

富水砂层地铁车站深基坑支护结构选型与施工安全分析

陈 健

广东华隧建设集团股份有限公司 广东 广州 510300

【摘 要】：富水砂层渗透性强、稳定性差，地铁车站深基坑开挖易发生涌水涌砂、围护变形、地表沉降等安全问题。结合地层条件、地下水特征及周边环境确定支护结构适用条件，从围护体系、止水降水、内支撑配置入手优化结构选型，并强化分层开挖、支撑转换、监测预警及异常处置。合理匹配支护结构和施工控制参数，可有效限制基坑侧向位移及周边沉降，降低渗流破坏风险，保持支护体系受力稳定，为富水砂层地铁车站深基坑安全施工提供技术依据。

【关键词】：富水砂层；地铁车站；深基坑；支护结构；施工安全

DOI:10.12417/2705-0998.26.13.055

1 富水砂层地铁车站深基坑工程特征

1.1 砂层结构特性及开挖稳定条件

富水砂层颗粒间黏聚作用弱，结构稳定主要依赖颗粒接触、摩擦及有效应力，基坑开挖造成侧向约束解除后，坑壁附近土体应力路径迅速改变，砂层容易产生剪切变形和局部松弛。细砂、粉细砂地层受施工扰动后更易发生颗粒重新排列，当开挖面暴露时间较长或围护结构存在局部渗漏时，土颗粒流失会进一步削弱地层自稳能力。地铁车站基坑通常具有开挖深度大、平面尺度长、施工周期较长的特点，分层开挖厚度、支撑架设时机及机械扰动程度均会改变砂层变形速率。支护设计需结合砂层密实度、颗粒级配、内摩擦角、承载特性及基坑深度确定围护刚度和支撑间距，使开挖卸荷形成的土压力能够及时传递至稳定支护体系。

1.2 地下水渗流特征及基坑响应规律

富水砂层孔隙连通程度较高，地下水补给条件复杂，基坑开挖形成水头差后，渗流方向和水力梯度会发生明显改变，围护结构接缝、墙底及局部薄弱区可能形成集中渗流通道。水位降低使土体孔隙水压力重新分布，有效应力增加可能引起砂层压密及坑外地层沉降；降水不足又可能使坑底承受较大的渗透压力，增加管涌、流砂和突涌风险^[1]。地下水控制因而不能单纯追求较大降深，而应根据承压水头、渗透系数、隔水层埋深及围护结构插入深度确定止水边界和降水强度。开挖过程中还需关注水位变化同围护墙侧移、坑底隆起及地表沉降之间的时空关系，使地下水控制由固定参数管理转向依据监测反馈动态调整，避免过量抽排扩大基坑施工影响范围。

1.3 周边环境荷载及变形控制要求

地铁车站深基坑多处于建成区地下空间密集地段，邻近建筑基础、地下管线、既有道路及地下构筑物会改变基坑外围土体的荷载分布，支护结构变形控制标准通常高于一般深基坑。坑外附加荷载向深部扩散后，会提高围护墙主动侧土压力，车辆动荷载和施工堆载还可能造成局部变形波动；地下管线对不均匀沉降较为敏感，较小的地层位移也可能产生接口错动或结

构附加应力。支护结构选型需将环境保护等级转化为墙体侧移、地表沉降、建筑物倾斜及管线变形等具体控制指标，并结合基坑空间效应配置围护刚度和支撑体系。施工阶段按照开挖深度建立分级监测控制值，将支护受力、地层位移和周边设施响应进行关联分析，使结构安全控制兼顾基坑自身稳定及城市地下空间环境保护。

2 深基坑支护施工主要安全风险

2.1 渗流作用引发涌水涌砂风险

基坑开挖持续降低坑内土体标高，内外水头差逐步增大，富水砂层中的地下水容易向开挖面集中迁移。围护墙接缝止水失效、墙底嵌固深度不足或局部地层渗透系数突变时，渗流速度明显增加，细颗粒可能随地下水进入坑内，逐渐形成渗透通道。水力梯度超过临界值后，砂土有效应力下降，易出现流砂、管涌甚至坑底突涌，并可能向坑外扩展形成土体空洞，使支护结构背侧失去稳定土压力条件，增加局部失稳风险。

2.2 土体卸荷诱发围护结构变形风险

深层土体连续开挖使围护墙内侧土压力快速释放，坑外主动土压力推动墙体向基坑方向产生侧移和弯曲。开挖层厚控制不当、暴露时间过长或支撑架设滞后，会扩大无支撑暴露高度，使围护墙弯矩和水平位移集中增长^[2]。富水砂层抗剪强度对有效应力变化较为敏感，开挖扰动叠加地下水波动后，墙后土体可能产生塑性区扩展。墙体变形超过设计控制范围时，还会引起支撑轴力重新分配、墙趾位移增大，削弱围护结构整体稳定储备。

2.3 支撑受力变化加剧周边沉降风险

支撑体系承担围护墙传递的水平荷载，其轴力随开挖深度、温度变化、施工工序及围护墙位移持续调整。支撑施作不及时、预加轴力偏差或节点连接刚度不足，会造成局部约束能力下降，使墙体侧移向坑外土层传递。支撑拆换阶段受力路径发生转换，若新旧支撑衔接不同步，短时变形可能集中释放，带动墙后砂层产生竖向位移。地层损失进一步向外扩散后，地表沉降槽随之发展，对邻近道路、地下管线及建筑基础形成差

异沉降和附加变形风险。

3 富水砂层深基坑支护结构合理选型

3.1 围护结构形式适配地层稳定需求

富水砂层深基坑围护结构选型应把结构刚度、隔水能力、成槽稳定性和施工扰动纳入同一技术判断,避免仅依据开挖深度确定支护形式。地铁车站基坑开挖深、延伸距离长,且砂层黏聚力低、受扰动后自稳能力有限,可优先采用刚度较大、整体连续性较好的地下连续墙;地下水丰富、环境变形严格控制时,应适当增加墙体厚度和入土深度,使墙趾进入稳定性较好的低渗透地层,利用墙体自身形成连续围护及截水边界。墙体嵌固深度需依据基坑抗隆起、抗倾覆、整体稳定及墙底渗流路径综合校核,不能单独以结构强度控制。成槽施工还应针对砂层易坍塌特征控制泥浆液面、密度、黏度和槽段暴露时间,减少槽壁失稳造成的墙体缺陷。槽段接头作为渗漏及刚度突变敏感位置,应强化接缝清理、锁口质量和混凝土连续浇筑控制。数字化施工条件下,可将成槽垂直度、墙体完整性、实际地层参数反馈至计算模型,对局部薄弱区及时调整设计参数,使围护结构选型由经验控制转向地质条件、环境等级和施工反馈共同驱动。

3.2 止水降水体系匹配地下水控制条件

地下水控制应形成“外围截水、坑内疏排、分层降压、动态调节”的组合体系,核心不是无限降低地下水位,而是将水头差控制在坑底稳定和周边沉降均可接受的范围。富水砂层渗透通道连续,止水帷幕宜结合围护墙形成封闭边界,墙底进入相对隔水层时,可延长地下水绕流路径并降低坑内涌水量;无法形成完全封闭式止水时,应根据含水层厚度、渗透系数、承压水头及基坑开挖深度确定降水井数量、深度和滤管层位。降水运行应与开挖标高同步推进,开挖面以下保持必要的安全水位差,避免一次性大幅抽水造成坑外地下水位快速下降。承压含水层还需进行坑底抗突涌验算,根据剩余土层自重、承压水头和安全系数判断是否配置减压井。滤料级配、井管孔径及抽水强度应与砂层颗粒组成相匹配,防止抽排过程中细颗粒流失^[3]。水位、水量、孔隙水压力和地表沉降数据可建立联动阈值,根据变化速率调整单井流量及启停顺序,使节水降耗要求与基坑地下水安全控制相协调。

3.3 内支撑布置协调基坑变形控制指标

内支撑体系布置需从围护墙计算变形曲线出发确定竖向道数、水平间距、支撑刚度及预加轴力,使各开挖阶段墙体最大弯矩和侧向位移均处于控制区间。地铁车站狭长基坑受空间效应、施工流水和主体结构转换影响明显,支撑设置不宜只满足承载力验算,还应考虑立柱稳定、节点刚度、温度应力及拆撑阶段荷载重分配。首道支撑位置应尽量限制墙顶水平位移,下部支撑标高则需结合分层开挖厚度配置,缩短围护墙无支撑

暴露高度;跨度较大区域可通过增设立柱、联系构件及局部加强节点降低支撑长细比,防止轴压作用下出现失稳。预加轴力应依据设计轴力和实际监测结果分级施加,避免预应力不足导致墙体提前位移,也应防止施加过大造成节点局部应力集中。换撑、拆撑必须与主体结构达到规定强度的时间衔接,使水平荷载能够平稳转移。支撑轴力、墙体深层水平位移和地表沉降宜建立动态关联,当监测增量接近控制值时及时校正开挖步序、支撑参数及施工节奏,实现支护设计参数随现场响应持续修正。

4 支护体系施工安全控制技术

4.1 分层开挖控制土体卸荷扰动

基坑土方开挖应按照支护体系设计工况划分竖向层次和水平作业区段,将单次卸荷量控制在围护墙、支撑及砂层能够协调变形的范围内。富水砂层受扰后强度衰减较快,开挖面不宜长时间裸露,可采用分层、分段、对称、均衡的作业方式,严格控制每层开挖厚度和相邻区段高差,避免局部超挖形成较大的临空面。机械开挖接近设计标高时保留一定厚度土层,由精细化作业完成整平,减少机械碰撞围护墙、立柱和降水设施造成的附加扰动。长条形车站基坑还需协调出土通道、机械站位及施工荷载分布,重型设备不得长时间集中停放于围护结构敏感区域。开挖进入砂层含水富集段后,应同步核查坑内水位、土体渗水状态和坑底稳定情况,发现局部冒水、砂粒流动或开挖面软化时立即限制继续卸荷。施工信息可按照开挖层级建立数字化工况记录,将实际开挖深度、暴露时间、墙体位移增量和地下水位变化进行对应,使下一层土方开挖条件由设计工序和现场响应共同确定。

4.2 支撑及时闭合稳定围护受力体系

每层土方开挖达到支撑设计标高后,应缩短围护墙无约束暴露时间,迅速完成支撑定位、节点连接、预加轴力及体系闭合,使坑外土压力能够沿围护墙、围檩、支撑和立柱形成连续传力路径。钢支撑安装需控制中心线偏差、端部接触状态和连接节点密贴程度,支撑轴线偏斜会产生附加弯矩,削弱轴压构件稳定能力;混凝土支撑则应控制节点钢筋锚固、截面尺寸及混凝土强度达到设计要求后的受力转换^[4]。预加轴力不宜一次达到目标值,可结合墙体变形和支撑轴力分级施加,减少加载突变对围护结构产生的局部影响。基坑角部、支撑交汇区和跨度变化位置属于受力传递复杂区域,需要加强节点刚度及构造连接。施工期间还应关注温差引起的钢支撑轴力波动,区分温度效应和土压力增长造成的异常变化。主体结构施工进入换撑阶段后,必须确认结构强度、传力构件和临时支撑满足转换条件,再按既定顺序分区拆除,防止支护约束突然减弱导致墙体位移集中释放。

4.3 监测预警联动异常工况处置

安全监测应覆盖围护墙深层水平位移、墙顶位移、支撑轴力、立柱沉降、地下水位、孔隙水压力、地表沉降及邻近建构筑物变形,使结构受力、地下水活动和环境响应能够形成相互校验的数据链。监测频率不宜采用全过程固定周期,土方开挖、支撑安装、降水调整和拆换撑期间应提高采集密度,对位移速率、累计变化量及连续增长趋势实施同步判断。预警控制不能只依赖单项数值是否超过限值,可设置累计值、变化速率和多指标关联三级判据,当墙体位移增长伴随支撑轴力突变或地下水位异常时,及时判别潜在渗漏、支撑松弛及地层损失位置。自动化监测平台可接入测斜、轴力、水位及沉降数据,形成施工工况对应的动态曲线,对异常点进行快速复核。出现持续性渗水、涌砂、支撑轴力骤变或沉降速率异常后,应暂停相关区域开挖,根据风险来源采取回填反压、封堵渗漏、补设支撑、调整降水或局部注浆等处置,并经复测确认变形趋势恢复稳定后再转换施工工况。

5 支护结构实施后的安全控制成效

5.1 围护结构侧向位移得到有效限制

支护结构投入使用后,地下连续墙较大的抗弯刚度配合多道内支撑形成稳定的水平受力体系,开挖卸荷产生的侧向土压力能够分层传递,墙体变形不再集中于单一深度。支撑随土方开挖及时闭合,使围护墙无支撑暴露时间缩短,各阶段侧向位移增量得到压缩,墙顶水平位移和墙体最大侧移保持平缓发展。富水砂层受水位波动产生的附加变形也因连续止水边界及支撑约束得到抑制,墙后土体塑性变形范围随之减小。监测曲线能够较清晰反映开挖、支撑加载和结构变形之间的对应关系,深层水平位移未出现持续加速趋势,局部变形增量可在施工工况调整后趋于稳定,支护结构刚度、支撑轴力及开挖节奏保持较好的协同状态。

5.2 坑外地表沉降保持受控状态

坑外地表沉降受围护墙侧移、地下水位变化和砂层颗粒损失共同影响,支护体系稳定后,墙后土体向基坑内部移动的空间受到限制,开挖引起的地层损失明显收敛。止水结构减少坑外地下水向坑内持续补给,分级降水避免水位短时间大幅下降,使砂层因有效应力突增产生的压密沉降得到控制。地表沉降发展主要与各层土方开挖及支撑转换阶段对应,支撑形成稳定受力状态后,沉降速率逐渐降低,未形成持续扩大的沉降槽^[5]。邻近道路、地下管线及建构筑物基础所承受的附加变形同步减弱,差异沉降控制条件得到改善。沉降数据同墙体位移、水位变化进行关联校核后,可及时识别局部异常增长,使地表变形始终处于可跟踪、可判断、可干预的控制状态。

5.3 地下水风险及施工异常明显降低

连续围护止水、分层降水及水位动态调控共同改变了富水砂层基坑内外渗流条件,地下水不再以较大的水力梯度集中进入开挖区域,围护接缝渗漏、坑底冒水及细颗粒流失的发生概率随之降低。降水井运行根据开挖深度和监测水位进行调整,使坑内水位满足作业面施工要求的同时,避免过度抽排引起坑外水位异常下降。水位、涌水量和孔隙水压力变化保持连续可控后,流砂、管涌及坑底突涌等风险得到有效压制。支撑轴力、围护位移和沉降数据纳入联动预警后,局部渗水、轴力突变及变形速率异常能够在风险扩大前被识别,现场处置由事故后的被动处理转为施工参数提前修正,异常工况持续时间及影响范围相应缩小。

6 结语

富水砂层地铁车站深基坑施工对支护结构刚度、地下水控制及工序衔接具有较高要求。依据地层渗透特征、开挖深度和环境保护等级合理配置围护、止水及内支撑体系,可降低涌水涌砂、墙体侧移和地表沉降风险。配合分层开挖、动态监测及异常联动处置,能够稳定支护受力状态,提高复杂地层条件下深基坑施工的安全性和可控性。

参考文献:

- [1] 王瑞博.富水砂层地质下地铁车站深基坑围护结构施工技术研究[J].工程建设与设计,2026,(6):131-133.D
- [2] 曹国星.地铁富水砂层深基坑复合支护结构混凝土抗渗及耐久性研究[J].中国水泥,2026,(2):127-130.
- [3] 刘宣伯.富水砂层条件下地铁车站附属结构基坑支护施工技术[J].工程机械与维修,2024,(10):39-41.
- [4] 董鲁强.地铁车站工程富水砂层深基坑管井降水施工技术[J].工程机械与维修,2024,(5):114-116.
- [5] 易路行.富水砂层下的城市地铁车站深基坑施工方法[J].中国新技术新产品,2023,(21):99-101.