

文章编号:1007-9629(2025)06-0565-08

二灰改良黄河下游沉积泥沙的路用性能

于姝慧¹, 刘燕¹, 张树明¹, 周祥^{2,*}, 杨帆³

(1. 济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250022; 2. 中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211899; 3. 济南鼎汇土木工程技术有限公司, 山东 济南 250002)

摘要:为探索黄河下游沉积泥沙在路基工程中的应用,以石灰和粉煤灰对其进行改良,同时结合回弹模量测试、直剪试验和极限承载力计算,对二灰改良黄河泥沙的路用性能进行分析。结果表明:当粉煤灰掺量大于40%时,无论石灰掺量数值如何,二灰改良黄河泥沙的回弹模量符合规范JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》要求,但抗剪强度指标提升效果有限;当石灰掺量大于4%时,二灰改良黄河泥沙较石灰掺量小于4%时的回弹模量显著提高,但抗剪强度指标改善有所减缓。综合考量极限承载力、时效性及成本效益,最终确定4%石灰+40%粉煤灰的掺量及7d养护龄期为黄河泥沙的最佳改良方案。

关键词:路基工程;无机料改良;黄河泥沙;极限承载力;微观结构

中图分类号:TU441⁺.5

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.06.010

Road Performance of Lime-Fly Ash Stabilized Sedimentary Silt in the Lower Reaches of the Yellow River

YU Shuhui¹, LIU Yan¹, ZHANG Shuming¹, ZHOU Xiang^{2,*}, YANG Fan³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. China Railway 14th Bureau Group Shield Engineering Co., Ltd., Nanjing 211899, China;

3. Jinan Dinghui Civil Engineering Technology Co., Ltd., Jinan 250002, China)

Abstract: To explore the application of sediment silt in the lower reaches of the Yellow River in roadbase engineering, lime and fly ash were used to improve its properties. Resilient modulus test, direct shear test, and ultimate bearing capacity calculation were conducted to analyze the road performance of the sediment modified by these two materials. The results show that when the fly ash blending ratio exceeds 40%, regardless of the lime content value, the resilient modulus of binary ash improved Yellow River sedimentary silt meets the control requirements of specification JTG 3441—2024 *Test Procedures for Stabilized Materials with Inorganic Binders in Highway Engineering*, but the effect on improving the anti-shear strength index is limited. However, when the lime content exceeds 4%, the resilient modulus of the two-material-modified Yellow River sediment silt significantly increases compared to when the lime content is less than 4%, although the improvement in shear strength indices slows down. Considering ultimate bearing capacity, time-effectiveness, and cost-benefit analysis, the optimal improvement scheme for Yellow River sediment silt is determined to be a combination of 4% lime and 40% fly ash with a curing age of 7 days.

Key words: roadbed engineering; inorganic material improvement; Yellow River sediment silt; ultimate bearing capacity; microstructure

收稿日期:2024-07-27;修订日期:2024-11-06

基金项目:山东省自然科学基金资助项目(ZR2022ME042);山东省高等学校青创科技支持计划(TJY2303);济南大学博士基金资助项目(XBS2469);山东省住房城乡建设科技计划项目(2024KYKF-XCJ017)

第一作者:于姝慧(1999—),女,山东德州人,济南大学硕士生。E-mail:yushuhui11924@163.com

通讯作者:周祥(1991—),男,山东济宁人,中铁十四局集团大盾构工程有限公司高级工程师,学士。E-mail:905915057@qq.com

中国黄河含沙量为 35 kg/m^3 , 年平均输沙量达 16 亿 t, 约有 4 亿 t 淤积在下游河道^[1-2]。泥沙淤积对引黄灌区运行、排水河道、耕地面积和生态环境均带来严峻挑战。当前治理策略主要包括将黄河淤积泥沙用于建筑用沙^[3]、砖陶制品^[4]、采煤沉陷地复垦^[5]、土壤改良^[6]及填海造陆^[7]等领域。

相较于普通泥沙, 黄河泥沙因其颗粒级配不佳、黏聚力与可塑性弱、细度模数低、强度分布不均, 以及稳定性差等, 不宜直接作为公路路基层填筑材料^[8]。当前, 针对黄河泥沙特性的改良研究聚焦于探索多样化的活化方法及其机制^[1,9-10], 以及微生物与酶诱导下 CaCO_3 沉积(EICP)的固化技术^[11-13]。研究包括: 基于黄河泥沙的活性指数与抗压强度等指标, 评估并分析 CaCl_2 以及 CaCl_2 与水玻璃复合激发剂的活化效果与机理; 运用微生物诱导碳酸盐沉积技术实现黄河泥沙的定量固化; 采用 EICP 技术对黄河泥沙进行固化处理等。

二灰改良技术是一种利用废弃物粉煤灰、石灰与泥沙混合作为地基回填土的创新方法, 其优势在于成本低廉、环境友好及后期强度显著提升^[14-16]。然而, 针对黄河下游泥沙的二灰改良研究尚显稀缺。考虑到黄河下游济南段蕴藏丰富的淤积泥沙资源,

将这些泥沙改良后用作济南新旧动能转换起步区的路基填料, 是实施“双碳”战略与“黄河流域生态保护和高质量发展”国家战略的关键行动之一。鉴于此, 本研究通过回弹模量 E 测试、直剪试验及扫描电子显微镜(SEM)分析, 对二灰改良黄河下游沉积泥沙(以下简称二灰改良黄河泥沙)进行系统评估, 并结合改良土的极限承载力 P_u , 确定了二灰改良黄河泥沙的最佳配比。本研究旨在为黄河泥沙的改良与资源化利用提供科学依据与参考。

1 试验

1.1 试验材料

试验用沙取自黄河下游济南段河漫滩地表以下约 2 m 深度处。干燥态泥沙呈褐色散沙状, 颗粒间黏结较弱, 易被风吹动或水流冲刷; 湿润态泥沙为黏稠且分布不均的浆体, 含水量较高, 颗粒之间具有较强的黏结力, 具有一定可塑性。依据 JTG 3430—2020《公路土工试验规程》对黄河泥沙开展土工试验, 其物理性质如表 1 所示。X 射线衍射(XRD)分析显示, 黄河沉积泥沙的主要矿物成分包括石英(SiO_2)、钙长石($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)、钠长石($\text{Na(AlSi}_3\text{O}_8)$)、方解石(CaCO_3)和高岭石($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)。

表 1 黄河泥沙的物理性质

Table 1 Physical properties of the Yellow River sedimentary silt

Natural density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Maximum dry density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	Natural moisture content(by mass)/%	Optimum moisture content(by mass)/%	Liquid limit (by mass)/%	Plastic limit (by mass)/%
1.96	1.60	21.3	13.8	27	7

黄河泥沙的颗粒级配累积曲线如图 1 所示。由图 1 可见, 黄河泥沙颗粒粒径主要集中在 $0.10\sim 0.25 \text{ mm}$, 占比为 86.6%(质量分数, 文中涉及的占比、含水率等均为质量分数)。其有效粒径 d_{10} 为 0.093 mm 、 d_{30} 为 0.122 mm , 限制粒径 d_{60} 为 0.167 mm 。该泥沙的不均匀系数 C_u 为 1.795, 曲率系数 C_c 为 0.951, 属于级配不良细沙, 无法直接应用于路基结构中。

1.2 试验配比设计

在二灰改良方案中, 设定以下变量: 黄河泥沙质量 m_0 , 石灰质量 m_1 , 粉煤灰质量 m_2 , 二灰改良混合料总质量为 $m_0+m_1+m_2$ 。本试验设计了 3 种石灰掺量 μ (以混合料总质量计, 下同), 分别为 0%、4% 和 8%; 同时, 设计了 5 种粉煤灰掺量 λ , 分别为 0%、20%、40%、60% 和 80%。

1.3 试验方案

1.3.1 回弹模量测试

采用静压法制成尺寸为 $\phi 100\times 127 \text{ mm}$ 的标准

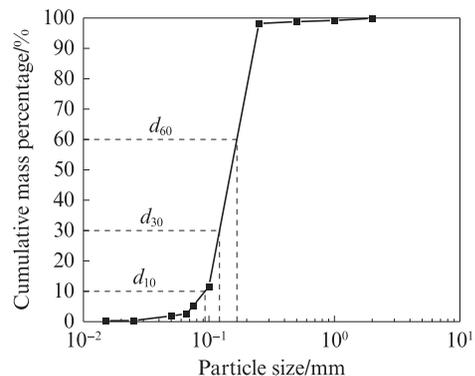


图 1 黄河泥沙的颗粒级配累积曲线

Fig. 1 Particle size distribution cumulative curve of the Yellow River sedimentary silt

圆柱体试件, 并采用承载板法对二灰改良黄河泥沙试件进行回弹模量测试。依据 JTG 3441—2024《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》, 试验前先将试件置于标准养护室内养护 7 d, 再置于水中浸泡 24 h。试验仪器采用杠杆压力仪, 将试件与试筒底面

置于杠杆压力仪底座上,采用4级等压加载方式,每级加载时间为1 min。

1.3.2 直剪试验

采用直剪仪测定二灰改良黄河泥沙试件的抗剪强度指标(黏聚力 c 和内摩擦角 φ),剪切速率设定为0.8 mm/min,正压力分别为100、200、400 kPa。本试验依据二灰掺量改良黄河泥沙重型击实试验数据和JTG D30—2015《公路路基设计规范》中的规定——基床底层压实系数为94%,将直剪试件的最大干密度统一为1.57 g/cm³,含水率 ω 统一为14%。45组直剪试验分3种条件执行:第1种是在击实操作完成后即刻进行,即无养护期(养护0 d);第2种在击实后养护7 d再进行;第3种在击实后养护28 d进行。

2 结果与分析

2.1 回弹模量

回弹模量可反映路基在交通荷载下的应力-应变关系,其对于路面结构设计和路基材料性能评估具有重要意义。4种等级荷载(中等/轻、重、特重和极重)条件下,不同含水率黄河泥沙重塑土的回弹模量见图2。由图2可见,黄河泥沙重塑土在最优含水率14%条件下的回弹模量为43.78 MPa,仅能满足中等/轻等级荷载的回弹模量要求,对于重、特重和极重这3种等级的荷载均无法满足。另外,实际工程中也无法实时满足黄河泥沙的含水率一直处于最优状态,故有必要对其进行改良。

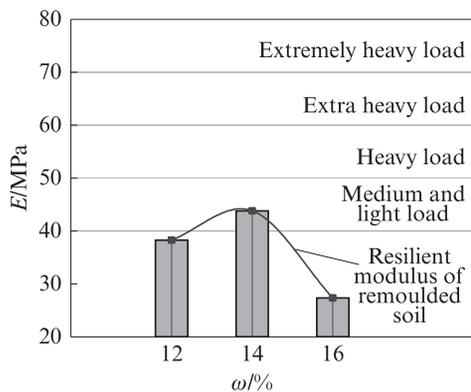


图2 不同含水率黄河泥沙重塑土的回弹模量
Fig. 2 Resilient modulus of remolded soil from the Yellow River sedimentary silt with different moisture contents

二灰改良黄河泥沙回弹模量随二灰掺量的变化如图3所示。由图3可见:(1)二灰改良黄河泥沙的回弹模量随着石灰掺量的增加呈先快速增大后趋于稳定的变化规律,当石灰掺量由0%增加至4%时,二灰黄河改良泥沙的回弹模量增长速率显著高于 μ

由4%增加至8%时。(2)当粉煤灰掺量达到或超过40%时,无论石灰掺量的数值如何,二灰改良黄河泥沙的回弹模量均大于70 MPa,从而满足极重荷载对路基填料回弹模量的标准;然而当粉煤灰掺量仅为20%时,石灰掺量必须高于4%,才能使二灰改良黄河泥沙的回弹模量达到70 MPa以上。

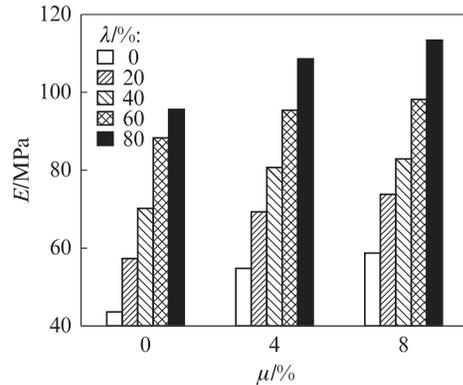


图3 二灰改良黄河泥沙的回弹模量随二灰掺量的变化
Fig. 3 Variation of resilient modulus of lime-fly ash stabilized Yellow River sedimentary silts with lime-fly ash content

2.2 直剪试验

直剪试验每组3个试件,每组试件的正应力与剪应力均符合库仑公式。需要说明的是,由于养护7 d时,已有部分改良黄河泥沙达到公路路基层的承载力设计值,且能够满足公路路基设计规范,考虑到现场施工的时效性,本试验只分析各试件养护7 d时的抗剪强度指标。养护7 d时二灰改良黄河泥沙抗剪强度指标随二灰掺量的变化如图4所示。

由图4可见:(1)当石灰掺量由0%增加至4%时,二灰改良黄河泥沙的黏聚力和内摩擦角均表现出显著增长;而当石灰掺量由4%增加至8%时,二灰改良黄河泥沙的抗剪强度指标增幅较小。这表明,石灰掺量的增加能够提高二灰改良黄河泥沙的抗剪强度,4%是经济有效的石灰掺量。(2)二灰改良黄河泥沙的黏聚力随着粉煤灰掺量的增加而增大;二灰改良黄河泥沙的内摩擦角随着粉煤灰掺量的增加先增后减,当粉煤灰掺量为60%时达到最大。该现象可能归因于粉煤灰中的生石灰在早期阶段消耗了大量水分,致使粉煤灰在后期的作用变得不显著^[17-18]。随着粉煤灰掺量的增加,多余的粉煤灰一部分用于填充孔隙,另一部分则附着在土壤颗粒表面,其细密特性对土壤颗粒产生了润滑效应。

不同养护龄期 t 下二灰改良黄河泥沙抗剪强度指标随二灰掺量的变化如图5所示。

由图5可见:(1)当粉煤灰掺量未达到40%时,

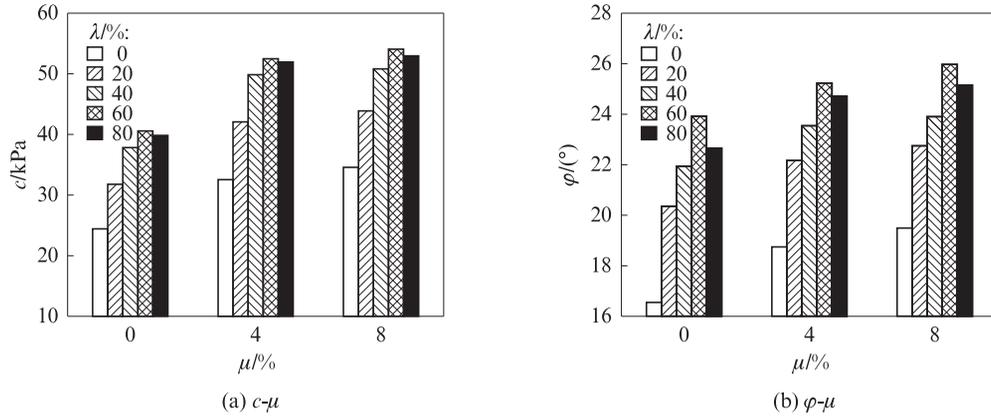


图4 养护7 d时二灰改良黄河泥沙抗剪强度指标随二灰掺量的变化

Fig. 4 Variation of shear strength indexes of lime-fly ash stabilized Yellow River sedimentary silts with lime-fly ash content at 7 d of curing

二灰改良黄河泥沙的黏聚力随着粉煤灰掺量的增加而快速增大;当粉煤灰掺量为40%~80%时,二灰改良黄河泥沙的黏聚力趋于稳定。(2)当粉煤灰掺量小于60%时,二灰改良黄河泥沙的内摩擦角的增长趋势表现出先增大后降低的规律,与图4(b)具有一致性。

由图5还可见:在石灰和粉煤灰掺量不变的条件

下,二灰改良黄河泥沙的黏聚力和内摩擦角均随养护龄期的延长呈显著增大的特性;在养护龄期和粉煤灰掺量相同的条件下,当石灰掺量由4%增加至8%时,二灰改良黄河泥沙的抗剪强度指标只有较小幅度的增大。这表明,相比石灰掺量,养护龄期和粉煤灰掺量对二灰改良黄河泥沙黏聚力和内摩擦角的影响作用更大。

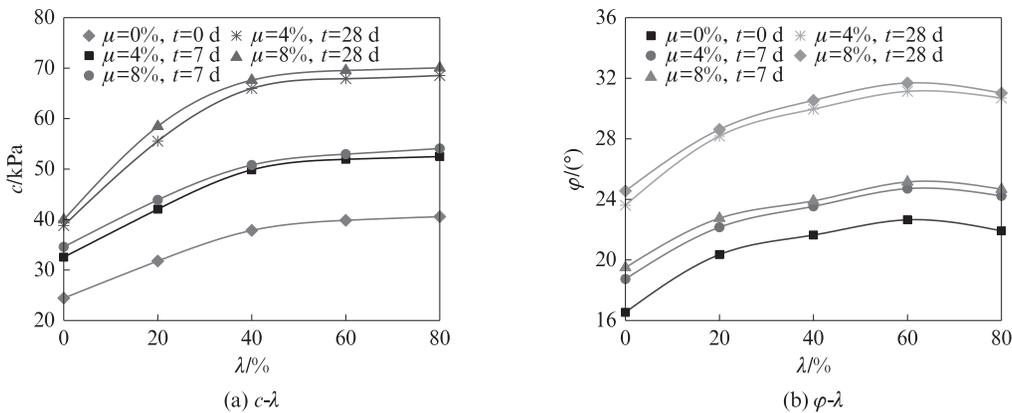


图5 不同养护龄期下二灰改良黄河泥沙抗剪强度指标随二灰掺量的变化

Fig. 5 Variation of shear strength indexes of lime-fly ash stabilized Yellow River sedimentary silts with lime-fly ash content under different curing ages

3 路基极限承载力分析

在路基填筑实践中,分层填筑法通常被作为主要的施工方法。此过程中,填筑材料的运输依赖于载重汽车,进而要求路基必须具备一定的承载力,以满足载重汽车的作业需求。鉴于现场路基试验段测定承载力所需的人力物力成本较高,本研究采取了一种更为经济的方法,即结合室内直剪试验结果,并依据太沙基极限承载力模型^[19],针对二灰改良黄河泥沙路基进行了极限承载力的计算分析。根据CJJ 37—2012《城市道路工程设计规范》的相关规定,路

基的容许承载力应达到或超过700 kPa。本研究选取安全系数3应用于太沙基极限承载力计算模型中^[19],据此,基于该模型计算得出的路基极限承载力不低于2 100 kPa。

3.1 二灰掺量对极限承载力的影响

养护7 d时二灰改良黄河泥沙路基极限承载力随二灰掺量的变化如图6所示。

由图6可见:(1)二灰改良黄河泥沙路基的极限承载力随石灰掺量的增加而显著增大,具体表现为:在石灰掺量由0%增至4%时,增长速率相对平缓;而当掺量从4%提升至8%时,增长速率明显加快。

(2)当粉煤灰掺量为40%时,石灰掺量为4%和8%的二灰改良黄河泥沙路基极限承载力分别为2 195.55、3 073.62 kPa,相比未掺石灰的黄河泥沙路基极限承载力分别增大32.3%和85.2%。(3)当石灰掺量达到或超过4%,且粉煤灰掺量不小于40%时,二灰改良黄河泥沙路基的极限承载力大于2 100 kPa,其他工况则均无法满足2 100 kPa的要求。

由图6还可见:3种石灰掺量条件下,二灰改良黄河泥沙路基的极限承载力均随着粉煤灰掺量的增加呈先增后降趋势,当粉煤灰掺量为60%时,路基的极限承载力达到最大。这是因为养护7 d后,石灰充分发生了消解和胶凝反应,粉煤灰中的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 与石灰中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应,使得改良黄河泥沙强度进一步提升;而当粉煤灰掺量较大时,二灰改良黄河泥沙的内摩擦角减小(图5),从而导致路基的极限承载力有所下降。

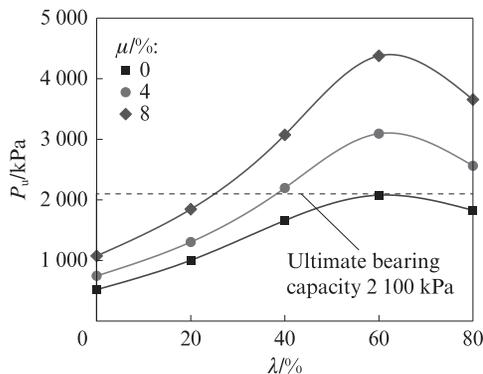


图6 养护7 d时二灰改良黄河泥沙路基极限承载力随二灰掺量的变化

Fig. 6 Variation of ultimate bearing capacity of lime-fly ash stabilized Yellow River sedimentary silt subgrades with lime-fly ash content at 7 d of curing

3.2 养护龄期对极限承载力的影响

由于石灰的消解、胶凝与火山灰反应均需要一个过程,二灰改良黄河泥沙在不同的养护龄期会呈现不同的强度效果。二灰改良黄河泥沙(石灰掺量为4%)路基的极限承载力随养护龄期的变化如图7所示。由图7可见:(1)二灰改良黄河泥沙路基的极限承载力随着养护龄期的延长呈增大趋势,且养护龄期在7 d之内的极限承载力增长速率较快,7 d之后极限承载力增速缓慢。(2)当石灰掺量为4%且粉煤灰掺量为60%和80%时,二灰改良黄河泥沙路基的极限承载力基本不受养护龄期的限制即可满足2 100 kPa的要求;而当石灰掺量为4%、粉煤灰含量为40%时,二灰改良黄河泥沙路基极限承载力在养护龄期大于7 d时才可满足要求。由此可见,二灰改

良黄河泥沙路基的极限承载力受二灰掺量和养护龄期的影响。实际工程中需要综合考虑二灰掺量、时效性及经济性等。

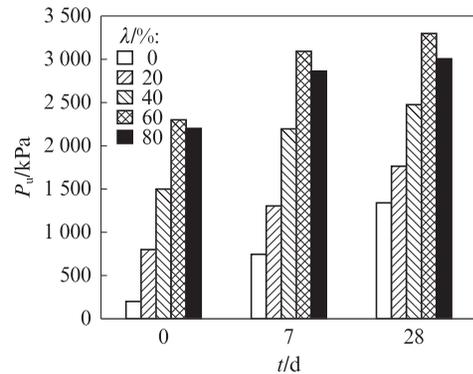


图7 二灰改良黄河泥沙路基的极限承载力随养护龄期的变化

Fig. 7 Variation of ultimate bearing capacity of lime-fly ash stabilized Yellow River sedimentary silt subgrades with curing age (lime content is 4%)

4 最佳二灰掺量确定

由以上分析可知:当石灰掺量为4%、粉煤灰掺量为40%且养护龄期为7 d时,二灰改良黄河泥沙的黏聚力和内摩擦角分别为49.84 kPa和23.54°(图4),回弹模量为80.7 MPa(满足极重荷载等级70 MPa的要求)(图3),极限承载力为2 195.54 kPa(满足最大极限承载力2 100 kPa的要求)(图7)。因此综合考虑时效性和经济性,以优化改良黄河淤积泥沙作为起步区路基填料为目的,最终确定4%石灰+40%粉煤灰的掺量及7 d养护龄期为黄河下游沉积泥沙的最佳改良方案。

无侧限抗压强度为改良土性能的关键指标。依据JTG 3430—2020,该值不得小于0.9 MPa。为验证最佳二灰掺量(4%石灰+40%粉煤灰)且7 d养护龄期是否达标,进行了无侧限抗压强度试验。结果显示,二灰改良黄河泥沙在轴向应力约为7%时,无侧限抗压强度达最大值0.937 MPa。这表明,采用该二灰掺量的改良黄河泥沙符合路基设计规范对无侧限抗压强度的要求。

5 微观结构分析

为了更深入地揭示黄河泥沙的改良效果,采用型号为Gemini SEM300的扫描电子显微镜(SEM)对压实试件进行观测。该设备放大倍率为8~20万倍,分辨率为0.7 nm。在观测前,对烘干试件进行表面喷镀薄膜处理。

各黄河泥沙试件的SEM照片如图8所示。由图8可见:(1)原样黄河泥沙经水流长期冲刷,颗粒表面破损严重,由薄片状结构组成,薄片平行或交错,边缘清晰,共同构成土颗粒骨架(图8(a))。(2)仅采用石灰对黄河泥沙进行改良时,土颗粒表面有少量颗粒状凝胶体和纤维状晶体产生(图8(b))。这是因为当在泥沙中加入一定量石灰后,石灰中的部分熟石灰会进行离子交换,饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 自行结晶;石灰遇水后发生碳化反应,并与土中活性 SiO_2 和 Al_2O_3 反应产生水化硅酸钙(C-S-H)、水化铝酸钙(C-A-H)凝胶和纤维状晶体^[20-22]。这些凝胶和晶体充填土体孔隙,有助于提高土体密度,增强土体强度。(3)采用4%石灰+20%粉煤灰对黄河泥沙进行改良时,粉煤灰的

添加在石灰改良的基础上,促进了C-S-H和C-A-H等难溶性化合物的形成,并增强了这些化学反应的完全性。这一变化导致凝胶物质与纤维状晶体的数量显著增加,它们相互交织,构建起复杂的空间网状架构(图8(c)),从而进一步增强了土体结构的稳定性和密实度。(4)采用4%石灰+40%粉煤灰对黄河泥沙进行改良时,随粉煤灰掺量增加,其活性组分通过火山灰反应生成胶凝产物,同时微细颗粒填充土体孔隙,显著降低孔隙率并形成密实结构。该过程不仅提升土体水稳性,还在颗粒表面形成致密水化膜(图8(d))。试验表明,改良土体的回弹模量、极限承载力和无侧限抗压强度显著提高,满足公路路基填料技术要求。

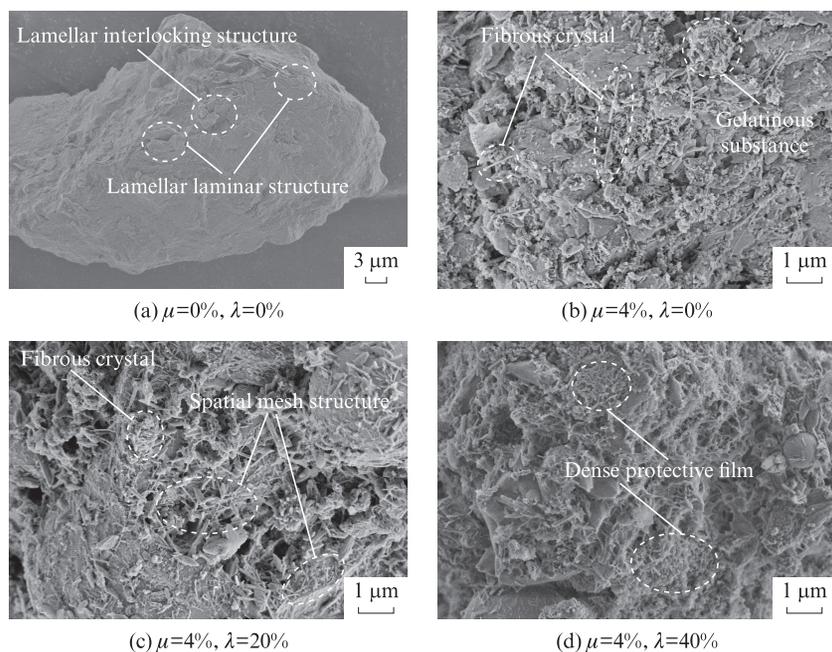


图8 二灰改良黄河泥沙的SEM照片

Fig. 8 SEM images of lime-fly ash stabilized Yellow River sedimentary silts

6 结论

(1)当粉煤灰掺量大于40%时,无论石灰掺量数值如何,二灰改良黄河泥沙的回弹模量均高于70 MPa,符合公路路基设计规范的要求。当石灰掺量由0%增加至4%的过程中,二灰改良黄河泥沙的回弹模量增长速率显著,然而石灰掺量继续增加对回弹模量提高效果有所降低。

(2)石灰和粉煤灰的掺入可以显著提高黄河沉积泥沙的抗剪强度指标。当石灰掺量大于4%,且粉煤灰掺量大于40%时,养护7 d的二灰改良黄河泥沙路基的极限承载力可以满足载重汽车在运输中对填料的要求。4%的石灰掺量和40%的粉煤灰掺量可

作为其对抗剪强度指标增长速率影响的转折点。综合考虑时效性和经济性,将4%石灰+40%粉煤灰的掺量及7 d养护龄期作为黄河泥沙的最佳改良方案。

(3)黄河泥沙微观结构由薄片状单元构成。石灰遇水发生碳化反应,与土中活性物生成凝胶和纤维晶体。随着粉煤灰掺量的增加,难溶性化合物形成加速,凝胶与纤维晶体增多,交织成空间网状结构,并在颗粒表面形成致密保护膜。这增强了土体密实度、水稳定性和极限承载力,满足道路工程性能要求。

参考文献:

- [1] 刘俊霞,张磊,杨久俊,等.磷酸对黄河泥沙石灰土的激活效果及作用机理[J].建筑材料学报,2013,16(5):898-902.

- LIU Junxia, ZHANG Lei, YANG Jiujun, et al. Activation effect and mechanism of phosphoric acid on Yellow River sediment lime soil[J]. *Journal of Building Materials*, 2013, 16 (5):898-902.(in Chinese)
- [2] 王钰轲, 陈宇源, 邵景干, 等. 考虑不同初始状态的黄河泥沙三轴静力剪切特性试验[J]. *工程科学学报*, 2023, 45 (10):1782-1794.
- WANG Yuke, CHEN Yuyuan, SHAO Jinggan, et al. Experimental study on the triaxial static shear characteristics of Yellow River silt under different initial states[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2023, 45 (10):1782-1794.(in Chinese)
- [3] 王立久, 姚文艺, 冷元宝. 黄河泥沙资源利用途径与原则[J]. *人民黄河*, 2014, 36(7):9-12.
- WANG Lijiu, YAO Wenyi, LEN Yuanbao. Ways and principles of utilizing sediment resources of the Yellow River[J]. *Yellow River*, 2014, 36(7):9-12.(in Chinese)
- [4] 张洪磊, 曹明莉. 机械粉磨对黄河泥沙颗粒群特性及胶凝活性的影响[J]. *材料导报*, 2024, 38(13):22090257.
- ZHANG Honglei, CAO Mingli. Influence of mechanical grinding on the particle groups characteristics and cementitious activity of Yellow River sediment[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(13):22090257.(in Chinese)
- [5] HU Z Q, WANG X T, MCSWEENEY K, et al. Restoring subsided coal mined land to farmland using optimized placement of Yellow River sediment to amend soil[J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(7):1029-1042.
- [6] MAO W B, KANG S Z, WAN Y S, et al. Yellow River sediment as a soil amendment for amelioration of saline land in the Yellow River delta[J]. *Land Degradation & Development*, 2016, 27(6):1595-1602.
- [7] 王钰轲, 蒋睿, 贾朝军, 等. 长期循环荷载下黄泛区黄河泥沙的变形特性及安定性分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21 (5):1866-1875.
- WANG Yuke, JIANG Rui, JIA Chaojun, et al. Deformation and shakedown analysis of river silt under long-term cyclic loads in Yellow River flooding area[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21 (5):1866-1875.(in Chinese)
- [8] WANG Y K, CAO T C, SHAO J G, et al. Experimental study on static characteristics of the Yellow River silt under (triaxial) consolidated undrained conditions[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2023, 41(3):285-294.
- [9] 海然, 刘俊霞, 张磊, 等. CaCl_2 复合活化黄河泥沙的作用效果与机理[J]. *建筑材料学报*, 2016, 19(4):654-658.
- HAI Ran, LIU Junxia, ZHANG Lei, et al. Interaction effect and mechanism of CaCl_2 and complex activator with the Yellow River sediment [J]. *Journal of Building Materials*, 2016, 19 (4):654-658.(in Chinese)
- [10] 刘俊霞, 刘明清, 杨延娟, 等. 硫酸氢钠对黄河泥沙工程特性的改性及机理研究[J]. *建筑材料学报*, 2017, 20(2):204-208,228.
- LIU Junxia, LIU Mingqing, YANG Yanjuan, et al. Modification of the engineering properties of Yellow River sediment by sodium bisulfate and its mechanism[J]. *Journal of Building Materials*, 2017, 20 (2):204-208,228.(in Chinese)
- [11] 岳建伟, 黄轩嘉, 邢旋旋, 等. 基于MICP改良黄河泥沙颗粒级配的试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2021, 53 (3):89-98.
- YUE Jianwei, HUANG Xuanjia, XING Xuanxuan, et al. Experimental study on the improvement of the particle gradation of the Yellow River silt based on MICP technology[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53 (3):89-98.(in Chinese)
- [12] 王钰轲, 曹天才, 宋迎宾, 等. 基于菌促方法和酶促方法的黄河泥沙加固参数试验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2023, 57 (6):1100-1110.
- WANG Yuke, CAO Tiancai, SONG Yingbin, et al. Experimental study on sediment reinforcement parameters of the Yellow River based on bacterial and enzymatic methods[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2023, 57 (6):1100-1110.(in Chinese)
- [13] 王钰轲, 陈浩, 宋迎宾, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙固化黄河泥沙水稳定性试验研究[J]. *水利学报*, 2024, 55 (1):71-79.
- WANG Yuke, CHEN Hao, SONG Yingbin, et al. Experimental study on water stability of Yellow River silt solidified by soybean-urease induced carbonate precipitation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2024, 55 (1):71-79.(in Chinese)
- [14] 安强, 潘慧敏, 赵庆新, 等. 碱激发赤泥-粉煤灰-电石渣复合材料性能研究[J]. *建筑材料学报*, 2023, 26(1):14-20.
- AN Qiang, PAN Huimin, ZHAO Qingxin, et al. Properties of alkali-activated red mud-fly ash-carbide slag composites [J]. *Journal of Building Materials*, 2023, 26(1):14-20.(in Chinese)
- [15] 王辉, 高尚, 郭美丽, 等. 粉煤灰-矿渣基泡沫地聚合物微观孔隙结构与宏观性能[J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(5):461-470.
- WANG Hui, GAO Shang, GUO Meili, et al. Micro-pore structure and macro-properties of fly ash-slag based foam geopolymer[J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27(5):461-470.(in Chinese)
- [16] 刘驰, 郭君渊, 杨晓杰, 等. DEIPA和C-S-H-PCEs复掺对水泥-粉煤灰体系早期性能影响[J]. *建筑材料学报*, 2024, 27(9):789-795.
- LIU Chi, GUO Junyuan, YANG Xiaojie, et al. Effects of DEIPA and C-S-H-PCEs on the early properties of fly ash-cement systems[J]. *Journal of Building Materials*, 2024, 27 (9):789-795.(in Chinese)
- [17] OZDEMIR M A. Improvement in bearing capacity of a soft soil by addition of fly ash[J]. *Procedia Engineering*, 2016, 143:498-505.
- [18] 牛恒, 孙德安, 阮坤林. 掺粉煤灰和二灰上海软土的力学特性[J]. *防灾减灾工程学报*, 2020, 40(6):992-1000.
- NIU Heng, SUN Dean, RUAN Kunlin. Mechanical properties of Shanghai soft clay mixed with fly-ash and lime fly-ash [J]. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 2020, 40(6):992-1000.(in Chinese)
- [19] 赵秀绍, 赵林浩, 王梓尧, 等. 全风化千枚岩复合改良土路用性能[J]. *交通运输工程学报*, 2021, 21(6):147-159.
- ZHAO Xiushao, ZHAO Linhao, WANG Ziyao, et al. Road properties of completely weathered phyllite composite improved soil[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2021, 21(6):147-159.(in Chinese)
- [20] 谢潇, 王璐瑶, 邓乐娟, 等. 生石灰改良黄土的微观机制试验研

- 究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(6):193-199.
- XIE Xiao, WANG Luyao, DENG Lejuan, et al. Study on the microscopic mechanism of the loess improved by quicklime[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(6):193-199. (in Chinese)
- [21] LI G N, WANG B M, LIU H, et al. Mechanical property and microstructure of alkali-activated Yellow River sediment-coal slime ash composites [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Materials Science Edition, 2017, 32(5):1080-1086.
- [22] 李敏, 于禾苗, 杜红普, 等. 冻融循环对二灰和改性聚乙烯醇固化盐渍土力学性能的影响[J]. 岩土力学, 2022, 43(2):489-498.
- LI Min, YU Hemiao, DU Hongpu, et al. Mechanical properties of saline soil solidified with the mixture of lime, fly ash and modified polyvinyl alcohol under freeze-thaw cycles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(2):489-498. (in Chinese)

(上接第558页)

- [7] 黄维蓉, 杨玉柱, 王成, 等. 不同改性剂对微表处性能影响研究[J]. 中外公路, 2022, 42(2):233-238.
- HUANG Weirong, YANG Yuzhu, WANG Cheng, et al. Study on the effects of different modifiers on micro surface properties[J]. Chinese and Foreign Highways, 2022, 42(2):233-238. (in Chinese)
- [8] 郑木莲, 范贤鹏, 刘富强, 等. 复配型水性环氧乳化沥青微表处耐久性[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2020, 40(1):68-76.
- ZHENG Mulian, FAN Xianpeng, LIU Fuqiang, et al. Micro surface durability of composite waterborne epoxy emulsified asphalt[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science), 2020, 40(1):68-76. (in Chinese)
- [9] 刘圣洁, 曹旭, 张钰林, 等. 水性环氧树脂复合改性乳化沥青固化行为及性能研究[J]. 材料导报, 2024, 38(24):273-279.
- LIU Shengjie, CAO Xu, ZHANG Yulin, et al. Research on curing behavior and performance of waterborne epoxy resin composite modified emulsified asphalt[J]. Materials Reports, 2024, 38(24):273-279. (in Chinese)
- [10] MENG Y J, CHEN J, KONG W K, et al. Review of emulsified asphalt modification mechanisms and performance influencing factors[J]. Journal of Road Engineering, 2023, 3(2):141-155.
- [11] ZHANG Z Q, YANG J H, YING F, et al. Design and performance of waterborne epoxy-SBR asphalt emulsion(WESE) slurry seal as under-seal coat in rigid pavement[J]. Construction and Building Materials, 2021, 270:121467.
- [12] LIU F Q, ZHENG M L, LIU X, et al. Performance evaluation of waterborne epoxy resin-SBR composite modified emulsified asphalt fog seal[J]. Construction and Building Materials, 2021, 301:124106.
- [13] 李兴富. 水性环氧树脂改性乳化沥青及混合料性能研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2016.
- LI Xingfu. Study on waterborne epoxy resin modified emulsified asphalt and the performance of mixture [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese)
- [14] LIU F Q, ZHENG M L, FAN X P, et al. Performance and mechanism of waterborne epoxy resin-SBR composite modified emulsified asphalt[J]. Construction and Building Materials, 2021, 274:122059.
- [15] KONG L, SU S N, WANG Z L, et al. Microscale mechanism and key factors of waterborne epoxy resin emulsified asphalt enhancing interlayer bonding performance and shear resistance of bridge deck pavement[J]. Construction and Building Materials, 2024, 419:135570.