

# 帷幕灌浆技术在强风化板岩地质中的应用

郑昊

(中交一航局第三工程有限公司)

**摘要:**在强风化板岩地质条件下,为了确保基坑稳定的前提下更高效、更经济地完成基坑止水体系的闭合,同时解决施工操作复杂性和强风化帷幕灌浆的技术难点,采用自上而下的帷幕灌浆技术,结合大连湾海底隧道建设工程南岸基坑止水体系的实际应用,通过精细调整先导孔布置、注浆压力等关键施工参数,成功克服了强风化板岩地质中帷幕灌浆的施工难题,显著提升了施工效率和质量,有效保证了帷幕灌浆在复杂地质条件下的施工质量,基坑开挖后的止水效果完全满足相关工程要求,证明了该方法在解决强风化板岩地质中基坑止水体系施工难题上的有效性和实用性。

**关键词:**基坑;强风化板岩;帷幕灌浆;止水体系

## 0 引言

在土木工程建设中,基坑止水体系的稳定与闭合是确保工程安全与质量的关键环节。尤其在复杂地质条件下,如强风化板岩地层,其施工难度和技术挑战尤为突出。强风化板岩因独特的物理力学特性和高度风化状态给基坑止水体系的施工带来了诸多难题,如帷幕灌浆的均匀性、注浆压力的控制以及施工操作的复杂性等,不仅影响了施工效率,也对工程质量构成了潜在威胁。

## 1 工程概况

大连湾海底隧道建设工程南岸陆域工程位于大连市城市中心,为减少对城市交通道路占用的影响,隧道主体工程采用直立式基坑降水形成干地条件,进行主体结构的施工,基坑支护采用荤素咬合桩兼做止水结构。由于工程临近海边,地下水与海水相连通,水量较大,基坑底位于地下水位以下深达约 12 m,基坑止水结构入岩深度需进入强风化板岩不少于 6 m。目前国内项目在强风化地质中帷幕灌浆应用较少,类似经验不足。工程局部地质条件较特殊,存在强风化板岩,其透水率较大,局部厚度达 30 m 以上,工程止水为基坑施工的重点<sup>[1]</sup>。

基坑深达 16 m,若采用基坑咬合桩结构兼做止水结构,进入强风化板岩的难度较大,且工期长、造价高,在强风化板岩深 30 m 处需施工桩基长度 60 m 以上,目前本地市场设备保有量很低,无法满足工程需求。

## 2 地质条件

帷幕灌浆施工需入强风化板岩 6 m,在帷幕灌浆施工区域内地质复杂,主要为强风化板岩,在地下深度为 18~30 m,颜色主要呈现为灰黄~灰色,具有变余泥质结构,原本以板状构造为主,但经过风化作用,其结构大部分已经遭到破坏,导致矿物成分发生了显著变化。岩芯形态多样,主要呈现为碎屑状和块状,部分碎块质地较为脆弱,用手即可折断。这些岩石在遇水时容易软化,并可能包含一些中等风化程度的残块<sup>[2]</sup>。现场钻孔地质情况见图 1。



图 1 现场钻孔地质情况

这些强风化板岩根据岩石的坚硬程度分类被归类为软岩;按照岩体基本质量等级划分属于 V 级,表明在地质工程中的稳定性和承载能力相对较弱,需要采取相应的工程措施来确保其稳定性和安全性。

### 3 帷幕灌浆工艺改进

强风化地质区域灌浆时在钻孔、注浆、压水试验等环节均易发生塌孔，致使灌浆施工无法完成，常规的施工方法在强风化地质中无法施工。针对强风化地质中进行帷幕灌浆施工存在塌孔情况，本项目采用自上而下施工工艺：先导孔的施工与常规地质施工方法相同，对先导孔进行加密，每 5~10 个孔布置 1 个先导孔，通过先导孔指导附近孔位的注浆。由于现场地质的不均匀性导致不同地段的强风化板岩破碎程度不同，为满足地质灌浆要求，施工过程中对钻孔、注浆、裂隙清洗、压力值控制等工序进行改进和调整。

#### 3.1 优化孔口管埋设

解决强风化地质中成孔以及注浆困难，避免钻孔、注浆塌孔，常规钻孔不适用于该地质，对钻孔方式进行了改进：钻孔件外套设钢套管，形成钻孔组件，钻孔过程中形成钻孔护壁，同时作为帷幕灌浆孔口管。孔口管埋设后，对管底注浆密封处理，封堵完成 24 h 后可进行下卧基岩帷幕灌浆。

#### 3.2 异常孔处理

施工过程中部分孔段渗漏较大，一次性灌浆无法达到结束标准，需要待凝复灌，复灌前需要重新钻孔即为扫孔，在浆液初凝后进行。钻孔时记录施工情况，由于地质情况不同，可能存在塌孔、掉块、涌水等情况，需灌浆加固后再钻进。

#### 3.3 裂隙冲洗

灌浆前，冲洗灌浆孔内裂隙，使孔底沉积厚度  $\leq 20$  cm。钻孔直接用水冲洗，回水变清即可。

一般情况下，岩性坚硬完整、地质构造中岩溶不发育区域的注浆孔，钻孔后需要用压力水进行裂隙冲洗，冲洗至水不再浑浊，压力控制小于灌浆压力的 80%，原则上不大于 1 MPa；根据本工程施工经验，强风化板岩风化较严重的部位，不宜进行裂隙冲洗。

#### 3.4 压力值控制

压水采用常规压自上而下分段循环式、孔口封闭灌浆的方法进行灌浆，先进行简易压水试验，成孔后进行该试验。压水试验采用三压力五阶段方式，最大压力取灌浆压力的 80%，不大于 1 MPa，且确保栓塞侧摩对灌浆结构的拉力、对试段底部的灌浆结构拉力不超过灌浆结构抗裂拉力限值。

#### 3.5 试段隔离

止水采用水压式或气压式栓塞，压力水应大于试验压力 0.2 MPa 以上，栓塞长度需大于钻孔孔径的 8 倍以保证止水效果。

#### 3.6 水位观测

完成试段隔离后，观测工作管内的水位是关键步骤。通过定期观测工作管内的水位，可及时发现并处理可能出现的异常情况，如水位异常波动、渗漏等。为了确保观测数据的准确性和连续性，设定了 5 min/次工作管内水位的观测，在观测过程中，需要特别关注水位下降的速度。当连续 2 次观测到的水位下降速度都小于 5 cm/min 时，可以确定管内的水位已经趋于稳定。满足上述条件后，可以结束观测。

#### 3.7 流量观测

在稳定的压力条件下进行流量测量。设定 30 min 为一个测量周期，在每个周期内进行多次测量，并记录测量值。当满足以下任意一个条件时，结束当前阶段的测量。

1) 如果在连续 4 次测量中，所得到的最大值均相同，且流量保持稳定，例如稳定在 1 L/min 左右，则结束本阶段测量。

2) 如果在一段时间内，所有测量值的最大值与最小值之差小于该段时间内最小值的 10%，也被视为测量过程足够稳定，从而结束当前阶段的测量。

上述 2 个条件满足一个即可。此外，阶段测量结束后，根据这一阶段的所有测量值，计算出一个最终值(改值为平均值)作为阶段的计算值，用于后续的分析或计算。

#### 3.8 帷幕灌浆

由于地质的强风化，土壤松散无法采用常规方法进行钻孔控制。因此，需要根据注浆孔的深度变化调整压力值，以确保注浆过程中避免塌孔，并避免因压力过大而穿透强风化板岩。经试验证明，注浆过程中需要对注浆段合理控制。首先，接触段的长度应限制在 3 m 内；其次，向下分段的长度应保持在 5 m 以内，直到达到终孔的位置。同时，在试验中确定了注浆压力的数值控制：第 1 段的初始压力应为 0.2 MPa，而从第 2 段开始，每一段的灌浆压力应逐渐增加 0.05 MPa，且底部的压力不能低于 2 倍的水头压力，最后一段压力为 1.0 MPa。

#### 4 止水质量控制

基坑止水设计的核心是确保在注浆施工后,地下水能得到有效控制,避免对工程结构和周边环境造成不良影响。本工程基坑采用咬合桩+帷幕灌浆止水体系,在帷幕灌浆地质结构中存在强风化地质,影响止水效果。需通过工艺改进、合理的灌浆压力值、优质的灌浆材料等手段进行灌浆控制,确保止水效果达到设计要求。同时在施工中加强地质情况的变化,适时调整施工参数,确保止水设计的有效性和可靠性。在施工中质量控制要点如下:

1) 注浆施工前,严格按照规范要求压水试验,确定基岩的渗透性以及需要注浆的深度<sup>[3]</sup>。由于地质条件复杂,压水试验孔尽可能加密,按每5~10个注浆孔进行一个压水试验,在施工过程中,根据现场地质情况的变化,适当的调整压水试验数量;

2) 灌浆材料应合格,满足其设计相关指标,施工前做好材料的检验和试验,把好材料检测的第一关,保证施工质量;

3) 在帷幕灌浆过程中,实时监控、量测灌浆压力、注浆量等关键参数,确保灌浆满足设计质量要求;

4) 在止水体系全部施工完成后,进行止水效果检测,如压水试验、渗透试验等,以评估止水结构的性能和效果。

#### 5 帷幕灌浆关键技术

为确保帷幕灌浆施工在强风化板岩地质条件下的有效性和质量,需根据先导孔的实际情况调整施工参数,并对不同地质条件下的止水帷幕进行典型段试验。施工中的关键技术包括注浆压力的调控、灌浆中断的处理策略,以及通过试验参数结合基岩完整性来优化灌浆深度、灌浆量和灌浆压力等参数。

##### 5.1 注浆压力控制及处理措施

注浆压力的合理调控是确保帷幕灌浆质量的关键。根据岩层完整性和地质条件的不同,注浆压力的调控策略有所区别:

1) 岩层完整区段:对于岩层较为完整,断层、裂隙以及岩溶不发育的灌浆区段,灌浆开始时迅速增加压力至设计压力值。随着每级浆液注入量的增加,适时更换更浓的浆液,直至达到灌浆结束的标准。

2) 含断裂和溶蚀区段:对于岩层中含有一定断裂和溶蚀的灌浆段,将灌浆压力分级递增至设计压力。在逐级加强灌浆浓度后,注入量会有所减少。在无串漏或串漏轻微的情况下,通过2~3个压力分级逐步增加压力至设计值。

3) 断裂破碎和强溶蚀地段:对于断裂破碎和强溶蚀地段以及串漏严重的灌浆段,采用间歇式注浆方法。在低压下注入大量浆液后,待浆液凝固再进行注浆,逐级升压直至达到设计压力。间断次数和时间根据注浆效果确定,通常为4~72 h。

##### 5.2 冒浆与串浆处理措施

灌浆过程中若出现冒浆或漏浆,需根据实际情况采取低压、高浓度、限制流量、限制用量或间断灌浆等方法进行处理。若发生串浆且串浆孔满足灌浆条件,可同时灌浆,每孔使用独立泵。条件不满足时,用塞子封住串浆孔,待其他孔灌浆结束后清洗并继续钻进和灌浆。

##### 5.3 灌浆中断解决办法

灌浆工作因故中断时,按以下原则处理以确保灌浆质量和连续性:

1) 优先考虑尽早恢复灌浆作业,确保灌浆层不被污染或损坏。

2) 若条件不允许立即恢复,应进行钻孔冲洗。若钻孔冲洗无效,则进行扫孔操作,清除孔内障碍。

3) 恢复灌浆时,选用与中断前相近开灌比级的水泥浆注入。若注入速度与中断前相近,可继续使用相同开灌比级的水泥浆;若注入速度大幅下降,则逐级增加水泥浆浓度直至达到预期效果。

4) 若恢复灌浆后注入速率明显下降且短时间内停止吸水,表明孔内可能存在严重堵塞或吸收能力丧失。应立即停止灌浆并采取补救措施,如再次扫孔、加大冲洗力度、改变灌浆策略等。

#### 6 试验检测结果与分析

工程止水整体完成后,为确保止水效果满足设计要求,进行了详细的试验检测。采用单点法压水试验评估帷幕灌浆的止水效能。试验过程中,压水试验的压力值设定为0.3 MPa,该值旨在模拟工程实际可能遭遇的水压力。设计要求的渗透系数上限 $K \leq 3 \times 10^{-5}$  cm/s,现场检测结果最大值 $K = 2 \times 10^{-5}$  cm/s,远低于设计要求,表明帷幕灌浆的止水效果优异。在基坑开挖及降水实施过程中,基坑渗水情况得到了有效控制,渗水量远小于设计

要求，完全满足了现场施工需求。在基坑开挖阶段以及后续的主体结构施工阶段，均未发现渗漏现象，进一步验证了帷幕灌浆止水效果的可靠性。

7 结语

本研究针对强风化板岩地质条件下的基坑止水问题，采用了帷幕灌浆止水工艺，并通过详细的试验检测与现场实施情况的观察，得出了以下结论：

1) 帷幕灌浆止水工艺在强风化板岩地质条件下能够有效实现止水目标，其渗透系数远低于设计要求，止水效果优异。

2) 在基坑开挖及降水实施过程中，基坑渗水情况得到了有效控制，满足了现场施工需求，且在后续施工阶段未出现渗漏现象。

3) 该工艺的成功应用，不仅解决了类似地质地下止水工程的难点，还具有良好的经济效益，对后续市政施工推广提供了有益借鉴。

参考文献：

[1] 张立光,张友毕,王国成. 大型沉管预制场止水系统关键技术的应用[J]. 中国港湾建设,2021,41(11):34-36.  
[2] GB 50021—2001,岩土工程勘察规范[S].  
[3] 王晓姝,孙竹,张立光. 强风化地层上土石围堰的截流结构设计及施工[J]. 中国港湾建设,2022,42(12):29-32,96.