

基于掘进试验和神经网络的渣土改良研究

Research on Soil Conditioning based on Tunneling Test and Neural Network

王晓明¹, 左文洲², 李长印², 王宜中², 郭 聪³

1. 中电建铁路建设投资集团有限公司, 北京 100060;
2. 中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450000;
3. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: 文章针对黏质粉土和粉质黏土地层, 基于盾构掘进实际控制方法, 结合两种主流渣土改良理念, 进行现场掘进试验, 深入分析不同改良方式对掘进参数和控制的影响, 结果表明以 3.5% 泡沫为主比以水为主的渣土改良方式, 推进速度提升约 17.8%, 开挖效率和适应性等也全面提升。随后通过 BP 神经网络拟合分析, 得到了更加精确的渣土改良方案, 使得后续掘进过程中, 平均推进速度达到 104 mm/min, 螺旋输送机压力稳定维持在 48 bar~64 bar, 出渣效率 1~1.1, 再未发生过喷涌, 穿越各风险源及地表沉降控制理想。

关键词: 渣土改良; 盾构掘进试验; 神经网络; 掘进参数

中图分类号: U25 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 05-0027-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.05.005

WANG Xiaoming¹, ZUO Wenzhou², LI Changyin², WANG Yizhong², GUO Cong³

1. Powerchina Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 100060, China;
2. Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China;
3. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In this paper, aiming at the clayey silt and silty clay stratum, based on the actual control method, combined with the two mainstream soil conditioning concepts, the field tunneling test is carried out, and the influence of different methods on tunneling parameters and control was analyzed in depth. The results show that the promotion speed of 3.5 % foam is about 17.8 % higher than that of water. The excavation efficiency and adaptability are also comprehensively improved. Subsequently, through the fitting analysis of BP neural network, a more precise soil conditioning scheme was obtained. In the subsequent tunneling process, the average advancing speed reached 104 mm/min, the pressure of the screw conveyor was maintained at 48 - 64 bar, and the muck discharge efficiency was 1-1.1. No muck-gushing occurred again, and the control of crossing various risk sources and surface subsidence was ideal.

Keywords: soil conditioning; shield tunneling test; neural network; tunneling parameters

作者简介: 王晓明 (1976—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 地下工程。

通信作者: 郭聪 (1989—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 地下工程。

收稿日期: 2022-08-10

0 引言

盾构法以其经济性、快捷性和安全性成为了隧道工程中应用最多的工法。盾构正常掘进最基础的工作是渣土改良, 这是由于地层经渣土改良, 才能拥有适宜的流动性、止水性和塑性^[1-2], 从而

岩土力学

使切削、推进系统、螺旋输送机等协调工作,实现正常掘进。

鉴于渣土改良的重要性,国内外诸多学者均对此进行了研究。如王树英等^[3]、杨益等^[4]对渣土改良和刀盘结泥饼进行了研究综述;LEINA-LAT等^[5]讨论了泡沫剂与土体之间的相互作用机理;彭磊等^[6]、王明胜等^[7]、赵世森等^[8]对泡沫配比和用量进行了研究;万泽等^[9]和张迅等^[10]研究了泡沫剂对土压平衡盾构主要掘进参数的影响;王洪新等^[11]进行了土压平衡盾构渣土改良的合理坍落度研究。

但以上研究多存在以下问题:(1)大部分学者都仅以泡沫剂作为渣土改良的主要手段进行试验研究,未考虑实际施工时很多工程为主要以水进行渣土改良。(2)坍落度评价法与实际盾构司机渣土改良评价方法不符,且由于施工工艺原因,盾构施工过程中无法采集穿越地层的原状土样,加之地层不均匀,导致即使相同的渣土改良方式和地层,坍落度依然可能不同。(3)大部分研究都仅采用传统的分析手段,未能结合人工神经网络等先进的技术手段,进行更为精确的渣土改良方案分析。

文章以郑州地铁8号线南流村站~五龙口西站区间盾构工程为依托,针对粘性土地层,结合两种主流渣土改良理念,进行现场掘进试验并通过BP神经网络拟合分析,探索精确的渣土改良方案。

1 工程概况

南流村站~五龙口西站区间起点里程左DK24+091,终点里程左DK26+184,全长2093 m。穿越地层主要为黏质粉土和粉质黏土。本区间地下水稳定埋深为10.2 m~15.8 m,除始发端外,地下水位均在隧道顶以上。

2 渣土改良盾构掘进试验

2.1 改良效果评价指标

推进和切削系统的核心参数如推进速度、总推力、贯入度和刀盘扭矩等是改良评价的重要

指标。

螺旋输送机压力和转速是评价渣土改良性能最主要的参数指标,螺旋输送机压力一般以维持在50 bar~80 bar为宜,高于80 bar则偏干,一般会提高螺旋机转速以提升出渣能力,导致出渣效率小于1;低于50 bar则偏稀,一般会降低螺旋机转速,利用土塞效应来防止发生喷涌,使得出渣效率高于1。

螺旋输送机出口处设置视频监控,便于盾构司机直接观察出渣状况,评价渣土流塑性能。在粉质黏土和黏质粉土地层中,渣土改良的直观评价以螺旋输送机出口处渣土分散不结块,皮带输送机连续出渣能带走,不产生堆积为最好的流塑性状态。渣土结块多为分散型泡沫剂偏少或发泡率偏低所致。渣土偏干会表现为螺旋机出渣不连续,过干则会导致螺旋机出渣困难。渣土偏稀会导致堆积和滑移,皮带机无法连续带走。过稀则无法形成土塞效应,发生喷涌,无法维持土压平衡。

2.2 试验方案

由于穿越地层均为黏质粉土和粉质黏土,黏粒含量高,不须加入膨润土,故采用分散型泡沫剂+水进行改良。基于左右线盾构机和施工材料均相同,结合目前该地层渣土改良的两种思路,以及实际施工进度和地层代表性,分别在区间左右线进行掘进试验:

(1)左线采用以水为主的渣土改良方式,泡沫剂用量配合加水量选用,泡沫原液比例按照常规选用3%;右线采用以泡沫剂为主的渣土改良方式,加水量配合泡沫剂用量选用,考虑渣土改良效果随原液比例递增,且为与最大5%的原液比例拉开差距以确保极端状况时的渣土改良性能,采用泡沫原液比例3.5%。左右线泡沫剂发泡倍率因管路气压须大于土仓压力以确保不堵管,故结合地层的渗透系数和干湿条件,分别在河底段、普通段和极端状况下大体按照4~6、10~13和20~30选用。

(2)根据以上试验采集各环盾构掘进数据,通过深入分析和对比评价,选择渣土改良方式。

2.3 试验实施

2.3.1 土体干湿程度划分

由于粉质黏土和黏质粉土对于土压平衡盾构来说性质近似,掘进时司机一般仅根据地层的干湿程度来调整改良剂用量。结合详勘资料,本次试验段为区间第 288 环~550 环,主要为河底段到湖心岛段。河底段地层为黏质粉土,渗透系数在 10^{-4} cm/s~ 10^{-5} cm/s,可认为是饱水地层。湖心岛段上覆 3 m~6 m 的粉质黏土,渗透系数在 10^{-6} cm/s 附近为隔水层,故该区域相对较干。从河底段到湖心岛段的过渡区段,其性质介于两者之间。

由于不同干湿程度的土体,渣土改良主要体现在加水量不同,结合现场司机掘进体验,不同干湿程度土体大致的加水量和对应的环数统计见表 1。

表 1 不同干湿程度土体加水量和环数

Table 1 Water addition and ring numbers of soil with different dry and wet degrees

| 线路 | 饱和 | | 普通 | | 偏干 | |
|----|----------------------|-------|------------------------|------|-----------------------|------|
| | 均值 | 分布 | 均值 | 分布 | 均值 | 分布 |
| 左线 | 0-0.4 m ³ | 118 环 | 0.5-1.5 m ³ | 74 环 | 1.5 m ³ 以上 | 71 环 |
| | | | | | | |
| 右线 | 0-1.2 m ³ | 117 环 | 1.3-2.2 m ³ | 71 环 | 2.2 m ³ 以上 | 74 环 |
| | | | | | | |

结合详勘资料、线间距和实际经验,认为左右线在相同里程处地层差异不大。根据左右线不同干湿程度土体对应的环数差异较小,且与详勘揭示的地质和水文条件基本一致,认为该划分标准合理。

2.3.2 渣土改良剂实际用量

表 2 不同干湿程度土体的泡沫剂用量和实际加水量

Table 2 Foaming agent dosage and actual water addition of soil with different dry and wet degrees

| 线路 | 改良剂 | 饱和 | | 普通 | | 偏干 | |
|----|------------------|------|-------|------|---------|------|---------|
| | | 均值 | 分布 | 均值 | 分布 | 均值 | 分布 |
| 左线 | 泡沫/L | 2.0 | 0-4 | 2.4 | 0-4 | 3.7 | 0-7 |
| | 水/m ³ | 0.07 | 0-0.4 | 0.97 | 0.5-1.5 | 2.5 | 1.6-4.5 |
| 右线 | 泡沫/L | 28.3 | 23-30 | 24.6 | 20-28 | 22.1 | 20-26 |
| | 水/m ³ | 0.65 | 0-1.2 | 1.85 | 1.3-2.2 | 2.7 | 2.3-3.3 |

按照上文分类标准,泡沫剂和水的实际用量统计结果见表 2。其中,右线在平均用水量递增的情况下,泡沫剂用量有所减少,说明泡沫剂为主导的渣土改良方式,渣土潜在的流塑性性能充分发挥,表现为在增加用水量后,原用量的泡沫性能已无法充分发挥,故减少其用量;与此相对,左

线泡沫剂和水的平均用量均递增,说明以水为主的渣土改良方式,渣土潜在的流塑性性能始终未充分发挥。

2.4 渣土改良效果对比分析

2.4.1 推进系统参数

推进速度和总推力的统计结果见图 1,结果表明:(1)在各种土体状态下,右线推进速度始终维持在 90 mm/min~125 mm/min,左线维持在 65 mm/min~105 mm/min,以泡沫为主导的改良方式平均推进速度提高约 17.8%,工效大幅提高。(2)在饱和地层中,右线总推力与左线基本持平,在普通和偏干地层中,右线总推力均低于左线。表明以泡沫剂为主导的改良方式,在大幅提升推进速度时,土体的抗力不增加甚至小幅度降低,地层的适应性更强。

2.4.2 切削系统参数

贯入度和刀盘扭矩的统计结果见图 2,结果表明:(1)右线贯入度在各地层中均高于左线,表明泡沫剂为主导的改良方式可以使盾构机在较高的推进速度和较低的刀盘转速下产生良好的切削效果,土方开挖的能力和效率更高;(2)左右线刀盘扭矩分布相近,表明泡沫剂为主导的改良方式,在大幅提高推进速度和开挖效率的同时,抵抗扭矩并没有增加,地层的适应性更强。

2.4.3 螺旋输送机参数

螺旋机转速和压力的统计结果见图 3,结果表明:(1)关于喷涌,左线共计存在 11 环螺旋机转速为 0 rpm,螺旋机压力为 30 bar,右线存在 1 环螺旋机转速为 2.4 rpm,螺旋机压力为 38 bar。这表明以水为主导的改良方式更易导致喷涌。另由于螺旋机压力在 38 bar 的情况下也有多环未发生喷涌,认为该值是喷涌的临界螺旋机压力;(2)左线螺旋机压力控制在 40 bar~60 bar,右线为 40 bar~50 bar,右线波动较小。表明以泡沫为主的改良方式更容易稳定控制渣土流塑性性能。(3)右线螺旋输送机转速明显小于出渣效率为 1 时的理论值,加之螺旋机压力为 40 bar~50 bar,表明渣土偏稀,与监控显示渣土无法连续带走,出现小范围堆积和短距离滑移印证。

岩土力学

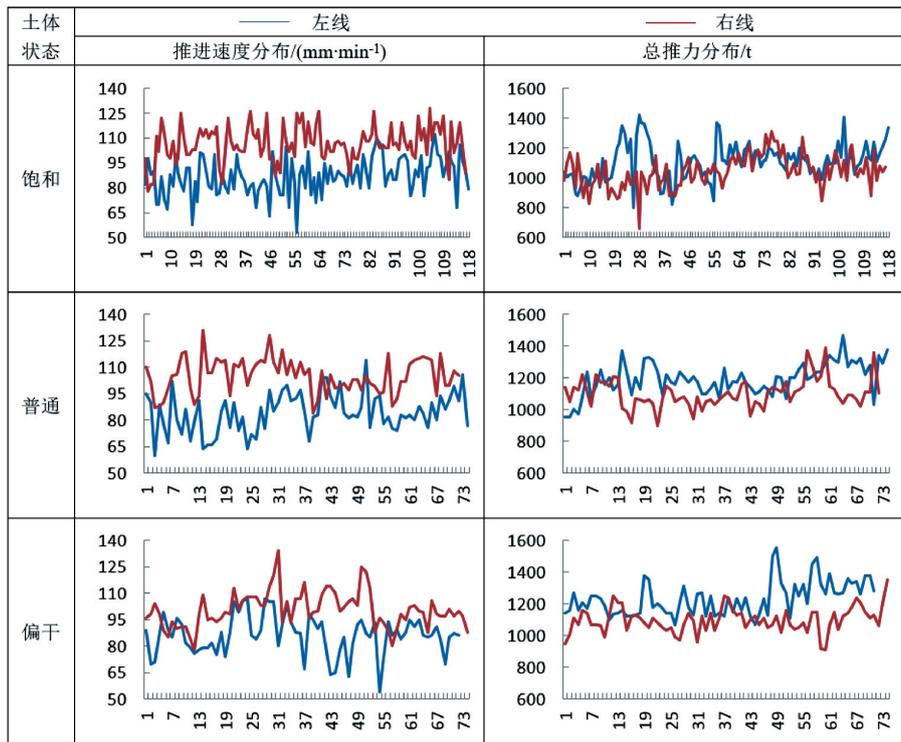


图 1 推进系统主要参数统计结果

Fig. 1 Statistical results of main parameters of propulsion system

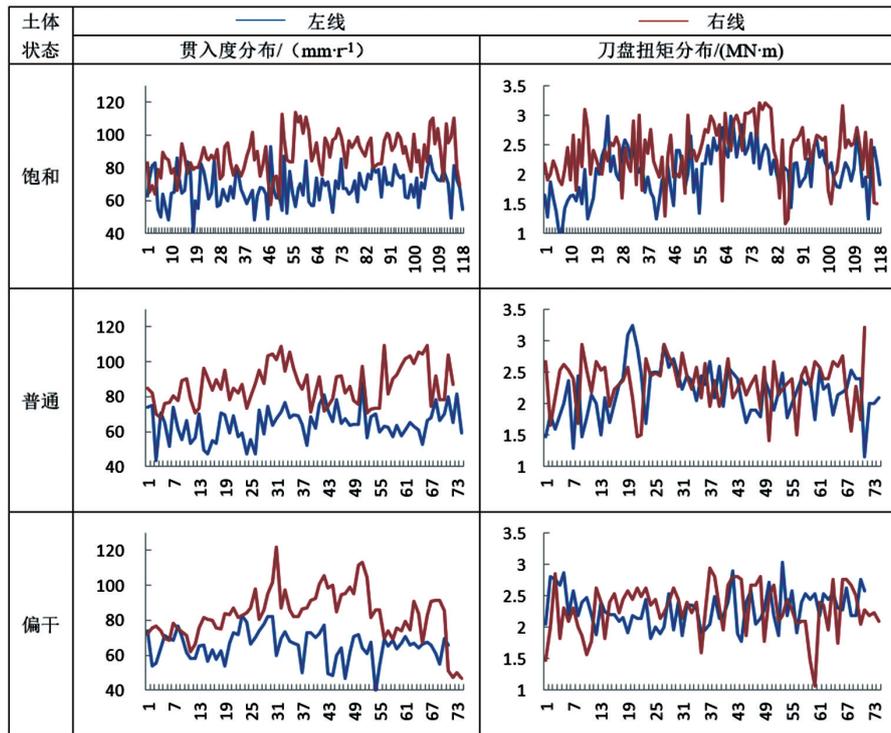


图 2 切削系统主要参数统计结果

Fig. 2 Statistical results of main parameters of cutting system

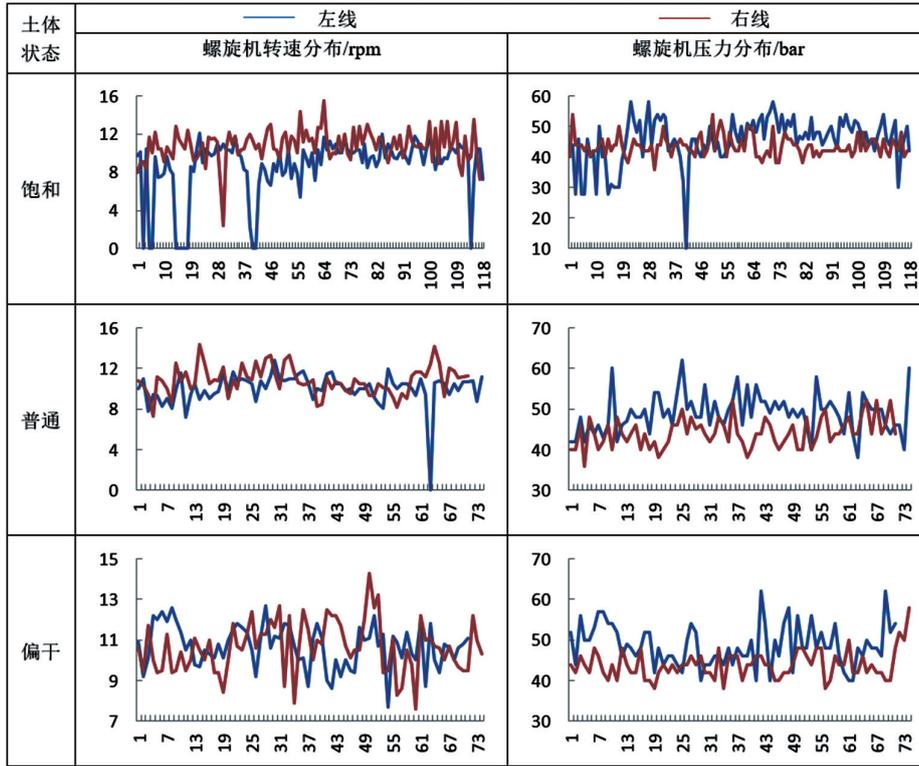


图3 螺旋输送机主要参数统计结果
Fig.3 Statistical results of main parameters of screw conveyor

3 渣土改良方案优化

3.1 方案优化需求

综上所述，认为以 3.5%泡沫为主，辅以适量的水进行渣土改良的方式，开挖效率及适应性等各方面均存在较大优势，故剩余区间均采用此改良方式。但由于掘进试验显示，现改良方案下渣土仍偏稀，达不到精准控制的需求，故引入人工神经网络 (Artificial Neural Networks, ANNs)^[12-15] 技术，通过深入学习样本数据来抽取其隐含的因果关系，建立改良剂与其他参数间的非线性模型，探索更精确的渣土改良方案。

3.2 神经网络简介

人工神经网络是模仿人类神经网络行为特征，进行分布式并行信息处理的算法数学模型。它通过调整内部大量节点之间的相互关系，达到信息处理的目的。其中，Back Propagation (BP) 神经网络因具有强大的学习能力和高速寻找优化解的能力，近年来被广泛用于工程领域^[16-17]。

3.3 神经网络模型建立

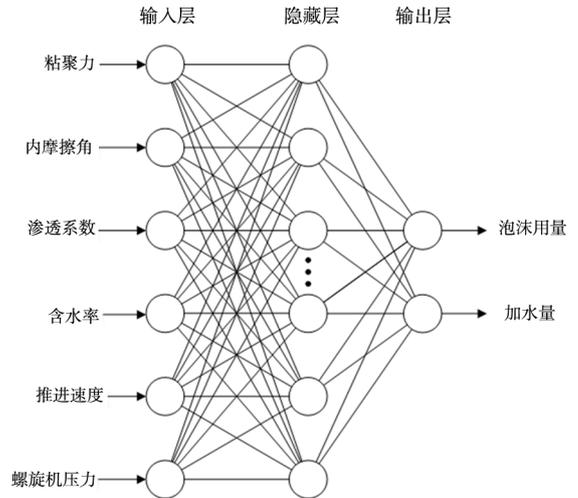


图4 渣土改良 BP 神经网络模型
Fig.4 BP neural network model for soil conditioning

由于渣土改良主要依据地层条件和掘进需求，结合司机操作逻辑，避免数据种类过多导致的过拟合，输入参数为粘聚力、内摩擦角、渗透系数、含水率、推进速度和螺旋机压力，输出值为泡沫用量和加水量，以此构建如图 4 所示的 BP 神经网络。

岩土力学

络模型^[12-17]。考虑到之前的渣土改良方案导致渣土偏稀，故在左线 865~1227 环和右线第 600~786 环重新采集掘进参数，以此作为数据库，并要求减少一定的加水量，使螺旋机压力尽量维持在 50 bar~60 bar。因输入参数数量 IN 为 6，故根据经验公式隐含层节点数 (HN) = 2×IN+1，则隐含层节点数取 13。传递函数分别为 Sigmoid 函数和 Purelin 函数，训练参数设置如下：学习速率 0.01，训练次数 (epoch) 200，精度目标值 1e-3。

3.4 基于神经网络优化渣土改良方案

基于地层类型、期望的推进速度和螺旋机压力对渣土改良进行拟合分析，结果如表 3 所示。

表 3 渣土改良拟合分析结果
Table 3 Fitting analysis results of soil conditioning

| 地层类型 | 螺旋机压力/bar | 推进速度 / (mm/min) | 泡沫剂用量/L | 加水量/m ³ | | |
|------|-----------|-----------------|---------|--------------------|---------|--------|
| 饱和地层 | 50 | 80 | 26.4083 | 0.6629 | | |
| | | 100 | 28.0946 | 0.8242 | | |
| | | 120 | 32.4286 | 0.8059 | | |
| | | 80 | 27.1955 | 0.5180 | | |
| | | 100 | 28.2591 | 0.5853 | | |
| | | 120 | 30.7080 | 0.6874 | | |
| | 60 | 80 | 27.3118 | 0.4360 | | |
| | | 100 | 28.7244 | 0.4683 | | |
| | | 120 | 32.1039 | 0.4843 | | |
| | | 普通地层 | 50 | 80 | 21.9133 | 1.6208 |
| | | | | 100 | 24.9661 | 1.7439 |
| | | | | 120 | 27.2023 | 1.9274 |
| 55 | 80 | | 23.5942 | 1.4137 | | |
| | 100 | | 25.0860 | 1.4661 | | |
| | 120 | | 27.7550 | 1.7188 | | |
| 60 | 80 | 22.5252 | 1.1817 | | | |
| | 100 | 26.3765 | 1.3393 | | | |
| | 120 | 27.6107 | 1.4949 | | | |
| | 偏干地层 | 50 | 80 | 18.1933 | 2.3992 | |
| | | | 100 | 22.1378 | 2.5927 | |
| | | | 120 | 23.9247 | 2.6928 | |
| 55 | | 80 | 19.5111 | 2.2362 | | |
| | | 100 | 21.8364 | 2.2798 | | |
| | | 120 | 25.0785 | 2.3908 | | |
| 60 | 80 | 20.1678 | 2.0827 | | | |
| | 100 | 22.5171 | 2.2983 | | | |
| | 120 | 24.8503 | 2.4077 | | | |

3.5 效果验证

基于神经网络拟合分析结果制定渣土改良方案，在本区间右线第 800~1394 环和冬青街站~南流村站区间盾构施工中得到了更加合理的掘进参数指

标：掘进速度稳定维持在 85 mm/min~120 mm/min，平均推进速度约 104 mm/min，螺旋输送机压力控制在 48 bar~64 bar，出渣效率控制在 1~1.1，再未发生过喷涌，出渣连续、分散、不滑落，地表沉降控制较之前更理想，见图 5。并且使原先单线每天 10~12 环的掘进速度，达到 15~20 环，大幅提升掘进效率。

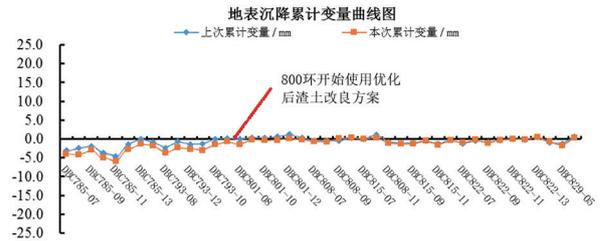


图 5 渣土改良优化前后地表沉降控制对比
Fig. 5 Comparison of surface settlement control before and after optimization of soil conditioning

4 结论

(1) 以 3.5%泡沫为主，辅以适量的水进行渣土改良，比以水为主的渣土改良方式推进速度提升约 17.8%，开挖效率和适应性等也全面提升。

(2) 通过 BP 神经网络拟合分析，得到了更加精确的渣土改良方案，使得使得后续掘进过程中，平均推进速度达到 104 mm/min，螺旋输送机压力稳定维持在 48 bar~64 bar，出渣效率 1~1.1，再未发生过喷涌，穿越各风险源及地表沉降控制理想。

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: 551-690.
 [2] 陈馈, 洪开荣, 吴学松. 盾构施工技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
 [3] 王树英, 刘朋飞, 胡钦鑫, 等. 盾构隧道渣土改良理论与技术研究综述 [J]. 中国公路学报, 2020, 33 (5): 8-34.
 [4] 杨益, 李兴高. 盾构刀盘结泥饼问题研究进展 [J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16 (S2): 1030-1038.
 [5] LEINALA T, GRABINSKY M, KLEIN K. A review of soil conditioning agents for EPBM tunneling [C]. Proceedings of 17th Tunnelling Association of Canada Conference. Toronto, Canada: [s. n.], 2002.

(下转第 42 页)

岩土力学

案后,地基位移特征点湿陷沉降位移大幅度降低,证明经拟定的方案处理后,湿陷沉降改善明显,满足了后期变形控制要求。

参 考 文 献

- [1] 李昌镐,侯精明,刘海松,等.湿陷性黄土地区海绵城市建设湿陷性风险模拟评估研究[J].水资源与水工程学报,2021,32(1):220-225.
- [2] 吴会东.山西北部地区黄土湿陷性快速判定方法研究[J].铁道工程学报,2021,38(2):35-40.
- [3] 刘挺,刘东顺,张平顺,等.强夯+CFG桩复合地基在具有腐蚀性的湿陷性黄土地区的应用[J].建筑结构,2020,50(23):114-117+50.
- [4] 刘明军,许东宇,张伟,等.素土挤密桩消除湿陷性黄土湿陷性研究[J].建筑结构,2021,51(S2):1640-1644.
- [5] 许萍,苗贺朝,邵生俊,等.不同三轴应力条件下湿陷性黄土增湿变形特性研究[J].应用力学学报,2021,38(5):1966-1973.
- [6] 王丽琴,刘鑫,王正,等.试样厚度对室内测定黄土湿陷性指标的影响[J].地震工程学报,2021,43(5):1190-1196.
- [7] 王雪艳.碎石桩加固深厚湿陷性黄土地基的试验研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(4):1164-1170.
- [8] 陈天镭,李旭东,鲁海涛,等.强自重湿陷性黄土湿陷范围浸水试验研究[J].建筑结构,2021,51(15):131-134.
- [9] 史宝东,梁庆国,赵涛,等.场地黄土扰动前后的湿陷性与其物性指标的关系[J].地震工程学报,2021,43(4):977-982+988.
- [10] 张延杰,王旭,梁庆国,等.浸水条件下湿陷性黄土地基群桩基础承载特性模型试验研究[J].岩土工程学报,2021,43(S1):219-223.
- [11] 尹今朝,胡同.湿陷性黄土力学性质与裂隙发展干湿循环效应[J].人民黄河,2022,44(2):143-146+152.
- [12] 赵兵朝,孙浩,郭亚欣,等.湿陷性黄土覆盖区煤层开采地表裂缝发育规律研究[J].矿业研究与开发,2021,41(6):105-110.
- [13] 王兆辉,陈天镭.湿陷性黄土地基中主动减小负摩阻力新桩型的试验研究[J].工业建筑,2021,51(5):151-157+144.
- [14] 郭倩怡,王友林,谢婉丽,等.黄土湿陷性与土体物性指标的相关性研究[J].西北地质,2021,54(1):212-221.
- [15] 黄雪峰,韦林辉,张吉禄,等.螺杆桩处理湿陷性黄土挤密效果分析与评价[J].兰州理工大学学报,2021,47(1):122-128.
- [6] 彭磊,何文敏,杨江朋,等.土压平衡盾构用复合式泡沫发生器及其产泡特性的研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(12):3199-3207.
- [7] 王明胜,路军富,罗奥雷.粉质黏土地层隧道盾构施工渣土改良剂试验[J].铁道工程学报,2020,37(5):74-79.
- [8] ZHAO S S, LI S C, WAN Z E, et al. Effects of anti-clay agents on bubble size distribution and stability of aqueous foam under pressure for earth pressure balance shield tunneling [J]. Colloid and Interface Science Communications, 2021, 42:
- [9] WAN Z E, LI S C, YUAN C, et al. Soil Conditioning for EPB Shield Tunneling in Silty Clay and Weathered Mudstone [J]. International Journal of Geomechanics, 2021, 21(9):
- [10] 张迅,贺雄飞.泡沫剂对土压平衡盾构主要掘进参数的影响研究[J].现代隧道技术,2021,58(3):176-181.
- [11] 王洪新,陈大羽,商涛平,等.土压平衡盾构渣土改良的合理坍塌度研究[J].地下空间与工程学报,2021,17(1):148-157+188.
- [12] 周志华.机器学习[M].北京:清华大学出版社,2016. ZHOU zhihua. MACHINE LEARNING [M]. 北京:清华大学出版社,2016.
- [13] 陈明.MATLAB神经网络原理与实例精解[M].北京:清华大学出版社,2013:1-307.
- [14] 张德丰.MATLAB R2020a神经网络典型案例剖析[M].北京:电子工业出版社,2021:14-243.
- [15] Michael A. Nielsen. Neural Networks and Deep Learning. Determination Press, 2015.
- [16] 黄靓钰,阳军生,张聪,等.基于BP神经网络的水下岩溶地层盾构掘进参数预测与分析[J].土木工程学报,2020,53(S1):75-80. 2020. s1. 013.
- [17] 李超,李涛,李正,等.基于BP神经网络的复合地层盾构掘进参数预测与分析[J].土木工程学报,2017,50(S1):145-150. 2017. s1. 026.

(上接第32页)