

长江漫滩深埋顶管始发洞门涌水涌砂的致险因子分析与管控措施

李宇淮

南京基础建设发展有限责任公司

摘要: 为了避免长江漫滩深埋顶管始发洞门涌水涌砂事故的发生,在对长江漫滩地层工程特性进行分析的基础上,分析了洞门破除、掘进和洞通三个阶段始发洞门涌水涌砂事故产生的原因并提出了针对性的控制措施。研究发现:洞门破除阶段事故产生的主要原因为洞外加固土体密闭性不足、洞门破除前未做水平探孔检测和应急降水井失效,控制措施为合理选择洞外土体加固方式、加强水平探孔检测和应急降水井的管理;掘进阶段事故产生的主要原因为洞门外止水帘布橡胶板渗漏,控制措施为在帘布橡胶板内增设两道钢丝刷,并在空腔内注入油脂;洞通阶段涌水涌砂事故产生的主要原因为洞门注浆密封不严,控制措施为多次反复注浆并及时焊接止水钢板。

关键词: 长江漫滩; 深埋顶管; 涌水涌砂; 加固土体; 钢丝刷; 止水钢板

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2024.01.084

引言

长江中下游漫滩地貌单元的第四纪地层主要由漫滩相沉积的淤泥质粉质黏土和河床相沉积的粉土、粉砂、细砂等无黏性土组成,赋存于粉土、粉砂和细砂层孔隙内的地下水与长江水连通,具有微承压性。粉土、粉砂和细砂组成的细小颗粒容易被水流携带而流向临空面,造成地层损失。

顶管和盾构同属于暗挖法的一种,需要从始发洞门向接收洞门掘进,始发或接收洞门作为连接井内与井外地层之间的结构,易成为渗漏通道。洞门处水压越大,对洞门密封性要求越高,当密封不当发生渗漏时,渗漏位置涌水涌砂的流速越快后果越严重。2007年11月20日南京地铁2号线元通站盾构接收时,因洞门密封措施不当发生了流量达 $260\text{m}^3/\text{h}$ 的涌水涌砂事故,造成地面超过80m范围塌陷,最大塌陷深度约 $3\text{m}^{[1,2]}$ 。2009年9月7日南京地铁2号线中和村站盾构始发时,因洞门密封失效导致流量达 $200\text{m}^3/\text{h}$ 的涌水涌砂事故,造成地表约1.1m的沉降^[1,2]。盾构工程技术人员从惨痛的事中总结了经验教训,并将MJS工法桩^[3,4]、冷冻法^[5,6]、钢套筒密闭始发与接收^[7~9]等技术大量运用到盾构始发与接收工程中,有效减少了盾构始发与接收阶段的工程事故。



图1 南京地铁2号线元通站事故之地面沉降照片

然而多数顶管工程技术人员对富水粉、细砂层深埋顶管洞门涌水涌砂风险的认识不足,盲目将浅埋顶管的洞门密封措施套用在深埋顶管上,导致洞门位置涌水涌砂,造成地表沉降。天津市某污水顶管工程钢筋混凝土管与洞门止水橡胶环之间存在缝隙,成为水土流失的通道,地面塌陷并造成施工机械倾覆^[8]。广州市海珠区海珠广场顶管始发时,洞门位置发生严重涌水涌砂事故,涌水涌砂量达 $30\text{m}^3/\text{h}^{[9]}$ 。因此,系统总结富水粉、细砂层深埋顶管洞门涌水涌砂事故的致险因子并给出相应的规避措施显得尤为重要。

本文先详细介绍南京长江漫滩场地工程地质与水文地质条件,以期工程技术人员能够深刻认识工程地质条件的复杂性及对顶管工程的潜在风险。然后按施工工况,系统分析了始发井洞门破除阶段、掘进阶段和洞通阶段始发洞门涌水涌砂风险的致险因子并给出了相应的管控措施。

一、工程地质与水文地质特性

(一) 工程地质特性

长江漫滩地层一般由漫滩相沉积的黏性土和河床相沉积的无黏性土组成。

黏性土多为淤泥质粉质黏土,呈流塑状,具有孔隙比大、含水率高、强度低、灵敏度高、压缩性高的特点。

无黏性土由粉土、粉砂和细砂等细粒土和中粗砂、卵砾石等粗粒土组成,由上自下逐渐密实, $0.25\sim 0.5\text{mm}$ 粒径重量占比超过60%。局部夹杂的粉质黏土,由于浸泡在砂土层的地下水中,没有得到很好的固结,仍呈软塑或流塑状。

中粗砂和卵砾石埋较深,均呈密实状,混夹卵和砾石含量约占10%~20%;卵砾石成分以石英砂岩为主,亚圆形,间隙充填中砂、粗砂。

(二) 水文地质特性

长江漫滩二元相地层的孔隙水可分为潜水和承压水。

潜水主要赋存在浅部的填土和淤泥质粉质黏土孔隙内,补给来源主要为大气降水和周边地表水入渗,排泄方式以自然蒸发为主。

承压水主要赋存在河床相沉积的粉细砂、中粗砂和卵砾石孔隙内,水头标高随长江水位的涨落而变化。丰水期长江水位高于承压水水头标高,向承压水含水层补给;枯水期长江水位低于承压水水头标高,承压水补给长江水。承压含水层顶板为浅部的淤泥质粉质黏土,底板为下伏基岩,水头标高约为1.0~4.5m。

漫滩相沉积的流塑状淤泥质粉质黏土和软塑状粉质黏土属于微透土层,渗透系数在 $0.0003\sim 0.004\text{m}/\text{d}$ 。河床相沉积的粉细砂属于中透土层,渗透系数在 $1.3\sim 8.6\text{m}/\text{d}$ 之间;中粗砂和卵砾石属于强透土层,渗

透系数在19~28.5m/d之间。南京地铁4号线浦江站、10号线江心洲站和临江站均对粉细砂、中粗砂和卵砾石层的综合渗透系数进行了测量，测得的结果分别为9.96m/d、13.45m/d和7.66m/d。

二、致险因子分析

(一) 洞门破除阶段

对于采用钻孔灌注桩、钻孔咬合桩或地下连续墙等作为支护结构，采用明挖法施工的井室结构工程，在顶管始发或接收前，需要将洞门区域的钻孔灌注桩、钻孔咬合桩或地下连续墙内的钢筋破除，避免钢筋损坏顶管机刀盘。洞门破除前，需要对洞外土体进行加固，防止向洞内坍塌。当洞门位于富水粉细砂层时，洞门外土体的加固必须确保阻断地下水向洞门内涌入的路径。

常规的高压旋喷桩由于施工设备占地小、净空要求低而被大量应用在洞门外土体加固工程中，但大量的工程实践表明，当在中密~密实地层成桩或成桩深度大于15m时，即便采用扩孔性能最强的三重管喷射方式进行成桩，形成的高压旋喷桩的均匀性和完整性也不理想，洞门渗漏风险非常高。然而成桩深度超过20m甚至达到30m的常规高压旋喷桩帷幕仍经常出现在设计文件里，为帷幕渗漏埋下了隐患。

(二) 掘进阶段

洞门安全破除完成后，即进入顶管掘进阶段。由于洞门直径大于顶管机外壳直径和顶管管节外径，因此洞门与顶管机和顶管管节之间都存在环形间隙，成为坑外地下水土涌入坑内的通道。常规浅埋顶管的做法是在洞门内侧设置一圈单层止水帘布，紧密包裹在顶管管节外壁，并用折页钢板约束止水帘布向坑内变形，以抵抗坑外水土压力，如图2所示。

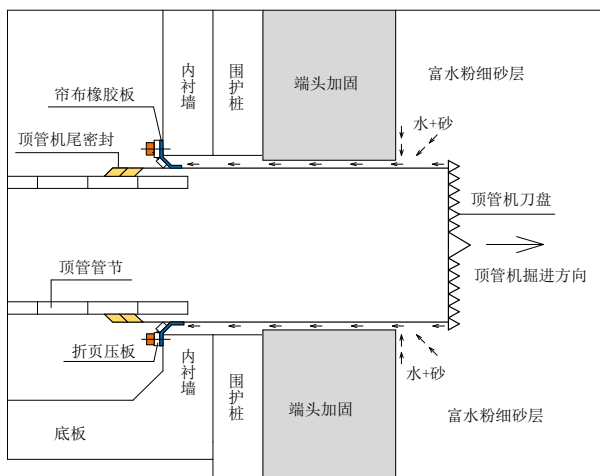


图2 掘进阶段常规洞门止水方法

该做法承压能力小，用在洞门处水压较小的浅埋顶管工程时，尚且会在止水帘布与顶管机外壳或管节间出现渗漏。如将其用在洞门处水压较大的深埋顶管工程中，将出现严重的渗漏。由于水压大，渗漏部位的流速快，短时间内大量水土涌入井室内，造成地面沉降，如图3所示。

(三) 洞通阶段

当顶管管节在始发井与接收井之间贯通后，需要将洞门内侧的折页钢板和帘布橡胶板拆除。如果没有提前通过管节内的二次注浆孔注浆将洞门与顶管管节外壁之



图3 某顶管掘进阶段洞门渗漏照片
间的环形间隙密封完全，如图4所示。

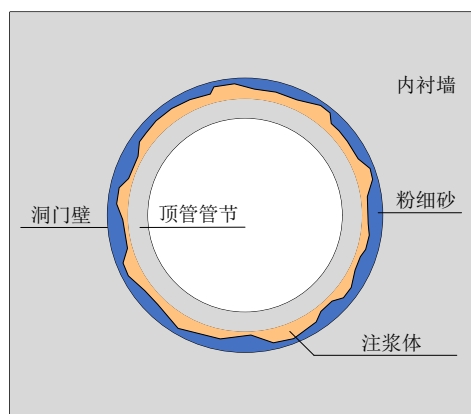


图4 洞门注浆不密实示意

那么一旦拆除折页钢板和帘布橡胶板，地下水土将沿着环形间隙快速流入井室内，造成地面沉降甚至塌陷。如果顶管管节底部的粉细砂颗粒也流失，将导致顶管管节沉降，相邻管节之间的接头可能会因为沉降不均匀而被拉脱。一旦管节接头渗漏，地下水土将快速涌入管道内，不仅使得地面大范围沉降，而且导致管道报废。

三、风险控制

(一) 洞门破除阶段

洞门外土体的加固应优先选择工艺成熟、密闭性好的三轴搅拌桩，三轴搅拌桩与井壁之间的间隙采用三重管高压旋喷桩或袖阀管注浆加固。当施工场地受限必须采用高压喷射方式进行扩孔成桩加固洞门外土体时，也应选择MJS或RJP工法桩，而不是采用常规的高压旋喷桩。

洞门大面积破除前，应先打设多个水平探孔。观察水平探孔内是否流水流砂，水平探孔分布图如图5。当水平探孔流水流砂时，应对洞外土体进行加固补强，直至水平探孔内不再流水流砂，方可破除洞门。

洞门破除期间，洞外应有应急降水井。应急降水井应提前进行群井抽水试验，确保现有降水井及配置的水泵规格能够将地下水水头降至洞门以下，再进行洞门的破除。洞门破除期间，应急降水井内的水泵应全部放置到位，现场配足备用水泵，并配备发电机作为应急电

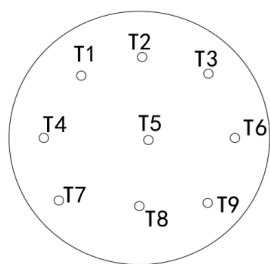


图5 洞门水平探孔分布图

源，确保应急降水井能够及时开启并维持运行。洞门破除完成前洞外降水井保持开启状态，以规避洞门破除期间涌水涌砂的风险。

(二) 掘进阶段

顶管掘进期间，始发洞门与顶管机外壳或管节外壁之间的间隙，必须采取有效措施进行止水。常规的一圈单层帘布橡胶板加折页钢板密封的耐压性不足，应改进为短套筒密闭始发的方式，即在洞门井壁上预埋环形钢板，然后在环形钢板上焊接一个长约1m的短套筒，短套筒内侧设置两道钢丝刷，外部仍保留帘布橡胶板加折页钢板的形式，如图6所示。



图6 短套筒始发照片

如果水压较大，洞门与顶管机外壳或管节外壁之间的环形间隙内仍出现渗漏，可在帘布橡胶板与中部钢丝刷之间的空腔和中部钢丝刷与最里侧钢丝刷之间的空腔内注入油脂（预先在钢套筒上留设注浆单向阀），进一步增加密封性能。

当顶管管节在始发井与接收井之间贯通后，需顶管机在加固体内掘进时，刀盘层内加压，且压力不得低于洞门位置实际地下水水压，以验证始发洞门短套筒的密封性，避免刀盘进入原状地层时从洞门环形间隙涌水涌砂。当周边环境宽松或地基土较为密实时，可在掘进过程一直启动坑外降水井，降低洞门位置地下水水头，减小洞门环形间隙的密封压力。

(三) 洞通阶段

管通后，应及时通过洞门及加固体内顶管管节的二次注浆孔向环形间隙注浆，注浆材料优先选择水泥水玻璃双液浆。注浆应由远离洞门端向洞门端反复多次进行。注浆完毕后，应打穿二次注浆管至环形间隙，观察是否有涌水涌砂现象。如有，应再次注浆，直至不再涌水涌砂方可拆除钢套筒。

钢套筒拆除时，应分段切割，每一段切割完成后，立即在洞门预埋钢环与顶管管节背覆钢板之间焊接弧形钢板。在工厂制作洞门环管节时即应在外围一周增设钢板，再在洞门井壁内侧增设一圈环梁，环梁包裹住凸出

洞门的管节，永久密闭洞门环形间隙，如图7所示。

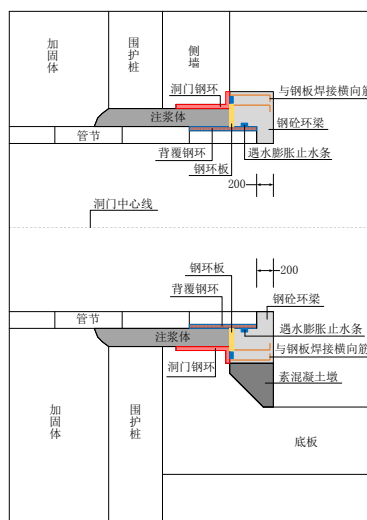


图7 洞门永久密封示意

结论

高水头、强渗透、快补给和细颗粒是长江漫滩场地顶管工程洞门涌水涌砂事故多发的地质原因；风险认知不足，盲目将浅埋顶管的工程经验应用到深埋顶管上，是洞门涌水涌砂事故多发的人为原因。洞门破除阶段应加强洞外加固土体密封性施工及检测，掘进阶段洞门密封应采用短套筒密闭的形式，洞通阶段应强化管节内二次注浆及焊接弧形密封钢板。通过坑外降水井降低地下水水头，有效降低洞门位置水压力，是管控洞门涌水涌砂最为直接的手段。

参考文献

- [1] 竺维彬, 鞠世健. 地铁盾构施工风险源及典型事故的研究[M]. 广州: 暨南大学出版社, 2009.
- [2] 江玉生, 江华, 杨志勇, 等. 盾构始发与到达一端头加固理论与工程实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2021.
- [3] 熊仲明, 覃泽宏, 蔡虹, 等. 富水砂层盾构始发MJS工法桩的应用及分析[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(03): 8-12+64.
- [4] 冯红喜, 闫文博, 朱昕阳, 等. 穿黄隧道超大直径盾构接收关键技术研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(S1): 127-128+130.
- [5] 黄丰, 石荣剑, 岳丰田, 等. 大直径盾构始发段冻结对槽壁影响的实测研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(11): 4392-4400.
- [6] 杨平, 袁云辉, 余才高, 等. 南京地铁集庆门盾构隧道进洞端头人工冻结加固温度实测[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(06): 591-596.
- [7] 廖少明, 门燕青, 赵国强, 等. 盾构接收中钢套筒的受力变形特性与实测分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 1948-1956.
- [8] 胡浩睿, 赵立锋, 孙广臣, 等. 盾构钢套筒接收技术在苏州地铁富水含砂地层中的应用研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(04): 197-203.
- [9] 李磊, 张建新. 泥水平衡法顶管工程事故实例及分析[J]. 天津城建大学学报, 2020, 26(04): 266-270+311.