

张德恒,徐奋强,陈宇洋,等.生蚝壳粉改良软黏土性能试验研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2025,44(5):561-567.
DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250009
ZHANG Deheng, XU Fenqiang, CHEN Yuyang, et al. Experimental study on the performance improvement of soft clay using oyster shell powder[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2025, 44(5): 561-567. DOI: 10.11956/j. issn. 1008-0562.20250009

生蚝壳粉改良软黏土性能试验研究

张德恒¹, 徐奋强¹, 陈宇洋^{1,2*}, 任 婧¹, 陈礼谦¹, 蔡金岭¹, 周 缘¹, 陈子瞳¹

(1. 南京工程学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211167; 2. 香港城市大学 建筑与土木工程系, 香港 999077)

摘 要: 为解决石灰改良软黏土高能耗问题, 采用生蚝壳粉替代石灰, 掺量分别为0%、3%、6%、9%、12%、15%、18%和21%, 通过XRD衍射试验、液塑限试验、击实试验和抗剪强度试验, 研究生蚝壳粉对软黏土基本物理力学特性的影响及改良机理。研究结果表明: 生蚝壳粉会降低软黏土中的高岭土含量, 增大土体干密度; 随着生蚝壳粉掺量的增加, 土体的黏聚力及抗剪强度先增后减, 内摩擦角先逐渐增大后趋于稳定; 竖向压力为75 kPa, 生蚝壳粉掺量为12%时, 与纯软黏土相比, 土体的抗剪强度提高了185.3%; 建议生蚝壳粉改良软黏土的最佳掺量为12%。研究结论为生蚝壳粉改良软黏土方面的应用提供参考。

关键词: 软黏土; 生蚝壳粉; 抗剪强度特征; X射线衍射; 胶结作用

中图分类号: TU443

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2025)05-0561-07

Experimental study on the performance improvement of soft clay using oyster shell powder

ZHANG Deheng¹, XU Fenqiang¹, CHEN Yuyang^{1,2*}, REN Jing¹, CHEN Liqian¹, CAI Jinling¹, ZHOU Yuan¹, CHEN Zitong¹

(1. Department of Architecture Civil Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. Department of Architecture and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: To address the high energy consumption issue associated with lime-stabilized soft clay, oyster shell powder was used as a substitute for lime, with incorporation rates of 0, 3%, 6%, 9%, 12%, 15%, 18%, and 21%. The effects of oyster shell powder on the fundamental physical and mechanical properties of soft clay and the improvement mechanism were investigated through X-ray diffraction(XRD) diffraction tests, liquid-plastic limit tests, compaction tests, and shear strength tests. The research results indicate that oyster shell powder reduces the kaolinite content in soft clay and increases the dry density of the soil. As the incorporation rate of oyster shell powder increases, the cohesion and shear strength of the soil first increase and then decrease, while the internal friction angle gradually increases before stabilizing. Under a vertical pressure of 75 kPa and an oyster shell powder incorporation rate of 12%, the shear strength of the soil increased by 185.3% compared to pure soft clay. The optimal incorporation rate of oyster shell powder for improving soft clay is recommended to be 12%. The findings of this study can provide a reference for the application of oyster shell powder in soft clay improvement.

Keywords: soft clay; oyster shell powder(OSP); shear strength characteristics; X-ray diffraction(XRD); cementation action

0 引言

软黏土具有高含水率、高压缩性、低抗剪强

度和高灵敏度等特点^[1-2], 易引起地基不均匀沉降, 导致地基承载力下降, 建筑物出现倾斜、开裂或损坏, 不仅影响建筑物的正常使用, 还可能对人

收稿日期: 2025-01-06 修回日期: 2025-03-17 接受日期: 2025-03-27 责任编辑: 黄琦

基金项目: 国家自然科学基金项目(42402286); 江苏省产学研基金项目(FZ20240174)

作者简介: 张德恒(1981-), 男, 山东菏泽人, 博士, 高级实验师, 主要从事岩土工程方面的研究。E-mail: zdh1022@163.com

通信作者: 陈宇洋(2002-), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要从事土木工程方面的研究。E-mail: cyuyang2024@163.com

身安全构成威胁。中国软黏土主要分布在长江中下游、珠江三角洲、松花江和黑龙江流域、华北平原、海南岛地区的湿地、湖泊等,一般厚度为1~15 m,对基础设施破坏严重。目前,软土地基加固技术已较为成熟。刘汉龙等^[3]探讨了软黏土地区基础设施的沉降特性,结合工程案例分析软黏土沉降对工程安全的影响,并提出几种有效的加固措施,例如堆载预压、真空预压、高聚物注浆、微生物注浆等。刘松玉等^[4]总结了近几年涌现的地基处理新工艺、新技术,包括钢渣改良土法、电石渣改良土法、赤泥改良土法、活性MgO碳化软弱土技术以及高聚物注浆技术等。SAKR等^[5]利用蛋壳及海贝壳粉改良软黏土,提高了软黏土的抗剪强度。张德恒等^[6]采用石灰、生物质灰渣固体废物及土工合成材料改善了膨胀土的胀缩特性。NAZIR等^[7]研究发现,大理石粉尘可降低土体的湿陷系数,提高承载力。ELSIRAGY^[8]、张德恒等^[9]研究表明,大理石粉可提高膨胀土的抗剪强度。

中国沿海地区存在大量贝壳及其碎片,若长时间不进行任何处理,微生物会将附着在贝壳上的残留物质分解成NH₃、H₂S和胺等^[10],影响环境。目前,贝壳粉作为建筑材料添加剂应用较广泛。刘月丽等^[11]研究发现贝壳粉可提高再生混凝土的抗渗性及耐水性。CHEN等^[12]研究表明贝壳粉可用于改良土壤的酸碱性,使酸性土壤达到中性。JIAO等^[13]研究发现贝壳粉可提高膨胀土的强度。ZHANG等^[14]评估了贝壳粉改良土体的可行性。LAVANYA等^[15]研究了硅烷改性牡蛎壳粉在疏水性混凝土中的潜在应用。YANG等^[16]研究了生蚝壳粉对水泥基材料微观性能、宏观性能及可持续性的影响。HADJADJ等^[17]以贝壳粉作为水泥基生物材料,以花岗岩工业废料作为细骨料,研究绿色流动砂混凝土的力学性能和耐久性能。BEKKERI等^[18]利用粉煤灰、炉渣和贝壳粉制备碱激发人造黏合剂。BISANAL等^[19]研究发现海贝壳粉和沥青混合可提高土体强度。VINOD等^[20]利用贝壳粉和橡胶粉固化膨胀土,改善其胀缩性。梅萌^[21]研究了海鲜贝壳粉对沥青及沥青混合料路用性能的影响,研究表明,采用生蚝壳粉、扇贝粉替代矿粉均可提高沥青混合料的抗疲劳性能,且生蚝壳粉改良沥青混合料所得沥青胶浆的疲劳因子更小,可有效提高沥青混合料的低温抗裂性能。

《2023年中国牡蛎(蚝)行业市场调查研究及未来趋势预测报告》显示,中国生蚝产量近700万吨,且每年呈递增趋势发展。生蚝壳粉是由天然

坚硬的生蚝壳制成的粉末,主要成分为碳酸钙,可作为建筑材料的添加剂,经济性与稳定性较好,但目前对于生蚝壳粉改良软黏土地基方面的研究较少。本文在软黏土中掺入不同比例的生蚝壳粉,通过XRD衍射试验、液塑限试验、击实试验和抗剪强度试验,研究生蚝壳粉对软黏土物理性能的影响及改良机理,为生蚝壳粉在软土地基中的应用提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

软黏土取自南京河西某地区,取土深度为0.1~1.5 m,呈灰黄色,基本物理特征见表1。其天然含水率为33.5%,烧失量为8%~10%,自由膨胀率为45%,属于弱性膨胀土。软黏土矿物成分见表2。由表2可知,软黏土的主要矿物成分为高岭土、蒙脱石和伊利石。软黏土化学成分见表3。由表3可知,土体的主要化学成分为SiO₂、Al₂O₃和Fe₂O₃等。

表1 软黏土基本物理特征
Tab.1 geotechnical characteristics of soft clay

液限 /%	塑限 /%	塑性 指数/%	相对 密度	最大干密度 /(g·cm ⁻³)	最优 含水率/%
31.4	14.8	16.6	2.65	1.87	14.2

表2 软黏土矿物成分
Tab.2 mineral composition of the soft clay

矿物成分	体积分数/%
高岭土、蒙脱石、伊利石	90.98
钠长石	2.26
钾长石	2.30
石英	4.46

表3 软黏土化学成分
Tab.3 chemical composition of the soft clay

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
SiO ₂	50.00~56.00	MgO	0.05~0.10
Al ₂ O ₃	30.00~33.00	Na ₂ O	0.07~0.15
Fe ₂ O ₃	1.00~1.30	K ₂ O	0.03~0.06
TiO ₂	1.30~1.80	Cl	0~0.05
CaO	0.10~0.25		

生蚝壳取自青岛某地区,生蚝壳粉制作过程见图1。生蚝壳粉粒径不大于0.074 mm,呈灰白色,其化学组成见表4。由表4可知,生蚝壳粉主要由CaCO₃和少量其他矿物组成。



(a) 粉碎机



(b) 晾干的生蚝壳



(c) 生蚝壳粉

图1 生蚝壳粉制作过程

Fig.1 production process of OSP

表4 生蚝壳粉化学组成

Tab.4 chemical composition of OSP

成分	质量分数/%	成分	质量分数/%
CaCO ₃	97.138	SrO	0.210
MgO	0.432	P ₂ O ₅	0.101
SiO ₂	0.883	Na ₂ O	0.762
Al ₂ O ₃	0.119	SO ₃	0.355

1.2 试样制备

(1) 制备击实试验试样

软黏土烘干后,过2 mm筛。制备8种配比试样,生蚝壳粉的掺量(质量分数)分别为0、3%、6%、9%、12%、15%、18%和21%,每种配比试样均设置5组含水率,分别为5%、10%、15%、20%和25%,共40个试样,置于干燥瓶内,养护48 h。

(2) 制备抗剪强度试验试样

设置含水率为软黏土的液限含水率(31.4%),制备8种配比试样,生蚝壳粉的掺量(质量分数)分别为0、3%、6%、9%、12%、15%、18%和21%。为缩短固结时间,将试样放入重塑圆柱筒内,并在圆柱筒一端加砝码进行增压,密封保存,直至达到所需的软黏土状态。制备的抗剪强度试验试样见图2。其中,三轴压缩试样的直径为3.5 cm,高为7.0 cm;直接剪切试样的直径为6.18 cm,高为2.0 cm。软黏土、生蚝壳粉和含水率之间的关系式为

$$x(1+a)+xb=W,$$

式中: x 为风干软黏土的质量,kg; a 为软黏土的液限含水率; b 为生蚝壳粉占土样的百分比; W 为混合物总质量,kg。



(a) 三轴压缩试样



(b) 直接剪切试样

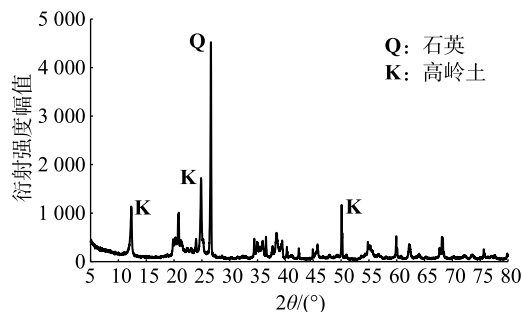
图2 抗剪强度试验试样

Fig.2 shear strength test specimens

2 试验结果与讨论

2.1 XRD衍射试验

生蚝壳粉及软黏土的XRD衍射图谱见图3,其中, θ 为入射角。由图3(a)可以看出,软黏土的主要矿物成分为高岭土,质量分数为69.3%,另含石英等其他少量矿物,质量分数为30.7%。由图3(b)可以看出,生蚝壳粉的主要矿物成分为CaCO₃,质量分数为96.2%。对比图3(a)和图3(c)可以看出,与纯软黏土相比,向软黏土中掺加12%的生蚝壳粉后,在 $2\theta=13.12^\circ$ 处,高岭土的衍射强度幅值从1 139降至501,降幅较大。由图3(d)可以看出,生蚝壳粉掺量为21%时,在 $2\theta=13.12^\circ$ 处,高岭土的衍射强度幅值降至451,表明随着生蚝壳粉掺量的增加,高岭土的含量逐渐减少。这是由于生蚝壳粉中的Ca²⁺可与高岭土中的Al³⁺进行交换,发生火山灰反应^[5],生成新的胶结化合物,例如铝硅酸盐氢氧化物、硫铝矿和水泥石等,这些新生成的胶结化合物可填充孔隙,增大颗粒之间的凝聚力。



(a) 软黏土

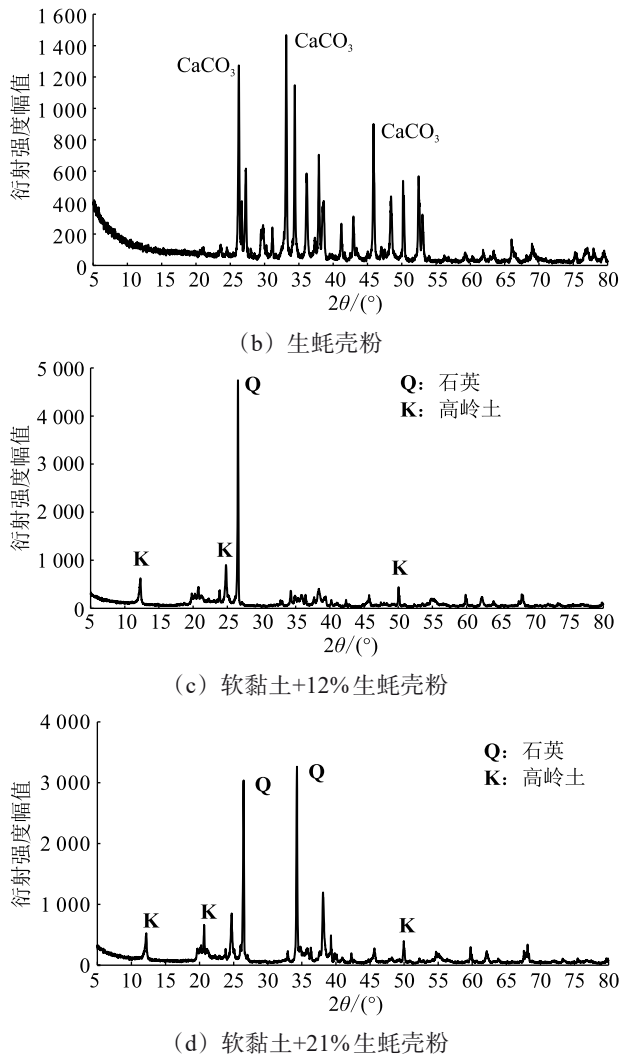


图3 生蚝壳粉及软黏土的XRD衍射图谱

Fig.3 XRD patterns of OSP and soft clay

2.2 液塑限试验

依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[22](以下简称《规程》)开展液塑限试验,研究生蚝壳粉对软黏土液塑限指标的影响,初步评价土体特征。生蚝壳粉对软黏土液限、塑限及塑性指数的影响见图4。由图4可知,随着生蚝壳粉掺量的增加,液限、塑性指数均逐渐减小,塑限逐渐增大。与纯软黏土(生蚝壳粉掺量为0)相比,生蚝壳粉掺量为21%时,土体液限减小了20%,塑限增大了40%,塑性指数减小了75%。这是由于与软黏土相比,生蚝壳粉吸水性较差,掺入生蚝壳粉会置换部分高岭土颗粒,黏土颗粒的含量降低,自由水含量减少,土体的塑性指数逐渐减小,可塑性范围缩小。

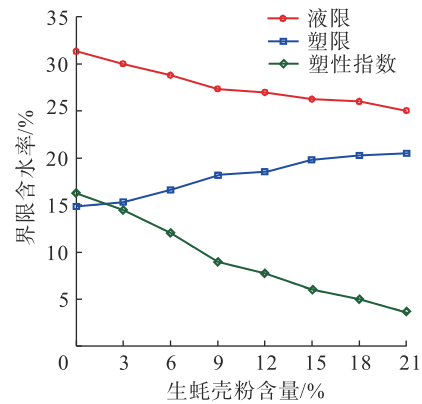


图4 生蚝壳粉对软黏土液限、塑限及塑性指数的影响

Fig.4 effect of OSP on liquid limit, plastic limit and plastic limit index of soft clay

2.3 击实试验

依据《规程》开展击实试验,研究生蚝壳粉对软黏土干密度和含水率的影响。生蚝壳粉对软黏土干密度的影响见图5。由图5可知,随着含水率的增大,土体的干密度均呈先增大后减小的变化趋势。生蚝壳粉掺量为12%时,土体的最大干密度为1.92 g/cm³,与纯软黏土相比,最大干密度增大了2.7%。这是由于生蚝壳粉与软黏土中的高岭土发生化学反应,新生成的化合物填充土体孔隙,提高了土体的密实度。

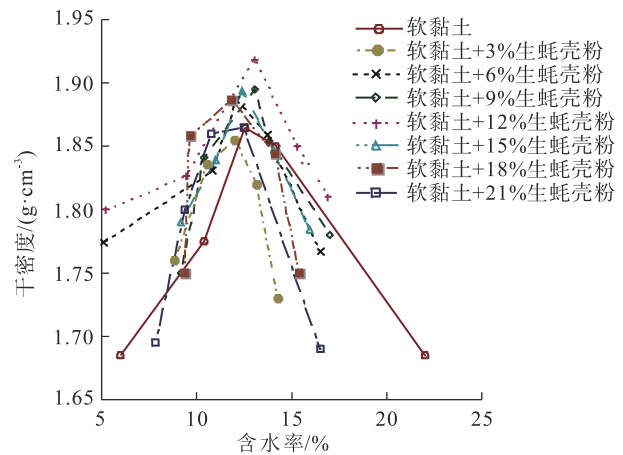


图5 生蚝壳粉对土体干密度的影响

Fig.5 effect of OSP on dry density of soil

生蚝壳粉对土体最优含水率与最大干密度的影响见图6。可以看出,随着生蚝壳粉掺量的增加,最优含水率呈先增后减的变化趋势。生蚝壳粉掺量为21%时,最优含水率降至11.9%,与纯软黏土相比,最优含水率减小了16.1%。这是因为生蚝壳粉吸水性较差,且可以填充黏土中的颗粒孔

隙,使得土体达到最大干密度时所需的水分减少。随着生蚝壳粉掺量的增加,土体的最大干密度也呈先增后减的变化趋势。生蚝壳粉掺量为12%时,土体的最大干密度最大。生蚝壳粉掺量超过12%后,过量的粗粒径生蚝壳粉会形成骨架结构,黏性颗粒无法充分填充孔隙,导致土体的最大干密度逐渐减小。

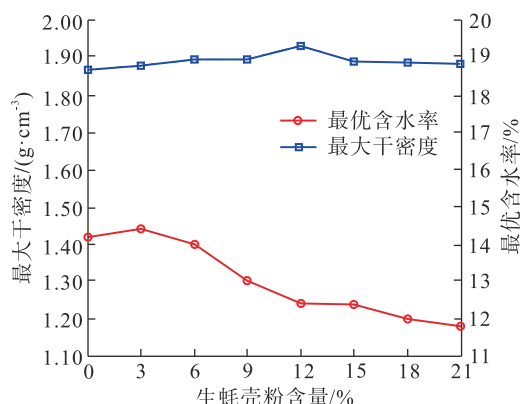
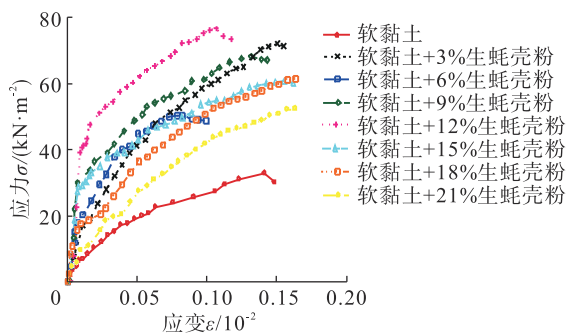


图6 生蚝壳粉对土体最优含水率与最大干密度的影响

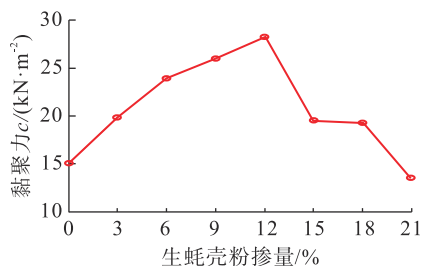
Fig.6 effect of OSP on the optimal water content and maximum dry density of soil

2.4 抗剪强度试验

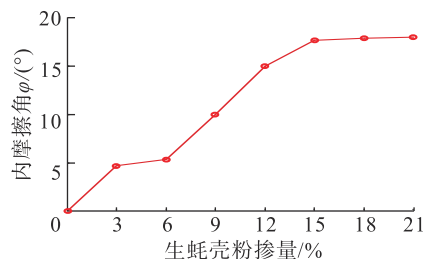
设置围压为50 kPa,依据《规程》开展抗剪强度试验(三轴压缩试验、直接剪切试验)。生蚝壳粉掺量对土体性能的影响见图7。其中,图7(a)~图7(c)为三轴压缩试验结果,图7(d)为直接剪切试验结果。



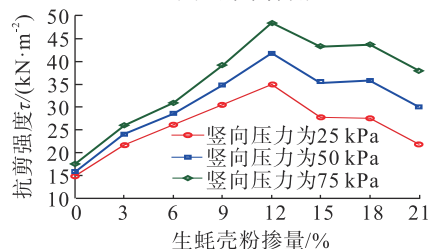
(a) 应力-应变



(b) 黏聚力



(c) 内摩擦角



(d) 抗剪强度

图7 生蚝壳粉掺量对土体性能的影响

Fig.7 effect of OSP content on the properties of soft clay

由图7(a)可知,生蚝壳粉掺量不大于12%时,应变相同的情况下,随着生蚝壳粉掺量的增加,土体应力有增大的趋势;生蚝壳粉掺量超过12%时,随着生蚝壳粉掺量的增加,土体应力减小。由图7(b)可知,随着生蚝壳粉掺量的增加,土体的黏聚力先增后减。生蚝壳粉掺量为12%时,土体的黏聚力达到最大值,与未掺加生蚝壳粉相比,黏聚力增大了90%。这是由于生蚝壳粉中的碳酸钙可与黏土相互作用,形成胶凝化合物,提高了土体的黏结力。生蚝壳粉掺量过大(>12%)时,生蚝壳粉大量占据土体内部孔隙,会削弱土体与胶凝化合物之间的黏结力。由图7(c)可知,随着生蚝壳粉掺量的增加,土体内摩擦角先增大后趋于稳定,生蚝壳粉掺量为21%时,土体的内摩擦角为18°,与液限状态下的纯软黏土相比,内摩擦角显著增大。产生这种现象可能有以下两方面原因:一是生蚝壳粉与软黏土中的高岭土进行离子交换生成了新的胶结物,胶结物的絮凝结构可增大土体的摩擦力;二是生蚝壳粉颗粒增大了土体剪切面的摩擦力。由图7(d)可知,不同竖向压力下,土体的抗剪强度均随生蚝壳粉掺量的增加先增后减。竖向压力相同的条件下,生蚝壳粉掺量为12%时,土体的抗剪强度最大。竖向压力为75 kPa,生蚝壳粉掺量为12%时,与纯软黏土相比,抗剪强度提高了185.3%。若要提高软黏土的抗剪强度,建议生蚝壳粉的最佳掺量为12%。

2.5 对比分析

为验证生蚝壳粉对软黏土的改良效果,将本文试验结果与文献[23]~文献[30]中的试验结果进行对比分析。引入抗剪强度改善因子 $F(X)$,即

$$F(X)=A/B,$$

式中, A 、 B 分别为改良后、改良前软黏土的抗剪强度。

抗剪强度改善因子对比见图8。由图8可知,与文献[23]~文献[30]相比,本文的改善因子最大,对土体抗剪强度的提升最显著。产生这种差异可能有以下两方面原因:一是所用软黏土的矿物组成、化学成分和性质有所不同;二是本文所用的生蚝壳粉与其他文献中所用的贝壳粉特性存在差异。

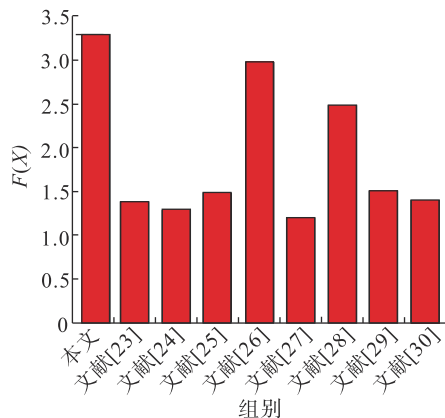


图8 抗剪强度改善因子对比

Fig.8 comparison of shear strength improvement factors

2.6 强度特征与养护时间的关系

竖向压力为25 kPa,不同养护时间下,生蚝壳粉对土体抗剪强度的影响见图9。

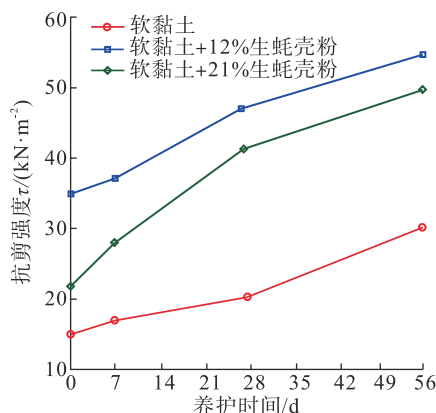


图9 生蚝壳粉对土体抗剪强度的影响

Fig.9 effect of OSP on shear strength of soil

由图9可知,随着养护时间的延长,土体的抗剪强度逐渐增大。在未养护的情况下,与纯软黏土相比,掺入12%、21%的生蚝壳粉后,土体的抗

剪强度分别增大了133.3%、45.5%,表明掺入生蚝壳粉可增大黏土颗粒的黏结性,提高土体的抗剪强度,但掺量过多,不利于软黏土固化。养护时间小于等于28 d时,纯软黏土的抗剪强度缓慢增大,养护时间超过28 d后,由于软黏土发生触变现象^[31],即软黏土颗粒通过吸附水膜重新连接,形成新的结构,纯软黏土的抗剪强度增幅较大。与纯软黏土相比,生蚝壳粉掺量为12%,养护时间为7 d、28 d、56 d时,土体的抗剪强度分别提高了118.6%、134.7%和81.4%;生蚝壳粉掺量为21%,养护时间为7 d、28 d、56 d时,土体的抗剪强度分别提高了63.62%、96.54%和64.84%。养护时间小于等于28 d时,掺入生蚝壳粉的改良土的抗剪强度增幅较大,养护时间超过28 d后,由于生蚝壳粉与软黏土之间的离子交换逐渐达到平衡状态,火山灰反应减弱,土体的抗剪强度增幅较小。整体来看,生蚝壳粉掺量为12%时,对土体抗剪强度的改良效果较好。

3 结论

本文通过XRD衍射试验、液塑限试验、击实试验和抗剪强度试验,研究生蚝壳粉对软黏土物理特性的影响以及改良机理,得到如下结论。

(1) 在软黏土中掺入生蚝壳粉,可降低软黏土中高岭土的含量,生成新的胶结化合物,例如硅酸盐、铝酸盐、水泥石等,填充颗粒之间的孔隙,增大凝聚力,提高土体密实度。生蚝壳粉掺量为12%时,土体的干密度最大。

(2) 随着生蚝壳粉掺量的增加,软黏土的最优含水率、黏聚力及抗剪强度均呈先增后减的变化趋势,内摩擦角先逐渐增大后趋于稳定。竖向压力为75 kPa,生蚝壳粉掺量为12%时,土体的黏聚力和抗剪强度最大。

(3) 随着养护时间的延长,土体的抗剪强度逐渐增大。适量掺入生蚝壳粉可增大软黏土颗粒的黏结性,提高土体的抗剪强度,但若生蚝壳粉掺量过多,会影响软黏土固结。生蚝壳粉掺量为12%时,对土体的改良效果较好。

(4) 生蚝壳粉是一种经济有效的改性添加剂,可用于改善软黏土的性能,实现固废利用,减少对环境的污染。

参考文献(References):

- [1] 才昊,叶冠林,兰立信,等.软黏土取样扰动机理、评估方法及控制措施研究进展[J].岩土工程学报,2025,47(2):225-233.

- CAI Hao, YE Guanlin, LAN Lixin, et al. Research progress on disturbance mechanisms, evaluation methods and control measures for sampling of soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(2): 225-233.
- [2] 刘松玉. 公路地基处理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2001: 211-220.
- [3] 刘汉龙, 赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(1): 96-115.
- LIU Hanlong, ZHAO Minghua. Review of ground improvement technical and its application in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(1): 96-115.
- [4] 刘松玉, 周建, 章定文, 等. 地基处理技术进展[J]. 土木工程学报, 2020, 53(4): 93-110.
- LIU Songyu, ZHOU Jian, ZHANG Dingwen, et al. State of the art of the ground improvement technology in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(4): 93-110.
- [5] SAKR M A, NAZIR A K, AZZAM W R, et al. Improving the soft clay using seashell and eggshell for road construction[J]. Journal of Engineering Research, 2022, 6(2): 70-75.
- [6] 张德恒, 孙树林. 石灰-生物质灰渣改良膨胀土强度变形及微观结构特征[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2018, 37(4): 726-731.
- ZHANG Deheng, SUN Shulin. Strength deformation and microstructure characteristics of lime-biomass ash treated expansive soils[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2018, 37(4): 726-731.
- [7] NAZIR A, EL SAWWAF M, AZZAM W, et al. Utilization of marble dust for improving the geotechnical characteristics of collapsible soil [J]. Journal of Geological Research, 2020, 2(4): 36-45.
- [8] ELSIRAGY M N. Geotechnical behaviour of reinforced soft clay by marble dust as a waste material[J]. Journal of Engineering Research, 2021, 5(3): 1-7.
- [9] 张德恒, 孙树林, 徐奋强, 等. 秸秆灰渣-大理石灰改良膨胀土试验[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(2): 193-197.
- ZHANG Deheng, SUN Shulin, XU Fenqiang, et al. Experiment improvement of expansive soil with straw ash-marble dust[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014, 33(2): 193-197.
- [10] YOON G L, KIM B T, KIM B O, et al. Chemical-mechanical characteristics of crushed oyster-shell[J]. Waste Management, 2003, 23(9): 825-834.
- [11] 刘月丽, 李永靖. 掺贝壳粉再生混凝土抗渗及耐水性能试验研究[J]. 公路交通科技, 2020, 16(1): 13-15, 18.
- LIU Yueli, LI Yongjing. Experimental study on impermeability and water resistance of recycled concrete mixed with shell powder[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2020, 16(1): 13-15, 18.
- [12] CHEN S, WANG Y J, HE X Y, et al. Mechanically activated shell powder modified asphalt and its aging resistance enhancement[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e04023.
- [13] JIAO W C, ZHOU W Z, HUANG Z, et al. Study on static and dynamic mechanical behavior of expansive soil modified by oyster shell powder[J]. Heliyon, 2024, 10(8): e29699.
- [14] ZHANG Z C, OMINE K, LI C, et al. Improvement effects of treating with calcined oyster shell and carbonized cow dung compost on clay with high water content[J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: e01654.
- [15] LAVANYA M R, JOHNPAL V, BALASUNDARAM N, et al. Potential use of silane-modified oyster shell powder in hydrophobic concrete[J]. Materials Research Express, 2024, 11: 055508.
- [16] YANG B, HAN Y, KONG Z Y, et al. Effect of waste oyster shell powder on the micro-and macroproperties and sustainable performance of cement-based materials[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 92(9): 109800.
- [17] HADJADJ M, GUENDOZ M, BOUKHELKHAL D. The effect of using seashells as cementitious bio-material and granite industrial waste as fine aggregate on mechanical and durability properties of green flowable sand concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 87: 108968.
- [18] BEKKERI G B, SHETTY K K, NAYAK G. Producing of alkali-activated artificial aggregates by pelletization of fly ash, slag, and seashell powder[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2023, 8(10): 258.
- [19] BISANAL M G, BADIGER R. Study on stabilization of soil using sea shell and bitumen emulsion[J]. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, 2015, 4(7): 5875-5882.
- [20] VINOD B R, SHOBHA R, RAGHAVENDRA A B, et al. Stabilization on expansive soil using sea shell powder and rubber powder[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 814(1): 012028.
- [21] 梅萌. 海鲜贝壳粉对沥青及沥青混合料路用性能的影响研究[D]. 武汉: 武汉工程大学, 2023: 19-44.
- [22] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2021: 76-83, 122-127, 180, 192-198.
- [23] PATEL A, MISHRA C B. Performance of seashell powder on sub-grade soil stabilization[C]//Kalpa Publications in Civil Engineering. EasyChair, 2017: 150-142.
- [24] TAMANG P, GURUNG S, BASNETT R, et al. Improvisation of bearing capacity of soil using cement, lime and chemical[J]. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2016, 33(8): 392-398.
- [25] PREETHAM H K, NAYAK S, SURYA E V. Experimental investigation on the stabilization of soft clay using granulated blast furnace slag[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 561: 012047.
- [26] AHMED M D, ADKEL A M. Stabilization of clay soil using tyre ash[J]. Journal of Engineering, 2023, 23(6): 34-51.
- [27] YOGESHKUMARI M M. A study on the behaviour of clay with egg shell powder[J]. International Journal of Recent Trends in Engineering & Research, 2016, 2(10): 61-65.
- [28] MUTHU K M, TAMILARASAN V S. Effect of eggshell powder in the index and engineering properties of soil[J]. International Journal of Engineering Trends and Technology, 2014, 11(7): 319-321.
- [29] SAHU G, SINGH A, KUMAR I, et al. Studies on improvement of shear strength of sandy soil using egg shell powder and quarry dust[J]. International Journal of Engineering Research & Technology, 2017, 6(5): 440-443.
- [30] ALRYBAYE A J, HASAN M, FATTAH M Y. Engineering properties of clayey soil stabilized with lime[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2016, 11(4): 2434-2441.
- [31] 杨爱武, 杨少朋, 张静, 等. 天津软黏土触变特性研究[J]. 工程地质学报, 2023, 31(5): 1528-1534.
- YANG Aiwu, YANG Shaopeng, ZHANG Jing, et al. Study on thixotropic properties of Tianjin soft clay[J]. Journal of Engineering Geology, 2023, 31(5): 1528-1534.