

# 固化钢渣-淤泥复合地基在软土地区的工程特性与应用研究

吴绍权<sup>1</sup> 黄国驱<sup>2</sup>

1. 广西创新工程咨询有限公司；2. 广西安泰信检测科技有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i4.8824

**[摘要]** 本文以工业废渣钢渣为核心固化剂，搭配少量激发剂制备环保型钢渣基固化材料，用于淤泥就地固化形成复合地基。通过室内配比试验、微观试验、现场载荷试验，系统研究固化钢渣-淤泥的力学特性、变形特性及微观机理，结合工程案例验证技术可行性、经济性与环保性。研究表明：钢渣掺量 20%、激发剂掺量 3%、养护龄期 28d 时，固化淤泥无侧限抗压强度达 1.8MPa，压缩模量 32MPa，满足软土地区路基及低荷载地基要求；现场试验验证，复合地基承载力特征值 230kPa，沉降量符合规范。

**[关键词]** 钢渣；淤泥固化；复合地基；软土地基；绿色岩土工程；固废资源化

## Engineering Characteristics and Application Research of Solidified Steel Slag-Silt Composite Foundations in Soft Soil Regions

Wu Shaoquan<sup>1</sup> Huang Guoqu<sup>2</sup>

1. Guangxi Innovation Engineering Consulting Co., Ltd.; 2. Guangxi Xiantaixin Testing Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** This study develops an environmentally friendly steel slag-based solidification material using industrial steel slag as the primary curing agent combined with a small amount of accelerator, designed for in-situ solidification of silt to form composite foundations. Through laboratory mix design experiments, microscopic analyses, and field load tests, the mechanical properties, deformation characteristics, and microscopic mechanisms of the solidified steel slag-silt mixture were systematically investigated. Technical feasibility, economic viability, and environmental sustainability were validated through engineering case studies. The results demonstrate that with a steel slag content of 20%, accelerator dosage of 3%, and a curing period of 28 days, the solidified silt achieves a uniaxial compressive strength of 1.8 MPa and a compression modulus of 32 MPa, meeting requirements for subgrade construction in soft soil regions. Field tests confirmed that the composite foundation exhibits a characteristic bearing capacity of 230 kPa, with settlement values compliant with relevant standards.

**[Key words]** steel slag; sludge solidification; composite foundation; soft soil foundation; green geotechnical engineering; solid waste resource utilization

### 1 引言

我国沿海地区广泛分布的软土，具有含水量高、孔隙比大、强度低、压缩性高的特点，给工程建设带来诸多困扰。随着沿海城镇化推进，港口疏浚、围海造陆产生的高含水量淤泥逐年增多，既占用土地，又污染生态环境；且软土地基承载力低、沉降大，处理不当易导致基础设施开裂、沉降，影响工程安全。

目前软土地基处理主流技术包括水泥土搅拌桩、CFG 桩等，其中水泥固化因施工简便应用广泛，但存在能耗高、碳排放大、成本高的问题，与绿色低碳理念不符。我国钢铁工业每年产生

大量钢渣，2024 年排放量超 1.2 亿吨，累计堆存超 10 亿吨，堆存不仅占用土地，还可能污染地下水，钢渣资源化利用成为行业难题。

钢渣含大量 CaO、SiO<sub>2</sub> 等活性成分，水化后可生成胶结产物，具备固化剂潜力。基于此，本文提出以钢渣为主固化剂、搭配少量激发剂固化高含水量淤泥，形成复合地基，实现“以废治废”，降低成本与碳排放。通过室内试验、现场试验及工程应用，系统研究其工程特性与机理，验证技术适用性，为软土地基处理创新提供理论与工程参考。

## 2 试验材料与试验方案

### 2.1 试验原材料

本次试验所用原材料均取自实际工程现场及工业生产废料, 确保试验结果的工程适用性, 具体特性如下:

(1) 淤泥: 取自东部沿海某港口疏浚现场, 取样深度 2.5~3.5m, 检测指标为: 含水量 86.2%, 天然密度 1.58g/cm<sup>3</sup>, 孔隙比 2.35, 有机质含量 5.3%, 液限 68.5%, 塑限 32.1%, 塑性指数 36.4, 为高含水量流塑状淤泥, 无法直接作为地基持力层。

(2) 钢渣: 选用某钢厂转炉钢渣, 破碎筛分后取粒径 ≤ 5mm 颗粒, XRF 检测主要成分为: CaO 48.32%、SiO<sub>2</sub> 22.15%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 16.78%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 6.85%, 7d 活性指数 78%、28d 92%, 水化活性良好, 可作为主固化剂。

(3) 激发剂: 选用生石灰与石膏作为复合激发剂, 其中生石灰 CaO 含量 ≥ 90%, 细度为 80 目; 石膏为建筑石膏, SO<sub>3</sub> 含量 ≥ 35%, 细度为 100 目。激发剂的作用是破坏钢渣表面的惰性氧化层, 加速钢渣的水化反应, 提升固化效果。

(4) 水: 试验用水为自来水, 无杂质, 符合室内试验标准要求。

### 2.2 试验方案设计

本次试验分为室内配比试验、微观试验两部分, 旨在确定最优固化配比, 分析固化土的力学特性与微观机理, 为现场施工提供依据。

#### 2.2.1 室内配比试验设计

以钢渣掺量 (10%、15%、20%、25%, 以淤泥干质量计)、激发剂掺量 (1%、2%、3%、4%, 以钢渣质量计)、养护龄期 (7d、28d、90d) 为变量设计正交试验, 标准养护 (20±2℃, 相对湿度 ≥ 95%), 每组 3 组平行试验取平均值, 确保数据可靠。

试验指标包括无侧限抗压强度、压缩模量、剪切强度、浸水稳定性, 均按《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 执行: 无侧限抗压强度采用 Φ50×100mm 试样; 压缩试验用固结仪, 最大荷载 1000kPa; 剪切试验用直剪仪 (快剪); 浸水稳定性通过浸泡 7d 后强度损失率评价。

#### 2.2.2 微观试验设计

选取最优配比试样, 分别在养护 7d、28d 时进行 XRD 与 SEM 试验, XRD 扫描范围 5°~80°, SEM 加速电压 20kV, 分析物相组成与微观结构变化, 揭示固化机理。

## 3 室内试验结果与分析

### 3.1 无侧限抗压强度试验结果与分析

无侧限抗压强度是评价固化淤泥力学性能的核心指标, 直接决定了复合地基的承载能力。不同变量条件下, 固化淤泥无侧限抗压强度试验结果如下:

(1) 钢渣掺量影响: 激发剂 3%、养护 28d 时, 钢渣掺量 10%~20%, 强度从 0.65MPa 升至 1.82MPa (提升 179.2%); 掺量超 20% 后增长放缓, 25% 时强度 1.95MPa (提升 7.1%)。原因是掺量不足时胶结产物少, 掺量过高则钢渣接触不充分、孔隙

增多。

(2) 激发剂掺量影响: 钢渣 20%、养护 28d 时, 激发剂 1%~3%, 强度从 1.23MPa 升至 1.82MPa (提升 48.0%); 掺量超 3% 后强度下降, 4% 时为 1.68MPa (下降 7.7%)。适量激发剂加速水化, 过量则产生水化热导致微裂缝。

(3) 养护龄期影响: 钢渣 20%、激发剂 3% 时, 养护 7d~28d, 强度从 0.95MPa 升至 1.82MPa (提升 91.6%); 28d~90d 升至 2.35MPa (提升 29.1%)。养护越长, 水化越充分, 强度持续提升但增速放缓。

综合分析可知, 固化钢渣-淤泥的最优配比为: 钢渣掺量 20%、激发剂掺量 3%, 该配比下, 固化淤泥 28d 无侧限抗压强度可达 1.8MPa 以上, 满足软土地区路基及低荷载建筑地基的使用要求。

### 3.2 压缩变形特性分析

选取最优配比试样进行压缩试验, 结果显示: 养护 7d 时压缩模量 18.5MPa、压缩系数 0.32MPa<sup>-1</sup>; 28d 时模量 32.0MPa、系数 0.18MPa<sup>-1</sup>; 90d 时模量 41.2MPa、系数 0.13MPa<sup>-1</sup>。与未固化淤泥 (模量 2.8MPa、系数 1.56MPa<sup>-1</sup>) 相比, 28d 模量提升 10.4 倍, 系数降低 88.5%, 显著改善压缩变形特性。

核心原因是钢渣固化后, 胶结产物填充淤泥孔隙, 形成稳定骨架结构, 抗压缩能力增强; 随养护龄期延长, 水化反应持续进行, 骨架结构更致密, 压缩变形进一步减小。

### 3.3 剪切强度与水稳定性分析

#### 3.3.1 剪切强度分析

直剪试验显示, 养护 28d 时, 固化淤泥黏聚力 38kPa、内摩擦角 22°, 较未固化淤泥 (黏聚力 8kPa、内摩擦角 6°) 分别提升 375%、266.7%, 抗滑动力显著增强, 源于胶结产物增加了颗粒间的摩擦力与黏结力。

#### 3.3.2 水稳定性分析

浸水稳定性试验表明, 养护 28d 试样浸水 7d 后强度 1.58MPa, 损失率 13.2%; 90d 试样浸水后强度 2.12MPa, 损失率 9.8%, 均满足规范 ≤ 20% 的要求, 适配沿海地下水丰富环境。

### 3.4 微观机理分析

#### 3.4.1 XRD 试验结果分析

XRD 试验显示, 未固化淤泥主要为石英、蒙脱石等黏土矿物; 养护 7d 试样出现 C-S-H 凝胶 (2θ = 27.5°、31.8°)、钙矾石 (2θ = 18.0°、24.2°) 特征峰; 28d 时两类峰值显著增强, 且出现氢氧化钙 (2θ = 34.5°) 峰值, 表明水化反应充分, 胶结产物增多, 有效提升力学性能。

#### 3.4.2 SEM 试验结果分析

SEM 观察显示, 未固化淤泥微观结构松散、孔隙大; 养护 7d 试样出现少量絮状胶结产物, 孔隙减小; 28d 试样微观结构致密, 大量 C-S-H 凝胶、钙矾石包裹淤泥颗粒, 形成稳定骨架结构, 这是力学性能提升的根本原因。

## 4 现场试验与工程应用

#### 4.1 工程概况

某东部沿海工业园区场地平整及道路路基工程，场地为软土区，淤泥厚度 3.5~5.0m，地下水埋深 1.2~1.8m，设计要求路基承载力 $\geq 200\text{kPa}$ 、沉降量 $\leq 30\text{mm}$ 。选用本文固化钢渣-淤泥复合地基技术处理，处理面积 5.2 万 $\text{m}^2$ ，深度 4.0m。

#### 4.2 现场施工工艺

结合工程实际，采用深层搅拌法进行固化钢渣-淤泥复合地基施工，施工流程如下：

(1) 场地平整：清除杂物、平整场地，修建排水设施防止雨水浸泡；(2) 测量放线：全站仪定位桩位，偏差 $\leq \pm 50\text{mm}$ ；(3) 钻机就位：调整垂直度，偏差 $\leq 1.0\%$ ；(4) 浆液制备：按最优配比制备，浓度 1.2~1.3 $\text{g}/\text{cm}^3$ ；(5) 钻进喷浆：钻进速度 0.8~1.0 $\text{m}/\text{min}$ ，提升喷浆速度 0.5~0.7 $\text{m}/\text{min}$ ；(6) 复搅：复搅速度 1.0~1.2 $\text{m}/\text{min}$ ，确保混合均匀；(7) 养护：养护期 $\geq 28\text{d}$ ，禁止碾压踩踏。施工中定期检测浆液浓度、喷浆量等参数，保障质量。

(2) 测量放线：根据设计图纸，采用全站仪进行测量放线，确定搅拌桩的桩位，桩位偏差控制在 $\pm 50\text{mm}$ 以内。

(3) 钻机就位：将深层搅拌钻机移动至桩位处，调整钻机垂直度，确保钻机垂直度偏差 $\leq 1.0\%$ 。

(4) 固化材料制备：按照最优配比（钢渣掺量 20%、激发剂掺量 3%），将钢渣、激发剂与水混合均匀，制备成固化浆液，浆液浓度控制在 1.2~1.3 $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

(5) 钻进与喷浆：钻机缓慢钻进至设计深度（4.0m），钻进速度控制在 0.8~1.0 $\text{m}/\text{min}$ ；到达设计深度后，匀速提升钻机，同时喷入固化浆液，提升速度控制在 0.5~0.7 $\text{m}/\text{min}$ ，确保浆液均匀分布在淤泥中。

(6) 复搅：钻机提升至地面后，再次钻进至设计深度，进行复搅，复搅速度控制在 1.0~1.2 $\text{m}/\text{min}$ ，确保固化材料与淤泥充分混合。

(7) 养护：施工完成后，对复合地基进行养护，养护期不少于 28d，养护期间禁止车辆碾压、人员踩踏，确保固化反应充分进行。

施工过程中，加强质量控制，定期检测浆液浓度、钻进速度、喷浆量等参数，确保施工质量符合设计要求。

#### 4.3 现场载荷试验结果

养护 28d 后，在复合地基场地选取 3 个代表性点位，进行单桩静载试验与复合地基静载试验，试验按照《建筑地基处理技术规范》（JGJ 79-2012）执行。

单桩静载试验显示，单桩竖向承载力特征值 180kN（满足 $\geq 150\text{kN}$ 要求）；复合地基承载力特征值 230kPa（远超 $\geq 200\text{kPa}$ 要求），设计荷载下沉降量 18.6mm（ $\leq 30\text{mm}$ ），满足工程使用要求。

#### 4.4 工程效益分析

本次工程应用中，固化钢渣-淤泥复合地基技术相比传统

水泥土搅拌桩技术，具有显著的经济效益、环境效益与社会效益，具体如下：

(1) 经济效益：钢渣价格约为水泥 1/3，可降低材料成本 25%以上，本次工程消纳钢渣 3.2 万吨，节省水泥 1.8 万吨，直接节省成本 280 万元；(2) 环境效益：消纳钢渣减少土地占用与污染，替代水泥减少 $\text{CO}_2$ 排放 1.28 万吨，符合“双碳”理念；(3) 社会效益：解决淤泥处置难题，推动固废资源化，助力岩土工程绿色转型。

(2) 环境效益：本次工程消纳钢渣 3.2 万吨，减少了钢渣堆存占用的土地资源，避免了钢渣对土壤、地下水的污染；同时，替代 1.8 万吨水泥，减少 $\text{CO}_2$ 排放约 1.28 万吨，减少了能源消耗，符合“双碳”战略与绿色环保发展理念，环境效益突出。

(3) 社会效益：该技术解决了沿海地区高含水量淤泥的处置难题，提升了软土地基的承载能力，保障了工程安全与使用寿命；同时，推动了工业固废资源化利用，促进了岩土工程行业的绿色转型，具有良好的社会效益。

## 5 结论与展望

### 5.1 结论

本文通过室内试验、微观试验、现场试验及工程应用，对固化钢渣-淤泥复合地基的工程特性与应用进行了系统研究，得出以下结论：

(1) 钢渣搭配 3%生石灰-石膏激发剂，掺量 20%、养护 28d 时，固化淤泥无侧限抗压强度 $\geq 1.8\text{MPa}$ ，压缩模量 32MPa，黏聚力 38kPa，内摩擦角 $22^\circ$ ，浸水强度损失率 13.2%，满足软土地区路基及低荷载地基要求。

(2) 固化机理为：钢渣在激发剂作用下水化生成 C-S-H 凝胶、钙矾石，填充淤泥孔隙、胶结颗粒，形成稳定骨架结构，显著提升力学与抗变形能力。

(3) 现场试验与工程应用表明，该复合地基施工简便、质量可控，承载力 230kPa，沉降量符合规范，成本降低 25%以上，实现“以废治废”，可行性与经济性突出。

(4) 该技术为沿海软土处理及钢渣资源化提供新路径，符合绿色岩土工程理念，推广应用前景广阔。

### [参考文献]

[1] 中华人民共和国国家标准. 土工试验方法标准 (GB/T 50123-2019) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.

[2] 张磊, 王鹏, 李娟. 钢渣固化淤泥的力学性能及微观机理研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44 (S1): 189-194.

[3] 李海枫, 刘敏, 张艳军. 工业固废在软土固化中的应用研究进展[J]. 岩土力学, 2021, 42 (8): 2201-2212.

[4] 陈明, 赵刚, 李艳. 固化钢渣-淤泥复合地基现场试验与工程应用[J]. 岩土工程技术, 2023, 37 (4): 489-494.

[5] 李军, 刘芳, 张磊. 钢渣固化淤泥的长期性能试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44 (6): 1678-1685.