

DOI : 10.16285/j.rsm.2018.1456

粉砂地层中浓泥土压盾构泥膜效应引起的 孔压变化规律试验研究

莫振泽^{1,2}, 王梦恕¹, 李海波³, 钱勇进⁴, 罗跟东², 王 辉⁵

(1. 北京交通大学 土木与建筑工程学院, 北京 100044; 2. 无锡地铁集团有限公司, 江苏 无锡 214000; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 4. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 5. 中铁十七局集团有限公司, 山西 太原 030006)

摘 要:为了减小盾构机在粉砂地层中掘进时对地层的扰动及地表沉降的影响, 针对粉砂地层渗透性大、内摩擦角高的情况, 提出一种新型浓泥土压盾构施工技术, 使用自制的土舱渗透试验装置, 开展了 3 组不同泥浆添加量下混合土中泥浆渗透试验, 研究混合土及地层中孔压的变化, 分析应力的传递规律。基于室内试验结果开展了现场孔压监测试验, 研究泥浆的添加对地层中孔压的影响。研究表明: 泥浆添加量大于 25% 时, 在开挖面表层处中出现泥膜效应; 盾构掘进过程中泥浆添加量越大, 地层中孔压的变化率越小, 当添加量达到 8 m³/环时, 其孔压变化率仅为 25%~45%; 浓泥土压盾构泥膜类型只有渗透型泥膜, 且渗透成膜前伴随泥浆颗粒损失。该研究结果对浓泥土压盾构在实际工程中的应用以及向砂砾石及砂卵石地层的推广具有重要的意义。

关键词: 盾构隧道; 浓泥土压盾构; 渗透特性; 泥膜效应; 粉砂地层; 孔压

中图分类号: TU 46

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2019) 06 - 2257 - 07

Laboratory investigation on pore water pressure variation caused by filter cake effect during slurry-EPB shield tunneling in silty sand layer

MO Zhen-ze^{1,2}, WANG Meng-shu¹, LI Hai-bo³, QIAN Yong-jin⁴, LUO Gen-dong², WANG Hui⁵

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Wuxi Metro Group Co., Ltd., Wuxi, Jiangsu 214000, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 4. School of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 5. China Railway 17th Bureau Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: To reduce stratum disturbance and settlement during shield tunneling in silty sand layer, a new construction technique of slurry-EPB shield was proposed for the silty sand layer with large permeability and high internal friction angle. 3 groups of slurry permeability test were carried out on mixed soils with different slurry additions using the self-made soil chamber penetrating test device. The variation of pore water pressure in mixed soil and stratum, and the distribution rule of pore water pressure were analyzed. Based on the laboratory testing results, in situ pore water pressure was monitored to study the effect of slurry addition on the pore water pressure in the stratum. The effect of filter cake appears on the excavation surface when the amount of slurry added is more than 25%. The larger the amount of slurry added during the tunneling process, the smaller the change rate of pore water pressure in the stratum. The change rate of pore pressure is only 25%-45% when the addition amount reaches 8 cubic meters per ring. Only the type of infiltration cake occurs in case of slurry-EPB shield, and undergoes slurry particles lost before the film formation. The research results have important significance for the application of slurry-EPB shield in practical engineering and extension to sandy gravel stratum.

Keywords: shield tunneling; slurry-EPB shield; infiltration; effect of filter cake; silty sand layer; pore water pressure

1 引 言

目前, 地铁和隧道工程建设过程中, 盾构技术

的应用越来越成熟, 其中土压平衡盾构因其施工过程中占用土地面积少, 适用于大部分地层, 施工工艺相对简单等优点, 在城市地铁工程中应用较多^[1]。

收稿日期: 2018-11-09

第一作者简介: 莫振泽, 男, 1983 年生, 博士, 高级工程师, 博士后在读, 主要从事于隧道与地下工程科研和建设管理工作。E-mail: 93513342@qq.com

而泥水盾构因对地层扰动小,施工过程中地表的沉降小等优点,在越江海底隧道等地层条件较差及对地表沉降要求较高的环境中应用较多^[2]。在海上丝绸之路沿线的国家及地区中,大部分是海相地质或海陆交接相地质,其中砂质地层最为普遍^[3]。盾构机穿越砂地层时,因砂土的内摩擦角较大,刀盘掘进过程中易产生过大的扭矩,压力舱易发生闭塞风险,同时因其高渗透性,螺旋排土器排土过程中易发生喷涌,进一步使得开挖面稳定难以控制,地表沉降变化过大。无锡地铁3号线建设过程中多区间穿越透水砂地层,同时上部有重要的建构筑物,对开挖面压力及地表沉降控制提出很高的要求^[4]。

土压盾构施工时,通过在土舱中加入气泡或膨润土泥浆对渣土进行改良,使土体形成塑性流动状态,防止闭塞及喷涌的情况发生。目前关于渣土改良的研究,多集中于改良后渣土性质方面。郭涛^[5]使用气泡对渣土进行改良,找出气泡改良土达到塑性流动状态时气泡的基本指标及评价方法;魏康林^[6]使用泡沫及膨润土对土体进行改良,研究两种外加剂对土体作用的内在机制,并给出了不同性质的地层使用何种外加剂的建议方法;王海波等^[7]发现改良渣土的等效粒径与其渗透系数呈正相关。这些研究大多都是对土体改良后渣土的性质及状态进行研究,较少有人研究土体改良对开挖面的稳定效果的影响。泥水盾构通过在泥水舱中注入加压泥浆,在表面渗透形成泥膜,通过泥浆压力平衡地层后的土水压力,维持开挖面的稳定。目前关于泥浆渗透成膜方面的研究,多集中在泥浆性质对成膜的影响方面。Watanabe等^[8]认为随着泥浆的密度的增加,泥浆滤失量逐渐减小;Fritz^[9]在高渗透性砂地层试验时发现向泥浆中加入砂、蛭石等可以有效地达到泥浆成膜的要求;韩晓瑞^[10]、闵凡路^[11-12]等发现使用高密度及高黏度的泥浆可以快速形成泥皮型泥膜。这些研究中主要针对泥浆在高渗透性地层中对渗透成膜的影响,但对泥浆在土层渗透过程中孔压变化及成膜方面较少有人研究。

在砂地层中施工时,因土压盾构对地层扰动较大,使得地表产生较大沉降,通过借鉴泥水盾构泥浆平衡开挖面的原理,提出一种浓泥土压盾构技术,在土舱中使用密度较大的泥浆与砂土混合,利用泥水盾构泥膜支护开挖面的原理维持开挖面的稳定,同时利用泥浆对渣土进行改良,达到螺旋排土器排土的效果。该方法与泥水加压盾构相比,提高了渣土排出能力,同时与土压平衡盾构相比,提高了开挖面的稳定控制效果。本文研究的主要问题是能

否在开挖面前方形成泥膜效应,达到维持开挖面稳定的效果。通过在室内进行模型试验研究地层及土舱内应力变化规律,找出维持开挖面稳定的泥浆关键参数,进而在全断面粉砂地层中进行浓泥土压盾构现场试验,研究实际盾构掘进过程中地层孔压的变化规律^[13-14],评价浓泥土压盾构技术的适用性及对开挖面稳定控制的效果。

2 室内试验

2.1 试验材料与试验方法

试验配置泥浆的主要材料为膨润土、黏土、羧甲基纤维素钠(CMC)及水。配制过程中控制泥浆的密度、黏度及泌水率,分别使用1002型泥浆比重秤、苏氏漏斗黏度计和1000 mL量筒对泥浆的密度、黏度和24 h泌水率进行测试,泥浆的基本性质如表1所示。

参考钱勇进等^[15]设计的试验装置,通过增设一个橡皮膜组成的气囊组件,改进为土舱渗透试验装置,加压方式为平面加压,装置由一个有机玻璃柱、加压设备及滤水量收集系统组成。有机玻璃试验柱高为90 cm、内径为9 cm,侧壁设有6个孔压测量孔,并接上孔压传感器,测孔的位置及测孔距离底层表面的距离如图1所示。试验玻璃柱顶部用法兰盘进行密封,外接加压控制设备,可控制压力范围为0~0.6 MPa。试验柱底部设有排水口,外接滤水收集系统,可测量并记录地层试验过程中的滤水量变化。

室内试验于现场试验室中进行,通过室内渗透试验获得现场用泥浆参数后,进一步开展现场试验。试验时,先在试验柱底部装入粒径为2~5 mm的中粗砂1 cm高,作为试验滤层防止底部排水孔淤堵;然后在滤层上装入高30 cm的试验用粉砂,该粉砂为现场采回砂样,粉砂的力学性质如表2所示,清洗烘干后过0.25 mm土工筛后制得,其中粒径0.1~0.25 mm的颗粒占24%,粒径0.075~0.1 mm的颗粒占37%,粒径<0.075 mm的颗粒占39%。通过分层压实的方法控制地层干密度,从试验柱底部排水口缓慢注入清水对地层进行饱和;将配制的泥浆分别按照粉砂质量的15%、20%、25%的添加量与粉砂进行混合后,均匀装入20 cm高混合土于试验柱中;放入定制的圆柱型橡皮膜,用密封圈固定于法兰盘底座上,盖好法兰盘盖,施加10 kPa压力排空橡皮膜与试验柱侧壁间的空气后,彻底密封法兰盘,并对试验装置进行加压,并打开底部排水孔,测量地层与混合土层中孔压的变化,试验依次施加3级

压力，分别为 50、100、200 kPa，模拟地层在不同土舱压力作用下孔压变化情况。

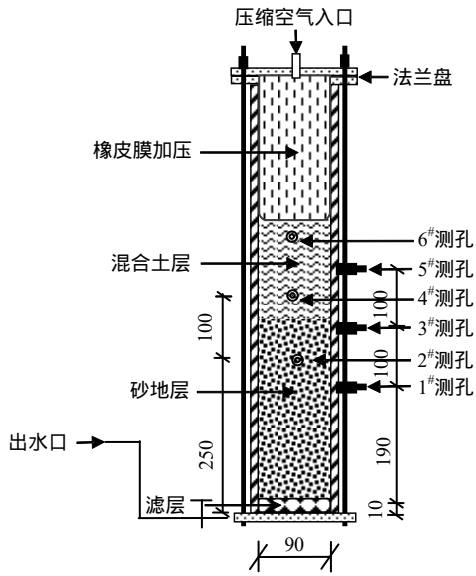


图 1 试验装置图 (单位: mm)

Fig.1 Diagrammatic sketch of test apparatus(unit: mm)

表 1 试验泥浆物理参数

Table 1 Physical parameters of the testing slurry

密度 / (g/cm ³)	漏斗黏度 /s	24 h 泌水量 /mL	d ₈₅ /μm	C _u
1.20	40	1	56	9.1

注: d₈₅ 为通过百分比为 85% 时对应的泥浆颗粒粒径; C_u 为不均匀系数。

表 2 粉砂的物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical parameters of the silty sand

密度 / (g/cm ³)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)	渗透系数 / (cm/s)	泊松比
1.92	3	32.4	3.5×10 ⁻³	0.28

2.2 试验结果与分析

不同添加量的泥浆与砂土混合后，地层与混合土层交界处的孔压变化出现较大的差异。以混合土层底部 4#测孔的孔压变化结果进行分析，如图 2 所示。可以发现，当泥浆添加量为 15% 时，随着压力的增大，混合土层中孔压快速消散，孔隙水快速通过排水孔流出，此时施加在混合土层上的总应力由混合土层及地层中的有效应力来平衡，因而认为该工况下盾构开挖面处产生的超静孔压将快速消散至地层，周边土体因应力平衡状态变化而产生扰动。当泥浆添加量为 20% 时，混合土层中的孔压并未完全消散，其中有一部分消散并转化为有效应力，但还有大部分超静孔压存在于混合土层中，因此，作用于混合土层上的总应力由孔隙水应力及有效应力

平衡，此时泥浆在压力作用下渗透进入地层孔隙，封堵地层中的孔隙，形成一层低渗透性的土层，这种低渗透性的土层与泥浆在地层渗透形成泥膜的效果相似，因此认为在开挖面及地层中产生泥膜效应^[12]，这一试验现象与钱勇进等^[15]在砂卵石地层中的试验结论一致。该工况下掘进过程中产生的超静孔压由于泥膜效应的存在，大部分仍存在于开挖面前方，因此，对周围土体的扰动较小。当泥浆添加量为 25% 时，混合土层中产生的超静孔压全部存在于混合土层中，并没有消散至地层中，此时认为在地层中形成一层致密的渗透泥膜，产生的泥膜效应更加明显。该种工况下盾构开挖面产生的超静孔压几乎没有消散，对周围地层的扰动最小。

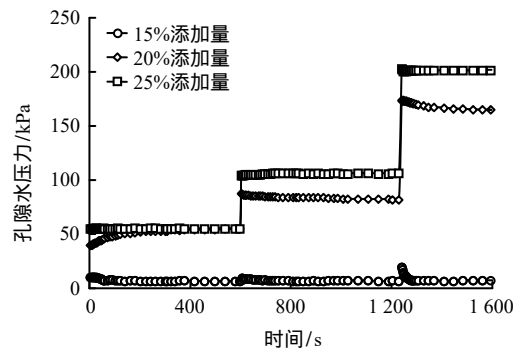


图 2 混合土层中孔压变化曲线

Fig.2 Dissipation curves of pore water pressure in the mixed ground

3 现场试验

3.1 依托工程概况

(1) 地质条件

无锡地铁 3 号线永乐东路站 - 金海里站区间盾构由永乐东路站始发，线路出永乐东路站后以小半径 400 m 曲线段转入长江北路，后直行进入金海里站。区间长度约 852.76 m，其中主要穿越富水砂层，占总盾构区间线路长度 50% 以上，最大覆土深度为 15.1 m，最小覆土深度为 9.5 m。隧道穿越区间地层主要为 Ⅰ黏质粉土、Ⅱ层粉砂、Ⅰ层粉质黏土、Ⅰ层黏土，隧道地质总坡面图如图 3 所示。场地地下水丰富，潜水稳定水位埋深在地面下 0.78 ~ 1.50 m 左右，地下水主要接受大气降水的入渗补给，同时接受沿线地表水、自来水的渗漏补给。地下水径流条件良好，盾构穿越粉砂层渗透系数在 3 m/d 左右。穿越区间含有微承压水，含水层赋存于 Ⅰ黏质粉土、Ⅱ粉砂层中，其隔水顶板一般为 Ⅰ黏土、Ⅱ粉质黏土，隔水底板为 Ⅰ粉质黏土、Ⅰ黏土、Ⅱ

粉质黏土，主要补给来源为潜水和地表水。地层基本物理力学性质如表 3 所示。

(2) 盾构选型

本工程根据上述地质条件等要求，选用直径为

6.44 m 的土压平衡盾构机，盾体直径为 6.39 m，刀盘最大功率为 630 kW，刀盘最大推力为 42 500 kN，最大扭矩为 6 200 kN·m，刀盘开口率为 35%，设计最大掘进速度为 80 mm/min。

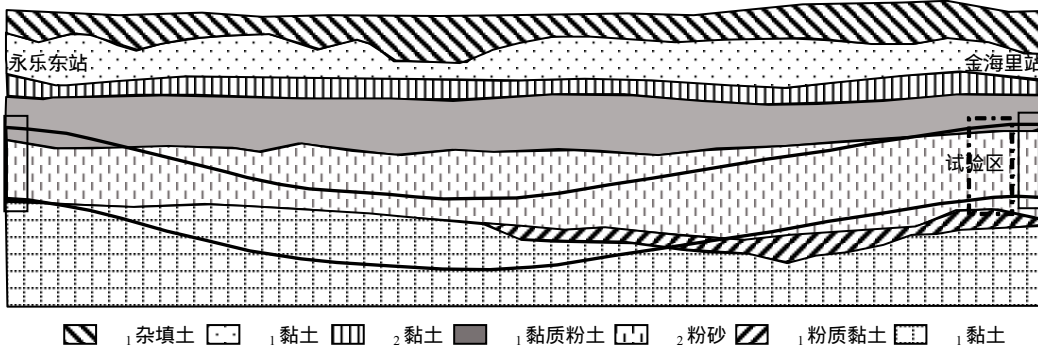


图 3 地质剖面图

Fig.3 Geological section map

表 3 地层基本物理力学性质
Table 3 Main physical and mechanical property of the stratum

土层代号及名称	重度 $\gamma / (\text{kN}/\text{m}^3)$	孔隙比 e	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^\circ)$	渗透系数 $K / (\text{cm}/\text{s})$
1 黏土	20.0	0.720	58.6	17.4	2.90×10^{-7}
2 粉质黏土	19.3	0.824	29.6	17.8	1.40×10^{-5}
1 黏质粉土	19.2	0.808	10.5	30.8	3.20×10^{-4}
2 粉砂	19.2	0.802	5.7	32.4	3.52×10^{-3}
1 粉质黏土	19.3	0.833	25.1	16.1	4.60×10^{-6}
1 黏土	20.3	0.670	60.1	17.8	6.30×10^{-7}

3.2 现场试验方案

(1) 试验内容及试验方法

基于室内试验的研究结果，选取无锡地铁 3 号线盾构段接收端前 670~680 环范围内的全断面砂层作为现场试验段，因盾构机土舱中无孔压监测设备，难以测量孔压变化，因此以盾构开挖面前方地层中孔压变化作为现场研究对象。试验段主要分为 2 个区域，其中 673~675 环为正常未加泥掘进区，676~679 环为添加泥浆试验区，盾构机在试验段掘进过程中，通过预先埋设的孔压计监测孔压的变化情况，试验段地质剖面如图 4 所示。

(2) 泥浆添加方案

根据现场土压平衡盾构机的泵送能力和管路的泵送功率，考虑到粉砂地层的渗透性大、含水率高的特点，试验泥浆添加方案设计为先掘进 2 环（676 环、677 环）管片过程中注入 4 m^3 /环的泥浆，之后的 2 环（678 环、679 环）管片时注入 8 m^3 /环的泥浆，泥浆添加方案如图 5 所示。使用的泥浆材

料为南京钙基膨润土及无锡惠山黏土，根据室内试验结果，选用泥浆密度为 $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ ，黏度为 50 s 的泥浆作为现场试验材料。

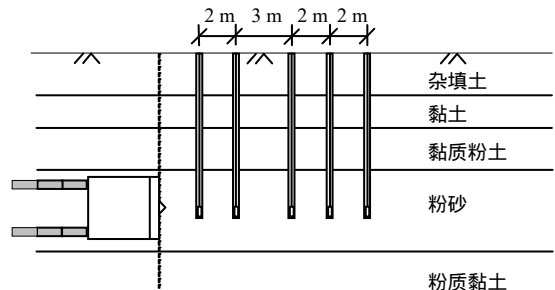


图 4 试验段地质剖面示意图

Fig.4 Geological profile of the testing area

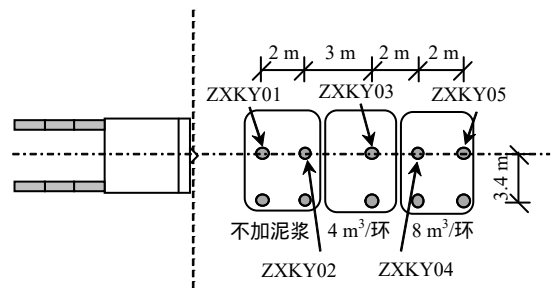


图 5 孔压计平面布置示意图

Fig.5 Plane arrangement of pore pressure transducer

(3) 孔压的监测

试验过程中孔压变化使用预先埋设的孔压计进行读取，孔压计使用 0~200 kPa 的振弦式传感器，可实时精确地测量地层中孔压的变化。孔压计埋设

深度为地表下 10~12 m,处于盾构机刀盘开挖面所在范围内,孔压计埋设完成后向使用粗砂及水泥浆对钻孔进行密封。现场孔压数据的记录分两段,在盾构机掘进过程中每隔 5 min 读取一次数据并记录,在盾构机停止掘进后每隔 20 min 读取一次孔压数据,持续监测并记录试验段(673~679 环)盾构管片掘进过程中开挖面前方孔压的变化情况。

3.3 地层孔压实测结果及分析

(1) 孔压随时间的变化规律

在砂地层掘进施工过程中,地层的孔压会随着盾构机的掘进及停止而先增大后减小,尤其是盾构机开挖时,其产生的孔压对地层产生一定的扰动。盾构试验段穿越的砂地层,其地层隔水顶板及底板分别为黏土层及粉质黏土层,这两个地层渗透系数较小,因而在掘进过程中产生孔压难以快速消散。图 6 为盾构机掘进过程中孔压变化情况,在盾构机正常掘进过程中,孔压快速增加,产生的超静孔压波动范围在 30~100 kPa。在盾构机停止掘进后,地层中的孔压逐渐减小至常规孔压值。当添加 4 m³/环的泥浆进行掘进时,孔压的波动范围由 40~100 kPa 减小至 40~70 kPa,波动幅度逐渐减缓。当添加 8 m³/环的泥浆进行掘进时,其孔压波动范围减缓至 30~50 kPa。即泥浆添加后,盾构机掘进时孔压的增加量逐渐减小。在相同掘进状态下,产生相同的作用力时,消散至地层中孔压逐渐减小,泥浆的添加阻碍了孔隙水应力的消散,这与室内试验中混合土层中产生孔压时,地层的孔压变化较小相似。

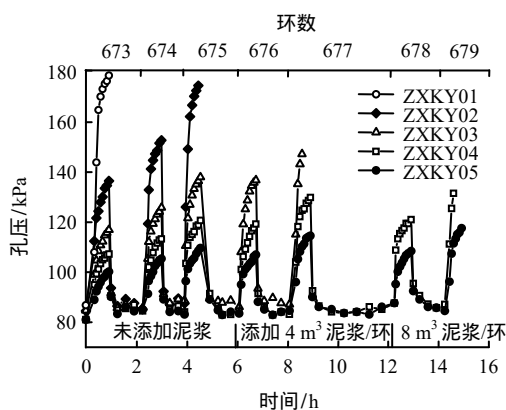


图 6 孔压随时间变化曲线

Fig.6 Curves of pore water pressure vs. time

(2) 孔压随掘进距离的变化规律

盾构机掘进过程中因盾构机刀盘与孔压计之间的距离不断变化,无法单一地分析孔压的变化受到哪些因素的影响。将 5 个孔压计所在位置与盾构

机掘进过程以距离为变量进行换算,如图 7 所示,研究在未添加泥浆及添加泥浆后盾构掘进时孔压力随距离的变化情况。ZXKY01 及 ZXKY02 为未加泥浆区的孔压变化曲线,随着距离的减小,孔压不断增加,当孔压计快接近刀盘时,最大值为 170~180 kPa,远大于该地层位置的常规孔压值 88 kPa。ZXKY03 的孔压变化曲线可分为两段:第 1 段为 5 500~2 000 mm 范围,这一范围内盾构机处于未加泥区域,因此其掘进过程中孔压逐渐增加,孔压变化范围为 100~140 kPa;第 2 段为 2 000~0 mm 范围,该段范围内盾构机处于 4 m³/环加泥区域,随着距离的减小,掘进过程中孔压变化并没有沿着前一段的变化规律进行增加,其变化的初始值出现一定程度的折减,孔压变化范围为 110~150 kPa。ZXKY04、ZXKY05 两条变化曲线出现相同的情况,这两段曲线的孔压变化可以分成 3 部分,分别是未加泥区域,4 m³/环加泥区域,8 m³/环加泥区域,3 段曲线可以发现相似的孔压变化规律。

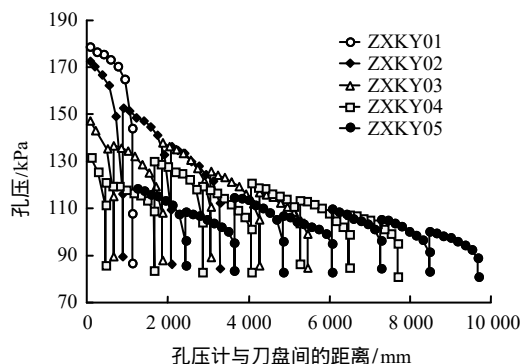


图 7 孔压随距离变化曲线

Fig.7 Curves of pore water pressure vs. distance

(3) 泥浆添加量对孔压变化的影响

泥浆的添加使得不同区域孔压的变化出现明显的差异,在距刀盘 600~2 000 mm 范围内选择 3 个孔压计 ZXKY02、ZXKY04、ZXKY05,盾构机掘进过程中 3 个孔压计分别对应未添加泥浆区,加泥浆 4 m³/环,加泥浆 8 m³/环,如图 8 所示。可以看出,随着孔压计距刀盘距离的减小,孔压值逐渐增大。其中 ZXKY02 记录的孔压变化范围为 125~150 kPa,即在未添加泥浆掘进过程中孔压变化量最大;而 ZXKY05 记录孔压的变化范围为 100~118 kPa,即在添加 8 m³/环泥浆掘进过程中孔压变化量最小。在相同距离情况下,随着泥浆添加量的增加,地层中孔压变化量逐渐减小,掘进过程中随着泥浆添加量的增加,泥膜效应越来越明显,对地

层的扰动越来越小。

为进一步分析孔压的变化情况,定义掘进过程中孔压的变化值与初始孔压值之比为孔压变化率,将孔压变化率与距离间的关系整理成图9。从图中可以看出,随着距离的不断减小,孔压变化率逐渐增大,未加泥浆时的变化率范围为45%~70%,添加量为 $8\text{ m}^3/\text{环}$ 时的变化率为25%~45%,泥浆增加使得孔压变化率降低一半左右,同时随着泥浆添加量的增加,其孔压变化率逐渐减小。

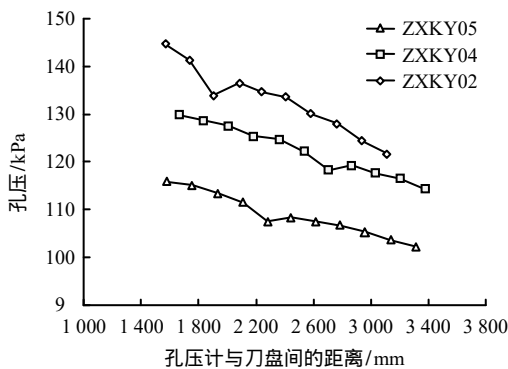


图8 泥浆添加量对孔压变化影响

Fig.8 Influence of slurry addition ratio on pore water pressure

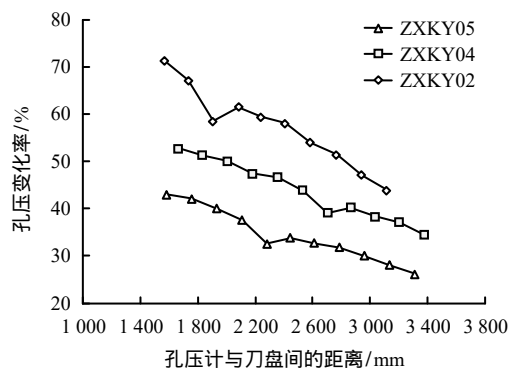


图9 泥浆添加量对孔压变化率的影响

Fig.9 Influence of slurry addition ratio on the changing ratio of pore water pressure

4 讨论

由室内试验结果可以发现,当混合土中泥浆添加量达到一定比例时,在压力作用下混合土层中部分超静孔压快速转化为有效应力,剩余超静孔隙水应力随着时间缓慢减小,而地层中的产生的超静孔压快速消散,这一孔压分布情况类似于在开挖面处产生一层低渗透性的泥膜,泥膜前方超静孔隙水应力在通过泥膜传递过程中快速的消散,开挖面前方的土水压力完全由地层中的有效应力进行平衡,这

一现象即泥膜效应。通过现场试验及孔压监测结果可以看出,未添加泥浆掘进时引起地层的孔压变化率高达70%,并且产生的孔压对周围地层的沉降变化有较大的影响。当添加泥浆掘进时,地层中孔压变化率显著地降低,通过分析认为,虽然地层中有一部分孔压变化,但泥浆的添加是地层孔压变化率减小的重要原因,验证了添加泥浆后地层中存在泥膜效应,使地层产生的孔压变化率减小,地层受扰动的程度降低。

泥膜效应的产生与泥水盾构中泥浆渗透成膜机制上是相同的,但是从泥膜效应的形式及渗透过程又有一定的差异。闵凡路等^[12]关于泥浆渗透成膜的研究成果中提出,泥膜渗透成膜除与地层孔隙有关外,与泥浆的颗粒密度、泥浆颗粒的级配等性质也有重要的关系,其最关键的是泥浆的代表粒径对地层孔径的封堵效果,因此,泥膜效应与泥水盾构的泥膜均是泥浆渗透封堵地层的结果。而泥水盾构是泥浆在压力作用下向开挖面渗透,形成的泥膜类型主要分3种,泥皮型、泥皮+渗透带型、渗透带型;而浓泥土压盾构中的泥膜是泥浆在压力作用下从混合土层中向开挖面渗透的过程,渗透过程中存在泥浆颗粒的损失,同时形成的泥膜形式为渗透型泥膜,通过室内试验后挖取试验地层表层观察也可看出相同现象。

由于施工现场土压平衡盾构机的泵送能力的限制,当泥浆添加量达到 $8\text{ m}^3/\text{环}$ 时已达到盾构机最大泵送能力,因此泥浆的添加量无法与室内试验时泥浆添加量相对应,掘进时开挖面后的地层中仍有一定程度的孔压变化,后续将改进盾构机管路的泵送能力,继续增加添加量进行试验。因在粉砂地层中掘进时,地层孔隙率较小,形成泥膜效应及对地层改善效果不明显。当盾构机在砂砾石或砂卵石施工时,因地层孔隙率大、开挖面稳定性较差,向开挖面添加的泥浆材料将有效封堵地层孔隙,产生更加明显的泥膜效应,更好的维持开挖面稳定,防止因开挖面失稳造成地层产生较大的变形。

5 结论

(1) 粉砂与泥浆混合后,在压力作用下泥浆快速向地层渗透,填充孔隙,地层中产生泥膜效应,使得混合土层产生应力几乎由地层中的有效应力平衡,减小了正常开挖时产生的孔压对地层扰动。

(2) 孔压的变化率受泥浆添加量影响,泥浆添加量越大,地层中孔压的变化率越小,当添加量达到 $8\text{ m}^3/\text{环}$ 时,其孔压变化率仅为25%~45%,因此

粉砂地层中泥浆的添加量是形成泥膜效应的关键因素。

(3) 粉砂地层中进行浓泥土压盾构产生的泥膜效应从机制上与泥水盾构相同,但是浓泥土压盾构泥膜类型只有渗透型泥膜,且渗透成膜前伴随泥浆颗粒损失。采用浓泥土压盾构技术,在砂砾石及砂卵石地层中掘进时,对于提高开挖面稳定,提高施工效率上具有重要的意义。

参考文献

- [1] 王梦恕. 中国隧道及地下工程修建技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
WANG Meng-shu. Tunneling and underground engineering technology in China[M]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [2] 袁大军, 尹凡, 王华伟, 等. 超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 2074 - 2080.
YUAN Da-jun, YIN Fan, WANG Hua-wei, et al. Study of soil disturbance caused by super large diameter slurry shield tunneling[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 2074 - 2080.
- [3] 张顶立, 李倩倩, 房倩, 等. 隧道施工影响下城市复杂地层的变形机制及预测方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2504 - 2516.
ZHANG Ding-li, LI Qian-qian, FANG Qian, et al. Deformation mechanism and prediction method for tunneling in complex urban ground conditions[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(12): 2504 - 2516.
- [4] 莫振泽, 王梦恕, 罗跟东, 等. 土压盾构在富水粉砂地层中浓泥渣土改良技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(12): 2026 - 2031.
MO Zhen-ze, WANG Meng-shu, LUO Gen-dong, et al. Study of ground conditioning by thick slurry for earth pressure balance shield in water-rich silty sand stratum[J]. *Tunnel Construction*, 2018, 38(12): 2026 - 2031.
- [5] 郭涛. 盾构用发泡剂性能评价方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
GUO Tao. Study on the performance evaluation of foaming agents in EPBS[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [6] 魏康林. 土压平衡盾构施工中泡沫和膨润土改良土体的微观机理分析[J]. 现代隧道技术, 2007, 44(1): 73 - 77.
WEI Kang-lin. Micro-mechanism analysis for the soil improvement by foam and bentonite in EPB shield tunneling[J]. *Modern Tunneling Technology*, 2007, 44(1): 73 - 77.
- [7] 王海波, 王树英, 胡钦鑫, 等. 盾构砂性渣土-泡沫混合物渗透性影响因素研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(5): 833 - 838.
WANG Hai-bo, WANG Shu-ying, HU Qin-xin, et al. Study of influencing factors of permeability of sand-foam mixture for shield tunneling[J]. *Tunnel Construction*, 2018, 38(5): 833 - 838.
- [8] WATANABE T, YAMAZAKI H. Giant size slurry shield is a success in Tokyo[J]. *Tunnels and Tunnelling*, 1981, 13(1): 13 - 17.
- [9] FRITZ P. Additives for slurry shields in highly permeable ground[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2007, 40(1): 81 - 95.
- [10] 韩晓瑞. 基于泥浆与地层匹配性的泥水盾构泥膜形成规律研究[D]. 南京: 河海大学, 2009.
HAN Xiao-rui. Study on the filter-cake forming law of slurry shield based on the matching of slurry and the ground[D]. Nanjing: Hohai University, 2009.
- [11] 张亚洲, 闵凡路, 孙涛, 等. 硬塑性黏土地层泥水盾构停机引起的地表塌陷机制研究[J]. 岩土力学, 2017, 38(4): 1141 - 1147.
ZHANG Ya-zhou, MIN Fan-lu, SUN Tao, et al. Analysis of causes for ground subsidence induced by slurry shield shutdown in hard plastic clay[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 1141 - 1147.
- [12] 闵凡路, 徐静波, 宋航标, 等. 反压条件下泥水盾构开挖面泥膜致密性评价试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 216 - 221.
MIN Fan-lu, XU Jing-bo, SONG Hang-biao, et al. Evaluating test on compactness of filter cakes of excavation face in slurry shield under reverse water pressure[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(8): 216 - 221.
- [13] 魏代伟, 朱伟, 闵凡路. 泥水盾构泥膜形成过程中超静孔隙水压力随时间的变化[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(3): 36 - 40.
WEI Dai-wei, ZHU Wei, MIN Fan-lu. Change laws of excess pore water pressure during forming of filter cake in slurry shield[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2011, 11(3): 36 - 40.
- [14] 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.
- [15] 钱勇进, 朱伟, 闵凡路, 等. 砂卵石地层中泥膜支护土压盾构施工试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(8): 210 - 215.
QIAN Yong-jin, ZHU Wei, MIN Fan-lu, et al. Test of construction method of filter membrane supporting EPB shield in sand and cobble stratum[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(8): 210 - 215.