

Stabilization measures for underground continuous wall slot in shallow sandy silt

Qingyuan Yao¹ Xiaolei Wang²

1.College of Civil Engineering Hebei University of Engineering, Handan, Hebei, 056038 China

2.Handan City Underground Space Engineering Technology Innovation Center, Handan, Hebei, 056038 China

Abstract

Urban underground space development in areas with extensive distribution of shallow sandy silty soil faces technical challenges related to slot stability under continuous walls. The unique physical-mechanical and permeability characteristics of such soil layers significantly influence the stabilization mechanisms of slot walls. This study thoroughly analyzes how particle composition features and pore structures of sandy silty soil inherently constrain soil disturbance resistance during slot formation. It clarifies structural weakening patterns caused by spatial-temporal variability of mechanical strength indicators, reveals the underlying mechanisms of permeability differences affecting wall protection system failure modes, and systematically establishes a scientific and practical slot stability control technology system. These findings provide theoretical support and practical guidance for deep foundation construction under complex geological conditions.

Keywords

sandy silty soil; slot stability; slurry wall protection; targeted slot wall reinforcement; dynamic process regulation

浅层砂质粉土中地下连续墙成槽的稳定措施

姚庆元¹ 王晓磊²

1. 河北工程大学土木工程学院, 中国·河北 邯郸 056038

2. 邯郸市城市地下空间工程技术创新中心, 中国·河北 邯郸 056038

摘要

浅层砂质粉土广泛分布区域的城市地下空间开发面临连续墙成槽失稳的技术挑战, 该类土层独特的物理力学与渗透特性综合作用显著影响槽壁稳定机制。深入剖析砂质粉土颗粒组成特征与孔隙结构对成槽过程中土体抗扰动能力的内在约束, 明确力学强度指标时空变异性引发的结构弱化规律, 揭示渗透特性差异对护壁体系失效模式的深层作用机理, 系统构建科学适用的成槽稳定性控制技术体系, 为复杂地质条件下的深基础施工提供理论支撑与实践引导。

关键词

砂质粉土; 成槽稳定性; 泥浆护壁; 槽壁靶向加固; 动态工艺调控

1 引言

砂质粉土作为典型沉积地层广泛分布于沿海与河相平原地带, 其颗粒级配的特定组合形式与低胶结物质含量构成特殊的结构不稳定本质, 成槽开挖过程触发地下水渗流场与原始应力场的联动调整。结构松散特性引发的颗粒迁移行为持续削弱槽壁边界约束效应, 渗透路径的定向发育导致泥浆护壁功能呈现显著地域差异性, 力学强度随含水率波动的敏感衰减加剧临空面变形不可控趋势。掌握此类土层对成槽工序的响应规律需从土体本构行为与外部扰动的耦合作用视角展开解析, 集成泥浆护壁、地层改良与工艺调控的协同控制策略对保障地下连续墙结构完整性具有关键工程意义。

【作者简介】姚庆元(1999-), 男, 中国河北邢台人, 硕士, 从事岩土方向研究。

2 浅层砂质粉土特性分析

2.1 物理性质

浅层砂质粉土的颗粒组成呈现出砂粒与粉粒共存的过渡性特征, 这种特定组合使得颗粒间的胶结物质普遍缺乏且分布不均, 土骨架在天然状态下表现出明显的结构性弱点。颗粒尺寸的差异导致粗颗粒与细颗粒在受力状态下相互影响, 当开挖扰动打破了原有平衡, 土颗粒接触点的受力状态改变促使颗粒更容易发生相对位移甚至整体结构解体。较高的孔隙率直观表征了土体内部存在密集且相互连通的微孔网络结构, 此类孔隙形态削弱了土颗粒间的有效接触面积与摩擦咬合效应, 造成土体抵抗外部变形的固有能力被削弱。相对较低的干密度客观印证了土骨架在天然埋藏条件下处于较为疏松的堆积状态, 意味着单位体积内的固体颗粒承载网络未能形成充分密集排列, 使得成槽后形成的临空面在周

围土压力与自重应力驱动下具有向开挖空间演进的客观趋势。孔隙水赋存于高度连通的孔隙通道中，渗透压力在土体失去侧向约束后将松散颗粒产生诱导性迁移作用，进一步加剧了槽壁表层的颗粒流失与结构弱化进程。这种由颗粒组成主导、孔隙结构放大、密度状态固化的物理特性集合构成了成槽稳定控制体系需要优先考量的底层因素^[1]。

2.2 力学性质

砂质粉土的力学特性表现为较低的内摩擦角与有限黏聚力，这种抗剪强度不足的特性导致开挖后槽壁土体在自重及周边土压力作用下容易沿潜在滑动面发生剪切破坏。土体内部存在明显的结构性与初始应力状态，一旦施工扰动打破原有平衡，原本处于稳定状态的土颗粒趋于重新排列组合以适应新环境，槽壁表面可能发生渐进性的颗粒松散与局部片帮现象。砂质粉土具备较高的压缩系数与较低的压缩模量，其压缩特性意味着外部荷载变化将引发不可忽视的变形响应，成槽临空面的形成促使槽壁土体持续向开挖空间产生缓慢但持续的挤压收敛位移，这种位移积累到一定程度就会威胁槽壁几何形态的保持能力。土体遇水后强度折减效应显著，地下水渗透作用削弱颗粒间的有效应力传递路径，加剧原有土骨架的抗变形能力衰退，槽壁稳定性在长时间暴露工况下呈现显著的时间效应，延迟性坍塌风险不容忽视。成槽过程中的动力扰动可能诱发砂层产生一定程度的液化趋势，减弱土体的自持能力，该动态敏感性与前述的静态力学弱点叠加形成复合负面效应，使得稳定控制策略必须同时考量动静态因素的综合影响。

2.3 渗透特性

砂质粉土的渗透系数相对较大与其内在孔隙连通性良好的微观结构直接相关，地下水在土体内部的运移过程遵循达西定律基本规律（如图 1）。渗透速率相对较快的情况可能伴随着泥浆向土层中滤失的现象，泥浆中携带的细颗粒成分沿渗流路径进入土体孔隙后能够暂时性减小其渗透系数。水力梯度的存在驱动着地下水与槽壁内侧的泥浆形成动态压力博弈，当外部泥浆液柱压力无法持续稳定压制地下水的渗透压力时，槽壁土体颗粒开始受到渗流力的潜在作用。槽壁表层土颗粒在水力驱动下产生微量但持续的迁移活动，这种颗粒移动将缓慢削弱土体原有的密实程度并扩大既有孔隙通道的尺度。泥浆护壁效果依赖于在槽壁表面形成的低渗透性致密泥皮，而砂质粉土较大的原生孔隙为泥浆颗粒提供了渗入通道，细粒级膨润土进入浅层土体孔隙后促使形成局部渗透系数相对较低的过渡层。土体本身的颗粒级配构成控制着渗透性改良所能达到的理论上限值。

3 地下连续墙成槽失稳的原因

3.1 地质因素

砂质粉土固有的低粘聚力特性显著削弱土颗粒间连接强度，地下水渗透作用在水力梯度下持续产生指向槽壁内部

的渗流力，这种力学效应加速剥离槽壁表层松散颗粒引发渐进式破坏。浅部土层常见的水平微层理形成天然抗剪薄弱带，槽壁临空面暴露该构造后极易演变为剪切滑移路径。土体渗透系数的空间变异性直接影响泥浆护壁效果，高渗透区段泥浆快速滤失导致泥皮形成滞后^[2]。古河道沉积形成的粉土夹砂薄层在应力重分布时表现出差异沉降倾向，槽段穿越此类界面区域需克服不均匀变形风险。

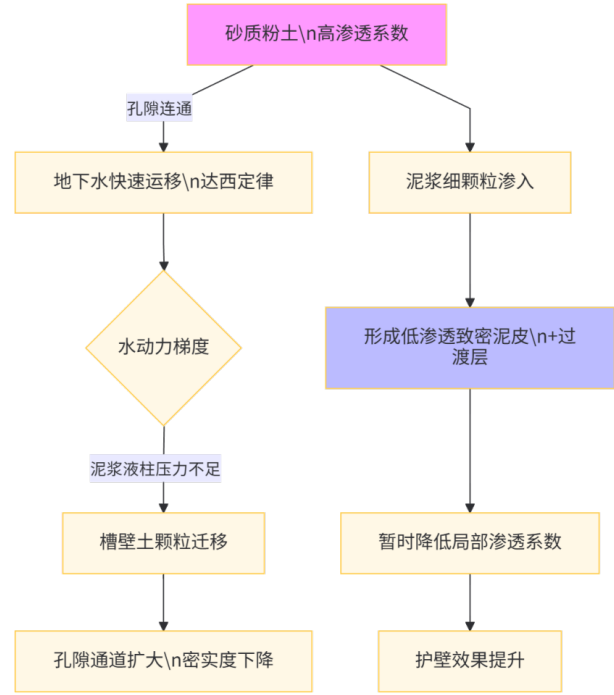


图 1 砂质粉土渗透特性与泥浆护壁机理示意

3.2 施工因素

液压抓斗掘进过程中的垂直度偏差诱发槽壁单侧应力失衡，抓斗闭合瞬间的挤压冲击力对松散砂质粉土施加额外动态荷载。泥浆粘度参数与滤失量未随土层渗透性实时调整，高渗透区泥浆大量流失削弱泥皮连续性。槽段划分长度设计未充分考虑地应力释放的时空累积效应，超长槽段暴露时间过久造成变形超出泥浆补偿极限。接头部位刷壁作业不彻底残留的泥皮形成渗流弱面，后续槽段施工时泥浆沿此通道流失中断护壁压力传递。

3.3 环境因素

季节性降水入渗急剧提升浅层土体饱和度，非饱和砂质粉土基质吸力丧失造成粘聚力衰减突破预测值。邻近基坑开挖导致原始水平应力场重新分布，槽壁支撑体系被迫承受额外位移压力。城市道路重型车辆通行引发低频振动荷载，槽壁土体在反复应力作用下发生疲劳性强度退化。地下管网渗漏形成的局部饱和区改变渗流场方向，当槽壁由传统入渗区转变为渗出区时渗流力反转直接助推土颗粒脱离。寒区施工中土体冻胀产生的体积膨胀力对槽壁形成持续性挤压破坏。

4 成槽稳定措施

4.1 泥浆护壁技术

泥浆护壁技术的核心价值在于建立具有动态平衡特性的流体支撑体系，膨润土基悬浮液依赖其非牛顿流体特性在槽壁表面快速形成低渗透性滤饼结构，该过程需精细调控泥浆粘度与目标土层渗透系数的匹配关系以控制滤失速率保持在合理范围。悬浮液中携带的胶体颗粒在流动过程中逐渐充填槽壁表层微观孔隙，这种渐进式封堵有效重构了表层土体的渗透通道分布格局，显著提升局部抗渗能力。静水压差作用在槽壁内侧持续产生的力学平衡是维持槽壁几何形态稳定的基本物理前提，泥浆密度的具体配比应当同步考量地下水动态压力与土体侧向压力的复合作用。泥浆胶体率指标直接关联泥皮形成的致密程度与结构完整性，高质量泥皮作为临时性防渗屏障能够有效阻断地下水潜蚀路径并提升槽壁表层土体的整体性。泥浆悬浮性能维系关乎钻孔岩屑的顺利返出效率，静止状态下泥浆凝胶强度及时固定散落土颗粒防止其向槽底沉降影响护壁效果。施工全程需动态追踪泥浆性能参数的时效性变化，滤失量异常波动需立即调整膨润土掺量或增稠剂比例以维持泥皮有效覆盖速率。

4.2 槽壁加固技术

槽壁加固技术着重增强槽周土体的自持能力与边界约束效应，预注浆加固方法通过硅酸盐或丙烯酸盐浆液在砂质粉土孔隙中的渗透扩散实现土颗粒胶结网络重构，浆液配方选择需匹配目标土层的渗透特性及地下水化学环境。注浆压力参数的设定需要在浆液扩散半径与土体扰动风险之间寻找精准平衡点，过低压力导致浆液难以覆盖设计加固范围而过高压力可能诱发地层水力劈裂。浆液凝胶时间窗口设定必须与成槽工序精确衔接，过早凝结限制加固区延伸范围而延迟固化则可能导致浆液流失降低加固效能。高压旋喷技术借助流体能量原位搅拌土体并混入水泥基固化剂，形成具有较高强度的连续加固体网络来改善槽壁外侧土体的承载刚度。深层搅拌工艺通过机械方式强制融合固化浆液与原状土体，形成均匀性改良的复合土结构显著提升抗剪强度指标。加固深度范围至少需要超越潜在滑动面埋藏深度，加固区边缘部位设置强度梯度过渡带以避免新旧土体界面形成应力突变点。槽段端头区域通常采用扩大加固范围的方式抵抗三维边

界效应引发的侧向挤压变形，该区域加固质量对槽段接头完整性具有决定性意义。

4.3 施工工艺优化

成槽机械液压抓斗的掘进参数调控直接作用于槽壁动态稳定性状态，设备选型须兼顾抓斗闭合力矩与浅层砂质粉土的颗粒离散敏感特性，垂直度控制精度对避免槽壁单侧应力集中至关重要。单元槽段长度设计考虑地层应力释放的时空累积效应，适度缩短槽段长度既能控制累计变形量又可降低土体暴露时长。抓斗提升动作需采取缓冲措施抑制机械回摆幅度，振动能量向槽壁传递会激发表层粉土的瞬时液化效应。弃渣清除系统需配置高效泥浆处理装置，恒定槽内液面高度是稳定地下水位波动影响的有效对策。间隔跳跃式成槽顺序充分利用已施工槽段的约束效应，相邻槽段成槽间隔期需预留充分泥皮固结时间以形成有效边界支撑。混凝土浇筑过程需预估初灌冲击力对槽壁泥皮结构的扰动风险，导管埋深动态调整规避局部冲刷导致护壁薄弱区扩大。施工全程建立槽壁变形监测数据与设备操作参数的实时关联数据库，为工艺参数的持续迭代提供工程实证依据^[1]。

5 结语

砂质粉土成槽稳定性控制需贯穿勘测设计至施工验收全流程，泥浆护壁技术核心在于动态维持滤失速率与泥皮形成速度的精细平衡，膨润土基浆液胶体性能应匹配地层渗透特征实时优化。槽壁加固须针对结构弱面开展靶向性土体胶结改良，支撑体系设计需考虑三维边界约束效应演化规律。设备选型侧重抓斗闭合力矩与土层离散特性的兼容度，成槽速度协调地应力释放时空效应与泥皮成熟周期的矛盾关系，钢筋笼精准下放规避对槽壁泥皮的机械损伤。混凝土浇筑参数设置需抵消初灌冲击对未固结区的扰动，环境响应机制应纳入动态决策模型形成完整技术闭环。

参考文献

- [1] 张竹青.高水位超厚浅层砂性土层地下连续墙施工技术[J].价值工程,2024,43(12):87-90.
- [2] 姜涛.地下连续墙施工过程中的变形控制研究[D].东南大学,2015.
- [3] 李永灿.高水位砾砂地层地下连续墙成槽施工技术[J].市政技术,2025,43(02):88-95.