

富水砂层环境小直径盾构端头加固技术探索

高鹏超 郑越子建 贾红玉 李永光 王 强

国网北京市电力通州供电公司 北京 101100

【摘要】：本文主要针对富水砂层环境下小直径盾构端头加固进行研究。先介绍本次研究的背景及意义，分别对工程概况、地质情况以及水文地质情况进行分析；其次对不同盾构端头加固技术进行比选并研究注浆加固工艺，在此基础上制定水泥—水玻璃双液浆注浆方案，包含加固机理、注浆参数优化以及注浆方案的设计。同时进行了现场试验来验证注浆加固效果。最后对研究成果进行总结并对以后研究的方向做了展望。本研究为在富水砂层环境下采用小直径盾构施工的端头加固提供了一定的理论及实践指导意义。

【关键词】：富水砂层；盾构端头加固；水泥-水玻璃双液浆；注浆参数优化

DOI:10.12417/2811-0528.26.20.060

1 绪论

1.1 研究背景及意义

在富水砂层环境下进行盾构施工作为当前隧道领域中的一个难点，其关键步骤——端头加固技术对于保障施工安全性及提高施工效率有着十分重要的作用。随着城市建设中地下空间开发利用程度不断加深，盾构工法因其具备施工速度较快、对地表扰动较小等诸多优点被大量应用。但在富水砂层中盾构始发与到达掘进时，因地下水丰富，砂层流动性强，易出现盾尾间隙渗漏及地表塌陷、涌水等地质灾害，严重影响盾构施工安全和周围环境安全。传统盾构端头加固大多采用注浆工法，但现有注浆工法应用于富水砂层环境下具有一定限制，例如注浆压力控制不合理、注浆量过少造成注浆范围不足等问题导致出现新的水土问题。为此，研究适合于富水砂层环境下小直径盾构端头加固新技术、新工艺具有重要的理论及现实意义。

本文针对富水砂层下小直径盾构端头加固方法的问题，在综合分析国内外相关成果的基础上提出了水泥—水玻璃双液浆注浆的方法并进行了现场施工试验，以期对同类型地区的盾构工程施工中的端头加固起到指导作用和技术借鉴意义。

1.2 主要研究内容

本次课题的研究目的是探索一种在富水砂层环境下小直径盾构端头加固技术，具体研究内容如下：

（1）工程概况描述，如工程基本情况、地层岩性及水文地质条件等，在此基础上开展相应的加固技术设计和现场试验；（2）结合已有盾构端头加固工法特点，对其中常用的注浆加固方式展开研究探讨，并比较不同方法的适应范围及利

弊，以及其在富水砂层中的使用情况，进而确定合适的方法。

（3）确定水泥—水玻璃双液浆注浆方案，进行注浆加固机理研究、注浆参数优化及具体注浆方案的设计。（4）实施水泥—水玻璃双液浆注浆现场试验，通过对注浆试验、现场监测及加固效果验证来评价所设计注浆方案的应用效果。

1.3 技术路线

本文研究思路以富水砂层下小直径盾构端头加固技术为研究目标，在以下几个方面展开：

一是对背景以及意义进行了分析，明确了该研究的重要性和实用性，并提出了相关的解决方法。二是对比现有盾构端头加固技术，并从加固效果、成本、工期、适用条件等方面综合考虑，从而探讨水泥—水玻璃双液浆注浆加固技术是否适合在本工程应用。三是合理选取注浆参数，主要研究注浆参数对于加固效果的影响，制定合理的注浆方案，并通过水泥—水玻璃双液浆注浆试验获取资料及现场监测来验证加固方案是否有效。

最后，结合试验成果得出适用于富水砂层环境下小直径盾构端头加固技术措施及未来研究发展方向。

2 工程概况

2.1 工程概况

本工程位于北京市通州区张家湾镇，为新建 110kV 送电电缆隧道，总长约 3090m。本标段电缆隧道路径长度 1230m，其中桩号 0+178-1+361.5 为 $\Phi 3.5\text{m}$ 单孔盾构电缆隧道，长度 1183.5 米，隧道埋深 9.622m~16.101m，管片外径 4000mm。

盾构竖井采用 $\phi 1000$ 咬合桩+内支撑的支护结构, 盾构区间施工采用土压平衡盾构机。

2.2 地质情况

盾构区间盾构穿越端头加固段地层岩性及分布特征如下:

粉砂-细砂③层: 褐黄-灰黄色, 中密, 饱和, 主要成分为云母、石英、长石等, 夹黏质粉土薄层、粉质黏土薄层。

细砂④层: 灰黄-灰色, 中密-密实, 饱和, 主要成分为云母、石英、长石等, 偶见砾石。

地质结构主要以砂层为主, 砂层的颗粒大小不一, 从粉细砂到细砂均有分布, 砂层厚、透水性大。

2.3 水文地质条件

拟建电缆隧道位于北运河和凉水河之间, 距离北运河最近处约 0.5km, 距离凉水河大于 2.0km, 具有地下水丰富, 水位埋藏浅, 渗透性强, 承压水头高的特点, 平均地下水位埋深约 6.9m, 最小埋深仅 1.8m。

地下水水位情况如下表所示:

序号	地下水类型	地下水稳定水位 (承压水测压水头)		主要含水层
		水位埋深 (m)	水位标高 (m)	
1	潜水	1.80~12.00	13.50~15.16	黏质粉土-砂质粉土② ₁ 层、粉砂-细砂③层、砂质粉土-黏质粉土③ ₁ 层、细砂④层、细砂-中砂④ ₁ 层
2	承压水 (水头 9.4~11.9m)	2.70~12.80	12.70~14.29	细砂⑥层、细砂⑦层

渗透系数指标: ③层为 0.0023 cm/s, ④层为 0.0046 cm/s。

在富水砂层环境中进行盾构端头加固设计与施工, 地下水位、水质类型、渗透系数以及含水层的分布情况是决定工程安全与效率的关键因素, 需着重考虑。

3 盾构端头加固技术对比分析

3.1 盾构端头加固技术对比

在富水砂层环境下, 常用的盾构端头加固技术主要包括深层搅拌加固、注浆加固、冷冻法加固以及化学固结法加固等, 或不同加固技术结合。每种技术都有其优缺点, 适用于不同的地质条件和工程需求。

四种加固技术的主要特点对比如下:

加固技术类型	成本	工期	适用条件	加固效果
深层搅拌加固	中	中	高水位	中等
注浆加固	低	短	一般	中等
冷冻法加固	高	长	高水位	好
化学固结法	中	中	特殊	好

综上所述, 结合本工程特点, 采取注浆加固的技术, 在保证加固效果的前提下可以达到低成本、短工期的目的, 为最佳加固技术的选择方案。

3.2 注浆加固工艺

注浆加固原理主要是向砂层内灌注浆液, 使其通过化学作用或者物理作用在砂粒间形成一种胶结体来提高砂层稳定性及强度。通常情况下, 对于注浆料的选择要考虑其流动性、凝结时间以及适用性等问题。而水泥-水玻璃双液浆流动性好并且凝结速度快, 在富水砂层加固中有较广泛的应用。

注浆施工的核心是注浆参数的控制, 即注浆压力、注浆速度、注浆量及注浆材料、浆液配比、浆液凝结时间等, 这直接关系到浆液能否顺利注入至砂层并产生有效的加固范围。若注浆压力过大可能导致冒浆甚至抬升地表; 若注浆压力太小又会造成扩散不足。有效加固范围不足; 注浆量则是直接决定了固化料的掺入量, 对于注浆效果来说在众多注浆参数中所占的比例较大。所以合理地确定注浆参数才能保证良好的加固效果。

另外, 注浆速度、注浆压力、浆液配比、凝结时间也需要结合现场情况, 适应当地地质及工程条件的要求。

综上所述, 在富水砂层中进行注浆加固, 应结合诸多方面的因素, 经过合理设计并精心施工后方可取得良好效果。

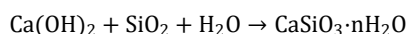
4 水泥-水玻璃双液浆注浆方案设计

4.1 加固机理

水泥-水玻璃双液注浆加固法是指采用水泥-水玻璃双液浆液通过化学反应作用增强土体结构, 提升土体承载力及稳定性的一种注浆技术。该技术主要是通过水泥浆液与水玻璃混合产生化学反应形成硅酸钙凝胶体达到加固富水砂层的目的。凝结时间可通过水玻璃浓度、配比、水泥浆水灰比调节。

富水砂层注浆时, 水泥浆与水玻璃浆混合后形成硅酸钙凝胶体能有效填充砂层的孔隙空间, 减少水的渗透, 从而能够增强砂层整体性及稳定性。

加固过程化学反应方程式可以简化为:



其中, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 代表水泥浆中的氢氧化钙, SiO_2 代表水玻璃中的二氧化硅, H_2O 代表水, 而 $\text{CaSiO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 则代表生成的硅酸钙凝胶体。

综上所述可知: 水泥-水玻璃双液浆注浆技术在施工过程中利用化学反应产生的硅酸钙凝胶体, 在一定程度上有效加固了富水砂层, 提高了砂层的物理力学性能, 保证了盾构端头加固整体的效果。

4.2 注浆参数优化

在富水砂层环境下,盾构端头加固技术的关键是注浆参数的优化。包括注浆压力、注浆速度、注浆量以及注浆材料的配比等方面。在充分考虑地质情况的基础上结合实际需求,采取现场试验法对其加以优化,实现最佳的加固效果^[1]。

注浆压力也是影响加固效果的主要参数之一,在压力不够的情况下,地层深部空隙无浆液充填,存在加固盲区。合适的压力可以促使浆液沿着孔隙、裂隙向深处延展,达到逐层均布注浆的目的,消除加固薄弱层,形成一个完整的加固体,整体均匀性大大增加。还可以增大土体的压密程度,提升地层的整体强度,止水防渗效果最好。

注浆量主要由加固体(扩散半径 R) 体积、地层孔隙率及注入系数、损耗系数决定,可采用理论公式计算出注浆量,但在实际施工过程中,注入系数和损耗系数较难确定,需结合现场试验和监测结果进行调整。

注浆材料的配合比是优化的重要方面之一。合适的配合比可以提高浆液的流动性及渗透性,并能提高加固体的强度及稳定性。

同时还要注意的,在进行注浆操作过程中还需要控制好注浆的速度,如果注浆速度过快的话,则会影响加固的质量效果;反之注浆速度过慢的话,也会增加工作的时间成本和费用支出。

4.3 注浆方案设计

盾构端头加固的注浆方案设计是确保施工安全和工程质量的重要环节。主要包括注浆材料的选用、注浆参数的选取以及注浆工艺的确定。

首先是根据地质条件和工程要求计算所需的注浆压力和注浆量,再进行配合比的优化与注浆工艺优化。

(1) 注浆压力确定: 注浆压力的理论计算公式为:

$$P_{\min} = \gamma h / 1000 + \sigma_t,$$

式中:

$P_{\min}$ —最小注浆压力, MPa;

h —地面至注浆段的深度, m;

γ —注浆地基的天然重度, kN/m³;

σ_t —土的抗拉强度, 可取 0.005MPa~0.040MPa。

但实际应用中除考虑最小注浆压力外,还需根据现场地质条件、周边环境条件以及设备性能对实际注浆压力进行调整,

一般情况可取 0.5MPa~1.5MPa 为宜。

(2) 注浆量确定: 注浆量的计算理论计算公式为:

$$Q = V \cdot n \cdot \alpha \cdot \beta$$

其中:

Q —设计用浆量 (m³);

V —被加固的土体体积 (m³), 砂层中扩散半径取 1.0m;

n —地层孔隙率, 可按地质勘察报告中给出的地层孔隙率取值;

α —地层填充系数, 小导管注浆及径向注浆宜取 0.6~1.0;

β —浆液损失系数, 可取 1.20~1.40。

地层填充系数与损耗系数需结合场地地质条件、注浆条件、施工经验并结合现场试验确定。

(3) 浆液配合比设计: 水泥采用 P.O42.5 普通硅酸盐水泥, 水泥浆水灰比 1:1; 水玻璃采用 38° Bé 的原液配置, 水泥浆与水玻璃浆液的体积比应根据现场试验确定, 按注浆需求的浆液凝结时间确定, 通常取值为 1:0.1~1:1。对于本工程渗透性较强的砂层, 水泥—水玻璃浆液配合比体积比取值 1:0.5。

(4) 注浆工艺优化: 主要考虑注浆顺序和注浆方式。采用分段注浆的方式, 先对盾构端头周围的土体进行预注浆, 再进行主注浆。预注浆以定量控制, 主注浆以压力控制为主, 这样可以减少浆液流失, 提高加固效果。

5 水泥-水玻璃双液浆注浆现场试验

5.1 注浆试验

注浆试验是为了验证注浆方案设计是否可行有效, 能否实现预期的加固效果。

注浆试验采用原位注浆方法, 注浆高度 8m, 为简化试验过程, 注浆体扩散半径统一按照 1.0m 考虑, 注浆压力范围按 0.5~0.8MPa, 在此基础之上变化注浆量, 根据注浆效果, 得到合理注浆损耗系数及填充系数。

试验区	注浆压力 (MPa)	注浆量 (L)	注浆时间 (min)	n	α	β
1#	0.5~0.8	7200	120	0.4	0.6	1.2
2#	0.5~0.8	14060	240	0.4	1.0	1.4

试验中应严格控制注浆压力和注浆量, 注浆完成后养护 14 天进行检测。试验结果表明, 适当增加注浆量可以有效提

高加固效果,但过大的注浆量会使注浆压力升高,可能导致地层破坏,此外过度注浆也会导致材料浪费,成本增加,故需要找到平衡点。

通过系统的试验设计和严格的现场操作,可以确保加固效果满足工程要求,并为后续施工打好基础^[2]。

5.2 现场监测

现场监测以水泥—水玻璃双液浆注浆后的地层稳定性、加固效果以及可能的环境影响为主。

监测项目包括地表沉降、注浆压力变化等。根据测值可以实时监控加固效果,预测可能出现的问题。

部位	监测点编号	地表沉降 (mm)	注浆压力 (MPa)
1#区	001	+1.5	0.5~0.7
	002	+1.3	0.5~0.7
	003	+1.0	0.5~0.7
2#区	004	+1.9	0.7~0.8
	005	+2.1	0.7~0.8
	006	+1.8	0.7~0.8

通过上述监测数据可以看出,在注浆过程中地表沉降为正向发展,出现一定的隆起,隆起值随注浆压力变大逐渐增加,但整体处在可控范围内。

5.3 加固效果验证

经过水泥—水玻璃双液浆区段注浆试验后,对加固前后进行现场检测及室内试验以检验加固成果:

加固前后土体检测指标如下:

部位	状态	渗透系数 k(cm/s)	压缩模量 Es(MPa)	备注
1#区	注浆前原状土	2.3×10^{-3}	20	
	注浆 14d 后	$6.3 \times 10^{-8} \sim 3.3 \times 10^{-7}$	45~62	
2#区	注浆前原状土	4.6×10^{-3}	25	
	注浆 14d 后	$3.2 \times 10^{-7} \sim 5.1 \times 10^{-7}$	55~76	

参考文献:

- [1] 王新强,雷元亮,陆志明,王二力.富水砂卵石地层盾构始发端头加固工法研究[J].四川建筑,2021,(04):77-79.
- [2] 赵合全.软弱富水地层大直径盾构始发端头联合加固方法及应用[J].都市轨道交通,2022,(02):130-135+142.
- [3] 周耿峰.复杂条件下盾构端头加固技术[J].低碳世界,2021,(01):179-180.

从表中可以看出,经注浆后地层的压缩模量显著增加,渗透系数明显减少,表明水泥—水玻璃双液浆注浆技术能有效提高富水砂层的稳定性和承载能力。

此外,现场监测数据显示,盾构端头处的地表沉降量也得到了有效控制,与端头外未加固区域相比减少了约 60%,同样验证了加固方案的有效性。

6 结论与展望

6.1 结论

本文通过对富水砂层环境中小直径盾构端头加固技术研究,认为采用水泥—水玻璃双液浆注浆方案能有效提高盾构施工的安全性和施工效率。文章对比了几类盾构端头加固技术,并深入探讨了注浆加固工艺的设计与参数优化^[3]。

由此可见,水泥—水玻璃双液浆因其凝结速度快、充填性好以及抗渗性强等特点在富水砂层盾构端头加固中具有较好的效果;从加固机理出发并根据注浆参数优化得出的注浆工艺可以较好地处理富水砂层的渗流现象,保证盾构始发及接收施工稳定性及安全性。

6.2 展望

通过对目前盾构端头加固方法进行比较,提出针对性的水泥—水玻璃双液浆注浆加固方法并运用到实际工程中去,达到了较好的加固效果。但是由于本研究的局限性,以下几个方面仍需深入探究:

- (1) 注浆材料改进:水泥—水玻璃双液浆虽有较好的固结力,但价格较贵,在某些条件下不够稳定。
- (2) 注浆工艺的改善:现有的注浆工艺对端头加固是有效的,但是在实际操作中还存在注浆速度、注浆压力以及配合比的动态调整等问题。
- (3) 加固效果的长期监测:本文中对加固的效果只是做了初步验证,并没有对加固的效果进行长期的检验。

总之,希望今后的工作中可以针对以上问题开展进一步的研究工作,促进小直径盾构端头加固施工技术的进步,更好地指导类似的工程施工建设。