

深埋岩溶区基岩面漏失致钻孔坍塌机理与预防

白坤晓, 张建良, 尉玺, 王建阳

(北京市工程地质研究所, 北京 100048)

摘要: 针对深埋岩溶区钻探施工中钻遇基岩面时因泥浆失返性漏失引发钻孔坍塌甚至地面塌陷的工程难题, 本文结合北京市通州区3起钻孔坍塌事故案例, 采用理论分析与工程验证相结合的方法, 系统研究了坍塌机理与防治措施。基于朗肯土压力理论, 建立了泥浆漏失前后孔壁应力平衡模型, 推导了保持孔壁稳定的临界深度计算公式。结果表明: 泥浆失返导致液柱压力下降, 无法平衡地层侧向土压力, 是孔壁失稳的根本原因; 坍塌形式分为局部坍塌与整体坍塌, 前者因临界深度以上地层液柱压力不足而自上而下失稳, 后者需同时具备基岩顶板破碎、溶洞或地下河发育、覆盖层以非黏性土为主等极端地质条件。工程实践表明, 合理设计孔口管深度、小径掏眼、提前下套管等预防措施可有效避免坍塌事故。研究成果对深厚覆盖层岩溶区钻探安全具有重要指导意义。

关键词: 深埋岩溶区; 基岩面; 泥浆失返; 钻孔坍塌; 孔壁稳定; 临界深度; 坍塌机理; 钻探工程

中图分类号: P634.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)S1-0381-07

Mechanism and prevention of borehole collapse induced by mud loss at bedrock surface in deep buried karst area

BAI Kunxiao, ZHANG Jianliang, YU Xi, WANG Jianyang

(Beijing Institute of Engineering Geology, Beijing 100048, China)

Abstract: To address the engineering challenge of borehole collapse or even ground subsidence induced by total mud loss when drilling into the bedrock surface in deep-buried karst areas, this study systematically investigates the collapse mechanism and preventive measures through a combination of theoretical analysis and engineering verification, based on three borehole collapse accident cases in Tongzhou District, Beijing. Based on Rankine's earth pressure theory, a stress balance model of the borehole wall before and after mud loss is established, and a formula for calculating the critical depth to maintain borehole wall stability is derived. The results indicate that the fundamental cause of borehole wall instability is the decrease in hydrostatic pressure caused by total mud loss, which fails to balance the lateral earth pressure of the formation. The collapse modes can be classified into local collapse and overall collapse. The former occurs from top to bottom above the critical depth due to insufficient hydrostatic pressure, while the latter requires extreme geological conditions such as a fractured bedrock roof, well-developed karst caves or underground rivers, and an overburden dominated by non-cohesive soils. Engineering practice demonstrates that preventive measures, including the rational design of conductor casing depth, small-diameter pilot drilling, and advanced casing running, can effectively avoid collapse accidents. These research findings provide important guidance for drilling safety in karst areas with deep overburden.

Key words: deep buried karst area; bedrock surface; mud loss; borehole collapse; borehole wall stability; critical depth; collapse mechanism; drilling engineering

0 引言

在钻探施工中, 为保证钻孔稳定, 钻穿覆盖层

进入稳定基岩后, 需下入表层套管稳固上部覆盖层, 套管要求进入稳定基岩 ≥ 0.5 m。在下入套管之

收稿日期: 2026-02-11; 修回日期: 2026-03-31 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.S1.051

第一作者: 白坤晓, 男, 汉族, 1987年生, 工程师, 探矿工程专业, 主要从事水文水井、地质岩心钻探技术与工程管理工作, 北京市海淀区北洼路90号, cwe_bkx@163.com。

引用格式: 白坤晓, 张建良, 尉玺, 等. 深埋岩溶区基岩面漏失致钻孔坍塌机理与预防[J]. 钻探工程, 2026, 53(S1): 381-387.

BAI Kunxiao, ZHANG Jianliang, YU Xi, et al. Mechanism and prevention of borehole collapse induced by mud loss at bedrock surface in deep buried karst area[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(S1): 381-387.

前,上部地层处于裸眼状态,通常依靠泥浆维持孔壁稳定。若覆盖层下方岩溶发育乃至存在溶洞,当钻进至基岩面附近时,由于岩溶裂隙或溶洞的存在,易发生泥浆失返性漏失,造成孔内泥浆压力迅速下降,难以平衡孔壁侧向压力,进而引发钻孔坍塌,甚至会引起地面塌陷^[1]。尤其在深埋岩溶区,因覆盖层深厚,钻孔坍塌时往往没有足够时间抢救钻具,极易造成钻具被埋、钻孔报废的严重后果,损失惨重。

针对岩溶区泥浆失返性漏失引起钻孔坍塌甚至塌陷问题,已有不少学者开展相关研究。姜明映等^[2]通过室内模型试验,研究了岩溶区覆盖层为“上黏下砂”结构时,桩孔钻穿溶洞后因泥浆漏失引发的土体变形机制与破坏模式,其力学原理在于:溶洞顶板被钻穿后,泥浆快速下窜导致孔壁应力失衡,下部砂土因单粒结构率先移动并充填桩孔,进而引起上覆黏土层失稳下沉。当砂土顶面与水平面夹角接近其内摩擦角时,砂土滑动停止;随后黏土层持续下沉并形成土拱;土拱形成后,地表趋于稳定。李慧娟等^[3]分析武汉市长江一级阶地钻探施工诱发岩溶塌陷的形成机制,认为在下伏碳酸盐岩岩溶发育且上覆盖层具“上黏下砂”二元结构的区域,进行钻探施工时可能破坏基岩与覆盖层的平衡条件及地下水动力条件,如果未采取及时有效的防护措施,极易引发岩溶塌陷。潘启钊等^[4]将钻探引发的岩溶塌陷划分为三个阶段:砂土漏失阶段、地表塌陷阶段、塌陷扩展阶段。石晓龙等^[5]分析了钻探引发岩溶塌陷的成因机理,钻探施工是直接诱发因素。施工过程中人为破坏地下洞穴隔水顶板,贯通地表水与地下水,在水动力及自重作用下,上部潜水迅速携带泥砂涌入洞中。由于塌陷过程迅速,且周边地质环境平衡遭到破坏,易产生联动效应,引发更大范围的地面变形与多处塌陷。

上述研究多针对岩溶覆盖较浅、土体结构简单的情况,而针对第四系覆盖层深、地层结构复杂时,因钻探诱发的岩溶塌陷问题,以及如何保障岩溶区钻探施工安全的相关研究较少。例如,1995年5月,一台车载黄河钻机在北京市通州区施工探采结合孔,钻进至288.20 m时揭露基岩(灰岩);继续钻进至289.29 m时,钻孔内泥浆突然严重漏失,漏失量达90 m³/h。现场人员立即提钻,钻杆提出近一半时,孔口地面开始下陷,孔内传出“轰、轰”响声,人员迅速撤离。随后钻机快速下沉,仅桅杆顶端露出地面,全套

设备陷入地下约18 m深处,在平原上形成一个直径约21 m的大坑,幸无人员伤亡^[6]。2012年11月,北京顺义区杨镇某岩溶水勘探孔钻进至283 m见基岩(灰岩)时发生失返性漏失。第一时间提钻,提钻过程中钻机倾斜,人员迅速撤离。后现场塌陷,形成直径约10 m的陷坑,钻机整体陷入,仅塔顶外露约7 m(图1),埋钻260 m,无人员伤亡但经济损失严重。因此,在关注岩溶塌陷的同时,也需要关注岩溶区的钻探安全,最大程度避免地质灾害,减少经济损失。



图1 顺义钻孔塌陷事故

2025年,在北京市通州区活动断裂监测项目钻探施工中,2个场地先后发生3次钻孔坍塌事故,均发生在钻进至基岩面附近时。本文结合实际案例及后续处理经验,从坍塌机理与工程应对措施两方面,系统总结深埋岩溶区钻探施工中基岩面泥浆失返条件下钻孔坍塌的预防与处置措施,以期为同类地质条件钻探施工提供技术参考。

1 事故案例

1.1 地质概况

项目施工区位于北京市通州区,覆盖层主要为第四系沉积物,属冲洪积、河流相沉积,偶见湖沼相,厚度330~800 m不等。下伏基岩地层主要有古生代寒武系、新元古代青白口系和中元古代蓟县系,其中碳酸盐岩地层主要为寒武系灰岩和蓟县系白云岩。受区域构造应力作用控制,断裂构造走向主要有NE和NW两组。NE向断裂主要有南苑-通县断裂、宋庄断裂、燕郊断裂和姚辛庄断裂,NW向断裂主要是张家湾断裂^[7]。断裂活动不仅使基岩本身较为破碎,更重要的是为地下水的运移和溶蚀作用提供了优势通道,极大地加剧了岩溶的发育程度。

1.2 事故统计

由于在施工前无法精确掌握地质情况,不能精准确定基岩面与漏失位置,对漏失程度缺乏预判,

加之缺乏类似施工经验,该项目在钻探施工中一共发生了 3 起钻孔坍塌事故(表 1)。

表 1 钻孔坍塌事故统计

位 置	钻孔类型	孔 号	基岩面/m	漏失位置/m	事 故 后 果
宋庄镇	地质勘探孔	NT02-T	330	330	钻孔坍塌、孔口塌陷
绿心公园	地质勘探孔	ZJW01-T	637	642.8	钻具被埋、钻孔报废、经济损失严重
	地应力孔	ZJW01-D	639	642	钻具被埋、钻孔报废、经济损失严重

1.3 事故经过

1.3.1 宋庄镇场地

该场地位于南苑-通县断裂(正断层)下盘,地层结构:覆盖层厚约 330 m,其中 0~310 m 为黏土、粉土与砂类土互层,310~330 m 段为砂卵砾石层;覆盖层以下基岩为寒武系灰岩。

地质勘探孔 NT02-T 事故经过:在孔深 38 m 处安装孔口管后,Ø130 mm 取心钻头钻进至 330 m 时见基岩,泥浆失返,第一时间提钻,艰难抢出钻具。在提钻过程中,能听见孔壁坍塌掉落到泥浆中的轰隆声,上提钻具时阻力很大。待稳定后,孔口管外形形成直径约 3 m、深度约 6 m 的空洞(图 2)。



图 2 孔口塌陷

后续处理:在孔口管外浇筑水泥砂浆,将地面塌陷坑填实并将孔口管固定牢固;下入 Ø130 mm 刮刀钻头下探孔内的坍塌情况,发现上部坍塌缩径,中部放空,底部有岩屑沉淀,说明钻孔没有整体坍塌;随后采用 Ø190 mm 牙轮钻头扩孔,为防止扩孔过程中再次发生泥浆漏失,扩孔至 328 m(基岩面以上 2 m)处,下入 Ø159 mm 套管并用水泥封固(图 3);待水泥凝固后扫孔至基岩面,继续用 Ø110 mm 取心钻头钻进,未出现泥浆漏失,表明随泥浆进入

岩溶裂隙的岩屑封堵了原有裂隙通道。

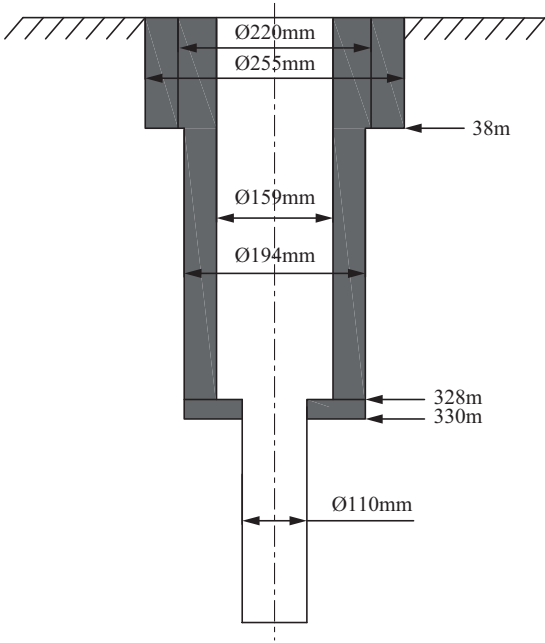


图 3 NT02-T 钻孔结构

1.3.2 绿心公园场地

该场地位于张家湾断裂(正断层)上盘,地层结构:覆盖层厚度约 637~639 m,地层以黏土、粉土及砂类土互层为主,下部为卵砾石夹黏土;基岩为蓟县系白云岩,基岩顶板破碎,裂隙发育,上部裂隙由黄泥填充。

(1)地质勘探孔 ZJW01-T 事故经过:全孔取心钻进,下入 Ø146 mm 孔口管 10 m;Ø130 mm 钻头钻穿厚达 637 m 的第四系覆盖层后进入基岩,未下套管;随后 Ø91 mm 取心钻头钻进至 642.8 m 时泥浆失返,随即孔壁坍塌,在提出 2 根钻杆后钻具被埋。钻孔报废。

(2)地应力孔 ZJW01-D 事故经过:Ø445 mm 牙轮钻头开孔钻进至 107 m,下入 Ø340 mm 表层套管并水泥固井;随后换 Ø311 mm 牙轮钻头继续钻进,至 639 m 见基岩;根据设计要求继续钻进至稳定基

岩面,钻至642 m时泥浆失返,第一时间提钻,在提出2根钻杆后孔内坍塌埋钻。

后续处理:钻具被埋,不能上下活动,且无法建立循环;下测线测得坍塌面位于109 m,孔内坍塌至表层套管下管口;反出部分钻具,钻孔报废。

2 事故分析

因泥浆失返引起的钻孔坍塌是一个复杂的动态过程,无法通过公式来表达其坍塌过程,但是可以通过分析泥浆漏失前后孔壁应力平衡状态的变化,来阐明泥浆漏失导致钻孔坍塌的机理。

2.1 孔壁稳定性分析

在未受扰动的原状地层中,土体处于应力平衡状态。当钻孔形成后,孔壁周围的原始应力状态被破坏,孔壁土体失去了原有的径向支撑,有向孔内移动的趋势。利用孔内泥浆液柱维持钻孔形成后的压力平衡,是保持孔壁稳定的基本方法^[8]。

孔壁的受力主要包括地层侧向土压力(含水土压力)、泥浆液柱压力及圆拱支撑力^[9]。圆拱支撑力是在钻进成孔后由于孔周土体向钻孔中心发生位移时相互挤压而形成“圆拱效应”,这种土体成拱的作用有利于孔壁稳定^[10],这也解释了为何孔浅、直径小的钻孔在没有泥浆保护的情况下,砂层也能够自稳。但该过程的作用机理比较复杂,目前还无法进行定量分析。为便于研究且使分析结果利于生产安全,本文主要针对地层主动土压力与泥浆液柱压力这两个主要受力进行力学分析。

根据朗肯土压力理论,地层的主动土压力 P_c 和泥浆液柱静压力 P_w :

$$P_c = K_a \gamma_c H_c \quad (1)$$

$$P_w = \gamma_w H_w \quad (2)$$

式中: K_a ——侧压力系数(取主动土压力系数),无量纲; γ_c ——地层重度, kN/m^3 ; H_c ——地层深度, m; γ_w ——泥浆的重度, kN/m^3 ; H_w ——液柱高度, m。

当泥浆液柱静压力大于等于地层的主动土压力时,即 $P_w \geq P_c$,孔壁能维持稳定^[8]。

2.2 漏失前后孔壁的受力情况

(1) 泥浆漏失前, $P_w > P_c$ (图4), 孔壁处于稳定状态。

(2) 泥浆漏失后, 泥浆以一定速度向孔底流动,

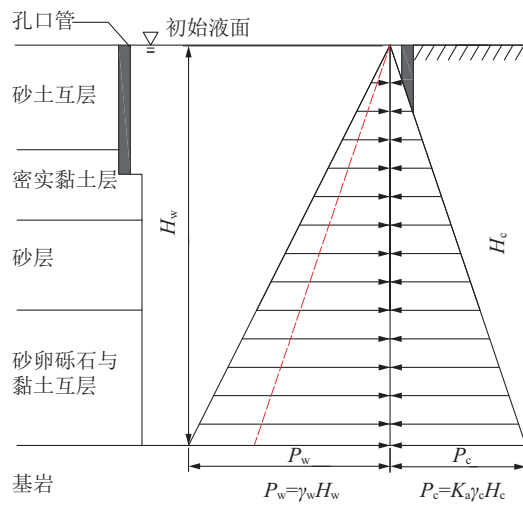


图4 泥浆漏失前孔壁受力情况

部分压力水头转化为速度水头 h_v 。

$$h_v = \frac{v^2}{2g} \quad (3)$$

式中: v ——泥浆漏失速度, m/s ; g ——重力加速度, 取 10 m/s^2 。

此时, 泥浆液柱静压力:

$$P_w = \gamma_w (H_w - h_v) = \gamma_w (H_w - \frac{v^2}{2g}) \quad (4)$$

随着泥浆持续漏失, 液柱高度 H_w 不断下降; 同时, 由于漏失过程中的能量转化, 部分静压力水头转化为速度水头, 导致泥浆液柱静压力进一步下降。以1995年通州自来水厂事故钻孔为例, 钻孔直径 $\Phi 311 \text{ mm}$, 钻杆规格 $\Phi 89 \text{ mm}$, 泥浆漏失量 $90 \text{ m}^3/\text{h}$, 计算可得泥浆漏失速度 $v = 0.36 \text{ m/s}$ 。代入式(3), 可得速度水头 $h_v = 0.0065 \text{ m}$, 可忽略不计。

由此可见, 在完全漏失的情况下, 速度水头对液柱静压力的影响有限, 不会出现负压抽吸现象, 此时起主导作用的是泥浆的液面高度。随着漏失持续进行, 当泥浆液柱压力无法平衡地层的主动土压力时, 孔壁土体便开始失稳坍塌^[11]。钻孔上部地层的应力平衡将被率先破坏, 引发该段孔壁的最早坍塌。

(3) 漏失至泥浆液面稳定后, 泥浆液柱静压力不足以平衡地层主动土压力的孔段将发生孔壁失稳。通过力学分析(图5), 可得保持钻孔压力平衡的临界深度 H_{cr} 。在临界深度以上, 主动土压力大于泥浆液柱静压力, 孔壁失稳; 在临界深度以下, 液柱

静压力大于主动土压力,孔壁保持稳定。

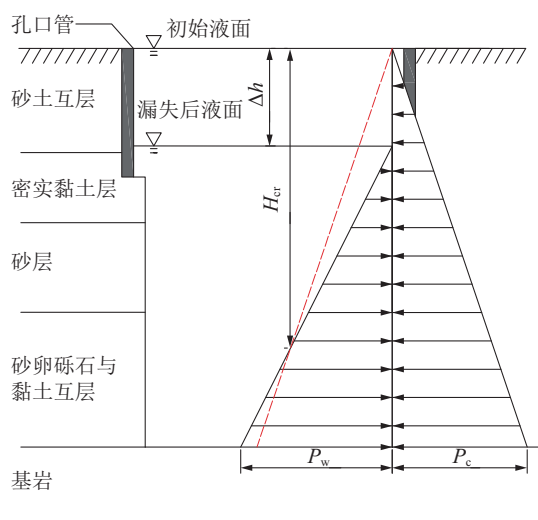


图5 泥浆漏失后孔壁受力情况

在临界深度时 $P_w = P_c$, 分别将式(1)、式(2)代入, 可得:

$$H_{cr} = \frac{\gamma_w \Delta h}{\gamma_w - K_a \gamma_c} \quad (5)$$

式中: Δh ——泥浆液面下降高度, m。

以砂土层为例, 已知孔深 600 m, 地层平均重度取 23 kN/m^3 , 主动土压力系数取 0.4, 泥浆重度取 10.8 kN/m^3 。

(1) 当泥浆液面下降到 30 m 时, 由式(5)可得临界深度 $H_{cr} = 202.5 \text{ m}$, 即 202.5 m 以上的砂土层因液柱压力不足以平衡地层侧压力而发生失稳坍塌, 202.5 m 以下的砂土层相对稳定。

(2) 同理, 当泥浆液面下降到 90 m 时, 计算得出的临界深度 $H_{cr} = 607.5 \text{ m}$, 即全孔范围内砂土层都会发生坍塌。

通过以上分析可知, 钻孔坍塌的临界深度受漏失后泥浆液面深度影响。当岩溶地层中水位极低甚至处于无承压状态时, 泥浆液面降深大, 全孔段发生坍塌; 若泥浆液面下降高度有限, 则存在临界深度, 为确保孔壁稳定, 需将孔口管下至临界深度以下。

2.3 钻孔坍塌过程

前文分析主要围绕泥浆漏失导致液柱压力下降对孔壁稳定性的影响, 而钻孔坍塌是一个涉及多因素交互作用的动态过程, 部分不稳定层段可能因上方坍塌物的临时支撑而暂时保持稳定, 而部分原

本稳定的层段可能因基岩顶板坍塌失去下部支撑而发生失稳。因此, 在实际工程中, 还需综合考虑其他因素, 例如基岩顶板破碎程度、第四系覆盖层的岩性与厚度、地下水动力条件等。基岩顶板附近裂隙发育程度越高, 越容易发生泥浆漏失并引发塌孔; 覆盖层主要岩性若为砂性土, 则由于砂粒间无黏结力, 易被地下水侵蚀、掏空和搬运, 容易发生坍塌; 岩溶地下水具有搬运、迁移及溶解碎屑物质的能力, 其能力大小主要由水流速度、水力坡度及流量的大小决定^[7,12]。

参考先前学者对工程勘察钻孔及钻孔灌注桩施工中孔壁失稳机理的研究, 以及对岩溶塌陷模型的建立^[5,13-16], 对覆盖层较深条件下的钻孔坍塌过程(图6)进行机理梳理。

(1) 局部坍塌: 当钻遇岩溶裂隙导致泥浆漏失且液面下降有限时, 临界深度以下地层保持稳定, 临界深度以上的地层将自上而下发生坍塌。砂层率先失稳, 随后上部黏土层因失去支撑而逐步塌落; 黏土因黏聚力的作用, 通常呈块状掉落, 并在下落过程中出现缩径搭桥现象。此过程持续至坍塌物填满临界深度以上钻孔空间后停止。

(2) 整体坍塌: 若基岩岩溶水位低, 漏失后泥浆液面显著下降, 同时基岩顶板破碎, 则钻孔上部孔壁将因应力平衡被打破而失稳, 钻孔底部因失去有效支撑而发生坍塌; 加之基岩下方存在巨大空间可储存塌落物, 或存在地下河可运移塌落物, 最终可能引起钻孔整体坍塌, 进而导致较大范围的地面塌陷。

3 预防措施及实际应用

3.1 预防措施

通过以上案例分析及理论推导, 针对深埋岩溶区基岩面钻孔漏失坍塌的特殊风险, 应采取以预防为主的安全防护策略。

(1) 地质资料搜集与钻孔设计。在钻探施工前, 应搜集周边钻孔的地质资料, 了解地层情况, 包括覆盖层岩性及厚度、基岩面岩溶发育程度及承压水头高度等, 并依据相关资料合理优化钻孔结构^[17]。

(2) 孔口管下入深度。孔口管应穿过不稳定的表土层, 进入足够深度的较厚密实黏土层; 孔口管与孔壁间隙需用优质黏土捣实或用水泥封固^[18]。由此, 即便钻孔发生大规模坍塌, 只要孔口管稳固,

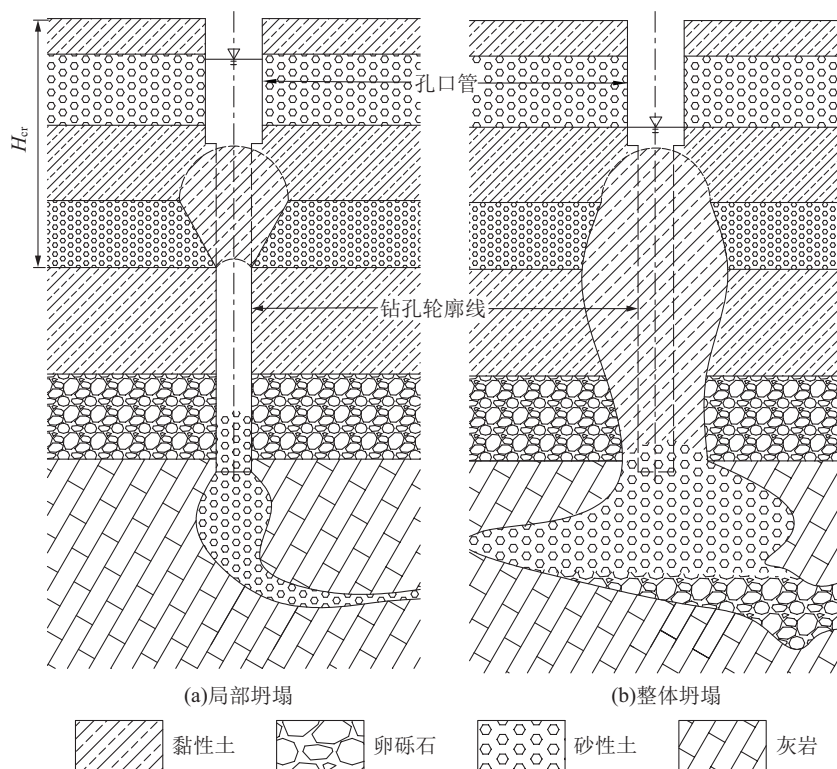


图6 钻孔坍塌模型

即可将坍塌范围限制在孔口管以下,防止坍塌蔓延至地表,从而确保钻机基础与机身稳定,避免钻机倾覆掉落事故。

(3)小径掏眼与漏失判定。小径掏眼是一种经济而灵活的探测与预防手段。在钻进至临近设计基岩面时,换用小口径钻头进行“掏眼”式钻进,钻进至稳定基岩面,观察泥浆漏失情况。例如,用 $\Phi 311$ mm钻头钻进至距设计基岩面约10 m后,改用 $\Phi 152$ mm钻头继续钻进至基岩面。采用此方法后,即使发生漏失,漏失速度也较低,从而争取更充分的钻具抢救时间;孔壁坍塌的砂土也更易将小口径段“膨住”,阻止泥浆进一步流失,避免坍塌继续扩大;同时,小径钻具上提时阻力较小,更容易提至安全位置。判定与应对分为两种情况:泥浆不漏失时,可退出现有小径钻具,用原设计孔径扩孔至该深度,并按设计下入套管或继续钻进;发生漏失时,一旦发现泥浆失返,应立即停止钻进,提出小径钻具,待钻孔稳定后采用原口径钻头钻进至漏失点以上2~3 m处,并提前下管。

(4)提前下管。在钻进至距基岩面2~3 m、发生漏失之前,提前下入表层套管。在确保上部地层稳定的前提下再进行后续钻进作业,即使后续钻进

基岩时发生泥浆失返,孔内液面下降,被套管隔离的第四系覆盖层也因有套管的支撑而不会坍塌。对于套管与基岩之间的不稳定地层,可通过水泥固井或下管封堵等方式处理^[17,19]。

3.2 措施应用

地应力孔ZJW01-D报废后,需要在同一场地补打一个更新孔。吸取之前塌孔的教训,通过孔口管保护、提前下管、水泥固井及下飞管等措施,顺利完成更新孔钻探施工。

施工流程:开孔采用 $\Phi 445$ mm牙轮钻头钻进至133.1 m,下入 $\Phi 340$ mm套管并用水泥固井;随后换 $\Phi 311$ mm牙轮钻头继续钻进,钻进至634.5 m(离基岩面还有2.5 m)时,提前下入 $\Phi 178$ mm套管;最后采用 $\Phi 110$ mm金刚石钻头取心钻进。

后续问题:提前下管虽有效避免了泥浆漏失导致的钻孔坍塌报废问题,但也为后续钻探埋下隐患。 $\Phi 178$ mm套管与稳定基岩面之间未受保护的破碎地层(634.5 m~639 m)暴露在外,随时存在坍塌掉块引发卡钻的风险。 $\Phi 110$ mm取心钻进至647 m时遇到溶洞,泥浆失返,采取清水顶漏钻进^[20],形成了“上塌下漏”的恶劣工况。对此采用水泥固井方式稳固坍塌地层,但后续钻进过程中,孔

壁水泥环在钻杆反复碰撞敲击下逐渐破碎掉落,无法从根本上解决坍塌问题。最终在钻进至656.7 m稳定地层后,扩孔下入一段 $\varnothing 146$ mm地质套管护住坍塌孔段(图7),后续钻探工作得以顺利进行。

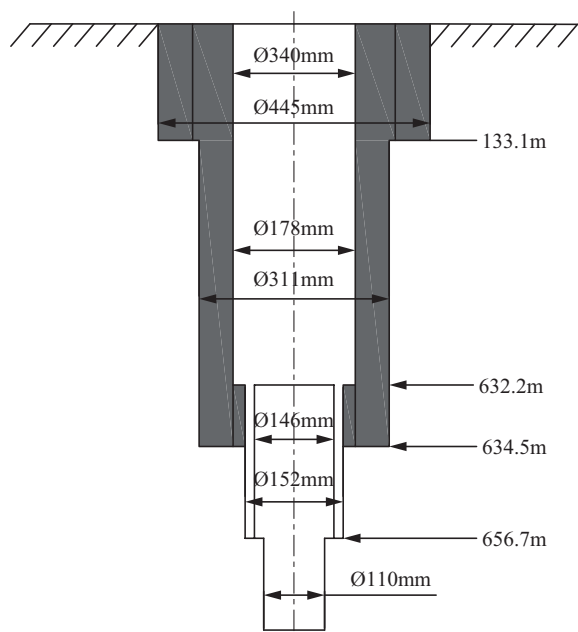


图7 ZJW01-D更新孔钻孔结构

4 结论

本文通过对北京市通州区断裂带边缘钻探施工中基岩面泥浆漏失引发钻孔坍塌问题的系统研究,得出以下结论。

(1) 钻孔坍塌机理明确,其本质是力学平衡被破坏。钻遇岩溶发育的基岩面时,漏失导致孔内泥浆液柱压力下降,无法平衡上部地层的侧向土压力,从而引发孔壁失稳,钻孔自上而下发生坍塌,钻孔的上部孔壁平衡首先被打破并率先发生坍塌。深埋岩溶区钻探引发的坍塌多为钻孔局部坍塌,一般由泥浆漏失造成钻孔上部坍塌并进一步形成孔口塌陷坑,仅在下部存在巨大岩溶空洞、地下河发育、覆盖层以非黏性土为主且基岩顶板破碎等极恶劣地质条件下,才会发生整体坍塌。

(2) 孔口管的下入深度对钻探安全至关重要。孔口管需下至临界深度以下才能保证钻孔不发生坍塌。临界深度通常远大于漏失后的液面高度,当孔口管无法达到临界深度时,也应确保其下入足够深度,以保证孔口不发生塌陷。

(3) 从工程实践看,事前预防是应对该类风险的最优选择。钻探施工前,应系统搜集与分析地质资料,掌握关键地质信息,在此基础上优化钻孔结构设计,并制定岩溶漏失应对预案。

参考文献:

- [1] 李锦峰.恶性漏失地层堵漏技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(5):19-27.
- [2] 姜明映,陈娥梅,刘永成,等.岩溶区钻孔桩泥浆漏失引起土体变形机制与破坏模式试验研究[J].中外公路,2024,44(5):59-64.
- [3] 李慧娟,陈梦源,梁川,等.武汉市长江一级阶地钻探施工诱发岩溶塌陷的形成机制分析[J].资源信息与工程,2022,36(2):193-196.
- [4] 潘启钊,刘锡儒,赵家福,等.岩溶区钻探引起地面塌陷机理分析[J].广东土木与建筑,2022,29(8):5-8,12.
- [5] 石晓龙,闫森,孙昊,等.广州市大坦沙钻探施工引发岩溶塌陷成因机理分析[J].资源信息与工程,2024,39(6):24-30.
- [6] 钟立勋.谨防京郊平原发生深层隐伏岩溶塌陷[J].中国地质灾害与防治学报,2001,12(4):26-29.
- [7] 李巧玲,雷晓东,李晨,等.北京东部地区深部岩溶塌陷危险性综合评价[J].城市地质,2018,13(4):24-31.
- [8] 鄢泰宁.岩土钻掘工程学[M].武汉:中国地质大学出版社,2001.
- [9] 李小青,乌效鸣.钻孔灌注桩孔壁稳定性分析[J].地质与勘探,2001,37(2):74-76.
- [10] 黄博杰.考虑圆拱效应与应力集中效应的桩孔自立稳定深度研究[D].重庆:重庆大学,2017.
- [11] 王柏辉,赵龙飞,尹武兵,等.深部含层理弱面储层井壁失稳力学研究进展[J].钻探工程,2025,52(1):4-15.
- [12] 张丽芬,曾夏生,姚运生,等.我国岩溶塌陷研究综述[J].中国地质灾害与防治学报,2007,18(3):126-130.
- [13] 何磊,刘斌,杨健.深埋岩溶塌陷机制与鞍山岩溶塌陷地质环境质量评价[C]//第六届全国工程地质大会论文集.南宁:中国地质学会,2000:81-85.
- [14] 刘广润,程伯禹.岩溶塌陷的类型、成因机制及防治途径——兼论武汉市岩溶塌陷勘查工作要点[J].地质学报,2001(4):414-417.
- [15] 姜伏伟.岩溶塌陷发育机理模式研究[J].中国岩溶,2017,36(6):759-763.
- [16] 唐攀,吴仕强,于炳松,等.古岩溶塌陷的成因特点与研究手段[J].现代地质,2015,29(3):675-683.
- [17] 于富安,刘维平,孙健越,等.莱芜富铁矿钻孔漏失特征及应对措施[J].钻探工程,2025,52(S1):305-309.
- [18] 李孔荣.浅谈水文地质钻探事故处理[J].吉林地质,2015(3):120-122,130.
- [19] 杨科,罗龙,曹灶开,等.阳山矿区严重漏失垮塌地层钻进工艺及工程实践[J].钻探工程,2024,51(2):119-126.
- [20] 王志祥,许非,陈冲,等.地质钻探完全漏失地层处理方式探讨[J].钻探工程,2023,50(S1):218-222.

(编辑 王跃伟)