软土复合地层地铁车站降水施工风险管控技术研究

段景明　陈　波　董　爽

中建八局轨道交通建设有限公司 江苏 南京 210000

【摘　要】：软土复合地层中的地铁车站降水施工受低渗软土、砂层透镜体、承压含水层和周边建构筑物共同约束，水位降深不足会削弱开挖面稳定性，降深过快又会放大地表沉降和接缝渗漏。本文分析软土压缩性、承压水补给和基坑开挖扰动的风险传递，围绕井点布置、分层降压、水位沉降联动监测、地连墙接缝处置以及停降回灌转换提出管控技术。降水风险管控应把水位、沉降、围护变形和结构封底状态纳入同一施工步序，使地下水控制从单纯排水转向分阶段、可反馈的安全控制。

【关键词】：软土复合地层；地铁车站；降水施工；风险管控；承压水

DOI:10.12417/2811-0528.26.21.034

引言

软土地区地铁车站基坑尺度大、开挖周期长，围护墙外侧常夹有粉砂层和承压含水层。降水施工降低坑内水头的同时，也会改变坑外孔隙水压力和有效应力。软土压缩模量低、固结变形滞后，砂层补给又使降水漏斗偏向透水通道扩展。车站邻近道路、管线、建筑基础时，地下水扰动可能表现为墙体位移、地表沉降、接缝渗漏和封底前抗浮安全不足；管控对象覆盖开挖、支护、监测和结构闭合全过程。

1 软土复合地层降水风险形成条件

1.1 软土压缩性与承压水补给

软土层含水量高、孔隙比大，降水后孔隙水压力下降会提高土骨架有效应力，压缩变形随排水路径和固结时间持续发展；当车站基坑外侧存在粉砂、粉土或砂层透镜体时，含水层补给能力与软土低渗特征叠加，降水漏斗不再沿基坑均匀展开。承压水头靠近坑底时，开挖卸荷削弱覆盖土重，坑底抗突涌稳定由水头差、隔水层厚度和墙趾入土深度共同决定[1]。风险管控的起点不是单个井点能否出水，而是识别软土压缩变形、砂层水平补给和承压水顶托三类作用在同一开挖步中的组合关系。

1.2 车站基坑开挖扰动与渗流集中

地铁车站基坑沿线路方向展开，端头井、换乘节点和出入口接口常形成平面几何突变，围护墙接缝、槽段搭接和墙底进入相对弱透水层的位置容易成为渗流集中通道。开挖卸荷会改变坑内外水压力分布，墙趾和接缝附近更容易出现水头差集中；局部降深过大时，管线、道路边缘和建筑基础附近的软土沉降先于坑内涌水表现出来。该类风险具有空间偏聚和时间滞后特征，坑底与周边沉降敏感区会被同一地下水扰动连接。渗流集中剖面关系见图 1。

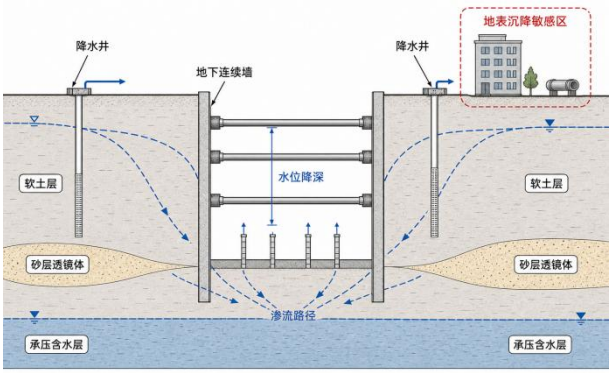


图 1 软土复合地层车站基坑降水风险剖面示意

图 1 中，砂层透镜体把坑外补给导向墙趾附近，承压含水层位于坑底以下，降水井形成的水位降深与渗流路径共同指向开挖面和沉降敏感区；当地下连续墙接缝或墙趾进入透水夹层时，坑内稳定和坑外沉降会同步受到影响。

2 地铁车站降水施工风险管控技术

2.1 井点布置与分层降压控制

井点布置应按坑内疏干、坑外减压和局部封堵三个功能区分开配置，坑内井控制开挖面水位，坑外观测井校核降深传播，端头井和接缝邻近井承担局部补强。单井水位降深、井群叠加降深和水力坡降安全系数共同约束分层降压：开挖前先形成小幅预降，支撑成型后再提高抽排能力，接近坑底时同步校核抗突涌安全[2]。若坑外观测井降深超过坑内目标响应，抽排量应转向坑内井或端头井，避免把沉降风险转移到周边敏感区。单井承压水降深关系见式（1）。

$$s=\frac{Q}{4\pi T}\int_{u}^{\infty}\frac{e^{-y}}{y}dy \quad (1)$$

式（1）中，s 单位为 m，Q 单位为 m3/h，T 单位为 m2/h，y 为无量纲积分变量。积分下限代表含水层影响参数，上限为

无穷远，表示井函数对非稳定降深的累积影响；Q 趋近于零时 s 趋近于零，T 增大时同一抽水量对应降深减小。

2.2 水位沉降联动监测与预警

监测预警应把降水井、观测井、墙体测斜点、地表沉降点和周边管线测点组成同一数据断面，水位预警、沉降预警和墙体位移预警共同触发抽排调整。软土复合地层中，水位下降、墙体水平位移和地表沉降存在时间滞后，单项水位读数处在控制线以内时，沉降点仍可能出现连续下沉[3]。预警判定应同时考察降深速率、沉降发展和围护墙变形方向，启停井、调整抽排和优化降水方案由多源监测共同决定。图 2 用于展示联动预警布置。

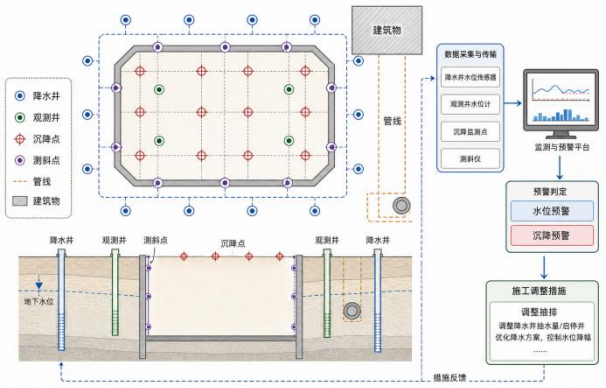


图 2 降水施工水位沉降联动监测预警布置

图 2 中，降水井布置在基坑周边，观测井、沉降点和测斜点分别对应地下水位、地表变形和围护墙响应；右侧预警判定把水位预警与沉降预警同时送入施工调整，说明抽排量、启停井和降水方案优化由多源监测共同决定。

2.3 地连墙接缝渗漏处置

接缝渗漏处置应先控制通道，再恢复抽排节奏。砂层透镜体、墙趾软弱夹层和槽段接头质量波动位置出现湿痕、细砂流失或坑壁背后水头异常时，直接加大抽排量会扩大接缝外侧水力坡降并带走细颗粒。井群叠加降深用于判断封堵前后接缝附近水位扰动是否收敛，现场宜先缩短开挖面暴露时间，采用坑内集水、接缝快凝封堵和墙外补强注浆切断通道，再依据观测井水位恢复情况调整井点运行。接缝附近井群叠加关系见式（2）。

$$S_m(t)=\sum_{i=1}^{n} s_i\left(r_{im},t\right) \quad (2)$$

式（2）中，Sm 为第 m 个观测点井群叠加降深，单位为 m；i 为井序号，n 为井数，二者均为无量纲；si 为第 i 口井降深，单位为 m，rim 单位为 m，t 单位为小时。停用井降深项为零，叠加降深随井数和距离变化。

3 降水施工风险管控效果保持

3.1 抽排节奏与回灌补偿协调

降水进入主体结构施工阶段后，风险重点由坑底稳定转向周边沉降累积和结构抗浮安全。抽排节奏应与底板垫层、底板浇筑、侧墙成型和顶板封闭状态对应，不能在结构自重尚未形成前快速停泵，也不能在坑外沉降持续发展时维持高强度抽排[4]。回灌补偿适用于坑外水位降幅过大且周边沉降敏感的区段，回灌井应布置在沉降控制区外缘或主要补给通道上；抽排降幅、水位恢复响应和保护结构受力变化按阶段比较，水量调节以观测井回升和沉降速率趋缓为依据。停降转换阶段关系见图 3。

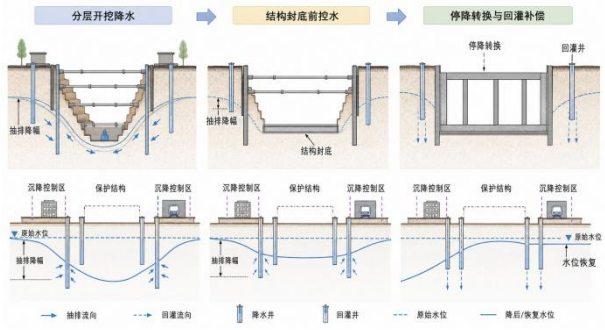


图 3 抽排降幅与水位恢复阶段响应示意

图 3 中，分层开挖阶段抽排降幅较大，结构封底前控水阶段维持受控水位，停降转换与回灌补偿阶段转向水位恢复；抽排流向、回灌流向和保护结构位置共同表明沉降控制应随阶段响应变化而调整。

3.2 停降转换与结构封底保护

停降转换应满足两个条件：坑底抗突涌和结构抗浮已由底板、内衬墙或临时压重承担，坑外水位恢复不会造成墙后水压力突增。软土复合地层中，停泵过快会使承压水沿墙趾或接缝回升，局部水压力可能先作用于尚未完全闭合的结构缝；停泵过慢则延长坑外固结沉降。水力坡降安全系数用于核对停降前后水头差和最不利渗径是否仍处于受控状态，分区停泵、保留关键观测井和应急井，可以使地下水压力恢复过程慢于结构受力体系形成过程。停降前水力稳定关系见式（3）。

$$K=\frac{i_c L}{H+\sqrt{a^2+b^2}} \quad (3)$$

式（3）中，K、ic 均为无量纲，L、H、a 和 b 单位均为 m。墙趾绕流修正量 a 或接缝渗漏修正量 b 增大时，根式修正项增加，K 降低；当 a 和 b 退化为零时，公式回到按水头差和渗径判断坑底水力稳定的基本形式。

4 结语

软土复合地层地铁车站降水施工风险管控应围绕地层补给、开挖扰动、井点控制和结构封底连续展开。软土压缩性决定沉降具有滞后累积特征，砂层透镜体和承压含水层决定渗流通道具有局部集中性，地下连续墙接缝和墙趾位置则把水位变化转化为坑内稳定风险。施工中应按坑内疏干、坑外减压和局部封堵划分井点功能，利用观测井、沉降点和测斜点形成联动预警，并在接缝渗漏、抽排调整、回灌补偿和停降转换中保持水位恢复与结构受力形成的匹配。只有把降水作为开挖、支护、监测和主体结构施工共同约束的控制过程，才能降低突涌、渗漏和周边沉降的叠加风险。

参考文献：

[1] 闫金帅.地铁车站深大基坑施工风险耦合分析[J].国防交通工程与技术,2026,24(4):57-63.

[2] 周永伟.地铁车站明挖法施工关键技术管理与创新实践[J].山西交通科技,2026,(4):153-158.

[3] 张海瑞.地铁车站地下连续墙施工技术及应用分析[J].四川水泥,2026,(8):113-115.

[4] 申珂.地铁车站机电设备的安装工艺要点研究[J].现代制造技术与装备,2026,62(7):112-114.