

# 大断面泥水盾构机穿越复杂地层引发地面塌陷风险分析与控制对策

蒋孝鹏 丁二威

浙江华东测绘与工程安全技术有限公司

DOI:10.32629/etd.v6i5.16854

**[摘要]** 针对某地铁区间大断面泥水盾构穿越复杂地层引发多起塌陷事故,本文结合工程实例,分析致灾原因,归纳地勘偏差、粉砂不良性、复合地层扰动、漂石积仓、泥浆系统失效等诱因,并提出相应控制对策,为类似工程提供技术参考。

**[关键词]** 地面塌陷; 盾构施工; 复杂地层; 粉砂; 风险控制

**中图分类号:** P588.21+2.1 **文献标识码:** A

## Risk Analysis and Control Measures for Ground Collapse Induced by Large-Diameter Slurry Shield Tunneling through Complex Strata

Xiaopeng Jiang Erwei Ding

Zhejiang Huadong Surveying and Engineering Safety Technology Co., Ltd.

**[Abstract]** This paper investigates a series of surface collapse incidents during a large-diameter slurry shield tunneling project beneath complex strata in a metro section. Based on field records and geological conditions, six major contributing factors are identified: deviation in geological exploration, poor characteristics of silty sand, disturbance from composite strata, boulder accumulation, slurry pipeline blockage, and frequent equipment failures. Targeted countermeasures are proposed, including improving exploration methods, optimizing slurry parameters, and strengthening equipment maintenance. The findings provide technical guidance for similar shield tunneling projects under complex ground conditions.

**[Key words]** Ground collapse; Shield tunneling; Complex strata; Silty sand; Risk control;

### 引言

随着城市地铁建设全面推进,盾构施工过程中频繁发生地面塌陷、建筑开裂、渗漏水等安全事故,尤以穿越复杂地层的大直径泥水盾构风险最为突出。已有研究表明,粉质黏土与富水砂砾层等特殊地层极易诱发掌子面失稳与泥浆系统失效,盾构参数控制与设备维护成为关键技术瓶颈<sup>[1-3]</sup>。本文以某地铁区间工程为例,聚焦盾构机在复合地层掘进中多次塌陷事故,系统梳理致灾因素,提出可操作的控制对策,旨在为类似复杂地质条件下的盾构施工提供技术借鉴<sup>[4-5]</sup>。

### 1 工程概况与地质环境特征

#### 1.1 工程概况

本研究工程为某地铁区间大直径泥水盾构隧道,采用泥水平衡盾构法穿越钱塘江,施工风险等级较高。隧道外径11.3m,内径10.3m,管片壁厚0.5m,单环宽2.0m,总长约2966m,累计推进1483环。线路整体呈东南-西北走向,依次下穿沿江河道、钱塘

江主河床、江底输油管线、厂房与住宅建筑群,并最终抵达南阳油库北侧,如图1所示。



图1 区间地理位置示意图

## 1.2地质环境特征

该区间地质构造复杂, 主要分布有粉砂、砂质粉土、粉质黏土、黏土及含砾粉质黏土等地层, 地质层序密集, 上下差异显著, 含水层发育、结构松散。盾构穿越钱塘江南岸后, 地层由复合型过渡为以粉砂为主的软弱层, 富水性强, 自稳性差, 该段也是地面塌陷事故的高发区域。

## 2 事故经过

盾构机穿越钱塘江南岸后, 进入地质结构松散、层间差异显著的粉砂-黏土复合地段, 接连发生多起地面塌陷事故, 对周边河堤及建筑物造成严重影响, 具体情况如下。

### 2.1河堤局部塌陷

2019年12月11日上午7点, 施工人员巡视发现赭山湾河南岸河堤出现沉降, 至9点塌陷范围扩展至约10m, 如图2所示。现场盾构刀盘部位冒气明显, 盾尾亦有气体逸出, 隧道内部暂未发现结构异常。塌陷部位对应盾构推进至第1132~1133环, 距刀盘前方约6.7m, 初判为掌子面扰动引发地层失稳所致。



图2 赭山湾河南河堤塌陷

### 2.2地面严重塌陷



图3 厂区内地面塌陷

2020年3月8日盾构推进至第1212环时, 刀盘因卡阻无法启动, 伴随出现泥浆管路堵塞与设备故障。多次强制启动过程中, 造成车间地面剧烈沉降, 厂房立柱明显下沉, 墙体结构再次开

裂, (见图3)。事故持续近两个月, 直至4月2日恢复; 但推进一环后刀盘再次受困, 最终于4月30日完成有效修复。

## 3 风险分析与控制对策

盾构机穿越钱塘江南岸后的复合地层, 地质条件复杂, 施工中连续发生多起塌陷事故。本文将事故归因于5个方面, 并分别提出有针对性的分析与控制措施。

### 3.1地质勘察偏差风险分析与控制对策

盾构施工过程中发现大量粒径超过30 cm的漂石(见图4), 实际情况与地勘报告存在明显出入。主要原因在于粉质黏土强度较低, 难以抵抗钻杆冲击力, 致使大粒径砾石在钻探中被挤压偏移, 未能准确探测。同时, 钻杆直径较小, 仅能识别小粒径砾石, 进一步降低了地勘精度, 导致地层复杂性被低估。该偏差直接影响盾构掘进参数设置与施工风险评估, 需引起重视。



图4 巡检过程中发现有大量砾石排出

地勘报告未准确反映大粒径砾石, 主要因粉质黏土强度不足, 钻探时砾石被挤压偏移, 导致结果失真。建议建立“加固—精探”机制: 初勘识别含砾层后, 对高含量区域注浆加固, 再行精探获取真实粒径数据, 据此优化掘进参数, 有效规避施工风险。

### 3.2粉砂地层特性与施工风险控制

粉砂地层因富水性、湿陷性、震陷性、内摩擦力大及自稳性差, 显著提升盾构施工风险。该类地层泥浆易渗失、浆液性能下降, 削弱携渣与支护能力, 易致积渣、堵管与掌子面失稳。施工扰动或地下水冲刷下易液化, 引发沉降; 颗粒粗糙、嵌挤力大, 刀盘扭矩上升, 扰动增强; 停机后因自密实致刀盘重启困难。自稳性差还易引发超挖与地层涌入, 诱发塌陷。

针对粉砂地层富水性强、易液化、自稳性差等特点, 盾构施工需采取多维控制策略。应合理配置泥浆参数, 提升携渣与支护能力, 防止积渣和掌子面失稳; 实时监测浆液性能, 防止流失导致性能下降。富水地层中适当提高推进速度, 缩短扰动时间, 减少泥浆损耗; 严格控制掘进推力与扭矩, 避免强扰动诱发沉降。充分发挥泥浆润滑与粘结作用, 有助于降低摩阻、稳定掌子面, 提升施工安全性。

### 3.3复合地层扰动风险分析与控制对策

如图5所示, 该区间塌陷区域掌子面为上部粉砂与下部粉质

黏土复合地层,二者自稳性差异显著。粉砂层稳定性差,需快速掘进以降低扰动;而粉质黏土粘结力强、推进缓慢,渣土强度高。实际施工中推进速度仅约10 mm/min,虽适应黏土特性,却加剧对粉砂层扰动。在高推力、大扭矩、低速推进的综合作用下,粉砂层失稳涌入,诱发地表塌陷,反映出复合地层中施工参数需兼顾上下层特性,精准协调控制至关重要。

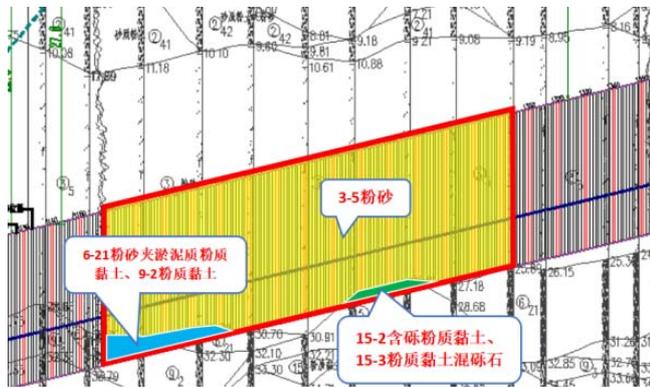


图5 下穿区域局部纵断面图

针对复合地层上下部地质特性差异大、施工响应不一致的问题,应采取差异化控制策略。上部粉砂透水性强、自稳性差,需快速掘进以降低扰动;下部粉质黏土稳定性好但阻力大,推进减缓易致推力、扭矩升高,加剧对上部的扰动,引发差挖与塌陷。施工中应在确保设备稳定的前提下,适当提高掘进速度,优化推进参数与泥浆支护效果,减少停机时长,实现上下地层协调,确保风险可控。

#### 3.4 漂石积仓风险分析与控制对策

在盾构穿越粉质黏土地层过程中,频繁出现大粒径漂石堆积于泥水仓内,泥浆难以有效携带排出,造成严重积仓现象。漂石堆积显著提高盾构推进所需总推力和刀盘扭矩,降低施工效率,同时导致刀具受力异常、加剧磨损,实测中多次发现刀具碎裂、扭曲(见图6)。漂石积仓已成为影响设备稳定运行、诱发掘进中断与地表塌陷的关键风险源,需引起高度重视。



图6 刀具损耗情况

有效排出漂石是防止泥水仓积石的关键。大粒径漂石需依靠碎石机破碎后随泥浆系统排出,因此保障碎石机正常运行至

关重要。实际施工中,塌陷区段曾因碎石机失效导致漂石无法处理,积仓风险显著上升。为此,应加强碎石机运行监测与日常维护,落实“化大为小”控制原则,确保盾构连续掘进,降低设备失效引发的施工中断与塌陷风险。

#### 3.5 泥浆系统失效风险与控制措施

盾构掘进过程中,泥浆循环管路多次发生堵塞甚至爆管,造成泥浆回流、泥水仓液位骤降、仓压突变,成为诱发地表塌陷的重要因素之一(见图7)。主要原因包括:

- ①地层因素:高粘性粉质黏土易附着管壁,形成淤堵;
- ②渣土沉积:泥浆停流后大粒径砂石沉积未排净,易堵塞管道;
- ③管网压力不足:近3 km长距离掘进导致循环压力下降,携渣能力减弱;
- ④泥浆性能劣化:富水层导致浆液流失与稀释,影响其支撑与裹渣功能;
- ⑤设备故障:逆止阀启闭失效,破坏掌子面压力平衡,增加塌陷风险。

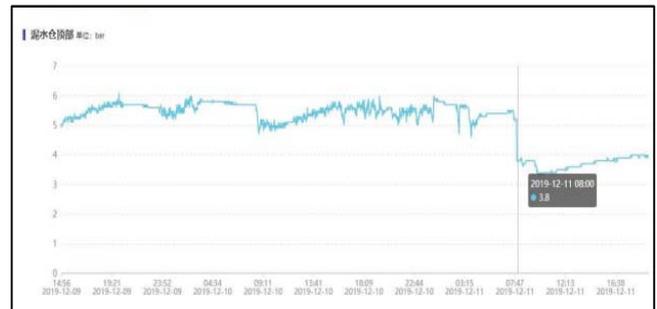


图7 泥水仓顶部仓压变化情况

为防止盾构施工中泥浆管路堵塞,应从流量提升、性能稳定、沉积控制及设备维护多措并举。在长距离输送系统中增设中继泵以提升循环能力,加强泥浆比重与黏度监测,确保携渣与支护效果;推进单环后延时停机,彻底清排渣土,避免沉积堵管;同时强化设备养护,确保逆止阀、泵体等关键部件高效运行,有效降低爆管与堵塞风险,保障盾构施工连续安全推进。

#### 4 结束语

本文以某地铁区间大断面泥水盾构施工引发的塌陷事故为案例,系统分析了粉砂与粉质黏土复合地层条件下,因地质勘察偏差、地层特性不良、漂石积仓、泥浆管路堵塞及设备故障等多重因素叠加导致地表沉降的机制。在此基础上,提出了加强地质精探、优化推进参数、保障设备运行、改进泥浆循环系统等多项控制对策,研究成果可为类似复杂地层条件下的盾构施工风险防控提供技术参考。

#### [参考文献]

- [1]周庆合.粉质黏土层大直径泥水盾构掘进地层扰动分析[J].铁道标准设计,2020,64(01):158-163.
- [2]张虎,于兴国.泥水平衡盾构机刀盘受困处理对策[J].城市建设理论研究(电子版),2019(28):28-29.

[3]唐少辉,张晓平,刘浩,等.复杂地层水下盾构隧道工程难点及关键技术研究展望[J/OL].工程地质学报:1-11[2020-07-08].<https://doi.org/10.13544/j.cnki.jeg.2020-044>.

[4]林洋.浅谈大直径泥水平衡盾构施工泥水处理系统应用及固废循环利用[J].地基处理,2020,2(02):153-157.

[5]赵程.泥水盾构泥浆性质与泥膜形成试验研究[J].赤峰学院学报(自然科学版),2020,36(01):74-77.

#### 作者简介:

蒋孝鹏(1993--),男,汉族,江苏苏州,硕士学历,研究方向:岩土工程、轨道交通与市政工程风险分析与监测技术等。