添加剂与工业增稠剂; 其次它无色无味, 不易被生物降解, 而且对环境无害, 具有广阔的应用前景<sup>[26]</sup>。近年来, 在土木工程领域, 聚丙烯酸钠被广泛应用于混凝土的改性, 并取得一系列令人瞩目的成果<sup>[27-28]</sup>, 但对于红黏土改性方面的应用研究仍存在一些不足之处。

综上所述, 本研究以柳州红黏土为研究对象, 对掺有聚丙烯酸钠的红黏土开展变水头渗透试验、三轴剪切试验、崩解试验以及扫描电镜试验, 揭示聚丙烯酸钠改性红黏土的微观作用机理, 以期对聚丙烯酸钠改性红黏土的相关工程提供一定的理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用红黏土采自柳州市北部生态新区某工程场地, 土样呈红褐色, 质地均匀, 结构紧密。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[29]</sup> 确定其基本物理指标: 最大干密度  $1.78 \text{ g/cm}^3$ , 最优含水率 24.31%, 液限 62.15%, 塑限 31.3%, 可归类为高可塑性黏土; 试验所用改良剂为工业级聚丙烯酸钠, 材质为无色无味的白色粉末, 其 pH 为 7.8, 粒度为 200 ~ 400 目, 分子量

为 1 000 万 g/mol, 结构式为  $[-CH_2-CH(COONa)-]_n$ , 物质数字识别号码(CAS 编号)为 9003-04-7。

## 1.2 试样制备

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)要求制备土样<sup>[29]</sup>, 过程如下: 将试验用红黏土依次经过低温烘干、碾碎、筛分(过 2 mm 标准筛)后, 按照预设的红黏土干质量掺入比(0、1%、2%、3%、4%、5%、6%)将一定质量的聚丙烯酸钠掺入红黏土中, 计算公式如下:

$$m = Mw \quad (1)$$

式中:  $m$ ——掺入的聚丙烯酸钠的质量/g;

$M$ ——干红黏土的质量/g;

$w$ ——聚丙烯酸钠的预定掺量/%。

将混合试样充分拌匀, 用喷壶分多次喷入去离子水, 期间继续搅拌, 直至土样湿润到最优含水率, 为确保试样均匀湿润, 拌匀后将试样放入密闭容器中闷土 24 h, 制得试验所需土样, 采用静压法压制试验所需试样, 三轴剪切试验采用直径 50 mm、高 100 mm 的土柱, 渗透试验采用直径 61.80 mm、高 40 mm 的土柱。

## 1.3 试验仪器及方法

### (1) 变水头渗透试验

采用 TST-55 南京土壤渗透仪进行试验, 步骤如下: ①将试样进行充分饱和后, 将透水石、密封圈套在底座中, 在透水石上垫上滤纸, 将土样环刀放入套筒内, 平放于底座上; ②在套筒上放上密封圈、滤纸、透水石、上盖、拧紧螺杆, 防止漏水漏气; ③打开进水管口与供水装置联通的开关, 通水排气, 调平渗透仪, 在水头作用下, 静置, 当上盖出水管口有水滴均匀冒出时开始测定; ④试验时, 将水头管送水至所需水头后关供水管夹开关, 记录起始水头  $h_1$  和开始时间  $t_1$  后, 按预定时间间隔测记水头和时间, 同时记录试验时与终止时的水温, 通过建立瞬时达西定律计算渗透系数。

### (2) 三轴剪切试验

采用 GDS 静态三轴测试系统进行试验, 步骤如下: 首先将饱和后的试样套上橡皮膜并装上三轴压力室, 其次对每组试样分别开展围压 100 kPa、200 kPa、300 kPa 的固结不排水试验, 剪切速率为 0.8 mm/min, 取应力应变曲线上偏差应力的峰值作为破坏值, 不存在峰值时, 取轴向应变 15% 所对应曲线上的点作为破坏值, 在应力平面上绘制莫尔圆, 求得黏聚力、内摩擦角, 根据莫尔—库仑强度准则计算抗剪强度。

## 2 试验结果

### 2.1 渗透特性

聚丙烯酸钠的掺入显著改善了红黏土的防渗性能, 不同聚丙烯酸钠掺量下红黏土的渗透系数变化曲线如图 1 所示。随着聚丙烯酸钠掺量的增加, 改性土的渗透系数逐渐减小, 与素红黏土相比, 当掺量为 1%、2%、3%、4%、5%、6% (按红黏土干质量计) 时, 改性红黏土的渗透系数分别降低 7.90%、44.02%、90.78%、94.91%、96.15%、96.83%。当掺量大于 3% 后, 其渗透系数波动较为稳定, 均在一个数量级。且经 3% 聚丙烯酸钠改性后的红黏土的渗透系数为  $8.1379 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ , 满足工程建设中防渗层的要求, 从成本、环保以及防渗效果的角度综合考虑, 确定聚丙烯酸钠的最适掺量为 3%。

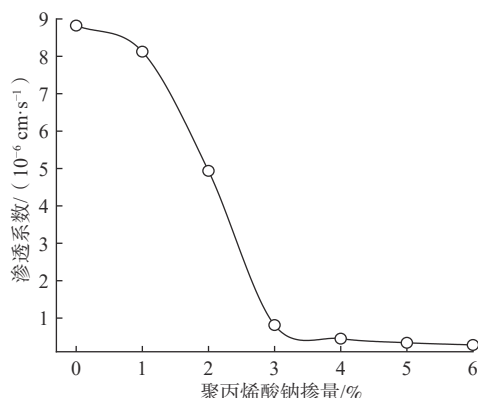


图 1 不同掺量下红黏土渗透系数

Fig. 1 Permeability coefficients of laterite soil under different dosages

### 2.2 力学特性

由图 2 和图 3 可知: 随着聚丙烯酸钠的掺入, 改性土的抗剪强度与内摩擦角随着聚丙烯酸钠掺量的增加呈现先增大后减小的趋势, 在掺量为 2% 时达到峰值; 改性土的黏聚力随着聚丙烯酸钠掺量的增加呈现逐步增大的趋势, 而黏聚力的提高是由于聚丙烯酸钠自身黏性的存在所导致。以围压 200 kPa 为例, 当围压为 200 kPa 时, 素红黏土抗剪强度为 192.600 kPa, 内摩擦角为 18.92°, 而聚丙烯酸钠掺量为 2% 的试样, 其抗剪强度为 951.854 kPa, 内摩擦角为 42.63°, 和素红黏土相比分别提高了 394.21% 与 125.32%; 聚丙烯酸钠掺量为 3% 的试样, 其抗剪强度为 826.621 kPa, 内摩擦角为 37.73°, 和素红黏土相比分别提高了 329.19% 和 99.42%。结合渗透特性的试验结果综合分析, 确定聚丙烯酸钠的最适掺量应为 3%。



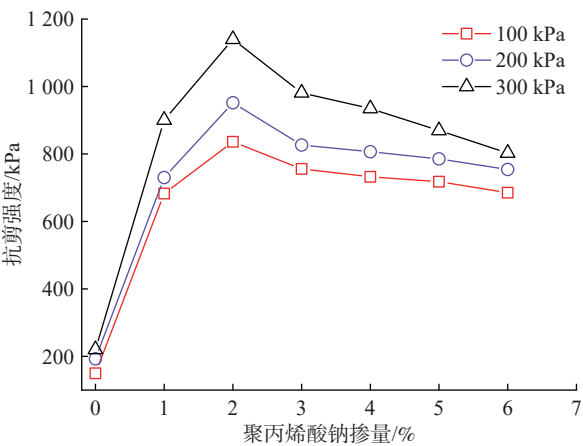


图 2 不同掺量下红黏土抗剪强度

Fig. 2 Shear strengths of laterite soil under different dosages

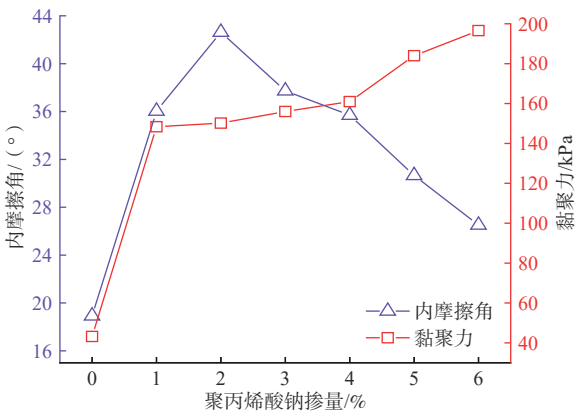


图 3 不同掺量下红黏土内摩擦角和黏聚力

Fig. 3 Internal friction angle and cohesion of laterite soil with different dosages

2.3 抗崩解特性

对素红黏土与经 3% 聚丙烯酸钠固化后的红黏土进行崩解测试。为了方便观察对比,试样规格与三轴剪切试验所制备试样相同,将其浸入去离子水中进行崩解测定,观察并描述试样的崩解情况。如表 1 所示,土体浸入水中 5 s 时,素红黏土与改性土试样表面均有小气泡缓慢溢出,此时水分子通过渗透作用不断进入土体并将表层试样中的气体置换出来,无其他现象产生;5 min 时,素红黏土试样继续吸水,同时伴随着底部土颗粒的开始剥落,改性土试样表面仍有小气泡缓慢溢出,处于吸水状态,无损伤形成;20 min 时,素红黏土下部表层的土颗粒完全脱落,同时伴随着裂隙的萌生,改性土仍处于吸水状态,但小气泡溢出速率明显降低,无损伤形成;1 h 时,素红黏土的崩解仍在持续,一直向上向内崩解蔓延,同时伴随着大量裂隙的出现,进入裂隙中的水分又加剧了崩解速率,而改性土表面也开始有土颗粒剥落;3 h 时,素红黏土试样已大量崩解,所剩土块之上满布裂隙,崩解速率降低,而改性土试样表面土颗粒缓慢均匀地脱落;3 h 至 5 h 期间,土样持续吸水崩解,素红黏土试样在 3.5 h 时完全溃散,而改性土试样仍在均匀崩解,也无大块土体剥落,直至 5 h 时才完全溃散,比素红黏土多耗费了 1.5 h。结果显示,随着 3% 聚丙烯酸钠的掺入,土体抗崩解性得到了显著提升,较素红黏土而言,完全崩解所需时间提高了 42.86%。

表 1 崩解过程

Table 1 Disintegration process

| 掺量<br>/% | 浸泡时间 |              |                   |                    |              |                 |              |      |
|----------|------|--------------|-------------------|--------------------|--------------|-----------------|--------------|------|
|          | 5 s  | 5 min        | 20 min            | 1 h                | 2 h          | 3 h             | 4 h          | 5 h  |
| 0        | 吸水   | 吸水+<br>土颗粒剥落 | 吸水+土颗粒剥落+<br>裂隙形成 | 吸水+裂隙数量骤增+<br>大量崩解 | 吸水+崩解加剧      | 几乎崩解完毕+<br>崩解减缓 | 完全崩解         | 完全崩解 |
| 3        | 吸水   | 吸水           | 吸水速率减缓            | 吸水+土颗粒剥落           | 吸水+裂隙形成+稳定崩解 | 吸水+裂隙发展+稳定崩解    | 吸水+裂隙发展+崩解减缓 | 完全崩解 |

2.4 微观结构特征

选用 KYKY-8000F 型场发射扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM)对素红黏土与经 3% 聚丙烯酸钠改性后的红黏土进行 2 个倍数的电镜扫描试验探究其微观结构的变化,SEM 图片如图 4 所示。素红黏土中存在明显的片状和块状颗粒,粒间孔隙明显发育,土体结构疏松,颗粒之间的接触方式主要以边-面接触为主;而添加了 3% 聚丙烯酸钠改性之后,土体结构变得较为致密,土中的孔隙和碎屑状颗

粒数量明显下降,形成了许多大面积的层状结构,颗粒之间的主要接触方式变为面接触,颗粒之间的咬合力提高,嵌固得更加密实,结构之间的稳定性与致密程度也被显著增强。

3 分析与讨论

3.1 改性红黏土渗透系数减小的原因

土体的渗透性是微观结构的宏观反映,对应于土体孔隙比或孔径分布的变化。聚丙烯酸钠对土体渗

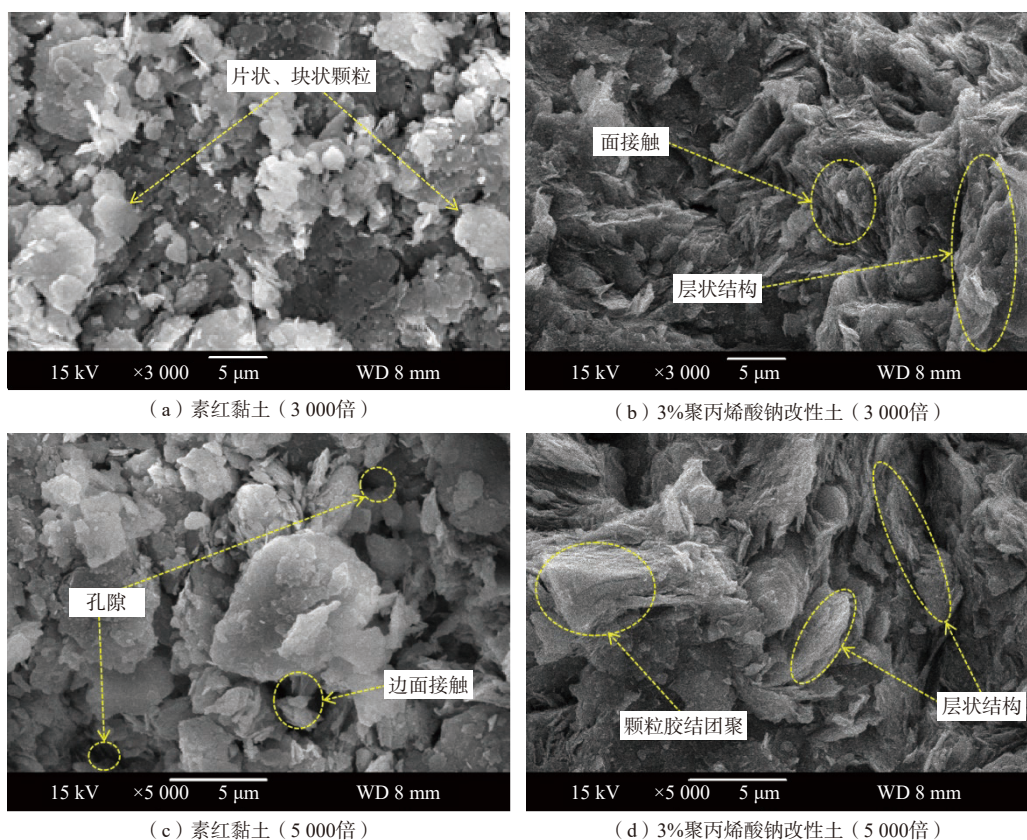


图4 改性前后土体微观结构

Fig. 4 Microstructures of soil before and after modification

透性的影响主要归结于2个因素:(1)聚丙烯酸钠与红黏土充分混合后,聚丙烯酸钠粉末均匀地附着于红黏土颗粒表面,当其遇水之后,红黏土颗粒表面附着的聚丙烯酸钠吸水膨胀形成三维网状水凝胶,水凝胶会充填土粒间的孔隙,导致改性土中的孔隙数量减少,减小可透水的空间结构,使水分子流经土体的速率显著降低,降低土体的渗透性;(2)聚丙烯酸钠的存在会促进土颗粒的絮凝,而絮凝作用会导致红黏土由粒状、片状变为团聚粒结构,而聚合物链在团聚粒之间形成桥梁,将众多的团聚粒黏结在一起,并填充粒间孔隙,使得分散的颗粒状黏土变为连续状。

### 3.2 改性红黏土力学特性变化的原因

在掺量不高于2%时,出现抗剪强度和内摩擦角随聚丙烯酸钠掺量增加而提高的原因归结于:

(1)聚丙烯酸钠具有吸水膨胀和吸附特性,其与红黏土充分混合后会均匀地附着于土颗粒表面,在遇水后吸水膨胀形成三维网状水凝胶,在黏土颗粒之间建立联系,并充分填充粒间孔隙空间中的大孔隙<sup>[30]</sup>,使得土颗粒间距减小,同时会增强土颗粒之间的联结,增强咬合作用,使其嵌固得更加密实,形成致密性

结构;

(2)聚丙烯酸钠能促进土的团聚作用,将分散的土颗粒黏结成较大团粒,众多团聚体结构被水凝胶紧紧黏结在一起,使得分散的颗粒状黏土变为连续状,形成了稳定的土体结构,因而,抗剪强度和内摩擦角得以有效改善;

(3)黏土颗粒会和聚合物的极性端基之间形成键,从而提高了土体强度<sup>[31]</sup>;

(4)聚丙烯酸钠具有强烈的吸水性,掺入红黏土中需要消耗土中大量的自由水,自由水的减少必然会令颗粒间的咬合力增加;同时也会使得土颗粒间的结合水膜厚度变薄。

而当掺量大于2%后,抗剪强度和内摩擦角会随着聚丙烯酸钠的增加而不断减小,究其原因:

(1)聚丙烯酸钠本身还具有增稠、膨胀、保水等特性,当聚丙烯酸钠掺量增加到一定程度以后,在饱和阶段会在土颗粒之间的孔隙中形成过量的水凝胶,过量的水凝胶不但充分填充了粒间孔隙,更是将土颗粒分离与阻断,导致土体结构性变差,颗粒间咬合作用减小;

(2)过量的水凝胶同时也会降低土样自身的均一性和整体性,土样中虽仍有团粒存在,但团粒之间联结变弱,最终削弱了土体的抗剪强度和内摩擦角。

### 3.3 微观结构的变化对工程特性的影响

改性前后颗粒的形貌特征如图4所示,这主要是由于聚丙烯酸钠的存在促进了土颗粒的胶结团聚作用,使得红黏土颗粒由粒状、片状等形成更大的团聚体结构,稳定了土体结构;其次是由于聚合物在团聚体之间形成桥梁,将众多的团聚体黏结在一起,并填充了粒间孔隙,使得土颗粒之间的接触更紧密。

而当土体遇水后,颗粒表面附着的聚丙烯酸钠与水接触,水分子通过渗透作用进入聚合物内部使其电离出带正电荷的钠离子,而其自身由于负电荷之间的静电斥力,高分子链逐渐伸展溶胀;而且由于链上带负电荷的离子不能移动到外部,使得其内外部的溶液离子浓度差形成反渗透压,水分子在反渗透压的作用下进一步进入聚合物中形成水凝胶,填充了土体内部的孔隙,增强了土颗粒之间的联结与咬合作用,同时由于聚丙烯酸钠所具有的黏性也使得土颗粒之间的黏聚力增加,不易遇水崩解,从微观上解释了聚丙烯酸钠减小红黏土渗透系数,提高土体强度及抗崩解特性的原理。

## 4 结论

(1)改性土的渗透系数随聚丙烯酸钠掺量的增加呈现逐步减小的趋势,并在掺量达到3%后趋于稳定,此时土体的渗透系数为 $8.1379 \times 10^{-7}$  cm/s,和素红黏土相比降低了90.78%,满足工程建设中防渗层的要求。

(2)改性土的抗剪强度随着聚丙烯酸钠掺量的增加呈现先增大后减小的趋势,在2%时达到峰值,在3%时达到次峰值,和素红黏土相比,分别提高了394.21%与329.19%,综合考虑确定其最适掺量为3%。此外,通过崩解试验确定了最适掺量的聚丙烯酸钠可以显著增强改性后土体的抗崩解性,其完全崩解所需时间增加了42.86%。

(3)经3%聚丙烯酸钠改性后,土体中的碎屑状颗粒数量明显下降,粒间孔隙被大量填充,土粒之间嵌固得更加密实,结构之间的稳定性与致密程度也显著增强,从微观上反映了改性后其防渗性能、力学性能和抗崩解性明显提高的根本原因。

(4)根据本文对聚丙烯酸钠改性红黏土特性的研究,建议在红黏土中添加3%聚丙烯酸钠来改性其特

性,可以在提高红黏土力学性能与抗崩解性的同时,降低其渗透系数。研究成果对进一步研究聚丙烯酸钠改性红黏土的工程特性具有指导意义。

### 参考文献 (References) :

- [1] 穆锐,黄质宏,姚未来,等.分级循环荷载下原状红黏土动力特性试验研究[J].水文地质工程地质,2022,49(3): 94 - 102. [MU Rui, HUANG Zhihong, YAO Weilai, et al. An experimental study of the dynamic characteristics of the undisturbed laterite under graded cyclic loading[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(3): 94 - 102. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 陈佳雨,刘之葵,陈永国,等.纤维红黏土强度的正交试验及多元非线性回归分析[J].水文地质工程地质,2020,47(1): 117 - 124. [CHEN Jiayu, LIU Zhikui, CHEN Yongguo, et al. Orthogonal test and multivariate nonlinear regression analyses of strength of the fiber red clay[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(1): 117 - 124. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 蒋文宇.广西红黏土土质特征及土性改良研究[D].南宁:广西大学,2015. [JIANG Wenyu. Study on soil characteristics and filling performance of Guangxi red clay[D]. Nanning: Guangxi University, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王泽成,李栋伟,张潮潮,等.考虑含水率对人工冻结红黏土力学特性的影响[J].地质科技通报,2022,41(6): 287 - 293. [WANG Zecheng, LI Dongwei, ZHANG Chaochao, et al. Effect of water content on the mechanical properties of artificially frozen red clay[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(6): 287 - 293. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 侯正伟,李建宏,李财生,等.椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响[J].环境科学,2023,44(8): 4497 - 4506. [HOU Zhengwei, LI Jianhong, LI Caisheng, et al. Effect of coconut fiber biochar and its nitrate modification on Pb passivation in paddy soils[J]. Environmental Science, 2023, 44(8): 4497 - 4506. (in Chinese with English abstract)]
- [6] TAMASSOKI S, DAUD N N N, JAKARNI F M, et al. Compressive and shear strengths of coir fibre reinforced activated carbon stabilised lateritic soil[J]. Sustainability, 2022, 14(15): 9100.
- [7] ALMAJED A, LATEEF M A, ALI BAIG MOGHAL A, et al. State-of-the-art review of the applicability and challenges of microbial-induced calcite precipitation



- (MICP) and enzyme-induced calcite precipitation (EICP) techniques for geotechnical and geoenvironmental applications[J]. *Crystals*, 2021, 11(4): 370.
- [ 8 ] AHENKORAH I, RAHMAN M M, KARIM M R, et al. Enzyme induced calcium carbonate precipitation and its engineering application: A systematic review and meta-analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 308: 125000.
- [ 9 ] 余梦, 张家铭, 周杨, 等. MICP 技术改性膨胀土试验研究 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38(5): 103 – 108. [ YU Meng, ZHANG Jiaming, ZHOU Yang, et al. Experimental study on modifying expansive soil by MICP technology[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2021, 38(5): 103 – 108. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] 张茜, 叶为民, 刘樟荣, 等. 基于生物诱导碳酸钙沉淀的土体固化研究进展 [J]. 岩土力学, 2022, 43(2): 345 – 357. [ ZHANG Qian, YE Weimin, LIU Zhangrong, et al. Advances in soil cementation by biologically induced calcium carbonate precipitation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(2): 345 – 357. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 11 ] POONI J, GIUSTOZZI F, ROBERT D, et al. Durability of enzyme stabilized expansive soil in road pavements subjected to moisture degradation[J]. *Transportation Geotechnics*, 2019, 21: 100255.
- [ 12 ] 裴向军, 杨晴雯, 许强, 等. 改性钠羧甲基纤维素胶结固化土质边坡机制与抗冲刷特性研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2316 – 2327. [ PEI Xiangjun, YANG Qingwen, XU Qiang, et al. Research on glue reinforcement mechanism and scouring resistant properties of soil slopes by modified carboxymethyl cellulose[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(11): 2316 – 2327. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] SOLDI A, MILETIĆ M. Study on shear strength of xanthan gum-amended soil[J]. *Sustainability*, 2019, 11(21): 6142.
- [ 14 ] KARIMI S, LASHKAR-ARA B, NAJAFI L. Influence of sugarcane molasses addition on the shear strength properties of slightly plastic loamy soils[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(9): 903.
- [ 15 ] 杨万里, 石玉玲, 穆鹏雪, 等. 瓜尔豆胶固化黄土的工程特性及抗冲刷试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(4): 117 – 124. [ YANG Wanli, SHI Yuling, MU Pengxue, et al. An experimental study of the engineering properties and erosion resistance of guar gum-reinforced loess[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 117 – 124. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 16 ] 王章琼, 高云, 沈雷, 等. 石灰改性红砂岩残积土工程性质试验研究 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(2): 416 – 421. [ WANG Zhangqiong, GAO Yun, SHEN Lei, et al. Engineering properties of lime-modified red sandstone residual soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(2): 416 – 421. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] YANG Wenrui, ZHOU Feng, ZHU Rui, et al. Strength performance of mucky silty clay modified using early-age fly ash-based curing agent[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01595.
- [ 18 ] 易富, 管茂成, 李军, 等. 稻壳灰-地聚物固化土力学特性及机理分析 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(2): 94 – 101. [ YI Fu, GUAN Maocheng, LI Jun, et al. Mechanical properties and mechanism analyses of rice husk ash geopolymer solidified soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 94 – 101. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 吴雪婷, 项伟, 王臻华, 等. 离子土固化剂固化淤泥的微观机理研究 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(5): 1285 – 1291. [ WU Xueting, XIANG Wei, WANG Zhenhua, et al. Microscopic mechanism of solidified silt with ionic soil stabilizer[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2018, 26(5): 1285 – 1291. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 游庆龙, 邱欣, 杨青, 等. 离子土壤固化剂固化红黏土强度特性 [J]. 中国公路学报, 2019, 32(5): 64 – 71. [ YOU Qinglong, QIU Xin, YANG Qing, et al. Strength properties of ionic soil stabilizer treated red soil[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(5): 64 – 71. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 牛鹏尧, 庄建琦, 贾珂程, 等. 聚丙烯酸钠混合剂固化黄土特性研究 [J]. 工程地质学报, 2022, 30(4): 1028 – 1035. [ NIU Pengyao, ZHUANG Jianqi, JIA Kecheng, et al. Study on properties of loess solidified by polyacrylate sodium[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(4): 1028 – 1035. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] BIAN Xia, ZENG Lingling, LI Xiaozhao, et al. Fabric changes induced by super-absorbent polymer on cement-lime stabilized excavated clayey soil[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(5): 1124 – 1135.



- [23] BIAN Xia, DING Guoquan, WANG Zhifeng, et al. Compression and strength behavior of cement–lime–polymer-solidified dredged material at high water content[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2017, 35(6): 840 – 846.
- [24] BIAN Xia, WANG Zhifeng, DING Guoquan, et al. Compressibility of cemented dredged clay at high water content with super-absorbent polymer[J]. *Engineering Geology*, 2016, 208: 198 – 205.
- [25] BIAN Xia, ZENG Lingling, DENG Yongfeng, et al. The role of superabsorbent polymer on strength and microstructure development in cemented dredged clay with high water content[J]. *Polymers*, 2018, 10(10): 1069.
- [26] 康祺祯, 李静静, 李育超, 等. PAA-Na 改性膨润土在酸碱盐溶液中的渗透性 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(10): 1877 – 1884. [KANG Qizhen, LI Jingjing, LI Yuchao, et al. Permeability of sodium polyacrylate modified calcium bentonite in acid-base salt solution[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2021, 55(10): 1877 – 1884. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 王玲玲, 隋雪, 谢宇航, 等. 聚丙烯酸钠对透水混凝土物理力学性能影响研究 [J]. 混凝土, 2020(2): 57 – 60. [WANG Lingling, SUI Xue, XIE Yuhang, et al. Effects of sodium polyacrylate on physical properties and mechanical behaviors of pervious concrete[J]. *Concrete*, 2020(2): 57 – 60. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] AZARIJAFARI H, KAZEMIAN A, RAHIMI M, et al. Effects of pre-soaked super absorbent polymers on fresh and hardened properties of self-consolidating lightweight concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 113: 215 – 220.
- [29] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People’s Republic of China. Standard for soil test methods: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese) ]
- [30] TIAN Kuo, LIKOS W J, BENSON C H. Pore-scale imaging of polymer-modified bentonite in saline solutions[C]//Geo-Chicago 2016. Chicago, Illinois. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2016: 468 – 477.
- [31] GEORGEES R N, HASSAN R A, EVANS R P, et al. Effect of the use of a polymeric stabilizing additive on unconfined compressive strength of soils[J]. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2015, 2473(1): 200 – 208.

编辑: 刘真真