

复杂富水地层盾构掘进速率评价及预测方法研究

徐霖 曹伟光 李向娟

北京市政路桥股份有限公司, 北京 100068

[摘要]富水地层由于地质情况复杂多变,影响盾构机的掘进性能。为了分析该种地层种盾构隧道掘进性能,预测掘进速率,以绍兴市轨道交通1号线玉山路站—阳和路站区间盾构工程为例,首先分析了掘进速率在掘进过程中的变化,研究地层物理力学参数对盾构掘进速率的影响。最后基于径向基函数模型,对富水地层中盾构掘进速率进行预测。研究发现,黏土和粉质黏土地层在掘进后期会引发刀盘结“泥饼”,降低盾构机掘进速率;含黏性土圆砾地层透水性良好,富含承压水,掘进速率较黏土和粉质黏土地层高;掘进速率与黏聚力 c 、塑性指数 I_p 、地基承载特征值 f_{ak} 和标贯锤击数 N 整体呈负相关关系,而与垂直渗透系数 k_v 呈正相关关系;存在最优含水率使得掘进速率最高。所提出的径向基函数模型可有效提高富水地层盾构机掘进速率的预测精度。研究成果将为相关地层情况下盾构隧道施工方案设计提供参考。

[关键词]富水地层;盾构机;掘进速率;掘进参数;径向基函数

DOI: 10.33142/sca.v6i12.10632

中图分类号: U231.3

文献标识码: A

Research on Evaluation and Prediction Method of Shield Tunneling Speed in Complex Water Rich Strata

XU Lin, CAO Weiguang, LI Xiangjuan

Beijing Municipal Road and Bridge Co., Ltd., Beijing, 100068, China

Abstract: Due to the complex and variable geological conditions, the excavation performance of shield tunneling machines is affected by the rich water strata. In order to analyze the excavation performance of this type of shield tunnel and predict the excavation rate, taking the shield tunneling project between Yushan Road Station and Yanghe Road Station on Shaoxing Metro Line 1 as an example, the variation of excavation rate during the excavation process was first analyzed, and the influence of physical and mechanical parameters of the strata on the shield tunneling rate was studied. Finally, based on the radial basis function model, the shield tunneling speed in rich water strata is predicted. Research has found that clay and silty clay layers can cause cutterhead formation "mud cake" in the later stage of excavation, reducing the excavation speed of shield tunneling machines; The stratum with cohesive soil and round gravel has good permeability and is rich in pressurized water. The excavation rate is higher than that of clay and silty clay layers; The excavation speed is negatively correlated with the cohesive force c , plasticity index I_p , foundation bearing characteristic value f_{ak} , and standard penetration hammer number N , while positively correlated with the vertical permeability coefficient k_v ; There exists an optimal moisture content that maximizes the excavation rate. The proposed radial basis function model can effectively improve the prediction accuracy of shield tunneling machine excavation speed in water rich strata. The research results will provide reference for the design of shield tunnel construction schemes under relevant geological conditions.

Keywords: water rich strata; shield tunneling machine; excavation rate; excavation parameters; radial basis function

富水地层广泛分布于我国各地区河流、湖泊和海洋沿岸。该地层地下水位高,含有丰富的孔隙潜水,孔隙承压水、岩溶水和基岩裂隙水。随着我国现代交通的飞速发展,在公路、铁路、市政等领域的隧道工程开挖中,盾构机因其良好的工作性能、广泛的应用范围和较高的工作效率,已逐渐应用于各种地质情况下的隧道工程中。当隧道穿越富水地层时,由于地下水的作用,盾构机掘进性能将受到很大影响。因此,有必要对富水地层盾构隧道掘进性能进行评价和预测。

目前,国内外学者对盾构机的掘进性能作出了广泛研究。掘进性能表现为掘进速率、施工进度、掘进机利用率和刀具磨损^[1-4]。学者通过理论分析、现场调研、室内试

验和数值模拟等方法,研究了不同地质情况下的盾构机掘进性能。在理论分析方面,目前较为经典的滚刀磨损预测模型为科罗拉多矿业学院模型(CSM)^[5]、挪威科技大学模型(NTNU)^[6]、上海交通大学模型^[7]、东北工学院模型^[8]。该模型给出了刀具受力的理论计算公式,公式中考虑岩石物理力学性质和刀具几何参数。Yagiz^[9]对CSM模型进行改进,使模型可进一步适用于节理岩体。该模型考虑了节理间距、节理倾角和粗糙度等参数对滚刀受力的影响。李刚等^[10]根据SCM模型,提出了一种基于能量分析的岩石隧道掘进机(Tunnel boring machine, TBM)破岩效率预测模型。针对海底隧道,苏文德^[11]提出了泥水平衡盾构掘进过程中最小带压进仓压力的理论计算方法,该方法综合考虑

地下水压力、土压力和渗流力,为海底泥水盾构带压进仓控制提供参考。在现场研究方面,杨旻等^[12]以南宁轨道交通2号线三十三中-苏卢站盾构掘进区间盾构隧道为例,对富水圆砾地层中土压平衡盾构的刀盘推力、刀盘扭矩和注浆压力展开分析,建议圆砾地层土舱压力最优值根据Terzaghi 松动土压力和静止土压力计算值。王柳善等^[13]结合成都市某地铁盾构区间富水卵漂石地质条件下盾构掘进参数和掘进速率进行研究,根据统计分析结果,建议掘进过程中适当降低土舱压力,提高贯入度。GONG 和 ZHAO^[14]对新加坡某花岗岩隧道的现场掘进参数进行非线性回归分析,给出了评估岩体掘进性能的经验公式,该公式中考虑了岩石单轴抗压强度、岩石脆性指数、节理数量和倾角。李杰^[15]等基于穗莞深城际轨道交通 SZH-3 标段虎门商贸城站-长安厦边站区间盾构隧道掘进数据,对刀盘推力、刀盘转速、刀盘扭矩、排土量、土舱压力与掘进速度进行多元回归分析,建立掘进速度的直接多元非线性预测模型和非线性化处理后的多元线性预测模型。Hassanpour^[16]等使用 CSM、NTNU 和 Q_{TBM} 预测模型,根据现场地质参数和机械参数,分析了 Karaj 水利隧道在掘进过程中 TBM 的掘进速率和破岩效率,并讨论了岩体参数的影响,如节理间距、节理倾角和岩石质量指标 RQD。室内试验方面,Jeong^[17]等开展了滚刀静力贯入试验,提出评价 TBM 掘进性能的新指标:峰值荷载指数和平均荷载指数。但是,当盾构机掘进至富水地层中时,地下水的影响不可忽视,此外,地层中包括黏土、砂、砾石等,地质情况复杂,盾构机的掘进性能受到很大影响,难以进行有效预测,目前相关研究较少。

本文以绍兴市轨道交通 1 号线玉山路站-阳和路区间盾构工程为例,分析了地质情况对掘进速率的影响,通过径向基函数模型,给出了复杂富水地层掘进速率预测方法。为相似地层下盾构隧道的掘进方案制定提供参考。

1 工程概况

绍兴轨道交通 1 号线包括三个盾构区间,即玉山路站~阳和路区间、阳和路站~鉴湖镇站区间及鉴湖镇站~芳泉路区间,如图 1 所示。其中,玉山路站~阳和路站盾构区间位于绍兴越城区,区间里程为 ZK42+372.976-ZK43+584.241。该区间隧道主要穿越黏土地层、粉质黏土地层、含黏性土圆砾地层、含砂粉质黏土地层和含黏性土砾砂地层,见图 2。地下水类型主要是第四纪松散岩类孔隙潜水,孔隙承压水、岩溶水和基岩裂隙水。其中,含黏性土圆砾和含黏性土砾砂地层透水性强,富含承压水,水位埋深在地表下 2.8m。

本隧道工程采用盾构法施工,使用土压平衡盾构掘进,盾构刀盘开挖直径 6.98m,为辐条与面板式复合刀盘,刀盘上布置有切削刀 40 把,边缘切削刀 36 把,焊接型切削刀 12 把,焊接型导向刀 16 把,焊接型先行刀 35 把、圆

环保护刀 124 把、加泥喷嘴保护刀 6 把。刀盘驱动功率 1120kW,额定扭矩 7586kN·m,最大总推力 48000kN。



图 1 玉山路站-阳和路区间线路图



图 2 玉山路站-阳和路区间地质剖面图

2 地质情况对盾构掘进速率的影响分析

工程中,评价盾构掘进性能的一个重要指标为掘进速率,定义为盾构机持续工作时,单位时间内的掘进距离。为了分析地质情况对盾构掘进性能的影响,本节将分析盾构机掘进过程中掘进速率随环号的变化。进一步地,分析了地层几种典型的物理力学参数与掘进速率之间的关系,包括黏聚力 c 、塑性指数 I_p 、含水率 ω_0 、地基承载特征值 f_{ak} 、标贯锤击数 N 和垂直渗透系数 k_v 。

掘进速率随环号的变化如图 3 所示。根据监测结果,在 1-123 环,盾构机掘进至黏土和粉质黏土地层中,在掘进过程中,粉质黏土的相对含量逐渐增加,由于其产生的泥浆流动性良好,黏性逐渐降低,因此盾构机掘进速率持续增加。当掘进至含黏性土圆砾地层时,在刀盘推力和扭矩作用下,圆砾易从地层中分离出来,且在承压水的冲刷作用下,刀盘表面没有黏附泥浆,因此盾构机可保持较高速率掘进,掘进效率高。在粉质黏土+含砂粉质黏土+含黏性土砾砂复合地层中,地层岩性变化显著,为了保持盾构机平稳掘进,减小了刀盘推力,因此掘进速率突降。在 751-1001 环,刀盘结“泥饼”问题导致刀具与掌子面无法直接接触,刀具切削土体效率降低,因此掘进速率减小。

由掘进速率的变化可知,黏性土产生的泥浆黏性大,排渣不利。还易引发刀盘结“泥饼”,盾构机掘进效率低。而在含有黏性土圆砾地层中,在地下水的作用下,泥浆黏性低,刀盘不易黏附泥浆,促进掘进效率的增加。这是富水地层与普通黏土地层的主要区别。

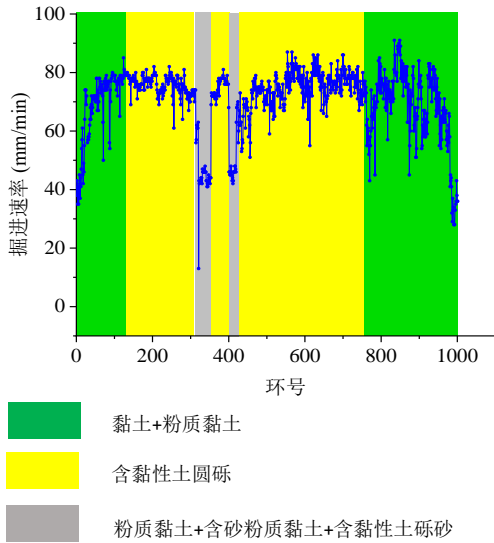


图3 盾构机掘进过程中掘进速率随环号的变化

为了进一步分析地质情况对盾构机的掘进速率影响,分别选用黏聚力 c 、塑性指数 I_p 、含水率 ω_0 、地基承载特征值 f_{ak} 、标贯锤击数 N 和垂直渗透系数 k_v , 分析地层物理力学参数与掘进速率之间的关系。根据隧道掘进线路所穿越的地层情况,将地层进一步细分为 52 个区间,计算出每个区间内的地层物理力学参数平均值。对应地,计算盾构机在掘进至各区间的掘进速率平均值,将各地层中掘进速率与地层物理力学参数绘制成散点图,结果见图 4。具体分析如下:

(1) 掘进速率与黏聚力 c 和塑性指数 I_p 成反比。 c 反映土体的黏性程度, I_p 为土体处于可塑性状态的含水率范围, I_p 越大,土颗粒越细,结合水含量越高。土体黏性和结合水含量的提高会引起泥浆流动性减弱,不利于排渣。此外,泥浆易黏附于刀盘表面,引发结“泥饼”问题,因此掘进效率降低。

(2) 掘进速率随着含水率的增加先增加后降低,存在最优含水率,使得盾构机掘进速率最高。通过地质勘查发现,粉质黏土、含黏性土粉砂含水率最低。而素填土、黏土透水性差,地下水以孔隙水的形式储存于该种地层中,因此地层含水率高。含黏性土圆砾、含黏性土砾砂透水性强,土体内部水分较少,含水率介于上述地层之间。含水率较低的土层中,掘进产生的渣土流动性差,易出现“滞排”,导致土舱压力升高,为此,盾构机掘进速率降低;但是,在含水率较高的素填土、黏土层中,黏性较高,会引发刀盘结“泥饼”现象,因此掘进速率较低。只有在含黏性土圆砾、含黏性土砾砂中,含水率适中,盾构机切削产生的渣土与承压水混合后流动性好,掘进效率高。

(3) 掘进速率随地基承载力特征值和标贯锤击数的增加而降低。地基承载力特征值和标贯锤击数反映出地层强度特征,地基承载力特征值和标贯锤击数越大表明地层

强度高,盾构机切削所需要的推力更大,掘进效率低。

(4) 掘进速率与垂直渗透系数呈正相关关系。在盾构机所穿越的富水地层中,含黏性土圆砾、含黏性土砾砂透水性强,垂直渗透系数较粉质黏土、含黏性土粉砂、素填土、黏土等地层高。地下水的充分补给保证了渣土的流动性,在承压水的冲刷作用下,刀盘表面不易结泥,因此盾构机可保持较高的速率掘进。

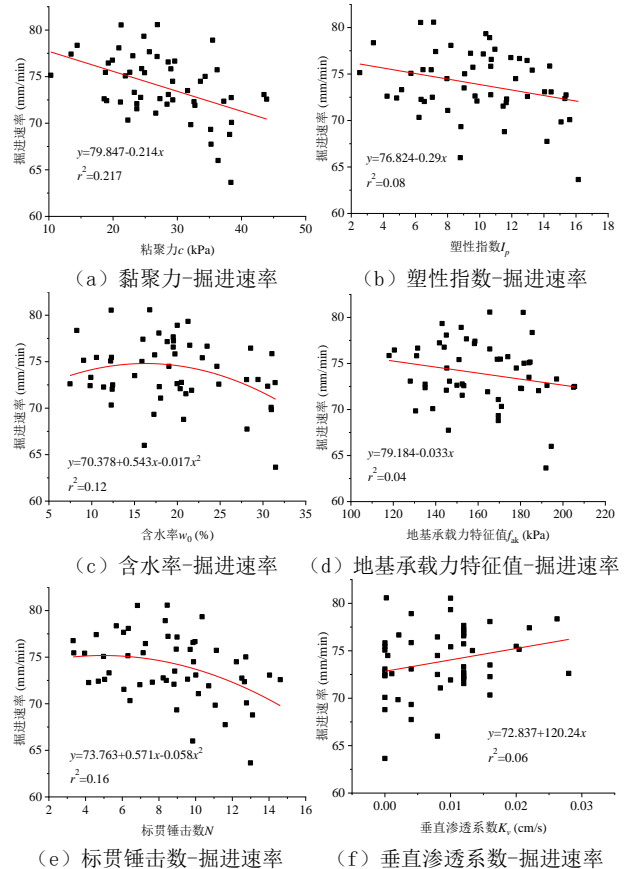


图4 地层力学参数对盾构掘进速率的影响

3 基于径向基函数的盾构掘进预测模型研究

径向基函数 RBF (radial basis function) 是应用最为广泛的代理模型之一,它以某一径向函数作为基,通过基函数的线性组合来预测函数值。RBF 模型有很强的非线性响应能力,具有良好的鲁棒性和全局最优特性,在解决小样本问题时计算优势显著,目前 RBF 已经被成功应用于插值与逼近、构造神经网络等方面。因此,本节采用 RBF 模型建立第 3 节中的物理力学参数与掘进速率之间的关系,对盾构机的掘进速率进行预测。

RBF 模型是一个寻求 n 组输入变量 x 和输出响应 y 之间关系的回归模型。RBF 的一般表达式为:

$$y(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i \Phi(r) \quad (1)$$

其中 ω_i 是第 i 个基函数的系数; $\Phi(r)$ 为径向函数; r

为待测点 x 与第 i 个样本点 x_i 之间的欧氏距离,即 $r=\|x-x_i\|$ 。

RBF 模型中可以选用不同的基函数 $\Phi(r)$, 本文中采用常见的薄板样条函数, 其形式如下:

$$\Phi(r)=r^2 \ln(r) \quad (2)$$

由于可能未知参数个数大于方程个数, 为求解上述等式, 引入正交条件:

$$\sum_{i=1}^m \omega_i p_j(x_i)=0 \quad (3)$$

因此, RBF 模型可以进一步地表示为:

$$y(x)=\sum_{i=1}^m \omega_i (\|x-x_i\|)^2 \ln(\|x-x_i\|) + \sum_{j=1}^k \lambda_j p_j(x) \quad (4)$$

其中 $p_j(x)$ 是线性多项式函数, $p_j(x)=[1, x_1, x_2, \dots, x_m]$, λ 为未知量。利用等式 (3) 和 (4), 可求解未知向量 ω 和 λ , 得到相应的 RBF 模型函数。

采用上述 RBF 模型建立黏聚力 c 、塑性指数 I_p 、含水率 ω_0 、地基承载特征值 f_{ak} 、标贯锤击数 N 和垂直渗透系数 K_v 与富水地层盾构隧道掘进速率之间的响应关系。本文共采用了 52 组实测样本, 将该样本集按照 4:1 的比例分为训练样本和测试, 样本集中利用训练样本建立 RBF 模型, 并利用测试样本对 RBF 模型进行精度评估。选用以下几个参数作为模型精度检验指标有: 判定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、相对平均绝对误差 RAAE, 其表达式分别为:

$$R^2=1-\frac{\sum_{i=1}^n (y_i-\hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i-\bar{y}_i)^2} \quad (5)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i-\hat{y}_i)^2} \quad (6)$$

$$RAAE=\frac{\sum_{i=1}^n (y_i-\hat{y}_i)}{n * STD} \quad (7)$$

式中 y_i 表示样本点所对应的实际输出结果, \bar{y}_i 为输出响应实际结果的平均值, \hat{y}_i 为 RBF 模型的预测值, STD 代表实际输出值的标准差。指标 R^2 整体地反映了预测模型的精度, 当值越接近于 1, 则模型越精确; RAAE 也是一个全局精度指标, RAAE 的值越小, 模型精度越高; RMAE 则是一个局部指标, 它描述的是设计空间内某个局部区域的误差, 故它的值越小越好。

RBF 模型测试样本值与模型的预测结果对比如图 5 所示, 可以观察到, 测试样本节点大多数位于 1:1 参考线附近, 表明 RBF 模型预测的富水地层盾构隧道掘进速率与样本实际速率较为接近。RBF 模型模型精度检验指标如表

1 所示, 由表可知, 此时模型 R^2 约为 0.73, RAAE 不超过 0.4, RMSE 小于 1.85(mm/min), 表明富水地层盾构隧道掘进速率预测值与实际值误差较小。

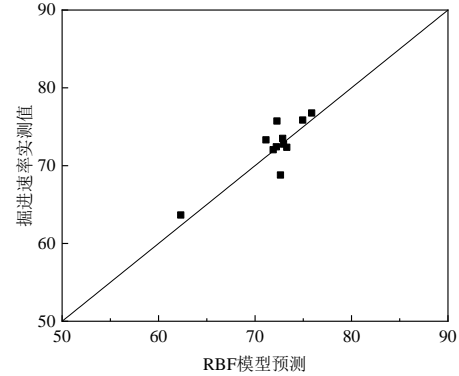


图 5 RBF 预测掘进速率与实际掘进速率

表 1 RBF 模型精度检验指标结果

R^2	RMSE	RAAE
0.7293	1.8159	0.3839

4 结论

本文基于轨道交通 1 号线玉山路站一阳和路站区间盾构工程, 分析了富水地层中盾构机开挖隧道的掘进性能。首先分析掘进速率在盾构机掘进过程中的变化, 给出了黏聚力 c 、塑性指数 I_p 、含水率 ω_0 、地基承载特征值 f_{ak} 、标贯锤击数 N 和垂直渗透系数 k_v 与掘进速率的关系。最后基于径向基函数 RBF, 对掘进速率进行预测。研究结论如下:

(1) 圆砾强度高于黏土和粉质黏土, 且透水性强, 富含承压水, 因此盾构机在该地层中掘进时的推力提高; 黏土和粉质黏土地层中, 刀盘节“泥饼”会引起刀盘推力、扭矩和土舱压力增加。

(2) 含黏性土圆砾地层中, 圆砾易从地层中分离出来, 且在承压水的冲刷作用下, 刀盘表面没有黏附泥浆, 盾构机掘进效率高。

(3) 掘进速率随着黏聚力 c 、塑性指数 I_p 、地基承载特征值 f_{ak} 和标贯锤击数 N , 的增加呈整体降低趋势, 而随垂直渗透系数 k_v 的增加而提高。存在最优含水率使得掘进速率最高。

(4) 基于径向基函数, 可得出地层各物理力学参数与掘进速率之间的关系, 进而预测富水地层盾构隧道掘进效率。预测结果表明, 本模型可较为有效地预测掘进速率。

[参考文献]

[1] 刘泉声, 刘建平, 潘玉丛, 等. 硬岩隧道掘进机性能预测模型研究进展 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(1): 2766-2786.
[2] 龚秋明, 赵坚, 张喜虎. 岩石隧道掘进机的施工预测模型 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(2): 4709-4714.
[3] 王旭, 李晓, 李守定. 关于用岩体分类预测 TBM 掘进速

- 率 AR 的讨论[J]. 工程地质学报, 2008, 16(4): 470-475.
- [4] 赵海鸣, 舒标, 夏毅敏, 等. 基于磨料磨损的 TBM 滚刀磨损预测研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(4): 152-158.
- [5] Ozdemir L. Development of Theoretical Equation for Predicting Tunnel Boreability[D]. Golden: Colorado School of Mines, 1977.
- [6] Bruland A. Hard rock tunnel boring advance rate and cutter wear[D]. Trondheim: Norwegian Institute of Technology, 1999.
- [7] 张照煌. 全断面岩石掘进机盘形滚刀寿命管理理论及技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.
- [8] 张照煌. 全断面岩石掘进机及其刀具破岩理论[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [9] Yagiz S. Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM model basic penetration for hard rock tunneling machines [D]. Golden: Colorado School of Mines, Doctorial Thesis, 2002.
- [10] 李刚, 于天彪, 费学婷, 等. 一种基于 CSM 模型的 TBM 刀盘比能预测方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2012, 33(12): 1766-1769.
- [11] 苏文德, 周建军, 彭正勇. 海底泥水盾构最小带压进仓压力计算[J]. 人民长江, 2019, 50(2): 127-130.
- [12] 杨昉, 谭忠盛, 彭斌, 等. 富水圆砾地层土压平衡盾构掘进参数优化研究 [J]. 土木工程学报, 2017, 50(1): 94-98.
- [13] 王柳善, 杨龙才, 孟庆明. 富水卵漂石地层土压平衡盾构施工参数研究 [J]. 华东交通大学学报, 2015, 32(6): 14-19.
- [14] Gong Q M, Zhao J. Development of a rock mass characteristics model for TBM penetration rate prediction[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2009, 46(1): 8-18.
- [15] 李杰, 张斌, 付柯, 等. 基于现场掘进数据的复合地层盾构掘进性能预测方法研究 [J]. 现代隧道技术, 2019, 56(4): 97-104.
- [16] Hassanpour J, Rostami J, Khamehchiyan M. TBM Performance Analysis in Pyroclastic Rocks: A case history of Karaj water conveyance tunnel[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010(43): 427-445.
- [17] Jeong H Y, Cho J W, Jeon S, et al. Performance assessment of hard rock TBM and rock boreability using punch penetration test[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016(49): 1517-1532.
- 作者简介: 徐霖 (1971.7—), 本科学历, 工程师, 主要从事道路与桥梁工程施工及管理工作。