

DOI: 10.11779/CJGE201709005

砂卵石地层高水压条件下盾构掘进喷涌控制研究

贺少辉，张淑朝，李承辉，朱自鹏，刘夏冰，汪大海，刘仰鹏

(北京交通大学土木建筑工程学院地下工程系，北京 100044)

摘要：以兰州地铁1号线一期工程世纪大道站—中间风井区段为背景，综合运用现场调查与过程监测、实验室模拟试验、三维数值模拟等方法与手段，对砂卵石地层高水压条件下土压平衡盾构掘进基于渣土改良的喷涌控制的可靠性进行了研究。主要取得以下成果：①建立了砂卵石地层高水压条件下盾构掘进改良渣土抗渗性（喷涌控制）的定量试验模拟与测试方法；②确定了单掺钠基膨润土浆液改良渣土的膨润土浆液最优浓度和掺加膨润土浆液的最优体积比，并证明了其改良后的渣土的抗渗性能具有较高的喷涌控制可靠性；③同时掺加钠基膨润土浆液和泡沫改良渣土，泡沫的掺入体积比应小于1:5。研究结果有力地支撑了世纪大道站—中间风井区段高水压条件下，盾构以-28‰的超大纵坡下掘进过程的喷涌控制，规避了盾构设备受淹风险。

关键词：砂卵石；高水压；土压平衡盾构掘进；渣土改良；喷涌控制；实验室试验；数值模拟

中图分类号：U455.43 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-4548(2017)09-1583-08

作者简介：贺少辉(1966-)，男，教授，博士生导师，主要从事隧道与地下工程专业领域的教学与研究工作。E-mail: heshaohui1114@163.com。

Blowout control during EPB shield tunnelling in sandy pebble stratum with high groundwater pressure

HE Shao-hui, ZHANG Shu-chao, LI Cheng-hui, ZHU Zi-peng, LIU Xia-bing, WANG Da-hai, LIU Yang-peng

(Department of Underground Works of School of Civil Engineering of Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the earth pressure balance shield tunnelling of Shijidadao station to the ventilation shaft section of Lanzhou metro line 1, the blowout control of conditioned muck in sandy pebble stratum with high groundwater pressure is studied through field investigation, laboratory tests and three-dimensional numerical modelling. It is mainly concluded that: (1) A method is established for testing the anti-blowout of conditioned muck in laboratory; (2) The optimum concentration of sodium-based bentonite slurry and the optimum volume ratio of slurry to soil of the conditioned muck are determined, and the reliability of the anti-blowout of the conditioned muck is verified; (3) The volume ratio of foam to soil of the conditioned muck should be less than 1:5 when using slurry and foam. The results of this study may guide shield tunneling at the section with the maximum longitudinal grade of -28‰ so as to effectively avoid shield-flooding risks due to blowout.

Key words: sandy pebble; high groundwater pressure; EPB shield tunnelling; conditioned muck; blowout control; laboratory test; numerical simulation

0 引言

在中国地铁盾构隧道工程中，首先在北京地铁遇到砂卵石地层^[1-3]，接着在成都地铁^[4-7]，目前兰州地铁1号线一期工程盾构穿越的地层主要为砂卵石。砂卵石地层中土压平衡盾构施工的渣土改良和喷涌控制是中国当前地铁盾构隧道工程亟待解决的关键技术问题^[4]。为做到在土压平衡盾构施工过程中有效控制喷涌，正确地认识喷涌发生的机理是基础，盾构螺旋输送机和渣土改良系统的合理选型是前提，做好渣土改良是关键。朱伟等一些专家以深圳砂砾土、广州砂卵漂石、南京粉质砂土和上海软质黏土为对象，深入地

研究了土压平衡盾构的喷涌发生机理，得出了“在盾构机的机型选定以后，喷涌的发生由排土口的水压力和渗流量共同控制，土体的渗透系数成为影响喷涌发生最主要的因素和最敏感的条件”的主要研究结论^[8-9]。王建刚等^[10]探讨了螺旋输送机防喷涌设计和喷涌故障应对措施，主要认为在富水地层中，螺旋输送机必须采用有轴式的螺旋杆，以有利于实现筒体内渣土保压和正常的压力递减，进而防止螺旋输送机筒体

基金项目：兰州市轨道交通砂卵石地层盾构施工地表沉降控制技术研究(C14L01060)

收稿日期：2016-05-11

内因压力无法控制而发生喷涌。晏启祥等^[6]和刘德智等^[11]探讨了在富水砂层中采用双级螺旋输送机的喷涌控制技术。渣土改良首先是改善进入盾构机土仓的渣土的流塑性,以保证盾构施工排渣连续顺畅;另一方面,对于富水地层,通过改良以明显降低土仓和螺旋输送机内渣土的渗透系数,提高其抗渗性,控制喷涌的发生。郭彩霞等^[2]和汪国锋^[3]在北京地铁盾构隧道工程中进行了单掺膨润土和双掺膨润土、泡沫改良砂卵石渣土的实验室试验和工程应用研究。马连丛进行了成都地铁富水砂卵石地层单掺泡沫改良渣土的实验室试验研究^[7]。Budach 等^[12]进行了粒径不大于 60 mm 的砂卵石地层单掺泡沫改良渣土的实验室试验研究。Ellenberger^[13]在工程中研究了双掺泡沫和高分子聚合物进行渣土改良。上述研究者对砂卵石地层渣土改良效果的评定基本上都是采用测定仅能反映改良后渣土流塑性的坍落度值的方法,而对影响喷涌发生最主要的因素和最敏感的条件的渣土的抗渗性(渗透系数)的研究显得很不足。此外,茅华^[14]、罗欣^[15]和王星钧等^[16]针对广州和南宁地铁盾构隧道的具体工程案例,探讨了喷涌控制的施工措施。

兰州地铁的砂卵石地层与北京地铁和成都地铁的砂卵石地层存在一定的差异,其盾构施工特性没有工程实践上的认识。针对兰州地铁砂卵石地层低含砂率(即地层中的细颗粒含量低)的特点,本文以兰州地铁 1 号线一期工程的具有最高水压的一个盾构施工区段作为工程背景,采用自行设计的渣土抗渗性(渗透系数)试验测试系统主要研究了单掺膨润土浆液(既能改善渣土的流塑性,又能增加渣土中的微细颗粒含量、提高抗渗性)改良渣土的喷涌控制性能;同时,也试验了双掺膨润土浆液和泡沫时,泡沫对改良渣土的抗渗性的影响。在试验所得到的改良渣土的渗透系数的基础上,开展了螺旋输送机内水压分布的三维数值模拟,将数值模拟的水压与试验时的击穿(喷涌)水压进行了比对分析。同时,对工程实施效果进行了施工过程跟踪与监测。

1 工程背景及问题的提出

1.1 工程概况

兰州地铁 1 号线一期工程(陈官营—东岗段),长约 26.692 km,其区间隧道大部分采用土压平衡盾构机掘进。因下穿黄河(如图 1 所示),其中的奥体中心站—世纪大道站区间采用泥水平衡盾构机施工。但是,施工单位中标进场后,考虑到泥水平衡盾构机存在其二次破碎系统不能有效、及时破碎大粒径卵石而可能造成环流系统频繁堵塞的风险,将制约工程筹划目标的实现,因而,提出了调整的施工方案:奥体中心站

—中间风井区段,因该区段下穿黄河,仍采用泥水平衡盾构机自奥体中心站始发进行施工;世纪大道站—中间风井区段,改为采用土压平衡盾构机,自世纪大道站始发、中间风井接收进行施工。本研究选取世纪大道站—中间风井区段作为依托工程,因该区段的中间风井位于黄河岸边,盾构到达中间风井时,其刀盘顶距地表为 36 m。盾构在该区段掘进时,穿越的地层为(2-10)和(3-11)砂卵石层;隧道结构底部处于(3-11)砂卵石层中。



图 1 盾构隧道平面示意图

Fig. 1 Sketch map of shield tunnel

1.2 砂卵石地层特性

根据地勘报告:(2-10)砂卵石层的一般粒径为 20~50 mm,偶遇漂石,漂石的最大粒径可达 500 mm;该层砂卵石粒径为 2~20 mm 的颗粒平均含量占 12.4%,小于 2 mm 的细颗粒含量约为 19.27%。(3-11)砂卵石层的一般粒径为 20~60 mm,偶遇漂石的最大粒径可达 500 mm 及以上;该层砂卵石的粒径为 2~20 mm 的颗粒平均含量占 14.82%,小于 2 mm 的细颗粒含量约为 21.47%,如图 2 所示。因此,(2-10)和(3-11)属于低含砂率(粒径小于 2 mm 的细颗粒的含量)的砂卵石层,盾构穿越该类地层时,渣土性能改良的难度大。



图 2 (3-11) 砂卵石地层

Fig. 2 Sandy pebble ground

1.3 问题的提出

两层砂卵石的渗透系数约为 62 m/d , 属于渗透性强的地层。中间风井区域的地下水位在地表以下 12 m , 也即地下水位在盾构刀盘顶以上 24 m , 地下水位至盾构螺旋输送机的进渣口达 30 m 以上。因此, 盾构属于在高水压条件下掘进。同时, 该部位也是兰州地铁 1 号线, 以及其它后续建设的线路中, 土压平衡盾构施工将要克服的最高水压条件。

因奥一世区间的中段需下穿黄河, 故盾构接近中间风井时, 以 -28% (基本上达到地铁设计规范规定的线路最大限制坡度 30%) 的下坡掘进, 一旦渣土性能改良效果不佳, 发生喷涌, 可能淹没盾构前方的关键控制设备系统。因此, 喷涌控制是关系到世纪大道站—中间风井区段能否正常施工和确保盾构设备安全的重大问题。

世纪大道站—中间风井区段盾构隧道采用由铁建重工制造的面板式刀盘土压平衡盾构机施工。开挖直径 $\Phi 6456 \text{ mm}$, 刀盘开口率约 33% , 其刀盘构造和刀具布置如图 3 所示。针对前述所提出的重大问题, 在设备选型上, 为有利于控制喷涌, 螺旋输送机采用了易于实现筒体内渣土保压和正常的压力递减的有轴式螺旋杆, 其总长度为 5.3 m 、壳体内径为 920 mm , 倾斜角度为 22° ; 其螺杆的节距为 630 mm 。螺旋输送机设计所能通过的卵石最大粒径为 520 mm (沿螺旋输送机长度方向) $\times 350 \text{ mm}$ (垂直螺旋输送机长度的方向); 也即在一个节距内, 螺旋输送机充满渣土的空间大小约为 $520 \text{ mm} \times 350 \text{ mm} \times 350 \text{ mm}$ 。



图 3 即将下井组装的盾构机刀盘

Fig. 3 Cutterhead of shield

尽管螺旋输送机采用了有利于控制喷涌的有轴式螺旋, 但是, 渣土性能改良效果的可靠性, 依然是制约该区段土压平衡盾构施工的关键问题。

2 防喷涌渣土性能改良试验研究

2.1 试验设备设计及制作

(1) 填装渣土的模型试验桶

针对螺旋输送机为圆形钢管, 其内的最大排渣空间为一个螺杆节距内的空间的特点, 基于达西渗透实验原理, 按照不小于 $1:1$ 的几何比尺, 设计和加工制作了如图 4 所示的用于试验改良渣土抗渗性的模型桶。该模型桶模拟螺旋输送机 1 个节距内除螺杆外的充满渣土的空间, 其内直径 D 为 35 cm (等于螺旋输送机横断面的排出卵石的最大粒径), 高 h 为 85 cm (相当于 1.35 螺杆节距), 断面面积 A 为 961.6 cm^2 , 体积 V 为 81.74 L , 采用无缝钢管加工制作而成。试验桶的中段的侧面设置了 3 个测量渗透压力的水头管孔; 底端的侧面设置了 1 个注水管孔; 上端的侧面为出水管孔。在进行改良渣土的抗渗性试验时, 依据中华人民共和国国家标准《土工试验方法标准》GB/T 50123—1999 关于渗透试验的规定, 模型桶内的两端安装透水滤网和钢板圆盘(如图 5 所示), 以将渣土封装在桶内。在模拟发生喷涌的水压击穿试验时, 先将模型桶上部出水端的透水滤网和钢板圆盘撤除, 然后, 施加水压进行击穿试验。



图 4 填装渣土的试验桶

Fig. 4 Barrel for testing permeability of conditioned muck



(a) 透水滤网

(b) 透水钢板圆盘

图 5 试验桶两端封装渣土的透水滤网和钢板圆盘

Fig. 5 Water-penetrating filter made by geotextile and steel plate

(2) 三轴伺服仪加注水压系统

为了测试改良后渣土试样发生喷涌破坏的最大水压力, 通过试验桶底部的注水孔, 采用三轴伺服仪加压系统进行注水加压, 如图 6 所示。



图 6 三轴伺服仪加压系统

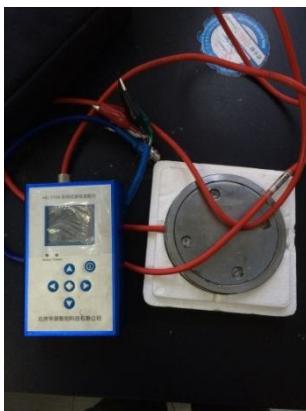
Fig. 6 Tri-axial servo system for loading water pressure

(3) 试验桶内的渣土加压系统

采用图 7 (a) 所示的规格为 5 t 的千斤顶在试验桶顶部施加压力, 以及图 7 (b) 所示的量程小、灵敏度高的振弦式微型土压力计来测量千斤顶所施加的压力, 以模拟施工状态螺旋输送机内的渣土压力。



(a) 千斤顶



(b) 振弦式土压力计

图 7 渣土加压与测试元件

Fig. 7 Hydraulic jack and soil pressure cell

2.2 钠基膨润土浆液性能试验

世纪大道站—中间风井区段盾构掘进采用产自甘肃省金昌市广明膨润土厂的钠基膨润土进行渣土改良。基于盾构始发和初始掘进段的实践, 确定了 100 g/L (即重量比=膨润土/水)、111 g/L、125 g/L 为高水压段盾构掘进控制喷涌的较优的膨润土浓度。试验时, 严格按照浓度将膨润土倒入水中, 充分搅拌并膨化, 其性能指标见表 1 和表 2 所示。据表 1 和表 2 的试验结果, 浓度为 125 g/L 的膨润土浆液的性能指标相比最优。因此, 确定 125 g/L 为渣土改良的最优膨润土浓度。同时, 据表 2 的结果, 膨化时间达到 24 h 以上,

膨润土浆液的主要性能指标黏度才能达到稳定状态, 因此, 应采用经膨化 24 h 以上的膨润土浆液进行改良渣土的流塑性和抗渗性试验。

表 1 不同浓度的膨润土浆液的比重

Table 1 Values of specific gravity of sodium-based bentonite slurry

浓度/(g·L ⁻¹)	100	111	125
比重/(g·cm ⁻³)	1.050	1.060	1.065

表 2 膨润土浆液的黏度

Table 2 Values of viscosity of sodium-based bentonite slurry

膨化时间 /h	黏度/s		
	100 g/L 的浆液	111 g/L 的浆液	125 g/L 的浆液
12	26.53	37.49	49.44
24	27.67	43.20	56.14
32	27.71	43.21	56.32

2.3 钠基膨润土浆液与渣土的最优体积比试验

在中间风井开挖至 (3-11) 砂卵石层时, 系统地采集了试样进行砂卵石层高水压条件下盾构掘进喷涌控制试验研究。根据地勘报告, (3-11) 砂卵石层的天然含水率为 8%。

试验时, 先将试样烘干, 然后按 8% 的含水率加水配制成渣土。采用浓度为 125 g/L 的膨润土浆液, 进行了 4 种体积比 (膨润土浆液/渣土): 1:10, 1:15, 1:20, 1:25 的改良后渣土的流塑性试验, 如图 8 所示。改良渣土的坍落度见表 3 所示。



(a) 体积比 1:25

(b) 体积比 1:20



(c) 体积比 1:15

(d) 体积比 1:10

图 8 不同体积比的改良渣土的流塑性试验

Fig. 8 Tests on slump of conditioned muck

表3 不同体积比的改良渣土的坍落度

Table 3 Values of slump of conditioned muck

体积比	坍落度/cm
1:25	2.0
1:20	7.0
1:15	11.5
1:10	14.5

根据北京地铁砂卵石地层土压平衡盾构施工渣土改良的实践经验^[1], 改良后渣土具有最佳流塑性的定性和定量判定指标是: 无离析、流淌现象, 坍落度为10~12 cm。借鉴该判定指标, 并据图8和表3所示的试验结果, 确定1:15为最优体积比。

2.4 钠基膨润土浆液改良渣土的抗渗性能试验

(1) 试验准备

a) 试验系统的合理性和可靠性验证: 在开展改良渣土的抗渗性试验之前, 进行了普通中粗砂的渗透性试验, 验证了本研究所设计和加工制作的试验系统的合理性和可靠性。

b) 按照125 g/L的最优浓度配制钠基膨润土浆液, 膨化时间应在24 h以上。

c) 先烘干, 然后按8%的天然含水率配制渣土。

d) 按1:15的最优体积比配制好改良渣土, 并填装在试验桶内, 如图9(a)和图9(b)所示。

e) 将试验桶和三轴伺服仪加压系统连接, 如图9

(c) 所示。在注水加压试验前, 采用图7所示的渣土加压与测试元件对试验桶内的改良渣土施加盾构掘进过程中螺旋输送机内的土压; 然后注水加压, 进行改良渣土的抗渗性试验。

(2) 改良渣土的抗渗性试验结果

对最优体积比为1:15的改良渣土, 共进行了5次试验, 得到了其被水压击穿前的渗透系数为(4.456~5.601)×10⁻⁵ cm/s, 击穿试样(即发生喷涌)时的最小水压为135 kPa(1.35bar)。



(a) 往试验桶填装改良渣土

(b) 填装完毕



(c) 连接好的试验系统

图9 改良渣土抗渗性试验系统

Fig. 9 Testing system for permeability of conditioned muck

2.5 泡沫对渣土抗渗性能的影响试验

在第1.2节中已经论述, 兰州地铁隧道盾构穿越的地层为低含砂率(粒径小于2 mm的细颗粒的含量)的砂卵石层。盾构在高水压区段掘进, 为显著改善渣土的抗渗性, 以第2.2节和第2.3节所研究的采取增加渣土中的黏粒含量的单掺膨润土浆液的加泥型改良方法为主。考虑到也有可能采用双掺膨润土浆液和泡沫进行渣土改良, 这里, 采用世纪大道站—中间风井区段盾构掘进使用的产自河北盛荣建筑材料有限公司的盾构泡沫剂(型号: SRPM-601), 进行了泡沫对膨润土浆液改良后的渣土抗渗性影响的试验研究。

试验采用工程施工上常用的浓度为3%的泡沫剂溶液, 发泡倍率为13倍。从试验结果得知, 在掺加体积比为1:15的膨润土浆液改良渣土的基础上, 再掺入体积比为1:10~1:5的泡沫, 除可进一步改善渣土流塑性外, 其改良后的渣土的抗渗性也略好于仅掺膨润土浆液的改良渣土。掺入体积比为1:10和1:5的泡沫时, 其改良后渣土的渗透系数分别为2.971×10⁻⁵ cm/s和3.592×10⁻⁵ cm/s, 均略小于仅掺膨润土浆液改良后渣土的渗透系数。但是, 并不是多掺泡沫的效果更好, 掺入体积比1:5的泡沫的渣土渗透系数反而大于掺入体积比1:10的渣土。究其原因: 当掺入量适当时, 泡沫和砂卵石混合后, 泡沫里的微小气泡封闭在砂卵石的孔隙中, 进一步地阻塞了透水通道, 因而降低了透水性; 当掺入体积比达到1:5及以上时, 改良后渣土的保水性变得差一些, 有少量泡沫析出, 所以其透水性反而大些。因此, 当采用膨润土浆液和泡沫双掺进行渣土改良时, 掺入泡沫的体积比应控制在小于1:5。

3 螺旋输送机内渗透水压数值模拟

3.1 三维数值建模

首先, 基于 Solidworks 软件, 建立了面板式刀盘土压平衡盾构机的三维机械精细化模型(包括盾壳、刀盘、渣土仓、螺旋输送机), 然后, 将盾构机三维机械模型导入有限差分软件 FLAC^{3D} 中, 建立了进入中间风井前盾构掘进状态的三维数值模型, 如图 10 所示(该图为沿隧道中线切开后的模型的一半)。图中的红色为(3-11)砂卵石层, 其上部分为(2-10)砂卵石层; 红色区域内的蓝色为盾壳, 盾壳内的深绿色竖条为渣土仓, 倾斜的绿条为螺旋输送机; 渣土仓和螺旋输送机内为改良后的渣土充填。模型几何尺寸为: 垂直隧道轴线方向(X方向)为 60 m, 坚向(Y方向)为 52.2 m, 沿隧道轴向(Z方向)为 30 m。该数值模型中的三维机械模型完全按照盾构机的实际构造和尺寸建立, 例如, 为了不影响压力传递的数值模拟结果, 螺旋输送机的数值模型与其实际构造和尺寸完全一致, 如图 11 所示。

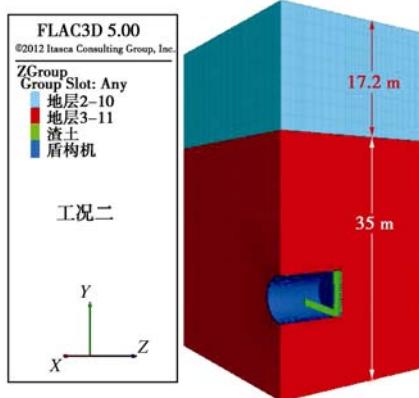


图 10 三维数值模型

Fig. 10 3D numerical model

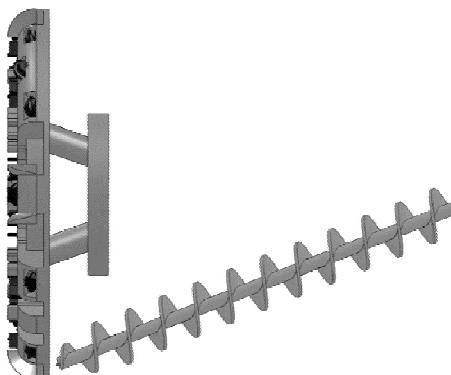


图 11 螺旋输送机的数值模型

Fig. 11 Numerical model for screw conveyor

3.2 渗流计算参数及边界条件

渗流计算参数见表 4 所列。

表 4 渗流计算参数

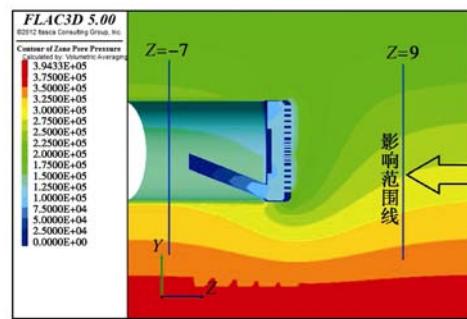
Table 4 Parameters for seepage flow analysis

材料	渗透系数	孔隙比 e	饱和度 S_r
地层(2-10)	62 m/d	0.282	
地层(3-11)		0.288	地下水位
渣土仓内和螺旋输送机内的改良渣土	5.601×10^{-5} cm/s	0.280	以下均取 100%
盾壳、刀盘面板、螺旋输送机	0	0	0

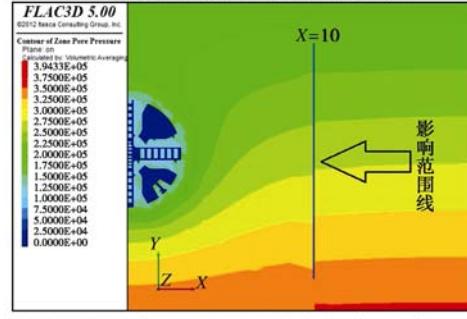
地下水位处于地表以下 12 m, 模型四周为定水头边界。螺旋输送机的出渣口为定流量边界。

3.3 计算结果及分析

计算得到的盾构掘进状态的隧道纵向和横向水压分布云图如图 12 所示。



(a) 隧道中线纵向剖面水压分布云图



(b) 刀盘面板与地层界面处的隧道横向水压分布云图

图 12 盾构掘进状态的水压分布云图

Fig. 12 Distribution of seepage flow pressure in tunneling process by EPB shield

据图 12 的结果, 绘制的螺旋输送机内的水压分布如图 13 所示。

据图 13 可知, 渗透水压值由螺旋输送机底部的与渣土仓连通的进渣口向出渣口处逐渐减小, 且变化比较均匀, 进渣口处、中间和距出渣口 1/4 螺旋输送机长度处的渗透水压分别为 105, 65.03, 35.61 kPa, 出渣口处的渗透水压几乎为零。因此, 与试验得到的改良渣土发生喷涌时击穿水压力 135 kPa 相比较, 进渣口处、中间和距出渣口 1/4 螺旋输送机长度处的抗喷涌安全系数分别为 1.29, 2.08 和 3.79。尽管数值模拟

的结果与地层条件、水力条件和参数选取有关, 且随着条件的改变还会产生一定的波动, 但是, 本研究的渗流数值模拟的地层渗透系数、地下水位和改良后渣土的渗透系数等主要参数的取值是基于勘察结果和本研究的试验结果, 因而得到的数值模拟结果是可靠的。同时, 基于试验结果和数值模拟结果的对比分析, 距出渣口 $1/4$ 螺旋输送机长度处的抗喷涌安全系数高达 3.79, 因此, 按本研究的结果进行渣土改良, 具有较高的防喷涌可靠性。

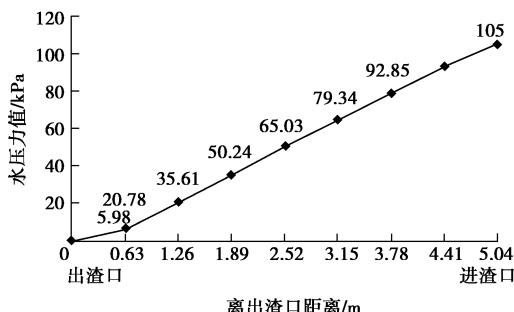


图 13 螺旋输送机内的水压分布

Fig. 13 Distribution of seepage flow pressure in screw conveyor of shield

4 工程实施结果与分析

盾构掘进可能在地层中引起的超孔隙水压会对喷涌控制造成影响。为了弄清楚盾构在砂卵石地层中掘进是否会产生地层中的超孔隙水压现象, 在高水压区段贴近左、右线隧道预先布置了 2 个地层孔隙水压观测孔(孔深均达隧道底部, 与左、右线隧道的水平距离均为 1 m); 在观测孔的底部, 预先埋设了孔隙水压计, 以监测盾构掘进对地层中孔隙水压力状态的影响。盾构掘进至观测孔位置时, 所观测到的孔隙水压仅略大于地下水的静水压力, 未观察到像在弱渗透性地层中因盾构掘进而造成的地层超孔隙水压现象, 原因是砂卵石地层的渗透性强, 水压消散快。

盾构在高水压区段施工时, 按照第 2.4 节研究得到的最优结果进行渣土改良, 效果良好, 有效地控制了喷涌的发生。盾构掘进至即将进入中间风井的端头地层加固区时, 其土仓下部压力传感器的压力为 257.6 kPa, 该值基本上等于图 13 所示的由数值模拟得到的螺旋输送机进渣口的渗透水压 105 kPa 加上刀盘前方相应标高处的主动土压力。因此, 工程实施结果表明, 本研究得到的高水压条件下防喷涌渣土性能改良试验结果, 以及基于渣土性能改良试验结果的螺旋输送机内渗透水压数值模拟结果, 是合理可靠的。

在第 1.1 节中已经述及, 原设计中, 奥体中心站至世纪大道站区间, 全采用泥水平衡盾构机施工, 后来将其中的世纪大道站至中间风井区段, 调整为采用

土压平衡盾构机掘进。作这一调整方案时, 最为担心的就是接近极限纵坡的盾构下坡掘进的喷涌控制问题。现在本区段工程成功实施, 说明该工程的喷涌控制问题得到解决, 也为后续兰州地铁隧道建设在高水压条件下的盾构选型提供了技术支撑。

5 结 论

以实验室试验模拟与测试为基础与核心, 基于试验结果进行了数值模拟。同时, 将所得的试验结果和数值模拟结果作为依据指导了研究所依托的工程的施工, 并对工程实施效果进行了现场过程跟踪与监测。主要结论如下:

(1) 建立的试验模拟与测试方法可作为今后高水压条件下盾构掘进改良渣土抗渗性(喷涌控制)的定量试验与测试方法。

(2) 获得的研究结果可作为砂卵石地层高水压条件下盾构机选型时, 土压平衡盾构机与泥水平衡盾构机比选的参考依据。

(3) 通过优化配比试验, 单掺钠基膨润土浆液和双掺钠基膨润土浆液及泡沫, 均可实现砂卵石地层高水压条件下盾构掘进的喷涌控制要求。单掺时, 最优钠基膨润土浓度为 125 g/L, 膨化时间应达到 24 h 以上, 其最优体积比为 1:15; 双掺时, 在掺入体积比为 1:15 的膨润土浆液的基础上, 再掺入泡沫的体积比应小于 1:5。

参考文献:

- [1] 乐贵平, 贺少辉, 罗富荣. 北京地铁盾构隧道技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012. (LE Gui-ping, HE Shao-hui, LUO Fu-rong. Beijing subway shield tunneling technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese))
- [2] 郭彩霞, 孔恒, 王梦恕. 无水大粒径漂卵砾石地层土压平衡盾构施工渣土改良分析[J]. 土木工程学报, 2015(增刊 1): 201 - 205. (GUO Cai-xia, KONG Heng, WANG Meng-shu. Study on muck improvement of EPB shield tunneling in waterless sandy-cobble-boulder stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2015(S1): 201 - 205. (in Chinese))
- [3] 汪国锋. 北京砂卵石地层土压平衡盾构土体改良技术试验研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2011. (WANG Guo-feng. Test research on soil improvement technology for EPBS in Beijing sandy gravel ground[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2011. (in Chinese))
- [4] 何川, 晏启祥. 加泥式土压平衡盾构机在成都砂卵石地

- 层中应用的几个关键性问题[J]. 隧道建设, 2007, 27(6): 4 - 6. (HE Chuan, YAN Qi-xiang. Key issues of applying mudding-type EPB shields to sandy cobble ground in Chengdu, China[J]. Tunnel Construction, 2007, 27(6): 4 - 6. (in Chinese))
- [5] 王国义. 成都富水砂卵石地层盾构设备配置探讨[J]. 现代隧道技术, 2013, 50(1): 34 - 39. (WANG Guo-yi. Discussion of the modification plan of the EPB TBM applied in a water-rich cobblestone stratum in Chengdu[J]. Modern Tunnelling Technology, 2013, 50(1): 34 - 39. (in Chinese))
- [6] 晏启祥, 郑代靖, 何川, 等. 富水砂卵石地层地铁盾构施工若干问题及对策[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(3): 713 - 719. (YAN Qi-xiang, ZHENG Dai-jing, HE Chuan, et al. Problems and countermeasures of metro shield construction in water-soaked sand and cobble stratum[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(3): 713 - 719. (in Chinese))
- [7] 马连丛. 富水砂卵石地层盾构施工渣土改良研究[J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 57 - 63. (MA Lian-cong. Study on ground conditioning for EPB shield in water-rich cobble ground[J]. Tunnel Construction, 2010, 30(4): 57 - 63. (in Chinese))
- [8] 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, 26(5): 589 - 593. (ZHU Wei, QIN Jian-she, WEI Kang-lin. Research on the mechanism of the spewing in the EPB shield tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(5): 589 - 593. (in Chinese))
- [9] 魏康林. 土压平衡盾构施工中喷涌问题的发生机理及其防治措施研究[D]. 南京: 河海大学, 2003. (WEI Kang-lin. Research on blowout mechanism and blowout control in EPB shield tunneling[D]. Nanjing: Hohai University, 2003. (in Chinese))
- [10] 王建刚, 韦丹, 续长明, 等. 螺旋输送机防喷涌设计介绍及喷涌故障应对措施[J]. 科技与企业, 2014(1): 282. (WANG Jian-gang, WEI Dan, XU Chang-ming, et al. An introduction to blowout control design of screw conveyor and countermeasures against blowout[J]. Technology and Enterprise, 2014(1): 282. (in Chinese))
- [11] 刘德智, 雷金山, 杨秀竹. 土压平衡式盾构双级螺旋输送机对喷涌的控制技术[C]// 2010 城市轨道交通关键技术论坛论文集. 北京, 2010. (LIU De-zhi, LEI Jin-shan, YANG Xiu-zhu. Control of water and sand gush by two-stage helical conveyer in tunnelling[C]// 2010 Key Technologies of Urban Rail Transit. Beijing, 2010. (in Chinese))
- [12] BUDACH Christoph, THEWES Markus. Application ranges of EPB shields in coarse ground based on laboratory research[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50(8): 296 - 304.
- [13] KUPFERROTH F J Ellenberger. The use of foams and polymers in earth pressure balanced TBMs[C]. Switzerland: Degussa Construction Chemicals Underground Construction Group, 2001.
- [14] 茅华. 隧道施工盾构螺旋机喷涌应对措施[J]. 铁道建筑, 2014(10): 39 - 41. (MAO Hua. Countermeasures to stop muck-gushing from shield's screw conveyer during tunnel construction[J]. Railway Engineering, 2014(10): 39 - 41. (in Chinese))
- [15] 罗欣. 浅谈土压平衡盾构机在隧道掘进中喷涌的治理[J]. 城市建设, 2010(20): 256 - 257. (LUO Xin. An elementary discussion of governing of blowout in EPB shield tunneling[J]. Urban Construction, 2010(20): 256 - 257. (in Chinese))
- [16] 王星钧, 徐长胜. 南宁富水圆砾地层防喷涌施工技术[J]. 建筑机械化, 2014(2): 88 - 89. (WANG Xing-jun, XU Chang-sheng. Nanning anti spewing water round gravel stratum construction technology[J]. Construction Technique, 2014(2): 88 - 89. (in Chinese))