

# Technical control of stability of trough wall in ultra-deep underground continuous wall

Yongbin Hou<sup>1</sup> Huajie Chen<sup>2</sup>

Hubei Coal Geology Team 125, Yichang, Hubei, 443000, China

## Abstract

With China's strategic deployment of major water resource allocation projects and disaster prevention systems, urban underground spaces are expanding into deeper layers. Ultra-deep continuous walls have become critical structures in large-scale foundation pit engineering, where wall stability directly determines construction safety and project success. Wall instability primarily stems from stress state changes during excavation and groundwater seepage. To ensure stability, systematic analysis of earth pressure-mud pressure balance is essential. Key technologies include precision slotting with hydraulic grabs, optimized slurry performance for wall protection, and underwater concrete pouring. Integrated monitoring through ultrasonic deformation gauges and real-time mud quality detection establishes a full-process control system. Field applications demonstrate that this integrated approach effectively maintains ultra-deep wall stability, providing critical safety assurance for complex geological conditions.

## Keywords

ultra-deep underground continuous wall; slot wall stability; slurry wall protection; hydraulic grab slot formation; deformation monitoring

# 超深地下连续墙槽壁稳定性控制技术

侯永宾<sup>1</sup> 陈华杰<sup>2</sup>

湖北煤炭地质一二五队, 中国·湖北 宜昌 443000

## 摘 要

随着国家布局重大水资源配置工程、防灾减灾体系建设等水利工程, 城市地下空间向深部发展, 超深地下连续墙成为深大基坑工程关键结构, 其槽壁稳定性因直接关系施工安全与工程成败, 且槽壁失稳主要源于开挖过程中的应力状态改变及地下水渗流作用, 故而, 为确保稳定性, 需系统分析土压力与泥浆压力的平衡关系, 采用液压抓斗精密成槽、优化泥浆性能护壁以及水下混凝土灌注等关键工艺, 同时结合超声波测壁仪变形监测与泥浆指标实时检测, 形成全过程控制体系, 实践表明, 集成应用上述技术可有效维持超深槽壁稳定, 为复杂地层条件下的安全施工提供重要保障。

## 关键词

超深地下连续墙; 槽壁稳定性; 泥浆护壁; 液压抓斗成槽; 变形监测

## 1 引言

随着国家布局重大水资源配置工程、防灾减灾体系建设等水利工程, 城市地下空间向深部发展, 作为深基坑工程核心支护与承重结构且深度大、施工环境复杂的超深地下连续墙应用日益广泛, 而在面对极高水压、复杂土层组合及强烈应力重分布时传统施工技术往往显现出不足致槽壁坍塌风险显著增加, 这已成为制约工程安全、工期与成本的核心技术瓶颈, 此稳定性控制难题涉及岩土力学、流体力学及施工工艺的多学科交叉并对现有技术水平提出更高要求, 亟需开展系统性机理研究并发展相适应的控制方法与实践技术体系。

【作者简介】侯永宾(1987-), 男, 中国河南安阳人, 本科, 工程师, 从事工程地质研究。

## 2 槽壁失稳机理分析

### 2.1 土体应力变化对槽壁稳定的影响

地下连续墙成槽施工本质上是通过在原始地层中开挖狭长槽孔而形成临空面, 这一过程彻底打破了土体原有的应力平衡状态。槽孔形成前, 周围土体处于天然三向应力状态, 其抗剪强度较高且处于稳定平衡。成槽后槽壁土体失去侧向支撑, 应力状态转变为近似双向应力, 导致侧向应力释放并重新分布, 土体抗剪强度显著降低。这一应力路径的变化使得槽壁附近土体更容易发生塑性变形乃至破坏<sup>[1]</sup>。具体表现为槽壁向临空面方向的侧向位移, 在软弱黏土层中易出现塑性流动和挤出变形, 在松散砂土层中则可能发生颗粒脱落和局部剥落。维持槽壁稳定的核心力学机制在于通过外部措施补偿失去的侧向应力, 其中泥浆护壁技术起着关键作用。泥浆液柱产生的静水压力作用于槽壁, 有效抵消部

分主动土压力和水压力，从而重建力学平衡。该平衡关系可通过朗肯主动土压力理论和泥浆压力计算公式进行定量描述，其中朗肯主动土压力系数定义为  $K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$ ，式中  $\phi$  为土体有效内摩擦角，单位度。泥浆压力平衡公式表示为  $P_m = \gamma' \cdot z + q - \gamma_m \cdot h$ ，其中  $P_m$  是泥浆提供的净侧向压力，单位 kPa。 $\gamma'$  为土体有效重度，单位 kN/m<sup>3</sup>。 $z$  表示计算点深度，单位 m。 $q$  为地表超载，单位 kPa。 $\gamma_m$  是泥浆重度，单位 kN/m<sup>3</sup>。 $h$  为泥浆液面高度，单位 m。当  $P_m > K_a \cdot (\gamma' \cdot z + q)$  时，槽壁处于稳定状态。失稳模式主要表现为两种形式，在强度均匀的黏性土中可能发生整体剪切破坏，形成贯穿性滑动面。

## 2.2 地下水渗流作用引发的稳定性问题

地下水渗流是影响超深地下连续墙槽壁稳定性的另一关键因素，其破坏机制主要表现为力学作用和物理作用的耦合效应。当成槽区域存在地下水头差时，特别是坑外水位高于槽内泥浆液面时，将形成指向槽内的渗流场。该渗流场产生作用于土颗粒骨架的渗流力，其方向与水流方向一致，大小与水力梯度成正比。渗流力不仅增大了作用于槽壁的主动土压力，更重要的是改变了土体的有效应力场，降低了土体的抗剪强度。在渗流作用下，粉细砂等松散地层中的细颗粒可能被水流带走，导致土体孔隙率增大结构松散，进而发生渗透变形。典型失稳模式包括管涌和流砂现象，管涌发生在级配不良的砂层或砂卵石层中，细颗粒在渗流作用下从粗颗粒孔隙中流失，形成内部侵蚀通道。流砂则发生在水力梯度较大的粉细砂层中，土体完全失去强度呈现类似流体性质的整体流动。这两种现象对槽壁稳定性具有致命影响，可在极短时间内导致大规模塌方。渗流稳定性控制的关键在于维持槽内泥浆液面高度始终高于地下水位一定安全距离，通常要求高出 1.5 m 至 2.0 m 以上，以形成反向水头抵消渗流作用。

## 3 稳定性控制的施工工艺

### 3.1 液压抓斗成槽工艺

液压抓斗成槽工艺是现代超深地下连续墙施工的核心技术，其工作原理基于液压系统驱动抓斗叶片开启与闭合，实现对土体的抓取和挖掘。施工采用分序分幅开挖流程，即先施工一期槽段再施工二期槽段，单个槽段通常划分为主挖幅和副挖幅交替开挖，最终形成连续墙体。该工艺的突出优势在于成槽垂直精度可控制在 1/500 以内，挖掘深度可达 100 m 以上，且对槽壁的扰动远小于传统冲击钻等工法。液压系统提供的平稳操作特性允许抓斗以可控速度下放，接触槽底后缓慢闭合抓取土体，然后匀速提升出槽，整个过程中避免了剧烈碰撞和抽吸效应，极大减少了槽壁土体的应力波动和振动影响<sup>[2]</sup>。为确保成槽过程中的动态稳定，必须实时维持槽内泥浆液面高度至少高于地下水位 1.5 m，这一高差产生的静水压力可有效抵消地下水压力和土体侧向压力。对于超深槽孔，还需采用重型导向架系统确保抓斗的垂直度，

并在抓斗底部设置超声波监测探头实时反馈槽深和槽形数据，实现信息化精准施工。

### 3.2 泥浆循环护壁工艺

泥浆循环护壁工艺是维持超深地下连续墙槽壁稳定的核心技术，其护壁机理主要体现在三个方面，泥浆液柱产生的静水压力可平衡地层土压力和水压力，维持力学平衡。泥浆中的膨润土颗粒在压差作用下在槽壁表面沉积形成致密低透水的泥皮，有效阻隔地下水渗流并防止水分流失。循环流动的泥浆及时携带钻渣出槽，同时冷却抓斗刀具降低磨损。泥浆性能参数的控制直接决定护壁效果的成败，比重关系着液柱压力大小，粘影响携渣能力和泥皮形成质量，含砂率过高会加剧泵体磨损并降低泥皮品质，pH 值则关系膨润土的水化作用和泥浆稳定性。针对不同地层特性，泥浆参数需动态调整优化，例如在高渗透性砂层中需提高粘度和比重以增强护壁效果，在黏土层中则可适当降低参数以减少浪费。完整的泥浆循环系统包括制备、循环、净化和回收四个环节，新鲜泥浆通过高速搅拌机充分水化后泵入槽内，携渣泥浆经沉淀池、旋流除砂器和振动筛多级净化后，检测调整性能指标并重新泵入槽内使用，这一闭路循环系统不仅保障了泥浆性能稳定，也实现了环保节能。具体性能控制指标见表 1。

表 1 不同地层泥浆性能控制指标

地层类型	比重 (g/cm <sup>3</sup> )	粘度 (s)	含砂率 (%)	pH 值	胶体率 (%)
淤泥、黏土	1.02-1.05	18-22	<4	8-9	>97
粉土、粉砂	1.05-1.10	22-25	<3	9-10	>98
细砂、中砂	1.10-1.15	25-30	<2	9-10	>98
粗砂、砾石	1.15-1.20	30-35	<1	10-11	>99
卵石、强风化岩	1.20-1.25	35-40	<0.5	10-11	>99

### 3.3 水下混凝土导管灌注工艺

水下混凝土导管灌注工艺是地下连续墙成型的关键工序，采用直升导管法在泥浆环境下完成混凝土浇筑。灌注开始时导管底端距槽底保持 300-500 mm 间距，首批混凝土量需保证埋管深度大于 1.0 m，形成可靠密封防止泥浆渗混。整个灌注过程需连续不间断进行，导管埋深严格控制在 2.0-6.0 m 之间，过浅可能导致泥浆卷入形成夹层，过深则易造成混凝土流动不畅或埋管事故。浇筑速度需与混凝土初凝时间匹配，保证上升速度不低于 2 m/h 以确保混凝土整体性<sup>[3]</sup>。混凝土灌注对槽壁稳定存在显著影响，若导管拆卸提升过快会导致槽内泥浆面骤降，破坏原有压力平衡可能引发槽壁塌方。混凝土不对称浇筑会产生偏压冲击槽壁，特别是在软弱地层中易导致土体位移和变形。相邻槽段施工间隔时间不足时，新浇混凝土侧压力可能引起已施工但未充分硬化槽段的变形甚至破坏。为控制这些风险，需采用严格的施工控制措施，精确计算导管埋深实时调整提升速度，保持混凝

土坍塌度在 180-220 mm 范围内以确保流动性和填充性,采用间隔跳跃式施工顺序减少相邻槽段的相互影响,并在混凝土灌注过程中全程监测槽内泥浆面变化,及时补充泥浆维持液面高度稳定。

## 4 稳定性监测与检测方法

### 4.1 槽壁变形监测技术

槽壁变形监测是实施信息化施工和动态风险管控的核心环节,其必要性体现在能够实时获取槽壁状态数据,为施工决策提供科学依据,及时识别潜在险情并采取干预措施,避免灾难性坍塌事故的发生。现代监测技术主要采用超声波测壁仪与测斜管系统相结合的综合监测方案。超声波测壁仪作为槽壁几何形态的直接检测手段,其工作原理基于超声波脉冲发射与接收的时差测量,传感器沿导杆下放过程中以高频向槽壁发射超声波,接收从槽壁反射的回波,通过精确计算声波传播时间并结合声速校准,可实时计算传感器与槽壁各点的距离,从而绘制出整个槽深范围内的壁面轮廓曲线<sup>[4]</sup>。该技术测量精度可达  $\pm 5$  mm,检测深度超过 100 m,能够在成槽后立即发现局部超挖、坍塌和壁面凹凸不平等缺陷,检测频率要求每幅槽段在清孔换浆后混凝土灌注前必须完成全深度检测,数据实时传输至地面系统生成三维槽孔模型。测斜管监测则侧重于槽壁周边土体的深层水平位移,在槽孔施工前于其外侧 1-2 m 处预埋专用测斜管,管底嵌入稳定土层,采用高精度伺服加速度计式测斜探头进行测量,探头每 0.5 m 一个测点采集数据,通过计算各深度点与初始基准值的差异,可精确获取土体水平位移随深度的变化曲线。

### 4.2 地下水位与泥浆性能检测

地下水位与泥浆性能的实时检测是维持超深槽壁稳定的基础性保障工作,其监测数据的准确性与及时性直接关系到压力平衡系统的有效性。地下水位监测需在槽孔周边布置不少于 4 个水位观测井,井点布置在可能受施工影响的主要含水层中,井管滤网位置与监测含水层对应,井深应大于槽孔深度 5 m 以上以确保监测数据的代表性。监测采用自动水位记录仪进行连续测量,测量精度要求达到  $\pm 1$  cm,数

据采集频率在成槽和混凝土灌注期间不低于 1 次/小时,重点监测槽内外水头差变化趋势,确保泥浆液面始终高于地下水位 1.5 m 以上的安全临界值<sup>[5]</sup>。当发现水位异常上升或下降超过 20 cm 时,需立即分析原因并调整泥浆液面高度或采取其他工程措施。泥浆性能检测则贯穿于泥浆循环使用的全过程,在泥浆站、槽孔入口和出口处分别设立检测点,检测频率为每班至少 2 次系统检测,每幅槽段施工前后必须进行全套指标检测,特殊地层施工时加密至每 2 小时检测一次关键指标。检测参数包括比重、粘度、含砂率、pH 值、失水量和泥皮厚度等,其中比重采用泥浆比重秤测量,控制范围 1.05-1.25 g/cm<sup>3</sup>。粘度采用马氏漏斗粘度计测量,控制范围 18-40 s。含砂率采用筛析法测量,要求小于 4%。pH 值采用试纸或电子 pH 计测量,控制范围 8-11。失水量采用 API 滤失仪测量,要求小于 30 mL/30 min。

## 5 结论

本文系统阐述了超深地下连续墙槽壁稳定性控制的关键技术。研究表明槽壁失稳主要源于应力状态改变与地下水渗流作用的耦合效应,需通过泥浆压力平衡、精准成槽作业和严格性能控制实现主动防控,以液压抓斗成槽、优质泥浆护壁与水下混凝土灌注的工艺组合,结合超声波测壁与多参数实时监测,形成的完整稳定性保障体系,该研究成果为超深地下空间开发中的槽壁稳定性控制提供系统解决方案,对预防坍塌事故、保障施工安全具有重要工程应用价值。

### 参考文献

- [1] 常林越,王卫东,宋青君.超深地下连续墙不同工艺施工土体位移实测分析[J].地下空间与工程学报,2025,21(S1):386-395.
- [2] 叶如,王毅,曹昱,等.软土地层地铁车站超深地下连续墙槽壁稳定性分析[J].城市轨道交通研究,2025,28(03):118-122.
- [3] 陶永木.排水泵站深基坑超深地下连续墙施工技术探讨[J].四川水利,2024,45(04):77-80+119.
- [4] 徐福田.复杂地质条件下超深地下连续墙成槽技术研究[J].铁道建筑技术,2024,(07):154-156+165.
- [5] 赵腾腾.百米级地下连续墙槽壁稳定性分析[J].山西建筑,2024,50(11):68-70+75.