

软土地区钻探工程施工中的钻孔塌陷预防措施

于明保 于礼 张文龙 栾天龙

中国地质调查局 哈尔滨自然资源综合调查中心 黑龙江哈尔滨 150000

【摘要】软土地区进行钻探工程时,钻孔塌陷一直是现场安全与工程质量面临的重大考验。若处理不当,孔壁坍塌会导致无法继续钻进、钻具卡埋乃至地表沉降等风险。结合软土层高含水量、渗透性强、易变形等特点,可采取地质勘查与施工方案优化、合理选用钻探工艺与钻具、科学配制与控制钻井液、护壁技术及套管使用等一系列防护措施,为后续地基处理或其他工程作业提供可靠依据和安全保障。

【关键词】软土地区; 钻孔塌陷; 地质勘查; 钻探工艺; 护壁技术

引言

我国沿海平原、长江三角洲与河湖冲积平原等区域大多分布着深厚的软土层,这类土层具有高含水量、高压缩性及相对低强度特征,在这些地层中开展钻探工程,如果护壁与排水措施不周到,很容易出现塌孔、沉降等问题。常规措施或经验无法完全适应软土地层独特性质,若无针对性预防,施工风险会大幅攀升,为使钻探作业顺利进行,应在方案设计到现场施工作业的全流程中,充分考虑软土特性,采取有效防护手段,以确保钻孔安全与施工效率。

1 软土地区钻探工程的特点

1.1 土层承载力低与高压缩性

软土具有显著的低承载力与高压缩性,往往分布在沿海冲积平原或滨海区域,其形成时间相对短,固结程度不足,压缩指数通常可达0.3~0.8,局部甚至更高。某些地区的标准贯入试验N值常常低于5,且随深度变化幅度不大。低承载力直接影响钻探平台、机具的布设,一旦载荷超过地基允许应力,地面就会出现沉陷或局部隆起。高压缩性则意味着在施工过程中,一旦孔壁应力平衡被打破,土体体积会发生明显的变形,诱发局部孔壁塌陷。由于软土的弹塑性变形特征显著,孔壁受到扰动后往往难以快速恢复原状,若地层承载力评估与施工前期支护准备不足,就容易出现塌孔或护壁失效。土层自身高含水量也使得孔内土体在孔隙水压力变化时发生变形更为频繁,压缩变形与局部失稳相互叠加,给钻孔安全带来较高风险,在实际钻探中如果没有充分考虑地基承载力与软土的高压缩性特征,不仅会造成施工进度延误,还会造成护壁材料浪费和

额外地基处理费用,因此只有科学评估并针对地层压缩特性做出相应施工策略,才能有效降低塌孔风险,同时保障工程质量与进度。

1.2 含水量高与渗透性强

软土地区通常处于河流冲积带或滨海滩涂地段,沉积环境造成土层结构松散、孔隙率大。实地测试往往发现,软土层含水量可达40%~60%,局部甚至超过70%。含水量高意味着土颗粒之间孔隙水发育充分,孔壁一旦受外力影响或地下水位波动,孔隙水压力变化就会引起土体结构失稳。此外,软土在一定情况下还具有相对较高的渗透性,渗透系数或在 10^{-5} ~ 10^{-7} m/s之间浮动,局部夹层渗透性更大。在钻探过程中如果外部水头或钻井液与孔内水压力差异较大,水流的侵蚀与渗透作用会加速土粒流失,使孔壁局部塌陷或产生坍塌滑动。高含水量与高渗透性共同作用下,孔壁如果没有及时护壁或补浆,土体会呈现流塑性,再加上钻进时对土层的扰动,使孔径发生不可逆的扩大或不规则塌落。土层水文地质环境越复杂,塌孔隐患越难控制,施工单位若忽视地层渗透特性,未做好排水、截渗或泥浆护壁方面的工艺调整,极易在钻探过程中遭遇孔壁坍塌、泥浆循环丢失等连锁问题。

1.3 易变形与孔壁稳定性差

软土层的显著特点之一就是形变模量较低,土体在受到扰动后易发生大范围塑性变形。例如,在某沿海吹填区域,地下泥质粉土的压缩模量仅为3~5MPa左右,局部薄弱层甚至更低。一旦钻杆振动、泥浆压力改变或施工载荷集中在孔口,孔壁就可能出现缓慢的内陷或崩塌。在施工

阶段,若忽视地层不均匀性以及孔壁变形特点,不及时采取支护与护壁措施,往往引发突然或渐进的塌孔。由此可见,软土地区钻探时,孔壁稳定性的控制并非单一手段即可解决,必须在了解土层力学行为的基础上,结合护壁、排水和泥浆控制等多种策略同步实施。

2 软土地区钻探工程施工中的钻孔塌陷预防措施

2.1 施工前的地质勘查与方案优化

在软土地区进行钻探施工前,必须充分开展地质勘查工作以便对土层性质、分布范围和水文条件进行准确评估。软土地区地质勘查可结合钻探取样、原位测试及室内物理力学试验等多种手段,从而有效分析各层段的含水量、塑性指数、压缩系数及渗透系数。以长江三角洲某段地层为例,我们实际探测中对50个勘察钻孔的压缩系数数据进行统计,发现其中82%的土层压缩系数高于 0.6MPa^{-1} ,含水量平均达48%,从这个数据我们可以看出该区域进行深度超过30m的钻探时,如果没有相应的防护措施,很可能出现严重塌孔问题。根据实际勘查结果,下一步需要编制与软土特性相适应的施工方案,应明确以下几方面重点:第一,确立最优的钻孔位置与路径,尽量避开极度软弱的冲积淤泥层或采取相应分段护壁措施,以减轻塌孔风险。第二,评估地表荷载与施工机具重量,必要时进行地基加固或设立地面垫层,防止施工平台下陷导致钻机倾斜。第三,确定合适的钻进参数与机械振动控制措施,如减小钻机旋转转速与轴压力,避免过度冲击土层。第四,事先设计泥浆护壁与排水方案,对高含水量地层可考虑设置排水井或截水帷幕,减小地下水向钻孔的渗透量。第四,明确对孔口与井口周边的临时防护方案,例如在地表铺设厚度约0.5~1.0m的沙砾垫层,并配合使用钢板或木板路,以保证交通与机械移动安全。对于超深钻孔或地层复杂程度较高的施工项目,宜根据不同深度的土层性质划分若干施工阶段,分步实施护壁,初期可采用浅层套管或护筒来隔离上部松散淤泥层,以保证后续中深层及深层钻进的顺利进行,为了提升方案的可靠性,我们还可依托数值模拟软件进行地层变形与孔隙水压力响应的仿真分析,预先评估不同护壁和泥浆参数对孔壁稳定的影响。

2.2 合理选择钻探工艺与钻具

软土地区钻探施工要想有效防止塌孔,就要在钻探方式

与钻具选择上做好结合,因此我们常用的正循环泥浆冲洗工艺,就适用于多数软土层,但当渗透性较强或孔壁极易坍塌时,可考虑使用反循环或跟管钻进工艺。反循环工艺能在一定程度上减少泥浆对孔壁的冲刷,有助于维持孔壁稳定。同时对于地层富水且软化明显的地段,跟管钻进能够在钻进过程中同步将钢管或套管压入孔内,以形成及时支护,避免土体随泥浆流失而下滑。在选择钻具方面,对于易坍塌的软土层要关注钻头形式、钻杆强度及其在孔内的受力状态。较为常见的金刚石钻头多用于硬质岩层,对粘性软土层的适应性并不突出,若遇淤泥质粉土或高含水量黏土时,易出现泥土黏附在钻头上的现象,导致排渣困难与反复卡阻。可改用专门为软土设计的刮刀式或螺旋式钻头,它们的排土与扰动控制能力更优,有些项目甚至采用扩孔器与稳定器的组合来维持孔径并减少孔壁振动。若地层出现粉质黏土与砂层互层的情况,需在钻头上配备防砂及防泥团黏附装置,以应对不同土质。钻具规格要结合钻孔深度与地层硬度选择合适的壁厚与材质。过薄的钻杆在软土层可能产生弯曲或振动幅度过大,从而加剧孔壁的扰动;过厚又会增大施工成本,降低钻进效率。对于地层极其松软、含水量偏高的施工环境,可适度降低钻机旋转速度与给进速度,避免土体受到剧烈剪切和振动。务必在每次进尺后检查钻头、钻杆及连接部位状况,防止因连杆松脱或扭矩过大而造成事故。在施工现场,技术人员需要配备足够的辅助设备与监测仪器,如旋转扭矩监测仪、孔内压力传感器等,以准确掌握钻探过程中的负荷与孔壁压力变化,在探测中发现扭矩陡增或泥浆循环异常,应及时减小钻压或提升钻具,在排障后再继续前进,合理的钻探工艺与钻具选型能显著降低孔壁破坏几率,为后续泥浆护壁与套管支护环节打下坚实基础。

2.3 钻井液的配制与参数控制

在软土地区,为了稳定孔壁和带出钻渣,钻井液的配制与参数管理至关重要。传统的黏土泥浆虽然在一般地层中应用广泛,但对于高含水量的软土区域,要根据地层特性和施工深度做适度调整。泥浆黏度、比重、失水量与胶体率等参数,应在不断试验与检测中优化。首先,泥浆黏度过低时,无法形成有效的泥饼附着孔壁,易出现塌孔;黏度过高则带渣性能虽强,但循环阻力增大,也会对孔壁产

生额外冲刷。以某实测数据为例,在淤泥质黏土层中,泥浆黏度最佳范围通常为 $18\sim 22\text{s}$,配合比重 $1.05\sim 1.15$ 即可满足孔壁保护需求。若遇局部砂质夹层,可适当提高比重至 1.2 左右,以抵抗砂层坍塌和水头渗透。其次,可根据地层饱和度与盐分含量调整泥浆中的外加剂配比。含有较高盐分或有机质的软土层,会使泥浆中黏土颗粒絮凝或分散效果发生变化,需要添加抗盐聚合物或降失水添加剂来保证泥饼在孔壁的均匀性与稳定性。针对局部软化特别严重的地层,可掺入适量的膨润土与纤维材料,以强化泥浆的封堵与支撑能力,在泥浆中加入一定比例的抑制剂如磺化物或有机硅等物质,能够有效减少黏土层的水敏性。现场施工时应持续监测泥浆的黏度、比重、失水率与砂含量,定时检测泥浆比重桶读数,并采用滤失仪测定失水量,如若参数偏离设计指标需及时调整。钻进过程中的泥浆循环速度与压力也要掌控,不能为了追求效率大幅提高泵速,以免泥浆强烈冲击孔壁。若孔内出现返浆不畅、漏失或冒浆等异常情况,要立即停泵检查孔内压力和护壁状况,必要时采取补浆、降低比重或加固等措施,细致的泥浆参数控制和配方调节,能在软土地层中形成一层相对稳定的泥饼,从而起到防渗、护壁和清渣等多重作用,有效提升钻孔的安全性。

2.4 护壁技术与套管使用策略

在软土地层中实现钻孔的安全与稳定,需要护壁技术和套管应用紧密配合。常见的护壁方法包括泥浆护壁、化学护壁与机械护壁等,泥浆护壁在前文已提及,主要就是通过调控泥浆性能,在孔壁形成泥饼,有效减缓土体塌落。化学护壁则借助注浆或化学固化剂,使孔壁表层土固化或水化程度改变,常见于高含有机质或极松散的地层。然而,化学护壁费用较高,且需评估对环境的影响与工期的要求,一般只在特殊项目或急需加强孔壁稳定时采用。相比之下,机械护壁更具有直接有效的作用,关键在于选择合适的套管以及安装方式。套管多采用钢制套管或玻璃钢套管,前者强度较高,可承受较大外压;后者质量较轻,施工操作相对便捷。在软土施工中,如果泥浆护壁仍不足以抵抗孔壁变形,就需要在钻进的同时或分阶段下套管。所谓随钻跟管技术,即在钻具进尺的过程中,通过振动或

顶压将套管逐步推进,与钻头保持同步下探。这样可使孔壁在钻进形成过程中立即获得支撑,土体来不及发生大规模塌落。若不采用随钻方式,也可以在每段钻进完成后立刻安装套管,一段段地把松散软土与上部水头压力隔绝在外。套管外壁与孔壁之间应填充泥浆或水泥浆,以避免套管周围空隙过大而造成漏浆或渗流。需要注意的是,套管外径的选取要与钻孔设计口径及钻具尺寸相匹配,以免因空间过小而导致套管无法顺利下放,或者过大造成材料浪费。在安装过程中,要使用绞车或顶管设备进行控制,力求套管垂直度和安放深度满足要求。对于易坍塌地层,常常在套管底部加装切削环或类似扩孔器,以便在推进时顺利切削软土并稳定孔壁。安装完毕后,要对套管进行防锈和密封处理,定期检查套管接头是否牢固。在多层软土或软硬交互层条件下,套管的使用需分段布设,以适应各层段不同的力学性质。如果钻孔深度大于 50m ,可考虑设置多级套管,逐级扩孔下放,既保证上部松散层有足够支护,也为下部砂质或淤泥夹层提供相对稳定的护壁。通过灵活运用泥浆护壁、化学护壁与机械护壁等方法并结合正确的套管下放策略,就能在软土地层中显著降低塌孔风险,确保钻探工程安全可控。

3 结语

软土地区的钻孔塌陷问题不仅与土层力学性质高度相关,还受制于水文环境、施工工艺和管理水平等多重因素。要想在此类地质环境中顺利完成钻探,必须综合应用地质勘查、施工方案优化、工艺与设备选择、钻井液配制控制以及多种护壁技术与套管使用策略。通过分层摸底、科学选型和全过程监测,能够将塌孔风险大幅降至可控范围,随着新型材料与先进施工技术的不断引入,软土地区钻探工程的安全性与效率有望进一步提升,为各类工程建设提供更可靠的地基信息与施工条件。

参考文献:

- [1] 何克. 钻孔减压治疗塌陷期股骨头坏死的临床观察[J]. 临床医药文献电子杂志, 2018, 5 (15): 85.
- [2] 梅春生. 港口工程中的钻孔灌注桩施工技术探讨[J]. 科技创新与应用, 2017, (01): 240.