

富水砂层地区地铁车站勘察中的水文地质问题分析

闫建飞 刘江姬

天津市地质工程勘测设计院有限公司 天津 300191

摘要：富水砂层作为一种典型的不良地质体，其高渗透性、低强度及强流变性等特点，给城市地铁车站的勘察、设计与施工带来了严峻挑战。水文地质条件是决定工程成败的关键因素之一。本文以富水砂层地区地铁车站勘察为研究对象，系统阐述了该类地区主要的水文地质特征，深入剖析了勘察过程中面临的核心水文地质问题，包括地下水赋存与动态特征的精准识别、渗透性参数的准确获取、突涌水风险的科学评估、基坑降水对周边环境的影响预测以及砂土液化与流砂管涌等灾害的判别。在此基础上，针对性地提出了优化勘察技术与方法的策略，如采用“地质-水文-工程”一体化的综合勘察理念、强化原位测试与水文地质试验、应用先进的地球物理勘探技术、构建精细化的三维水文地质模型以及实施动态风险评估与信息化勘察。最后，结合工程实例，验证了所提策略的有效性。研究成果旨在为富水砂层地区地铁车站的勘察工作提供理论支撑与实践指导，保障城市轨道交通工程的安全、高效建设。

关键词：富水砂层；地铁车站；工程勘察；水文地质；突涌水；基坑降水

引言

随着我国城市化加速，城市地面交通压力剧增，发展地铁等城市轨道交通成为缓解拥堵、优化布局的必然之选。但城市地下空间开发拓展，使地铁工程需穿越复杂地质环境，富水砂层因独特工程地质与水文地质特性，成为地铁建设高风险区域。其孔隙度大、渗透性强、承载力低，易流变液化，在地铁车站深基坑工程中，水文地质要素影响基坑稳定、围护结构安全及周边沉降控制。历史上，因对其认识不足，国内外工程事故频发，造成巨大损失并威胁公共安全。工程勘察是地铁建设先行环节，传统方法在富水砂层地区难全面精确揭示水文地质问题，存在重大隐患。因此，系统梳理关键问题、探索科学勘察对策意义重大。本文旨在深入分析并提出系统性方案，为同类工程提供借鉴。

1 富水砂层地区的主要水文地质特征

富水砂层地区的水文地质条件复杂，主要体现在以下几个方面：

1.1 地下水赋存类型与含水层结构

在富水砂层地区，地下水通常以孔隙潜水和承压水两种主要形式赋存。（1）孔隙潜水：赋存于浅部砂层中，其水位受大气降水、地表水体（河流、湖泊）及城市管网渗漏等因素影响显著，动态变化大，季节性波动明显。潜水含水层通常与上覆的粘性土层或人工填土层构成复杂的二元或多元结构。（2）承压水：赋存于深部相对隔水层（如粘土、粉质粘土）之下的砂层中，具有较高的水头压力。承压水的补给、径流和排泄条件相对稳定，但一旦基坑开挖深度超过其顶板隔水层，将形成巨大的水头差，极

易引发突涌灾害。富水砂层地区常存在多层承压含水层，各层之间水力联系复杂，相互影响。

1.2 高渗透性与强透水性

砂层，尤其是中粗砂、砾砂层，孔隙连通性好，渗透系数（K值）通常在 10^{-3} cm/s至 10^{-1} cm/s量级，属于强透水性。这意味着地下水在砂层中流动迅速，一旦围护结构存在缺陷或基坑底部隔水层被破坏，大量地下水将在短时间内涌入基坑，形成灾难性的突涌。

1.3 水-土相互作用的敏感性

富水砂层中的有效应力原理是其力学行为的核心。砂土的抗剪强度完全依赖于颗粒间的摩擦力，而摩擦力又由有效应力（总应力减去孔隙水压力）决定。因此，任何导致孔隙水压力升高的因素（如快速加载、地震、水头差增大）都会直接降低土体的有效应力，从而削弱其承载力和稳定性，极易诱发流砂、管涌甚至整体失稳。

2 勘察中的核心水文地质问题剖析

在富水砂层地区进行地铁车站勘察，必须直面并解决以下几项关键的水文地质难题。

2.1 地下水赋存与动态特征的精准识别难题

传统的钻探取样和水位观测往往存在“点”的局限性，难以准确刻画地下水在三维空间上的连续分布和动态变化规律^[1]。例如，潜水位的季节性波动幅度、承压水头的精确高程、不同含水层之间的越流补给关系等，若仅凭有限的钻孔数据进行线性插值，极易产生误判。对承压水头的低估是导致突涌事故的最常见原因之一。

2.2 渗透性参数获取的准确性与代表性问题

渗透系数（K值）是基坑降水设计和涌水量计算的

核心参数。常规的室内渗透试验（如常水头、变水头试验）所用土样在取样、运输和制备过程中极易受到扰动，导致测得的K值远低于原位真实值。而现场抽水试验虽然能反映一定范围内的综合渗透性，但其成本高、周期长，且单个试验点的代表性有限，难以全面反映整个车站区域砂层渗透性的空间变异性。

2.3 突涌水风险的科学评估与量化

突涌水是富水砂层地铁基坑最致命的风险。其发生机理主要是基坑内外巨大的水头差导致基坑底部隔水层（或围护结构嵌固段）被击穿。传统的安全系数法（如Terzaghi或Harr公式）多基于一维简化模型，忽略了土体的非均质性、各向异性以及渗流场的三维复杂性，导致风险评估结果过于保守或过于乐观。如何结合精细化的水文地质模型和数值模拟，对突涌风险进行动态、量化的评估，是勘察阶段亟待解决的难题。

2.4 基坑降水对周边环境影响的预测困境

为保证基坑干作业，必须进行大规模降水。然而，在富水砂层中，降水会形成大范围的降落漏斗，导致周边地下水位急剧下降，进而引发一系列环境地质问题：

（1）地面沉降：地下水位下降导致有效应力增加，土层固结压缩，引发不均匀沉降，威胁邻近建筑、道路和地下管线的安全^[2]。（2）地层“疏干”效应：长期、大范围降水可能导致砂层颗粒重新排列，甚至造成细颗粒流失，改变地层结构，影响未来地下空间的开发利用。准确预测降水影响范围和沉降量，需要精确的含水层参数（如储水系数、给水度）和边界条件，而这些恰恰是勘察中的难点。

2.5 砂土液化与流砂、管涌灾害的判别

液化：在地震等动力荷载作用下，饱和砂土的孔隙水压力会急剧上升，有效应力趋近于零，土体瞬间丧失承载力，呈现类似液体的状态。勘察中需准确判定砂土的液化可能性，这依赖于标准贯入试验（SPT）锤击数、土层埋深、地下水位及地震动参数等，任何一个参数的误差都可能导致误判。（2）流砂与管涌：流砂是指在向上的渗流力作用下，砂土颗粒发生悬浮、流动的现象，常发生在基坑开挖面或围护结构接缝处。管涌则是指在渗流作用下，细小颗粒被水流带走，形成管状通道，最终导致土体结构破坏。这两种灾害的发生与水力梯度密切相关，而水力梯度的精确计算又依赖于对渗流场的准确模拟。

3 优化勘察技术与方法的策略

针对上述核心问题，必须摒弃传统的单一、静态勘察模式，转向系统化、精细化、动态化的综合勘察策略。

3.1 推行“地质-水文-工程”一体化综合勘察理念

勘察工作应从项目伊始就打破专业壁垒，由地质、水文地质、岩土工程等多专业人员协同作业。勘察方案的制定、钻探孔的布设、测试项目的选取都应以解决具体的工程水文地质问题为导向，而非仅仅满足规范的最低要求。例如，针对突涌风险，应专门布设用于测试承压水头和隔水层厚度的钻孔；针对降水影响，应布设用于监测水位动态的长期观测孔。

3.2 强化原位测试与水文地质试验

原位渗透试验：大力推广使用孔压静力触探（CPTU）、十字板剪切试验（VST）等先进原位测试技术。CPTU不仅能提供连续的锥尖阻力、侧壁摩阻力，还能同步测量孔隙水压力，通过经验公式可间接、连续地估算渗透系数，其结果比室内试验更具代表性。（2）精细化水文地质试验：在关键区域进行多孔、分层的抽水/注水试验。通过主孔抽水、多个观测孔同步监测水位变化，可以反演计算出含水层的渗透系数、储水系数等参数的空间分布，并验证不同含水层之间的水力联系。对于深层承压水，可采用分层止水的同径多孔试验方法。

3.3 应用先进的地球物理勘探技术

地球物理方法可以有效弥补钻探“点”数据的不足，提供“面”乃至“体”的地质信息。

高密度电法（EH-4）：对地下水和含水层极为敏感，能有效划分含水砂层与隔水粘土层的界面，圈定富水区域。（2）微动探测：利用天然背景噪声反演地下横波速度结构，对砂层与粘土层有较好的分辨能力，且不受电磁干扰，适用于城市复杂环境^[3]。（3）地质雷达（GPR）：在浅部（通常<20m）分辨率极高，可用于探测地下障碍物、空洞及浅层地下水位。将物探成果与钻探资料相互印证、融合解译，可构建更可靠的地质-水文地质模型。

3.4 构建精细化的三维水文地质模型

利用专业的地质建模软件（如GMS、MODFLOW、Petrel等），将所有勘察数据（钻孔、物探、试验、监测）进行集成，构建车站区域的三维地质结构模型和水文地质概念模型。在此基础上，建立三维渗流-应力耦合数值模型，可以：精确模拟天然状态下及基坑开挖、降水工况下的地下水渗流场。定量计算基坑各部位的安全系数，识别突涌高风险区。预测不同降水方案下周边地下水位降深和地面沉降量，为优化降水设计和制定环境保护措施提供依据。

3.5 实施动态风险评估与信息化勘察

勘察不应是“一锤子买卖”，而应贯穿于整个设计

和施工前期。通过布设自动化监测系统（如孔隙水压力计、水位计、沉降标），对关键水文地质参数进行长期、实时监测^[4]。将监测数据反馈到数值模型中，进行模型的动态修正和更新，实现对水文地质风险的动态评估。这种“勘察-监测-反馈-修正”的信息化闭环模式，能最大程度地降低工程不确定性。

4 工程实例分析

某滨海城市地铁6号线拟建一座地下三层岛式车站，场地地貌属冲海积平原。初步勘察揭示，地表下15-30m深度范围内存在巨厚的中粗砂层，实测渗透系数 $K = 5 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ，属强透水层。该砂层中赋存有承压水，初步测得水头埋深为3.0m（地面下），而车站底板设计埋深约28m，基坑开挖将直接揭露承压含水层，突涌风险极高。

4.1 传统勘察方案的不足

若仅按常规间距布孔，并进行简单的抽水试验，很可能无法准确查明承压水头的空间变异性和隔水层（下卧粘土层）的完整性。

4.2 优化后的综合勘察实践

一体化布孔：加密布设了12个勘察孔，其中4个为专门的水文地质孔，配备了分层过滤器和水位观测管。

（2）综合物探：在车站及周边500m范围内开展了高密度电法和微动探测，清晰勾勒出富水砂层的平面展布范围和厚度变化。（3）精细化试验：进行了为期7天的群孔抽水试验，利用5个观测孔数据，反演得到承压含水层的 K 值为 $4.8 \times 10^{-3} \text{cm/s}$ ，储水系数为 1.2×10^{-4} ，且发现车站西侧隔水层存在一厚度不足2m的薄弱带。（4）三维建模与风险评估：基于上述数据构建了三维水文地质模型，并进行了渗流-应力耦合分析。模拟结果显示，在常规降水方案下，西侧薄弱带处的安全系数仅为0.95，存在突涌风险。

4.3 成果应用与效果

勘察成果直接指导了工程设计。设计方采纳建议，

在西侧薄弱带区域增设了三轴搅拌桩进行地基加固，并优化了降水井的布置和抽水速率。施工期间，通过自动化监测系统对水位和孔压进行实时监控，数据与模型预测高度吻合，未发生任何水文地质灾害，工程顺利推进。该实例充分证明了系统性、精细化水文地质勘察对于保障富水砂层地区地铁车站工程安全的决定性作用。

5 结语

富水砂层地区地铁车站建设，成败很大程度上取决于对水文地质条件的认知深度与应对策略的科学性。本文分析该类地区勘察核心水文地质问题并提出优化策略后得出结论：精准识别是基础，需综合手段查明地下水等情况，精确测定承压水头以防范突涌风险；参数获取是关键，应推广原位测试等获取代表性参数，为工程提供依据；风险量化是核心，要利用三维数值模拟技术实现从“定性判断”到“定量决策”的转变；综合勘察是保障，需推行一体化理念，融合多种技术构建模型并实施信息化管理。未来，随着人工智能等技术的发展，水文地质勘察将更智能精准，建立相关数据库和预警平台，有望实现对富水砂层地区地铁工程水文地质风险的超前感知与主动防控。

参考文献

- [1]樊冬冬,刘天任,谭勇,等.富水砂层水文地质参数反演及基坑降水围护优化[J].建筑技术,2023,54(13):1587-1591.
- [2]李正印,张彬.郑州富水砂层地区地铁换乘站施工现场监测分析[J].建设监理,2025,(03):93-97+106.
- [3]陈国良.武汉市富水砂层地铁车站施工盖挖技术研究[J].大众标准化,2024,(22):33-35.
- [4]许杰,周志纯,黄磊群,等.富水砂层地铁盾构施工盾尾注浆对土体稳定性影响分析[J].建筑施工,2025,47(05):746-750.