

DOI: 10.11779/CJGE201611009

泥水平衡式盾构模拟试验系统的研制与应用

齐 春¹, 何 川^{1*}, 封 坤¹, 汤 印¹, 王 维¹, 夏炜洋²

(1. 西南交通大学交通隧道工程教育部重点实验室, 四川 成都 610031; 2. 中铁二局股份有限公司, 四川 成都 610032)

摘 要: 为了探究泥水盾构水下掘进控制和泥水平衡机理等问题, 在调研国内外模型盾构设备的基础上确定泥水盾构的基本参数和工作模式, 研制出泥水平衡盾构模拟试验系统, 包括模型箱、盾构机总成、推进机构、液压动力系统、操作系统、深冷装置等主要部分。该系统可对最高 100 m 水头条件下泥水平衡盾构施工的主要过程进行模拟, 可较真实地再现泥水平衡盾构掘进过程中泥膜的动态形成过程, 从而阐明水土压力平衡的机理等关键技术问题, 并可为泥水平衡盾构的设计和控制提供重要参数。以砂卵石地层为例配制相似地层和泥浆, 并进行盾构试掘进, 对设备的功能性进行验证, 并初步研究了泥水盾构掘进过程中地表位移的时空变化规律和地层中泥膜的形态。结果表明, 由于刀盘无超挖且地层开挖后直接由盾壳支撑, 土体移动受到限制, 地层变形主要由开挖导致的应力释放产生。排渣装置长度较长, 可暂存的渣土量多, 使得盾构通过前地表沉降随顶推力和刀盘、排渣装置转速的增大而增大; 盾构通过后的地表沉降则由于盾壳与土体的摩擦作用有所减小。在盾构刀盘前方, 泥浆渗入地层的范围大致关于盾构轴线对称, 泥膜形态呈倒扣的“锅底”形分布, 其范围约占刀盘外径的 20%~43%。

关键词: 隧道工程; 泥水平衡盾构; 模拟试验系统; 地表沉降; 泥膜形态

中图分类号: TU451; U25; U45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)11-1999-10

作者简介: 齐 春(1988-), 男, 博士研究生, 研究方向为现代盾构隧道技术与设计理论。E-mail: qichun0304@126.com。

Development and application of simulation test system for slurry balance shield

QI Chun¹, HE Chuan¹, FENG Kun¹, TANG Yin¹, WANG Wei¹, XIA Wei-yang²

(1. MOE Key Laboratory of Transportation Tunnel Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. China Railway Erju Co., Ltd., Chengdu 610032, China)

Abstract: To study the excavation control and the balance mechanism on the cutting face during underwater excavation of slurry balance shield (SBS), the basic parameters and working modes of SBS are determined after investigation of model shield machines worldwide, and then a simulation test system for SBS is developed. The system mainly consists of model box, shield machine assembly, thrusting system, hydraulic power system, operation system and cryogenic unit. It can simulate the main procedure of SBS excavation under the maximum water head of 100 m, and can really reproduce the dynamic formation process of the slurry membrane during excavation, which is critical for illustrating the mechanism of water-earth pressure balance and may provide important parameters for the design and control of SBS. The similar stratum and slurry are prepared based on the sandy gravel strata, and an excavation test is then carried out to verify the function of the simulation system. The space-time variation laws of the ground surface settlements as well as the slurry membrane morphology during shield excavation are also analyzed. The results show that because the cutter head has no over-excavation and the stratum is directly supported by the shield shell, the soil movement is restricted, and the stratum deformation is mainly caused by the stress release caused by the excavation. As the mud discharge device is long, which enhances the temporary storage capacity of mud, the ground surface settlements before shield passing through increase with thrust force, cutter head speed and speed of mud discharge device. After the shield passing through, the ground surface settlements decrease due to shield-soil friction. The slurry permeation region in front of the cutter head is approximately symmetric about the shield axis, and the slurry membrane morphology is a flip "pot" shape, whose dimensions are about 20% to 43% of the external diameter of the cutter head.

Key words: tunnel engineering; slurry balance shield; simulation test system; ground surface settlement; slurry membrane shape

0 引 言

泥水平衡式盾构地层适应性广, 开挖面稳定性高,

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1361210, 51578462, 51208432)

收稿日期: 2016-01-08

*通讯作者 (E-mail: chuanhe21@163.com)

在国内外地铁、铁路、公路、市政和水电隧道修建中得到广泛应用^[1]。日本东京湾横断公路隧道、荷兰“绿色心脏”隧道、国内的上海长江隧道、狮子洋隧道等大断面水下隧道均采用泥水平衡式盾构修建。除此之外,国内尚有数量众多大型跨江海软土隧道采用或拟采用泥水平衡盾构工法施工^[2-3]。

盾构穿越地层不确定因素较多,工程条件复杂多变,当盾构施工控制参数未能及时调整至与地层条件相匹配时,盾构开挖面就会处于失稳的风险中,甚至会造成灾难,带来严重的经济损失与社会影响。近年来有关泥水盾构施工不当引起的开挖面失稳及其衍生事故时有报道。

泥水平衡盾构掘进过程中,泥水舱中的泥水进入前方开挖地层,泥水颗粒逐渐填充地层空隙并不断降低地层渗透性,从而逐步在开挖面上形成泥膜,阻止泥水舱中的泥水和地层中地下水的相向流动,使盾构推进力能够有效作用在开挖面上,维持开挖面稳定。可见,泥水平衡盾构是在流固耦合作用中通过刀盘前方泥膜的生成→破坏→再生→再破坏的过程来实现泥水压对水土压的动态平衡,从而在保证开挖面稳定的条件下实现盾构的不断掘进^[4-5]。研究泥水平衡盾构掘进过程中流固耦合效应影响下泥膜的动态形成过程具有重要意义,可为合理确定泥水盾构泥水压力、注浆压力和顶推力等关键施工参数提供重要参考。

以往关于泥水平衡盾构泥膜的研究多集中于泥浆材料及配比对泥膜性能的影响,以及泥膜对开挖面稳定的影响。Anagnostou 等^[6]分析了泥浆对泥水盾构开挖面稳定的影响,并针对不同的地层条件分别将开挖面的支护介质定义为膜结构模型和悬浮结构模型。Broere^[7-8]认为,开挖面泥膜前后压力差减小导致的泥膜体积增大会使其孔隙比增加,进而增大渗透系数,泥浆会继续渗入地层,导致孔隙水压力增大,泥膜前后压差进一步减小从而进一步增大泥膜渗透性,此过程反复发生最终会破坏开挖面的稳定性。闵凡路等^[9-10]采用自制的泥浆渗透装置,通过测定不同性质的泥浆和地层组合条件下泥浆成膜过程中地层超孔隙水压力和渗透流量的变化情况,明确了影响泥膜分布的因素和泥膜的作用机理。

这些研究所采用的试验装置对实际盾构作了较大简化,多采用筒体一端充入泥水另一端铺滤膜,中段装入模拟地层的材料的模式开展研究,无法考虑泥水盾构动态施工过程中泥浆与地层的流固耦合等相互作用关系,故难免与工程实际存在偏差。国内外相关研究机构也因此研制了一系列泥水平衡盾构模拟试验设备与装置,以期能够开展更精细的研究,如早稻田大

学理工学部森麟^[11-13]教授团队研制出 $\Phi 25\text{ cm}$ 模型泥水式盾构试验装置(图 1),在泥水平衡盾构掘进机理和掘进参数控制的早期研究中发挥了重要作用;程展林等^[14]自制盾构开挖面稳定试验系统设备,以穿黄隧道工程为依托,对泥水盾构施工中泥浆稳定开挖面的机理、泥膜形态和临界压力的确定等问题开展了研究。袁大军等^[15]研制了 $\Phi 20\text{ cm}$ 泥水盾构模型试验装置(图 2),并采用该设备进行了泥水盾构的开挖面土体劈裂和泥水喷发的研究。徐前卫等^[16]研制了可模拟泥水平衡盾构施工的室内模型试验装置,可模拟刀盘开口率、壁后注浆压力等不同影响因素下泥水平衡盾构动态掘进的过程。这些试验装置在泥水平衡盾构开挖面稳定机理和掘进参数控制研究方面发挥了重要作用,但也存在一些不足,如仅可在水压小于 0.5 MPa 条件下进行单向静态掘进模拟,所形成的泥膜为局部的静态泥膜。

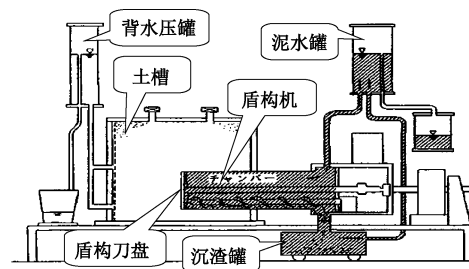


图 1 $\Phi 25\text{ cm}$ 模型泥水式盾构试验装置

Fig. 1 Testing system of $\Phi 25\text{ cm}$ model slurry balance shield



图 2 泥水盾构模型试验装置

Fig. 2 Testing machine of slurry balance shield

本文在广泛调研国内外泥水平衡盾构和模型盾构设备的基础上,确定了泥水盾构的工作模式和基本参数,研制出能够实现 100 m 水头压力下泥水盾构机动态掘进的模拟试验系统,并可对盾构掘进过程中刀盘前方泥膜的整体形态进行观测。选取代表性地层开展了水下盾构隧道的模拟掘进试验,对系统的整体功能进行验证,并在此基础上配制泥浆材料,完成泥膜形成的模拟试验,研究了泥水盾构掘进过程中地层中泥膜的形态。

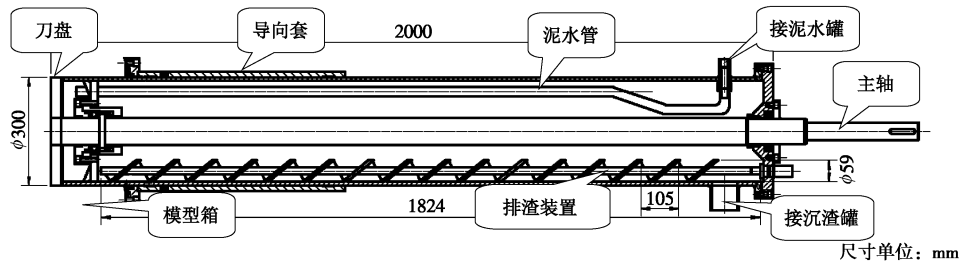


图5 盾构壳体布置图

Fig. 5 Arrangement of shield shell

盾构机主轴采用液压马达驱动,并用减速器调节,既能满足输出扭矩大的要求,又能保证运行速度平稳,从而实现试验中的精细化调节。机体采用可移动的密封结构与模型箱连接,所有旋转部位装旋转轴承,轴承与外部采用旋转密封隔离。

(2) 刀盘

刀盘位于盾构机的最前方,是盾构机的关键部件之一,具有掘削土体、支撑开挖面及搅拌前方土砂等功能,以圆形刀盘最为常见。刀盘的设计主要包括结构型式、刀具布置以及装备扭矩等,由盾构穿越地层条件确定。对于泥水平衡盾构而言,刀盘应能保证泥水能和开挖面充分接触。

常见的刀盘结构型式主要为辐条式和面板式,以及介于二者之间的辐板式。辐条式刀盘开口率大,刀具沿辐条两侧布置。辐条式刀盘掘削扭矩小,易排土,土舱内土压可有效作用到开挖面上,多用于机械式盾构及土压盾构,而对于地下水压力大、易坍塌的土质而言,易喷水喷泥。面板式刀盘属于封闭式刀盘,刀盘开口率在10%~40%之间,面板可直接支承开挖面,有利于开挖面稳定,但在掘削黏性地层时易黏覆面板,对泥水式和土压式盾构均可采用。辐板式刀盘介于辐条式和面板式之间,开口率约为35%~50%。对于本试验系统,由于可模拟较高水压地层,故采用面板式刀盘,如图6,7所示。

对于刀盘扭矩,根据经验公式有

$$T = \alpha_0 \alpha_1 \alpha_2 D_c^3 \quad (1)$$

式中, T 为装备扭矩, D_c 为刀盘直径, α_0 为稳定掘削扭矩系数, α_1 为刀盘支承系数, α_2 为土质系数。

对于实际的泥水平衡式盾构机而言, $\alpha_0 = 9 \sim 18 \text{ kN/m}^2$, 这里取最小值 9 kN/m^2 。

对于中心支承式刀盘, $\alpha_1 = 0.8 \sim 1.0$; 对于中间支承式刀盘, $\alpha_1 = 0.9 \sim 1.2$; 对于周边支承式刀盘 $\alpha_1 = 1.1 \sim 1.4$; 这里取 $\alpha_1 = 1.1$ 。

对于密实砂砾、泥岩而言, $\alpha_2 = 0.8 \sim 1.0$; 对于固结粉砂、黏土而言, $\alpha_2 = 0.8 \sim 0.9$; 这里取 $\alpha_2 = 1.0$ 。

由式(1)计算可得,当刀盘的直径为300 mm时,刀盘装备扭矩为 $T = 0.26 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 。

考虑一定的富余量,刀盘的最大扭矩取 $0.3 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 采用变量泵—变量马达调速方式,刀盘可在 $0 \sim 12 \text{ r/min}$ 转速范围内进行正、反转。

根据施工地层的不同,盾构机一般配备掘削刀具、超前刀具、保护刀具和修边刀具等刀具中的几种,以应对不同的施工条件。考虑到室内试验地层条件简单,组分可控,本系统只配置了掘削刀具,并沿刀盘径向均匀布置,且每一位置对称配置2把刀具,并呈“U”型开口,使得刀盘正反向旋转时均可高效掘削土体,并有利于机体“脱困”。

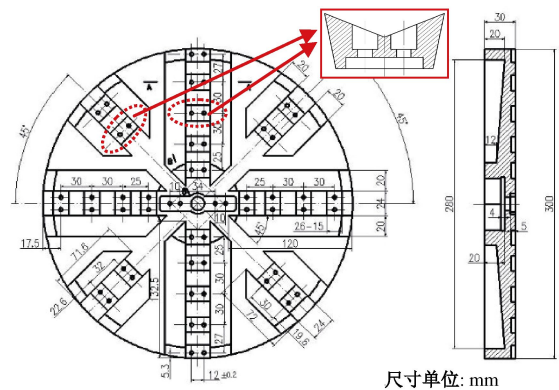


图6 刀盘设计结构型式

Fig. 6 Schematic of cutter head



图7 刀盘实体图

Fig. 7 Cutter head

(3) 排渣装置与沉渣罐

排渣装置的主要功能是把土舱内的掘削土除掉、经排土控制器运至地表。为满足不同地层中掘进时的排渣需求,本试验系统的排渣装置采用类似于轴式螺旋出土器的构造,通过排渣装置将开挖渣土压缩形成

密封土塞, 阻止泥土中的水流出, 保持泥土舱压力平衡^[18]。装置长 1824 mm, 直径 59 mm, 螺距 105 mm, 见图 6。采用不锈钢材料制作, 动力由无级变速电机提供, 最大扭矩 0.05 kNm, 可实现转速 0~25 r/min 无级可调。

排渣装置在盾构壳体内下方沿盾构轴线下方布置, 其尾部通过壳体后下方的管道与沉渣罐相连以将前方掘削土体带至盾构机下方的沉渣罐收集。沉渣罐通过软管与泥水罐连通, 可在泥水罐→进泥管→泥水舱→排渣装置→沉渣罐之间形成泥水-渣土环流, 实现渣土的循环利用。沉渣罐体放置于平行盾构机体主轴的导轨上, 并与盾构壳体刚性连接, 保证二者同步运动。刚性连接设计成可拆卸的导管式, 便于清洗罐体。排渣装置与沉渣罐的布置见图 8。

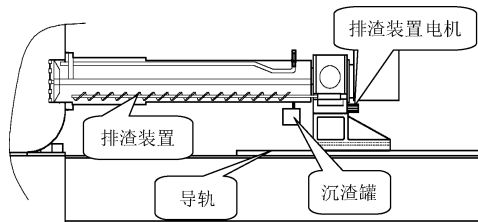


图 8 排渣装置与沉渣罐布置图

Fig. 8 Arrangement of mud discharge device and mucking box

(4) 推进机构

盾构机推力主要用于克服前方的开挖阻力 F_1 和侧面的摩阻力 F_2 。对于泥水盾构而言, 可根据经验公式估算:

$$F_1 = 0.25\pi(q_e + p_w + \alpha)D_s^2, \quad (2)$$

$$F_2 = c\pi D_s L, \quad (3)$$

式中, q_e 为切削土压力, p_w 为地下水压力, α 为防塌压力, D_s 为盾构机外径, c 为土的黏聚力, L 为土中盾构机长度。

对于本系统, $D_s=300$ mm, p_w 取最大值 1 MPa, L 取最大推进行程 800 mm。其他参数取经验值, 即 $q_e=0.02$ MPa, $\alpha=0.05$ MPa, $c=0.03$ MPa, 代入式(2)、(3)可得盾构机的装备推力为 $F_n = F_1 + F_2 = 75 + 22 = 97$ kN。

装备推力取 100 kN, 采用双千斤顶模式。千斤顶采用长行程高精度油缸推进, 推进行程 800 mm, 其布置如图 9 所示。

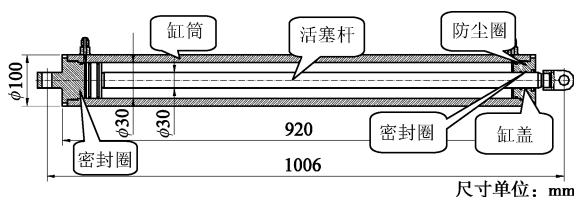


图 9 千斤顶布置示意图

Fig. 9 Schematic of jack arrangement

实际施工中, 千斤顶支撑在后方拼装好的管片环上, 千斤顶进油后顶出活塞, 从而推动盾构机前进。若试验系统也采用此方法实现盾构机的前进, 则需要增设一套反力装置, 增大了试验系统的复杂性。本系统另辟蹊径, 通过盾构机壳体左右两侧对称布置的一对拉杆将千斤顶回缩产生的拉力转化为盾构前进所需的顶推力, 将千斤顶伸出产生的顶推力转化为拉力将掘进完成的盾构机体归位。具体实施如图 9 所示, 千斤顶底座通过法兰与模型箱连接, 耳座与齿轮箱连接。其工作原理为: 千斤顶回油缩回活塞杆, 带动盾构机前进; 千斤顶进油顶出活塞杆, 拉动盾构机后退; 实物如图 10 所示。

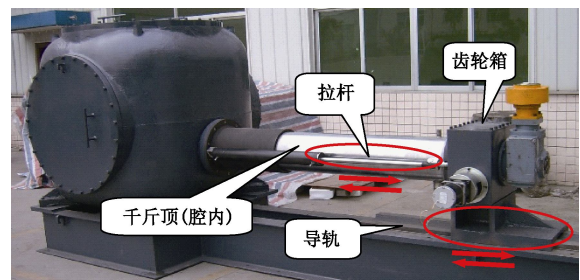


图 10 推进机构实物图

Fig. 10 Photo of thrusting system

(5) 液压动力系统和加压系统

液压动力系统由液压马达驱动液压系统和推进机构（油缸）液压系统组成, 前者用于控制盾构推进力大小, 后者用于控制推进速度。液压动力系统的动力通过高精度稳定器调节, 保证压力稳定输出。推进参数则通过精密调速阀调整流量进行控制。液压动力系统实物如图 11 所示。



图 11 液压动力系统实物图

Fig. 11 Photo of hydraulic power system

加压系统也由两部分组成, 分别为模型箱加压装置和泥水罐加压装置。采用气体加压方式, 高压氮气作为压力源, 通过精密压力表控制压力输出。模型箱顶部预留接口通入高压氮气, 模拟不同水土压力; 泥水罐顶部预留接口通入高压氮气, 模拟不同泥水压力, 如图 3 所示。

（6）操作系统

整个试验系统的操作全部集成到操作台完成，从而简化试验操作，提高效率。操作台可以实现试验系统的启停，并可对盾构机推进压力和掘进速度、刀盘转速和转向、排渣装置的转速等进行实时控制和调整。各掘进参数和模型箱内的温度可实时显示在操作台上的液晶屏上，如图 12 所示。



图 12 试验操作台
Fig. 12 Operation table

（7）深冷装置和测试元件

采用自增压式低温容器输出低温液氮，经模型箱顶板的预留接口进入冻结循环管（采用大比热的铜管制作），冻结管内流动的低温液氮不断将模型箱内土体热量带走，从而使土体冻结，液氮升温气化后通过模型箱上的排气管排出。为加大热交换面提高冻结效率，试验时可根据需要弯成各种形状。当环境温度较高，采用深冷装置无法满足冻结要求或冻结成本过高时，可通过将开挖面前方地层分层挖开的方式测量刀盘前方泥膜在不同位置处的渗透范围。

系统的测试元件主要有位移计、土压力盒、孔隙水压力计和温度传感器等，各测试元件通过模型箱顶板预留通孔连接至箱外的数据采集装置。

2 泥水平衡盾构试验系统掘进试验

为验证泥水平衡盾构模拟试验系统的功能，并初步探索盾构试验掘进参数，为后续复杂模拟试验打下基础，开展了泥水平衡盾构试验系统掘进试验。试验对泥水盾构掘进过程中地表沉降的时空变化规律和刀盘前方泥膜的成膜状态进行了研究。

2.1 泥水与地层土体的配制

（1）泥水配料及配比确定方法

泥水在开挖面上的渗透成膜状态可分为 3 种，即表面吸附聚集膜、无法形成泥膜和渗透填充膜。定义泥水可渗比 n 为地层孔隙直径 L 与泥水有效直径 G 的比值，当 n 变化时，泥水在开挖面上对应不同的成膜状态。对砂、砾石层而言， L 与 D_{15} （地层粒径累加曲线 15%的粒径）、 G 与 G_{85} （泥水粒径累加曲线 85%的

粒径）分别存在一定的对应关系，因此可用 D_{15} 与 G_{85} 之比计算泥水可渗比^[19-20]。

由以上泥水成膜状态与可渗比的关系可知，开挖地层的土质条件对泥水配料起到决定作用。本次试验确定的泥水由膨润土（浆液主体材料）、CMC（羧甲基纤维素钠，增黏剂）、水和乙醇组成。为便于观测，可向泥水中掺入不影响泥膜性能的中性示踪粒子染色剂对泥水进行标识，本试验选用氧化铁粉作为示踪粒子。

泥水配制时，首先根据实际工程所处土质特点，考虑试验条件及模型系统能力，选定几种颗粒材料作为掘进地层的土样，通过土工试验确定各土样的 D_{15} 。其次选定拟用的膨润土，并据土工试验得到相应泥水的 G_{85} 。最后根据预先确定的泥水 n 值计算试验土样的 D_{15} ，并根据各颗粒材料的 D_{15} ，选定 2，3 种按照一定比例进行试配，直到满足要求。

（2）泥水及模拟试验地层配制

泥水盾构多用于地下水丰富、渗透系数高、水压力高及不稳定的地层，因此本文选取透水性较高的砂性土开展模拟掘进试验。

根据前述原则，进行模拟掘进地层的配制。试验条件下，为避免盾构机泥水管堵塞，泥浆浓度不宜过大。因此，参考相关资料，经过综合试验后确定泥浆造浆材料配比（质量比）为膨润土：CMC：水：乙醇=13.02%：0.20%：86.68%：0.10%，并据此确定试验地层的配比。膨润土选用四川省仁寿兴大工贸有限公司生产的“龙泉山牌”300 目钠质膨润土；CMC 选用成都市科龙化工试剂厂生产的产品。

试验地层配制以成都地铁施工中典型的砂卵石地层为模拟对象，主体组分为碎石，砂和黏土用于调节颗粒级配。碎石、砂均产自成都新津金马河，黏土取自成都地铁施工现场。通过土工试验得到 3 种材料的颗粒级配情况，如表 1 所示。

表 1 试验掘进地层配比

Table 1 Proportions of test strata	
配比	地层各组分质量比
配比 1	只含黏土
配比 2	砂：碎石：黏土=5%：90%：5%
配比 3	砂：碎石：黏土=10%：70%：20%

根据表 1 初步确定 3 种不同的组分配比，通过试配可知配比 2 满足试验要求。各配比时地层的可渗比见表 2，最终试验地层配比为砂：碎石：黏土=5%：90%：5%。

2.2 量测项目

（1）盾构机掘进参数

盾构掘进过程中对盾构机推力、刀盘扭矩、转速、排渣装置转速、土体温度、泥水压力等关键掘进参数

进行实时采集,并在系统操作台上同步显示,便于实时掌握盾构掘进状态以便根据需要做出调整。

表 2 各配比时地层的可渗比

Table 2 Groutability ratios of test strata

配比	D_{15}/m	G_{85}/m	$n=D_{15}/G_{85}$
配比 1	0.1757	0.1148	1.50
配比 2	2.0194	0.1148	17.6
配比 3	0.6429	0.1148	5.6

(2) 地表位移

地表位移采用布置在地表的差动式位移传感器量测。沿盾构掘进方向平行布置 3 排位移测点,每排 5 个测点,关于盾构轴线对称布置,如图 13。

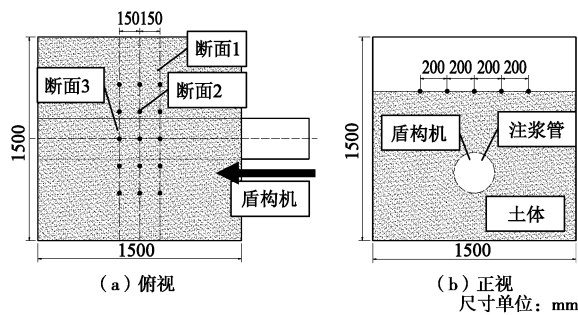


图 13 位移测点布置图

Fig. 13 Arrangement of displacement sensors

(3) 泥浆渗透范围

模型盾构掘进至预定位置时,停止推进,将盾构周围土体挖除,观察刀盘周围泥膜状态,并测量不同位置处泥浆深入土体的距离。

2.3 模拟掘进过程

试验分两组进行:第一组为试掘进,主要验证试验系统的适应性,并对盾构掘进过程中地表沉降的时空变化规律进行了研究;第二组对不同注浆压力下泥浆渗透的范围进行了研究。试验过程如下。

(1) 装土。模型箱内装入配制好的土层,土体表面距离模型箱顶部 40 cm,并作调平处理,以便安装传感器。第一组试验土体沿模型箱纵横向填满,土层范围为纵向×横向×竖向=150 cm×150 cm×110 cm;第二组试验在模型箱内前方固定一透明钢化玻璃板作为前方地层边界,土层范围为纵向×横向×竖向=65 cm×150 cm×110 cm。

(2) 掘进。启动盾构机开始逐步掘进施工,并记录各相关参数。为消除盾构刚启动时掘进参数波动对试验结果的影响,先使盾构掘进一段距离后再对各参数进行测量并记录。对于第一组试验,盾构掘进过程中实时记录地表沉降变化;对于第二组试验,盾构掘进一定距离后停止推进,但保持刀盘旋转,观察刀盘

前方泥膜形成情况。

2.4 成果分析

(1) 泥水盾构掘进引起的地表沉降分析

本组试验通过高压氮气加压系统将水压设为 0.20 MPa;土压可根据土体重度及盾构机体埋深算出,相比水压而言很小,可忽略不计。注浆压力取与开挖面前方水土压力平衡,也为 0.20 MPa。

整个掘进过程分 10 步进行,每个工况对应不同的掘进参数,如表 3 所示。监测结果表明,各工况地表位移曲线形状相似,均近似呈正态曲线分布,最大沉降值位于盾构开挖轴线上方,两侧沉降值递减。为节省篇幅,此处仅对部分监测结果进行分析。

表 3 不同工况对应的掘进参数

Table 3 Excavation parameters of different test conditions

工 况	推进距离 /cm	顶推力 /kN	刀盘转速 /(r·min ⁻¹)	排渣装置转速 /(r·min ⁻¹)
1	47.5	41	8.9	16.5
2	59.7	42	9.6	16.8
3	64.8	49	10.8	20.2
4	69.5	52	11.0	21.8
5	75.0	51	11.1	21.8
6	79.7	51	11.2	21.8
7	85.8	55	11.0	24.6
8	91.0	51	11.2	24.6
9	95.1	49	11.2	24.6
10	102.0	49	11.0	25.0

注:当模型盾构位于初始位置时,刀盘并未位于模型箱体表面处,而是伸出 25 cm,因此盾构机的推进距离可以超过 80 cm。

图 14 为监测断面 1 的地表位移随掘进过程的变化曲线。根据文献[21]的研究成果,盾构推进速度随着刀盘转速和总推力的增大而增大;盾构掘进速度越大,则就会有更多的土被掘削进入土仓;同时,随着排渣装置转速的加大,掘削下来的土更容易被排出,因而单位时间内排土量也跟着提高。相比工况 1~工况 3,工况 4 具有最大顶推力和刀盘及排渣装置转速,意味着相同时间内掘削和排出的渣土量多。此外,本系统排渣装置长度较长,即便渣土未能及时完全排出也可暂存于排渣装置中,因此工况 4 对应的地层沉降最大。文献[22]的研究也得出了类似结论。

在后续掘进过程中,由于本装置直接采用钢制盾构机壳体支撑开挖后的土体,限制了土体移动,刀盘开挖时又无超挖,且土体受盾壳的摩擦作用不断向前、向上运动,导致监测断面 1 的地表沉降量有所减小。

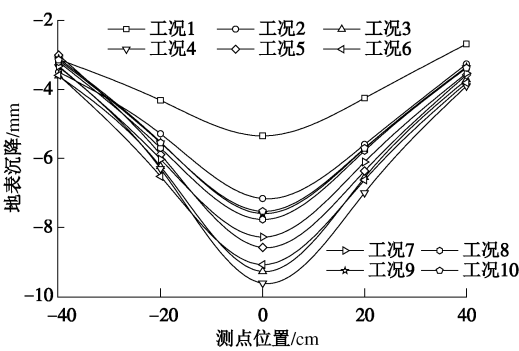


图 14 监测断面 1 各工况地表位移

Fig. 14 Ground surface settlements of 1st section

图 15 表示的是工况 5 时各监测断面的地表位移。可以看出，监测断面 2 处位移最大。其原因为：对于断面 1，盾壳与土体之间的摩擦作用带动土体向前、向上运动，使得盾构刀盘通过后该断面的地表沉降量有所减小；工况 5 时，盾构刀盘正处于断面 2 下方而尚未到达断面 3，开挖扰动对地层的影响显然在断面 2 处比断面 3 的大。由于盾构开挖使地层局部卸载，洞周径向应力突变为零，地层原始应力急速发生重分布，导致地层沉降急剧增大。因此，工况 5 时地表最大位移产生于监测断面 2 处。

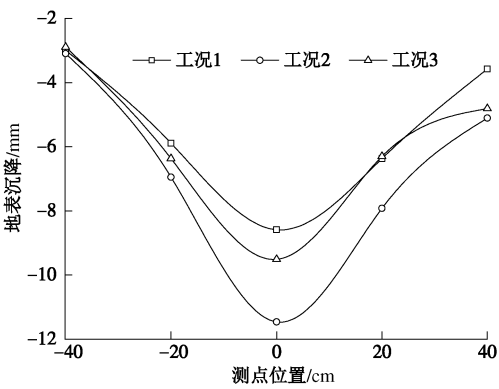


图 15 工况 5 时各监测断面地表位移

Fig. 15 Ground surface settlements under condition 5

(2) 泥水盾构掘进刀盘前方泥膜形态

待模型盾构掘进至预定位置时，停止推进，将盾构周围土体挖除，从而测量刀盘周围不同位置处泥浆深入土体的距离。

泥水盾构施工中泥浆在高压作用下侵入地层形成不同状态的泥膜，因此地层中泥浆的渗透范围不仅与与地层孔隙有关，还与注浆压力有关^[23]。试验分别对注浆压力为 0.20 和 0.22 MPa 时刀盘周围泥浆的渗透范围进行了对比。图 16 所示为刀盘周围泥浆渗透情况。将土体内不同深度处的测试数据插值拟合后，可绘出刀盘前方泥浆渗透范围，如图 17 所示。



图 16 刀盘周围泥浆渗透范围

Fig. 16 Permeation regions of slurry around cutter head

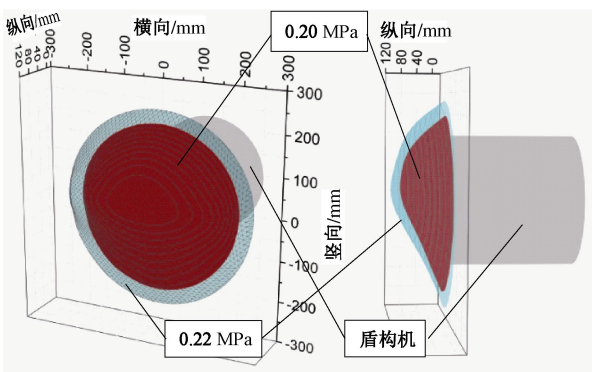


图 17 刀盘前方泥浆渗透范围示意图

Fig. 17 Schematic of permeation regions of slurry in front of cutter head

可以看出，对于本试验所取注浆压力而言，泥浆渗入地层的范围在盾构刀盘前方大致关于盾构轴线对称，泥膜形态呈倒扣的“锅底”形分布。由于注浆管偏盾构机轴线上方设置，故泥浆在刀盘上半部分沿掘进方向渗入地层的距离比下半部分的稍大；而在盾构机竖向，由于重力作用，泥浆在刀盘下方渗入土体中的距离则比上方大，如在 0.20 MPa 注浆压力下，刀盘上、下方沿竖向的最大渗透距离分别约为 5，7 cm，沿横向的最大渗透距离约为 5 cm，约占刀盘外径 20%；在 0.22 MPa 注浆压力下，刀盘上、下方沿竖向的最大渗透距离分别约为 8，10 cm，沿横向的最大渗透距离约为 9 cm，约占刀盘外径 30%。此外，越靠近刀盘中心，掘进过程中刀具对土体的切削破坏作用越小，故刀盘中心位置附近泥浆渗透距离较大，最大渗透距离位于刀盘中心前方，在 0.20 MPa 注浆压力下约为 10 cm，约占刀盘外径的 30%；在 0.22 MPa 注浆压力下约为 13 cm，约占刀盘外径的 43%。

3 结 论

(1) 研制了一种泥水平衡式微型盾构模拟试验系统，包括模型箱、盾构机总成、推进机构、液压动

力系统、操作系统、深冷装置等主要部分。该系统可对最高 100 m 水头条件下泥水平衡盾构施工的主要过程进行模拟, 并真实再现泥水平衡盾构掘进过程中泥膜的动态形成过程。

(2) 利用该试验系统在砂砾石地层中开展了试掘进试验, 成功验证了系统的整体功能。试验对泥水盾构掘进过程中地表沉降的时空变化规律和刀盘前方泥膜的成膜状态进行了初步研究。

(3) 对于本试验系统, 刀盘无超挖且地层开挖后直接由盾壳支撑, 土体移动受到限制, 地层变形主要由开挖导致的应力释放产生。排渣装置长度较长, 可暂存的渣土量多, 使得盾构通过前地表沉降随顶推力和刀盘、排渣装置转速的增大而增大; 盾构通过后的地表沉降则由于盾壳与土体的摩擦作用有所减小。

(4) 泥浆渗入刀盘前方地层的范围大致关于盾构轴线对称, 泥膜形态呈倒扣的“锅底”形分布。最大渗透距离位于刀盘中心前方, 约占刀盘外径的 30%~43%, 而沿刀盘径向, 刀盘外约 20%~30% 处已基本观察不到泥浆渗入。

参考文献:

- [1] FRITZ P. Additives for slurry shields in highly permeable ground[J]. *Rock Mechanics & Rock Engineering*, 2007, **40**(1): 81 - 95.
- [2] 孙 钧. 海底隧道工程设计施工若干关键技术的商榷[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, **25**(8): 1513 - 1521. (SUN Jun. Discussion on some key technical issues for design and construction of undersea tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, **25**(8): 1513 - 1521. (in Chinese))
- [3] HE C, WANG B. Research progress and development trends of highway tunnels in China[J]. *Journal of Modern Transportation*, 2013, **21**(4): 209 - 223.
- [4] 齐 春, 何 川, 封 坤. 考虑流固耦合效应的水下盾构隧道受力特性[J]. *西南交通大学学报*, 2015, **50**(2): 306 - 311, 330. (QI Chun, HE Chuan, FENG Kun. Fluid-solid interaction-based mechanical characteristics of underwear shield tunnel[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2015, **50**(2): 306 - 311, 330. (in Chinese))
- [5] 夏炜洋. 盾构法隧道施工期流固耦合问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012. (XIA Wei-yang. Study on coupled solid-fluid problem of shield tunnel during construction period[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012. (in Chinese))
- [6] ANAGNOSTOU G, KOVÁRI K. The face stability of slurry-shield-driven tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1994, **21**(2): 165 - 174.
- [7] BROERE W. Tunnel face stability and new CPT applications[D]. Delft: Delft University of Technology, 2001.
- [8] BROERE W. Influence of excess pore pressures on the stability of the tunnel face[C]// *Claiming the Underground Space*, ITA. Amsterdam, 2003: 759 - 765.
- [9] 闵凡路, 朱 伟, 魏代伟, 等. 泥水盾构泥膜形成时开挖面地层孔压变化规律研究[J]. *岩土工程学报*, 2013, **35**(4): 722 - 727. (MIN Fan-lu, ZHU Wei, WEI Dai-wei, et al. Change of pore water pressure in soil as filter cakes formed on excavation face in slurry shield[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, **35**(4): 722 - 727. (in Chinese))
- [10] MIN F L, ZHU W, HAN X R. Filter cake formation for slurry shield tunneling in highly permeable sand[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2013, **38**(9): 423 - 430.
- [11] 森 麟, 秋葉芳明. 密閉式シールドにおける粘土性切羽地盤の破壊条件と取り込み土量の支配条件[J]. *トンネルと地下*, 1984, **15**(8)(168): 25 - 29. (MORI Akira, AKIBA Yoshiki. Fluid-solid interaction-based mechanical characteristics of underwear shield tunnel[J]. *Tunnels and Underground*, 1984, **15**(8)(168): 25 - 29. (in Japanese))
- [12] 栗原和夫, 森 麟, 田村昌仁. 泥水式シールドの適正泥水圧に関する実験的研究[J]. *土木学会論文集*, 1989, **6**(11)(409): 37 - 46. (KURIHARA Kazuo, MORI Akira, TAMURA Masahito. Experimental study on the suitable slurry pressure in a slurry type shield[J]. *Journal of JSCE*, 1989, **6**(11)(409): 37 - 46. (in Japanese))
- [13] 森仁司, 栗原和夫, 森 麟, ほか. 泥水式シールドによる砂質切羽地盤の間隙水圧とその発生メカニズム[C]// *土木学会論文集*, 1991, **3**(15): 115 - 124. (MORI Akira, KURIHARA Kazuo, MORI Hitoshi, et al. The mechanism of the increases of the pore water pressure in sandy soils by tunnel driving with slurry type shield[C]// *Journal of JSCE*, 1991, **3**(15): 115 - 124. (in Japanese))
- [14] 程展林, 吴忠明, 徐言勇. 砂基中泥浆盾构法隧道施工开挖面稳定性试验研究[J]. *长江科学院院报*, 2001, **18**(5): 53 - 64. (CHEN Zhan-lin, WU Zhong-ming, XU Yan-yong. Experimental study on stability of tunnel excavation surface in sand foundation by slurry shield method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2001, **18**(5): 53

- 64. (in Chinese))
- [15] 袁大军, 黄清飞, 小泉淳, 等. 水底盾构掘进泥水喷发现象研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(11): 2296 - 2301. (YUAN Da-jun, HUANG Qing-fei, KOIZUMI Atsushi, et al. Study on slurry-water gushing during underwater shield tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(11): 2296 - 2301. (in Chinese))
- [16] 徐前卫, 朱合华, 唐卓华, 等. 可模拟泥水平衡盾构施工的室内模型试验装置及使用方法 [P]: 中国, CN103437771A. 2013. (XU Qian-wei, ZHU He-hua, TANG Zhuo-hua, et al. A laboratory model test equipment for simulating slurry balance shield construction and its application method[P]. China, CN103437771A. 2013. (in Chinese))
- [17] 何川, 张建刚, 苏宗贤. 大断面水下盾构隧道结构力学特性[M]. 北京: 科学出版社, 2010. (HE Chuan, ZHANG Jian-gang, SU Zong-xian. Mechanical characteristics of underwater shield tunnel structure with large cross-section[M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
- [18] 胡国良, 龚国芳, 杨华勇, 等. 盾构螺旋输送机液压驱动及控制系统[J]. 液压与气动, 2004(12): 33 - 35. (HU Guo-liang, GONG Guo-fang, YANG Hua-yong, et al. Hydraulic drive and control system of shield screw conveyor[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004(12): 33 - 35. (in Chinese))
- [19] HE J, VLASBLOM W J. Effects of filter cake on soil cutting in tunneling[C]// Progress in Tunnelling after 2000, Proceedings of the AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress. Milan, 2001: 181 - 188.
- [20] 张凤祥, 朱合华, 傅德明. 盾构隧道[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (ZHANG Feng-xiang, ZHU He-hua, FU De-ming, et al. Shield tunneling method[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [21] 徐前卫. 盾构施工参数的地层适应性模型试验及其理论研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. (XU Qian-wei. Study on the simulated model test of shield machine's working parameters applicable to different strata and its theoretical investigation[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese))
- [22] 江英超. 盾构掘进对砂卵石地层的扰动机理研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014. (JIANG Ying-chao. Study on the soil disturbance mechanism of shield tunnelling in sandy cobble stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese))
- [23] 刘成, 孙钧, 杨平, 等. 泥膜形成与状态划分细观分析及模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(3): 435 - 442. (LIU Cheng, SUN Jun, YANG Ping, et al. Mesoscopic analysis and model test on formation process and state division of slurry membrane[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(3): 2296 - 2301. (in Chinese))