

泥水盾构泥浆泵选型关键参数规律性研究

孙恒¹, 黄新森^{1,2}, 马超¹, 陈少林^{1,2}, 罗利平^{1,2}, 张红伟^{1,2}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040;
2. 中交二航局成都城市建设工程有限公司, 四川 成都 610218)

摘要:为了认清在泥水盾构泥浆泵选型设计时的规律性和差异性,针对现有研究的不足,采用统计分析法,从15个实际工程案例入手,统计了包括开挖直径、隧道长度、穿越主要地层、进排泥的管径、密度和流量在内的17个关键参数,分析在选型设计阶段关键参数之间的规律性和差异性,得到了进排泥的管径、密度与开挖直径的一次线性回归方程,不同地层的进排泥密度选取规律等6点结论,最后将结论成功运用于福州地铁F1线滨海新城站—机场站中间风井泥水盾构区间,研究成果可为今后泥浆泵选型或评估提供新的思路。

关键词:泥水盾构;泥浆泵选型;进排泥;统计分析法;规律研究

中图分类号:U45 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)04-0144-08

Regularity of the key parameters for slurry shield mud pump selection

SUN Heng¹, HUANG Xinmiao^{1,2}, MA Chao¹, CHEN Shaolin^{1,2}, LUO Liping^{1,2}, ZHANG Hongwei^{1,2}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Wuhan Hubei 430040, China;

2. CCCCSHEC Chengdu Urban Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610218, China.)

Abstract: In order to recognize the regularity and differences in the selection and design of the mud pump type for the slurry shield, in view of the shortcomings of the existing research, the statistical analysis method is adopted to analyze the 17 key parameters with regard to 15 field cases, including the diameter of the excavation, the length of the tunnel, the main stratum, pipe diameter, density and flow of inlet and discharge mud. Six conclusions are obtained, such as the first-order linear regression equation between the pipe diameter, density and excavation diameter of inlet and discharge mud, the selection rule of inlet and discharge mud density for different formation; and they have been successfully applied to the ventilation shaft slurry shield section between Binhai Xincheng Station and Airport Station on F1 Line of Fuzhou Metro. The research results can provide new ideas for the selection or evaluation of mud pumps in the future.

Key words: slurry shield; mud pump selection; inlet and discharge mud; statistical analysis method; regularity research

0 引言

我国泥水盾构的开端始于1993年底开建的广州地铁1号线,历经了近30年的发展,泥水盾构隧道技术已成为我国地下工程建设领域不可或缺的关键技术之一^[1]。单就设备而言,泥水盾构与土压盾构最大区别在于,土压盾构是通过土仓内的渣土来稳定开挖面,出渣是通过螺旋输送机和皮带机排至渣土斗,再通过电瓶车 and 门式起重机运送至地面渣土场;泥水盾构则是通过环流系统来稳定开挖

面,同时通过排泥泵直接将渣土泵送至地面泥水站。泥浆泵作为环流系统中的重要输送设备,其选型和设计是否合理,直接影响到盾构机的稳定运行^[2],同时选型成功与否也会对工期、成本和安全造成一定的影响。因此在泥水盾构选型阶段,对于泥浆泵的关键参数选型至关重要。

目前研究学者对泥浆泵选型大致从以下几个方面开展研究:(1)通过对本工程选型计算所需的基础参数进行收集,再通过理论公式计算得到进排

收稿日期:2021-08-20; 修回日期:2021-11-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.04.022

第一作者:孙恒,男,汉族,1986年生,部门经理,工程师,电气自动化专业,长期从事盾构法施工和科研工作,湖北省武汉市东西湖区金银湖路11号,290249517@qq.com。

引用格式:孙恒,黄新森,马超,等.泥水盾构泥浆泵选型关键参数规律性研究[J].钻探工程,2022,49(4):144-151.

SUN Heng, HUANG Xinmiao, MA Chao, et al. Regularity of the key parameters for slurry shield mud pump selection[J]. Drilling Engineering, 2022,49(4):144-151.

泥所需的总扬程量。然后确定进排泥泵的型号及数量,最后再计算得到功率匹配性良好的电机。这也是目前大部分研究学者的选型思路^[2-13]。(2)针对于泥浆泵的某一特性进行针对性研究。如董柏让^[14]、崔建等^[15]对泥浆管路的磨损特性进行了研究分析,提出了相应的管路减磨措施;孔玉清^[16]、陈健等^[10]结合具体工程,对排泥管携渣能力进行了分析,研究结论对于泥浆管路合理选用具有指导意义。(3)研究泥浆泵相关参数之间的内在联系。如秦邦江等^[17]通过管路压力损失分析,计算得到泥浆环流的泵扬程参数;孙桐林^[18]研究泥浆管中的颗粒粒径、密度对管道压力损失的影响;孙宁川^[19]研究流量与盾构掘进速度之间的关系,提出了按照3~4 cm/min的推进速度来选择泥浆流量较为合理且经济;李新月^[20]通过狮子洋隧道工程,分析不同地层特性对进排泥量的影响;赵运臣等^[21]结合武汉长江隧道工程,研究了进排泥泵配置及进浆密度对最大掘进速度的影响。

上述研究成果对于国内泥水盾构的发展有一定的推动作用,但也存在部分问题:(1)目前对于泥浆泵选型采用到的计算公式部分未能统一,存在一定的差异性;(2)即使部分计算公式能够统一,但对于公式中的系数取值也不尽相同,未对系数取值进行进一步说明,对计算公式的研究局限于表面;(3)目前我国大规模使用泥水盾构法修建隧道已有一定的基础,不同工程对于泥浆泵的选取存在一定的差异性和规律性,却未有系统性研究。

鉴于此,笔者从统计的实际工程案例入手,分析泥水盾构泥浆泵选型关键参数的规律性,并对相关计算公式进行优化,旨在为后续工程提供参考。

1 泥浆泵选型规律分析

泥浆泵的选型与设计关系到整个隧道的进展与成败,现将15个随机统计到的已建成的泥水盾构隧道,在施工阶段所选用的进排泥泵关键参数进行列表分析,具体详见表1。主要从开挖直径、隧道长度和穿越主要地层与进排泥的管径、密度和流量等方面进行相关差异性和规律性分析。数据主要来源于已发表的书籍文献和本单位已建工程的相关资料。

1.1 开挖直径与进排泥管内径的关系

进排泥管内径是泥浆泵选型的关键因素之一。大部分工程所采用进排泥管的管径相同,目的是便

于统一采购和使用。在统计到的15个工程案例中,仅有3个案例所使用的管径不同。一般来说,管径过大,会造成管道内的流速过慢,不利于携渣和排渣;管径过小,不利于大颗粒的排出,同时也会加剧管路的磨损。将统计到的15个工程案例中的开挖直径与进排泥管径进行对比分析,绘制成的散点图如图1和图2所示。

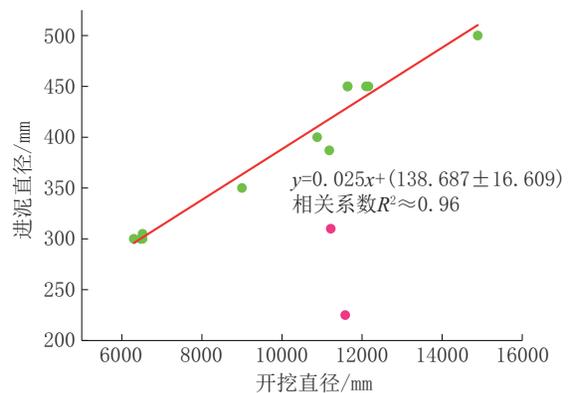


图1 开挖直径与进泥管径的关系

Fig.1 Relationship between excavation diameter and inlet mud pipe diameter

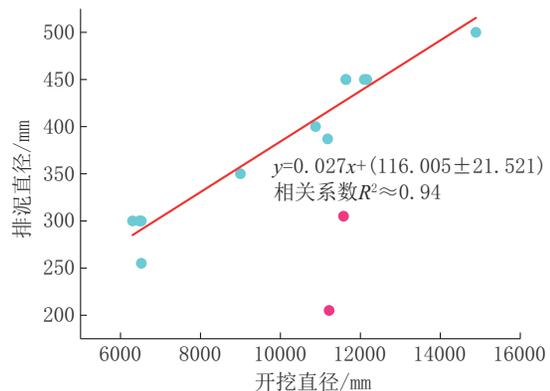


图2 开挖直径与排泥管径的关系

Fig.2 Relationship between excavation diameter and discharge mud pipe diameter

通过对图1和图2进行分析,可以看出:当开挖直径越大,所配套使用的管径一般就会越大,基本呈线性关系,通过拟合线性曲线,得到的进泥管径与开挖直径一元线性方程为: $y=0.025x+(138.687\pm 16.609)$,相关性系数 $R^2\approx 0.96$;排泥管径与开挖直径一元线性方程为: $y=0.027x+(116.005\pm 21.521)$ 。散点图中某些数据波动较大(图1、图2中标红点),可能的原因是存在同一个施工单位在不同

表1 不同工程泥浆泵选型关键参数一览
Table 1 List of the key parameters for mud pump selection for different projects

序号	项目名称	开挖直径/mm	穿越主要地层	隧道长度/m	进泥管径/mm	排泥管径/mm	进泥密度/(g·cm ⁻³)	排泥密度/(g·cm ⁻³)	进泥流量/(m ³ ·h ⁻¹)	排泥流量/(m ³ ·h ⁻¹)	进泥泵型号	排泥泵型号	进泥泵扬程/m	排泥泵扬程/m	进泥电功率/kW	排泥电功率/kW	进泥泵台数	排泥泵台数	参考文献
1	某地铁隧道	6300	泥质粉砂岩	2359	300	300	1.15	1.30	860	970	WARMAN	WARMAN	—	—	235	350	2	3	[2]
2	武汉地铁6号线琴台站—武胜路站	6470	粘土、中砂、强风化泥岩、强风化破碎泥岩	1731	300	300	1.15	1.30	786	904	WARMAN	WARMAN	70	70	315	400	2	3	[3]
3	福州地铁2号线厚庭站—桔园洲站	6520	粗中砂、卵石、粉质粘土	2670	305	255	1.15	1.35	600	720	WARMAN	WARMAN	68.2	69.5	315	435	2	3	—
4	武汉地铁2号线积玉桥站—江汉路站	6520	粉细砂、含砾中粗砂	3100	300	300	—	1.30	—	900	WARMAN	WARMAN	—	75.5	—	400	2	3	[4]
5	武汉地铁2号线12标	—	粉细砂、粉质粘土	2400	355	355	1.15	1.30	700	816	—	—	50	73/35	200	335+	1	2	[5]
6	南水北调穿黄隧洞过河段	9000	砂砾石层、中砂、细砂、粉质粘土	3450	350	350	1.20	1.35	1100	1200	—	—	76	78	—	—	3	4	[6]
7	京沈客运专线望京隧道	10880	淤泥质粉质粘土、粉砂、粉细砂	3660	400	400	1.25	1.35	1530	1810	WARMAN	WARMAN	63	70	630	800	2	4	[7]
8	狮子洋隧道SDⅢ标段	11182	粉细砂、中粗砂、砂砾岩、泥质粉砂岩	4500	387	387	1.10	1.30	1190	1420	WARMAN	WARMAN	58	66/35	315	500+	2	5	[8]
9	上海大连路隧道	11220	粉细砂、粉质粘土、淤泥质粉质粘土	1200	310	205	1.22	1.35	702	880	WARMAN	WARMAN	46.5/15	30/25	250+	132+	2	6	[9]
10	杭州望江路隧道	11640	粉质粘土、粉砂层	1837	450	450	—	1.30	—	1830	—	WARMAN	WARMAN	—	—	—	—	2	[10]
11	孟加拉吉大港卡纳普里河底隧道	12160	(粉)细砂、粉质粘土	2450	450	450	1.15	1.35	2100	2500	WARMAN	WARMAN	60.32	56.8	800	900	2	3	—
12	南京纬三路过江通道	14890	(粉)细砂、圆砾、卵石、中等风化砂岩	4000	500	500	1.15	1.45	2710	3180	WARMAN	WARMAN	—	—	1100	1100	2	3	—
13	殷翔路隧道	11580	粘质粉土层、淤泥质粘土层、砂质粉土	1563	255	305	1.22	1.42	530	720	NS-KH	NS-KH	46	43.7/28	250	250+	1	6	[11]
14	武汉某泥水盾构	12100	粉细砂、泥质粉砂岩、强(中)风化砾岩	3185	450	450	1.10	1.20	—	2800	—	—	—	70	—	1100	—	2	[12]
15	南京地铁10号线中间风井—江心洲站	11640	粉细砂、卵石、圆砾	3600	450	450	1.10	1.35	1588	1903	—	—	—	—	—	—	1	3	[13]

工程重复使用同一批泥浆管路的缘故,目的是节约施工成本,但绝大部分工程基本都在拟合曲线的正常范围内;按照图 1 和图 2 所拟合的公式,可以在选型初期基本确定所采用的管径处于哪个范围较为合理。

1.2 开挖直径与进排泥流量的关系

进排泥流量也是泥浆泵选型的关键因素之一。正常施工期间的进排泥流量不是固定值,而是与掘进速度有关:掘进速度越快,切削下来的渣土就越多,为了保证开挖面的稳定,需要及时将渣土排出,势必就会造成排泥流量的增加,与此同时也增加了开挖面所需的进泥量。目前大部分选型计算中,都会要求使用最大挖掘速度进行选型设计(一般考虑为 60 mm/min),这是较为科学且合理的。将开挖直径与进排泥流量进行分析(图 3、图 4),可以看出:开挖直径越大,所需要的进排泥量一般就会越大,基本呈线性关系;散点图中某些数据波动较大,可能的原因是存在同一个施工单位多次使用同一规格的泥浆泵的缘故,目的是节约施工成本,由于泵的扬程限制,进排泥流量可能会与开挖直径不匹配,但绝大部分工程基本都在拟合曲线的正常范围内;按照图 3 和 4 所拟合的公式,可以在选型初期基本确定进排泥量处于哪个范围较为合理。

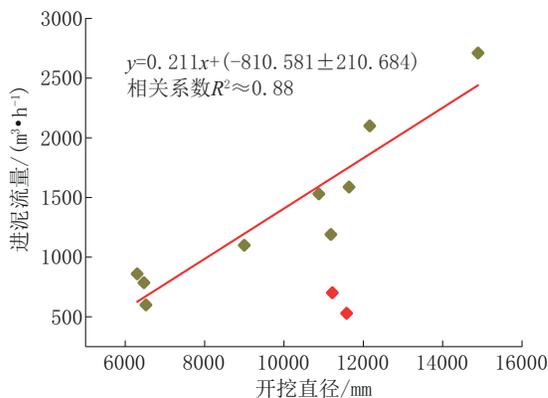


图 3 开挖直径与进泥流量的关系

Fig.3 Relationship between excavation diameter and inlet mud flow

通过上面确定的管径和流量可以初步判断流速是否处于正常范围。

1.3 开挖直径、隧道长度与进排泥电机总功率的关系

当选用的管径和流速确定之后,按照正常选型

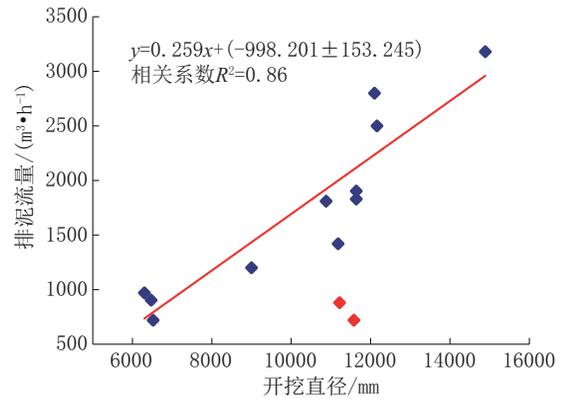


图 4 开挖直径与排泥流量的关系

Fig.4 Relationship between excavation diameter and discharge mud flow

思路,就可以计算得到本工程所需的总扬程量,最后得到每台泵所配套的电机功率。带动泵运转的电机功率是选型的关键因素之一,将隧道长度和开挖直径与总电机功率通过散点图绘制出,如图 5 和图 6 所示,从图中可以看出:开挖直径越大、隧道长度越长,所需要总电机功率就越大;电机功率在设计计算时均会考虑 20%~40% 的富余量,且不同工程考虑的富余量不同。因此即使相同掘进距离且相同开挖直径的工程,其总电机功率也会有一定的偏差;由于收集到的文献资料中对于电机功率描述较少,导致样本数据偏少,对于线性拟合较为困难,但可以在后期数据逐渐累积中逐渐进行线性拟合。

1.4 隧道长度与进排泥泵数量的关系

泥水盾构常用于穿江、湖、海等大型水下隧道

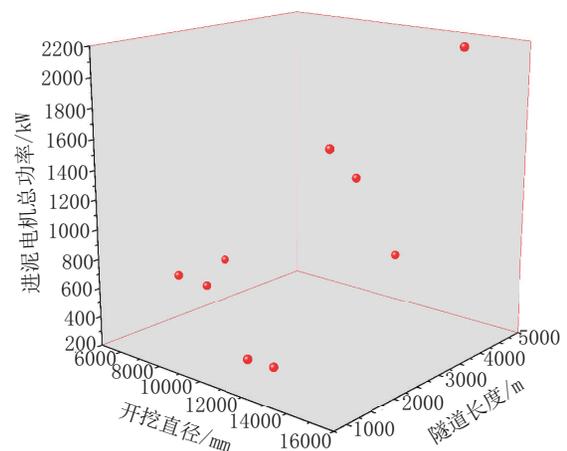


图 5 开挖直径、隧道长度与进泥泵电机总功率关系

Fig.5 Relationship between excavation diameter, tunnel length and total power of the inlet mud pump motor

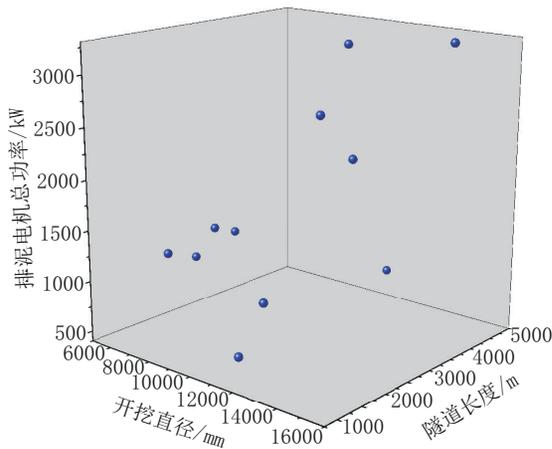


图6 开挖直径、隧道长度与排泥电机总功率关系
 Fig.6 Relationship between excavation diameter, tunnel length and total power of the discharge mud pump motor

中,掘进距离大都超过1 km,最长可达4~5 km。单个进排泥泵难以满足整个隧道贯通,因此需要隔一段距离设置中继泵用于接力。通过若干台中继泵的配合,使每台泵的性能都在允许范围内,既能确保泵送泥浆的稳定,同时也能保证泥浆泵的功效发挥和使用寿命。

不同工程的中继泵安装数量并不固定,主要受制于隧道长度,同时受隧道坡度、埋深、泥水站到始发井口的长度和电机功率等多因素的影响。用随机统计到的15个工程中的隧道长度,除以进排泥泵的数量,并绘制如图7所示的柱状图。

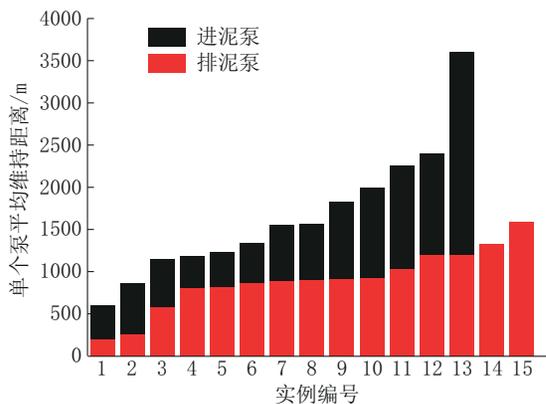


图7 单个泵维持的平均距离
 Fig.7 Average excavation length per pump

从图7可以看出:单个进泥泵的平均维持距离>单个排泥泵的平均维持距离,其中一个原因是排泥泵需要克服井口到地面以及地面到泥水处理站高

度这段扬程损耗,而对于进泥泵来讲,这两段高差刚好是进泥的扬程增益,另一个原因是由于排泥泥浆密度大于进泥泥浆密度;进泥泵的平均维持距离大部分在(1500±250)m之间,排泥泵的平均维持距离大部分处于(1000±100)m之间,按照这一思路,可以在选型初期基本确定所采用的进排泥泵的台数。

1.5 不同地层的进排泥密度选定

进泥密度与不同地层所需建立的泥膜有关,排泥密度则与地层特性、携渣能力等因素有关。整个隧道的泥浆密度并不固定,而是呈正态分布^[14]。选型阶段计算所采用的泥浆密度应该是隧道正常掘进期间所出现的频率最高的密度。但由于选型阶段还未实施,因此大部分工程在进行选型设计时所使用的进排泥密度存在经验性。

将统计到的15个工程中,不同进排泥密度出现的次数进行分析,绘制成如图8和图9所示的柱状图。从图中可以看出:进泥密度大部分选用1.15 g/cm³,排泥密度大部分选用1.3 g/cm³和1.35 g/cm³。对出现进排泥密度为1.15:1.3和1.15:1.35的工程所属地层进行分析,可以发现对于这两个组合所对应的地层情况基本揽括了国内典型的软土地层和复合地层,因此大部分工程在选型计算时可以采用这两类组合进行计算。

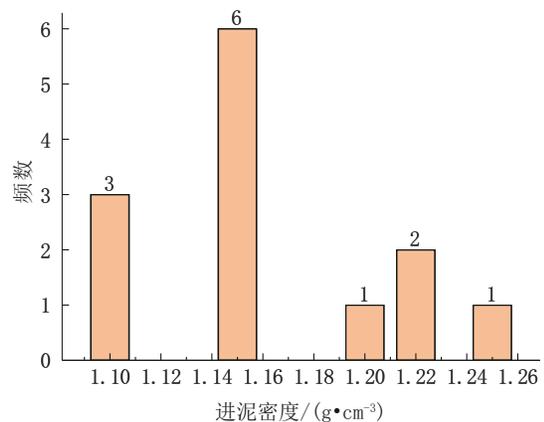


图8 进泥密度出现的频数
 Fig.8 Occurrence frequency of various inlet mud densities

1.6 进排泥泵品牌的选用

在随机统计到的15个工程中,绝大多数都增设了2~3台进排泥所需的中继泵,一方面说明单个进排泥泵的扬程难以满足整个隧道的贯通,另一方面也说明了中继泵是泥水盾构系统中极为重要的附属设

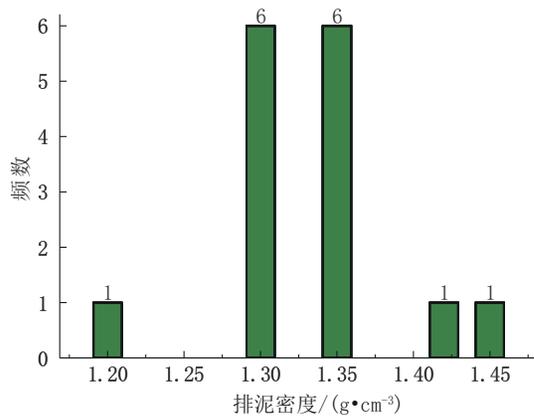


图 9 排泥密度出现的频数

Fig.9 Occurrence frequency of various discharge mud densities

构中能够逐渐崭露头角。



图 10 福州地铁 4 号线某区间使用的 WARMAN 渣浆泵

Fig.10 WARMAN slurry pump used in a section of Fuzhou Metro Line 4

备之一。由于需要在盾构主控室内进行集中控制，因此对中继泵的安全性和系统性要求较高。在随机统计到的 15 个已建工程中，绝大部分都是采用澳大利亚进口的 WARMAN 渣浆泵(图 10)，WARMAN 渣浆泵用途广泛，结构先进，通用化程度高，且运转可靠，使用寿命长，装配维修方便，在国内泥水盾构技术领域享有盛名。一方面说明了目前大多数工程更偏向于选择使用进口的成套设备，另一方面也体现了在泥水盾构施工中一直面临成本高和技术上受制于外企的尴尬境地。随着“十四五”期间国内对于轨道交通行业的大力发展，希望后续国产泵在盾

2 实例分析

2.1 工程概况

福州至长乐机场城际铁路工程滨海新城站—机场站中间风井区间采用 2 台开挖直径 8630 mm 泥水平衡盾构机进行双线施工。区间盾构穿越地层主要为<2-4-5>含泥粉细砂和<3-1-1>粉质粘土。隧道顶部埋深范围 8.68~29.59 m，左线长度为 4065.757 m，右线长度 4072.879 m。线路纵断面呈 V 型坡，最大纵坡 +8.096‰，最小纵坡 +2‰。泥水站安装在中间风井场地，距离始发井口 200 m。简化的地质示意图如图 11 所示。

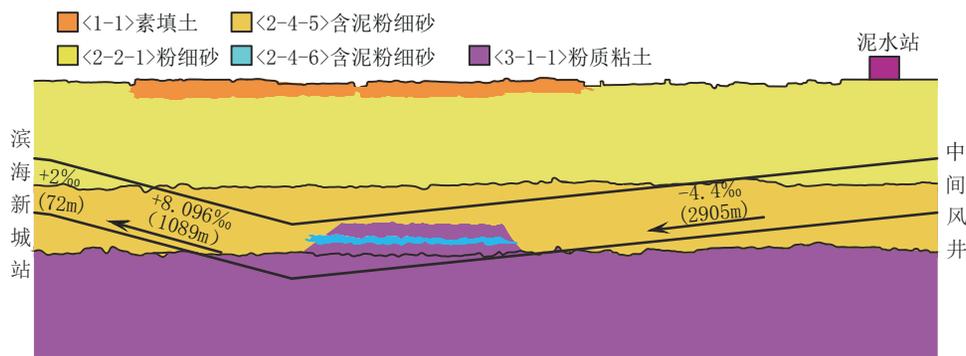


图 11 工程示意图

Fig.11 Project sketch

2.2 泥浆泵选型计算过程

按照上述泥浆泵初步选型思路，可以大致得到本工程应用较为合理的泥浆泵设计参数：

(1)本工程采用的泥水盾构开挖直径 8630 mm，按照图 1 和图 2 中所示的计算公式，进泥管径为 329

mm，排泥管径为 333 mm，考虑统一采购和使用更换的目的，管径取 350 mm 为宜。

(2)按照图 3 和图 4 中所示的计算公式，选型设计计算时进泥流量取值范围为 1010.349±210.681 m³/h，为了便于计算，取 1000 m³/h；排泥流量取值范

围为 $1236.969 \pm 153.245 \text{ m}^3/\text{h}$, 为了便于计算, 取 $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ 。

(3) 通过上述初步设计的流量和管径, 可以得到泥浆在管道内的流速为: 进泥 2.89 m/s 、排泥 3.46 m/s , 处于正常流速 $2 \sim 5 \text{ m/s}$ 之间, 比较符合实际工程需要。

(4) 按照进泥泵的平均维持距离大部分在 $1500 \pm 250 \text{ m}$ 之间, 排泥泵的平均维持距离大部分处于 $1000 \pm 100 \text{ m}$ 之间这一思路, 本工程单洞长度为 4000 m , 考虑每条隧道采用“三进四排”模式, 即 3 台进泥泵、4 台排泥泵较为理想。

(5) 本工程属于软土地层, 按照图 8 和图 9 的思路, 选型计算时的进排泥流量组合取 $1.15:1.35$ 较为合理。

本工程在泥浆泵选型设计时, 通过上述计算初步设计泥浆泵参数, 并采用理论计算验证, 再通过多次联系厂商, 并召开专家咨询会, 最终确定的泥浆泵型号及参数如表 2 所示。

表 2 本工程采用的泥浆泵参数

Table 2 Parameters of the mud pump used for the project

参数名称	具体数值
进泥管径/mm	350
排泥管径/mm	350
进泥密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.15
排泥密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.35
进泥流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	1000
排泥流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	1200
进泥泵型号	WARMAN 10/8FF-AH
单个进泥泵扬程/m	51.07
排泥泵型号	WARMAN 10/8S-GH
单个排泥泵扬程/m	48.28
单个进泥泵功率/kW	315
单个排泥泵功率/kW	435

2.3 应用效果

滨海新城站—机场站中间风井区间左线于 2021 年 9 月 25 日已顺利始发, 并按照该进排泥泵配置进行了装机、调试, 目前运行正常, 未出现滞排、堵管以及超负荷运作等情况产生。表明选型阶段设计较为合理, 后续笔者将继续跟进本区间的泥水环流情况, 并完善相关研究内容。

3 结论与展望

针对现有研究中, 对于泥浆泵选型的差异性和规律性研究不足, 通过统计分析 15 个泥水盾构中泥浆泵选型关键参数, 得到了参数之间的选型规律。同时对传统泥浆泵选型设计计算公式中存在的误区进行了分析。并通过实际案例进行了分析和应用, 为今后泥水盾构泥浆泵选型设计提供了新的思路。

由于统计到的资料数据有限, 在选型阶段进行泥浆泵设计时可能会与理论计算存在一定的偏差。但随着后续施工数据的累积, 相关规律性则会更加突出, 所得到的结论也会更加具备普遍性和适用性。

参考文献(References):

- [1] 朱伟, 钱勇进, 闵凡路, 等. 中国泥水盾构使用现状及若干问题[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(5): 724-735.
ZHU Wei, QIAN Yongjin, MIN Fanlu, et al. The current status and some problems of slurry shield in China[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(5): 724-735.
- [2] 苏志学, 蒲晓波, 贺开伟, 等. 泥水平衡盾构泥浆泵选型设计研究[J]. 装备制造技术, 2015(3): 87-89.
SU Zhixue, PU Xiaobo, HE Kaiwei, et al. Selection and design on slurry pump of slurry shield machine[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2015(3): 87-89.
- [3] 陈文远. 泥水平衡盾构泥水环流系统设计计算研究[J]. 中国设备工程, 2018(2): 86-89.
CHEN Wenyuan. Study on design and calculation of slurry circulation system of slurry balance shield[J]. China Plant Engineering, 2018(2): 86-89.
- [4] 赵旭, 黄平华, 叶忠, 等. 中继泵自主配置技术在泥水盾构施工中的应用[J]. 隧道建设, 2011, 31(5): 634-638.
ZHAO Xu, HUANG Pinghua, YE Zhong, et al. Application of relay pump independent configuration technology in slurry shield tunneling[J]. Tunnel Construction, 2011, 31(5): 634-638.
- [5] 贾金建. 泥水盾构机泥水循环系统选型及应用[J]. 工程机械与维修, 2013(2): 148-150.
JIA Jingjian. Selection and application of slurry circulation system for slurry shield machine[J]. Construction Machinery & Maintenance, 2013(2): 148-150.
- [6] 马凤伟. 泥水管道选择与接力泵位置计算[J]. 河南建材, 2010(5): 45-46, 48.
MA Fengwei. Selection of slurry pipeline and position calculation of relay pump[J]. Henan Building Materials, 2010(5): 45-46, 48.
- [7] 古艳旗. 大直径泥水平衡盾构机泥水循环系统选型[J]. 工程技术(引文版), 2016(2): 234.
GU Yanqi. Selection of slurry circulation system for large diameter slurry balance shield machine[J]. Engineering Technology

- (Citation Version), 2016(2):234.
- [8] 申智杰. 广深港客专狮子洋隧道大型泥水平衡盾构泥水处理系统配置[J]. 建筑机械(上半月), 2011(5):100-103.
SHEN Zhijie. Slurry circuit configuration of major slurry-balanced TBM in GSG Passenger Line Shiziyang Tunnel[J]. Construction Machinery, 2011(5):100-103.
- [9] 段文水. 隧道工程泥水输送系统泥泵的选型应用[J]. 流体机械, 2009, 37(12):49-51.
DUAN Wenshui. The selection of sludge pump applied in the sludge delivery system of tunneling project[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(12):49-51.
- [10] 陈健, 薛峰, 赵合全, 等. 大直径泥水盾构环流系统管路压力损失及携渣特性[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(2):83-91.
CHEN Jian, XUE Feng, ZHAO Hequan, et al. Pipeline conveying resistance and slag carrying characteristics of large diameter slurry shield circulation system[J]. Hazard Control in Tunneling and Underground Engineering, 2020, 2(2):83-91.
- [11] 李怀洪, 彭少杰. $\phi 11.58\text{m}$ 泥水平衡盾构泥水输送系统设计[C]. 上海国际隧道工程研讨会, 2005.
LI Huaihong, PENG Shaojie. Design of slurry transportation system for $\phi 11.58\text{m}$ slurry balance shield[C]. Shanghai International Tunnel Engineering Seminar, 2005.
- [12] 赵国栋. 泥水盾构排浆接力泵接入位置的计算与应用[J]. 铁道建筑技术, 2019(S1):149-153.
ZHAO Guodong. Calculation and application on connection position of slurry discharge relay pump in slurry shield tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2019(S1):149-153.
- [13] 黄波, 李晓龙, 陈长江. 大直径泥水盾构复杂地层长距离掘进过程中的泥浆管路磨损研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(4):490-496.
HUANG Bo, LI Xiaolong, CHEN Changjiang. Study of abrasion of slurry pipe of large-diameter slurry shield boring in complex strata[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(4):490-496.
- [14] 董伯让. 泥水盾构泥浆管路磨损与减振处理技术[J]. 隧道建设, 2016, 36(11):1385-1388.
DONG Borang. Countermeasures for reducing wear and vibration of slurry pipe of slurry shield[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(11):1385-1388.
- [15] 崔建, 徐公允, 陈焱, 等. 清华园隧道泥水环流系统泥浆输送管路磨损分析[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1):1224-1231.
CUI Jian, XU Gongyun, CHEN Yan, et al. Analysis of slurry transportation pipeline wear in slurry circulation system of Tsinghuayuan Tunnel[J]. Modern Tunneling Technology, 2020, 57(S1):1224-1231.
- [16] 孔玉清. 泥水盾构环流系统及排泥管携渣能力分析与应用[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(3):205-213.
KONG Yuqing. Analysis of the circulation system of a slurry shield and the muck carrying ability of a dredging pipe[J]. Modern Tunneling Technology, 2018, 55(3):205-213.
- [17] 秦邦江, 夏毅敏. 泥水盾构泥浆环流系统管路压力损失分析与计算[J]. 液压气动与密封, 2016, 36(7):52-55.
QIN Bangjiang, XIA Yimin. The differential pressure analysis and calculation of pipeline circulation system in slurry shield[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2016, 36(7):52-55.
- [18] 孙桐林. 泥水盾构水平直管压力损失特性研究[J]. 铁道建筑技术, 2017(10):7-10, 49.
SUN Tonglin. Study on pressure loss characteristics of horizontal straight pipe in slurry shield machine[J]. Railway Construction Technology, 2017(10):7-10, 49.
- [19] 张宁川. 泥水盾构主机推进速度与泥浆系统能力的匹配[J]. 隧道建设, 2007(6):7-9.
ZHANG Ningchuan. Matching between thrust speed of main shield machine and capacity of slurry system[J]. Tunnel Construction, 2007(6):7-9.
- [20] 李新月. 复合地层泥水盾构环流关键参数选择探析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(5):771-775.
LI Xinyue. Research on mud transportation parameter selection for slurry shield in composite strata[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(5):771-775.
- [21] 赵运臣, 王光辉, 王超峰. 武汉长江公路隧道泥水盾构排浆泵配置及进浆密度对最大掘进速度的影响分析[J]. 隧道建设, 2008(4):408-411.
ZHAO Yunchen, WANG Guanghui, WANG Chaofeng. Analysis on influence of slurry feeding/discharging pumps and feeding slurry densities on maximum boring advance rates: Case study on slurry shields of Wuhan Yangtze River crossing highway tunnel[J]. Tunnel Construction, 2008(4):408-411.

(编辑 周红军)