

李杰,谢建斌,杨海涛,等. 交联生物聚合物增强红黏土物理力学性能研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(3): 273-282.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20240190

LI Jie, XIE Jianbin, YANG Haitao, et al. Study on the physical and mechanical properties of red clay enhanced by cross-linked biopolymers [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(3): 273-282. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20240190

# 交联生物聚合物增强红黏土物理力学性能研究

李杰, 谢建斌\*, 杨海涛, 杨乐, 王朝, 李克努

(云南大学 建筑与规划学院, 云南昆明 650504)

**摘要:** 为提高红黏土的强度和稳定性, 解决传统土体加固方法带来的环境污染和耐久性不足等问题, 采用 $\gamma$ -聚谷氨酸、 $\beta$ -葡聚糖及其交联聚合物 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G对红黏土进行改良, 通过响应面分析法优化 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G配比, 研究交联生物聚合物对红黏土物理力学性能的影响。研究表明: 与单一生物聚合物相比,  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G的加固效果更优。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%时, 对红黏土的加固效果最佳, 与素红黏土相比, 无侧限抗压强度、黏聚力和內摩擦角分别增大了74%、47.06%和41.68%, 压缩模量减小了54.81%。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G交联基质可有效填充土颗粒之间的空隙, 并将土颗粒包裹成整体, 显著增强红黏土的力学性能。研究结果为南方红黏土地区基础设施建设提供一种新型环保的土壤加固方案。

**关键词:** 交联生物聚合物;  $\gamma$ -聚谷氨酸;  $\beta$ -葡聚糖; 红黏土; 响应面分析; 土壤加固

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)03-0273-10

## Study on the physical and mechanical properties of red clay enhanced by cross-linked biopolymers

LI Jie, XIE Jianbin\*, YANG Haitao, YANG Le, WANG Chao, LI Kenu

(School of Architecture and Urban Planning, Yunnan University, Kunming 650504, China)

**Abstract:** To improve the strength and stability of red clay and address the environmental pollution and durability issues associated with traditional soil stabilization methods,  $\gamma$ -polyglutamic acid ( $\gamma$ -PGA),  $\beta$ -glucan, and their cross linked polymer  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G were used to modify red clay. The optimal ratio of  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G was determined using response surface methodology, and the effect of cross-linked biopolymers on the physical and mechanical properties of red clay was investigated. The results indicate that  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G outperforms single biopolymers in terms of reinforcement. At a  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G content of 2.5%, the reinforcement effect on red clay was optimal. Compared to untreated red clay, the unconfined compressive strength, cohesion, and internal friction angle increased by 74%, 47.06%, and 41.68%, respectively, and the compression modulus decreased by 54.81%. The  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G cross-linked matrix effectively fills the gaps between soil particles and binds the particles into a cohesive mass, significantly enhancing the mechanical properties of red clay. This study provides a novel environmentally friendly soil stabilization solution for infrastructure construction in southern red clay regions.

**Keywords:** cross-linked biopolymers;  $\gamma$ -polyglutamic acid;  $\beta$ -glucan; red clay; response surface analysis; soil stabilization

## 0 引言

红黏土颗粒细小, 比表面积大, 遇水膨胀失水收缩, 具有高地基承载力、高收缩性、低压缩

性、低膨胀性和易开裂等特点<sup>[1-2]</sup>, 遍布中国湖南、云南、贵州和广西等南方地区。昆明红黏土地区在基础设施建设过程中经常面临水土流失和地基开裂等地质灾害问题<sup>[3-4]</sup>, 频繁的降雨和蒸发作用

收稿日期: 2024-07-10 修回日期: 2024-08-27 接受日期: 2024-09-11 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目(12462033; 52408299)

作者简介: 李杰(2000-), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: lijie\_9c0b@stu.ynu.edu.cn

通信作者: 谢建斌(1973-), 男, 浙江台州人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: kmxiejb@sina.com

会加剧红黏土裂隙的发育,易引发坍塌、滑坡和地基沉降<sup>[5-6]</sup>。研究有效的红黏土加固技术,提高其强度及稳定性具有重要的现实意义。

传统的红黏土加固方法主要有机械加固和化学加固。机械加固方法通常过程复杂、周期长且费用高。水泥是常见的化学加固材料,虽然能提高红黏土的强度和稳定性,但黏土颗粒的层间膨胀会减小黏土与水泥水化物之间的黏附力,削弱加固效果<sup>[7]</sup>。此外,采用水泥加固会导致二氧化碳和氮氧化物排放量增加、土壤pH值升高及地下水污染<sup>[8-9]</sup>。近年来,生物技术以绿色、高效的优点,逐渐成为土体加固的研究热点。目前,比较常见的有微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)方法和生物聚合物加固方法<sup>[10-11]</sup>。由于红黏土颗粒细小,孔隙比较小,渗透性较差,MICP方法不适用于红黏土加固。生物聚合物是一种中性、环保且经济的可再生物质。学者们对单种生物聚合物加固土体强度及持水特性开展了广泛研究<sup>[12-13]</sup>。CHENG等<sup>[14]</sup>采用6种不同生物聚合物来加固3种天然土壤,发现加固后土壤的无侧限抗压强度均有不同程度的提高。张俊然等<sup>[15]</sup>研究表明黄原胶、结冷胶、瓜尔胶均能有效改良粉土的持水能力。HAMZA等<sup>[16]</sup>研究发现黄原胶生物聚合物可有效提高膨胀土的强度并降低其胀缩性。此外, $\beta$ -1,3/1,6-葡聚糖也能提高高岭土的界限含水率、压实度和剪切模量<sup>[17]</sup>。CHANG等<sup>[18]</sup>、杨海涛等<sup>[19]</sup>研究表明,采用 $\beta$ -葡聚糖加固土体时,其掺量一般为0~2%,且 $\beta$ -葡聚糖掺量为2%时,对砂-黏土的改良效果最佳。LIU等<sup>[20]</sup>研究不同掺量的 $\gamma$ -聚谷氨酸对砂土力学性能的影响,研究发现 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为1.2%时,对砂土水力特性的改良效果最佳。

目前,对单种生物聚合物加固土体的研究已相对成熟,但大部分只局限于研究生物聚合物对土体某种工程力学性能的影响,尚难以同时提高土体的多种物理性能。生物聚合物加固土体存在耐久性差、稳定性不佳等问题<sup>[21]</sup>。研究发现,生物聚合物通过交联可形成三维聚合物结构,从而提高生物聚合物的力学性能、热稳定性和抗蠕变性<sup>[22-23]</sup>,FATEHI等<sup>[24]</sup>和VISHWESHWARAN等<sup>[25]</sup>也认为生物聚合物交联是加固土体的有效途径。这是由于通过化学交联作用,生物聚合物分子可与交联剂分子中的官能团反应形成共价键,构成网状结构,从而有效提高生物聚合物的耐久性和稳

定性<sup>[26]</sup>。 $\beta$ -葡聚糖具有良好的生物相容性,是常见的土体加固材料,且其长链结构含有大量羟基,可为化学交联提供有利条件<sup>[27-28]</sup>。 $\gamma$ -聚谷氨酸含有大量肽键和亲水羧基,可作为与 $\beta$ -葡聚糖化学交联的交联剂,单独用于土体改良<sup>[29-30]</sup>。鉴于此,本文采用 $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸及其交联生物聚合物 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G对红黏土进行加固。通过无侧限抗压强度试验、直剪试验、固结试验和渗透试验,探究交联生物聚合物对红黏土物理力学性能的改良效果,并开展微观试验,探究交联生物聚合物加固红黏土的作用过程,为南方红黏土地区基础设施建设提供理论参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试验材料

红黏土取自云南省昆明市某基坑。取样后,将适量红黏土置于黑色塑料袋中密封,并迅速放入保湿缸内备用。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[31]</sup>,得到其颗粒级配曲线,见图1。红黏土不均匀系数 $C_u$ 为12.5,曲率系数 $C_c$ 为1.62,物理性质见表1。

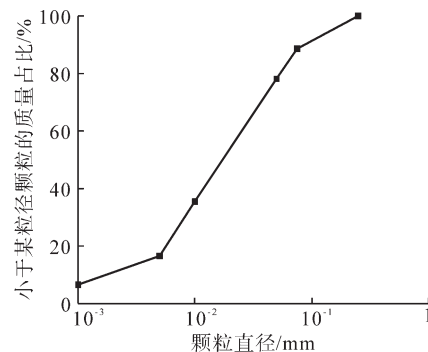


图1 红黏土颗粒级配

Fig.1 particle size distribution of red clay

表1 红黏土物理性质

Tab.1 physical properties of red clay

参数	取值	参数	取值
塑限 $w_p$ /%	37	最优含水率 $w_{opt}$ /%	24.11
液限 $w_l$ /%	59	天然含水率 $w$ /%	28.90
塑性指数 $I_p$	22	比重 $G_s$	2.76
最大干密度 $\rho_d$ /(g·cm <sup>-3</sup> )	1.583		

注: $w_{opt}$ 、 $w$ 均为质量分数。

采用分析纯 $\beta$ -葡聚糖,呈乳白色粉末,极易溶于水,其主链结构由 $\beta$ -1,3-糖苷键连接,含有 $\beta$ -1,3-糖苷键、 $\beta$ -1,4-糖苷键、 $\beta$ -1,6-糖苷键连接的支

链。 $\beta$ -葡聚糖是一种阴离子聚合物,呈分枝状和螺旋状,通过氢键诱导土壤中的阳离子,例如 $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 等,形成离子键桥联<sup>[32]</sup>。采用分析纯 $\gamma$ -聚谷氨酸,呈白色粉末,具有良好的水溶性和吸附性。分析纯 $\gamma$ -聚谷氨酸是一种由D-谷氨酸、L-谷氨酸通过 $\alpha$ -氨基和 $\gamma$ -羧基形成酰胺键而连接的高分子阴离子均聚氨基酸,含有较多肽键( $-\text{CO}-\text{NH}-$ )和亲水羧基( $-\text{COOH}$ )<sup>[33]</sup>。低浓度下, $\gamma$ -聚谷氨酸易与高岭土、蒙脱石等黏土矿物产生强烈的吸附效应,并与土壤中的水分交联,降低土壤孔隙比。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G交联聚合物由 $\gamma$ -聚谷氨酸与 $\beta$ -葡聚糖通过化学交联制备而成,反应式见图2。

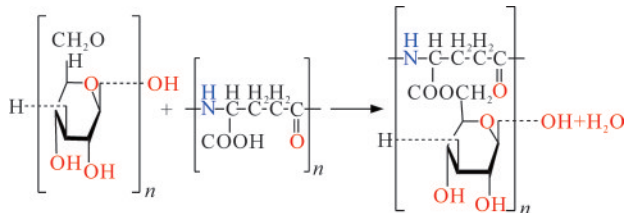


图2  $\gamma$ -聚谷氨酸交联 $\beta$ -葡聚糖反应式

Fig.2 crosslinking reaction formula of  $\gamma$ -PGA with  $\beta$ -G

## 1.2 试件制备

考虑土体的性质差异,适当扩大 $\beta$ -葡聚糖和 $\gamma$ -聚谷氨酸的掺量(质量分数)范围,设计 $\beta$ -葡聚糖掺量为0~2.5%,掺量梯度为0.5%; $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为0~2%,掺量梯度为0.4%。

为提高试验效率,采用响应面分析-中心组合设计(RSM-CCD)对交联生物聚合物配比进行优化。采用Design-Expert V8.0.6.1软件,以 $\beta$ -葡聚糖掺量和 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为自变量,以14 d无侧限抗压强度和14 d抗剪强度为响应值,建立强度预测模型。通过分析强度预测模型的应力曲面和强度等高线,确定交联生物聚合物加固红黏土的最佳配比,并通过无侧限抗压试验、直剪试验、固结试验和渗透试验,验证该最佳配比的准确性及合理性。

取出保温缸内的红黏土,置于105℃烘干箱中烘干24 h,然后过2 mm细筛。依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)<sup>[31]</sup>,采用干拌法制备试件,具体流程如下。

(1) 按照设计掺量,将 $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸和交联生物聚合物 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G与土样均匀拌和。

(2) 根据最优含水率,量取适量蒸馏水,用喷壶分两次均匀喷洒在混合土料中,直至混合土料中无白色颗粒。

(3) 分别根据无侧限抗压试验、直剪试验、固结试验和渗透试验的要求制样。

(4) 将试样放入养护箱中,相对湿度为60%,养护温度为(20±2)℃。

## 1.3 试验方案

分别对养护28 d的各组改良红黏土试样和素红黏土试样进行无侧限抗压试验、抗剪试验、固结试验和渗透试验,研究 $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸和交联生物聚合物 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G对红黏土的改良效果。采用ZJ型应变控制式无侧限压缩仪,对试样逐步加压,直至试样产生20%轴向应变,获取应力-应变曲线。采用ZJ型应变控制式直剪仪,分别在100 kPa、200 kPa、300 kPa和400 kPa的垂直压力下测定抗剪强度,获取抗剪强度曲线。通过GZQ-1型全自动气压固结仪对试样施加50~400 kPa的压力,固结24 h后,测量试样的高度变形量及含水率,绘制压力-孔隙比曲线并计算压缩模量。采用TST-55型变水头渗透仪,通过变水头法测量试样的渗透系数。试验设备见图3。



(a) ZJ型应变控制式无侧限 (b) ZJ型应变控制式直剪仪  
压缩仪



(c) GZQ-1型全自动气压 (d) TST-55型变水头渗透仪  
固结仪



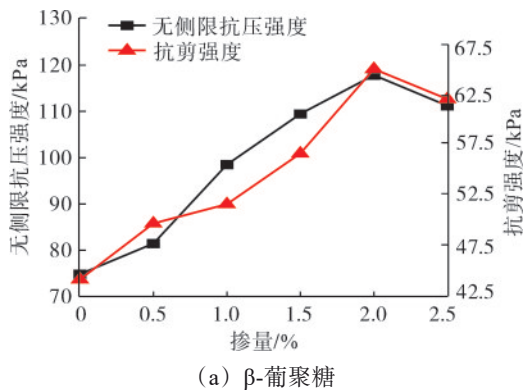
图3 试验设备

Fig.3 testing equipment

## 2 试验结果与分析

### 2.1 交联生物聚合物最佳配比

不同 $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量下红黏土的强度见图4。由图4(a)可知, $\beta$ -葡聚糖可显著增强红黏土的无侧限抗压强度。 $\beta$ -葡聚糖掺量为0~2%时,无侧限抗压强度随 $\beta$ -葡聚糖掺量的增加而增大。 $\beta$ -葡聚糖掺量小于0.5%时,无侧限抗压强度的增幅较小,这是由于 $\beta$ -葡聚糖掺量过少,生成的 $\beta$ -葡聚糖凝胶较少,无法充分填充红黏土颗粒之间的空隙。 $\beta$ -葡聚糖掺量为2%时,无侧限抗压强度达到最大值,为117.85 kPa,较素红黏土无侧限抗压强度增大了57.5%。 $\beta$ -葡聚糖掺量超过2.0%后,无侧限抗压强度开始减小,这是由于土体内 $\beta$ -葡聚糖掺量过多,残留的 $\beta$ -葡聚糖粉末使土颗粒之间的接触减少。抗剪强度与无侧限抗压强度的



变化规律相似。 $\beta$ -葡聚糖掺量为2%时,抗剪强度最大,约为素红黏土抗剪强度的1.47倍。整体来看, $\beta$ -葡聚糖加固红黏土的适宜掺量为0~2%。由图4(b)可知, $\gamma$ -聚谷氨酸可显著增强红黏土的无侧限抗压强度。 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为0.8%时,无侧限抗压强度的增幅最大,较素红黏土增大了16.04 kPa。 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为0~1.6%时,无侧限抗压强度随 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量的增加而增大。 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为1.6%时,无侧限抗压强度最大,约为素红黏土无侧限抗压强度的1.42倍。 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量超过1.6%后,无侧限抗压强度开始减小。抗剪强度随 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量的增加先增大后减小, $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为1.6%时,抗剪强度最大,较素红黏土抗剪强度增大了45.6%。通过以上分析,确定 $\gamma$ -聚谷氨酸加固红黏土的适宜掺量为0~1.6%。

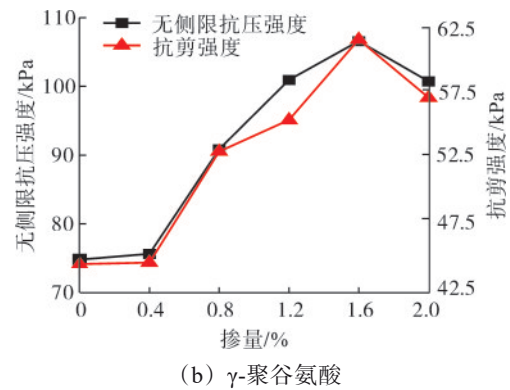


图4 不同 $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量下红黏土的强度

Fig.4 strength of red clay with different content of  $\beta$ -G and  $\gamma$ -PGA acid

基于上述研究结果,采用 Design-Expert V8.0.6.1 软件进行中心组合设计,得到13组 $\beta$ -葡聚糖与 $\gamma$ -聚谷氨酸的交联配比。按照每组配比,分别制备 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G-红黏土无侧限抗压试验试样和直剪试验试样,见图5。



(a) 无侧限抗压试样

(b) 直剪试样

图5  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G-红黏土试样

Fig.5  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G cross-linked composite-red clay specimen

对13组试样的试验值进行响应面分析,通过非线性拟合,得到无侧限抗压强度预测模型和抗剪强度预测模型,分别为

$$Y_1 = 42.59X_1 + 38.54X_2 + 14.57X_1X_2 - 20.22X_1^2 - 28.16X_2^2 + 74.76, \quad (1)$$

$$Y_2 = 17.77X_1 + 12.78X_2 + 5.68X_1X_2 - 8.3X_1^2 - 8.85X_2^2 + 50.47, \quad (2)$$

式(1)、式(2)中: $Y_1$ 为试样的预测无侧限抗压强度, kPa;  $X_1$ 为 $\beta$ -葡聚糖掺量, %;  $X_2$ 为 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量;  $Y_2$ 为试样的预测抗剪强度, kPa。

由于13组试样的 $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量不同,对红黏土抗压强度、抗剪强度的提升效果存在差异。各组红黏土试样无侧限抗压强度、抗剪强度的试验值与预测值对比见图6,图中直线的斜率为1。由图6可知,数据点基本分布于直线附近,表明强度预测值与试验值一致性较好。通过方差分析,得到无侧限抗压强度预测模型和抗剪强度预测模型的 $p$ 值分别为0.001 8和0.001 9,

均远小于 0.1, 表明  $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸对试样的无侧限抗压强度和抗剪强度影响显著, 失拟项概率分别为 0.064 2 和 0.222 5, 均大于 0.05, 表明

所建立的强度预测模型较合理, 可用来预测交联生物聚合物改良红黏土的无侧限抗压强度和抗剪强度。

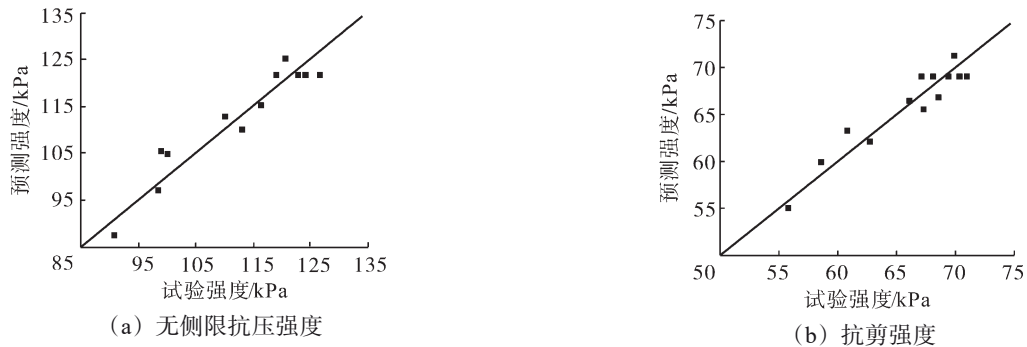


图 6 强度预测值与试验值对比

Fig.6 comparison of predicted and experimental strength values

响应面分析结果见图 7。由图 7 (a) 可知, 随着  $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量的增加, 无侧限抗压强度曲线均先上升后下降, 形成曲面。曲面两端颜色较浅, 无侧限抗压强度较小, 中间颜色较深, 无侧限抗压强度较大。曲面越陡, 表明  $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸对红黏土无侧限抗压强度的影响越显著。曲面有明显顶点, 表明可根据最大响应值出现的位置来确定使改良红黏土无侧限抗压强度达到最大值时  $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸的最佳掺量。由图 7 (b) 可知, 边缘区域无侧限抗压强度较小, 中间区域无侧限抗压强度较大, 进一步证明了单一生物聚合物对红黏土的改良效果弱于交联生物

聚合物。 $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸均为高掺量 (即  $\beta$ -葡聚糖掺量为 1.5%~2.0%,  $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为 1.2%~1.6%) 时, 无侧限抗压强度有所减小, 这是由于部分  $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸未发生反应, 以粉末的形式附着在土颗粒表面, 土颗粒之间的相互作用减小。由图 7 (c) 和图 7 (d) 可知, 抗剪强度响应曲面也呈中间高、两边低的形态, 且比无侧限抗压强度的响应曲面更陡峭, 表明  $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸对抗剪强度的影响比对无侧限抗压强度的影响更大。结合图 7 (a) 和图 7 (c) 中响应值最大区域, 确定  $\beta$ -葡聚糖和  $\gamma$ -聚谷氨酸的最佳掺量分别为 1.00%~1.75% 和 0.8%~1.4%。

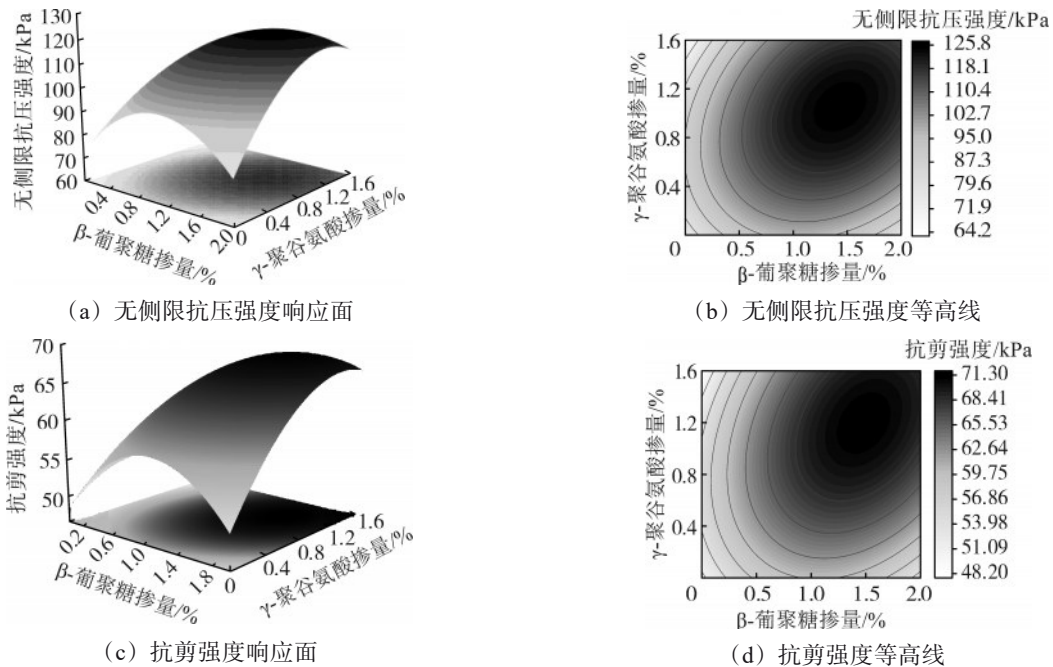


图 7 响应面分析结果

Fig.7 response surface analysis results

根据上述响应面分析结果,通过 Design-Expert V8.0.6.1 软件,拟合得到响应面分析-中心组合设计(RSM-CCD)的2种配比,见表2。综合考虑试验需要,确定最佳配比为 $\beta$ -葡聚糖掺量为1.4%、 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为1.1%(即 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%)。

表2 RSM-CCD 配比  
Tab.2 RSM-CCD ratio

配比方案	$\beta$ -葡聚糖掺量/%	$\gamma$ -聚谷氨酸掺量/%	14 d 预测无侧限抗压强度/kPa	14 d 预测抗剪强度/kPa
1	1.45	1.11	125.54	71.21
2	1.45	1.12	125.53	71.22

试验方案见表3。其中,掺量为2.5%的 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G为试验组,素红黏土以及掺量为2.5%的 $\beta$ -葡聚糖、2.5%的 $\gamma$ -聚谷氨酸、3.6%的 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G为对照组,分别开展无侧限抗压试验、直剪试验、固结试验和渗透试验,对比试验结果,验证拟合所得最佳配比的准确性,分析交联生物聚合物对红黏土物理力学性能的影响。

表3 试验方案  
Tab.3 test scheme

组别	$\beta$ -葡聚糖掺量/%	$\gamma$ -聚谷氨酸掺量/%
素红黏土	0	0
$\gamma$ -PGA- $\beta$ -G-2.5%	1.4	1.1
$\beta$ -葡聚糖-2.5%	2.5	0
$\gamma$ -聚谷氨酸-2.5%	0	2.5
$\gamma$ -PGA- $\beta$ -G-3.6%	2.0	1.6

### 2.2 物理力学性能

红黏土无侧限抗压强度的变化见图8。由图8可知,红黏土的无侧限抗压强度随轴向应变的增大呈先增大后减小的变化趋势,曲线最终趋于平缓,存在明显的应变软化现象。3种生物聚合物对红黏土无侧限抗压强度提升效果的排序为 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G> $\beta$ -葡聚糖> $\gamma$ -聚谷氨酸,这是由于交联生物聚合物形态更稳定,能填充土颗粒之间的空隙,对红黏土强度的改良效果优于单一生物聚合物。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为3.6%时,曲线高于素红黏土,但低于 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%时的曲线。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为3.6%和2.5%时,对应的无侧限抗压强度分别为素红黏土的1.58倍和1.74倍。当 $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量过高时,土颗粒表面残留的大量生物聚合物粉末无法充分反应,导致土颗粒之间的接触减少,使无侧限抗压强度减小。

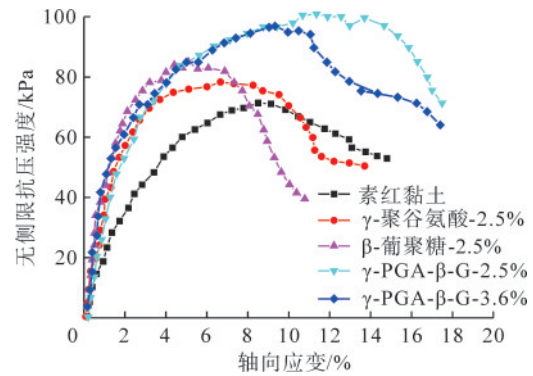


图8 红黏土无侧限抗压强度的变化

Fig.8 change of unconfined compressive strength of red clay

红黏土抗剪强度的变化见图9。由图9可知,4种不同加固方式均能增大红黏土的抗剪强度。养护28 d后,素红黏土黏聚力为33.85 kPa,内摩擦角为10.7°。 $\beta$ -葡聚糖掺量为2.5%时,改良红黏土的黏聚力较素红黏土增大了15.93 kPa,提高约47.06%,而内摩擦角仅提高1.6°。 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为2.5%时,改良红黏土的黏聚力较素红黏土增大了14.17 kPa,提高约41.86%,而内摩擦角仅提高1.27°。由此可见, $\beta$ -葡聚糖或 $\gamma$ -聚谷氨酸这种单一生物聚合物对红黏土内摩擦角的影响较小,主要通过增大红黏土的黏聚力来提高其抗剪强度。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G对红黏土的抗剪强度提升效果显著。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%时,对红黏土抗剪强度的改良效果最佳,与素红黏土相比,改良红黏土的黏聚力和内摩擦角分别增大了16.27 kPa和4.46°。在生物聚合物掺量相同的条件下,改善红黏土抗剪强度能力的排序为: $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G> $\beta$ -葡聚糖> $\gamma$ -聚谷氨酸。

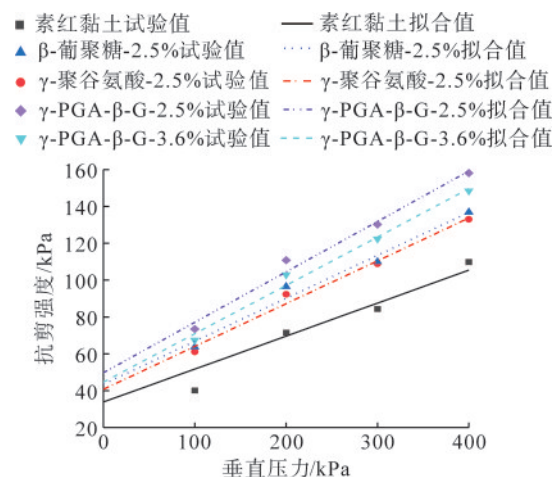


图9 红黏土抗剪强度的变化

Fig.9 change of shear strength of red clay

红黏土垂直压力-孔隙比的变化见图10。由图10可知,4种改良红黏土的垂直压力-孔隙比曲线均高于素红黏土,表明生物聚合物与红黏土颗粒作用充分,对红黏土压缩性的改良效果较好。垂直压力为50~200 kPa时,曲线由高到低依次为 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%的改良红黏土、 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为3.6%的改良红黏土、 $\beta$ -葡聚糖掺量为2.5%的改良红黏土、 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为2.5%的改良红黏土、素红黏土。垂直压力为200~400 kPa时,曲线由高到低依次为 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%的改良红黏土、 $\beta$ -葡聚糖掺量为2.5%的改良红黏土、 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为3.6%的改良红黏土、 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为2.5%的改良红黏土、素红黏土。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%、 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为3.6%、 $\beta$ -葡聚糖掺量为2.5%和 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为2.5%的改良红黏土的压缩系数分别为 $0.47 \text{ MPa}^{-1}$ 、 $0.71 \text{ MPa}^{-1}$ 、 $0.61 \text{ MPa}^{-1}$ 和 $0.94 \text{ MPa}^{-1}$ ,较素红黏土分别减小了54.81%、31.73%、41.35%和9.62%。其中, $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%的改良红黏土的压缩性最小,抗压压缩性最佳。

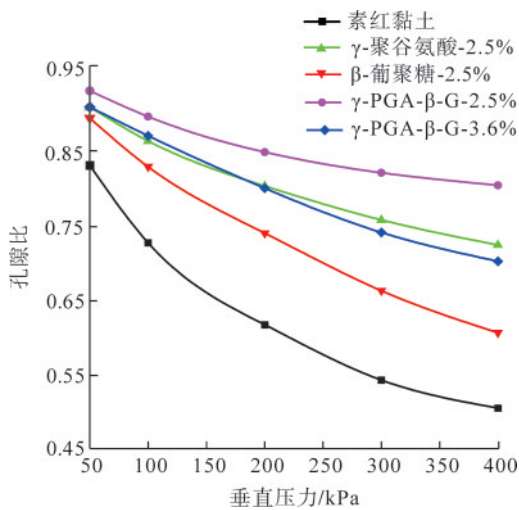


图10 红黏土垂直压力-孔隙比的变化

Fig.10 vertical pressure-pore ratio change of clay

红黏土渗透系数的变化见图11。由图11可知,素红黏土的渗透系数为 $1.91 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ , $\beta$ -葡聚糖改良红黏土和 $\gamma$ -聚谷氨酸改良红黏土的渗透系数分别为 $4.84 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 和 $7.18 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ 。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%、3.6%的改良红黏土的渗透系数分别为 $8.33 \times 10^{-9} \text{ cm/s}$ 和 $1.19 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ ,较素红黏土均减小一个数量级以上。这是由于在养护时间充足的条件下, $\beta$ -葡聚糖与 $\gamma$ -聚谷氨酸充分交联,孔隙之间

主要为聚合物-聚合物接触,可显著增大红黏土的密实度,减小孔隙比,增强抗渗性。综合来看, $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%时,改良红黏土的渗透系数最小,抗渗性最佳。

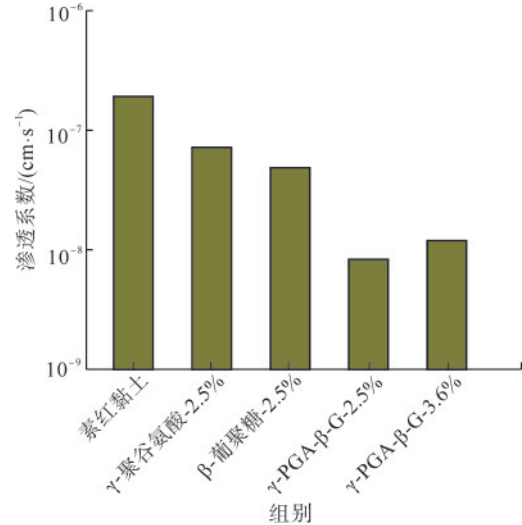


图11 红黏土渗透系数的变化

Fig.11 variation of permeability coefficient of red clay

通过以上分析可知, $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%时,对红黏土抗压强度、抗剪强度的改良效果最佳,可更好地抵抗长期载荷作用及复杂应力条件下的变形与失稳,确保结构的稳定性,延长基础设施的使用寿命。此外,改良红黏土的抗压缩性与其固结能力密切相关。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%时,压缩系数较小,表明土体固结能力较强,长期沉降量较小,在潮湿环境中的抗侵蚀能力更强。整体来看,交联生物聚合物在改良红黏土耐久性和稳定性方面效果显著。

### 2.3 微观试验

红黏土的X射线衍射(XRD)图谱对比见图12。由图12可知,素红黏土以及 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%的红黏土,其衍射强度峰值以及峰值所对应的 $2\theta$ ( $\theta$ 为入射X射线束与衍射探测器之间的夹角)存在明显差异,表明素红黏土、 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%的改良红黏土的组成成分有所不同。素红黏土的主要矿物为二氧化硅,成分相对单一,红黏土颗粒之间的相互作用是影响其物理力学性能的主要因素。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G掺量为2.5%的改良红黏土中除含有二氧化硅外,还含有有机物 $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_2$ 。由于有机物一般在结晶状态下才能与X射线发生衍射,因此,可认为养护28 d后, $\gamma$ -PGA-

$\beta$ -G 掺量为 2.5% 的改良红黏土中已存在  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G 交联生物聚合物。红黏土颗粒及交联生物聚合物

基质的相互作用是影响  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G 改良红黏土物理力学性能的主要因素。

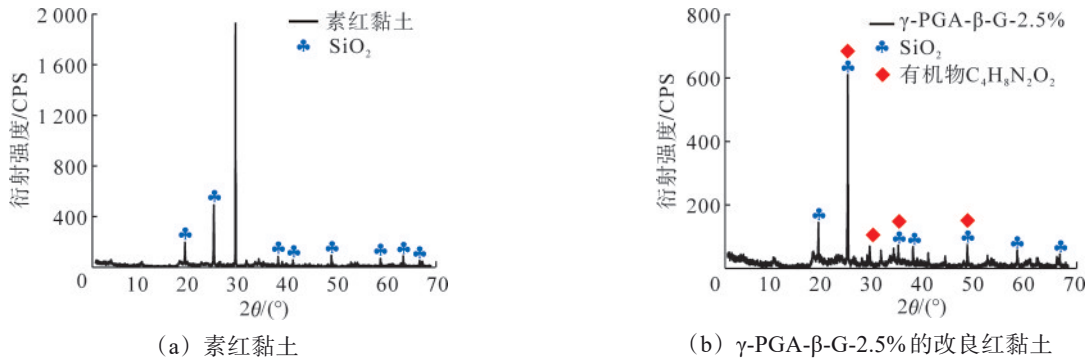


图 12 红黏土的 XRD 图谱对比

Fig.12 comparison of XRD patterns of red clay

红黏土的扫描电镜 (SEM) 图像见图 13。由图 13 (a) 可知, 素红黏土颗粒分布不均匀, 孔隙间无明显填充物, 单个颗粒呈松散堆积状态, 颗粒之间存在较大空隙。在外力作用下, 土颗粒易发生相对移动, 因此, 素红黏土易发生压缩变形。由图 13 (b) 和图 13 (c) 可知,  $\gamma$ -聚谷氨酸、 $\beta$ -葡聚糖可分别形成链状、纤维树状凝胶, 并通过氢键吸附在土颗粒表面, 填充颗粒间的空隙, 增大土颗粒之间的摩擦力。由于纤维树状结构比链状结构填充空隙的效果更好, 且  $\beta$ -葡聚糖凝胶自身的力学性能优于  $\gamma$ -聚谷氨酸凝胶, 因此,  $\beta$ -葡聚糖

对红黏土的改良效果优于  $\gamma$ -聚谷氨酸。由图 13 (d) 可知, 絮凝状的交联基质包裹颗粒表面, 将独立的土颗粒连接为一个整体, 填充了大部分空隙。交联生物聚合物形态较稳定, 表面为絮状、片状结构, 外壳较粗糙, 可增大颗粒之间的相互摩擦作用。与单种生物聚合物相比,  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G 掺量为 2.5% 的改良红黏土的物理力学性能更优。 $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸和  $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G 分别通过纤维树状凝胶、链状胶凝和交联基质胶结红黏土颗粒, 作用方式见图 14。

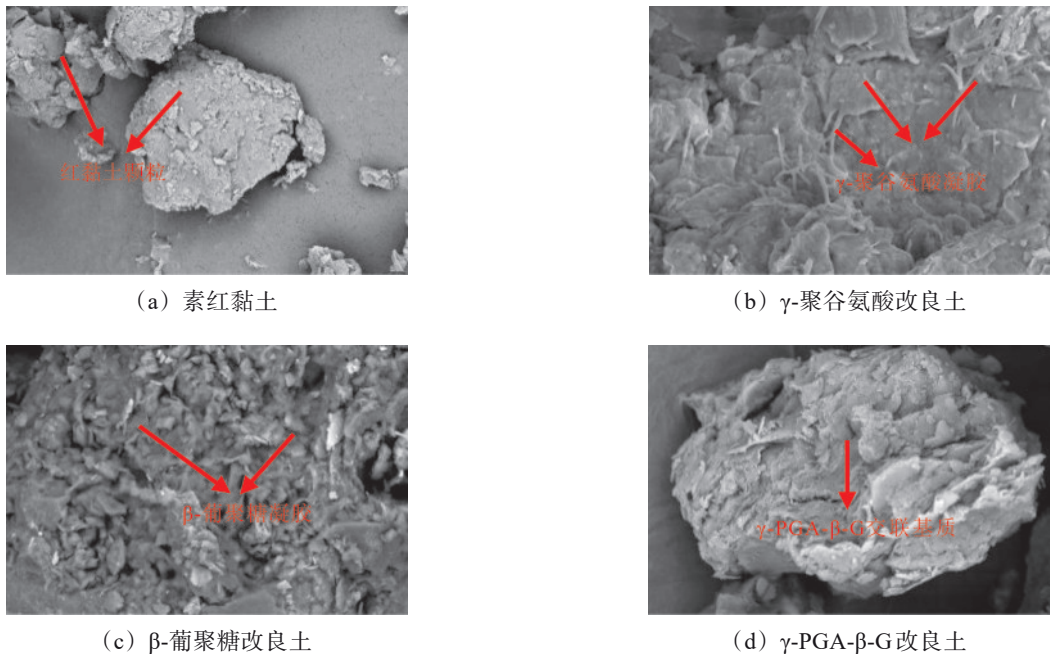


图 13 红黏土的 SEM 图像

Fig.13 SEM images of red clay

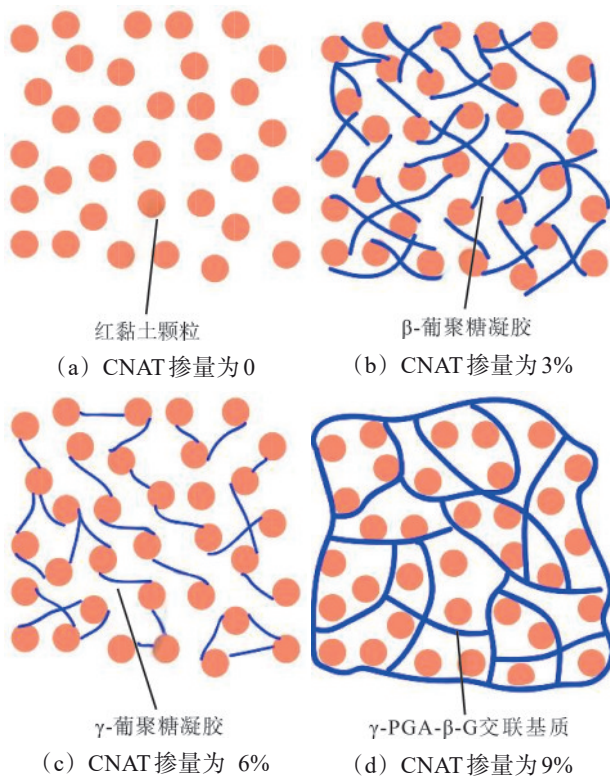


图14 生物聚合物加固红黏土的作用方式

Fig.14 mode of action of biopolymer in reinforcing red clay

### 3 结论

通过室内试验研究 $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸及其交联生物聚合物 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G对昆明某基坑红黏土物理力学性能的影响,并通过响应面分析优化 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G的配比,分析 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G加固红黏土的作用方式,得出如下结论。

(1)  $\beta$ -葡聚糖和 $\gamma$ -聚谷氨酸均能显著增强红黏土的力学性能。 $\beta$ -葡聚糖增强红黏土强度的最佳掺量为2%, $\gamma$ -聚谷氨酸增强红黏土强度的最佳掺量为1.6%。

(2) 根据响应面分析-中心组合设计(RSM-CCD),提出无侧限抗压强度、抗剪强度预测模型,该模型的强度预测值与试验值具有较好的一致性。

(3) 与单一生物聚合物相比,交联生物聚合物 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G对红黏土物理力学性能的改善效果更好,且 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G的最佳掺量为2.5%( $\beta$ -葡聚糖掺量为1.4%、 $\gamma$ -聚谷氨酸掺量为1.1%)。

(4)  $\beta$ -葡聚糖、 $\gamma$ -聚谷氨酸改良红黏土的方式主要通过形成凝胶来填充土颗粒之间的空隙,连接土颗粒。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G对红黏土的改良,主要依靠交联基质包裹土颗粒。 $\gamma$ -PGA- $\beta$ -G交联生物聚合物为土体改良提供了更优的选择。

研究结果可为南方红黏土地区基础设施建设以及土体改良提供参考。但由于试验条件限制,仅对特定红黏土开展了研究。此外,交联生物聚合物对于不同土壤的改良效果可能存在差异。在未来的研究中,可进一步探讨交联生物聚合物在多种土壤和环境条件下的性能,扩大其应用范围。

### 参考文献(References):

- [1] 张亚彬,左双英,吴道勇,等.基于结合水膜厚度变化的红黏土收缩机理研究[J].地质科技通报,2023,42(5):241-248.  
ZHANG Yabin, ZUO Shuangying, WU Daoyong, et al. Shrinkage mechanism of red clay based on changes in the thickness of bound water film[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2023, 42(5):241-248.
- [2] CHENG Y Z, YANG G Y, LONG Z L, et al. Dynamic characteristics of overconsolidated remolded red clay in Southwest China: an experimental study[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(5):176.
- [3] 何岱洵,张家明,陈茂,等.极端干湿循环作用下饱和泥浆红黏土的干缩裂隙发育特征[J].安全与环境工程,2022,29(1):101-110.  
HE Daixun, ZHANG Jiaming, CHEN Mao, et al. Desiccation and cracking behaviour of saturated slurry red clay specimens under extreme wetting-drying cycles[J]. Safety and Environmental Engineering, 2022, 29(1):101-110.
- [4] LIU X R, LI J G, YI R, et al. Modified cam-clay model parameters M of Kunming red clay[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2455: 012019.
- [5] 罗易,张家铭,周峙,等.降雨-蒸发条件下土体开裂临界含水率演变规律研究[J].岩土力学,2020,41(8):2592-2600.  
LUO Yi, ZHANG Jiaming, ZHOU Zhi, et al. Evolution law of critical moisture content of soil cracking under rainfall-evaporation conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8):2592-2600.
- [6] 曹硕鹏,付宏渊,高乾丰,等.降雨作用下裂隙红黏土边坡渗流特征与冲刷模式[J].中国公路学报,2022,35(5):33-43.  
CAO Shuopeng, FU Hongyuan, GAO Qianfeng, et al. Seepage characteristics and scouring modes of a cracked red clay slope under rainfall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(5):33-43.
- [7] 宋斯宇,顾帼华,王艳红,等.黏土矿物的结构性质及其对浮选的影响[J].矿产保护与利用,2020,40(2):43-50.  
SONG Siyu, GU Guohua, WANG Yanhong, et al. The structure property of clay minerals and their effects on flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(2): 43-50.
- [8] SUPRIYA, CHAUDHURY R, SHARMA U, et al. Low-CO<sub>2</sub> emission strategies to achieve net zero target in cement sector[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 417:137466.
- [9] JANG C, YANG B, HONG W T, et al. Soil improvement using agar gum polymer for seismic liquefaction mitigation[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2024, 177:108405.
- [10] DUBEY A A, HOOPER-LEWIS J, RAVI K, et al. Biopolymer-

- biocement composite treatment for stabilisation of soil against both current and wave erosion[J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(12): 5391-5410.
- [11] RAVEH-AMIT H, GRUBER A, ABRAMOV K, et al. Mitigation of aeolian erosion of loess soil by Bio-Stimulated microbial induced calcite precipitation[J]. *Catena*, 2024, 237: 107808.
- [12] 王天亮, 王林, 刘松松, 等. 黄原胶和瓜尔胶改良膨胀土力学特性试验研究[J]. *中国铁道科学*, 2023, 44(2): 1-10.  
WANG Tianliang, WANG Lin, LIU Songsong, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil improved by xanthan gum and guar gum[J]. *China Railway Science*, 2023, 44(2): 1-10.
- [13] SHI J Q, XIAO Y, FU G Y, et al. Calcareous silt earthen construction using biopolymer reinforcement[J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 72: 106571.
- [14] CHENG Z B, GENG X Y. Mechanical behaviours of biopolymers reinforced natural soil[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 2023, 88(2): 179-188.
- [15] 张俊然, 赵鑫鑫, 姜彤. 3种生物聚合物改良粉土的持水特性研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(8): 2157-2164.  
ZHANG Junran, ZHAO Xinxin, JIANG Tong. Water retention characteristics of silt improved by three types of biopolymer[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(8): 2157-2164.
- [16] HAMZA M, NIE Z H, AZIZ M, et al. Strengthening potential of xanthan gum biopolymer in stabilizing weak subgrade soil[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2022, 24(9): 2719-2738.
- [17] CHANG I, LEE M, TRAN A T P, et al. Review on biopolymer-based soil treatment (BPST) technology in geotechnical engineering practices[J]. *Transportation Geotechnics*, 2020, 24: 100385.
- [18] CHANG I, CHO G C. Strengthening of Korean residual soil with  $\beta$ -1, 3/1, 6-glucan biopolymer[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 30: 30-35.
- [19] 杨海涛, 谢建斌, 江珊汕, 等. 交联生物聚合物增强粉土抗压及抗剪强度的机理[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(12): 147-154.  
YANG Haitao, XIE Jianbin, JIANG Shanshan, et al. Mechanism of crosslinked biopolymers reinforcing compressive and shear strength of silty soil[J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41(12): 147-154.
- [20] LIU J, BAI Y X, SONG Z Z, et al. Evaluation of strength properties of sand modified with organic polymers[J]. *Polymers*, 2018, 10(3): 287.
- [21] CHANG I, CHO G C. Shear strength behavior and parameters of microbial gellan gum-treated soils: from sand to clay[J]. *Acta Geotechnica*, 2019, 14(2): 361-375.
- [22] REN F F, DING H, DONG B, et al. Study on the improvement of soil properties using hydrophilic-hydrophobic biopolymer crosslinking[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 415: 135101.
- [23] TEICHTMEISTER S, HOLZAPFEL G A. A constitutive model for fibrous tissues with cross-linked collagen fibers including dispersion—with an analysis of the Poynting effect[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2022, 164: 104911.
- [24] FATEHI H, ABTAHI S M, HASHEMOLHOSSEINI H, et al. A novel study on using protein based biopolymers in soil strengthening[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 167: 813-821.
- [25] VISHWESHWARAN M, SUJATHA E R. Experimental investigation and numerical modeling of a cross-linked biopolymer stabilized soil[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(19): 1952.
- [26] 程传亮, 龚博, 钱劲. 生物聚合物交联网络的力学响应[J]. *应用数学和力学*, 2016, 37(5): 441-458.  
CHENG Chuanliang, GONG Bo, QIAN Jin. Mechanical responses of crosslinked biopolymer networks[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2016, 37(5): 441-458.
- [27] MATSUMOTO Y, ENOMOTO Y, KIMURA S, et al. Highly deformable and recoverable cross-linked hydrogels of 1,3- $\alpha$ -d and 1,3- $\beta$ -d-glucans[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 251: 116794.
- [28] ZHANG L F, YANG J L, DING C B, et al. Application of polysaccharide-based crosslinking agents based on schiff base linkages for biomedical scaffolds[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2024, 345: 122585.
- [29] NAKAMOTO M, NOGUCHI M, NISHIGUCHI A, et al. Fabrication of highly stretchable hydrogel based on crosslinking between alendronates functionalized poly- $\gamma$ -glutamate and calcium cations[J]. *Materials Today Bio*, 2022, 14: 100225.
- [30] 石肖肖, 史文娟, 庞琳娜, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对土壤水氮运移特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 190-197.  
SHI Xiaoxiao, SHI Wenjuan, PANG Linna, et al. Effects of  $\gamma$ -polyglutamic acid on soil water and nitrogen transport characteristics[J]. *Chinese Journal of Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 190-197.
- [31] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019: 29-32.
- [32] PYLKKÄNEN R, MOHAMMADI P, LILJESTRÖM V, et al.  $\beta$ -1,3-Glucan synthesis, novel supramolecular self-assembly, characterization and application[J]. *Nanoscale* 2022, 14: 15533-15541.
- [33] HO G H, HO T I, HSIEH K H.  $\gamma$ -Polyglutamic acid produced by *Bacillus subtilis*(natto): structural characteristics, chemical properties and biological functionalities[J]. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 2006, 53: 1363-1384.