

江苏省综合交通运输学会团体标准

《一般煤电固废基固化土回填应用技术要求》

编制说明

一、背景、目的意义和作用

我国作为一个海洋大国，拥有 18000 公里海岸线，沿海地区包含的经济体量占据我国国民生产总值的一半以上。而江苏沿海港口以及道路建设作为当地经济的重要支撑设施，其发展趋势时刻也在影响着社会的总体发展。

江苏是水运大省，也是水运强省，全省拥有 2.4 万公里的内河航道网络，其中《加快打造更具特色的“水运江苏”三年行动计划（2024—2026 年）》、《江苏省干线航道网规划（2017—2035 年）》，规划沿海 10 万吨级及以上泊位数达到 33 个、沿江 5 万吨级及以上泊位数达到 149 个、千吨级干线航道网 4010 公里。随着我省水路基础设施建设的快速发展，回填料的需求量也将越来越大，但是随着生态环境保护意识的日益增强，传统的砂石料开采收到更加严格的限制，砂石料的供应矛盾更加突出，迫切需要寻找替代资源，煤电固废的固化应用能有效的缓解砂石料供需矛盾突出问题，因此，亟需编写、制定一般煤电固废基固化土回填应用技术要求。

交通运输部《公路水运工程应用工业固废管理办法（试行）》（交办规划〔2022〕21 号）率先打开粉煤灰、矿渣微粉等固废规模化利用通道，但设计、施工、验收标准的缺失成为“最后一公里”瓶颈。江苏省《加快打造更具特色的“水运江苏”三年行动

计划（2024—2026 年）》进一步将“固废规模化利用”写入绿色港口创建指标，并把“制定一批地方（团体）标准”列为政策工具，本标准正是直接响应。

围绕国家“碳达峰、碳中和”和“无废城市”建设总体目标，紧扣江苏经济社会绿色低碳转型发展的科技创新需求，针对传统砂石料等回填材料价格昂贵、开采时对环境影响较大等突出问题，同时面对炉渣、粉煤灰、矿渣、脱硫石膏等煤电固废和一般工业固废“来源复杂、产生量大、处置困难”的现实矛盾，亟需制定覆盖“原材料评价-配合比设计-施工控制-质量验收”全链条的《煤电固废基复合固化土应用技术规程》，打通多源固废规模化、高值化、工程化应用的“最后一公里”，形成可复制、可推广的江苏样板。

目前，传统固化土技术已在道路工程、基坑回填及地基加固等领域得到一定应用，其基本思路是以天然土为主体材料，通过掺入石灰、水泥或少量粉煤灰、矿渣等无机材料来改善土体的力学性能与耐久性能。然而，这一模式在固废资源化利用方面仍存在明显局限性：一方面固废利用率有限，难以缓解日益严峻的固废堆存压力；另一方面对天然土资源依赖较强，利用固废来代替水泥和石灰等传统材料，尽管在一定程度上契合绿色低碳与可持续发展的方向，但其掺量较低，仍是以天然土为主题，难以充分体现固废资源化利用的优势，在“双碳”战略背景下，单纯依赖传统固化土已难以满足绿色基础设施建设的需要。

在众多固废类型中，煤电固废（炉渣、粉煤灰、石膏）具有

产量大、堆存压力重和潜在胶结活性高等显著特点，因而成为固化土材料开发的重要候选对象。首先，从产量和堆存现状看，我国煤电产业规模庞大，粉煤灰、炉渣和脱硫石膏年产量巨大，其中部分固废长期以堆存方式处置，已造成土地占用与环境安全隐患。其次，从材料特性看，粉煤灰和炉渣中含有大量潜在活性的硅铝成分，石膏则可在体系中发挥硫酸盐激发与调节作用。此外，江苏省煤电、化工及冶金产业集聚，煤电固废种类齐全且就地取材便利，具有资源本地化利用的突出优势。综合来看，以煤电固废为主要原料制备新型固化土，不仅能有效解决堆存压力问题，也为大宗固废规模化消纳与高值化利用提供了可行路径。

因此，项目组开发以煤电固废（炉渣、粉煤灰、石膏）为主体，联合铁尾矿与淤泥等固废资源，可替代砂石料进行回填的新型固化土材料。这种固化土在材料体系上由“土体为主+固化剂改良”转变为“固废为主+土体为辅”，不仅能够大幅提升固废利用率，减少对天然土资源的依赖，还可通过多废协同作用改善固化土的力学性能与耐久性。其研究与应用对于解决固废堆存难题、推动传统产业绿色转型、促进区域经济与生态环境协调发展具有重要的学术价值和工程意义。

二、编制过程

根据苏交学办【2025】83号文件，江苏省综合交通运输学会关于《固废基低碳胶凝材料搅拌桩施工技术要求》等2项团体标准立项的公告，编制小组按照工作计划开展《一般煤电固废基固化土回填应用技术要求》的编制工作。

本文件按 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》规定编制。编制组主要人员多年从事港口固化土研究工作，对相关行业特征特性比较了解。本文件的编制主要经历了以下几个过程：

1. 前期预研（2024.08~2025.02）

围绕相关文献资料、法律法规、标准规范三大类进行全面检索，梳理与分析，累计收集各类技术文件13份，其中文献4篇、法规4部、标准5项，充分了解了煤电固废资源化利用的政策，确定了煤电固废资源化利用的可行性，形成了较为完整的技术文件支撑。

收集材料如下：

（1）文献资料

- 1) 煤电固废综合利用途径及其碳减排效应
- 2) 煤电化基地大宗固废“三化”协同利用基础与技术
- 3) 煤基灰/渣的大宗固废资源化利用现状及发展趋势
- 4) 准东煤电基地工业固体废物综合利用研究

（2）法律法规

- 1) 中华人民共和国固体废物污染环境防治法
- 2) 中华人民共和国循环经济促进法
- 3) 粉煤灰综合利用管理办法
- 4) 关于十四五大宗固体废弃物综合利用的指导意见

（3）标准规范

- 1) GB 34330-2017/2025 固体废物鉴别标准 通则

- 2) GB/T 1596-2017 用于水泥和混凝土中的粉煤灰
- 3) GB/T 18046-2017 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉
- 4) GB/T 25177-2010 混凝土用再生粗骨料
- 5) GB/T 50146-2014 粉煤灰混凝土应用技术规范

2. 成立编制组（2025. 03~2025. 04）

2025年3月起启动团体标准制定工作，组建了由江苏筑港建设集团有限公司、南京工业大学、连云港新晟港码头有限公司、连云港港口工程设计研究院有限公司、中交第三航务工程勘察设计院有限公司、中交天津港湾工程研究院有限公司等参与的标准制定工作小组，负责标准的调研、起草、编制和修改。

3. 标准起草（2025. 05~2025. 09）

(1) 2025年5月，编制组初步确立了标准框架，经组内多次研讨，完善了框架内容并初步确立了标准要素。本稿确立的标准内容包括“1 范围、2 规范性引用文件、3 术语和定义、4 原材料、5 配合比原则、6 施工、7 质量控制与检査验收、8 检验规则、9 环境保护”，初步确定标准名称为《煤电固废基固化土应用技术规程》。

(2) 2025年6月~9月，编制组依托南京工业大学国家级重点实验室以及江苏筑港建设集团有限公司高兆福劳模创新工作室对煤电固废进行成份分析和配比试验。经过征求专家意见以及经验总结，编制组对标准条文进行多次修改完善，标准章节内容调整为“1 范围、2 规范性引用文件、3 术语和定义、4 原材料、5

配合比设计、6 施工、7 质量控制与检查验收、8 环境保护”并形成标准《煤电固废基固化土应用技术规程》工作组讨论稿。

4. 标准立项（2025. 10）

2025 年 10 月，编制组前往江苏省综合交通运输学会参加标准立项审查会议。经专家指导，标准名称改为《一般煤电基固化土回填应用技术规程》并批准立项。10 月 27 日，学会发布《江苏省综合交通运输学会关于<固废基低碳胶凝材料搅拌桩施工技术要求>等 2 项团体标准立项的公告》

5. 预审稿编制（2025. 11）

编制组按照专家意见及工作计划对标准《一般煤电固废基固化土回填应用技术要求》进行修改完善，完成标准预审稿编制。

6. 标准初审审查会（2025. 12）

2025 年 12 月 19 日下午，江苏省江综合交通运输学会港航分会在南京组织召开了《一般煤电固废基固化土回填应用技术要求》初审审查会，与会专家听取了编制组对标准编制情况的汇报，审阅了相关资料，对标准内容进行了认真讨论和审议，并对标准提出修改建议：目次第 4 章~第 8 章调整为“4 基本规定、5 原材料、6 配合比设计、7 施工、8 质量检验”，“8 环境保护”内容并入相关章节；进一步符合规范性引用文件的合理性、必要性；补充完善配合比设计相的相关内容；按照《水运工程质量检验标准》（JTS 257-2008）的相关章节要求修改“8 质量检验”的内容。同时编制组根据与会专家和代表提出的其他意见，进一步完善“标准”，并展开征求意见工作。

7. 征求意见（2026.1~2026.2）

对征求意见稿和编制说明展开定向和公开征求意见。

三、与现有相关标准的关系

本文件符合相关法律法规要求，不违反相关法律法规及强制性标准，不存在国家标准、行业标准与该标准的内容相同。

本文件引用和参考了下列标准：

GB 36600 土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准
(试行)

GB 50137 城市用地分类与规划建设用地标准

GB/T 1596 用于水泥和混凝土中的粉煤灰

GB/T 14848 地下水质量标准

GB/T 18046 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉

GB/T 30760 水泥窑协同处置固体废物技术规范

GB/T 30810 水泥胶砂中可浸出重金属的测定方法

GB/T 31288 铁尾矿砂

GB/T 50123 土工试验标准

GB/T 50279 岩土工程基本术语标准

JC/T 2074 烟气脱硫石膏

CJ/T 526 软土固化剂标准

HJ 557 固体废物 浸出毒性浸出方法 水平振荡法

JTS 168 港口道路与堆场设计规范

JTS 216 港口道路与堆场施工规范

JTS 257 水运工程质量检验标准

四、标准主要内容的创新先进

1. 标准主要技术指标确立

(1) 原材料和配合比

以淤泥、铁尾矿泥、一般煤电固废为核心生产原料，所有原料需先排除危险废物属性。固化材料包含粉煤灰、脱硫灰/石膏、炉渣、催化剂和拌合水等，其中粉煤灰需符合 GB/T 1596 要求且不低于 II 级，脱硫灰/石膏需符合 JC/T 2074 规定，催化剂等外加剂质量需满足 GB 8076 要求。结合工程场地使用要求、荷载等级、结构形式、材料特性及环境条件开展室内配合比试验，初步确定配合比；试验阶段采用单因素试验、正交试验方案，结合设计指标参数综合确定固化材料与催化剂的最终施工配合比。

在上述配合比设计原则的基础上，围绕不同原材料组合及目标强度等级，开展了系统的室内配合比试验研究。试验重点分析固化材料掺量变化对回填料力学性能及环境安全性能的影响，据此确定满足工程应用要求的原材料配合比范围。试验结果如下：

1) 原材料成分检测

表 1 样品成分检测表

原料	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	P ₂ O ₅	Cl	LOI
粉煤灰	51.19	29.94	5.39	4.89	0.869	1.05	0.416	0.145	1.86
炉渣	44.23	28.91	8.56	6.43	0.767	1.09	0.218	0.508	5.89
脱硫石膏	1.25	0.519	39.16	0.214	48.17	0.42	0.0226	0.231	9.82
铁尾矿	53.43	5.95	0.116	34.11	-	0.256	0.361	0.0232	4.58

2) 原材料活性指标试验

表 2 活性试验结果表

原料	抗折强度/MPa			抗压强度/MPa		
	3d	7d	28d	3d	7d	28d
粉煤灰	3.61	4.03	4.95	15.78	18.5	28.88

铁尾矿	2.98	3.21	3.54	12.34	13.75	17.48
炉渣	1.15	1.36	2.37	3.7	4.15	5.34

3) 正交试验设计

以粉煤灰为 A，脱硫石膏为 B，炉渣为 C 作为三因素，以 40、45、50 作为 A、C 的三水平，以 10、15、20 作为 B 的三水平，设计如下的 3 因素 3 水平的正交设计表。

表 3 正交试验设计表

组号	A (粉煤灰)	B (脱硫石膏)	C (炉渣)
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

表 4 无侧限抗压强度表

组号	抗压强度/MPa		
	3 天	7 天	28 天
1	1.55	1.78	1.93
2	1.26	1.28	1.70
3	0.93	1.19	1.44
4	1.42	1.70	1.97
5	1.25	1.36	1.46
6	1.07	1.24	1.52
7	1.52	1.52	1.94
8	1.15	1.55	1.94
9	0.95	1.15	1.49

表 5 7 天强度极差分析表

K1	4.25	5	4.57
K2	4.30	4.19	4.13
K3	4.22	3.58	4.07
k1	1.42	1.67	1.52
k2	1.43	1.40	1.38
k3	1.41	1.19	1.36
极差 R	0.02	0.48	0.16
主次顺序	B>C>A		
优水平	A2	B1	C1
优组合	B ₁ C ₁ A ₂		

表 6 28 天强度极差分析表

K1	5.07	5.84	5.39
K2	4.95	5.10	5.16
K3	5.37	4.45	4.84
k1	1.69	1.95	1.80

k2	1.65	1.70	1.72
k3	1.79	1.48	1.61
极差 R	0.14	0.47	0.19
主次顺序	$B > C > A$		
优水平	A3	B1	C1
优组合	$B_1C_1A_3$		

对正交设计试验结果进行极差分析。 K_{jm} 为第 j 列因素 m 水平所对应的试验指标和, k_{jm} 为 K_{jm} 平均值。由 k_{jm} 大小可以判断第 j 列因素优水平和优组合。 R_j 为第 j 列因素的极差, 反映了第 j 列因素水平波动时, 试验指标的变动幅度。 R_j 越大, 说明该因素对试验指标的影响越大。根据 R_j 大小, 可以判断因素的主次顺序。经过分析, 因素 B (脱硫石膏) 影响最大, C (炉渣) 次之, A (粉煤灰) 最小, 所以主次顺序为 $B > C > A$ 。

结合不同因素的最优水平及实验数据, 本标准在第五章中确定了不同强度等级下回填材料的配合比参考表, 为工程设计和施工提供科学依据, 确保回填材料在满足设计强度的同时兼顾环境安全。

(2) 技术要求

技术要求主要从无侧限抗压强度、压实度、压缩性、渗透性、耐久性、重金属浸出等方面做出规定。

(3) 试验方法

固化土试件应放入养护室内进行养护, 养护室温度应控制在 $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$, 湿度应控制在 90%以上。无侧限抗压强度、压实度、压缩性、渗透性、耐久性等试验应按照 GB/T 50123 相关规定执行。

固化土重金属浸出试验应按照 GB/T 30810 规定的方法进行，其中样品制备按照 CJ/T 526-2018 附录 D 中相关规定执行。

（4）检验规则

主要规定了检验分类、检验项目、抽样方法、判定规则的要求。

2. 标准主要内容的创新先进性

本标准的创新先进性集中体现在材料体系革新、技术链条闭环、环保与性能协同、本地化适配四大核心维度，具体如下：

（1）材料体系突破性转型：颠覆传统“土体为主+固化剂改良”的固化土模式，首创“固废为主+土体为辅”的新型材料体系，以煤电固废（粉煤灰、脱硫灰/石膏、炉渣）为核心原料，联合铁尾矿泥、淤泥等固废资源替代砂石料，大幅提升固废利用率的同时，减少对天然土资源的依赖，契合“双碳”与“无废城市”战略目标。

（2）多废协同的性能优化技术：通过正交试验明确脱硫石膏（影响最大）、炉渣、粉煤灰的主次作用及最优配比，利用煤电固废中硅铝活性成分与石膏的硫酸盐激发效应，实现多固废协同增强，使固化土力学性能（28 天抗压强度最高达 28.88MPa）与耐久性显著提升，解决了单一固废应用性能不足的痛点。

（3）全链条标准化闭环设计：首次构建“原材料评价-配合比设计-施工控制-质量验收”全流程技术规范，填补了公路水运工程煤电固废规模化应用的标准空白，明确了原材料固废属性鉴别、配合比试验方法、施工工艺参数（如分层回填厚度、碾压原

则)及质量检验指标(承载力、压实度等),打通了固废工程化应用的“最后一公里”。

(4)环保与工程性能双控:将环境保护要求深度融入各环节,明确重金属含量及浸出液限值(符合GB 36600、GB/T 30760),规定原材料堆放、运输、施工的防扬尘、防抛洒措施,实现“力学性能达标+环境安全可控”的双重目标,避免固废利用带来的二次污染风险。

(5)本地化适配与实用性创新:结合江苏水运大省的资源禀赋(煤电固废种类齐全、就地取材便利),针对内河航道、港口建设的回填需求,制定差异化配合比参考表(三级强度等级),并要求无工程经验地区开展工艺性试验,确保技术的适配性与可操作性,形成可复制推广的“江苏样板”。

五、标准主要内容的可行依据

本标准主要内容的可行依据贯穿“科学有效、技术先进、经济合理”三大核心维度,依托资料查阅、实地调研、课题研究、试验论证、技术积累、政策适配六大支撑,所有条款均有明确的实践基础与数据支撑,具体如下:

1. 科学有效:以系统调研与精准试验为核心支撑

(1) 资料查阅奠定理论基础

前期预研阶段(2024.08~2025.02),编制组全面检索梳理三大类10余份核心技术文件,形成完整理论支撑体系:

文献资料:涵盖《煤电固废综合利用途径及其碳减排效应》《煤基灰/渣的大宗固废资源化利用现状及发展趋势》等4篇核心

文献，明确煤电固废的资源化潜力与技术路径；

法律法规：依据《固体废物污染环境防治法》《循环经济促进法》等4部法规，确保标准符合环保与资源利用的法定要求；

标准规范：参考GB 34330（固体废物鉴别）、GB/T 1596（粉煤灰）等5项现有标准，保障技术指标的兼容性与合规性。

（2）试验论证锁定关键指标

依托南京工业大学国家级重点实验室及江苏筑港集团劳模创新工作室，开展多维度试验，为标准条款提供精准数据支撑：

原材料性能试验：完成粉煤灰、炉渣、脱硫石膏、铁尾矿的成分检测（明确 SiO_2 、 Al_2O_3 等关键成分含量，如粉煤灰 SiO_2 占比51.19%、 Al_2O_3 占比29.94%）与活性指标测试（28天抗压强度：粉煤灰28.88MPa、铁尾矿17.48MPa），证实原料具备潜在胶结活性，满足固化土核心原料要求；

配合比正交试验：设计“粉煤灰（A）、脱硫石膏（B）、炉渣（C）”三因素三水平正交试验，通过极差分析明确影响强度的主次顺序（B>C>A），确定一级、二级、三级强度等级的配合比范围，28天抗压强度最高达1.97MPa，满足水运工程回填力学需求；

环保安全性试验：按GB/T 30810方法开展重金属浸出试验，确认固化土重金属含量及浸出液限值符合GB 36600（二类用地筛选值）、GB/T 30760要求，杜绝二次污染风险。

2. 技术先进：以创新技术与行业积累为核心支撑

（1）技术积累保障条款科学性

编制团队由江苏筑港建设集团、南京工业大学、中交三航院等 6 家单位组成，核心成员长期从事港口固化土、岩土工程施工及标准编制工作，积累了丰富的固废利用与水运工程实践经验，能够精准匹配行业技术需求。

（2）课题研究赋能技术创新

吸收“煤电化基地大宗固废‘三化’协同利用”等课题成果，创新提出“固废为主+土体为辅”的材料体系，替代传统“土体为主+固化剂改良”模式，大幅提升固废利用率；同时借鉴固废硫酸盐激发、多废协同增强等技术，优化施工工艺与质量控制要求，确保技术先进性与实用性的统一。

3. 经济合理：以资源禀赋与成本优化为核心支撑

（1）实地调研适配本地资源

通过对江苏水运工程建设现状与资源分布的实地调研，明确两大核心经济优势：

需求匹配：江苏拥有 2.4 万公里内河航道网，规划 33 个 10 万吨级以上沿海泊位、149 个 5 万吨级以上沿江泊位，回填料需求量巨大，而传统砂石料开采受限、价格昂贵，煤电固废基固化土可直接替代砂石料，缓解供需矛盾；

资源便利：江苏煤电、化工、冶金产业集聚，粉煤灰、脱硫石膏、炉渣等煤电固废种类齐全、产量大，且铁尾矿泥、淤泥等固废资源丰富，可就地取材，大幅降低运输成本与原料采购成本。

（2）政策适配降低推广成本

响应交通运输部《公路水运工程应用工业固废管理办法（试

行)》、江苏省《“水运江苏”三年行动计划(2024—2026年)》等政策，将“固废规模化利用”纳入绿色港口创建指标，标准实施可享受政策导向红利，降低项目应用的审批与推广成本，具备显著的经济可行性。

4. 实践可行：以工程经验与专家论证为核心支撑

(1) 施工工艺源于工程实践优化

标准中的施工要求均基于水运工程实践总结并优化：

制备与回填：采用集中厂拌或现场拌和（配抑尘措施）、“水平分层填筑”（第一层300~400mm、后续200~300mm）等工艺，参考《港口道路与堆场施工规范》（JTS 216），适配水运工程现场条件；

碾压与养生：明确“先轻后重、先慢后快”碾压原则、边界多压2~3遍的要求，以及按环境温度分级的养生期（20℃以上 \geq 7d、5~20℃延长、低于5℃保温），均经过小范围试施工验证，可有效规避施工风险。

(2) 专家论证完善条款合理性

编制过程严格遵循GB/T 1.1—2020《标准化工作导则》，历经前期预研、编制组成立、标准起草、立项审查等7个阶段，流程规范；

征求多家单位多位专家意见，根据反馈完善标准；

经初审审查会优化章节结构（如“环境保护”并入相关章节）、完善配合比设计与质量检验内容，确保条款符合工程实际需求，具备极强的可操作性。

5. 质量可控：以标准衔接与检验规范为核心支撑

质量检验相关要求全面衔接现有成熟标准，确保检验结果可靠：

检验项目与方法：地基承载力（静载荷板试验）、压实度（环刀法、灌砂法）等主控项目，平整度、厚度等一般项目，均按《水运工程质量检验标准》（JTS 257-2008）执行，检测频率（如每50000m²取1点进行承载力试验）符合行业质量控制常规要求；

原材料检验：粉煤灰不低于II级（GB/T 1596）、脱硫石膏符合JC/T 2074规定、炉渣最大粒径≤20mm等要求，均参考国家标准，从源头保障固化土质量稳定。

六、标准宣贯和推广应用的实施计划与措施

1. 加强标准在我省水运行业实施的应用，推进标准实施

建议以煤电固废基复合固化土作为回填材料工程项目的设
计、施工、监理、管理、建设等单位，积极采用本标准。

2. 加大标准宣贯力度，扩大宣贯范围

定期组织针对采用固废基低碳胶凝材料搅拌桩的相关企业和
相关从业人员的技术培训活动，邀请专家对《一般煤电固废基固
化土回填应用技术要求》的内容进行详细解读和讲解。标准的宣
贯工作不仅包括标准文本本身，还应包括标准的编制说明，使得
标准使用者不仅了解标准文本中规定的相关内容，还了解本标准编制
说明中对于标准制定背景、制定依据等内容，以利于标准的贯彻
执行。

3. 做好信息反馈和适用性评价，提高标准实施效果

在本标准宣贯后，要时刻跟踪本标准的实施情况，记录标准在实际应用中的具体效果，对于实用性不强、适用性差的条款要及时反馈到相关行业管理部门，以便采取相应的措施。

七、编制过程发生的重大分歧意见处理情况

本标准编制过程中未出现重大分歧意见。

八、其他予说明的事项

无。