

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.030



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



大理石废粉-黄原胶复合改良膨胀土的工程特性 试验研究

李结全^{1,2}, 赵长友¹, 曾召田¹, 韦冬斌¹, 王平¹

(1. 桂林理工大学 广西岩土力学与工程重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 广西建设职业技术学院
土木工程学院, 南宁 530007)

摘要:为实现“固废资源化利用”和“以废治害”的双重目标,以南宁膨胀土为对象,研究单一大理石废粉和复合大理石废粉-黄原胶两类方法对其工程特性的改良效果。通过自由膨胀率试验和直剪试验分别研究改良膨胀土的膨胀特性和强度特性,以此确定各改良材料的最优掺量,结合电镜扫描试验揭示其改良作用的微观机制。结果表明:单一大理石废粉的掺入能有效降低膨胀土的自由膨胀率,但随掺量增加土体强度有所下降,当掺量为25%时,膨胀抑制效果明显且强度劣化趋于稳定;在大理石废粉25%掺量的基础上,黄原胶的掺入使改良土体的黏聚力和内摩擦角显著提高,且在黄原胶掺量为1.5%时强度参数达到峰值,而膨胀性仍处于可控范围;大理石废粉主要通过改变土体颗粒级配和矿物成分抑制其膨胀变形,而黄原胶形成的凝胶基质可有效填充土体孔隙和增强颗粒间胶结作用,并形成致密团聚体,从而提升土体强度。25%大理石废粉与1.5%黄原胶的材料配比为膨胀土复合改良的最佳方案。

关键词:膨胀土;大理石废粉;黄原胶;膨胀特性;强度特性

中图分类号: TU443 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Experimental study on the engineering performance of expansive soil improved by a composite of marble waste powder and xanthan gum

LI Jiequan^{1,2}, ZHAO Changyou¹, ZENG Zhaotian¹, WEI Dongbin¹, WANG Ping¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Guangxi Polytechnic of Construction, Nanning 530007, P. R. China)

Abstract: To achieve the dual objectives of “solid waste resource utilization” and “using waste to treat hazards,” this study systematically investigated the improvement effects of two methods—sole marble waste

收稿日期: 2025-12-16

基金项目: 国家自然科学基金(41962014); 广西自然科学基金(2023GXNSFAA026187)

作者简介: 李结全(1980-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事环境岩土工程研究, E-mail: 55801579@qq.com。

曾召田(通信作者)男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: zengzhaotian@163.com。

Received: 2025-12-16

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No.41962014); Natural Science Foundation of Guangxi (No. 2023GXNSFAA026187)

Author brief: LI Jiequan (1980-), PhD, senior engineer, main research interest: environmental geotechnical engineering, E-mail: 55801579@qq.com.

ZENG Zhaotian (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: zengzhaotian@163.com.

powder and composite marble waste powder-xanthan gum—on the engineering properties of Nanning expansive soil. The expansion and strength characteristics of the modified expansive soil were evaluated through free swell ratio tests and direct shear tests, respectively, to determine the optimal dosage of each improvement material. Additionally, scanning electron microscopy tests were conducted to reveal the microscopic mechanisms of the improvement. The experimental results showed that: (1) The addition of sole marble waste powder effectively reduced the free swell ratio of the expansive soil, but soil strength decreased with increasing dosage. When the dosage reached 25%, the expansion inhibition effect was significant, and the strength degradation trend stabilized. (2) On the basis of 25% marble waste powder, the addition of xanthan gum significantly improved the cohesion and internal friction angle of the modified soil. At a xanthan gum dosage of 1.5%, the strength parameters reached their peak values while the expansiveness remained within a controllable range. (3) Marble waste powder primarily inhibited the expansive deformation by altering the particle gradation and mineral composition of the soil, while the gel matrix formed by xanthan gum effectively filled soil pores, enhanced particle bonding, and formed dense aggregates, thereby improving soil strength. Considering all factors, the material ratio of 25% marble waste powder and 1.5% xanthan gum was determined to be the optimal scheme for the composite improvement of expansive soil.

Keywords: expansive soil; marble waste powder; xanthan gum; swelling characteristics; strength properties

膨胀土作为一种典型的胀缩性土,在广西、贵州、云南等地区分布尤为广泛。该类土体富含蒙脱石、伊利石等强亲水性矿物,表现出显著的吸水膨胀和失水收缩特性,且对气候条件变化极为敏感,易引发路基隆起、边坡滑塌和建筑物开裂等严重工程问题,被称为“工程中的癌症”^[1]。因此,对膨胀土进行有效改良以提升其工程性能,已成为当前岩土工程领域亟待解决的关键问题。

目前,学者针对膨胀土提出了多种改良方法,涵盖化学、物理及生物改良等技术路径,并对改良效果与存在的问题进行了深入研究。在化学改良方面,符策岭等^[2]采用石灰改良膨胀土,发现随石灰掺量增加,土体强度显著提升,膨胀性明显降低;Liu等^[3]利用褐煤粉煤灰对膨胀土路基进行稳定,其作用效果可提升强度与承载能力并降低胀缩指标;Zhu等^[4]采用水泥固化膨胀土在干湿循环作用下的性能演化规律,发现在干湿循环作用下因胶结结构破坏和孔隙劣化而发生的力学性能衰减。在物理改良方面,Gidebo等^[5]发现,在膨胀土中掺入天然纤维可显著改善土体结构稳定性并增强其强度性能,其作用机理主要表现为纤维加筋与裂隙抑制;张艺等^[6]发现,采用粉土改良可降低膨胀土胀缩变形并提升其路用性能,现场试验结果验证了其工程可行性。在生物技术改良方面,肖建章等^[7]采用微生物技术复合改良膨胀土,发现改良后土中蒙脱石含量显著减少,膨胀性大幅降低;Mobarezi等^[8]利用EICP技术通过碳酸盐沉淀增强颗粒胶结并优化微结构,从而有效抑制膨胀土的胀缩变形;而王欢等^[9]则利用EICP技术,优化工艺参数,显著提升了膨胀

土力学性能。

各类膨胀土改良方法虽在工程实践中取得一定成效,但仍存在诸多局限。如,化学改良法虽见效快,却可能引起二次污染且后期养护困难;物理改良法存在无法就地取材、改良成本高昂的缺点;生物改良法则面临材料易老化、经济性不足及施工技术复杂等问题。传统改良材料(如石灰、水泥)因其高碳排放与潜在的生态干扰,正逐渐被更环保的创新方案所补充甚至替代。在此背景下,工业废弃物的资源化利用^[10-11]与各种低碳处置技术的研发^[12]日益受到重视,稻壳灰^[13]、碱渣^[14]、钢渣粉^[15]、牡蛎壳粉^[16]及各类生物聚合物^[17]等新型环保改良材料相继涌现。近年来,学者围绕废弃石粉的资源化利用开展了大量研究,并在软土改良、农业土壤改良以及不良土复合固化等方面取得了一定成果^[18-20]。广西贺州是重要的大理石产区,每年加工过程中产生约150万t废粉,除少量用于水泥生产^[21]外,大部分长期堆存,不仅占用土地资源,还对大气环境与人体健康构成威胁。目前,针对大理石废粉在土体工程,尤其是膨胀土改良中的应用研究仍较缺乏,其对膨胀土胀缩特性、结构演变及强度发展的影响尚不明确,相关机理亦尚未形成成熟的理论体系。因此,开展大理石废粉在膨胀土改良中的应用研究,既契合固废资源化利用的现实需求,也具有一定的理论探索价值。此外,黄原胶作为一种环境友好型生物聚合物,已被广泛应用于土壤改良^[22-24],并表现出利于植被生长的特性。鉴于此,将二者复合用于膨胀土改良,系统研究其工程特性,不仅为固体废弃物的资源化利用开辟了新途径,也为绿色低碳的

土体改良技术提供了新思路,具有重要的工程意义与环境价值。

笔者通过系统试验研究大理石废粉与黄原胶复合改良膨胀土的工程特性与微观机理。首先,开展自由膨胀率与直剪试验,分析7种废粉掺量(0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%)对膨胀土改良效果的影响,确定废粉最优掺量;在此基础上,进一步复合掺入不同比例黄原胶(0%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%),探究其对膨胀土工程特性的协同改良效应,确定黄原胶的最佳掺量;最后,选取代表性试样进行扫描电镜(SEM)观测,从微观层面揭示复合改良的作用机理。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

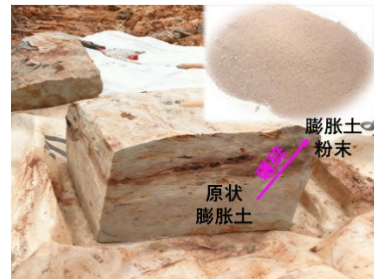
膨胀土取自广西南宁水牛研究所附近,取土深度约2.5 m,呈灰白色(图1(a))。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[25]测定其基本物理性质,并结合XRD试验和K值法^[26]分析其矿物组成,结果见表1。根据相关判别标准^[27],该土样自由膨胀率 $\delta_{ef}=70\%$ ($60 \leq \delta_{ef} \leq 90$),塑性指数 $I_p=37.23$ ($27 \leq I_p \leq 40$),属于中等膨胀土。

大理石废粉来源于广西贺州市某化工厂,为白色粉末(图1(b)),其矿物成分(XRD试验结合K值法^[26])亦列于表1。

黄原胶选用工业级黄原胶,呈淡黄色粉末状(图1(c)),其分子量介于 $1 \times 10^6 \sim 2 \times 10^7$ Da,分子链可形成螺旋网格结构,具有良好的增稠、黏合与乳化性能,广泛用于食品及医疗行业。

采用马尔文3000激光粒度仪对膨胀土和大理石废粉分别进行了颗粒分析试验,结果如图2所示。需要说明的是,激光粒度分析基于等效球体衍射原理,其结果与《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)中推荐的筛析法(联合密度计法)存在一定差异,故粒径数据主要用于材料间的相对比较,而非绝对粒径值的精确标定。

为进一步定量表征两种材料的粒度分布特征,基于图2的颗粒级配曲线提取了其特征粒径参数(D_{50} 、 D_{90}),结果汇总于表1。由图2和表1可知,膨



(a) 膨胀土



(b) 大理石废粉



(c) 黄原胶

图1 试验材料

Fig.1 Test materials

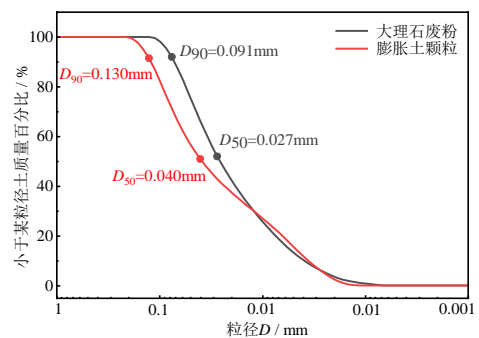


图2 颗粒级配曲线

Fig.2 Gradation curves

胀土和大理石废粉的粒径虽均以0.001~1 mm范围为主导粒组,但二者整体分布趋势存在明显差

表1 膨胀土与大理石废粉的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of expansive soil and marble waste powder

试验材料	比重 G_s	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 $I_p/\%$	自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	矿物组成/ $\%$	特征粒径/mm	粗颗粒含量 ($D > 0.075$ mm)/ $\%$
南宁膨胀土	2.76	64.14	26.91	37.23	70	蒙脱石 27.5、伊利石 41.5、高岭石 17.5、绿泥石 8.8、其他物质 4.7	$D_{50}=0.025$ 、 $D_{90}=0.210$	28.69
大理石废粉	2.31					方解石 78.2、白云石 21.8	$D_{50}=0.110$ 、 $D_{90}=0.350$	8.06

异:膨胀土颗粒粒径整体大于大理石废粉。这一差异性材料是材料配比设计的重要依据之一,也为阐释二者在改良过程中所扮演的不同角色(如骨架作用与填充效应)提供了物理基础。需要说明的是,图2所示的颗粒级配曲线基于经105℃烘干、破碎并过2 mm筛的预处理土样测试获得,该状态与后续改良试验所用土样保持一致,确保了试验结果的可比性与延续性。

1.2 试样制备

试样制备流程包括土样预处理、改良剂掺混及成型制样3个步骤。

土样预处理:将原状膨胀土(图1(a))切成小块,自然风干后,以橡皮锤破碎并过2 mm方孔筛;同时,为剔除大理石废粉中可能混入的杂质颗粒,将其过0.5 mm方孔筛净化处理。将筛分后的膨胀土粉末与大理石废粉粉末分别置于105℃烘箱中烘干8 h,确保二者充分干燥、含水状态一致,备用。

改良剂掺混:采用干混法按设计配比进行掺混。首先,按粉-土质量比 M (大理石废粉/膨胀土:0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%)掺入大理石废粉,确定其最佳掺量(工况1:单一大理石废粉改良);在此基础上,按胶-土质量比 N (黄原胶/膨胀土:0%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%)掺入黄原胶,确定其最佳掺量(工况2:大理石废粉-黄原胶复合改良)。

成型制样:掺混后的材料可直接用于自由膨胀率试验;直剪试验试样需按击实试验确定的素土最佳含水率(17.1%)配制土样,闷料24 h后,采用静压法成型为环刀试样(直径61.8 mm,高度20 mm),控制干密度为1.36 g/cm³。两种工况共14种掺量配比,每种配比制备4个试样用于不同荷载(1组),每组荷载设置2个平行试样,共计制备112个环刀试样。试样制备及后续试验流程如图3所示。

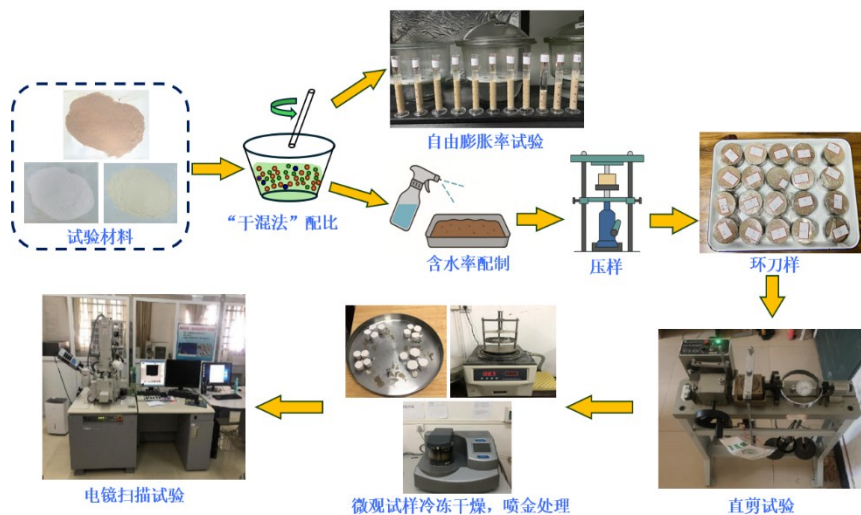


图3 试样制备和试验流程

Fig.3 Sample preparation and test procedure

1.3 试验方法

1) 自由膨胀率试验

为探究单掺大理石废粉及复合掺加大理石废粉-黄原胶对膨胀土膨胀特性的影响,依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[25],采用PZL-1型土壤自由膨胀率测定仪进行试验。具体步骤为:取制备的不同配比土样,使用量土杯精确量取;将土样倒入盛有5 mL 5%氯化钠水溶液的量筒中;待土样沉积稳定后,每隔2 h记录一次试样体积,直至连续两次读数差值不超过0.2 mL,视为膨胀稳定,并据此计算自由膨胀率。

2) 直剪试验

为探究单掺大理石废粉及复合掺加大理石废粉-黄原胶对膨胀土抗剪强度的影响规律,依据《公

路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[25],采用ZJ型应变控制式直剪仪对不同配比土样进行不固结不排水剪切试验。试验选取前述制备的14组试样,每组4个试样,装样后分别在100、200、300、400 kPa垂直荷载下,以0.8 mm/min的速率进行剪切,获取各试样的抗剪强度峰值,并通过库仑强度公式计算得到黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

3) 电镜扫描试验

为了从微观层面揭示膨胀土的改良机理,选取典型试样进行扫描电镜(SEM)观测,包括:未改良素土($M=0%$)、单掺大理石废粉改良土($M=15%$ 和 $25%$),以及复合掺加大理石废粉与黄原胶的改良土($M=25%$, $N=1.5%$)。以直剪试验后的剪切破坏样为观测对象,制成5 mm×5 mm×2 mm的试

样,经液氮冷冻干燥后,用导电胶固定于样品台并进行喷金处理。采用日立 S-4800 场发射扫描电镜,在 5 000 倍放大倍数下观察试样表面形貌与微观结构,并结合 Image Pro Plus(IPP)图像软件进行微观结构的定量分析。

2 结果与分析

2.1 单一大理石废粉改良膨胀土

1) 自由膨胀率试验

7 种大理石废粉掺量 ($M=0\%、5\%、10\%、15\%、20\%、25\%、30\%$) 下改良土的自由膨胀率试验结果如图 4 所示。由图 4 可知,随着大理石废粉掺量 M 的增加,改良土的自由膨胀率 δ_{ef} 呈持续下降趋势:当掺量 M 从 0% 增至 30% 时, δ_{ef} 由 70% 降至 37%, 累计降幅达 47.14%。进一步分析可见,当掺量 M 达到 25% 和 30% 时, δ_{ef} 分别下降至 38% 和 37%, 均已低于《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—2013)^[27] 关于地基换填土自由膨胀率应低于 40% 的限值要求。值得注意的是,掺量 M 从 25% 增至 30% 时,膨胀率下降幅度已趋于平缓,表明继续增加掺量对膨胀性抑制效果的提升有限,因此掺量 25% 可作为膨胀抑制效果趋于稳定的阈值。

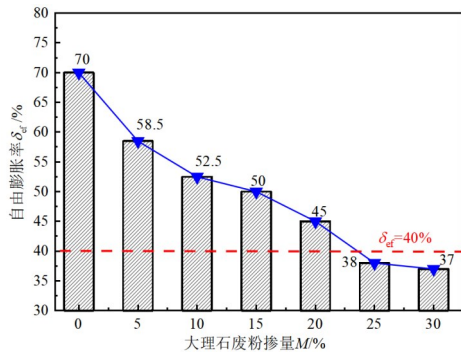


图 4 自由膨胀率 δ_{ef} 随大理石废粉掺量 M 的变化曲线

Fig.4 Variation of $\delta_{ef} - M$ curve

改良土自由膨胀率随大理石废粉掺量增加而降低的本质原因,可从两个方面阐释。①惰性材料替代效应:大理石废粉的主要成分为方解石 (CaCO_3),其本身不具备吸水膨胀特性;随着废粉掺入,膨胀土中蒙脱石、伊利石等亲水性黏土矿物的相对含量被部分稀释替代,导致土体整体的膨胀势减弱;掺量越高,这种替代效应越显著,膨胀率下降也越明显。②颗粒填充与包裹效应:由图 2 的颗粒级配曲线可知,大理石废粉的粒径整体小于膨胀土,大量细颗粒废粉掺入后,一方面填充于土颗粒间的孔隙,改善土体级配,另一方面依附于黏土颗粒表面形成包裹层(如图 5 所示),有效阻隔了土颗粒与水的直接接触,从而抑制了水化膨胀作用的

发挥^[28]。

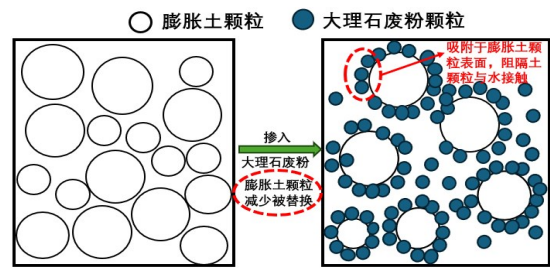


图 5 大理石废粉改良膨胀土机理示意图

Fig.5 Schematic diagram of the improvement mechanism by marble waste powder

2) 直剪试验

7 种大理石废粉掺量 ($M=0\%、5\%、10\%、15\%、20\%、25\%、30\%$) 下的大理石废粉改良土的直剪试验结果如图 6 所示。由图 6 可知,在相同垂直压力条件下,改良土的抗剪强度 τ 随大理石废粉掺量 M 的增加呈总体下降趋势:以垂直压力 400 kPa 为例,当掺量 M 从 0% 增至 30% 时, τ 由 269.97 kPa 降至 206.92 kPa, 降幅达 23.35%。这表明大理石废粉的掺入会在一定程度上劣化土体的抗剪性能,对工程结构的力学稳定性可能产生不利影响。强度下降的机理可从两方面解释:大理石废粉本身不具有黏聚性,其掺入会替代部分黏性土颗粒,削弱土体内部的颗粒间相互作用力,导致结构趋于松散;细颗粒废粉附着于膨胀土颗粒表面,虽在一定程度上抑制了土体吸水膨胀,但同时造成孔隙增多、增大,进一步弱化了抗剪性能。

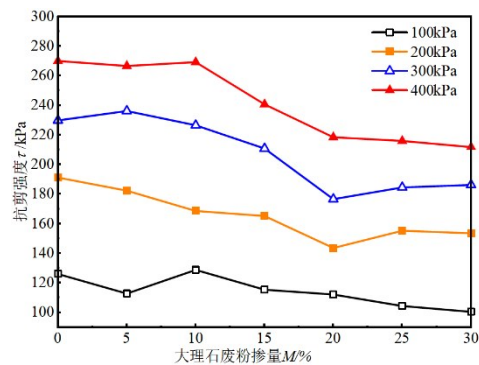
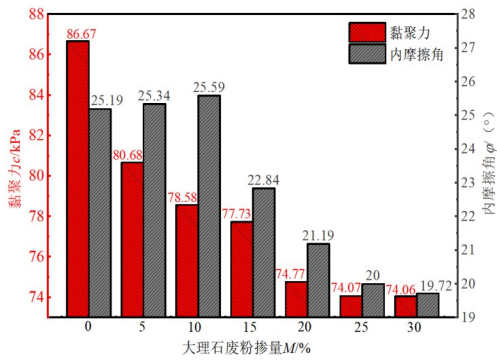


图 6 抗剪强度 τ 随大理石废粉掺量 M 的变化曲线

Fig.6 Variation of $\tau - M$ curves

为进一步揭示大理石废粉掺量对强度参数的定量影响,基于库仑强度公式计算得到不同掺量下改良土的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,其随掺量 M 的变化规律如图 7 所示。

由图 7 可知,随大理石废粉掺量 M 增加,改良土的黏聚力 c 呈逐渐降低趋势。当掺量 M 从 0% 增至 30% 时, c 由 86.67 kPa 降至 74.06 kPa, 降幅为 14.55%;随着 M 提高,黏聚力的下降速率逐渐放

图7 强度参数(c 、 φ)随废粉掺量 M 的变化规律Fig.7 Variation of shear strength parameters with M content

缓,并在掺量达到25%后趋于稳定,这一趋势与自由膨胀率的变化规律基本一致。其机理在于:膨胀土的黏聚力主要来源于黏土颗粒间结合水膜与分子间作用力;惰性大理石废粉掺入后,其颗粒附着于黏土表面,阻隔了黏土颗粒间的直接相互作用,削弱了结合水膜的连通性与分子间力,从而导致黏聚力降低;随着废粉掺量进一步提高,黏土颗粒被替代的程度趋于饱和,其对黏聚力的削弱效应逐渐减弱,故降幅趋缓。

与此同时,改良土的内摩擦角 φ 随大理石废粉掺量 M 增加呈先微增后显著降低的趋势:当掺量 M 为0%~10%时, φ 由25.19°微增至25.59°,增幅为1.59%;继续增加掺量至30%时, φ 降至19.72°,降幅达22.94%。其机理为:在低掺量阶段($M \leq 10\%$),少量大理石废粉颗粒附着于膨胀土颗粒表面,形成粒径较大、表面更粗糙的片状团粒与团聚体,有效填充土体孔隙,降低孔隙率,使土体结构更为紧密,颗粒间相对位移时的摩阻力增大,故内摩擦角略有提升;在高掺量阶段($M > 10\%$),土体中黏性颗粒含量急剧减少,导致可形成团粒与团聚体的基体减少,少量团聚体虽构成土体骨架,但难以形成连续有效的颗粒间咬合,土体结构趋于松散,颗粒间咬合力减弱,因此内摩擦角显著降低。

综合上述分析,大理石废粉掺量对膨胀土的膨胀性与强度具有差异化影响:随掺量增加,自由膨胀率持续降低,膨胀抑制效果显著;但抗剪强度呈下降趋势,尤其在掺量超过15%后强度劣化加剧。当掺量达到25%时,膨胀抑制效果已十分明显(自由膨胀率由素土的70%降至38%),且强度下降趋势趋于稳定;继续增加掺量至30%,膨胀率进一步降低幅度有限,而强度持续下降。因此,从膨胀抑制效果优先、兼顾强度可控的原则出发,确定 $M=25\%$ 为大理石废粉改良膨胀土的最优掺量。

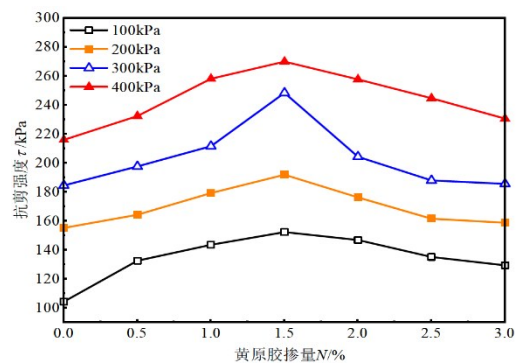
上述结果表明,单一大理石废粉虽能有效抑制

膨胀土的膨胀性,但会劣化其强度特性,不利于工程应用。因此,在实际改良过程中,不仅需合理控制大理石废粉掺量,还应考虑复合掺入其他材料以弥补其强度损失。现有研究表明^[24],黄原胶作为一种环境友好型土体改良剂,能够显著提升土体强度。为此,在确定大理石废粉最佳掺量($M=25\%$)的基础上,引入黄原胶进行复合改良,旨在协同改善膨胀土的膨胀特性与抗剪强度,使其更好地满足工程实践的要求。

2.2 大理石废粉-黄原胶复合改良膨胀土

1) 直剪试验

为探究黄原胶对大理石废粉改良膨胀土强度特性的增强效应,在固定废粉掺量($M=25\%$)条件下,开展了不同黄原胶掺量($N=0\%、0.5\%、1.0\%、1.5\%、2.0\%、2.5\%、3.0\%$)的复合改良土直剪试验,结果如图8所示。由图8可知,在同一垂直荷载作用下,复合改良膨胀土的抗剪强度 τ 随黄原胶掺量 N 的增加呈先增大后减小的趋势:以垂直荷载300 kPa为例,当黄原胶掺量 N 从0%增至1.5%时,抗剪强度 τ 由184.54 kPa提高至248.37 kPa,增幅达34.59%;而当掺量 N 进一步增至3%时, τ 则回落至185.67 kPa,降幅为25.24%。这表明在25%大理石废粉改良基础上复合掺入黄原胶,可有效弥补单掺废粉引起的强度损失,但黄原胶掺量存在最优阈值, $N=1.5\%$ 为强度提升的最佳掺量,超过该阈值后增强效应反而被削弱。

图8 抗剪强度 τ 随黄原胶掺量 N 的变化曲线($M=25\%$)Fig.8 Variation of τ - N curves ($M=25\%$)

为深入揭示黄原胶对土体强度的增强规律,基于库仑强度公式计算得到不同黄原胶掺量下复合改良土的黏聚力 c 和内摩擦角 φ ,其随掺量 N 的变化规律如图9所示。

由图9可知,改良土的黏聚力 c 随着黄原胶掺量 N 的增加呈现先显著增大后减小的变化趋势。当 N 从0%增至1.5%时, c 由74.07 kPa显著提升至113.39 kPa,增幅高达53.08%;继续增加 N 至3.0%时, c 下降至85.74 kPa,降幅为24.42%。这

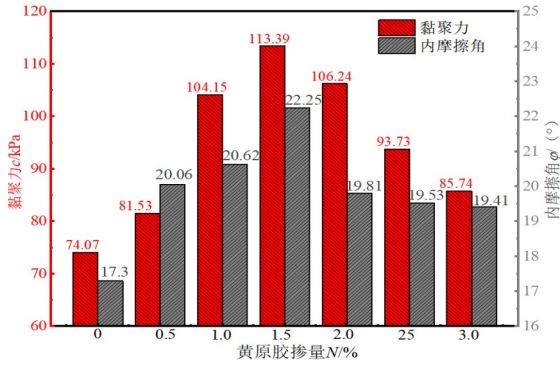


图9 强度参数(c、 φ)随黄原胶掺量N的变化(M=25%)
 Fig.9 Shear strength parameters vs. N content(M=25%)

表明,在25%大理石废粉改良基础上复合掺入适量黄原胶,可有效提升土体的黏聚力,且N=1.5%为黏聚力增强的最佳掺量;过量黄原胶反而会劣化黏聚性能。与此同时,内摩擦角 φ 随黄原胶掺量N的变化亦呈现先增大后趋于稳定的趋势:当N在0%~1.5%范围内, φ 由17.31 $^{\circ}$ 增加至22.25 $^{\circ}$,增幅为28.54%,并在N=1.5%时达到峰值;此后随掺量继续增加至2%以上, φ 逐渐下降并趋于稳定,整体波动范围保持在17 $^{\circ}$ ~20 $^{\circ}$ 之间,表明内摩擦角对黄原胶掺量的敏感性相对较低。

综合上述分析,黄原胶掺量在0%~1.5%范围内,改良土的抗剪强度显著提升,并在N=1.5%时达到峰值。其增强机理主要包括:黄原胶具有强亲水性,遇水后形成黏稠凝胶基质,包裹土颗粒并形成致密团聚体,有效增强颗粒间联结力;黄原胶颗粒径细小,可有效填充土体内部孔隙,部分凝胶在颗粒间形成“桥接”结构^[29](如图10所示),进一步联结团聚体并填充孔隙,从而增强土体整体性与强度。然而,当黄原胶掺量超过1.5%时,过量生成的胶结基质会使土体整体塑性增强、刚度降低,团聚结构的稳定性被削弱,从而导致土体强度降低^[30]。因此,在固定大理石废粉掺量为25%的基础上,复合掺入1.5%黄原胶可有效弥补单一废粉改良导致的强度损失,显著提升土体力学性能。在满足强度要求的前提下,后续需进一步研究该复合掺比对膨胀土膨胀特性的影响,以验证其全面满足规范要求。

2) 自由膨胀率试验

图11为固定大理石废粉掺量(M=25%)条件下,复合改良土自由膨胀率随黄原胶掺量(N=0%、0.5%、1%、1.5%、2%、2.5%、3%)变化的曲线。

由图11可知,随着黄原胶掺量N的增加,改良土的自由膨胀率 δ_{ef} 呈阶段性上升趋势,具体可分为两个阶段。①缓慢增长阶段(N=0%~1.5%): δ_{ef} 由38%缓慢增至41%,增幅为7.89%,膨胀性略有

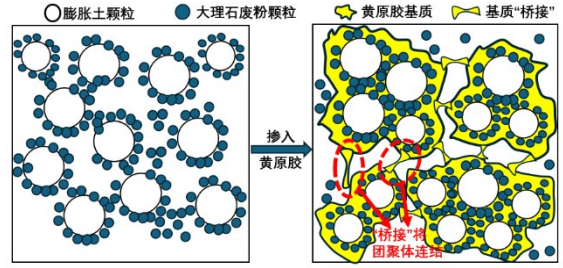


图10 大理石废粉-黄原胶复合改良膨胀土机理示意图
 Fig.10 Schematic diagram of the improvement mechanism by marble waste powder and xanthan gum

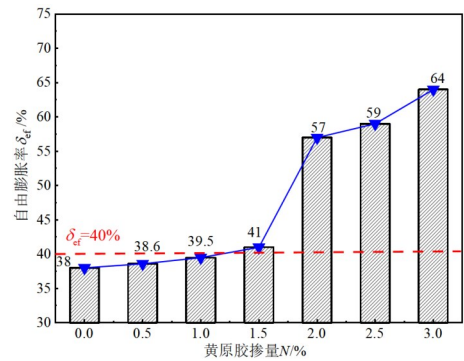


图11 自由膨胀率 δ_{ef} 随黄原胶掺量N的变化(M=25%)
 Fig.11 Variation of δ_{ef} -N curve(M=25%)

增强但整体可控;②显著增长阶段(N=1.5%~3.0%): δ_{ef} 由41%迅速上升至64%,增幅达56.10%,膨胀性明显劣化。上述结果表明,黄原胶的掺入会引起改良土膨胀性增强,这与单一大理石废粉改良土的变化趋势相反。依据《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—2013)^[27]规定,当自由膨胀率超过40%时,改良土一般不满足多数路基填料要求。在黄原胶掺量为1.5%时, δ_{ef} 为41%,虽略超限值,但仍属弱膨胀土范畴,整体影响可控;而掺量超过1.5%后, δ_{ef} 迅速上升至57%以上,接近中等膨胀土水平,劣化效应显著。因此,从膨胀性控制角度,黄原胶掺量不宜超过1.5%。黄原胶掺入引起膨胀性增强的机理为:黄原胶具有强亲水性,遇水后由粉末状态转为絮状凝胶基质,在填充土体孔隙的同时自身体积膨胀;随着黄原胶掺量增加,土体中亲水胶结物质含量增加,整体遇水膨胀效应被强化,宏观表现为自由膨胀率上升。

综合强度与膨胀特性分析,在25%大理石废粉基础上复合掺入1.5%黄原胶,既可有效提升土体强度,又能将膨胀率控制在可接受范围内(弱膨胀土范畴),满足工程规范对填料的基本要求。因此,确定复合改良的最优配比为:大理石废粉25%、黄原胶1.5%(即M=25%,N=1.5%)。

3 改良膨胀土的微观机理分析

为揭示改良前后膨胀土微观结构的演化特征及其与宏观力学行为的内在关联,选取典型试样进行扫描电镜(SEM)观测,包括:未改良素土($M=0\%$)、单一大理石废粉改良土($M=15\%$ 、 25%)以及大理石废粉-黄原胶复合改良土($M=25\%$, $N=1.5\%$),试验结果如图12、图13所示。

图中黄色标注区域为基于Image Pro Plus图像分析软件提取的孔隙分布。各试样对应区域的平面孔隙图像经统一参数处理后,统计得到平面孔隙率,结果列于表2(面积单位:像素)。

3.1 单一大理石废粉改良

图12为4种典型试样的微观结构特征。由图12可知,随着大理石废粉掺量 M 的增加,改良土的微观结构发生显著变化,这与宏观工程特性的变化密切相关。具体来说,未掺大理石废粉的素土试样($M=0\%$,图12(a))呈致密块状结构,颗粒边界不规则但结合紧密,孔隙细小且数量较少,表面平整,整体密度高。掺入15%大理石废粉($M=15\%$,图12(b))后,试样结构趋于疏松,颗粒间结合力减弱,内部形成层片状集合体,孔隙尺寸明显增大。当掺量增至25%($M=25\%$,图12(c))时,试样土颗粒间连接进一步弱化,结构由层片状转为松散小块状集合体,孔隙数量和尺寸显著增加。表2的定量分析结果进一步印证了上述结构变化:随着大理石废粉掺量 M 从0%增至15%、25%,试样的平面孔隙率由25.12%显著上升至62.99%、69.82%,孔隙几乎占据平面大部分区域。

微观结构演变可有效解释单一大理石废粉改良膨胀土的宏观效果。①膨胀性降低的机理:不具亲水性的大理石废粉颗粒逐步替代部分黏性土颗粒,削弱了土体整体的亲水潜力;同时,废粉颗粒嵌入土体孔隙并附着于黏性土颗粒表面,形成细小团聚体,这些团聚体进一步聚集成无定向性的块状结构,破坏了原有层状结构的连续性,从而有效抑制了土体的膨胀性。②强度下降的机理:随着非活性大理石颗粒含量的增加,原本依靠黏性颗粒间相互作用形成的胶结力被削弱,导致土体结构趋于松

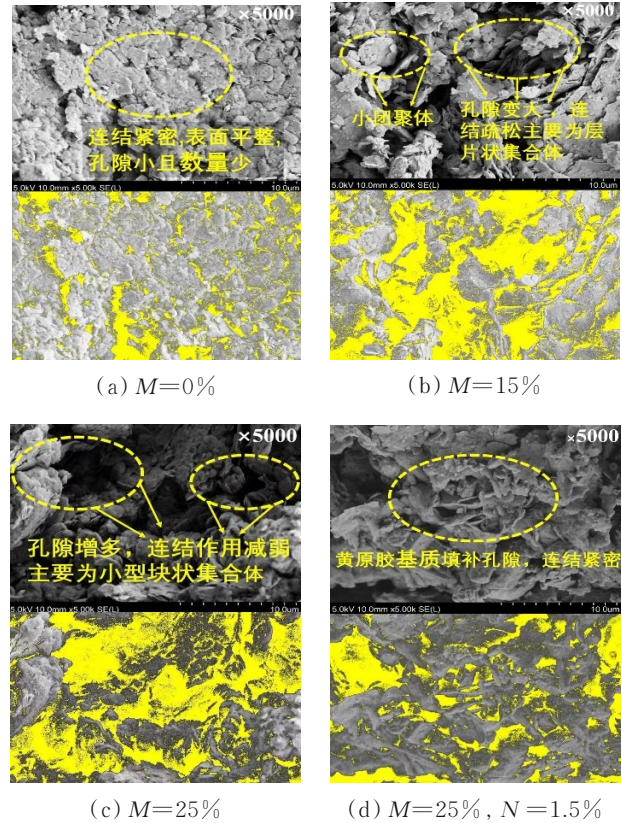


图12 不同掺剂试样的SEM图像(黄色代表孔隙)

Fig.12 SEM images of samples with different additives (yellow represents pores)

散,孔隙率增大,颗粒间有效接触面积减少,进而造成抗剪强度降低(其反应机理如图5所示)。

SEM微观测试结果从结构层面有效验证了关于“单一大理石废粉改良能使膨胀土膨胀性降低但强度减小”的宏观结论。

3.2 大理石废粉-黄原胶复合改良

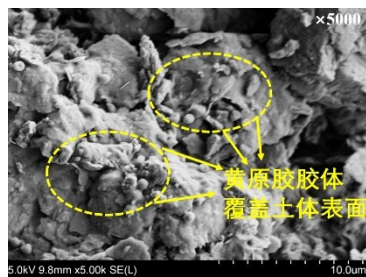
当采用25%大理石废粉与1.5%黄原胶复合改良膨胀土时,试样($M=25\%$ 、 $N=1.5\%$)的微观结构呈现出显著的协同优化特征。由图12(d)和图13(a)可见,黄原胶遇水后生成大量胶凝基质,均匀覆盖于土体颗粒表面,并有效填充了单掺废粉改良土中形成的松散孔隙,使土体结构由松散状态转为致密整体。进一步观察图13(b)和图13(c)发现,凝胶基质在填充孔隙的同时形成“桥接”效应,将大理石废粉形成的小型团聚体紧密连接成结构更完整

表2 SEM试验中不同掺剂试样的分析结果

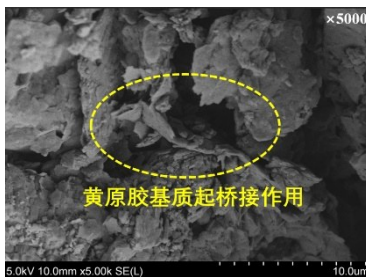
Table.2 SEM analysis results of samples with different additives

典型试样	接触关系及结构	孔隙像素点面积/个	总像素点面积/个	平面孔隙率/%
未改良素土($M=0\%$)	联结紧密,块状结构	1 150 455	4 579 840	25.12
15%大理石废粉($M=15\%$)	联结疏松,层片状	2 883 228	4 577 280	62.99
25%大理石废粉($M=25\%$)	松散结构,小型块状	3 190 494	4 569 600	69.82
25%大理石废粉+1.5黄原胶($M=25\%$ 、 $N=1.5\%$)	联结紧密,块状团聚体	1 263 975	4 554 865	27.76

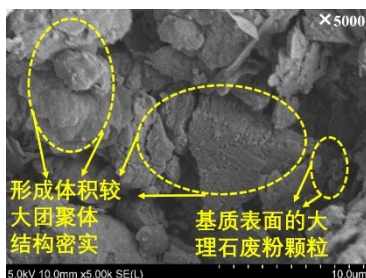
的大型团聚体,显著增强了土体结构的连续性。表 2 的孔隙率数据从定量角度印证了上述变化:复合改良后试样的平面孔隙率降至 27.76%,较单掺 25% 大理石废粉的 69.82% 显著降低,已接近素土的密实水平(25.12%)。这一微观结构的改善直接解释了宏观力学性能的提升:凝胶基质的黏结作用和桥接效应显著增强了颗粒间的联结力,从而使土体抗剪强度得到明显提高(其反应机理如图 10 所示)。



(a) 包裹作用



(b) 桥接作用



(c) 填充作用

图 13 黄原胶的微观作用机制 ($M=25\%$, $N=1.5\%$)Fig.13 Microscopic mechanisms of xanthan gum ($M=25\%$, $N=1.5\%$)

值得注意的是,黄原胶的掺入虽能显著提升强度,但也会引起自由膨胀率的轻微回升。结合微观结构分析,其原因可从两方面阐释:黄原胶作为亲水性生物聚合物,其分子链中含有大量羟基(—OH)等亲水基团,遇水时通过氢键作用吸附水分子,形成水化膜包裹于土颗粒表面,该过程本身伴随一定的体积膨胀效应;黄原胶形成的凝胶网络在填充孔隙的过程中,将水分子引入并锁闭于土体内部,导致土体吸水能力略有增强,从而引起自由膨

胀率的轻微增大。然而,由于大理石废粉的物理填充与级配优化效应已从根本上削弱了黏土矿物的膨胀潜势,黄原胶引入的额外膨胀效应被有效抑制在可控范围内。因此,在最优掺量下(1.5%),复合改良土仍能实现“膨胀可控、强度显著提升”的协同优化效果。

从改良机理层面看,大理石废粉与黄原胶的复合实现了两种材料的优势互补:大理石废粉作为惰性材料有效抑制了土体的膨胀潜势,通过物理填充与稀释效应有效抑制了土体的膨胀潜势;黄原胶则通过其胶结特性,弥补了大理石废粉导致的强度损失。二者的协同作用使膨胀土在保持较低膨胀性的同时获得了较高的抗剪强度,达到了单一改良材料难以实现的综合改良效果。

4 结论

通过试验研究了大理石废粉单掺及其与黄原胶复合改良对膨胀土工程特性的影响,确定了两种改良材料的最佳掺量,并分析了其改良机理,主要结论如下:

1) 大理石废粉能有效抑制膨胀土的膨胀特性,但会降低土体强度。随着废粉掺量增加,改良土的自由膨胀率逐步下降,当掺量达到 25% 时, $\delta_{ef} < 40\%$, 满足规范对填料膨胀率的限制要求;同时,掺量超过 25% 后,强度下降趋势趋于平缓。综合考虑膨胀控制与经济性,确定大理石废粉的最佳掺量为 $M=25\%$ 。

2) 黄原胶的掺入可显著提升改良土的抗剪强度,但会引起膨胀率一定程度增大。随着黄原胶掺量增加,改良土的黏聚力与内摩擦角均先增后减,在掺量为 1.5% 时达到峰值;此时其自由膨胀率虽略有上升($\delta_{ef}=41\%$),仍属弱膨胀土范畴,工程中可控。超过该掺量后,膨胀率急剧上升,强度亦开始下降,故黄原胶的最佳掺量为 $N=1.5\%$,并在此基础上形成 25% 大理石废粉+1.5% 黄原胶 ($M=25\%$, $N=1.5\%$) 的复合最优配比,该配比下土体膨胀性与强度表现协调,整体工程性能较优。

3) 微观结构分析表明,大理石废粉通过替代部分黏土颗粒并改善颗粒级配,削弱原有层状结构的定向排列特征,同时填充孔隙、提高结构致密度,从而在结构层面抑制土体膨胀。黄原胶吸水后形成连续凝胶网络,对土颗粒产生包裹、填充与“桥接”作用,增强颗粒间黏结与约束,使土体形成更为稳定的空间联结体系。二者共同作用下,土体内部逐步构建起“颗粒骨架-凝胶桥接”复合结构,实现体积稳定性与强度提升的协同统一。

参考文献

- [1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1984.
Liao S W. Expansive soil and railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese)
- [2] 符策岭, 曾召田, 莫红艳, 等. 石灰改良膨胀土的工程特性试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2019, 44(2): 524-533.
Fu C L, Zeng Z T, Mo H Y, et al. Experimental study on the engineering characteristics of the improved expansive soils with lime[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2019, 44(2): 524-533. (in Chinese)
- [3] Liu M L, Saberian M, Li J, et al. Evaluation of brown coal fly ash for stabilising expansive clay subgrade: a sustainable solution for pavement construction[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2024, 204: 107533.
- [4] Zhu F H, Wu Z G, Zhang Z F, et al. The geotechnical behaviour and microstructural characteristics of the alkaline residue/cement-stabilized expansive soil under wetting-drying cycles[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 2025, 58(2): qjgegh2024-016.
- [5] Gidebo F A, Kinoshita N, Yasuhara H. Optimization of physical and strength performance of cellulose-based fiber additives stabilized expansive soil[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02851.
- [6] 张艺, 李永强, 章定文, 等. 粉土改良膨胀土的路用性能与现场试验[J]. 岩土力学, 2023, 44(10): 2942-2952.
Zhang Y, Li Y Q, Zhang D W, et al. Road performance and field test of expansive soil improved by silt[J]. Rock and Soil Mechanics, 2023, 44(10): 2942-2952. (in Chinese)
- [7] 肖建章, 刘禹杉, 王迪, 等. 采用微生物技术复合改良膨胀土的工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(增刊1): 97-101.
Xiao J Z, Liu Y S, Wang D, et al. Experimental study on engineering characteristics of composite improvement of expansive soil by using microbial technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45 (Sup 1): 97-101. (in Chinese)
- [8] Mobarezi M, Nikoee E, Owji R, et al. Enzyme-induced carbonate precipitation as a novel remedy for expansive soils: assessing microfabric and swelling characteristics[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2024, 42(7): 6457-6475.
- [9] 王欢, 张佳伟, 郭合家. EICP改良膨胀土的物理力学性质试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(5): 109-116.
Wang H, Zhang J W, Guo H J. Experimental study on physical and mechanical properties of expansive soil improved by EICP[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2024, 46(5): 109-116. (in Chinese)
- [10] Xiao J Z, Shen J Y, Bai M Y, et al. Reuse of construction spoil in China: Current status and future opportunities[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 290: 125742.
- [11] Shen J Y, Xiao J Z, Li S S. Mechanism and mechanical property of recycled solidified excavated soil by cement and geopolymer[J]. Construction and Building Materials, 2025, 483: 141597.
- [12] 肖建庄, 沈剑羽, 段珍华, 等. 工程渣土资源化基础问题与低碳技术路径[J]. 科学通报, 2023, 68(21): 2722-2736.
Xiao J Z, Shen J Y, Duan Z H, et al. Basic problems and low-carbon technical path of construction spoil recycling[J]. Chinese Science Bulletin, 2023, 68(21): 2722-2736. (in Chinese)
- [13] 李丽华, 陈雪岭, 肖衡林, 等. 聚丙烯纤维加筋稻壳灰土力学性能研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(8): 154-160.
Li L H, Chen X L, Xiao H L, et al. Mechanical properties of polypropylene fiber reinforced rice husk ash solidified soil[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 53(8): 154-160. (in Chinese)
- [14] 刘晶晶, 吴东彪, 许龙, 等. 水泥-碱渣改良膨胀土干湿循环耐久性及其劣化机制试验研究[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(21): 9207-9218.
Liu J J, Wu D B, Xu L, et al. Durability and deterioration mechanisms of the cement-soda residue treated expansive soils subjected to drying-wetting cycles[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(21): 9207-9218. (in Chinese)
- [15] 吴燕开, 苗盛瑶, 李鑫, 等. 冻融循环下钢渣粉水泥改良膨胀土室内试验研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(3): 851-861.
Wu Y K, Miao S Y, Li X, et al. Experimental study on physical and mechanical properties of expansive soil improved by steel slag powder cement under freeze-thaw cycle[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(3): 851-861. (in Chinese)
- [16] 黄震, 边林林, 刘莹, 等. 牡蛎壳粉改良膨胀土的工程特性及微观机理研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(5): 1729-1739.
Huang Z, Bian L L, Liu Y, et al. Engineering characteristics and microscopic mechanism of expansive soil improved by oyster shell powder[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2023, 20(5): 1729-1739. (in Chinese)
- [17] 张俊然, 赵鑫鑫, 姜彤. 3种生物聚合物改良粉土的特

- 水特性研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2157-2164.
Zhang J R, Zhao X X, Jiang T. Water retention characteristics of silt improved by three types of biopolymer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2157-2164. (in Chinese)
- [18] Waheed A, Arshid M U, Khalid R A, et al. Soil improvement using waste marble dust for sustainable development[J]. Civil Engineering Journal, 2021, 7(9): 1594-1607.
- [19] Umar I H, Lin H. Marble powder as a soil stabilizer: an experimental investigation of the geotechnical properties and unconfined compressive strength analysis[J]. Materials, 2024, 17(5): 1208.
- [20] Saygili A. Use of waste marble dust for stabilization of clayey soil[J]. Materials Science, 2015, 21(4): 601-606.
- [21] Zhang J T, Cai D S, Wang T K, et al. Experimental analysis on the effects of artificial marble waste powder on concrete performance[J]. Annales de Chimie Science des Matériaux, 2018, 42(3): 347-362.
- [22] 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 biopolymer[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(1): 106-114. (in Chinese)
- [23] 左晨希, 孙树林, 黄曼捷, 等. 黄原胶和玄武岩纤维改良黄土抗压强度试验研究[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(1): 57-61.
Zuo C X, Sun S L, Huang M J, et al. Experimental study on loess compressive strength improvement through xanthan gum and basalt fiber[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(1): 57-61. (in Chinese)
- [24] 张胜杰, 王鸥, 王天亮, 等. 黄原胶及瓜尔胶改良尾矿砂强度特性及微观机制[J]. 工程地质学报, 2023, 31(2): 441-448.
Zhang S J, Wang O, Wang T L, et al. Strength improvement and microscopic mechanisms of tailings sands using xanthan gum and guar gum[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(2): 441-448. (in Chinese)
- [25] JTG 3430—2020 公路土工试验规程[S].
JTG 3430—2020 Test methods of soils for highway engineering[S].
- [26] Zeng Z T, Lu H B, Zhao Y L, et al. Analysis of the mineral compositions of swell-shrink clays from Guangxi Province, China[J]. Clays and Clay Minerals, 2020, 68(2): 161-174.
- [27] GB 50112—2013 膨胀土地区建筑技术规范[S].
GB 50112—2013 Technical code for building in expansive soil regions[S].
- [28] 陈熠坤, 储亚, 蔡国军, 等. 膨胀土自由膨胀率影响因素及试验机理研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(10): 2195-2203.
Chen Y K, Chu Y, Cai G J, et al. Study on influencing factors and experimental mechanism of free swelling rate of expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(10): 2195-2203. (in Chinese)
- [29] Chang I, Im J, Prasadhi A K, et al. Effects of Xanthan gum biopolymer on soil strengthening[J]. Construction and Building Materials, 2015, 74: 65-72.
- [30] Bagheri P, Gratchev I, Rybachuk M. Effects of xanthan gum biopolymer on soil mechanical properties[J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 887.

(编辑 XXX)