

华东勘测设计研究院有限公司

201 科技项目研究大纲

项目名称：工程建设副产物绿色资源化处置关键技术研究

项目承担单位：浙江华东工程建设管理有限公司

项目参与单位：工程试验中心

项目负责人：任金明

项目起止年限：2021 年 7 月至 2024 年 6 月

2021 年 8 月

目 录

一、概述	1
1.1 研究目的和意义	1
1.2 国内外发展现状及水平	2
1.2.1 国外发展现状及水平	2
1.2.2 国内发展现状及水平	3
1.2.3 国内外工程建设副产物资源化利用情况对比	4
1.3 拟解决的技术关键及创新点	4
二、项目研究内容和目标	7
2.1 工程建设副产物绿色资源化处置统筹与智能调运关键技术研究	7
2.1.1 工程建设副产物分类处置及资源化利用标准体系构建	7
2.1.2 工程建设副产物源头减量及前端处置技术研究	8
2.1.3 大体量工程建设副产物智能调配系统关键技术	8
2.2 工程余泥渣土绿色高效处置利用关键技术研究	10
2.2.1 工程余泥、渣土新型固化剂研发及固化土制备技术	10
2.2.2 余泥渣土回填造地规模化消纳技术	11
2.2.3 河道底泥农用规模化消纳技术	11
2.3 工程石粉开发高价值化绿色建材关键技术研究	13
2.3.1 石粉基高延性水泥基新材料关键技术研究	13
2.3.2 石粉开发 SPC 石塑复合材料关键技术研究	14
2.3.3 石粉在无机胶黏剂类粉材中的应用与研究	15
2.4 复杂条件大容量工程渣（土）场全生命周期安全保障技术研究	16
2.4.1 多组分、非均一渣土力学参数试验研究	16
2.4.2 复杂条件渣（土）场安全性态演化机理及稳定控制方法研究	17
2.4.3 工程渣（土）场全生命周期安全保障措施研究	17
三、项目实施方案	19
3.1 研究开发试验方法及技术路线	19
3.1.1 工程建设副产物绿色资源化处置统筹与智能调运关键技术研究	20
3.1.2 工程余泥渣土绿色高效处置利用关键技术研究	25
3.1.3 工程石粉开发高价值化绿色建材关键技术研究	31
3.1.4 复杂条件大容量工程渣（土）场全生命周期安全保障技术	35
3.2 本项目依托工程落实情况	41
四、项目研究开发组织和分工	43
五、预期成果	44
5.1 约束性指标	44
5.2 预期性指标	45
六、项目进度计划	46

一、概述

1.1 研究目的和意义

工程建设在消耗大量原材料和资源的同时，也会产生大量的固体废物，如余泥、渣土、石粉和建筑垃圾等，这些工程建设产生的固体废物可统称为“工程建设副产物”。

当前，我国仍处于基础设施建设的兴盛时期，据国家发改委公布的数据，当前我国大宗固废累计堆存量约 600 亿吨，年新增堆存量近 30 亿吨，其中工程建设副产物占据了可观的比例。据统计，2020 年我国大宗固废综合利用率不足 50%，而欧盟各国建筑垃圾资源化利用率达到 70%以上，日、韩、新加坡更是高达 95%以上。我国工程建设副产物仍然存在存量大会、产量大会、利用率低的问题。2021 年国家发展改革委、科技部等十部门联合发布《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》，要求全面提高资源利用效率，推动生态文明建设，促进高质量发展。《指导意见》指出，鼓励再生材料及制品在建筑工程和道路工程中的应用，要求新增大宗固废综合利用率达到 60%。浙江省对固体废物的处置提出了更高的要求，浙江是全国第一个以省政府名义部署开展全域“无废城市”建设的省份，为推动形成绿色发展方式和生活方式，持续推动废物源头减量和资源化利用，印发了《关于进一步规范建筑垃圾治理工作的实施意见（征求意见稿）》，明确定义了工程渣土、工程泥浆等在内的 5 类建筑垃圾，要求到 2025 年底，全省建筑垃圾处置能力充盈，建筑垃圾综合利用率达 90%以上，“减量化、资源化、无害化”等“三化”管理水平和数字化综合监管水平居全国前列。

结合我院实际，本项目具有三方面的研究意义：

- （1）面向可持续发展的市场需求。
- （2）面向投-建-营一体化商业模式的需求。
- （3）面向工程建设本身需求。

本项目研究遵循“减量化、资源化、无害化、产业化”原则，对标国内外标杆，聚焦研究余泥、渣土、石粉等工程建设副产物绿色资源化处置，形成工程建设副产物资源化利用的核心技术，并通过示范应用，研究成果达到国际领先水平。

1.2 国内外发展现状及水平

1.2.1 国外发展现状及水平

在工程建设副产物资源化利用研究方面，国外对建筑垃圾的研究开展得很早。在工程建设副产物处理和再利用方面，德国、美国、日本和新加坡等走在前列。

德国是世界上首个提出建筑废弃物回收再利用的国家，每个地区均有大型的建筑废弃物再加工综合工厂，其出台的《废弃物限制处理法》第一次引入了“源头预防”的理念，并明确了必须优先预防建筑废弃物产生及对其再生利用的原则。1994 年，出台《循环经济和废物管理法》规定了废弃物处置的“3R”原则，即减量化（Reduce）原则、再利用（Reuse）原则和再循环（Recycle）原则。该原则注重源头控制，并将避免工程建设副产物的产生放在首位，其次是考虑对其进行再利用和再循环，对于无法再利用和再循环部分，最后才可考虑填埋或焚烧。目前，德国的建筑废弃物回收再利用率高达 86%。

美国十分重视对工程建设副产物的利用与管理，并进行了长达一个多世纪的法律规范建设，逐渐形成了一系列可操作性强而又完整的管理措施及政策法规体系。主要做法包括：①综合利用。美国每年产生建筑垃圾 3.25 亿吨，占城市垃圾总量的 40%。经过分拣、加工，其再生利用量占 70%左右，剩下 30%的建筑垃圾进行回填处理。②分层次综合利用。最低层次是“低级利用”，占余泥渣土总量的 50%-60%，包含现场分拣利用及一般性回填等；其次是“中级利用”，约占总量的 40%，主要用作建材。③“四化”管理。围绕“减量化”“无害化”“资源化”与综合利用“产业化”建立完善的规范制度。此外，美国还将处理工程建设副产物作为一个新兴的产业发展领域，并对如何使工程建设副产物处理形成新的产业化进行探讨。

日本早在 20 世纪 90 年代初，在《资源重新利用促进法》中提出了“建设副产物”的说法，要求建筑施工期间产生的渣土、沥青混凝土块、混凝土块、金属及木材等“建设副产物”，必须经过“再生资源化设施”进行处理，同时详细规定了各类废弃土的性质与用途去向。此外，日本还大力投入建设副产物处理利用的相关技术攻关研究，并形成了整套建设废弃土及泥土改良处理工法。日本还提出“土方银行”的概念，并由中央政府实施强权管控，从而实现对余泥渣土收运的灵活高效运作及管理。根据日本国土交通省的调查数据，截至 2012 年底，日本建筑垃圾资源化利用率达到 96%；其中混凝土资源化利用率高达 99.3%。

新加坡对建筑垃圾的管理及综合利用推行垃圾处理“减量化、资源化及再循环利用”的原则。一是积极推进源头减量战略，并广泛奉行绿色建筑理念，通过执行余泥渣土处理收费减少建筑垃圾排放；二是实行建筑垃圾多级分类筛选和综合利用，以保证余建筑垃圾实现最大化的循环利用；三是实行特许经营制度，同时政府出台“低租金、长租期”等相关配套政策进行扶持，并将建筑垃圾处置情况及其循环利用情况纳入工程竣工验收考核范围；四是利用余泥渣土填海，其堆造的“实马高”岛屿形成了世界上第一个近乎全部为垃圾堆成的人工岛。2006 年，新加坡建筑垃圾产生量约为 60 万吨，其中 98%均进行处理，50%-60%完成了循环利用。

1.2.2 国内发展现状及水平

随着我国城市化建设进程不断加快，城市工程建设过程中的余泥渣土等工程建设副产物急剧增加。根据 2015-2020 年国家规划实施的地下空间开发规模，上海、广州、深圳和杭州等 7 个城市的开发规模增量均在 2000 万 m^2 ，超大规模的地下空间开发带来巨量的余泥渣土。

我国工程建设副产物资源化的研究和应用推广起步较晚。自 2005 年我国制定《城市建筑垃圾管理规定》以来，一系列的法律、法规及相关政策文件开始陆续颁发。2016 年以来，国家多次提出加快推行城市建设垃圾源头分类的管理制度，并在广泛应用范围内试点和推广，并于 2019 年推出了“无废城市”建设实施试点方案。《方案》中明确提出，开展城市建筑垃圾的分类治理，提高垃圾源头减量及垃圾资源化利用水平。

然而，我国余泥渣土等工程建设副产物的处置手段仍然较为单一，回填、堆存、填埋还是目前最主要的处置方式。随着环保意识的提高、技术手段的进步、法律法规的完善及市场经济的引导，各地政府纷纷制定适合本区域工程特性和产业特征的绿色处置和资源化利用政策。2013 年以来，北京市、吉林省、广州市、深圳市等 25 个地方相继出台了建筑垃圾管理与资源化政策，对建筑垃圾的排放、运输、处置、监督及法律责任等做出了明确的规定。但多数还限于规范处置运输管理范畴，出台资源化利用具体政策的不足 30%。

目前，我国对工程建设副产物的综合利用率不到 5%。虽然在一些经济较发达城市，通过技术的驱动和政策的引导，出现了一些较为先进的资源化利用企业。如深圳市相继出现了多家建筑废弃物综合利用工厂和企业，作为示范推广项目，年处

理余泥渣土能力可达 30 万 m³。但总体而言，我国在国家层面的工程建设副产物资源化处置法律体系还不完善，标准体系尚未建立，处置技术相对落后。

1.2.3 国内外工程建设副产物资源化利用情况对比

根据发达国家的发展经验，工程建设副产物的高效、高值、高标准资源化利用，一方面有赖于装备制造、工程建造等领域的技术进步，以及管理和利用模式的创新。但另一方面，相关法律法规体系的健全、规范标准体系的完善，是持续推进工程建设副产物资源化利用发展的制度保障。工程建设副产物资源化利用的技术发展和制度建设，其核心内容都是围绕“减量化、资源化、无害化、产业化”的“四化”方向开展的。虽然我国工程建设规模体量很大，但在工程建设副产物资源化处置方面离国际先进水平仍有较大差距。

“十四五”规划明确提出“构建资源循环利用体系”，为实现全面推行循环经济理念，构建多层次资源高效循环利用体系，深入推进循环化改造，补齐和延伸产业链，推进能源资源梯级利用、废物循环利用，充分借鉴发达国家在工程建设副产物绿色处置和资源化利用领域的先进经验，加快形成符合具有中国特色、符合中国国情的自有核心技术体系与法律制度体系，是我国在工程建设副产物绿色处置及资源化利用方面需要长期坚持的事业。

1.3 拟解决的技术关键及创新点

本项目根据国内外相关研究进展及国内行业发展趋势，结合我院业务特点，针对工程建设副产物绿色资源化处置相关问题与难点进行研究和攻关，**拟解决的关键技术包括以下四个方面：**

（1）工程建设副产物绿色资源化处置统筹与智能调运关键技术研究

1) 系统研究国内外工程建设副产物绿色资源化处置相关标准发布、利用及实施效果，梳理各层级标准脉络，构建工程建设副产物分类处置及资源化利用标准；

2) 通过创新设计思路、施工工艺及优化设备配置等技术手段，解决工程建设过程中副产物的大产出量、环境破坏等问题，形成工程建设副产物绿色源头减量技术和前端处置系列技术；

3) 通过对工程建设副产物调运需求分析，构建考虑其质-量-时-空关系及资源化处置的项目群智能调配模型，形成工程建设副产物智能化运筹平台。

(2) 工程余泥渣土绿色高效处置利用关键技术研究

1) 通过工业废渣和工程石粉改性, 研发新型工程余泥和渣土固化剂, 通过“以废治废”模式, 形成成本经济、施工便捷的工程余泥、渣土固化工艺, 并开发相应的固化土制备技术。

2) 通过酸性土壤物理性质调节技术、土壤养分库改良技术和重金属钝化技术的研究, 解决大体量酸性土壤的经济型改良问题及河道底泥的大规模消纳利用问题, 形成“以废治废”的河道底泥良性处理模式。

3) 通过余泥渣土的生态回填技术, 对矿坑修复的同时, 实现复绿复耕和余泥渣土协同消纳, 通过“以废治废”的方式, 实现余泥渣土规模化利用。

(3) 工程石粉开发高价值化绿色建材关键技术研究

1) 基于不同掺量下工程石粉对高延性水泥基新材料工作性能、力学性能和耐久性能的影响研究, 提出石粉基高延性水泥基新材料制备关键技术, 形成工程石粉在高延性水泥基新材料中的资源化高值利用技术。

2) 采用工程石粉制备 SPC 石塑复合材料, 研究石粉表面改性技术, 实现石粉在石粉-PVC 热熔共混体系中的分散均匀, 明确石粉的最佳掺量和细度要求, 形成 SPC 石塑复合板材和管材生产工艺。

3) 采用工程石粉制备建筑室内室外用腻子粉, 明确石粉的最佳掺量和细度要求, 形成工程石粉在无机胶黏剂中的资源化利用技术。

(4) 复杂条件大容量工程渣(土)场全生命周期安全保障技术研究

1) 针对水电水利、矿山、城市建筑与市政工程等不同类别的渣场, 分类开展多组分、非均一渣土力学参数试验研究, 提出典型的余泥渣土物理力学参数集。

2) 针对高含水率渣(土)快速堆填加载、暴雨入侵、沟水入渗等复杂边界条件及填料性能, 开展渣(土)场安全性态演化机理及稳定控制方法研究, 采用随机有限元分析和长期观测等手段, 实时掌控消纳场安全性态的时空演化规律, 为消纳场设计、长期稳定性分析提供依据。

3) 针对大型渣土消纳场安全隐患大、破坏能力强等问题, 开展大容量渣(土)场全生命周期安全保障措施研究, 建立消纳场灾害预警机制。

本项目的创新点包括以下几个方面：

（1）通过创新设计思路、施工工艺及优化设备配置，形成工程建设副产物绿色环保前端处置及减量化技术体系；构建考虑工程建设副产物质、量、时、空关系及资源化处置的项目群智能调配模型。

（2）通过“以废治废”新模式，研发工程余泥和渣土的高效、经济固化技术，及余泥渣土的规模化消纳利用技术。

（3）通过高延性混凝土、石塑复合材料、无机胶黏剂等材料和产品研发，实现工程石粉绿色资源化高值利用。

（4）建立多组分、非均一渣土力学参数集，开展复杂条件渣（土）场安全性态演化机理及稳定控制方法研究，提出大容量渣（土）场全生命周期安全保障技术。

华东勘测设计研究院有限公司

二、项目研究内容和目标

2.1 工程建设副产物绿色资源化处置统筹与智能调运关键技术研究

工程建设副产物目前的主要处置方式仍以回填、填埋和堆存等为主。这些“迁移性”的处置过程，不仅产生高昂的运输成本，而且运输过程还会增加城市交通压力，引起噪声、扬尘等环境污染问题。本课题通过工程建设副产物分类标准的完善和智能调运平台的构建，建立不同尺度的供求网络，优化不同类型工程建设副产物的去向。通过工程建设副产物“质-量-时-空”关系的建立，提高处置效率，降低处置成本，在城市工程建设领域具有广阔的市场前景。

2.1.1 工程建设副产物分类处置及资源化利用标准体系构建

（1）工程建设副产物分类处置及资源化利用法律法规和标准规范数据库构建

收集整理国内外工程建设副产物（包括建筑垃圾、余泥渣土、河库底泥、工程石粉等）分类处置及资源化利用相关的法律法规和标准规范，梳理各层级脉络，建立相关法律法规和标准规范，及其发布、利用及实施效果等相关信息的数据库。

（2）工程建设副产物分类处置及资源化利用流程构建

在上述数据库的基础上，依据岩土工程、建筑工程、市政工程及环境保护等领域的相关要求，建立更加符合实际要求的工程建设副产物分类标准，结合工程建设副产物分类标准和工程实践，梳理各类工程建设副产物（包括建筑垃圾、余泥渣土、河库底泥、石粉等）分类处置及不同途径的资源化利用流程，建立全过程图谱，标记重要节点，明确全流程中涉及的关键技术及重要产品。

（3）工程余泥渣土分类处置及资源化利用标准构建

重点针对工程建设副产物中的余泥渣土，结合上述建立的余泥渣土分类处置及资源化利用流程，拓展和完善标准维度。在产生环节，制定针对不同类型余泥渣土产生的行为指南，为资源化利用创造有利前提条件；在处置环节，制定相关技术参数和设备选型规范，为处置过程提供保障；在利用环节，制定针对不同再生产品性能参数、应用范围和条件的规范，为再生产品应用提供指导；结合各环节关键工作，制定相应标准，促进将工程余泥渣土资源化利用纳入工程竣工验收的绿色节能评价部分。

2.1.2 工程建设副产物源头减量及前端处置技术研究

在现有技术基础上，通过理论分析、试验研究、深化总结，形成具有自主知识产权的工程建设副产物源头减量系列成套技术。并重点进行下列研究：

（1）工程泥浆绿色絮凝沉淀技术

针对盾构泥浆、钻孔泥浆、河道底泥、砂石废水等工程泥浆，开展基于磁絮凝的绿色高效泥水分离技术研究。检测泥浆的理化性质指标，根据不同泥浆的理化性质，筛选对泥浆具有良好沉淀作用的絮凝剂。选择不同磁种与筛选的絮凝剂进行复配使用，筛选出对各类泥浆絮凝作用具有良好强化作用的磁种。优化磁种与絮凝剂的配合比，确定复配絮凝剂的最佳比例和投加量。在此基础上，将絮凝剂和磁种混合反应，制备复合磁性絮凝剂，优化原料配比和反应条件，制备具有进一步絮凝强化作用，且回收方便的复合磁性絮凝剂。

（2）工程泥浆高效泥水分离技术

针对各类工程泥浆特性，基于高效磁性絮凝剂的研究，开发新型高效的快速沉淀和磁分离成套设备，强化工程泥浆的快速固液分离，并实现磁性絮凝剂的高效回用，降低工程应用成本。优化设备参数和工艺流程，形成工程泥浆绿色高效泥水分离成套技术。

（3）工程泥浆快速脱水固结技术

采用土工管袋技术，针对工程泥浆开展快速脱水固结研究。利用袋壁土工织物的过滤作用，通过重力作用和袋壁的张力，使泥浆快速脱水、排水。研究工程泥浆的理化性质与土工管袋相关参数的关系，优化药剂配方和设备选型，梳理总结土工管袋法实现泥浆快速脱水固结的现场施工工艺。

2.1.3 大体量工程建设副产物智能调配系统关键技术

（1）工程建设副产物智能调配管理模型

针对工程建设副产物，研究工程建设副产物分类处置方案。分析规划调配的供需匹配、时间变化、组合关系等特点，根据副产物分类处置流程，在一般的土石方平衡问题的基础上，建立考虑多项目、多物源、多处置方式以及工程建设副产物资源化和综合利用等特点的物料调配规划模型。建立适用于工程建设副产物规划调配问题的智能调配核心算法，求解工程建设副产物去向优化问题，建立组合优化的工程建设副产物调运去向方案。

(2) 工程建设副产物智能调运方案

采集、分析、应用工程建设副产物运输时间和路径管理的偏好，基于 WebGIS 和城市交通建立工程建设副产物运输路径规划模型，在调运去向方案建立运输路径规划模型。根据工程建设副产物供需平衡、资源化、运输和处置等多方面的费用和收益，根据前述建立的调运去向和路径条件，建立工程建设副产物调运方案的经济评价模型，评价并优化调运方案。以调运模型给出的规划路径作为参照，与实际运输路径对比，监管运输车辆的路径规范性，针对运输路径不规范的情况进行预警和统计。

(3) 工程建设副产物智能调配系统平台构建

综合采用三维虚拟现实技术，数据仓库技术，GIS 地理信息技术，数据挖掘技术等诸多先进技术于一体，构建集工程建设副产物分类处置标准、前端处置技术、智能调配、资源化利用等功能于一体的智能调配三维可视化系统平台，实现工程建设副产物的智能调配、资源的高效利用和运输车辆的有序管理。

2.2 工程余泥渣土绿色高效处置利用关键技术研究

工程余泥渣土的随意堆放，不仅造成环境污染和资源浪费，而且占用大量土地资源，造成工程成本大幅上升。工程余泥渣土由于工程性能差、成分复杂、产量高等问题，在资源化利用前，往往需要进行相应的前端处置，以达到可资源化利用的要求。本课题以工程余泥渣土为研究对象，对工程余泥渣土绿色前端处置到资源化利用的全过程开展研究，包括余泥渣土新型固化技术、余泥渣土回填造地规模化消纳技术、河道底泥农用规模化消纳技术等。

2.2.1 工程余泥、渣土新型固化剂研发及固化土制备技术

(1) 工程余泥固化剂配方研发

针对絮凝、脱水后的泥浆、淤泥及工程余泥（含水率 $>45\%$ ），研究镁基胶凝材料对其固化的效果和处置方法。考虑水泥掺量、 MgO-MgCl_2 摩尔比、养护模式和养护龄期等作用因素，以固化后材料的抗压强度等力学性能指标为参照，系统分析镁基胶凝材料对脱水泥浆、淤泥及工程余泥的固化效果和影响因素。

选取粉煤灰、矿渣、磷石膏等进行配比改性，研究混掺上述工业副产物对镁基胶凝材料对脱水泥浆、余泥和工程余泥的固化效果和影响规律。开展 X 射线衍射、扫描电镜和压汞等试验，揭示镁基胶凝材料改良余泥的水化产物形成、相变规律和孔隙结构等微观特征，阐明镁基胶凝材料固稳改良余泥宏观性能的内在机理。

(2) 工程渣土固化剂配方研发

以工程石粉（石灰岩石粉和凝灰石石粉）和工业废渣为主要原料，针对含水率 17-45% 的渣土，开展渣土固化剂研发。根据渣土的成分固相分析，针对性地添加钢渣、电石渣、木质素等成分进行调理，研究固化剂配合比、固化剂掺杂量、含水量等因素对固化渣土强度性质的影响，探讨干湿循环条件下固化渣土的耐久性。观察固化渣土微观形貌结构，分析其物相组成，检测表面官能团变化，探索渣土固化剂的主要固化机理，并研制高效渣土固化剂产品。

(3) 固化土制备技术研究

1) 就地固化处置技术

固化渣土用于道路等基础设施修建是一个消纳量巨大的途径，在需施工的道路上就地取材，使用现场的渣土、石粉，及少量工业废料，使用路拌法工艺，与固

化剂就地拌合，大幅降低材料运输成本。路面层直接使用碎石镶嵌、碾压，无需使用混凝土，并具有良好的地形条件及变形能力适应性。

2) 异地固化处置技术

该技术资源化利用工程渣土通过合理的固化剂添加和改性，基于均匀试验思想，研究成型压力、水玻璃等对免烧空心砖各项性质的影响规律。经厂拌法进行质量控制，研究不同拌合工艺对于固化产品的孔隙结构影响，充分提高均匀性另外结合现代制造技术调整工艺参数，优化产品性能。

2.2.2 余泥渣土回填造地规模化消纳技术

(1) 余泥渣土协同回填技术

研究采用工程泥浆、余泥渣土协同回填和真空堆载联合预压，解决多种类副产物联合消纳快速造地难题。解决城市缺少堆放地的问题，减缓了城市建筑废弃物的“围城之困”。将单一的矿坑生态修复、农田整治、建设用地“三治合一”。

(2) 余泥渣土回填污染勘测、阻隔技术

研究回填材料源头管控、回填地基污染扩散监测及阻隔控制技术，保障回填废弃矿坑再生农业用地土壤质量、建筑用地环境安全，为废弃矿坑复耕复绿提供便利，为当地创造土地，增加土地指标，消除安全隐患。

2.2.3 河道底泥农用规模化消纳技术

(1) 河道底泥对旱地红壤酸化阻控的影响机制和重金属钝化技术研究

针对旱地红壤酸度高的问题，采用河道底泥与有机物料复配的方式开展酸性红壤改良研究，并与无机碱性物质、微生物菌剂等配合施用，研究河道底泥对旱地红壤酸化阻控的影响效应与机制，并研发基于河道底泥的酸化土壤改良剂。

针对旱地红壤因 pH 降低而导致重金属生物有效性升高的问题，开展河道底泥与热解炭化物复配使用对旱地酸性红壤重金属的钝化效果研究。进行河道底泥及热解炭化物的复配施用和定向功能调控，强化河道底泥及热解炭化物对酸性红壤中重金属的固持能力，并研制对旱地红壤重金属具有高效钝化效果的河道底泥基土壤调理剂。

(2) 河道底泥对旱地红壤有机质提升与库容扩增的影响

针对旱地红壤有机质含量低的问题，开展河道底泥、有机肥、无机碱性物质、微生物菌剂等配合施用对土壤养分和有机质影响的研究；研究低产旱地红壤有机

质提升速度和提升空间，通过结构和质地改良增加其库容的途径，有效扩大其库容量，使土壤有机质含量维持在较高水平。

（3）河道底泥改良农用地的安全风险评价

针对河道底泥改良农用地的安全问题，对河道底泥改良土壤过程中相关污染指标，及作物体内重金属等相关指标进行检测，参照农用地环境安全和食品安全相关标准和要求，制定采用河道底泥改良农用地的安全风险评价方法，并制定河道底泥改良农用地的技术标准，提出用于农用地改良的河道底泥污染限值要求。

华东勘测设计研究院有限公司

2.3 工程石粉开发高价值化绿色建材关键技术研究

以矿山开发等弃置工程石粉（石灰岩石粉、大理岩石粉、凝灰岩石粉）为研究对象，开展石灰岩石粉、大理岩石粉和凝灰岩石粉在高延性水泥基新材料、新型建筑材料中的绿色资源化高值利用研究。实现工程石粉的多方向、多层次、多渠道综合利用，实现“变废为宝”的目标。

2.3.1 石粉基高延性水泥基新材料关键技术研究

（1）石粉制备中低强度（20~60 MPa）高延性水泥基新材料

1) 石粉特性评价。针对不同岩性石粉，检测其粒径分布、细度模数、比表面积、比重、液塑限、化学成分、矿物成分、游离云母含量等物化性能指标。研究其活性指数，形成用于制备高延性水泥基新材料的石粉特性综合评价方法。

2) 石粉细度与掺量研究。研究不同细度的石粉在不同掺量下，对中低强度高延性水泥基新材料工作性能和力学性能的影响，在工作性能和力学性能满足设计要求的前提下，确定石粉合适的细度与掺量。

3) 中低强度高延性水泥基新材料制备技术研究。研究 PVA 纤维掺量与中低强度高延性水泥基新材料力学性能之间的量化关系，研究在力学性能满足设计要求的条件下，PVA 纤维最低掺量。提出掺入石粉的高延性水泥基新材料流变性能调控技术方法，确保纤维的均匀分散。

（2）石粉制备高强度（60~100 MPa）高延性水泥基新材料

1) 石粉掺量研究。与中低强度高延性水泥基材料相比，石粉掺入对高强度高延性水泥基材料抗压强度的影响更大，同时由于高强度高延性水泥基材料配合比需要更低的水胶比，石粉掺入也会对工作性能产生显著影响。课题在石粉特性评价和满足工程设计要求的前提下，研究石粉掺入对高强度高延性水泥基材料工作性能和力学性能的影响，确定石粉的最佳掺量范围。

2) 高强度高延性水泥基新材料制备技术研究。研究 PVA 纤维和 PE 纤维制备高强度高延性水泥基新材料的性能指标，提出经济的纤维类型与组合方式。由于配合比采用低水胶比，其工作性能和流变性能调控难度更大。在中低强度高延性水泥基新材料工作性能和流变性能调控研究的基础上，重点研究高效聚羧酸减水剂在强度高延性水泥基新材料体系中对工作性能的调控效能，提出高效调控方法。

3) 石粉基界面过渡区微观机理研究。研究石粉掺量与纤维/基体界面微观力学参数定量关系,并基于微观力学设计理论,计算纤维/基体界面粘结最佳范围,基于材料性能设计要求,提出适合的石粉掺量范围,揭示石粉掺入对纤维/基体界面微观力学性能影响的机理。

(3) 石粉制备超高强度 (>100 MPa) 高延性水泥基新材料

1) 熔结凝灰岩石粉活性研究。熔结凝灰岩石粉化学成分独特,具有与粉煤灰相似的活性效应。采用熔结凝灰岩石粉制备超高强超高性能高延性水泥基新材料 (ultra-high performance concrete, UHPC) 具备一定的可行性。针对 UHPC 低水胶比特点,研究熔结凝灰岩石粉在 UHPC 低水胶比基体下的活性、反应程度及石粉对 UHPC 水化进程的影响,探明熔结凝灰岩石粉对 UHPC 强度发展的作用机理。

2) 超高强度高延性水泥基新材料制备技术研究。制备超高强度高延性水泥基新材料常用纤维为微细钢纤维 (SF 纤维) 及聚乙烯纤维 (PE 纤维),分析 SF 纤维和 PE 纤维制备超高强度高延性水泥基新材料的性能差异,基于工程设计要求,选择合适的纤维类型。根据紧密堆积理论模型,使得材料通过颗粒堆积达到最紧密堆积状态,确保熔结凝灰岩石粉、硅灰、粉煤灰等超小粒径掺合料以凝胶粒子形态填充于水泥颗粒间,进而发生火山灰效应,生成致密的水化硅酸钙,进一步降低内部孔隙,得到均匀致密的高密实材料,研制工作性能和力学性能符合性能设计要求的超高强超高性能高延性水泥基新材料。

3) 超高强度高延性水泥基新材料设计体系研究。结合混凝土密实堆积理论,熔结凝灰岩石粉、硅灰、粉煤灰等矿物掺合料在混凝土中的化学反应,研究 UHPC 力学性能提升方法,通过多种矿物掺合料类型,完善 UHPC 复合胶凝材料体系,在掌握材料工作性能、力学性能等多方面性能演化机理的基础上,实现 UHPC 性能综合提升和减少成本。

2.3.2 石粉开发 SPC 石塑复合材料关键技术研究

石塑复合材料 (stone plastic composite, SPC) 是以石粉 (CaCO_3) 和聚氯乙烯树脂 (PVC) 为主要成分,辅以多种助剂,在高温高压下挤塑而成的一种新型材料。由于 SPC 综合了 CaCO_3 和 PVC 的多重优势,与传统木质材料相比具有更加优异的理化性能。采用石灰岩/大理岩/凝灰岩石粉制备 SPC,从 SPC 石塑复合材料配比、石粉在 PVC-石粉共混体系中的作用机理以及 SPC 石塑复合板材和管材的加工

工艺三个方面开展研究。

(1) 石粉表面改性研究

针对石粉与 PVC 在加热混合时的团聚、分散不均的问题，探究石粉的表面改性技术，实现石粉在 PVC-石粉共混体系均匀分散效果。

(2) 石塑复合材料配比研究

分析石粉细度和掺量对 SPC 流变性能、力学性能（韧度、强度等）的影响，提出最佳的石粉细度和掺量。研究不同助剂（稳定剂、增塑剂、润滑剂、加工助剂等）对 PVC 和石粉共混体系流变性能、耐久性能、可加工性能的影响，提出 SPC 用助剂种类和掺量，形成石塑复合材料配比。采用 SPC 石塑复合材料生产 SPC 石塑板材和管材，开发相应的生产工艺。

(3) 石粉在 PVC-石粉共混体系中机理研究

研究不同岩性的石粉（石灰岩石粉、大理岩石粉、凝灰岩石粉）在 PVC-石粉共混体系的增强作用机理，揭示采用硅烷偶联剂或钛酸酯偶联剂分散石粉时，偶联剂表面基团与熔融 PVC 材料的化学间作用。

2.3.3 石粉在无机胶黏剂类粉材中的应用与研究

(1) 腻子粉配合比研究

以凝灰岩石粉作为矿物掺合料部分取代水泥，以石灰岩石粉和大理岩石粉为填料，结合羟丙基甲基纤维素（HPMC）和可分散性乳胶粉制备高粘结强度、高抗裂性能的室内/室外建筑用腻子粉。研究石粉的掺入对腻子粉试板外观、粘结强度、耐水性、抗渗性、初期干燥抗裂性、表干时间、打磨性等性能的影响；通过改变石粉的掺量和细度，研究石粉对腻子性能的影响；通过正交试验选择最佳配方，提出适用于制备腻子粉的石粉的性能指标。

(2) 石粉作用机理研究

从微观结构对腻子的性能进行深入研究，得出掺入石粉后腻子的微观结构与其宏观性能的关系，并探究其机理。

2.4 复杂条件大容量工程渣（土）场全生命周期安全保障技术研究

在对工程渣土资源化处置前，仍需将其运送到消纳场露天堆填。工程渣土组分和性质较为复杂，当采用堆填方式不当或遭遇强降雨入渗时，可能引发堆填体发生失稳并形成远距离滑动，存在巨大的安全隐患，严重威胁周围居民的生命财产安全。本课题以不同类别的工程渣场为依托，基于典型工程渣土物理力学参数试验成果，研究复杂条件大容量工程渣（土）场的安全性态演化机理及其稳定控制方法，提出工程渣（土）场全生命周期安全保障措施。

2.4.1 多组分、非均一渣土力学参数试验研究

（1）非均一渣土常规力学参数试验

在课题依托渣土消纳场布置一定数量的勘测点并钻孔取样，根据《土工试验方法标准》利用取回的渣土样品制作重塑土样，对非均一渣土物质的成分进行分析，开展含水率试验、固结试验、三轴剪切试验等一系列常规土力学试验，研究各消纳场内典型工程渣土的含水率、比重、粘聚力和内摩擦角等常规物理力学参数特性，编制典型工程渣土的物理力学参数资料集，为后续快速堆填和暴雨入渗等条件下消纳场边坡稳定性和滑坡机理分析提供计算参数。

（2）渣土长期稳定力学参数试验

消纳场长期运行过程中，由于水位升降、降雨、蒸发等原因，消纳场浅层的工程渣土处于干湿周期交替状态，干湿交替作用容易使土颗粒排列方式、孔隙结构等发生变化，劣化工程渣土的力学参数，严重时将影响堆填体边坡的变形和稳定性，甚至引发地质灾害。为此，根据钻孔采集的渣土制作重塑土样，在实验室内对土样进行多次干湿循环，对土样进行三轴压缩试验、SWCC 试验和直剪试验等力学试验，揭示多次干湿循环作用下渣土力学性能劣化机理，试验结果可用于验算工程渣土消纳场多次干湿循环、长期运行等条件下渣土劣化后的边坡的稳定性。

（3）非均一渣土参数随机场理论研究

利用随机场对渣土堆积体常规物理力学性质的空间变异性进行研究，得出典型工程渣土主要物理力学参数的均值、标准差、变异系数、概率分布规律等随机统计特征参数，基于上述研究基础对考虑工程渣土物理力学参数空间变异性的堆填体边坡变形统计特性进行研究。

2.4.2 复杂条件渣（土）场安全性态演化机理及稳定控制方法研究

（1）动态荷载作用下大容量渣土消纳滑坡机理研究

基于试验得到的渣土物理力学参数，根据消纳场的类型、堆置高度、堆置方式、工程渣土物理力学参数、现场查勘情况和地质勘察剖面，选择 2 条以上代表性消纳场边坡断面，利用 PFC 颗粒离散元法建立消纳场不同堆填阶段的边坡模型，基于 PFC 已有模型编写相关流-固耦合算法，实现消纳场边坡的流-固耦合行为，研究堆填体快速堆载-雨水入渗-临界稳定过程中边坡细观组构的变化，通过正反分析，总结消纳场发生失稳破坏的关键影响因素。

（2）暴雨触发消纳场滑坡机理分析

基于多孔介质饱和-非饱和渗流理论，采用 Geo-Studio 软件，通过多级建模，对降雨条件下具体边坡暂态渗流场和稳定性进行分析，研究降雨入渗过程及其对坡体渗流场的影响规律，揭示暴雨工况下雨水入渗渣土内部孔隙水压力变化过程。

（3）大容量工程渣（土）场滑坡成灾模式研究

基于前期得到的工程渣土常规物理力学参数和长期强度参数成果，采用 DAN-3D 或 GDEM 数值模拟软件，对人工堆填体发生高速远程滑坡时的运动距离、运动速度和覆盖区范围等灾害风险评估关键因素进行还原或预测，进而对大容量工程渣（土）场滑坡成灾模式进行研究。

（4）考虑随机特性的渣土堆积体安全性分析

采用局部平均细分法模拟各消纳场渣土物理力学性质随机场，计算各随机物理力学参数的统计特性以揭示工程渣土的空间变异性；将各消纳场渣土物理力学性质设为基本随机变量输入至有限元网格，采用将随机场模拟技术与有限元分析方法结合的随机有限元法（random finite element method, RFEM）对渣土堆积体的稳定性、渗透稳定性等进行分析，将计算结果与传统确定性分析方法得出的结果进行比较分析，提出考虑工程渣土空间变异性的渣土堆积设计理论。

2.4.3 工程渣（土）场全生命周期安全保障措施研究

（1）消纳场选址、体型布置原则及挡排措施研究

调研全球已发生消纳场滑坡灾害，结合数值分析等手段研究消纳场稳定的控制因素及影响规律，研究稀湿渣土排弃物堆排过程安全控制技术、深软地基消纳场堆排过程安全控制技术，提出大型城市消纳场选址、体型构造、挡排措施等结构设

计原则、消纳场滑移变形控制和安全运营的控制方法，规范城市渣土消纳场工程建设与运营管理，形成城市渣土处置相关指南、规程与规范。目前，项目单位正在参编《工程渣土堆填处置技术规范》（浙江省地方标准）、《城市渣土受纳场工程建设与运营管理技术指南》，现处于大纲编制阶段。结合本研究，将相关研究工作进一步细化，做到力学理论、计算分析、工程设计、施工验收、运营监测等方面的协调、可行，形成成套规范化技术体系。

（2）基于物联网技术的渣土堆填过程控制

利用物联网对堆填边坡进行监测，保证堆填边坡不陡于设计图纸要求坡度，临时边坡应满足自身稳定要求，确保施工人员设备安全；通过无人机携带 AI 识别摄像头，设计方量、粗粒渣土识别算法，对渣土类别对比确认；通过主要路口、堆渣点的视频监控、扬尘监测等设备实现厂区环境安全监测；构建渣土消纳场三维模型及运维平台，通过集成监测数据，实现渣土堆填过程的危险报警及堆填范围内严格分区、分期填筑。

（3）长期观测与预警机制研究

对消纳场进行长期观测，通过埋设张力计（量测吸力）、含水量探头、土压力盒、测斜管、雨量计及地表径流量计等，形成完整的监测系统。通过对降雨入渗测量，系统研究消纳场边坡中水分、孔隙水压力、应力状态及渣土变形规律，探究消纳场边坡中土-水相互作用机理，全面掌握消纳场变形、应力、水土作用实测数据；结合数值分析与监测成果，反馈分析消纳场边安全性态演化规律，初步建立消纳场滑坡预警机制，为后续消纳场监测设计合理性做原型复核、分析与总结。

三、项目实施方案

3.1 研究开发试验方法及技术路线

本项目总体技术路线如图 3-1 所示。

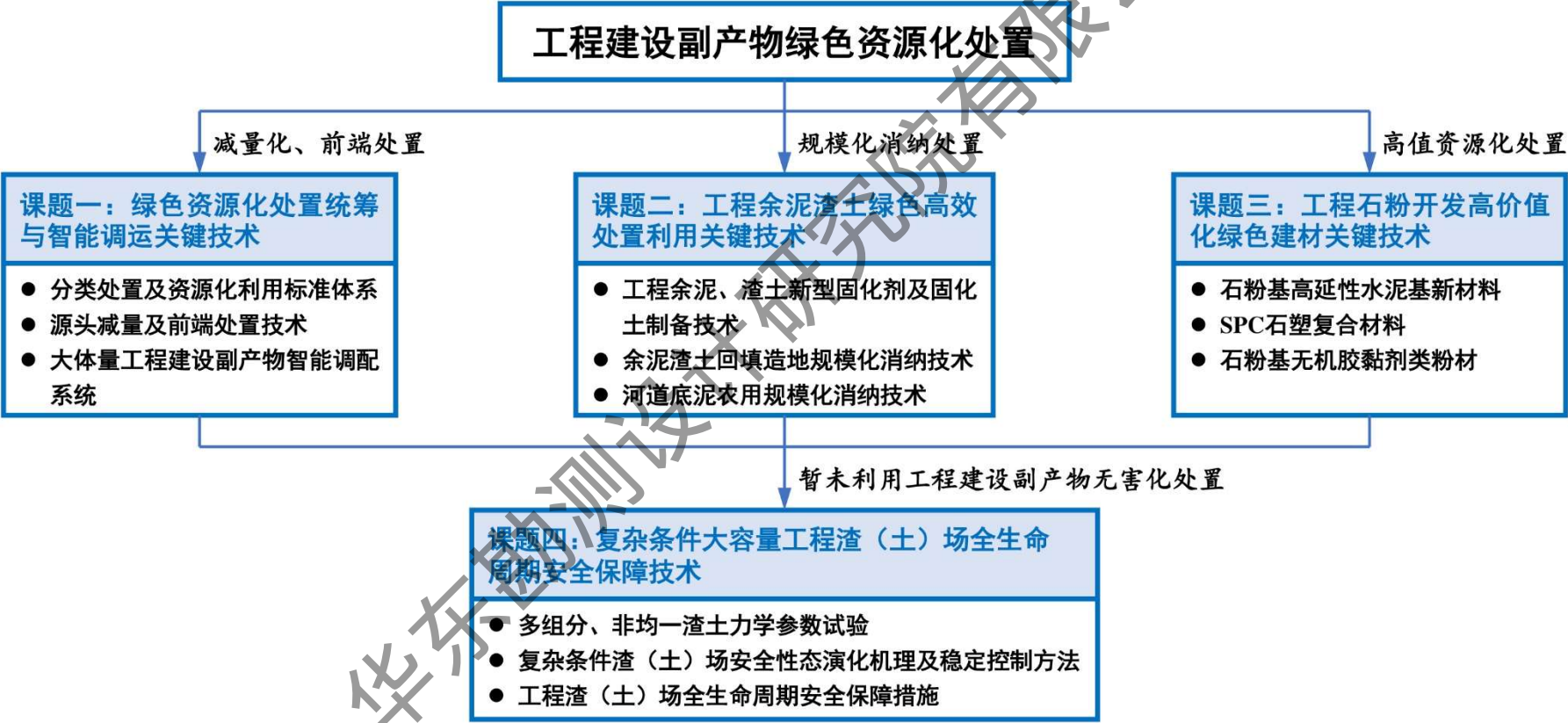


图 3-1 项目总技术路线图

3.1.1 工程建设副产物绿色资源化处置统筹与智能调运关键技术研究

3.1.1.1 课题一技术路线

在建立工程建设副产物绿色处置及资源化利用法律法规和标准规范数据库的基础上，结合工程实践，梳理各类工程建设副产物分类处置及不同途径的资源化利用流程，建立符合工程实际的余泥渣土分类标准。结合我院工程业务特点，重点针对余泥渣土，建立的分类处置及资源化利用流程，拓展和完善标准维度。进而开发工程建设副产物源头减量及前端处置技术，并构建工程建设副产物智能调配系统。

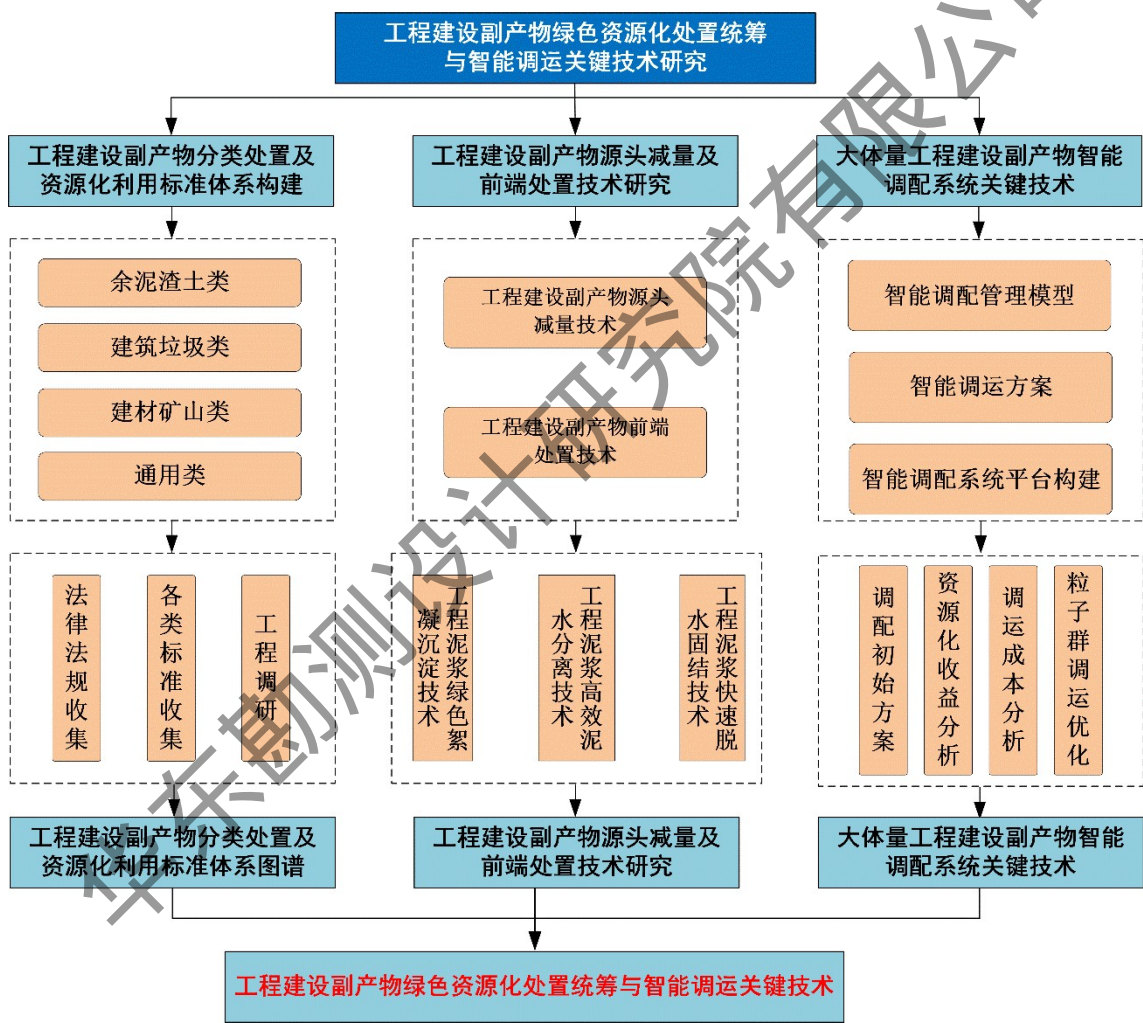


图 3-2 课题一技术路线图

3.1.1.2 课题一研究开发试验方法

(1) 工程建设副产物分类处置及资源化利用标准体系构建

1) 工程建设副产物分类处置及资源化利用法律法规和标准规范数据库构建

① 从国家法律、行政法规、各省市地方性法规三个层次，收集整理国内有关工程建设副产物的法律、法规，如《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》（国家法律）、《城市建筑垃圾管理规定》（行政法规）、《浙江省固体废物污染环境防治条例》（地方性法规）等；收集整理发达国家关于工程建设副产物的法律法规，如《固体废弃物处理法》（美国，1965）、《废物处理法》（德国，1978）、《资源重新利用促进法》（日本，1991）、《建筑垃圾再生促进法》（韩国，2003）等。

② 从国家标准、行业标准、地方标准、团体标准和国外标准等五个层次，收集整理国内外关于工程建设副产物的标准规范，如《工程施工废弃物再生利用技术规范》（GB/T 50743-2012）、《建筑垃圾处理技术标准》（CJJ/T 50743-2019）、《工程渣土免烧再生制品》（JG/T 575-2020）、《建筑垃圾再生材料公路应用设计规范》（DB61/T 1175-2018）、《建筑垃圾再生骨料应用技术规程》（T/ZS 0164-2020）、日本工业标准《Recycled aggregate for concrete class H》（JIS A5021:2005）等。

③ 梳理各层级法律法规和标准规范脉络，根据表 3-1 所示分类体系进行管理，建立相关法律法规和标准规范，及其发布、利用及实施情况等相关信息的数据库，设置上传、下载、检索、条目对比等功能模块。

2) 工程建设副产物分类处置及资源化利用流程构建

① 在已有分类标准的基础上，结合岩土工程、建筑工程、市政工程及环保等领域的相关要求，建立符合不同处置方式和资源化利用要求的工程余泥渣土多级分类体系（如图 3-3）。包括：**一级分类标准**。通过现场地质调查和鉴别，按产生的位置和来源等进行初步定性分类，如泥浆、淤泥、黏土、砂土、砾石、卵石、杂填土等，通过一级分类初步区分余泥渣土的基本类别和成分，为初步评估其再生资源化利用潜力提供直观的依据。**二级分类标准**。在一级分类基础上，通过现场快速检测，按照块状物（石块、砾石、砂、卵石等）与土的比例将其划分为 3 类：以块状物为主的渣土、以土类为主的渣土、土和块状物含量相当的渣土。同时，结合块状物的级配特征，对上述分类进行细化。**三级分类标准**。在上述两级分类基础上，通过进一步采样分析，确定土体材料性能指标，按照物理力学特征（如依据比重、天

然含水率、粒径、液限、塑限、塑性指数、最佳含水量、颗粒筛分、抗剪强度、CBR值、易溶盐量等）进行细分，建立各类细粒渣土的性能特征与资源化利用要求之间的关系，确定上述两级分类未能达到应用要求时需要采取何种改进措施对其进行处理。应用各级分类指标对样品进行快速定性命名，提供较为精准的材料性质和性能指标，为现场踏勘、取样分析、工程评估和后期利用提供详实、直观、准确的分类判据。在三级分类体系的基础上，通过大量工程的分类实践，建立余泥渣土的性能特征与资源化利用途径间的关联，形成余泥渣土标准化分类体系。



图 3-3 余泥渣土多级分类体系示意图

②结合工程建设副产物分类标准和工程实践，梳理各类工程建设副产物（包括建筑垃圾、余泥渣土、石粉等）分类处置及不同途径的资源化利用流程。建立从副产物源头产生到运输（输送），再到前端处置，以及最终进行资源化利用或再生产品应用的全过程图谱，标记重要节点，明确全流程中涉及的关键技术及重要产品。

3) 工程余泥渣土分类处置及资源化利用标准构建

重点针对工程建设副产物中的余泥渣土，充分结合上述建立流程，在工程建设副产物分类处置及资源化利用的各个环节，制定相应的标准规范，从全过程拓展和完善标准纬度。在生产环节，制定针对不同类型余泥渣土产生的行为指南，并明确不同作业类型或施工工艺产生的余泥渣土的性质及资源化利用的途径，为资源化利用创造有利前提条件。在处置环节，根据副产物的理化性质、产生位置、产生量，以及处置要求等条件，制定相关处置技术参数设置和处理设备选型规范，为处置过

程的稳定进行提供保障。在利用环节，针对不同再生产品性能参数、应用范围和条件等，制定相应的产品标准，为再生产品的应用提供指导；最后，将工程余泥渣土资源化利用环节纳入工程竣工验收，作为工程绿色节能评价的重要组成部分，并根据资源化利用率、再生产品附加值、经济效益、环境效益等关键指标，制定相应的验收和评价标准。

(2) 工程建设副产物源头减量及前端处置技术研究

1) 工程泥浆绿色絮凝沉淀技术

检测泥浆比重、含水率、粒度组成、矿物组成、机质含量、Zeta 电位、pH 值、重金属含量，检测不同类型泥浆（盾构泥浆、钻孔泥浆、河道底泥、砂石废水）的理化性质，初步筛选适用的絮凝剂，并以泥浆沉降速率、絮体体积、絮体密度等指标为参照，确定最佳絮凝剂。

选择不同的磁种与上述最佳絮凝剂进行复配使用，以泥浆絮凝沉降速率、絮体体积、絮体密度等指标为参照，筛选出对泥浆絮凝作用具有良好强化作用的磁种。优化磁种与絮凝剂的最佳配合比，结合应用成本，确定复配絮凝剂的最佳配置方案和投加量。

在上述基础上，将絮凝剂和磁种进行混合反应，制备复合磁性絮凝剂，优化添加剂和原料配比、反应条件，制备具有进一步絮凝强化作用，且回收方便的复合磁性絮凝剂。

2) 工程泥浆高效泥水分离技术

针对工程泥浆特性，设计新型“斜板沉淀+电磁铁”分离设备，开展中试试验，根据固液分离效率，优化斜板角度和密度，及电磁铁磁力强度，确定工艺参数，实现泥浆的快速沉降和高效固液分离。

3) 工程泥浆快速脱水固结技术

通过泵送系统将工程泥浆灌入具有较土工管袋中，利用袋壁土工织物的过滤作用，通过重力和袋壁的张力，使泥浆快速脱水、排出。根据现场条件及泥浆的含水率（含泥率）、透水性、土颗粒级配特征及泥浆处理量等参数，定制管袋尺寸、材质等工艺参数，优化脱水效率，实现规模化处理。

(3) 大体量工程建设副产物智能调配系统关键技术

1) 基于群智能算法的工程建设副产物的调配多目标优化模型

通过分析相关影响因素，确定目标函数和搜索优化解算法，通过设置约束条件和边界条件组合，假设非劣解，选取合适的群智能算法实现演化迭代，建立城市建筑工地工程建设副产物资源化调配优化模型。再以此为基础，实现工程建设副产物的调配多目标优化系统。

2) 基于 WebGIS 技术的工程建设副产物运输的路线规划

在进行运渣路线规划时考虑城市功能分区、人口分布、道路条件等因素，以期减少扰民、避开居民区和商业区、降低施工影响，综合确定运渣线路，引入 WebGIS 技术，通过嵌入百度地图或者高德地图等主流 GIS 平台获取道路信息，并施加路线限制等相关信息，代入路径优化模型，综合优化运渣路线。

3) 元素化报表引擎

工程建设副产物的调运任务需要报表系统管理物料的来源项目、种类、数量、去往项目、路径、执行人等基本信息。各项目、地区的管理报表可以认为是这些基本信息组成的表单，只是形式和布局不同，但其实表单项、工程数据信息是基本一致的。一方面建立报表，一方面建立报表元素集，进而建立通用的模板+报表元素的填表逻辑模板，并使用云端系统实现。用户可事先定制用户流程、表单格式和填表内容，使用中只要选择有限的键信息即可生成报表。

3.1.2 工程余泥渣土绿色高效处置利用关键技术研究

3.1.2.1 课题二技术路线

以工业废渣、工程石粉、镁基胶凝材料等为主要原料，研发新型余泥渣土固化剂，分析固化机理，并开展固化剂工程应用工艺研究，路拌法处置和厂拌法处置技术，形成成套余泥渣土固化剂配方及固化土制备技术。另外，通过余泥渣土回填造地技术和河道底泥农用规模化消纳技术，形成余泥渣土规模化消纳技术。

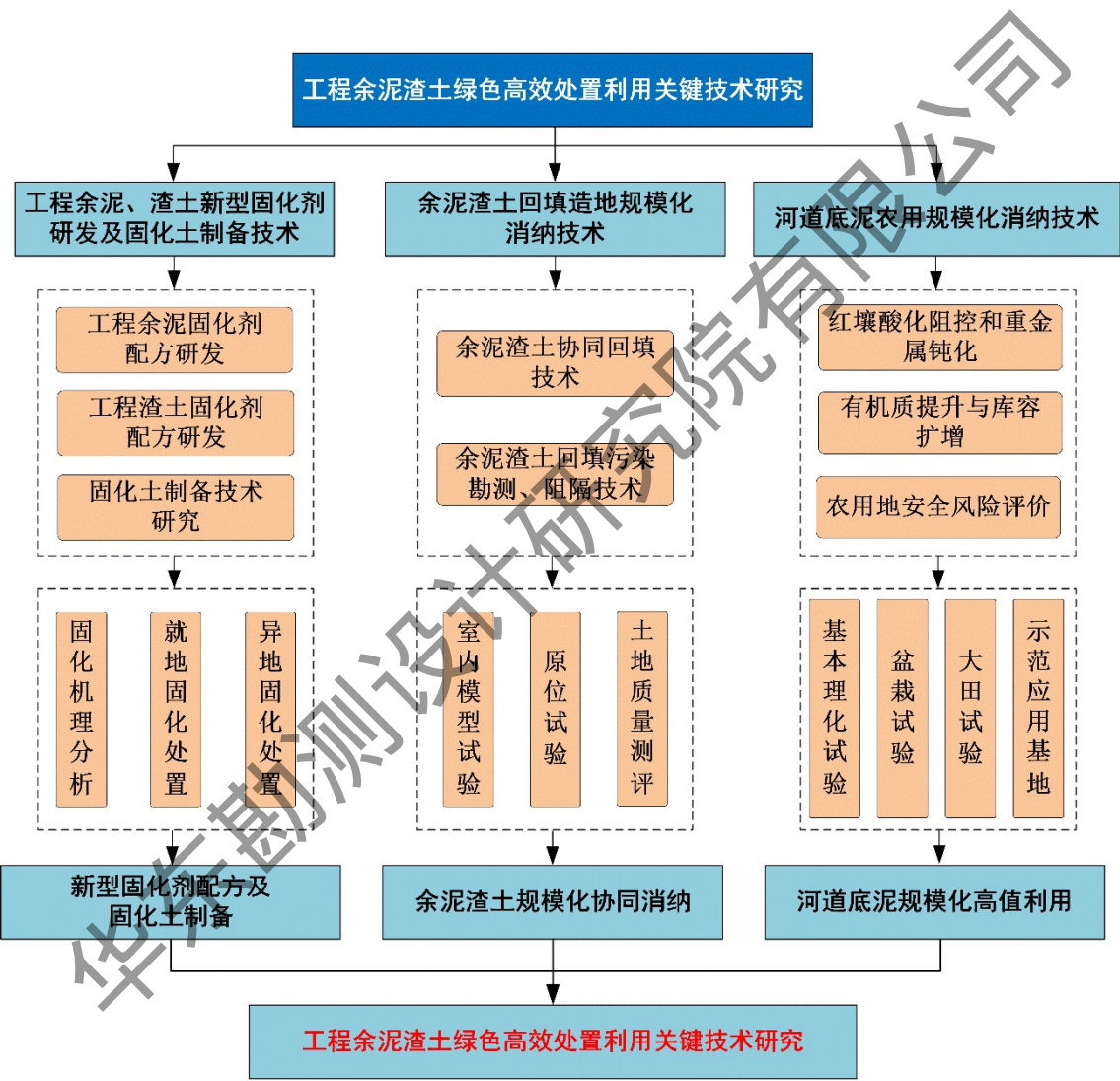


图 3-4 课题二技术路线图

3.1.2.2 课题二研究开发试验方法

(1) 工程余泥、渣土新型固化剂研发及固化土制备技术

1) 工程余泥固化剂配方研发

① **固化性能研究**。考虑水泥掺量、 MgO-MgCl_2 摩尔比、养护模式和养护龄期等作用因素，以固化后材料的抗压强度等力学性能指标为参照，系统分析镁基胶凝材料对工程余泥的固化效果和影响因素。

② **固化机理研究**。选取粉煤灰、矿渣、磷石膏等进行配比改性，研究混掺上述工业副产物对镁基胶凝材料对工程余泥的固化效果和影响规律。开展 X 射线衍射、扫描电镜和压汞等试验，揭示镁基胶凝材料改良余泥的水化产物形成、相变规律和孔隙结构等微观特征，阐明镁基胶凝材料固稳改良余泥性能的内在机理。

③ **稳定性研究**。采用冻融循环、干湿循环、海水侵蚀等多种类型的模型试验，模拟复杂气候及腐蚀环境对镁基胶凝材料处置改良工程余泥的侵蚀破坏过程；以质量、体积、强度等物理力学指标为参照，定量评价镁基胶凝材料改良余泥土的长期稳定性；探索复杂环境诱发的改良土的宏观性状演化作用机制，从而满足高含水率余泥资源化利用所需要的强度、刚度、耐久性等工程服役性能要求。

2) 工程渣土固化剂配方研发

① **渣土采样方案**。选择杭州 5 个典型渣土消纳场，采集 3 种典型渣土：硬壳层黏土、淤泥质黏土、淤泥夹粉砂。每种渣土在每个渣场设 10 个取样点，每个取样点采集 2 kg 渣土，共采集 300 kg，混合均匀后进行后续测试。

② **渣土环境土工特性分析**。对采集的三种渣土进行环境土工特性分析，包括：液塑限测定、颗粒分析、击实试验、比重测试、渣土物相分析、重金属含量分析。

③ 渣土固化剂配合比设计及性能测试

固化剂种类及配合比设计（单掺试验）：固定水泥掺量为 5%，以石粉、矿渣、钢渣和石膏作为添加剂单独添加，掺杂量设为 5%、10%、20%，以 NaOH 为碱激发剂，碱激发剂的掺量设为 10%，并在最佳含水率和最大干密度时用静压压实成型。养护温度为 20℃，养护时长为 7 d，初步分析各工业废渣对不同母土种类的影响规律，确定其掺量的范围。

固化剂优化配比试验：根据单掺杂试验得到的各组分对于不同母土种类的渣土固化规律，选择适合于特定母土种类的两种或者三种工业废渣（A、B、C）进行

复合掺杂试验，掺杂配比和掺杂量见表，以 NaOH 为碱激发剂，碱激发剂的掺量设为 10%，并在最佳含水率和最大干密度时用静压压实成型。养护温度为 20℃，养护时长为 7 d，优化固化剂配比，确定其掺量。

碱激发剂种类及掺量设计：根据固化剂优化配比试验，选择对于三种母土种类最佳的固化剂配比进行碱激发剂种类及掺量试验，碱激发剂的种类选择 NaOH 和 Na_2SiO_3 ，并在最佳含水率和最大干密度时用静压压实成型，养护温度为 20℃，养护时长为 7 d。

④ **固化性能测试**。对上述固化剂配比和掺量确定试验及碱激发剂种类及配比试验进行无侧限抗压强度测试、直接剪切试验及水稳试验测试。

⑤ **固化机理研究**。通过扫描电镜（SEM）、透射电镜（TEM）观察微观形貌结构，通过 X 射线衍射光谱（XRD）分析物相组成，通过红外光谱（IR）了解表面官能团变化，通过 Zeta 电位仪测试表面电位，从而分析探索高效固化剂的微观固化机理。

⑥ **固化产品安全性控制**。建筑渣土：消解后测试，筛选符合《建设用土地土壤污染风险筛选值》（GB 36600-2018）的渣土。工业废渣：依据《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》（GB 5085.3-2007）；固化产品：依据《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》（GB 5085.3-2007）。

3) 固化土制备技术研究

① **就地固化处置技术**。采取就地固化处理方式以提高渣土作为地基承载力和水稳特性，就地固化采用强力搅拌工艺。对具体的搅拌工艺（渣土干燥后与干燥固化剂加水拌和、固化剂预湿润后与渣土直接拌和，固化剂与渣土均预湿润后拌和），搅拌设备研究，另外对于固化剂的投加方式研究，致力于固化土制备的均匀性。

② **异地固化处置技术**。先将原土运至厂区，并添加上述固化剂进行拌和闷料，至一定含水率，含水量拟降至 25%、30%和 35%以下。利用破碎机对上述步骤中改良土进行破碎，获得粒径小于 1 cm 的土粒，并通过翻晒方式进一步降低土体含水率。待所得土粒含水率比最佳含水率高 2%-4%时，再添加一定配比固化剂拌合。拟设三种方式（渣土干燥后与干燥固化剂加水拌和、固化剂预湿润后与渣土直接拌和，固化剂与渣土均预湿润后拌和）拌和后进行压制定型，生产生态砌块。通过研究孔隙结构、固化土强度、水稳性等来评价固化土制备技术。

(2) 余泥渣土回填造地规模化消纳技术

依托北支江二期清淤底泥进行矿坑造地技术研究，核心研究内容为余泥渣土回填技术及回填污染勘测阻隔技术。主要通过场地勘测、土体有机重构工程、田间道路工程三个方面开展。

1) 场地勘测。详细查明拟建场地范围内地基土的类别、地层特征及分布规律，查明地下水的类型、埋藏条件及其变化幅度，划分场地土类型和场地类别，分析、论证渣土回填方案的可行性。

2) 土体重构工程。根据矿坑土体结构和土层厚度空间分布特征，应用适宜于矿坑土地整治的土体有机重构构建技术。关键技术在于工程渣土和工程泥浆互层回填和真空堆载联合预压，以解决工程泥浆单一回填形成沼泽地的问题。再发展回填材料源头管控、回填地基污染扩散监测及阻隔控制技术，以保障回填废弃矿坑再生农业用地土壤质量。

3) 田间道路固化工程。以工程建筑渣土为路基填料的田间道路工程施工流程：准备工作→测量放线（确定位置范围）→路基处理（工程建设渣土碾压）→检查路基质量→垫层压实→检查垫层厚度及平整度→砼面层摊铺路面→检查砼面层厚度及平整度→人工整修→养护→交工验收。

(3) 河道底泥农用规模化消纳技术

1) 酸化阻控影响机制研究。以河道底泥脱水处理后的泥饼为原料。利用扫描电镜分析和观察泥饼形貌特征；利用 XRD 分析仪对泥饼矿物成分进行表征；利用 TOC 分析仪测定泥饼有机碳含量；利用常规方法测定泥饼的养分含量。

采集由第四纪红土母质发育多年耕作的酸性红壤作为供试土，土壤经风干、研磨过筛后贮存并分析其理化性质。利用常规方法测定土壤机械组成、全量氮磷钾、土壤活性酸、土壤交换性酸、总有机质、CEC、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 和 Na^{+} 等交换性盐基含量和盐基饱和度。

供试土壤准备好后，将对红壤酸化有抑制作用的铁铝氧化物、石灰及磷石膏等无机碱性物质与泥饼以不同的比例添加到供试土壤中，研究泥饼-无机碱性物质的复合型酸性改良剂对红壤旱地酸性的阻控效应。为便于各种类型酸性改良剂作用效果间的比较，本试验设置泥饼单独施用的处理为对照。试验在温室大棚进行，根据前期试验初步结果，试验时间暂定为 140 天。试验结束后，采集土壤样品，利用常

规分析手段分析全量氮磷钾、土壤活性酸、土壤交换性酸、总有机质、CEC、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 和 Na^{+} 等交换性盐基含量和盐基饱和度，探讨泥饼酸性改良剂及不同添加比例对红壤酸化阻控的效应，并筛选出 2-3 种对红壤酸化阻控效果较好的泥饼-无机碱性物质的酸性改良剂。

2) 重金属钝化技术研究。采集由第四纪红土母质发育多年耕作的养分贫瘠、耕性不良的红壤作为供试土，土壤经风干、研磨过筛后贮存并分析其理化性质。将泥饼以不同添加比例与泥饼配合添加到供试红壤，研究泥饼复合调理剂对土壤重金属生物有效性的影响。为便于泥饼复合调理剂作用效果间的比较，本试验设置泥饼单独施用和不适用任何物质的处理（CK）为对照。试验在温室大棚进行，按前期试验初步结果，试验时间暂定为 210 天。试验结束后，采集土壤和作物样品，对比分析添加泥饼复合调理剂后，土壤和作物样品中的重金属浓度进行检测，探讨泥饼复合调理剂对红壤旱地重金属的钝化效果，并筛选 1-2 种对红壤重金属钝化具有良好效果的泥饼复合调理剂。

3) 旱地红壤肥力性状改良。采集由第四纪红土母质发育多年耕作的养分贫瘠、耕性不良的红壤作为供试土，土壤经风干、研磨过筛后贮存并分析其理化性质。利用常规方法测定土壤机械组成、全量氮磷钾、pH 值、总有机质、CEC、中微量养分等；利用湿筛法筛分水稳性团聚体；采用磷脂脂肪酸（PLFA）生物标记法测定土壤及不同粒径团聚体中微生物群落结构；利用氯仿熏蒸— K_2SO_4 提取法测定土壤及不同粒径团聚体微生物量碳和微生物量氮；参照《土壤酶及其研究方法》测定土壤及不同粒径团聚体中脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶、过氧化氢酶等酶活性。

将泥饼以不同的添加比例与中微量元素配合添加到供试红壤，研究泥饼复合调理剂对土壤团粒结构、微生物活性及养分状况的影响。为便于泥饼复合调理剂作用效果间的比较，本试验设置泥饼单独施用和不适用任何物质的处理（CK）为对照。试验在温室大棚进行，按前期试验初步结果，试验时间暂定为 140 天。试验结束后，采集土壤样品，对比分析添加泥饼复合调理剂后，土壤团粒结构、微生物及酶的活性、养分含量的变化，探讨泥饼复合调理剂对红壤旱地肥力提升的影响效果，并筛选 1-2 种对红壤肥力性状改良较好的泥饼复合调理剂。

4) 河道底泥对旱地红壤有机质提升与库容扩增的影响研究

通过设计与补充化肥综合试验、泥饼综合试验、泥饼调理剂综合试验、泥饼与

化肥及调理剂配合等田间小区试验，研究泥饼、调理剂的类型及施用方法对低产旱地红壤有机质的影响。试验前，采集各研究小区的基础土壤作为对照，土壤经风干、研磨过筛后贮存并分析其理化性质。利用常规方法测定土壤机械组成、全量氮磷钾、总有机质；利用 X 射线衍射分析技术分析粘土矿物组成；利用超声波振荡-重液法测定轻组、重组有机质含量、有机无机复合度及复合量；利用傅积平改进法测定各结合态腐殖质的含量；利用六偏磷酸钠分散法测定颗粒有机质含量。

按照田间试验的具体方案，将化肥、泥饼、泥饼复合调理剂等分别施入土壤后，研究不同类型泥饼对低产旱地红壤有机质含量和质量的影响。试验以油菜-玉米轮作的方式进行。试验结束后，采集各研究小区的土壤样品，对比分析各研究小区土壤有机质组分的变化特征，研究泥饼、调理剂的应用方法及其对土壤有机质累积、土壤有机碳组分变化等的影响，提出适宜低产红壤旱地有机质提升的泥饼、化肥、土壤调理剂使用的技术和方法，建立相应的技术模式。

3.1.3 工程石粉开发高价值化绿色建材关键技术研究

3.1.3.1 课题三技术路线

本课题研究内容主要包括三个方面：工程石粉制备高延性水泥基新材料、SPC石塑复合材料、石粉基无机胶黏剂类粉材。

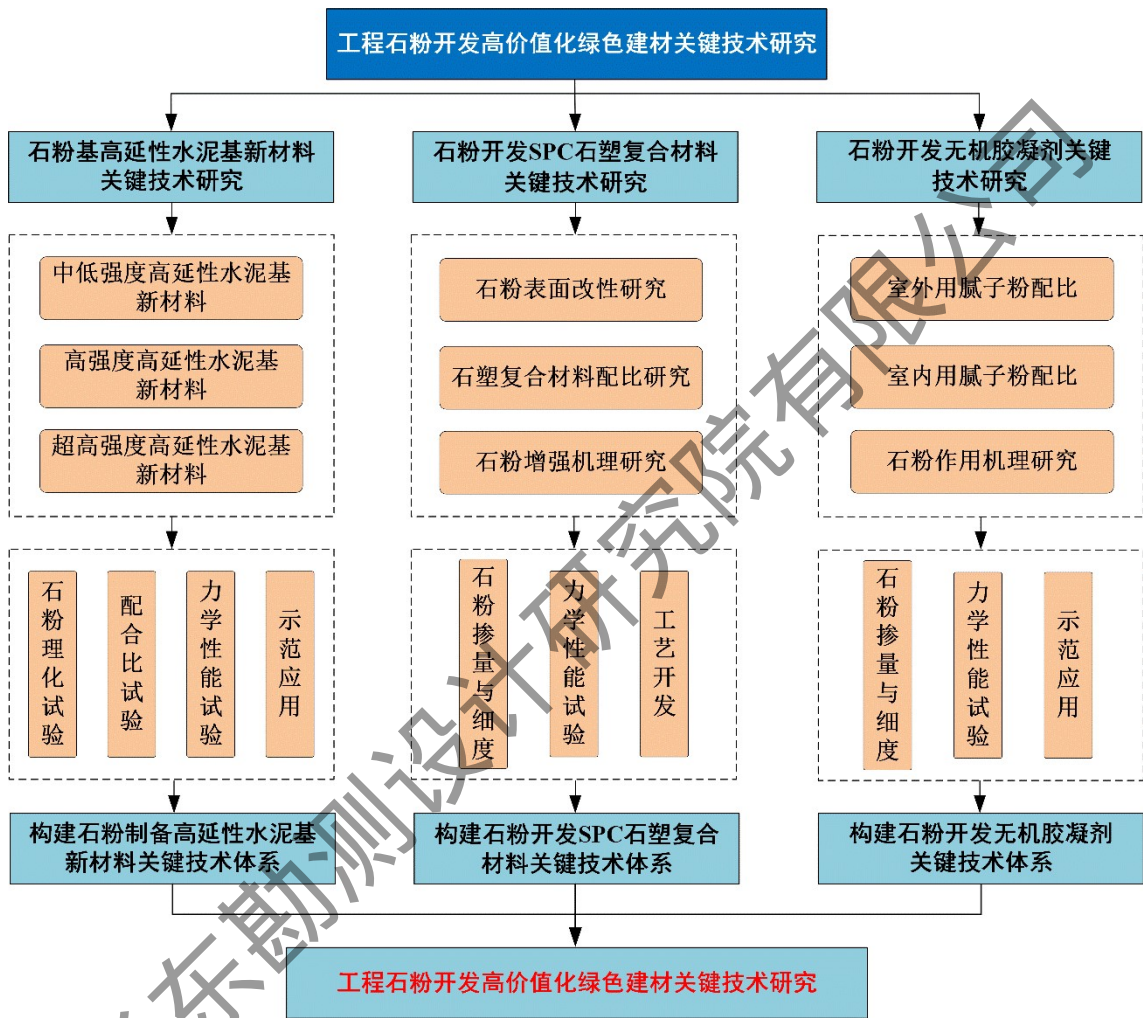


图 3-5 课题三技术路线图

3.1.3.2 课题三研究开发试验方法

(1) 石粉基高延性水泥基新材料关键技术研究

采用石粉作为矿物掺合料部分替代水泥、粉煤灰等胶凝材料，制备不同强度等级以及不同应变能力的高延性水泥基新材料。首先，依据 GB/T 51003-2014《矿物掺合料应用技术规范》对石灰岩石粉/凝灰岩石粉/大理岩石粉进行理化性能测试，测试项目如表 3-2 所示。

表 3-2 石粉理化试验项目

实验项目	性能指标	参数设置
石粉理化性质	粒径分布	石粉岩性和细度
	化学成分	
	比表面积	
	活性指数	
	密度	
	游离云母	

不同强度等级以及不同应变能力的高延性水泥基新材料的制备，采用高性能聚羧酸减水剂和羟丙基甲基纤维素复掺协同调控掺入不同石粉掺量的高延性水泥基新材料工作性能和流变性能，研制出中低强及高强高延性水泥基新材料和超高强度超高性能高延性水泥基新材料，其性能指标应满足下列要求：

① 力学性能指标要求：

中低强度高延性水泥基新材料抗压强度等级 C30，拉伸应变 0.5%、1.0%；

高强度高延性水泥基新材料抗压强度等级 C60，拉伸应变 0.5%、1.0%；

超高强度高延性水泥基新材料抗压强度等级 C100，拉伸应变 0.5%、1.0%。

② 配合比设计要求：

配合比中采用机制砂作为细集料，尽量选用粗机制砂；

配合比中采用石灰岩/凝灰岩/大理岩石粉作为矿物掺合料，掺量尽可能多。

中低强/高强/超高强度高延性水泥基新材料的基准配合比试验，在基准配合比的基础上，采用石粉替代水泥、粉煤灰、硅灰、矿渣等胶凝材料。通过初试优选出最佳的石粉类型，再通过拌和试验和力学性能测试确定石粉的细度和掺量。

本课题在试验研究方面，针对不同石粉掺量研制的高延性水泥基新材料，测试其抗压、单轴拉伸、四点弯曲、与既有旧混凝土的界面粘结等基本力学性能，评估高延性水泥基新材料基本力学性能是否满足设计要求；采用低收缩水泥（硫铝酸盐

水泥)、膨胀剂和减缩剂降低高延性水泥基新材料的干燥收缩,研究其最佳掺量范围,制备低收缩高延性水泥基新材料。本课题在理论研究方面,采用高延性水泥基新材料微观力学设计理论,从纤维、基体以及纤维/基体三个方面进行理论研究,一方面为高延性水泥基新材料研制提供理论指导,另一方面揭示石粉作用的微观力学机理。研究方案如下:

① **纤维性能优选及影响研究。**基于高延性混凝土微观力学桥联模型,定量计算不同纤维类型及长度下的复合材料纤维桥联应力 σ 与裂缝宽度 δ 本构关系;研究纤维类型及长度对纤维桥联应力、桥联余能和复合材料断裂能的影响;分析不同长度的纤维在拔出过程中的断裂效应以及在体积掺量一定的情况下纤维长度与纤维根数的关系,基于高延性水泥基新材料准则和能量准则所要求的应变硬化指数 PSH ,提供充足的纤维桥联能力富余量,确定纤维合适的类型和长度的最佳范围。

② **纤维/基体界面粘结特性优化及影响研究。**石粉的掺入会对纤维/基体界面粘结性能产生影响,进而改变高延性水泥基新材料宏观力学性能。基于应变硬化所要求的强度准则和能量准则,定义 $PSH_S < 1.0$ 和 $PSH_E < 1.0$ 对应的 τ_0 范围为无效的纤维/基体界面粘结; $1.0 \leq PSH_S < 1.5$ 和 $1.0 \leq PSH_E < 3.0$ 对应的 τ_0 范围为适度的纤维/基体界面粘结; $PSH_S \geq 1.5$ 和 $PSH_E \geq 3.0$ 对应的 τ_0 范围为最佳的纤维/基体界面粘结,明确最佳的纤维/基体界面粘结是实现高延性的必要条件。基于高延性水泥基新材料微观力学桥联模型,定量计算不同纤维长度下的复合材料纤维桥联应力 σ 与裂缝宽度 δ 本构关系,探究纤维/基体界面粘结对纤维桥联应力和桥联余能的影响机理,确定不同类型的纤维在桥联能力最大化时最佳纤维/基体界面粘结范围。

③ **基体设计研究。**在纤维长度和纤维/基体界面粘结强度优化设计后,基于高延性水泥基新材料强度准则和能量准则所要求的应变硬化指数 PSH 要求,确定基体的断裂韧性 K_m 和弹性模量 E_m 范围,为高延性水泥基新材料基体的设计提供理论指导依据。

(2) 石粉制备复合材料

采用石粉作为填料制备复合板材。通过调整石粉掺量和细度,合理选择助剂种类及掺量,制备复合材料,测试不同石粉掺量和细度下复合材料的流变性能、力学性能(拉伸性能、弯曲性能、抗冲击性能、握裹性能)、紫外线耐老化性能、高低温耐候性能。优化调控混料(热混温度、冷混温度)、挤出(挤出速度)、开发一套

板材的生产工艺流程。

(3) 石粉制备无机胶黏剂

采用石粉作为矿物掺合料或填料制备建筑室内用腻子 and 建筑外墙用腻子。采用熔结凝灰岩石粉和水泥复掺作为基料、调控熔结凝灰岩石粉和水泥的比例，以石灰岩石粉和大理岩石粉作为填料，调配羟丙基甲基纤维素（HPMC）和可分散性乳胶粉用量制备腻子。通过正交试验，测试在不同石粉细度和掺量下，腻子试板的外观、粘结强度、耐水性、抗渗性、初期干燥抗裂性、表干时间、打磨性等性能，在腻子粉性能满足设计要求的前提下确定石粉的掺量和细度，以此提出适用于制备腻子粉的石粉的性能指标。通过 XRD 和 SEM 等微观表征手段观察石粉引起的水泥水化产物的变化，通过 MIP 压汞测试石粉掺入引起的孔结构的变化，揭示宏观性能变化的机理。本项目制备的建筑室内/室外用腻子性能应满足标准要求：

建筑室内用腻子质量符合 JGT 3049-1998 《建筑室内用腻子》。

建筑外墙用腻子质量符合 JGT 157-2004 《建筑外墙用腻子》。

在基准配合比的基础上，采用石灰岩/凝灰岩/大理岩石粉作为填充料，通过初试从石灰岩石粉、大理岩石粉以及凝灰岩石粉中优选出最佳的石粉类型，再通过拌和试验和力学性能测试确定石粉的细度和掺量。采用石粉制备腻子粉，根据《建筑室内用腻子》（JGT 3049-1998）和《建筑外墙用腻子》（JGT 157-2004）标准要求，测试施工性、干燥时间、初期抗裂性能、打磨性、吸水性、耐碱性、粘结强度、柔韧性、动态开裂性等性能。

3.1.4 复杂条件大容量工程渣（土）场全生命周期安全保障技术

3.1.4.1 课题四技术路线

本课题采用工程调研、室内试验、现场试验、理论分析、数值模拟和现场监测相结合的方法开展研究。首先，对依托项目进行调研，在各消纳场布置勘测点进行采样，选取部分勘测点进行现场地基原位试验；随后，利用采集试样进行常规物理力学试验及长期稳定力学参数试验，建立典型渣土物理力学性质参数集。以此为基础，采用数值模拟（包括 PFC、Geo-Studio、DAN-3D、GDEM 和 RFEM），通过多级建模研究不同堆填阶段降雨入渗情况下堆填体边坡的稳定性和渗流场变化规律，揭示受液化效应触发的堆积体高速远程滑坡动力学特征，揭示大容量工程渣（土）场滑坡成灾模式。最后，对依托项目进行全生命周期安全监测，基于理论分析和现场监测数据，研究复杂条件大容量工程渣（土）场全生命周期安全保障措施，提出考虑随机特性的工程渣（土）场堆积设计理论。

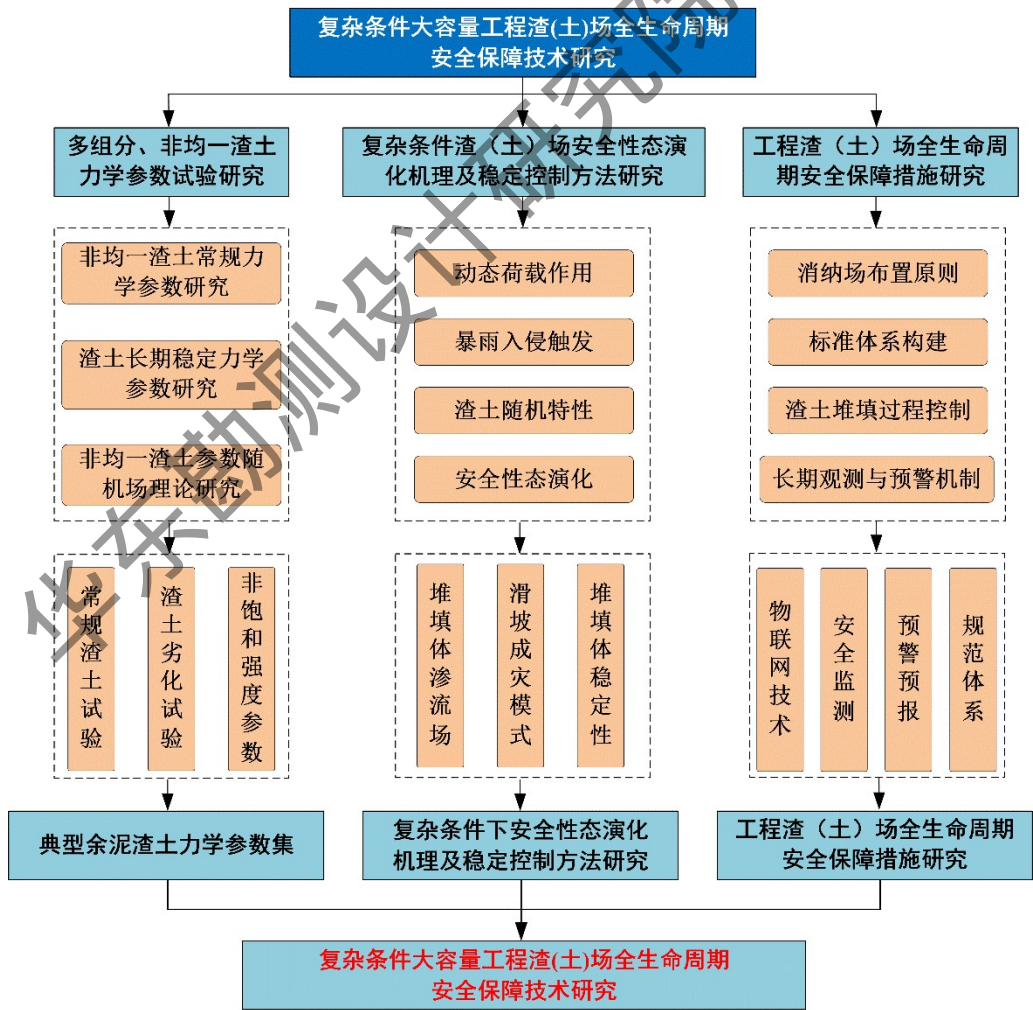


图 3-6 课题四技术路线图

3.1.4.2 课题四研究开发试验方法

(1) 多组分、非均一渣土力学参数试验研究

对富阳黄金坞、油树坞渣土消纳场、渝西工程渣场和 JPEJ 海腊沟渣场进行实地踏勘，根据现场堆填状态和堆积体形态，在消纳场布置勘察点进行表面取样和钻孔采样，钻孔后的圆柱形土芯应该全部带回。利用带回室内的土样，开展典型渣土物理力学参数试验，并进行多次干湿循环后渣土长期强度参数试验，用于验算大容量渣土消纳场多次干湿循环、长期运行等条件下渣土劣化后的稳定性。根据各消纳场渣土试验结果，建立多组分、非均一渣土物理力学参数集。此外，应该在现场选择部分勘察点进行重型圆锥动力触探和标准贯入试验，测试渣土消纳场的密实度和地基承载力。

表 3-3 工程渣土（场）相关调研安排

序号	调研目的	调研内容
1	渣（土）场建设资料收集	项目建设背景、消纳场周围地形图、代表性区域工程地质构造与地质勘察资料、渣土堆填总体规划图、工程渣土产量、渣土类别、渣土来源、典型意义降雨资料（包括降雨强度和历时）等
2	工程渣土（场）现场踏勘与典型渣土采样	渣土消纳场类型、堆填体分区、堆填体边坡高度、坡比、勘察点与长期监测点布设、表面取样与钻孔取样等
3	相关设计标准收集	渣场洪水设计标准、渣场安全稳定分析及设计技术标准、已建和在建工程不同型式排水方案及泥石流防治方法、渣场水土保持设施运行维护和生态修复措施等
4	渣（土）场长期运行管理资料收集	依托消纳场分级堆放资料、周围重要居民建筑分布、工程渣场沟水处理方式、渣场长期运行过程中气象要素观测数据、降雨极值特征统计数据；全球范围内消纳场滑坡灾害及事故致因、软土地基消纳场稳定的控制因素等
5	资源化利用途径	再生产品市场需求、处置及再利用相关政策规划、废弃矿山复垦状态、围垦区规模等

在工程渣土消纳场布置勘察点时，勘察点应沿倾倒方向按折线布设或在堆填体坡体按上、中、下部布设，典型布设方案如图 3-7 所示。布设的勘察点包括：表层渣土取样点、钻孔取样点、标准贯入试验点和圆锥动力触探点，各勘察点布设数量需要根据具体消纳场组分、消纳场分区、堆填体形态和堆填高度等确定。

根据我国东部沿海城市工程渣土特性研究成果，将依托富阳黄金坞、油树坞渣土消纳场余泥渣土类型分为 4 类；将渝西工程金岗沱泵站渣场工程渣土分为 3 类。

在每个渣土消纳场，按不同渣土类别分别布置勘察点，预期布置勘察点数量统计结果如表 3-4 所示。布置勘察点时，为了使 DPT、SPT 和钻孔取样测试结果可相互对比，DPT 孔与取样孔间隔不超过 5 m，DPT 孔与 SPT 孔位置间隔不超过 10 m。

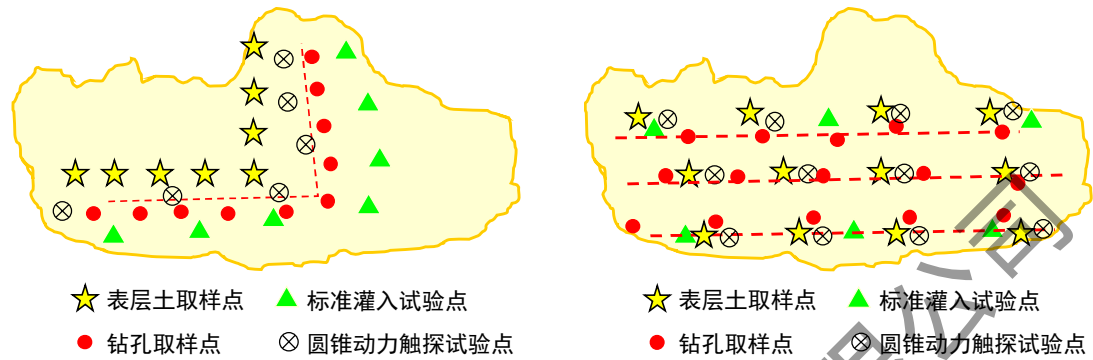


图 3-7 消纳场勘察点布置示意图：(a) 折线布置；(b) 上中下布置

表 3-4 工程渣土（场）勘察点布设一览表

消纳场类型	序号	勘察点类型	单位	单个消纳场工作量	总工作量	布设方法
富阳渣土消纳场	1	表层渣土取样点	个	12	24	沿倾倒方向按折线布设
	2	钻孔取样点	m/个	440/20	880/40	
	3	标准贯入试验点	个	4	8	根据现场堆积性质确定
	4	圆锥动力触探点	个	4	8	
金岗沱泵站渣土消纳场	5	表层渣土取样点	个	9	9	在消纳场上中下部均匀布设
	6	钻孔取样点	m/个	330/15	330/15	
	7	标准贯入试验点	个	3	3	根据现场堆积性质确定
	8	圆锥动力触探点	个	3	3	
JPEJ 海腊沟渣场	9	表层渣土取样点	个	9	9	在消纳场上中下部均匀布设
	10	钻孔取样点	m/个	180/9	180/9	

表层取样时，利用环刀法在渣土表层下部 0.5 m 处取样。钻孔取样时，取样点深度见表 3-5 所示，钻孔取得的全断面圆柱体土芯应带回，便于重塑土样的制作。

表 3-5 工程渣土（场）现场取样计划

序号	取样点类型	取样深度/m	单点取样数	取样总数
1	钻孔取样	0.8-1.0、1.8-2.0、3.8-4.0、5.8-6.0、7.8-8.0、9.8-10.0、11.8-12.0、13.8-14.0、15.8-16.0、17.8-18.0、19.8-20.0、21.8-22.0	12	768
2	表面取样	0.5	12 或 9	42

渣土室内物理力学试验用土样通过在各个渣土消纳场表层和钻孔采集重塑得到。利用重塑土样拟开展的室内试验、试验指标、具体试验方法、主要涉及的仪器设备和计划试验组数如表 3-6 所示。

表 3-6 非均一渣土常规物理力学参数试验计划

序号	试验名称	指标	试验方法	主要涉及试验仪器	土样说明	组数
1	含水率试验	水的质量分数	烘干法	电热烘箱、天平、台秤	钻孔土样与表层土样	40
2	密度试验	密度与干密度	环刀法	环刀、天平	钻孔土样与表层土样	40
3	比重试验	比重	比重瓶法	比重瓶、天平、恒温水槽、砂浴、温度计、筛	钻孔土样混合均匀，风干后碾碎制备重塑土样	36
4	颗粒分析试验	粒径分布曲线	筛析法	试验筛、天平、台秤、振筛机等	用四分法取风干松散重塑土样	36
5	界限含水率试验	塑限和液限	联合测定法	液塑限联合测定仪、试样杯、天平、筛等	天然含水率钻孔土样	36
6	击实试验	饱和含水率	轻型击实法	击实仪、台秤、标准筛	利用土芯制作不同含水率重塑土样	15
7	渗透试验	渗透系数	变水头试验	渗透容器、水头装置、秒表等	用环刀切取不同深度土芯制作原状土样，利用土样制备给定密度试样	33
8	固结试验	各级压力下孔隙比、压缩系数、固结系数与超静孔压	标准固结试验	固结容器、加压和变形测量设备、秒表、天平、刮土刀等	利用钻孔土芯制备给定密度和含水率扰动土样	22
9	三轴剪切试验	内摩擦角、粘聚力与孔隙压力	固结不排水剪切试验	应变控制式三轴仪、击实器、饱和器、负荷传感器、位移传感器、橡皮膜等	扰动土样直径 39.1mm，高度/直径为 2.0~2.5	48

拟开展的渣土长期强度参数试验安排见表 3-7、3-8 所示。

表 3-7 干湿循环作用下工程渣土水力-土力特性试验计划

序号	试验名称	测试指标	主要试验仪器	干湿循环次数	试样个数	试验组数
1	SWCC 试验	体积含水率	压力板仪、 Tempe 仪	0、3、6	12	H 渣场 2 组
2					12	Y 渣场 2 组
3					12	J 渣场 2 组
4					12	JP 渣场 2 组
总计					48	8
注：1. 每个试验工况制备两个相同的试样进行平行试验，试验结果取平均值；2. 需基于渣土体积含水率试验结果，利用有关数学模型拟合得渣土基质吸力，得到工程渣土的土-水特征曲线，进而计算多次干湿循环后渣土的强度参数。						

表 3-8 工程渣土长期强度力学参数试验计划

序号	试验名称	试验方法	测试指标	干湿循环次数	试样个数	试验组数
1	蠕变试验	直剪试验	蠕变应变	0、3、6	6	H 渣场 2 组
					6	Y 渣场 2 组
					6	J 渣场 2 组
					6	JP 渣场 2 组
总计					24	8
注：蠕变试验时采用分级加载方式施加荷载						

根据现场布设的原位试验勘察点，需要进行的原位试验安排如表 3-9 所示。基于现场原位试验结果，结合孔隙比和液限指数，根据 GB50007-2011《建筑地基基础设计规范》对消纳场的地基承载力进行评估。

表 3-9 消纳场地基承载力评估现场原位试验计划

试验名称	指标	主要涉及试验仪器	试验应注意事项	试验组数
标准贯入试验	贯入 30cm 对应锤击数、贯入深度	标准贯入器、落锤、钻杆、锤垫	土样应为原位土样，按 GB/T 50123-2019 中 45.3 节开展试验	11
轻型动力触探试验	动贯入阻力	动力触探仪、落锤、探头、触探杆	根据渣土组分合理选择动力触探仪，按 GB/T 50123-2019 中 47.3 节开展试验	11
总计				22

(2) 复杂条件渣（土）场安全性态演化机理及稳定控制方法研究

1) 动态荷载作用下大容量渣土消纳滑坡机理与暴雨触发消纳场滑坡机理研究。采用 PFC、GEO-Studio 和 DAN-3D 软件对渣土堆积体稳定性、渗流场和发生远程滑坡特征分析的流程如下：①根据消纳场类型、堆填体边坡高度、坡比、分级

堆放等情况，选择堆填体边坡剖面；②根据堆填记录，采用分级建模的方法建立典型堆填体边坡剖面模型；③利用分析软件对不同堆填阶段边坡模型施加渗流场，渗流场考虑普通降雨入渗和暴雨入渗情况；④进行数值计算，根据计算结果，指出堆填体在快速堆载和降雨入渗情况下边坡的稳定性、渗流场特征，分析边坡滑坡机理，研究消纳场受液化效应触发的高速远程滑坡动力学特征。

2) 考虑随机特性的渣土堆积体安全性分析。采用 RFEM 对渣土堆积体安全性分析的流程如下：①采用局部平均细分法模拟得到一组渣土主要力学参数随机场，即进行基本随机变量抽样；②将材料性质随机场映射（Mapping）至有限元模型上；③进行有限元分析计算，得出材料为随机分布时的渣土稳定性指标。重复上述步骤，直至计算得到的随机安全性分析结果样本达到统计稳定，即可得到安全性指标的均值、标准差及频率分布等统计特性。基于上述结果，对堆积体物理力学性质随机性的敏感性进行研究，据此提出渣土堆积体填筑设计理论。

(3) 工程渣（土）场全生命周期安全保障措施研究

针对大容量渣土消纳场和水电工程大型渣场安全隐患大、破坏能力强等问题，试验汇集典型的渣土物理力学参数集，采用随机有限元、安全监测等手段预测、实时掌控消纳场安全性态演化规律，提供消纳场设计、分析及预警方法，于结题前将试验方法、设计原则、安全监测及预警等方面纳入地方规范，并实现消纳场运行的工程应用。

渣土消纳场边坡长期监测系统流程如下：①根据渣（土）场边坡形态、堆积高度合理选择重要监测断面；②监测断面布设监测仪器；③确定渣土堆填范围内分区、分期填筑方式，将上述长期监测与定期监测数据集成至运维平台，并实现数据可视化、监测报警功能。详细监测仪器布置和仪器要求见表 3-10。

表 3-10 渣（土）场全生命周期现场监测方案

监测断面	监测内容	监测点位置	监测点数量	监测仪器或监测方法
沿消纳场最大堆高处	表面位移	马道以及监测断面左右两侧约 60 m 范围	每隔 1 级马道布设 1 个	交会法和三角高程法
	滑动变形	沿着监测断面马道均匀布置	4~8 根	测斜管
	浸润线	沿着监测断面马道均匀布置	4~8 根	测压管
	临空坡面变形	弃渣场旁适当位置	2 个	视频监控辅以无人机
	表面变形	渣场顶部	2 个	柔性测斜仪
	深部变形	渣场监测断面中部边坡内部	2 个	GPS 接收机

监测断面	监测内容	监测点位置	监测点数量	监测仪器或监测方法
	渗压	渣场监测断面中部边坡内部	2 个	渗压计
	土体含水率	渣场监测断面中部边坡内部	2 个	土体含水率自动监测仪
	土压力	渣场监测断面中部边坡内部	8 个	土压力计
注：除上述仪器外，还需读数仪、DTU 模块、无线终端和无线网关等设备。				

3.2 本项目依托工程落实情况

本项目主要依托北支江、之江路、长久灰岩矿、锦屏、金童山、大皇山等在内的 12 个工程，内容涵盖四个课题所需的应用研究场景，详见表 3-11。

表 3-28 项目依托工程落实情况

序号	项目名称	项目概况	依托内容
课题一：工程建设副产物绿色资源化处置统筹与智能调运关键技术研究			
1	北支江综合整治工程	本项目土石方总开挖量 411 万 m ³ ，总填筑量 211 万 m ³ ，疏浚河道底泥 70 万 m ³ 。	余泥、渣土前端处置技术研究。
2	之江路输水管廊及道路提升工程	其中隧道长度约 5.62 km，采用盾构隧道，内径 13.3 m，外径 14.5 m。采用管线、交通、景观三合一同步研究的建设方案。	余泥、渣土前端处置技术研究。
3	渝西配水工程	工程土石方开挖 1994.91 万 m ³ ，土石方填筑 1121.65 万 m ³ ，利用开挖料 1050.88 万 m ³ ，外借 70.76 万 m ³ ，弃渣总量 944.02 万 m ³ （折合松散方 1185.28 万 m ³ ），弃渣堆放在工程沿线 134 处弃渣场。	渣土消纳场调运系统构建。
课题二：工程余泥渣土绿色资源化利用关键技术研究			
1	北支江综合整治工程	本项目土石方总开挖量 411 万 m ³ ，总填筑量 211 万 m ³ ，疏浚河道底泥 70 万 m ³ 。	余泥渣土规模化消纳利用技术研究。
2	之江路输水管廊及道路提升工程	其中隧道长度约 5.62 km，采用盾构隧道，内径 13.3 m，外径 14.5 m。采用管线、交通、景观三合一同步研究的建设方案。	余泥渣土规模化消纳利用技术研究。
3	平阳县平宋塘河综合整治工程	工程清淤 14.57 万 m ³ ，拆除重建跨河桥梁 3 座、新建跨河桥梁 1 座、修缮跨河桥梁 1 座、新建支流人行桥 10 座。景观涉及河道总长 2.79 km。	河道疏浚泥浆快速泥水分离技术。
4	丽水城区排水防涝工程	本工程新建五桃隧洞长 2.75km，城门洞形隧洞，开挖洞径 3.5m×3.5m（宽×高）。	顶管施工泥浆快速泥水分离技术。
5	余杭区临平西大门综合整治项目	临平西大门综合整治工程拟结合余杭区星桥佛日坞矿坑进行渣土回填。其中 1#采坑占地面积约为 331.4 亩，蓄水深度约为 3~8m；2#采坑占地面积约为 108 亩，蓄水深度约为 50m。	矿坑回填造地技术等。

序号	项目名称	项目概况	依托内容
课题三：工程石粉绿色资源化高值利用关键技术研究			
1	池州长久（神山）灰岩矿项目	矿区面积 4.7299 km ³ ，开采矿种为水泥用灰岩、普通建筑骨料，矿产总储量 19.08 亿吨，设计开采规模 7000 万吨/年。	石灰岩石粉资源化利用及新型建筑材料研发。
2	白鹤滩旱谷地渣场项目	谷地料场原规划总开挖量约 1658 万 m ³ ，其中，灰岩有用料约 1390 万 m ³ （自然方），无用料约 268 万 m ³ （自然方），松方系数按 1.45 计，无用料弃渣松方为 388 万 m ³ ，石粉等生产废渣按 60 万 m ³ 计，共需规划容渣量约 448 万 m ³ 。	石灰岩石粉资源化利用及新型建筑材料研发。
3	锦屏海腊沟大理岩渣场项目	锦屏二级水电站厂房系统及部分引水隧洞等主体工程及临时工程的土石方开挖渣料弃置在海腊沟内，弃渣量约 500 万 m ³ 。	大理岩石粉资源化利用及新型建筑材料研发；水电渣场长期稳定性研究。
4	宁波金童山矿地综合利用项目	可开采石料储量约 6716.79 万 t，该区域的残山孤丘及矿底中深部资源进行整体开采。石粉量约占骨料总量的 10%。	凝灰岩石粉资源化利用及新型建筑材料研发。
5	舟山大皇山矿山项目	凝灰岩建筑骨料加工系统设计处理能力为 800 万 t/年。石粉量约占骨料总量的 10%。	凝灰岩石粉资源化利用及新型建筑材料研发。
课题四：复杂条件渣（土）场安全性态演化机理及稳定控制方法研究			
1	杭州市富阳区黄金坞渣土消纳场	总容量 1200 万方，已封场，堆填坡度 1:50，目前场地部分用于农用地，部分用于苗木种植，部分用于厂区建设。	渣土消纳场滑坡演化分析及稳定控制
2	杭州市富阳区油树坞渣土消纳场	总容量 500 万方，分 5 段堆填，坡度 1:100，距离主坝约 300 米处有居民。	渣土消纳场滑坡演化分析及稳定控制
3	渝西配水工程	工程土石方开挖 1994.91 万 m ³ ，土石方填筑 1121.65 万 m ³ ，利用开挖料 1050.88 万 m ³ ，弃渣总量 944.02 万 m ³ （折合松散方 1185.28 万 m ³ ），弃渣堆放在工程沿线 134 处弃渣场。	渣土消纳场滑坡演化分析及稳定控制

四、项目研究开发组织和分工

本项目通过成立项目课题组的形式开展各课题的研究工作。本项目研究开发工作以华东建管人员为主，联合院内相关专业人员，组成项目团队及核心小组，以子题为单位开展具体工作，并与国内外相关科研院所和企业开展合作。

项目负责人总体负责项目的实施管控，统筹协调院内外相关资源，各课题设置课题负责人和课题助理。**课题负责人**负责研究工作的具体开展和落实。根据专业特长和工程经验，以子题为单位对研发人员进行分组、分工；**课题助理**配合课题负责人开展研究工作和对外合作。各子题设置**子题负责人**，根据项目负责人和课题负责人拟定的工作安排，负责各子题研究工作的开展。同时，本项目还将依托我院各创新平台，充分借助平台团队的技术力量、试验设备和场地，开展相关试验研究。

五、预期成果

5.1 约束性指标

课题一：工程建设副产物绿色资源化处置统筹与智能调运关键技术研究

- ① 建立系统性的工程建设副产物分类、处置以及资源化标准体系。
- ② 从工程建设副产物产生源头及加工过程控制着手，形成绿色环保的工程建设副产物前端处置及减量化技术体系 1 套。
- ③ 研究建立考虑工程建设副产物质、量、时、空关系及资源化处置的项目群智能调配模型，形成工程建设副产物智能化运筹平台 1 个。

课题二：工程余泥渣土绿色资源化利用关键技术研究

- ① 分别研发一种能应对低温、水浸和侵蚀的新型工程余泥固化剂和渣土固化剂配方及性能改良方法，并形成相应的固化土制备工艺和质量控制标准 1 项。
- ② 基于余泥和渣土联合消纳模式，研发一种快速回填造地技术，形成相应的施工工艺方法和质量控制标准 1 项。
- ③ 建立基于河道底泥的酸性土壤改良成套技术，形成相应的酸性土壤改良剂 1 种，并进行小规模示范应用。

课题三：工程石粉绿色资源化高值利用关键技术研究

- ① 研发工程石粉制备中低强、高强、超高强的系列化高延性水泥基新材料 3 种，并形成相应的关键技术 1 套；
- ② 研发工程石粉制备 SPC 石塑复合板材和管材产品 1-2 种，并形成相应的关键技术 1 套；
- ③ 研发工程石粉制备室内用腻子粉产品和室外用腻子粉产品 2 种，并形成相应的关键技术 1 套。

课题四：复杂条件大容量工程渣（土）场全生命周期安全保障技术

- ① 形成复杂条件城市渣土消纳场的安全运维保障标准 1 部；
- ② 提出复杂条件消纳场的勘测试验、计算分析、结构挡排、安全监控、长期运维的规范化安全保障技术规程 1 份；
- ③ 形成复杂条件工程渣（土）场全生命周期安全监测与预警系统 1 套（集成至课题一工程建设副产物智能化运筹平台中）。

5.2 预期性指标

课题一：工程建设副产物绿色资源化处置统筹与智能调运关键技术研究

- ① 发表学术论文（核心及以上）1-2 篇；
- ② 申请专利 3~5 项（发明专利不少于 2 项）、软件著作权 3 项；
- ③ 编制标准（企业及以上）1 部；
- ④ 培养相关技术人员 5~10 人；
- ⑤ 课题研究报告 1 份。

课题二：工程余泥渣土绿色资源化利用关键技术研究

- ① 发表学术论文（核心及以上）5 篇；
- ② 申请专利 10 项（发明专利不少于 7 项）；
- ③ 编制标准（企业及以上）1 部；
- ④ 培养相关技术人员 5~10 人；
- ⑤ 课题研究报告 1 份。

课题三：工程石粉绿色资源化高值利用关键技术研究

- ① 发表学术论文（核心及以上）3-5 篇；
- ② 申请专利 3~5 项（发明专利不少于 2 项）；
- ③ 编制标准（企业及以上）1 部；
- ④ 培养相关技术人员 5~10 人；
- ⑤ 课题研究报告 1 份。

课题四：复杂条件大容量工程渣（土）场全生命周期安全保障技术

- ① 发表学术论文（核心及以上）1~2 篇；
- ② 申请专利 7 项（发明专利不少于 5 项）、软件著作权 2 项；
- ③ 编制标准（企业及以上）1 部；
- ④ 培养相关技术人员 5~10 人；
- ⑤ 出版专著 1 部；
- ⑤ 课题研究报告 1 份。

六、项目进度计划

本项目执行期为三年，起止时间为 2021 年 7 月至 2024 年 6 月。项目进度计划安排详见表 6-1，各课题进度计划安排详见表 6-2 至表 6-5。

表 6-1 项目进度计划表

序号	时间	内 容	考核目标
第一阶段研究（2021-2022 年）			
1	2021.07 ~ 2022.11	1. 项目启动，研究方案专家评审及修改； 2. 开展各课题调研任务，收集相关资料；确定各试验工作开展场所； 3. 商定各课题外委工作任务和实施方案，签订外委合作协议； 4. 各课题相关试验研究准备工作，包括样品采集、实验材料采购、试验装置搭建等； 5. 全面启动各课题相关基础研究、模拟研究，并开展部分中试试验。	第一阶段研究报告； 成果专利申请； 论文撰写发表。
2	2022.12	项目中期评审。	中期研究报告及成果。
第二阶段研究（2023-2024 年）			
1	2023.01 ~ 2023.08	1. 全面开展各课题相关研究工作； 2. 外委工作中期检查； 3. 阶段性新产品登记、技术鉴定；	第二阶段研究报告； 成果专利申请； 论文撰写发表； 企业标准编制。
2	2023.09 ~ 2024.04	1. 全面推进各课题相关研究工作； 2. 各课题相关成果示范及应用研究； 3. 相关新产品登记和技术鉴定。	项目研究报告初稿； 依托工程设计报告。
3	2024.05 ~ 2024.06	1. 各课题研究成果整理、汇总； 2. 项目研究报告编制； 3. 结题、评审。	项目研究报告。