

浅析地下水渗流情况下花岗岩残积土层暗挖隧道施工技术

张海涛

山东省路桥集团有限公司

摘要：隧道工程作业期间，涉及大量开挖作业内容，往往需要利用机械设备完成开挖作业，但极易对地下水环境造成破坏，使其处于失衡状态，地下水资源严重流失，还会影响施工的安全性。暗挖隧道施工作为一种常用作业模式，能够有效减少施工量，但将导致周边围岩处于不稳定状态，需要结合工程的基本情况，灵活运用暗挖隧道施工技术。故本文以实际工程为例，重点阐述了地下水渗流条件下花岗岩残积土层暗挖隧道施工技术，并简单论述了花岗岩残积土分类等内容，希望对相关工作有所帮助。

关键词：花岗岩残积土；暗挖隧道施工技术；地下水渗流

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2023.08.049

引言

花岗岩残积土层暗挖隧道过程中，若存在地下水渗流情况，将导致隧道结构受力不平衡，且地表变形异常明显，严重则会造成塌方，威胁施工人员的生命安全。对此应明确花岗岩残积土的基本类型，分析地下水渗流具体作用机理，优化施工方案，科学运用施工技术。

一、花岗岩残积土分类

花岗岩残积土指：特定气候和条件下，在化学和物理风化作用下，一种残积在原地所形成的碎屑物，此类物质压缩性小、孔隙大。具体分类标准包含：以粒度为标准，大于2毫米其含量在20%的花岗岩残积土为砾质黏性土，颗粒含量不超过5%为黏性土，颗粒含量在5-20%之间为砂质黏性土，如表1所示。以粒径组分和塑性指数为依据分类，包含砂质黏土、砾质粉土、粉质黏土等。另外，花岗岩由角闪石、长石、石英等构成，而花岗岩残积土由黏土矿物组成^[1]。

表1 花岗岩残积土分类 (d>2mm颗粒含量)

名称	d>2mm颗粒含量 (%)
黏性土	<5
砂质黏性土	5-20
砾质黏性土	>20

二、地下水渗流下花岗岩残积土层变形机理

(一) 渗流影响

若施工阶段处于雨季，降水量大且降雨天气频繁，

使得地表水持续化向下渗透，作业地点地下水位大幅度提高，围岩外部与内部产生水头差，出现地下水渗流的现象，逐渐演变成渗流场。根据相关调查结果显示，渗流场内部较为复杂，且内部稳定性不断发生改变，在物理学和化学的作用下，花岗岩残积土的抗剪强度发生明显变化^[2]。

(二) 产生的物理学作用

地下水渗流现象出现后，土地空隙的压力作用位置改变，间接影响土体的有效应力。并且花岗岩之间发生化学和物理反应，土体微观结构随之变，并会出现水体状态改变、颗粒大规模迁移等现象，降低残积土强度。另外，随着地下水渗透时间的延长，土体颗粒逐渐分离，颗粒孔隙随之增加，如表2所示。通过深入分析表2可知，孔隙变形量与初始孔隙属于正比关系，孔隙不断扩大，变形量也随之变化。

表2 不同程度的渗透压力下土颗粒孔隙比及变形量变化

渗透压力kPa	孔隙比	变形量mm
20	1.0	0.15
	1.2	0.37
60	1.0	0.11
	1.2	0.22
80	1.0	0.11
	1.2	0.14

(三) 渗流对花岗岩残积土层的具体影响

通过查阅相关资料，以及分析实验结果可知，围压越大，残积土渗透指数越小。同时，渗流场越强烈，土体空隙随之变大，摩擦阻力、结合力降低。

三、花岗岩残积土层暗挖隧道施工中地下水渗流特征

(一) 计算模型

为了系统化分析地下水渗流特征，将花岗岩残积土层简化，利用ABAQUS数值模拟软件，构建完善的隧道瞬态渗流模型，深度分析各个作业环节的地下水渗流场。

(二) 渗流计算原理

采用达西定律，将饱和砂土作为渗流介质，制定并实施渗透试验，表达式为：

$$Q = AK \frac{(h_1 - h_2)}{L}$$

其中：h为总水头损失，A为过水断面面积，L为渗流路径，K为含水层渗透系数，Q为地下水流量。渗流连续性方程为：

$$\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right) = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

其中：v为流速，t为时间，S为含水层释放或存储的水量。

（三）地下水水位变化特征

通过分析实验结果可知，地下水水文变化特征为：初始地下水位与最低点水位的距离为最大水位降深。隧道施工期间，当处于拱墙开挖作业阶段，地下水位下降速度最快；支护作业阶段，地下水位下降幅度明显；仰拱支护阶段，地下水位逐渐恢复至初始状态；衬砌作业阶段，水位恢复速度降低。当整个隧道作业内容完成后，地下水水位处于稳定状态^[3]。

四、花岗岩残积土层暗挖隧道施工技术

（一）工程基本情况

某市4号线地铁工程项目施工阶段采用暗挖作业模式，其中一部分作业区域地质构造呈现复杂化特点，为了避免影响工程进度和质量，选择对花岗岩残积土层作业，整个作业区段为160米。由于花岗岩残积土组成部分和构造较为特殊，若施工期间出现地下水渗流现象，将导致土层处于失稳状态，极易发生崩解情况而引发重大安全事故。鉴于此，工程负责人应与施工人员展开深入探讨，结合以往作业经验，从工程实际情况出发，对作业方案合理优化，规范施工技术使用方案，促进暗挖隧道施工有序开展。

（二）超前支护施工技术

地下水渗流状况下，暗挖隧道施工过程中，应重视超前支护施工技术的运用，避免由于围岩形变，而出现坍塌、掌子面失稳等情况，威胁施工人员的生命安全，产生严重的经济损失，降低工程综合效益。超前支护施工期间，作业人员应明确小导管注浆作业流程，掌握此环节作业要点，根据本工程具体情况，可以选用直径为42毫米的无缝钢管，并将钢管前端加工成圆锥形态，以此避免泥浆向外喷出，浪费施工材料。

小导管注浆施工技术要点：其一，安装作业完成后，施工人员应在周围裂缝区域和钻孔处涂抹适量塑料泥，并且为了防止发生工作面塌陷事故，可以在工作面喷涂混凝土。小导管注浆施工准备阶段，由技术人员展开压水试验，判断压力是否符合要求，并重点检查机械

设备的运行状态等。若工程施工时间较为紧张，且对施工设备作业效率要求高，可以同时4-8根导管进行注浆。还要将管内的砂石清理干净，之后注入水灰比为1:1的水泥浆。单孔注浆压力需控制在0.3-1.0MPa，当注浆量达到设计要求即可停止作业。其二，初始混合比确定后，应在凝胶时间对混合比合理调节，还需系统化检测灌浆固结体强度，确保混合比符合工程施工要求。其三，灌浆作业阶段，施工人员需仔细检测灌浆压力，促使最终压力与设计值相一致，避免实际灌浆压力大于预期设定压力值，出现地面结构变形的情况^[4]。

（三）隧道结构防水抗渗施工技术

暗挖隧道施工阶段，需要根据地下水渗流具体情况，建立施工力学模型，考虑到工程对防水防渗性能的具体要求，引入达西定律，分析孔隙水压分布情况，具体表示形式为：

$$w_s(q) = W_s(q_2) - \frac{\left[\frac{W_s(q_2)}{\ln(q_2/q_1)} + \frac{W_s(q_0)}{\ln(q_1/q_0)} \right] t_y}{\left[\frac{t_q}{\ln(q_2/q_1)} + \frac{t_y}{\ln(q_1/q_0)} \right]} \times \frac{\ln(q/q_2)}{\ln(q_2/q_1)} + W_s(q_2) \frac{\ln(q/q_2)}{\ln(q_2/q_1)}$$

$q \in (q_1, q_2)$ ，其中 t_q 为围岩渗透系数、 t 为渗透系数、 t_y 为塑性区渗透系数， W_e 为承载水压、 q_1 为隧道开挖后半径、 q_2 为围岩半径、 q_0 为隧道净径。

建立地铁暗挖隧道结构时，不仅需要轨道路面展开防渗设计，还需对围岩展开抗压防渗设计。本工程隧道行车宽度2.85米，选择防水混凝土结构。具体施工阶段，采用刻槽方法完成混凝土表面结构作业，扩大隧道的受压面积，还能减少承压受力。防护混凝土的配制属于重难点内容，应采用正交试验法，分析方防水混凝土影响因素，如表3所示，故此应采用“4因素3水平”进行配比，以此保障防水混凝土配制质量达到预期要求。

表3 防水混凝土影响因素与水平

水平	因素			
	Z纤维素kg/m ³	X膨胀剂%	C矿粉%	V粉煤灰%
1	1 (Z1)	3 (X1)	9 (C1)	9 (V1)
2	1.3 (Z2)	5 (X2)	17 (C2)	17 (V2)
3	1.3 (Z3)	7 (X3)	22 (C3)	22 (V3)

（四）CRD工法分布开挖支护技术

为了保障暗挖隧道施工的安全性，并能在规定时间内完成施工内容，可以采用CRD工法分布开挖支护技术，促使受力结构体系处于完整状态。具体施工过程中，施工人员应重视长钢架连接作业，形成一个完整的封闭环，并在拱部位置提前预留核心土，避免出现坍塌等不良现象。若施工地点地质条件较差，应将C20早强

混凝土喷射至掌子面，具体喷射厚度不应超过5厘米，提高土层的稳定性。同时，管控混凝土强度时，需要仔细检测原材料质量，多角度分析和调整施工技术方案，并合理处理地层支护作业。

处于开挖作业期间，施工人员需严格遵守作业要求，尽可能地一次完成，杜绝欠挖现象的出现。另外，仔细分析出现超挖、预留变形、作业误差等情况的原因，确保开挖轮廓线比值、圆顺，满足工程设计要求。一旦施工期间出现质量问题，应立刻制定完善的应对措施，避免影响开挖施工质量。此外，每次开挖作业结束后，施工人员需铺设50厘米厚的混凝土，之后展开挂网、锚杆、钢架设置等作业。安装格网钢架时，需要仔细清理杂物和废渣，防止发生失稳、下沉等不良情况。处理超挖区域时，可以利用砖块和混凝土垫实。

开挖作业结束后进入初期支护阶段，采用梅花形布置的方法注浆钢花管。同时利用现代化仪器设备，全过程监测整个施工流程，以便于及时发现边墙、拱脚异常移动情况，针对性制定应对方案。不仅如此，技术人员应准确记录工程开挖情况，系统化分析地质特点，是否与现有勘察资料内容存在不同点，为工程顺利开展奠定基础。

（五）超前加固注浆技术

暗挖隧道施工期间，可以根据工程建设要求，运用超前加固注浆技术，以此降低地下水渗透带来的影响。选用二重管无收缩浆液，将浆液分成三种，当A与B混合后形成溶液型浆液，A与C混合后形成悬浊型浆液，浆液配制应按照表4标准，提高加固注浆施工质量。同时，浆液将影响花岗岩残积土层的渗透性，需要施工人员提前调整浆液的配合比，并根据工程施工要求，科学调节注浆压力，避免出现凝结硬化的现象。

表4 注浆液配合比

名称	内容	质量kg	密度	备注
A液	稀释剂	280	1.37	500L
	硅酸钠	301.5	1.0	
B液	稀释剂	313.45	1.0	500L
	H剂	69.74	1.0	
C液	稀释剂	232.45	1.0	500L
	水泥	260	1.3	

超前加工注浆施工时，核心作业流程为钻孔和灌浆。钻孔施工阶段，施工人员需要按照作业图纸确定注浆孔，并反复多次进行核对，准确无误后才可进入下一施工流程。钻机定位的误差不得超过30毫米，钻杆垂直度误

差控制2度以内，并委派技术人员严格监测钻孔钻进深度，若发现溢水情况立刻停止作业，注入适量的浆液，并分析溢水情况出现的原因。注浆施工阶段，采取压力灌注的方法，先灌入AB混合液，此时灌浆压力应在1.5-2.0MPa，持续10分钟，当外壁不存在溢水情况即可停止作业，之后灌入AC混合液，若灌浆压力超过2.0MPa，则将钻杆提高25厘米。

另外，根据施工方案确定注浆加固范围。处于注浆准备阶段，应了解相关采参数，包括凝结进程、渗透半径、注浆量、填充率等等。施工阶段需结合作业地点的地质条件，以及机械设备、钻孔布设、注浆孔数等等，不断调整施工方案。安全岩盘注浆期间，注浆厚度应超过2.5米，若未能达到则以要求，应提前进行止浆墙作业。本工程止浆墙施工时，墙体厚度设为1.5米，利用C20混凝土作业，循环注浆长度为10米。若注浆量逐步降低，而注浆终压大幅度提高，即可完成注浆作业，并增设检查孔。其中检查孔的数量应为注浆孔数量的7%，且出水量不得超过0.2L/（m·min），也可进行压水试验。不仅如此，根据施工量估算注浆量，计算公式为： $Q=Rna(1+\beta)$ ，其中R为注浆范围体积、n为孔隙率、a为注浆填充系数，0.7-0.9、 $na(1+\beta)$ 为填充率、Q为注浆总量、 β 为注浆折损系数。

总结

总而言之，若存在地下水渗流情况，需要根据花岗岩残积土层的性质特点，灵活运用超前加固注浆技术、CRD工法分布开挖支护技术、隧道结构防水抗渗施工技术、超前支护施工技术等。

参考文献

[1] 杨国浪. 地下水渗流情况下花岗岩残积土层暗挖隧道施工技术研究[J]. 广西城镇建设, 2023(1): 58-63.

[2] 彭东祥. 地下水渗流情况下花岗岩残积土层暗挖隧道施工技术研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(8): 158-161.

[3] 张利锋. 复杂环境下花岗岩残积层地区超大型基坑施工技术[J]. 建筑施工, 2021, 43(7): 1187-1189.

[4] 朱旻, 陈湘生, 张国涛, 等. 花岗岩残积土硬化土模型参数反演及工程应用[J]. 岩土力学, 2022, 43(4): 1061-1072.