

文章编号:1673-9469(2022)04-0041-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2022.04.006

# 盾构下穿仑头海高水压粉细砂地层渣土改良试验研究

宋相帅<sup>1,2</sup>, 许超<sup>1,2\*</sup>, 石红兵<sup>3</sup>, 杨志勇<sup>1,2</sup>, 孙恒<sup>1,2</sup>

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040; 3. 中国建设基础设施有限公司, 北京 100029)

**摘要:** 为解决土压平衡盾构穿越高水压粉细砂地层时易喷涌、开挖面塌陷等技术难题, 依托广州地铁12号线下穿仑头海盾构工程, 通过筛分试验、改良剂性能试验、砂层喷涌模拟装置设计及现场工程验证等手段, 对高水压粉细砂地层下土压平衡盾构喷涌防控技术开展研究。试验研究成果: (1) 针对本工程粉细砂地质特性, 确定合理改良剂品种及配比, 优选了膨润土膨水比、膨化时间及掺入比; (2) 基于相似理论, 设计了一套模拟砂层喷涌发生、评价装置, 直观反映不同工作压力下改良剂改良砂样的效果, 为渣土改良试验提供技术支撑; (3) 通过评估喷涌发生装置砂样喷出的流速 $v$ 、水平距离 $\Delta L$ 等参数, 确定了特定级配砂样所需改良剂的相关配比及掺入量, 并形成了防喷涌渣土改良实施方案。结合实际盾构穿越仑头海砂层运用效果, 指导现场膨润土改良参数控制, 验证了膨润土相关参数及喷涌模拟装置可靠性, 避免了盾构穿越富水砂层喷涌风险。

**关键词:** 土压盾构; 高水压; 粉细砂; 渣土改良; 喷涌

**中图分类号:** U455

**文献标识码:** A

## Experimental Study on Improvement of Residual Soil in Silty Fine Sand Stratum with High Water Pressure in Luntouhai Under Shield

SONG Xiangshuai<sup>1,2</sup>, XU Chao<sup>1,2\*</sup>, SHI Hongbing<sup>3</sup>, YANG Zhiyong<sup>1,2</sup>, SUN Heng<sup>1,2</sup>

(1. CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd. Wuhan, Hubei 430040, China; 2. Transportation Industry Transportation Infrastructure Intelligent Manufacturing Technology R & D Center, Wuhan, Hubei 430040, China; 3. China Construction Civil Infrastructure Corp. Ltd, Beijing 100029, China)

**Abstract:** In order to solve the technical problems of gushing and collapse of excavation surface when the earth pressure balance shield passes through the silty fine sand stratum with high water pressure, this paper studies the gushing prevention and control technology of earth pressure balance shield under the silty fine sand stratum with high water pressure by means of screening test, modifier performance test, sand layer gushing simulation device design and field engineering verification. Test and research results: 1) according to the geological characteristics of silty fine sand of the project, determine the reasonable variety and proportion of modifier, and optimize the bentonite swelling water ratio, expansion time and mixing ratio; 2) Based on the similarity theory, a set of device for simulating the occurrence and evaluation of sand gushing is designed to intuitively reflect the effect of modifier on sand samples under different working pressures, so as to provide technical support for residue soil improvement test; 3) By evaluating the velocity  $v$  and horizontal distance of sand sample ejected from the gushing device  $\Delta L$  and other parameters, the relevant proportion and mixing amount of modifier required for specific graded sand samples are determined, and the implementation scheme of anti gushing residue improvement is formed. Combined with the actual application effect of shield tunneling through Luntou sea sand

收稿日期: 2022-04-01

基金项目: 中建股份科技研发计划资助(CSCEC-2019-Z-19); 湖北省高端外国专家项目(2021EJD012)

作者简介: 宋相帅(1993-), 男, 湖北武汉人, 硕士, 工程师, 主要从事盾构隧道方面研究。

\* 通讯作者: 许超(1988-), 男, 湖北孝感人, 硕士, 高级工程师, 主要从事轨道交通及大直径盾构相关研究工作。

layer, guide the on-site bentonite improvement parameter control, verify the reliability of bentonite related parameters and gushing simulation device, avoid the gushing risk of shield tunneling through water rich sand layer.

**Key words:** earth pressure shield; high water pressure; silty fine sand; residue improvement; gush

近年来,盾构穿江越海工程日益增多,在一定水头压力作用下盾构穿越强透水地层越来越普遍,极易造成盾构机出现不同程度喷涌现象<sup>[1]</sup>。喷涌现象高发于粉细砂、中粗砂地层、砾石、卵石、断裂带岩层等地层,由于没有足够多的黏土物质,地下水与进入密封仓内的固体物质不能揉合成一体,在密封仓内就形成“水是水,渣是渣”的状态,严重影响施工进度,甚至出现上覆地层过大的沉降。

目前,国内外常用喷涌处理方法为渣土改良及盾构螺旋机加设防喷涌结构。宁小平<sup>[2]</sup>结合福州地铁1号线富水岩层,分析了正常状态下盾构设备出现喷涌现象的可能性;朱自鹏<sup>[3-5]</sup>以兰州地铁1号线盾构区间为依托,通过渣土改良试验和数值模拟,开展高水压砂卵石地层下土压平衡盾构防喷涌研究;韩锋<sup>[6]</sup>针对福州地层土性、富含承压力水特点,建立水压力传递理论模型,分析出影响喷涌变量;叶晨立<sup>[7]</sup>以福州地铁1号线上藤站—达道站区间为背景,开展渣土改良室内及现场试验,确定了土压平衡盾构穿越高水压高渗透性地层渣土改良综合解决方案;刘琦<sup>[8]</sup>结合实际工程情况,采用对应技术分析喷涌发生因素,并采取对应措施实现喷涌控制技术;胡长明等<sup>[9]</sup>针对穿越砂层的盾构施工进行了渣土改良试验,通过对比改良前后渣土抗剪强度、渗透性及塌落度,得到了合理的膨润土用量及泥浆掺入比;赵宗智<sup>[10]</sup>针对土压平衡盾构施工过程中喷涌灾害的预警问题,提出建立考虑施工过程影响的渣土水头分布模型的研究方法;文斌等人<sup>[11-15]</sup>重点分析富水砂层下盾构渣土改良及喷涌控制相关技术,获得了相应的渣土改良参数,提出了防止喷涌的一些参数建议。通过对相关文献进行分析发现,渣土改良中评价改良效果主要以渣土渗透系数、塌落度等为指标,

尚无室内试验真实模拟渣土改良后喷出效果,且无合适的评判标准,导致渣土改良实际运用效果判断具有滞后性。

本文以广州地铁12号线下穿仑头海富水砂层段为工程背景,结合改良剂改良砂层机理及室内试验,设计了一套喷涌发生、评价装置,确定了高水压粉细砂地层的渣土改良配比方案,为渣土改良效果提供了直观评判,为类似工程提供经验借鉴。

## 1 工程概况

广州地铁官洲站—仑头站盾构工程,区间长1.4 km,最大坡度为29.5‰。采用土压平衡盾构施工,开挖直径6.7 m,管片外径6.4 m、内径5.8 m。盾构下穿仑头海于210~280环穿越全断面粉细砂地层,80~210环、280~350环部分穿越富水粉细砂地层,最大水压0.42 MPa,地层以粉细砂、中粗砂为主,颗粒级配一般,地层工程与水文地质特征如表1所示。场地内主要为孔隙潜水,含水层主要为砂层。该工程是连接官洲生物岛与仑头的重要枢纽线,同时下穿仑头海等重要河流,工程挑战与意义重大。

渣土改良放喷涌试验所用砂样取自类似地层130环<2-2>、<2-3>混合砂样,试验砂样制备A、B、C、D等4组,同时结合地勘资料对<2-2>、<2-3>进行分析,含水率为40%,对取出砂样烘干后进行筛分实验,得到其级配曲线如图1所示。

通过对图1试验砂样颗粒级配分析可知,砂样的不均匀系数 $C_u$ 约为2.6,曲率系数 $C_c$ 约为3.1。通过比较试验砂样不均匀系数 $C_u < 5$ ,且曲率系数 $C_c > 3$ ,表明砂样级配不良,易导致掘进中细颗粒被地下水带走形成涌水通道,造成喷涌现象。

表1 地层工程地质及水文地质特征

Tab. 1 Engineering geological and hydrogeological characteristics of stratum

层号	名称	工程特征	水文特征	渗透系数/( $m \cdot d^{-1}$ )
<2-2>	粉细砂、淤泥质粉细砂	松散-中密,成分以石英及长石为主,含少量云母及贝壳碎屑,级配差	以粉细砂为主,含少量黏粒,中等透水	5.000
<2-3>	中粗砂、淤泥质中粗砂	稍密-中密,成分以石英及长石为主,含少量云母及贝壳碎屑,级配一般	以中粗砂为主,含少量黏粒,中等透水	8.500

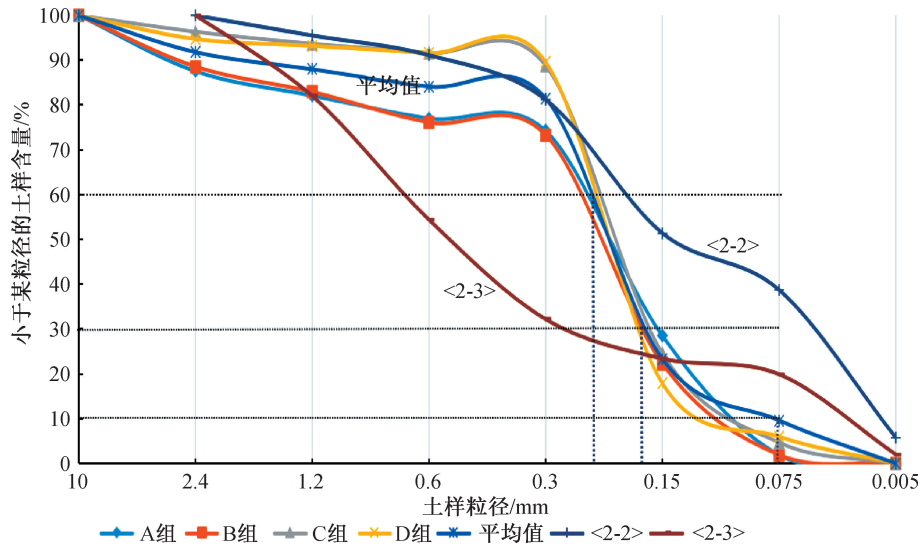


图1 试验砂样颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle grading curve of test sand sample

## 2 砂层喷涌及改良剂改良机理

### 2.1 喷涌发生机理

喷涌发生原理<sup>[1]</sup>:盾构开挖面上水压力过高,渣土本身不具止水性,难以将土体中水体按照输送水体和土体一起排出盾构机。较大流量的渗流水经过压力舱和螺旋排土器后其压力水头没有递减到和零相接近的范围。渗流水在输送至出口的瞬间,由于前方隧道内部临空,且处于无压状态,渗流水在忽然增大的压力下带动正常输送的砂土喷涌而出。

喷涌发生条件:排土器自身压缩效应和排土闸门可以抵 10 kPa ( $H_2=1$  m) 的水压力和  $3 \text{ cm}^3/\text{s}$  的渗流量,水压力和渗流量中任一指标低于这两值,认为不发生喷涌;两个指标同时超出以上两个标准,视为喷涌发生;若排土口水流量  $Q>4 \text{ cm}^3/\text{s}$  且水压力  $P_w>20 \text{ kPa}$  (即  $H_2>2$  m) 时,认为发生严重喷涌。

### 2.2 改良剂改良机理

膨润土属于膨胀蒙脱石粘土矿物,具有较高膨胀性和较低导水率,与级配一般的砂土混合后,膨润土会形成蒙脱石颗粒包裹着石英颗粒链,连接锁定砂性土颗粒,形成一套互相咬合的低渗透性颗粒系统。当自由水接触到土体后,砂土颗粒与膨润土形成的链锁系统可以吸收并阻隔自由水分,且膨润土颗粒水化后均有润滑作用,可以改善土体流塑性。

高分子聚合物一般以碳氢元素为主,构成分

子长链,大多可溶于水或与水反应,常用的改良剂如羟甲基纤维素(CMC)、高吸水性树脂等。高吸水性树脂可吸收土中自由水,形成树脂类凝胶颗粒填充土体间隙,起到改善土体流塑性的作用;CMC 溶于水后可极大提高水的粘性,该类材料具较长分子链,通过分子链间的结合、拉扯作用,可增加粘性,将分散的砂土颗粒紧密地拉扯包裹在一起,降低砂土孔隙率。

## 3 渣土改良剂选择

为解决土压盾构穿越富水粉细砂地层易出现喷涌问题,渣土改良试验需实现:(1)改善土仓渣土的渗透性能,避免开挖面因排水固结而带来较大的地表沉降或坍塌事故;(2)降低土仓渣土及开挖面土体的内摩擦角,使渣土对刀具的磨损进一步减少,对刀盘扭矩进一步降低;(3)改善砂性土层的流动性,避免盾构推进时产生喷涌情况,同时防止盾构停机土仓内渣土离析沉淀,使刀盘重新启动扭矩增大,损害盾构设备。

### 3.1 膨润土改良剂配比

试验优选了广州恒运红钠土、浙江安吉苑丰膨润土两种钠基膨润土改良材料,试验选用不同膨水比进行膨润土浆液基础试验。结合两种膨润土泥浆性能测量情况,考虑到膨润土粘度对砂层的适配性,选定红钠土膨水比为 1:7 及安吉膨润土膨水比 1:4 两种比例继续开展性能测试,其不同膨化时间下比重、粘度试验如图 2、图 3 所示。

分析表明,膨水比 1:7 的红钠土比重明显小

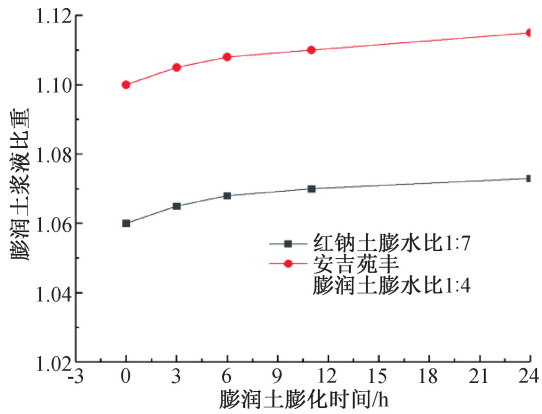


图2 不同膨化时间下比重对比曲线图

Fig. 2 Comparison curve of specific gravity under different expansion time

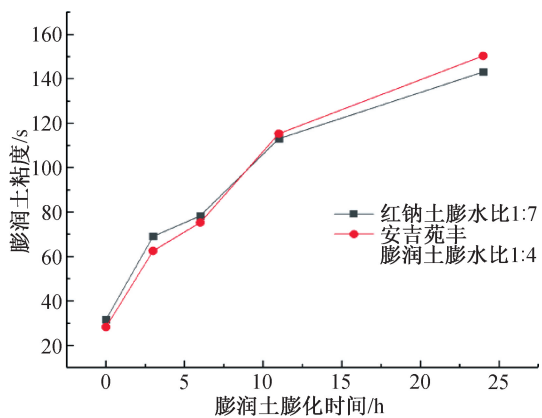


图3 不同膨化时间下粘度对比曲线图

Fig. 3 Viscosity comparison curve under different expansion time

于膨水比 1 : 4 安吉膨润土,但两者在相同膨化时间下,粘度变化趋势基本一致,且两者的粘度值较为接近。

### 3.2 高分子聚合物配比

试验优选了 2 种高分子聚合物改良材料,对不同配比条件下材料性能进行了试验,试验指标主要包括比重、粘度、胶体悬浮率以及 pH 值,测试所用高分子材料如图 4 所示。

通过试验可知,1#高分子聚合物在浓度为 8 : 1 000 时加入泥浆搅拌开始出现挂丝,手挑后有一定的黏手效果;2#高分子聚合物在浓度为 6 : 1 000 时加入泥浆搅拌开始出现挂丝,手挑后黏手效果不明显,且加入高分子聚合物后会出现离析状态,因此后续不考虑加入高分子聚合物进行喷涌试验。

### 3.3 膨润土泥浆优选

通过对膨润土材料及高分子聚合物材料进行性能参数对比分析,结合材料运用成本,保证既定



图4 试验选用的两种高分子聚合物

Fig. 4 Two kinds of high molecular polymers selected in the test

改良效果的前提下,选择浙江安吉苑丰膨润土作为砂层防喷涌试验的改良材料,开展砂层喷涌模拟试验,进而评价膨润土材料的配比方案。

## 4 砂层防喷涌试验研究

### 4.1 防喷涌试验装置

为能较为精确地还原现场盾构螺旋机在穿越易喷涌地层的喷涌现象,基于相似理论进行模型试验,对盾构机土仓、螺旋机进行一定比例结构缩放,设定体积放缩比例在 10 000 : 1 左右,如图 5 所示。

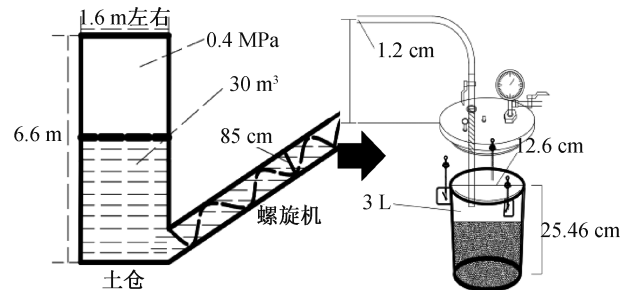


图5 试验装置设计原理

Fig. 5 Design principle of test device

通过简易装置测量不同喷射距离,实现了实验室喷涌试验的可操作化,进而评判膨润土改良喷涌的效果,试验装置如图 6 所示。

本装置试验原理:利用外部空压机对装有渣样压力罐进行加压,压力控制参照实际工程进行施加,待装有渣样压力罐内压力稳定后,打开压力罐的排浆阀。罐内渣样在工作压力 0.42 MPa 作用下会喷射出一定距离,选取不同改良参数下渣样喷射最远点为基准点位,获取不同参数下渣样喷射距离及出口端速度,进而优选膨润土掺入比、膨化时间及膨水比等参数范围,现场渣土喷涌模拟试验如图 7 所示。

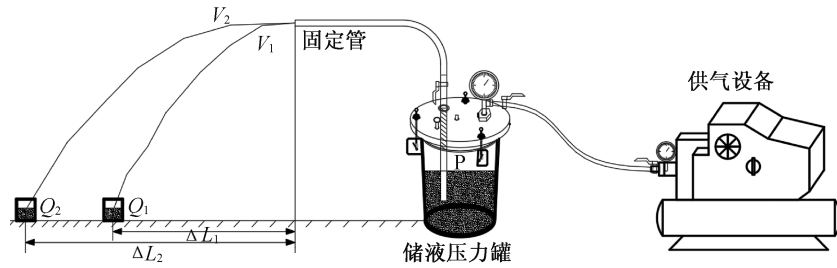


图 6 渣土喷涌模拟装置

Fig. 6 Slag gushing simulation device



图 7 现场试验情况

Fig. 7 Field test

本渣土喷涌模拟装置有益效果:(1)使得土压平衡盾构渣土改良防喷涌效果转换为试验可操作性、可评判性的数据参数;(2)便于对改良剂改良地层防喷涌的效果进行直观评价,提供盾构渣土防喷涌改良效果评价指标;(3)可测试不同压力下不同改良剂对渣土防喷涌的改良效果,具有较高的普适性。

#### 4.2 膨润土掺入比

膨润土掺入比是表征膨润土浆液改良砂层消耗量的重要指标,直接影响现场材料成本及渣样改良效果。本组试验通过设置不同的膨润土泥浆掺入量来验证喷涌试验的喷射效果,其中设置膨润土泥浆掺入比为 2.67%、5.35%、8.02%、10.69% 及 13.37% 进行喷涌试验,试验工况如表 2 所示,试验结果如图 8 所示。

表 2 膨润土掺入比试验工况

Tab. 2 Test conditions of bentonite mixing ratio

参数	工况				
	1	2	3	4	5
膨润土 泥浆体积/mL	50	100	150	200	250
砂样体积/mL	1 870	1 870	1 870	1 870	1 870
膨润土掺入比/%	2.67	5.35	8.02	10.69	13.37
喷射距离/cm	268	240	190	165	185

试验表明在相同工作压力下,随着膨润土泥浆掺入比的增加,渣样喷射出口至落点距离先逐渐减

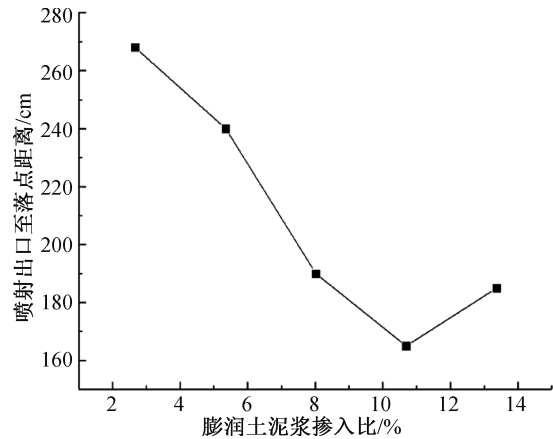


图 8 不同膨润土泥浆掺入比

Fig. 8 Different bentonite slurry mixing ratio

小后增加,主要原因是由于在掺入比小于 10.79% 时,膨润土泥浆对砂样起到成团包裹作用,整体摩阻力增加,导致喷射距离降低;当掺入比高于 10.79% 时,膨润土泥浆占比较大,成团包裹作用基本饱和,再加入膨润土泥浆会增大渣样的润滑效果,导致渣样喷射距离增加,建议膨润土泥浆掺入比为 10%~12%。

#### 4.3 膨润土膨化时间

膨润土膨化时间反映的是膨润土吸水饱和程度,直接影响其粘度等参数。本组试验通过设置不同的膨润土泥浆膨化时间来验证喷涌试验的喷射效果,其中膨润土泥浆的膨化时间分别选择为 0、1、2.5、4.5 及 6.5 h 进行喷涌试验,膨化时间利用六速旋转粘度计测量的粘度指标来反映,试验工况如表 3 所示,试验结果如图 9 所示。

试验表明,在相同工作压力下,随着膨润土泥浆粘度的增加,渣样喷射出口至落点距离先逐渐减小后增加,主要原因是由于随着浆液膨化时间的增加,浆液的黏附效果增强,携渣裹挟能力增加,但当膨化时间足够大时,浆液膨化基本完成,相应的黏附效果等不会进一步提升,同时考虑到实际工程运用工期等影响,建议该种膨润土泥浆膨化时间不低于 1 h,粘度 50~70 s 为宜。

表3 膨润土膨化时间试验工况

参数	工况					
	1	2	3	4	5	6
膨化程度	无膨润土	未膨化	膨化 1 h	膨化 2.5 h	膨化 4.5 h	膨化 6.5 h
膨润土泥浆体积/mL	0	150	150	150	150	150
砂样体积/mL	1 870	1 870	1 870	1 870	1 870	1 870
膨润土粘度/s	0	34	56	83	125	166
喷射距离/cm	223	205	185	195	165	195

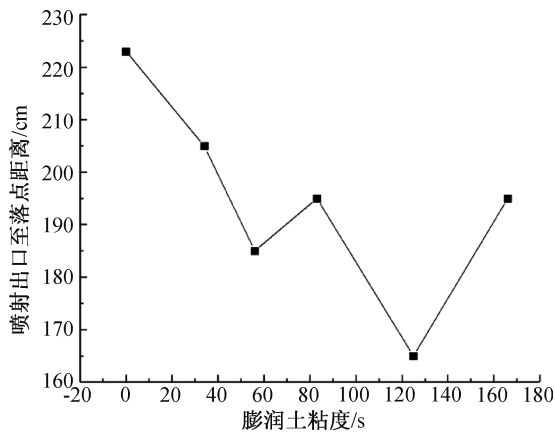


图9 不同膨润土泥浆膨化时间

Fig. 9 Expansion time of different bentonite slurry

#### 4.4 膨润土膨水比

膨润土膨水比反映膨润土与水的比值。本组试验通过设置不同膨润土泥浆膨水比来验证喷涌试验的喷射效果,其中膨润土泥浆膨水比为1:3、1:4、1:5、1:6及1:7进行喷涌试验,试验工况如表4所示,试验结果如图10所示。

表4 膨润土膨水比试验工况

参数	工况				
	1	2	3	4	5
膨水比	1:3	1:4	1:5	1:6	1:7
膨润土泥浆体积/mL	150	150	150	150	150
砂样体积/mL	1 870	1 870	1 870	1 870	1 870
膨润土粘度/s	58.73	55.97	54.55	46.43	45.15
膨化时长/h	0	1	4.5	8	9
喷射距离/cm	175	185	185	195	205

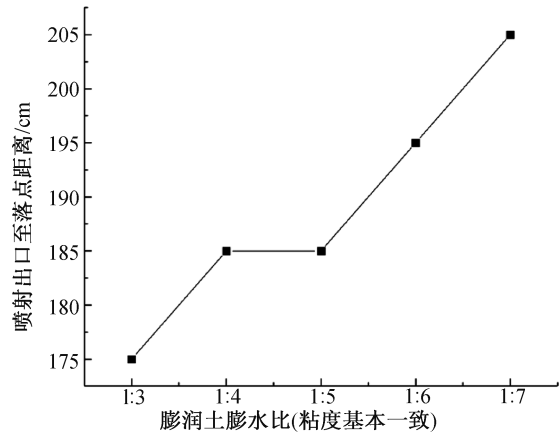


图10 不同膨润土泥浆膨水比

Fig. 10 Bentonite water ratio of different bentonite slurry

试验表明,在相同工作压力下,在保证膨润土浆液粘度基本一致时,随着膨润土膨水比的增加,喷射出口至落点距离逐渐增大,表明膨润土材料在不同膨水比中成团包裹砂粒的效果不同,建议膨润土膨水比为1:4。

#### 5 工程实际运用效果

结合砂样颗粒级配分析、改良剂优选试验及喷涌模拟试验,制定了盾构下穿仑头海160环~265环富水粉细砂层时的防喷涌渣土改良实施方案,确定了膨润土为主、高分子聚合物为辅的渣土改良方案,采用的膨润土材料为浙江安吉苑丰钠基膨润土材料,膨润土掺入比为10%~12%、膨化时间50~70 s、膨水比1:4,高分子聚合物视掘进情况而定。

现场经过技术人员相关论证后,通过了该项富水粉细砂层时的防喷涌渣土改良实施方案。结合实际运用效果分析,如图11至图13所示。图11反映砂层区段内出渣情况,该地层在运用本试

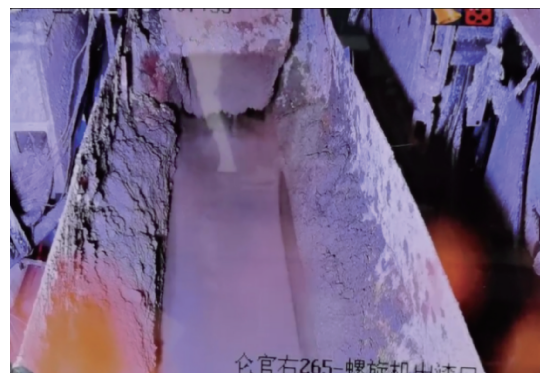


图11 盾构出渣情况

Fig. 11 Shield cutter head speed

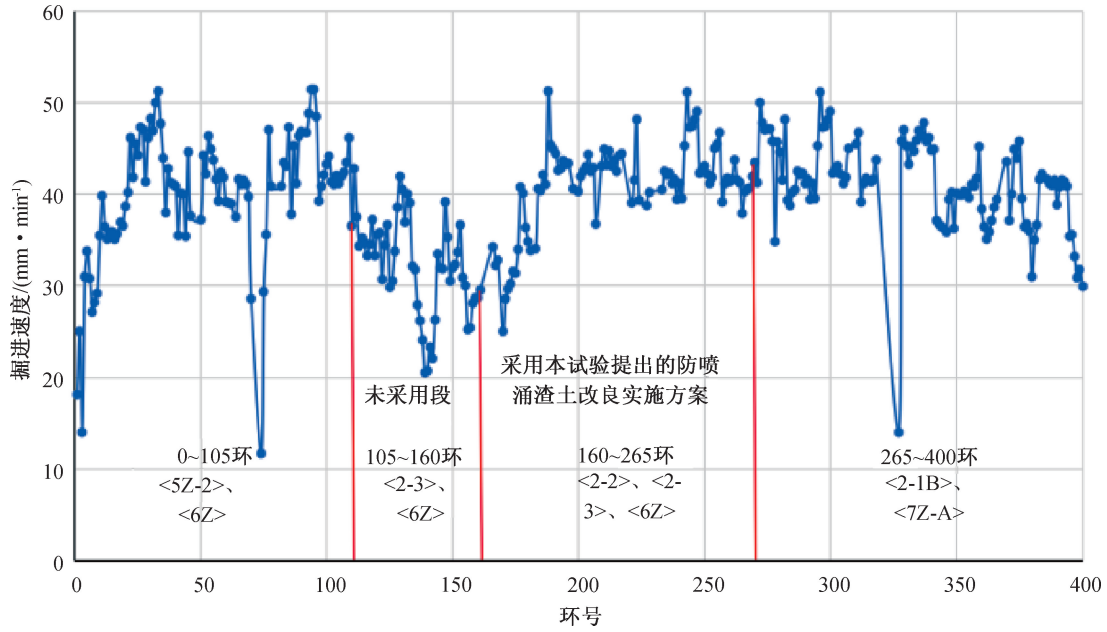


图 12 盾构掘进速度

Fig. 12 Shield tunneling speed

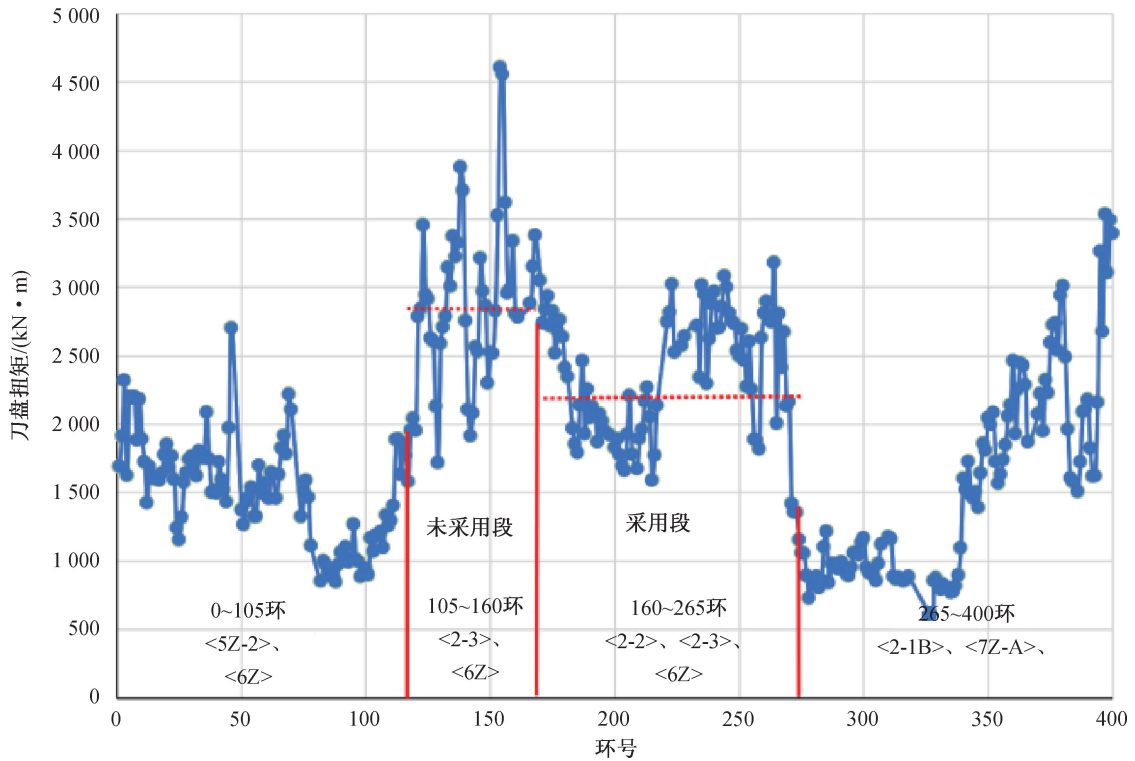


图 13 盾构刀盘扭矩

Fig. 13 Torque of shield cutterhead

验膨润土浆液参数后,渣样整体排出顺畅,且膨润土浆液成团携砂效果较好,未出现喷涌现象,同时有效地解决了盾构停机土仓内渣土离析沉淀,保障了施工安全,验证了本富水粉细砂层时的防喷涌渣土改良实施方案及膨润土渣土改良参数的可

行性。

图 12、图 13 对比盾构掘进前 400 环盾构穿越不同地层的掘进参数,其中<5Z-2>、<6Z>、<2-2>、<2-3>、<7Z-A>、<2-1B>分别为砂质黏性土、全风化混合花岗岩、粉细砂、淤泥质中粗砂层、混合花

岗岩强风化层、淤泥质土,在160环~265环砂层地段加入上述配比方案膨润土浆液后,盾构出渣顺畅,未出现喷涌现象,盾构掘进速度明显提升,由原来30 m/min提升至40 mm/min,并逐渐趋于稳定状态。盾构刀盘的扭矩明显减小,由2 800 kN·m降低至2 200 kN·m,盾构掘进参数整体控制效果良好,为类似工程提供经验借鉴。

## 6 结论

本文以广州地铁12号线下穿仑头海穿越粉细砂层段为工程背景,通过砂样颗粒级配分析、改良剂优选试验、喷涌模拟试验及现场应用效果验证,得出如下结论:

1)富水粉细砂地层渣土改良,建议采用钠基膨润土,质量比为1:4,膨化时间不低于1 h,粘度建议值为50~70 s左右,膨润土泥浆掺入比为10%~12%。

2)针对现有砂土改良效果评价方法的局限性,设计了一套简便、实用的土压平衡盾构模拟喷涌发生装置,真实再现了渣样在特定工作压力下喷涌现象,实现了不同工作压力下不同改良剂对渣土防喷涌改良效果的模拟测试。

3)结合本土压平衡喷涌模拟发生装置,设计了一套防喷涌渣土改良效果的评价标准,通过渣样喷涌距离 $\Delta L$ 、喷口处速度 $v$ 等指标直观反映了改良剂改良砂土效果。

4)通过现场盾构穿越仑头海实际运用效果,验证了本喷涌模拟装置和评价标准的可靠性以及渣土改良方案的合理性,解决了本项目盾构穿越富水砂层易发生喷涌的难题,也为后续类似工程提供经验借鉴。

## 参考文献:

[1]朱伟,秦建设,魏康林.土压平衡盾构喷涌发生机理研

究[J].岩土工程学报,2004(5):589-593.

- [2]宁小平.富水地层土压平衡盾构防喷涌施工技术[J].福建建材,2016(4):85-88.
- [3]朱自鹏.砂卵石地层高压条件下土压平衡盾构防喷涌研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [4]张淑朝.兰州地铁低含砂率强渗透性砂卵石降低土压平衡盾构扭矩及防喷涌研究[D].北京:北京交通大学,2018.
- [5]魏文义.土压平衡盾构加气排水防喷涌技术研究[J].铁道建筑技术,2021(2):38-42.
- [6]韩锋.含砾砂土地层中土压平衡盾构施工喷涌发生的主要原因分析及防治措施[J].福建建材,2016(5):84-85.
- [7]叶晨立.高压高渗透砂性地层土压平衡盾构施工渣土改良技术研究[J].隧道建设(中英文),2018,38(2):300-307.
- [8]刘琦.富水砂层地铁施工的土压平衡式盾构机喷涌控制技术[J].中国设备工程,2019(8):174-176.
- [9]胡长明,崔耀.土压平衡盾构施工穿越砂层渣土改良试验研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2013,45(6):761-766.
- [10]赵宗智,崔明.考虑施工过程的土压平衡盾构喷涌预警研究[J].北京交通大学学报,2020,44(6):1-7.
- [11]支斌.富水砂层土压平衡盾构喷涌机理与渣土运移规律研究[D].山东:山东大学,2021.
- [12]丁彦杰.高压富水砂层土压平衡盾构的土体改良技术研究[D].北京:中国矿业大学,2020.
- [13]李昌.富水砂层地铁施工中的土压平衡式盾构机喷涌控制技术[J].建筑技术开发,2018,45(22):28-29.
- [14]宁士亮.富水砂层盾构渣土改良技术[J].铁道建筑技术,2014(3):86-90.
- [15]朱海军,周明洋.富水砂层地铁施工中的土压平衡式盾构机喷涌控制技术[J].建筑施工,2018,40(1):100-102.

(责任编辑 周雪梅)