

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.043



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



生物聚合物改良花岗岩残积土的力学特性及机理

许晓亮^{1,2}, 陈奕恺¹, 谭德林¹, 毛强³

(1. 三峡库区地质灾害教育部重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002; 2. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室, 南京 210007; 3. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司电力科学研究院, 广州 510700)

摘要:花岗岩残积土的力学性能改良对相关工程灾害防治具有重要意义。为探究生态友好的生物聚合物对花岗岩残积土力学性能的改良效果,采用黄原胶(XG)、瓜尔豆胶(GG)及其复合胶(G-X)对花岗岩残积土进行改性,通过无侧限抗压强度、三轴剪切强度及扫描电镜试验,研究生物胶种类、掺量、养护方式与养护龄期对改良效果的影响规律及强化机理。结果表明:XG、GG、G-X均能有效提高花岗岩残积土的抗压强度,标准养护下改良土抗压强度随聚合物掺量增加而持续提升,但增幅逐渐趋缓,而常温养护下改良土抗压强度会出现峰值,最优掺量为1.0%~1.5%;复合胶G-X改良土抗压强度较高(可达素土的2倍以上)、龄期稳定性较好,且抗剪性能提升明显(黏聚力约为素土的2.4倍),兼具GG的黏结作用与XG的填充作用,呈现出协同增效的改良效果。

关键词:花岗岩残积土;生物聚合物;黄原胶;瓜尔豆胶;力学特性;强化机理

中图分类号: TU411.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)03-0099-10

Mechanical characterization and mechanism of granite residual soil improved by biopolymers

XU Xiaoliang^{1,2}, CHEN Yikai¹, TAN Delin¹, MAO Qiang³

(1. Key Laboratory of Geological Hazards on Three Gorges Reservoir Area (China Three Gorges University), Ministry of Education, Yichang 443002, Hubei, P. R. China; 2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, P. R. China; 3. CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510700, P. R. China)

Abstract: The improvement of mechanical properties of granite residual soil is of great significance for engineering disaster prevention and control. In order to investigate the improvement effect of eco-friendly biopolymers on the mechanical properties of granite residual soil, xanthan gum (XG), guar gum (GG) and their composite gum (G-X) were used to modify granite residual soil, and the effects of biopolymer type, content, curing mode, and curing age on the improvement effect and its reinforcement mechanism were investigated

收稿日期: 2025-01-05

基金项目: 湖北省安全生产专项资金科技项目(SJZX20230909);国家自然科学基金高铁联合基金(U2034203)

作者简介: 许晓亮(1989-),男,博士,副教授,主要从事岩土工程研究, E-mail: sichuan106@ctgu.edu.cn。

毛强(通信作者),男,高级工程师, E-mail: maoqehv@163.com。

Received: 2025-01-05

Foundation items: Science and Technology Project of Special Foundation for Safety Production in Hubei Province (No. SJZX20230909); National Natural Science Foundation of China High Speed Rail Joint Fund (No. U2034203)

Author brief: XU Xiaoliang (1989-), PhD, associate professor, main research interest: geotechnical engineering, E-mail: sichuan106@ctgu.edu.cn.

MAO Qiang (corresponding author), senior engineer, E-mail: maoqehv@163.com.

through unconfined compression strength, triaxial shear strength and scanning electron microscopy tests. The results show that XG, GG, and G-X can improve the compressive strength of granite residual soil, and the compressive strength of improved soil under standard curing conditions increases continuously with polymer dosage but the increase slows down, while the compressive strength of improved soil under room temperature curing peaks, and the optimal dosage of polymer is about 1.0%-1.5%; The composite G-X improved soil has better compressive strength (up to more than twice that of untreated soil) and age stability, and the shear resistance is obviously improved (cohesion is about 2.4 times that of untreated soil), which combines the bonding effect of GG and the filling effect of XG, and presents a synergistic improvement effect.

Keywords: granite residual soil; biopolymer; xanthan gum (XG); guar gum (GG); mechanical properties; strengthening mechanism

花岗岩残积土是花岗岩经长期风化作用形成的特殊土体,具有天然孔隙比高、压缩性高、剪切强度低等特点,广泛分布于中国东南沿海地区^[1]。在湿热环境下,浸水后的花岗岩残积土易引发滑坡、地面沉降、崩岗及崩塌等地质灾害,严重威胁区域基础设施安全与生态环境^[2-3]。因此,提升花岗岩残积土的力学性能,对工程灾害防治具有重要的现实意义。

传统的花岗岩残积土固化主要通过水泥、石灰、粉煤灰等无机材料对土颗粒表面进行黏结加固^[4-6],但当固化层无法抵抗膨胀与收缩时,颗粒间的胶结作用易发生破坏^[7]。粒间孔隙水参与水泥基固化材料的水化反应后呈强碱性,而颗粒内部仍保持弱酸性,这种酸碱差异会导致土体产生损伤^[8]。此外,水泥基材料固化花岗岩残积土时会残留大量不可降解的无机产物,且排放温室气体,对环境造成不利影响^[9]。因此,开发绿色环保的花岗岩残积土改良方法已成为当前相关领域的研究热点。

生物聚合物是一类“生态友好型”改性材料^[10],具有改善土体力学性能、抑制裂隙发育且不影响坡表植被生长等特性^[11],在地基处理、边坡灾害防治中具有良好的应用前景。其中,黄原胶与瓜尔胶(瓜尔豆胶)是两种常用的生物聚合物材料。黄原胶可通过其羧基(-COOH)和羟基(-OH)与带电土颗粒形成阳离子键合及氢键,增强土体黏聚力^[12];瓜尔胶中的硼酸根离子能生成高黏性凝胶,提高颗粒间的黏结强度^[13]。此外,瓜尔胶与黄原胶复配能产生“协同增效作用”,进一步提升土体强度与抗崩解性能,并可有效减弱黄土的湿陷性^[12]及膨胀土的胀缩性^[14-15]。

生物聚合物作为绿色环保材料,已被尝试应用于抑制泥岩崩解、改良膨胀土及黄土等工程问题,并取得了良好效果,这为花岗岩残积土的改性研究提供了重要借鉴。但花岗岩残积土具有遇水易崩

解、黏聚力大幅损失的水敏性特征,采用上述生物聚合物改良后,土体力学性能的提升效果仍有待验证,相应的加固机理也需进一步阐明。为此,选取黄原胶、瓜尔胶及其复合胶作为改性材料,通过力学性能试验与微观结构测试探究其对花岗岩残积土的改良效果及微观作用机理,揭示生物聚合物类型、掺量、养护方式及养护龄期等因素对改良土力学特性的影响规律。

1 试验方案

1.1 试验材料

试验所用花岗岩残积土取自广东省英德市连江口镇,其成分及含量见表1、表2,土样颗粒级配如图1所示。塑、液限试验结果表明,该花岗岩残积土的塑限为27%、液限为47.3%,其他物理性能指标见表3;通过室内击实试验测得该土样的最优含水率为22.2%,最大干密度为1.631 g/cm³。

表1 试验土样矿物成分及含量

Table 1 Mineral compositions and contents of test soil

石英/%	微斜长石/%	赤铁矿/%	黏土矿物总量/%
28	2	3	67

表2 黏土矿物相对含量

Table 2 Relative clay mineral contents

高岭石/%	伊利石/%	绿泥石/%	蒙脱石/%	伊蒙间层矿物/%
61	9	4	7	6

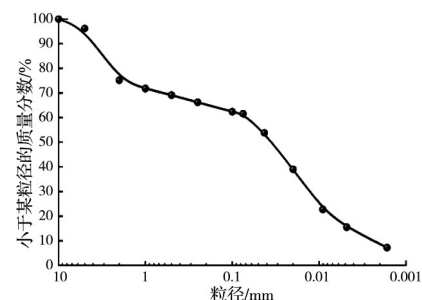


图1 试验土样颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of test soil

表3 花岗岩残积土基本物理性质

Table 3 Basic physical properties of granite residual soil

相对密度 G_s	天然含水率	天然密度	渗透系数 $k/(cm/s)$
	$\omega/\%$	$\rho/(g/cm^3)$	
2.65	23.83	1.87	3.58×10^{-5}

试验所用生物聚合物为黄原胶(xanthan gum, XG)和瓜尔豆胶(guar gum, GG),二者外观均为灰白色固体粉末(图2)。黄原胶是黄单胞杆菌以碳水化合物为主要原料经发酵产生的微生物胞外多糖,主要由D-糖醛酸、D-甘露糖、丙酮酰化甘露糖和葡聚糖组成^[16]。瓜尔豆胶是从瓜尔豆胚乳中提取的非离子型半乳甘露聚糖,为D-半乳糖和D-甘露糖按1:2比例构成的水溶性多糖^[17]。根据文献[15,18]中黏性土改良的试验经验,复合胶(xanthan-guar gum, G-X)采用黄原胶与瓜尔豆胶颗粒按等质量比(1:1)干燥混合配制而成。

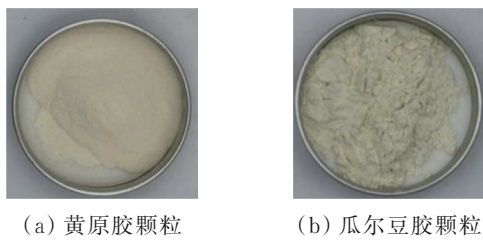


图2 黄原胶及瓜尔豆胶颗粒

Fig. 2 Xanthan gum and guar gum particles

1.2 试样制备

将碾碎后的花岗岩残积土置于105℃烘箱中干燥24h,过2mm土工筛。为使生物聚合物分布均匀,采用干混合法^[14],按24%含水率和不同生物聚合物掺量 M (生物聚合物质量 m_d /干土质量 m_s)配制试样,掺量配置见表4。相关研究表明,生物聚合物改良土在掺量为0~2%时改良效果最优^[13,19],2.5%复合胶是在试验过程中根据试验情况额外添加的掺量配置。设置24%含水率是为了使在试样中土体颗粒达到最优含水率的条件下生物聚合物仍能充分吸水,形成土颗粒-水凝胶黏结物。为使土样含水率均匀,拌制完成后密封闷料24h,随后按96%压实度制备试样。其中无侧限抗压强度试样尺寸为 $\phi 50$ mm、高100mm,三轴剪切试样尺寸为 $\phi 61.8$ mm、高125mm。

表4 生物聚合物掺量配置

Table 4 Biopolymer dosage preparation

生物聚合物种类	生物聚合物掺量/%
黄原胶(XG)	0.5、1.0、1.5、2.0
瓜尔豆胶(GG)	0.5、1.0、1.5、2.0
复合胶(G-X)	0.5、1.0、1.5、2.0、2.5

按照表4所示掺量,分别将不同类型生物聚合物改良花岗岩残积土试样在标准养护条件与常温养护条件下养护,并开展无侧限抗压强度等试验。1)标准养护条件下的试样,制样后采用保鲜膜包裹密封,置于恒温恒湿箱中养护(温度 $(20 \pm 3)^\circ C$ 、相对湿度 $\geq 95\%$),可有效稳定土样含水率,更精准地模拟非表层土体的真实湿度环境。为避免密封失效引起含水率变化而影响试验结果,养护箱内设置素土试样作为对照组。养护龄期分别设置为0、2、4、6、8、20d;2)常温养护下的试样,制样后直接裸露置于室内自然温度湿度环境中养护,龄期分别为0、2、4、6、8、20d,该方式可加速表层土样水分蒸发,更准确地模拟表层土体环境。相关工艺流程如图3所示。



图3 试样制备与养护过程

Fig. 3 Specimen preparation and curing process

1.3 试验内容

参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[20],开展无侧限抗压强度、三轴剪切强度和微观结构试验,每组试验均测定3个平行试样。具体方法如下:1)无侧限抗压强度试验。采用WDW-20KN型微机控制电子万能试验机,量程为20kN,竖向加载速率设为1mm/min。当轴向力读数达到峰值后,继续加载至轴向应变达3%~5%时停止试验。2)三轴剪切试验。采用不固结不排水(UU)方式,在SLW-1型应力-温度耦合三轴剪切试验机上进行。试验设置100、200、400kPa三种围压,剪切方式为等应变剪切,剪切速率为1mm/min;当偏应力达到峰值后,继续剪切至轴向应变达3%;若偏应力未出现峰值,则继续剪切至15%~20%轴向应变。3)微观结构试验。先将压缩试验后的试样进行干燥处理,再截取直径2cm的土样,通过导电胶固定于Prisma E环境扫描电子显微镜样品台,选取适宜放大倍数观察素土及生物聚合物改良土的微观结构。

2 改良土无侧限抗压强度

2.1 生物聚合物类型及掺量对无侧限抗压强度的影响

图4所示为未经养护处理的花岗岩残积土素土及不同掺量生物聚合物改良土的无侧限抗压应力-应变曲线。由图4可知,GG、XG和G-X三种生物聚合物均能显著提高花岗岩残积土的无侧限抗压强度,改良土的抗压强度随生物聚合物掺量的增加呈持续上升趋势,但强度增幅(即强化效率)逐渐变缓,且所有试样的轴向应力在达到峰值后呈下降趋势。其中,XG改良土的抗压强度相对较低,GG与G-X改良土的抗压强度相近,约为素土的2倍、XG改良土的1.3倍,表明GG及G-X胶对花岗岩残积土抗压强度的提升效果更为显著。此外,生物聚合物改良土的应力-应变曲线呈现典型的应变软化特

征,且随着生物聚合物掺量的增加,应力峰值对应的应变位置整体后移。其中,GG改良土的这一变化最为显著,G-X改良土次之,XG改良土应力峰值对应的应变相对较为接近。综上可见,XG改良土强度发挥时效更快,但提升幅度有限;GG改良土强度提升速度相对平缓,却有着更大增幅;G-X改良土则介于两者之间,兼具二者的特点。

2.2 养护方式对改良土抗压强度的影响

考虑到不同土层深度的干湿环境存在差异,采用标准养护和常温养护两种方式,分别模拟下部土体和表层土体的赋存条件。图5所示为两种养护方式下养护4d的改良土应力-应变曲线;图6所示为对应养护条件下改良土的无侧限抗压强度与生物聚合物掺量的关系。由图5、图6可知,与标准养护相比,常温养护条件下,素土及改良土的水分流失较多、试样含水率更低,其无侧限抗压强度显著提高。如1%掺量的GG改良土,常温养护4d后的无侧限抗压强度可达2000 kPa,约为标准养护条件下的6.7倍。进一步结合掺量影响分析可知,在标准养护条件下,改良土的抗压强度始终随生物聚合物掺量的增长而持续增强,但增长幅度呈先增后减的变化规律;具体表现为强化效率分别在GG掺量为1.5%、XG掺量为0.5%、G-X掺量为2%时达到最高,强度提升最为明显,这一规律与未养护条件下保持一致。相比之下,常温养护条件下,改良土的抗压强度随生物聚合物掺量的增加先达到峰值,随后逐渐下降;具体而言,GG改良土、XG改良土及G-X改良土抗压强度峰值对应的掺量分别为1%、1%和1.5%。

强度变化主要与试样失水速率有关。图7所示为常温与标准养护条件下分别养护4d的改良土试样外观。由图7可知,常温养护试样失水现象显著,破坏后内部含水率仅5%~8%。水分大量流失促使土体破坏模式由塑性破坏向脆性破坏转变,进而使其抗压强度大幅提高。然而,随着生物聚合物掺量的增加,土体内部水分不足以与过量生物聚合物形成稳定的水凝胶-颗粒胶结体,导致多余聚合物以干燥结晶形式存在,反而削弱了土颗粒间的黏结作用,致使抗压强度降低。相比之下,标准养护条件下试样水分蒸发缓慢,含水率基本保持稳定,生物聚合物与土颗粒充分结合,形成稳定的胶结结构,因此抗压强度随掺量的增加呈持续上升趋势。

结合实际工程应用可知,采用生物聚合物加固花岗岩残积土时,表层土体能达到更高的抗压强度,相同掺量下约为下部土体的3~6倍。因此,加固花岗岩残积土表层土体时,应尽量根据常温养护

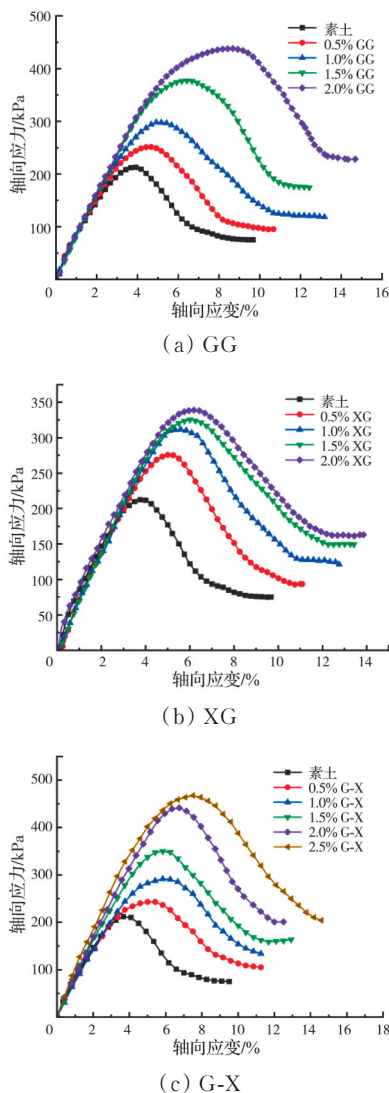


图4 不同生物聚合物掺量花岗岩残积土的应力-应变曲线
Fig. 4 Stress-strain curves of granite residual soil with different biopolymer contents

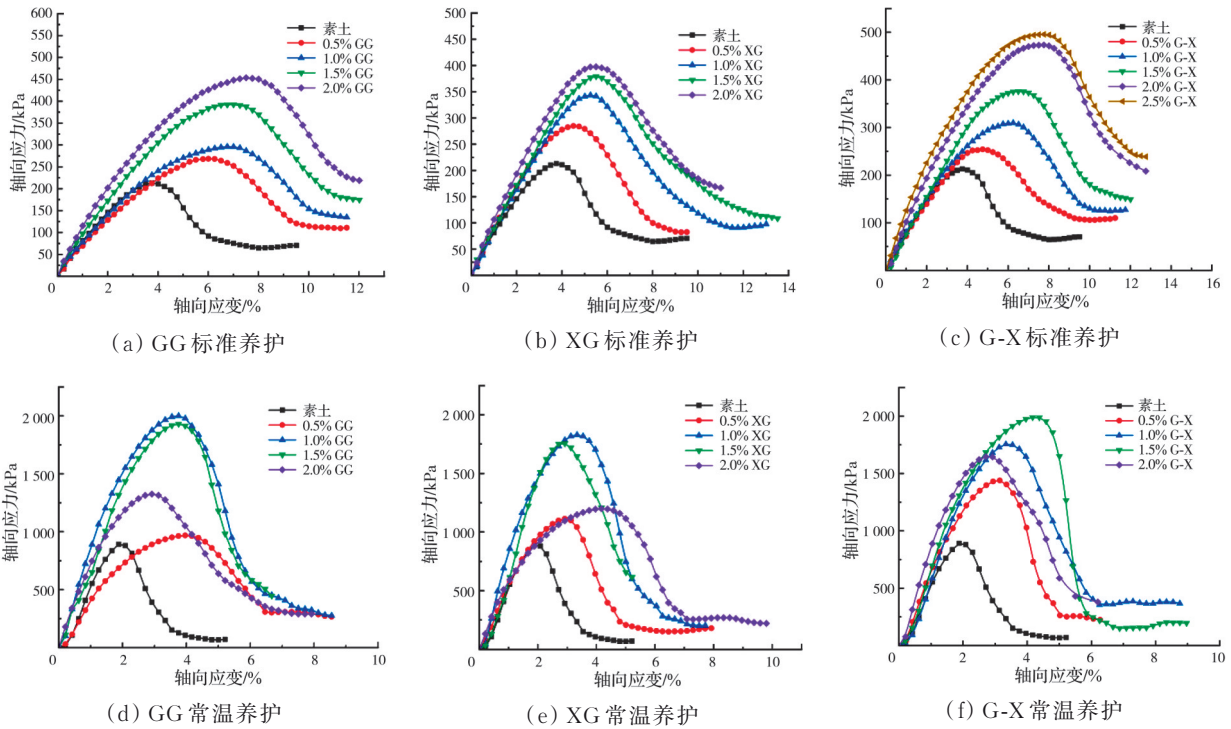


图 5 不同养护方式下花岗岩残积土的应力-应变曲线(养护 4 d)

Fig. 5 Stress-strain curves of granite residual soil with different curing methods (curing 4 d)

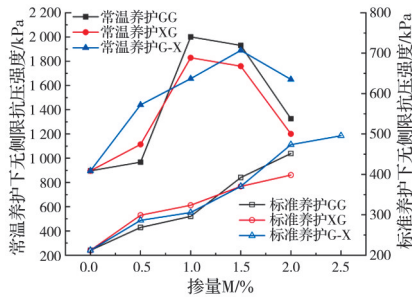


图 6 不同掺量及养护方式下改良土的抗压强度 (养护 4 d)

Fig. 6 Compressive strength of improved soil under different curing methods and dosages (curing 4 d)

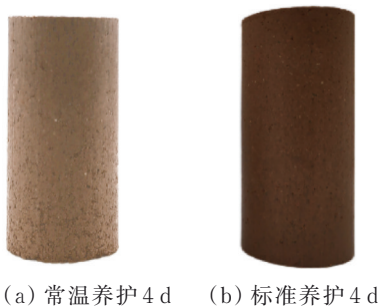


图 7 不同方式养护后的改良土试样

Fig. 7 Improved soil specimens after different curing methods

下的最优掺量配制改良土,以充分发挥其最大抗压强度;而对于下部土体,尽可能选择强化效率较高的对应掺量,在保证力学性能改良效果的同时提升工程经济性。

2.3 养护龄期对改良土抗压强度的影响

图 8 所示为不同养护龄期下 3 种生物聚合物改良土的无侧限抗压强度随掺量的变化规律。由图 8 可知,养护初期(标准养护前 4 d、常温养护前 6 d),3 类改良土抗压强度均显著增长,说明聚合物胶体与土颗粒逐步胶结固化,3 种生物聚合物均在较短养护龄期内有效提升了花岗岩残积土的抗压性能。但随着养护时间的延长,GG 改良土抗压强度出现一定程度下降,养护至 20 d 时强度降低更为明显,表明单掺 GG 改良花岗岩残积土存在“后期强度损失”现象;XG 改良土抗压强度随养护龄期先上升后趋于稳定,且后期仍呈缓慢增长趋势;经短期增长后,G-X 改良土抗压强度随养护龄期的延长呈小幅波动,后期同样表现出缓慢增长趋势。

可见,采用 G-X 改良花岗岩残积土既可弥补单掺 XG 强度提升幅度较低的不足,又可避免单掺 GG 引发的后期强度损失问题。上述现象可归因于 3 种生物聚合物的作用机制存在差异。

养护过程中试样的含水率变化直接影响其强度发展。试验中,标准养护下试样含水率基本保持稳定,而常温养护下试样失水明显。以 G-X 改良土为例,图 9 所示为常温养护下不同龄期时掺量为 1.5% 的 G-X 改良土试样含水率与抗压强度的变化曲线。由图 9 可知,常温养护 4 d 内,试样含水率显著降低,同时 G-X 改良土抗压强度明显升高;4 d 后,试样含水率降速减缓,抗压强度增速亦随之放缓。

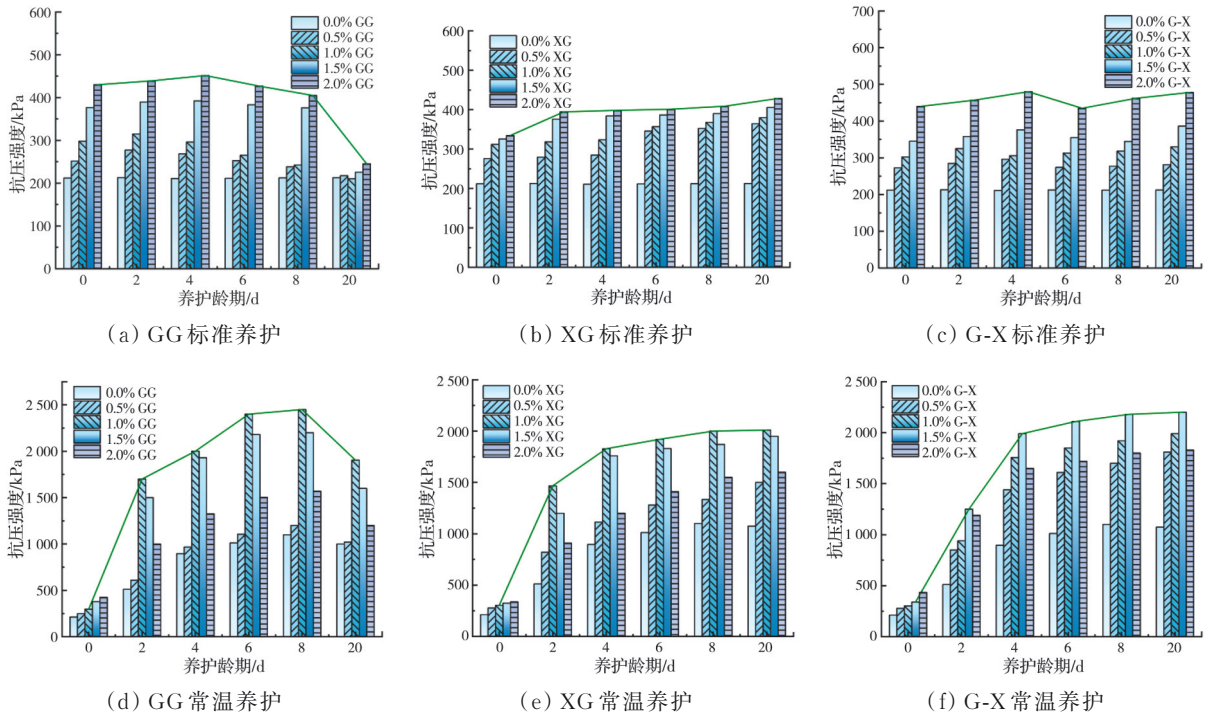


图 8 改良土无侧限抗压强度与养护龄期的关系

Fig. 8 Relationship between unconfined compressive strength and curing age of improved soil

此外,对比同期素土与G-X改良土的含水率可知,生物聚合物的掺入可减缓土体水分蒸发,增强花岗岩残积土的持水性能。由此可知,常温养护下改良土抗压强度的增长与含水率损失显著相关;相较于生物聚合物,土体失水在试样强度增长中起主导作用。

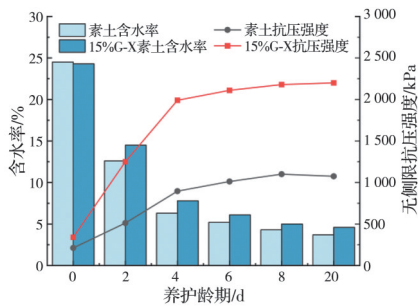


图 9 常温养护下G-X改良土含水率与抗压强度的关系

Fig. 9 Relationship between water content and compressive strength of G-X improved soil under room temperature curing

3 改良土抗剪力学性能

选用抗压强度改良效果更优的材料开展三轴剪切试验,以探究其对花岗岩残积土抗剪强度的改良效果。G-X改良土在无侧限抗压强度与后期强度稳定性方面均表现更优;同时,XG价格约为GG的1.5~2.0倍,相同掺量下采用G-X改良花岗岩残积土较XG更具经济性。因此,选取G-X改良土为研究对象,进一步分析其抗剪力学性能。

图 10 所示为 G-X 改良花岗岩残积土在不同生物聚合物掺量下的三轴剪切应力-应变曲线,此处只给出素土及 1%、2% 两种掺量试样的曲线。由图 10 可知,素土与 G-X 改良土在三轴剪切过程中均呈显著的应变硬化特征。表 5 为偏应力随生物聚合物掺量增加的变化值。由表 5 可知,同一围压下,土体抗剪强度总体随掺量的增加而提高。这表明生物聚合物的掺入可同步提升花岗岩残积土的抗压强度与抗剪强度。

表 5 偏应力变化表
Table 5 Deviator stress variation

掺量/%	$(\sigma_1 - \sigma_3)/kPa$	$(\sigma_1 - \sigma_3)/kPa$	$(\sigma_1 - \sigma_3)/kPa$
	$(\sigma_3 = 100 \text{ kPa})$	$(\sigma_3 = 200 \text{ kPa})$	$(\sigma_3 = 400 \text{ kPa})$
0	240.91	340.52	520.64
0.5	285.62	375.14	565.57
1.0	350.71	440.33	635.27
1.5	437.82	530.43	730.71
2.0	475.24	567.04	780.08

图 11 所示为 G-X 改良土经三轴剪切后的试样宏观变形特征。结合图 10、图 11 可知,G-X 改良后的花岗岩残积土试样在三轴剪切过程中表现出明显的剪胀变形。在弹性阶段,土颗粒发生压密,应力-应变呈近似线性增长,土体主要通过胶结作用抵抗变形;进入塑性阶段后,土颗粒在进一步压密的基础上重新排列,试样产生剪胀效应,应变快速增大,颗粒间摩擦作用逐渐占据主导。由于摩擦力与

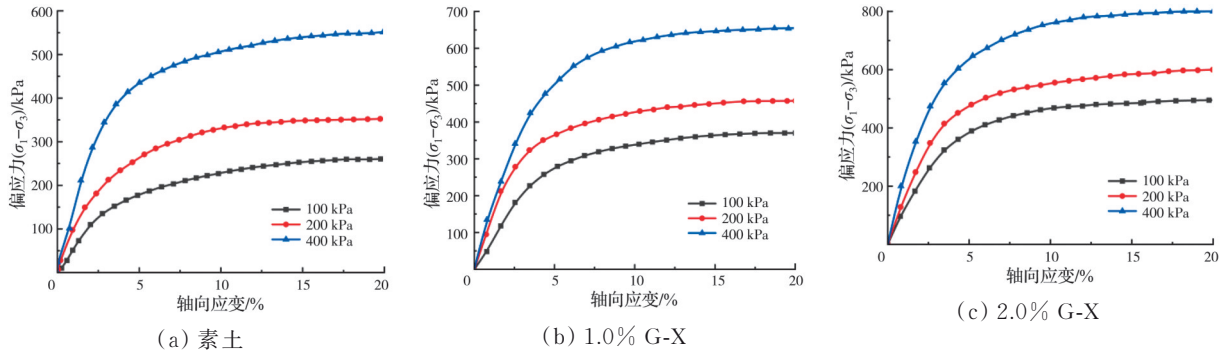


图 10 不同掺量 G-X 改良土的偏应力-应变曲线

Fig. 10 Deviator stress-strain curves of G-X improved soil with different dosages

胶结力共同提供的强度大于土体结构损伤带来的强度衰减,轴向偏应力持续增大,应力-应变曲线呈现应变硬化特征。此外,G-X的掺入可显著提高花岗岩残积土的塑性指数(试验结果表明,改良土体塑性指数为素土的2~3倍),并增强土颗粒间的胶结作用,有效抑制裂纹的发生,因此试样在三轴剪切过程中呈现大范围鼓胀变形,未出现明显的剪切破坏。



图 11 G-X 改良土三轴剪切后试样

Fig. 11 G-X improved soil specimen after triaxial shear

续增大趋势,但增幅较小。由此可见,G-X生物聚合物主要通过提高花岗岩残积土的黏聚力来提升抗剪性能。

为探究实际工程应用的可行性,将生物聚合物改良土的力学性能与造价同水泥石进行对比。结果表明:1)对于表层土体,生物聚合物改良土具有较高抗压强度,1%掺量试样在常温下裸露放置4~8 d后抗压强度高于2 000 kPa(图8)。已有研究表明^[21],采用水泥加固花岗岩残积土时,5%水泥掺量下养护7 d的抗压强度约为900 kPa;若要达到2 000 kPa的抗压强度,水泥掺量需15%~20%,远高于生物聚合物所需掺量。此外,水泥石通常需养护14~28 d强度才能达到峰值,养护周期与工作量均显著高于生物聚合物改良土。2)从经济角度看,GG、XG、G-X单价虽高于水泥,但掺量低,总体改良成本更具优势,可有效降低工程造价。

总体而言,相较于水泥石,采用3类生物聚合物改良花岗岩残积土不仅造价更低、工程养护周期更短,且兼具环保特性,更具工程应用潜力。

结合图 12 中抗剪强度指标分析可知,掺入生物聚合物后,土体黏聚力 c 随掺量显著增大,掺量为 1.5% 时增长速率最快,掺量为 2% 时黏聚力可达素土的 2.4 倍;内摩擦角 φ 同样随着掺量的增加呈持

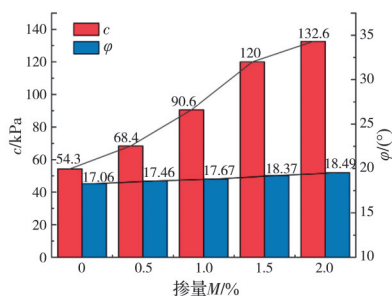


图 12 剪切强度参数与 G-X 掺量的关系

Fig. 12 Relationship between shear strength parameters and G-X dosage

4 加固机理分析

图 13 给出了素土及不同生物胶改良土的 SEM 微观结构,由此可探析 GG、XG、G-X 对花岗岩残积土的加固机理。结合 SEM 图像分析:1)改良前,花岗岩残积土分层明显,颗粒联结松散,孔隙率较高,颗粒间缺乏有效黏结(图 13(a));2)加入生物聚合物后,分层界面被包裹,易形成较大胶结结构,土颗粒间孔隙被填充,显著增强了颗粒黏结性与土体致密性(图 13(b));3)XG 在固化过程中与土颗粒间黏结较弱,主要通过填充颗粒间孔隙,增大颗粒间有效接触面积,从而提升整体强度(图 13(c)中出现较多细小的颗粒状物质,其与土颗粒黏结作用较弱,难以形成网络状胶结结构,填充在土体孔隙能显著优化土体结构);4)GG 依托其高分子网络结构,在

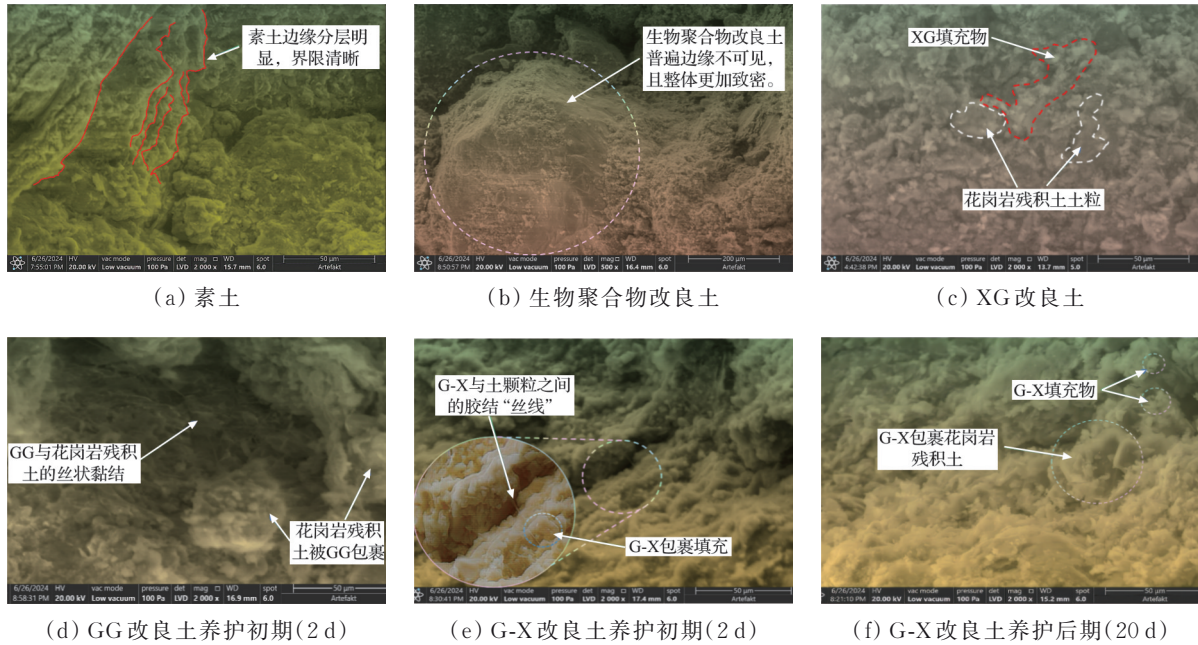


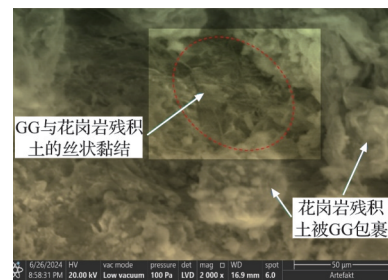
图 13 花岗岩残积土素土及聚合物改良土的 SEM 照片

Fig. 13 SEM images of pure granite residual soil and polymer improved soil

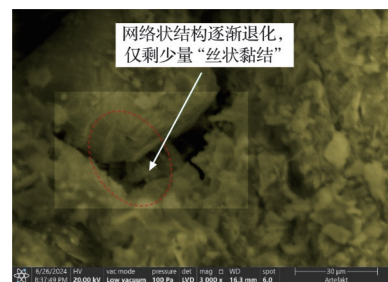
颗粒间形成强力黏结,显著提高颗粒间黏结性能(图 13(d)中可见其密布的丝状/网状黏结);5)G-X 结合了黄原胶的填充作用与瓜尔豆胶的黏结特性,在静电作用、氢键作用等协同作用下,瓜尔胶中的半乳糖与黄原胶螺旋结合,可在土体颗粒表面形成更稳定的胶结体^[15](图 13(e)中 G-X 胶结体的填充与包裹效果更显著),展现出更为优异的协同加固效果。

进一步分析复合胶 G-X 改良土微观结构随养护龄期的变化规律,发现其强度提升存在特殊机理。在养护初期,瓜尔豆胶和黄原胶的协同作用增强了颗粒间黏结(由图 13(e)可知,养护初期以胶结作用为主,随着胶结体的形成,土体抗压强度上升较快);但随着龄期的增加,瓜尔豆胶高分子网络结构逐渐退化,部分黏结作用减弱,土体抗压强度出现小幅波动(图 13(f)中丝状/网络状黏结结构减少)。与此同时,G-X 黏聚物等细小颗粒状物质逐渐生成,持续填充颗粒间孔隙并形成更稳定的胶结体,使改良土后期强度再次提升。

图 14 所示为 GG 改良土在不同养护时期的微观结构变化。由图 14 可知,随着养护时间的推移,瓜尔豆胶的高分子网络结构逐渐退化、数量减少。结合已有研究分析,这一现象与瓜尔豆胶的氧化及水解作用有关^[22],即高亲水性的瓜尔豆胶会与空气中的氧气、水分发生氧化水解反应,破坏多糖链等大分子结构的完整性,导致胶体黏性降低。这也解释了前述单掺瓜尔豆胶时改良土出现“后期强度损



(a) 养护早期(2 d)



(b) 养护后期(20 d)

图 14 GG 改良土不同养护时段的 SEM 照片

Fig. 14 SEM images of GG improved soil at different curing periods

失”的现象。

综上所述,生物聚合物改良花岗岩残积土的加固效果主要通过填充孔隙,增强颗粒间黏结并优化土体结构实现。黄原胶的填充效果、瓜尔豆胶的强黏结特性以及复合胶的“协同增效效应”共同构成了改良花岗岩全风化残积土力学性能提升的微观机制(图 15),为后续改良配比优化和工程应用效果提升提供了科学依据。

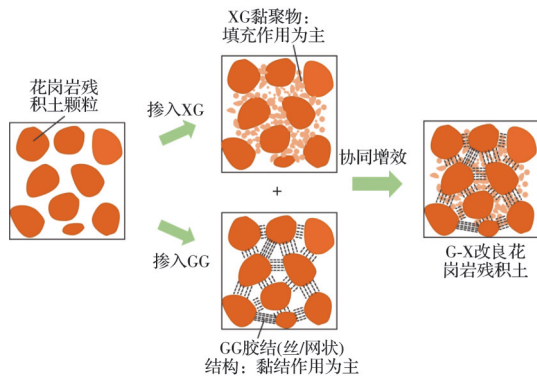


图15 生物聚合物改良花岗岩残积土的微观机理示意图

Fig. 15 Schematic diagram of the micromechanism of biopolymer improved granite residual soil

5 结论

1)黄原胶XG、瓜尔豆胶GG及二者复合胶G-X均能有效提高花岗岩残积土的抗压强度;在2%掺量下,G-X与GG改良土强度约为素土的2倍,XG改良土强度约为素土的1.5倍;G-X改良土通过显著提升素土黏聚力(增幅约2.5倍)有效改善其抗剪性能。

2)标准养护条件下,3种改良土的抗压强度随掺量的增加持续提升,但增幅逐渐趋缓,强化效率分别在GG掺量为1.5%、XG掺量为0.5%、G-X掺量为2%时达到最高;常温养护条件下,改良土抗压强度随掺量的增加先升至峰值后下降,GG、XG、G-X对应的最优掺量分别为1%、1%、1.5%,且常温养护下试样失水显著,其抗压强度可达标准养护条件下的6倍以上。

3)随着养护龄期的增长,GG改良土抗压强度出现强度损失现象;XG改良土龄期稳定性较好,但强度提升幅度有限;G-X改良土不仅强度提升显著,且强度随龄期整体呈缓慢上升趋势,主要因其兼具GG对土颗粒的黏结作用与XG的填充作用,表现出协同增效的改良效果。

参考文献

[1] 吴能森,赵尘,侯伟生.花岗岩残积土的成因、分布及工程特性研究[J].平顶山学院学报,2004,13(4):1-4.
Wu N S, Zhao C, Hou W S. Research on the cause of formation, distribution and engineering characteristics of the granite residual soil[J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology, 2004, 13(4): 1-4. (in Chinese)

[2] 简文彬,胡海瑞,罗阳华,等.干湿循环下花岗岩残积土强度衰减试验研究[J].工程地质学报,2017,25(3):592-597.
Jian W B, Hu H R, Luo Y H, et al. Experimental study on deterioration of granitic residual soil strength in wet-

ting-drying cycles[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 592-597. (in Chinese)

- [3] 周宇,陈东霞,于佳静,等.干湿循环下花岗岩残积土的崩解试验与微观机理研究[J].长江科学院院报,2023,40(1):153-160.
Zhou Y, Chen D X, Yu J J, et al. Test and micro-mechanism of disintegration of granite residual soil under dry-wet cycles[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2023, 40(1): 153-160. (in Chinese)
- [4] 宋树祥,黄秋凤,张楠,等.传统改良方式与微生物固化花岗岩残积土效果对比研究[J].广东土木与建筑,2023,30(3):25-29.
Song S X, Huang Q F, Zhang N, et al. Study on the effectiveness of traditional improvement methods and microbial curing of granite residual soils[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2023, 30(3): 25-29. (in Chinese)
- [5] Zhao Y R, Chen X S, Wen T D, et al. Experimental investigations of hydraulic and mechanical properties of granite residual soil improved with cement addition[J]. Construction and Building Materials, 2022, 318: 126016.
- [6] Sun Y L, Liu Q X, Xu H S, et al. Influences of different modifiers on the disintegration of improved granite residual soil under wet and dry cycles[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2022, 32(4): 831-845.
- [7] Tan Y Z, Hu M Z, Li D Q. Effects of agglomerate size on California bearing ratio of lime treated lateritic soils [J]. International Journal of Sustainable Built Environment, 2016, 5(1): 168-175.
- [8] Sunil B M, Nayak S, Shrihari S. Effect of pH on the geotechnical properties of laterite[J]. Engineering Geology, 2006, 85(1/2): 197-203.
- [9] Yuan L, Ma Y C, Zhang J, et al. Orthogonal analysis and mechanism of compressive strength and microstructure of the metakaolin-fly ash geopolymer[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01154.
- [10] 付宏渊,查焕奕,潘浩强,等.生物聚合物改良预崩解炭质泥岩水稳性及冲刷试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2633-2644.
Fu H Y, Zha H Y, Pan H Q, et al. Experimental study on water stability and scour resistance of biopolymer modified disintegrated carbonaceous mudstone[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(7): 2633-2644. (in Chinese)
- [11] 欧阳森,张红日,邓人睿,等.黄原胶生物聚合物改良膨胀土裂隙演化规律研究[J].岩土工程学报,2025,47(1):106-114.
Ouyang M, Zhang H R, Deng R R, et al. Development of cracks in expansive soil improved by xanthan gum bio-

- polymer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(1): 106-114. (in Chinese)
- [12] Dehghan H, Tabarsa A, Latifi N, et al. Use of xanthan and guar gums in soil strengthening[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2019, 21(1): 155-165.
- [13] Eldaw G E. A study of guar seed and guar gum properties[D]. Khartoum: Agriculture University of Khartoum, 1998.
- [14] 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 T L, Wang L, Liu S S, 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. (in Chinese)
- [15] 卢毅, 赵洪岩, 蔡田露, 等. 生物胶改良黏土抗崩解特性试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(3): 64-71.
Lu Y, Zhao H Y, Cai T L, et al. Experimental study on disintegration resistance of clay improved by biological glue[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(3): 64-71. (in Chinese)
- [16] Acharya R, Pedarla A, Bheemasetti T V, et al. Assessment of guar gum biopolymer treatment toward mitigation of desiccation cracking on slopes built with expansive soils[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2657(1): 78-88.
- [17] Fu H Y, Yu G T, Gao Q F, et al. Crack resistance and strength properties of red clay modified with lignocellulose and guar gum[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2023, 27(10): 4152-4162.
- [18] Wan J, Ouyang F, Xiao H L, et al. Experimental study on the physical and mechanical properties of modified clay using xanthan gum and guar gum composite materials[J]. Sustainability, 2024, 16(13): 5432.
- [19] Sujatha E R, Saisree S. Geotechnical behaviour of guar gum-treated soil[J]. Soils and Foundations, 2019, 59(6): 2155-2166.
- [20] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].
GB/T 50123—2019 Standard for geotechnical testing method[S]. (in Chinese)
- [21] Dong X X, Bao X H, Cui H Z, et al. Effects of cement treatment on mechanical properties and microstructure of a granite residual soil[J]. Applied Sciences, 2022, 12(24): 12549.
- [22] 郭广军, 周利英, 何建平, 等. 瓜尔胶及其衍生物的过硫酸铵氧化降解研究[J]. 化学研究与应用, 2010, 22(12): 1546-1550.
Guo G J, Zhou L Y, He J P, et al. Oxidative degradation of guar gum and its derivatives by ammonium persulfate[J]. Chemical Research and Application, 2010, 22(12): 1546-1550. (in Chinese)

(编辑 朱备)