

引调水工程穿越粉质黏土路段的地质勘察及地基处理建议

张毅

中工武大设计集团有限公司新疆分公司

DOI:10.32629/hwr.v10i7.7057

[摘要] 引调水工程是水资源优化配置的关键基础设施,穿越粉质黏土路段时易面临承载力不足、沉降超标、渗漏失稳等问题。本文系统分析粉质黏土的物理、力学及水理特性,阐述针对性地质勘察技术的核心要点与方法组合,详解换填垫层法、水泥土搅拌桩法等常用地基处理技术的原理、适用条件及选型逻辑,结合工程案例验证方案有效性。研究成果为同类工程的勘察设计与地基处理提供技术参考,助力工程安全高效建设。

[关键词] 引调水工程; 粉质黏土; 地质勘察; 地基处理; 技术选型

中图分类号: P56 文献标识码: A

Geological Survey Methodology and Foundation Treatment Strategies for Water Diversion Projects Crossing Silty Clay Formations

Yi Zhang

Xinjiang Branch, China Railway WuDa Engineering Design Group Co., Ltd.

[Abstract] Water diversion projects constitute critical infrastructure for optimizing regional water resource allocation and enhancing water security. When traversing silty clay formations, such projects frequently encounter geotechnical challenges—including inadequate bearing capacity, excessive differential settlement, and seepage-induced instability—which may compromise structural integrity and long-term serviceability. This paper presents a systematic characterization of the physical, mechanical, and hydraulic properties of silty clay, outlines a comprehensive geological survey methodology—including integrated field and laboratory techniques tailored to low-permeability, high-compressibility strata—and elaborates on the theoretical foundations, applicability criteria, and decision-making framework for selecting foundation treatment technologies. Specific emphasis is placed on two widely adopted methods—the granular replacement cushion technique and the cement-soil deep mixing pile method—with performance validation drawn from representative engineering case studies. The findings offer actionable technical guidance for geological investigation, foundation design, and construction implementation in analogous water conveyance projects, thereby contributing to enhanced safety, durability, and operational efficiency.

[Key words] Water diversion projects; silty clay; geological investigation; foundation improvement; technology selection rationale

引言

引调水工程在缓解水资源时空分布不均、保障生产生活用水安全中具有战略意义。随着工程规模扩大,线路常需穿越粉质黏土区域,该类土体颗粒介于砂土与黏土之间,工程性质受含水率影响显著,易出现压缩变形大、抗剪强度低、渗透性不均等问题,可能导致构筑物开裂、边坡失稳、输水渗漏等风险。因此,精准掌握粉质黏土特性,优化勘察方案,科学选择地基处理技术,对降低工程风险、控制成本至关重要。本文基于粉质黏土特性分析,梳理勘察要点,对比处理技术适配性,结合案例验证可行性,为同类工程提供指导。

1 粉质黏土工程地质特性分析

1.1 粉质黏土基本物理性质

粉质黏土的基本物理性质决定其工程行为,核心体现在颗粒组成、关键指标及空间分布。其颗粒以粉粒为主,黏粒次之,砂粒含量少,级配曲线平缓,结构性较弱。天然含水量接近或略高于塑限,孔隙比在0.8~1.2之间,液限25%~35%,塑限15%~20%,塑性指数10~17,属于中塑性土。受地质作用影响,物理性质呈现空间异质性,横向因沉积韵律导致指标波动,纵向随深度增加密实度提高、含水量与孔隙比递减,直接影响工程地质分区与地基处理设计。

1.2 粉质黏土力学特性

粉质黏土的力学特性直接关联地基承载与变形控制, 主要包括抗剪强度、压缩性与承载能力。抗剪强度由黏聚力与内摩擦角决定, 天然状态下黏聚力 $15\sim 30\text{kPa}$, 内摩擦角 $12^\circ\sim 25^\circ$, 饱水后黏聚力显著降低、内摩擦角略减, 抗剪强度大幅下降。压缩性用压缩系数与压缩模量表征, 多数为中压缩性土, 压缩系数 $0.2\sim 0.5\text{MPa}^{-1}$, 部分饱水土体超过 0.5MPa^{-1} , 呈高压缩性, 压缩模量 $4\sim 10\text{MPa}$, 变形潜力较大。天然地基承载力特征值 $80\sim 150\text{kPa}$, 随密实度提高、含水量降低而增大, 埋深增加也会提升承载力, 力学特性与含水率、密实度的相关性为处理方案优化提供依据。

1. 3粉质黏土水理特性与工程风险

粉质黏土的水理特性集中表现为渗透性、湿陷性与胀缩性, 与水动力条件耦合易引发风险。其渗透性较弱, 渗透系数 $10^{-6}\sim 10^{-4}\text{cm/s}$, 属弱透水层, 但可能存在局部透水通道导致渗透性不均。部分具有湿陷性, 浸水后结构破坏、颗粒重排产生显著变形; 胀缩性表现为失水收缩、遇水膨胀, 反复干湿循环会导致开裂^[1]。饱水状态下工程性质劣化, 抗剪强度降低、压缩性增大, 还可能软化崩解。这些特性易引发基坑涌水、边坡失稳、基础不均匀沉降、输水渗漏等工程风险, 影响工程质量与运营安全。

2 引调水工程穿越粉质黏土路段地质勘察技术

2. 1勘察目的与技术要求

引调水工程粉质黏土路段地质勘察的核心目标是查明地质条件, 获取准确的物理力学与水理参数, 识别潜在风险, 为设计、施工与地基处理提供依据。勘察需遵循《水利水电工程地质勘察规范》《建筑地基基础勘察规范》等行业标准, 结合工程类型与规模, 明确勘察深度、范围及测试项目, 满足基础设计、边坡稳定分析、防渗设计等需求, 兼顾经济性与高效性, 实现地质查明与工程需求的精准匹配。

2. 2勘察方法选型与组合

2. 2. 1钻探勘察。钻探勘察是获取深部地质资料的核心方法, 钻孔布置遵循全面性与针对性结合原则, 沿线路均匀布置勘探点, 关键区域加密密度。钻孔深度需穿透粉质黏土层进入下伏稳定地层一定深度, 满足承载力与沉降计算、边坡稳定分析需求。岩芯采取率是质量关键, 需采用合适工具与工艺, 确保采取率不低于80%, 完整保留土体结构与分层界面, 为地质分层与参数分析提供依据。

2. 2. 2原位测试技术。原位测试可在土体天然状态下获取参数, 弥补钻探取芯的扰动影响。静力触探试验适用于各类粉质黏土, 通过探头贯入测量锥尖阻力与侧壁摩阻力, 快速判断土体密实度、强度及分层, 为承载力估算提供依据。标准贯入试验通过重锤落击贯入器, 根据击数评价密实度, 结合经验公式估算天然地基承载力。十字板剪切试验适用于饱和和软塑粉质黏土, 直接测定不排水抗剪强度, 避免参数失真。渗水试验通过钻孔水位差测量渗水量, 计算现场渗透系数, 反映渗透性空间差异^[2]。

2. 2. 3室内试验项目。室内试验补充原位测试参数, 基本物理性质试验包括颗粒分析、液塑限测定、含水量与孔隙比测试, 明确颗粒组成、塑性状态与密实程度。力学性质试验涵盖直剪

试验与压缩试验, 测定黏聚力、内摩擦角及压缩系数、压缩模量, 支撑抗滑稳定分析与沉降计算。水理性质试验包括渗透试验与湿陷性试验, 测定饱和渗透系数并判断湿陷性及等级, 为地基处理方案制定提供依据。

2. 3勘察重点与数据处理

勘察重点聚焦构筑物基础、边坡工程及渗漏敏感段, 基础区域需查明粉质黏土厚度、分层特征、参数及下伏地层; 边坡区域需勘察土体结构、含水量、软弱夹层及地下水; 渗漏敏感段需测试渗透性, 识别透水通道。勘察数据需通过原位测试与室内试验对比验证, 消除偏差。基于数据进行地质分层与参数分区, 划分工程地质单元, 明确核心参数范围。勘察报告需包含工程概况、勘察方法、地质分析、参数统计、地质剖面图、风险评估等核心内容, 采用图表结合方式清晰表达成果^[3]。

3 粉质黏土地基处理技术选型与设计

3. 1地基处理目标与原则

引调水工程粉质黏土地基处理的核心目标是提高承载力, 满足荷载要求; 控制沉降量及速率, 避免结构损坏; 增强抗渗性, 防止渗漏; 改善稳定性, 保障边坡与基础安全。技术选型遵循技术可行、经济合理、环保节能、施工便捷的原则, 结合粉质黏土特性、工程要求、施工条件及环境约束综合判断, 确保方案满足技术指标, 控制成本、减少生态影响, 便于施工组织与质量控制^[4]。

3. 2常用地基处理技术原理与适用条件

3. 2. 1换填垫层法。换填垫层法通过置换浅层软弱粉质土体, 采用灰土、砂石等高强度材料铺设垫层并压实, 利用垫层承载与扩散作用传递荷载, 降低软弱土体应力。施工流程包括基坑开挖、材料铺设、分层压实, 开挖避免扰动下伏原状土, 垫层材料级配合理, 压实控制厚度与质量。适用于浅层软弱粉质黏土路段, 处理深度不超过3m, 关键参数为垫层厚度与压实系数, 压实系数需达0.95以上。

3. 2. 2水泥土搅拌桩法。水泥土搅拌桩法分湿法与干法, 核心机理是搅拌机械将水泥与粉质黏土强制混合, 水泥水化生成稳定胶凝物质, 形成具有强度与整体性的桩体, 与周边土体构成复合地基。施工控制水泥掺量、搅拌均匀性及桩长桩距, 确保桩体均匀无漏搅断桩, 桩长穿透软弱层。加固效果通过复合地基承载力与压缩模量评价, 适用于中深层粉质黏土路段, 常规处理深度一般为 $3\sim 10\text{m}$, 具体需根据设备能力与地质条件确定。

3. 2. 3高压喷射注浆法。高压喷射注浆法通过高压泵将水泥浆液高速喷射注入粉质黏土, 喷射流冲击切割土体, 使浆液与土体混合胶结, 形成高强度、高抗渗固结体, 兼具加固与防渗功能。分为旋喷、摆喷、定喷, 适用于渗透系数 $10^{-6}\sim 10^{-2}\text{cm/s}$ 的粉质黏土, 设计参数包括喷射压力、提升速度与浆液配比, 需根据土体性质与工程要求调整。

3. 2. 4排水固结法。排水固结法通过塑料排水板设置垂直排水通道, 结合堆载预压施加附加荷载, 加速地基孔隙水排出, 缩短固结时间, 提高土体密实度与强度。核心机理是消除孔隙水压力消散障碍, 使土体在附加荷载下固结, 有效应力增加。适用于

软塑-流塑粉质黏土路段，尤其沉降控制严格的区域，预压时间与沉降计算是设计关键，确保运营前完成大部分固结沉降^[5]。

3.3不同处理技术对比与选型流程

为直观呈现技术适配差异，便于量化对比，整理技术对比如表1所示：

表1 粉质黏土地基处理技术对比

处理技术	核心原理	适用场景	处理效果(承载力提升幅度)	抗渗性能改善	施工周期	成本等级	环境影响
换填垫层法	置换软弱土体+压实加固	浅层软弱粉质黏土(厚度≤3m)	1.5~2.5倍	一般	短	中低	较小
水泥土搅拌桩法	水泥水化反应形成复合地基	中深层粉质黏土(厚度3~10m)	2.0~3.5倍	较好	中	中等	较小
高压喷射注浆法	浆液与土体混合固化	需防渗或深层加固路段	2.5~4.0倍	优秀	中长	中高	中等
排水固结法	排水通道加速土体固结	软塑-流塑粉质黏土(沉降控制严格)	1.8~3.0倍	一般	长	中低	较小

选型流程需结合勘察数据与工程要求，先通过承载力与沉降计算明确处理目标，再根据粉质黏土厚度、状态、防渗需求等，参考表1进行多方案技术经济比选，确定详细设计参数与施工工艺。

3.4地基处理方案的设计流程

地基处理方案设计基于勘察数据开展承载力与沉降计算，结合构筑物类型、荷载大小、防渗标准明确处理目标。通过多方案技术经济比选，综合考量处理效果、施工周期、成本与环境影响，优先选择适配性强、性价比高的技术。确定技术类型后，细化设计参数，优化施工工艺，针对关键工序制定质量控制措施，确保处理效果达标。

4 工程案例

4.1工程概况

某引调水工程线路全长68km，其中12km穿越粉质黏土路段，主要构筑物为直径3.2m的输水管道，设计流量35m³/s。该路段粉质黏土厚度4~8m，天然含水量28%~32%，孔隙比1.0~1.1，黏聚力20~25kPa，内摩擦角15°~18°，渗透系数10⁻⁵~10⁻⁴cm/s，部分区域为软塑状态。原地基天然承载力特征值90~110kPa，无法满足输水管道基础要求，沉降量预测超过允许值，同时存在局部渗漏风险，需专项地基处理。

4.2地质勘察实施与成果

勘察采用钻探、原位测试与室内试验相结合的方法，沿线路布置勘探点65个，关键区域每50m1个，钻孔深度10~12m，岩芯采取率85%以上。原位测试采用静力触探、标准贯入与渗水试验，室内试验完成颗粒分析、液塑限、直剪、压缩等项目。勘察明确粉质黏土分为两层，上层3~5m为软塑状态，性质较差；下层2~3m为可塑状态，性质稳定。上层压缩系数0.4~0.6MPa⁻¹，承载力90~100kPa；下层压缩系数0.2~0.3MPa⁻¹，承载力110~130kPa。风险识别主要为浅层软塑土体导致的承载力不足与沉降超标，局部存在渗漏隐患，勘察成果为处理方案设计提供精准数据支撑。

4.3地基处理方案设计与施工

结合勘察成果与工程要求，参考表1对比分析，该路段粉质

黏土厚度4~8m，需兼顾承载力提升与沉降控制，施工周期要求适中，最终选择水泥土搅拌桩法。设计参数为：桩长6~8m，穿透上层软塑土体进入下层可塑土体0.5~1.0m；桩距1.2m，桩径0.5m，呈等边三角形布置；水泥掺量为土体质量的15%，采用湿法搅拌工艺。施工采用双轴搅拌桩机，监控搅拌均匀性与水泥浆配比，确保桩身垂直度偏差不超过1%，桩位偏差控制在50mm以内。针对局部土体含水量过高的问题，调整水泥浆浓度并放慢搅拌速度，保障桩体质量。

4.4处理效果检测与评价

处理完成后采用静载试验、取芯检测与渗透试验进行检测，静载试验结果显示复合地基承载力达220~250kPa，满足设计要求；取芯检测表明桩体完整性良好，无断桩、夹泥现象，抗压强度达1.5~2.0MPa；渗透系数降至10⁻⁷~10⁻⁶cm/s，抗渗性能显著提升。工程运行期间进行沉降观测与渗漏监测，沉降量累计不超过15mm，且趋于稳定，无渗漏现象发生，处理效果良好，保障了工程安全运营。

5 结论与建议

5.1主要结论

粉质黏土具有物理性质空间异质、力学强度受含水量影响大、水理特性复杂的特点，易引发承载力不足、沉降超标、渗漏等工程风险。引调水工程穿越该类路段时，采用钻探、原位测试与室内试验相结合的勘察方法，可精准获取地质参数与风险信息。换填垫层法、水泥土搅拌桩法等技术各有适配场景，通过技术经济比选可确定最优方案，案例验证水泥土搅拌桩法对中深层粉质黏土路段的处理效果显著。

5.2工程建议

地质勘察阶段应优化勘察点布置，在关键区域加密测点，强化原位测试与室内试验数据联动，确保参数准确性。地基处理阶段需根据粉质黏土厚度、状态及工程要求精准选型，严控施工关键工序质量，避免出现桩体不完整、压实不足等问题。运营维护阶段应建立长期沉降与渗漏监测体系，实时跟踪工程状态，制定应急处置预案，及时应对潜在风险。

【参考文献】

[1]千航,陈志坚,王喆.大型沉井流塑状粉质黏土地基固结排水分析[J].沈阳大学学报(自然科学版),2024,36(04):341-349.
[2]王玉龙.特殊粉质黏土地层中三岔双向旋扩灌注桩施工技术[J].建筑安全,2024,39(06):6-10.
[3]赵柏念,梁皓,仕坦.淤泥质粉质黏土基础处理[J].云南水力发电,2023,39(03):189-192.
[4]符传立,尼珂.粗砂与粉质黏土互层地质条件下的地基处理型式研究[J].人民珠江,2021,42(S2):66-71.
[5]刘春华.高水位下粉质黏土路基处理方案优化研究[D].辽宁科技大学,2021.

作者简介：

张毅(1993—)，男，汉族，河南省南阳市人，本科，工程师，工程地质与水文地质。