

富水圆砾地层中泥水平衡盾构主要掘进参数 K-means聚类及控制分析

吕祎晔¹,裴利华^{1,2},林东²,杨醒宇²,桂跃^{1*}

(1.昆明理工大学 建筑工程学院,云南 昆明 650051;2.中铁四院集团西南勘察设计有限公司,云南 昆明 650504)

摘要:新建盾构隧道近距离穿越容易引起临近既有隧道产生变形,如何依据地层条件合理设置掘进参数以控制环境变形至关重要。该文采用K-means聚类算法分析掘进参数和地表沉降之间的关联性,通过误差平方和(E_{SSE})对聚类质量进行度量并选取了最佳聚类簇数,对试验段现场监测数据进行聚类分析,得到3个聚类中心,最终提出了富水圆砾地层泥水平衡盾构施工最优掘进参数组合。结合实际下穿段参数设定值和既有隧道变形情况对最优参数组合进行了验证。结果表明:①富水圆砾地层中泥水平衡盾构施工最优的掘进参数组合为:平均扭矩2 005 kN·m、推力14 380 kN、掘进速度17.5 mm/min、进排泥浆流量差57 m³/h;②采取最优掘进参数组合后,近接下穿段既有隧道竖向变形控制在0.58 mm以内,达到了较为理想的变形控制效果。

关键词:盾构隧道;近接施工;掘进参数;K-means聚类;既有隧道沉降;参数优化

中图分类号:U455.43

文献标志码:A

K-means Clustering and Control Analysis of Main Tunneling Parameters of Mud-Water Balanced Shields in Water-Rich Round Gravel Strata

LYU Yiye¹, PEI Lihua^{1,2}, LIN Dong², YANG Xingyu², GUI Yue^{1*}

(1. Department of Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650051, China;

2. China Railway Fourth Institute Group Southwest Survey and Design Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650504, China)

Abstract: It is important to set reasonable tunneling parameters according to the ground conditions to reduce the deformation of existing tunnels, since the close crossing of new shield tunnels is likely to cause deformation in the adjacent existing tunnels. The K-means clustering algorithm was proposed to explore the correlation between tunneling parameters and surface settlement, and the optimal number of clusters was selected by using the sum of squared errors (E_{SSE}) to measure the clustering quality. Through cluster analysis on the field monitoring data of the test section, three cluster centers were obtained. Finally, the optimal combination of tunneling parameters for mud-water balanced shield construction in water-rich round gravel strata was proposed. The optimal combination of tunneling parameters was verified by combining the parameter setting values of the actual underpass section and the deformation of the existing tunnel. The results show that ① the optimal combination of tunnelling parameters for mud-water balanced shield construction in water-rich round gravel strata is an average torque of 2 005 kN·m, a thrust of 14 380 kN, a tunnelling speed of 17.5 mm/min, and a difference in inlet and outlet mud flow of 57 m³/h; ② after the optimal combination of tunnelling parameters is adopted, the vertical deformation of the existing tunnel near the underpass section is controlled within 0.58 mm, which achieves a relatively ideal deformation control effect.

Keywords: shield tunnel; proximity construction; excavation parameter; K-means clustering; existing tunnel settlement; parameter optimization

收稿日期:2024-12-02(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52068039);中铁四院重点研发项目(编号:QESP805R02)

作者简介:吕祎晔,男,硕士研究生.E-mail:yyyl1030@126.com

*通信作者:桂跃,男,博士,教授.E-mail:gydrgui@kmust.edu.cn

0 引言

新建隧道掘进扰动土体引起的应力重分布易导致周边既有隧道结构损伤,威胁其安全运营^[1]。在此类高风险近接工程中,合理设定掘进参数是控制风险的主要手段^[2]。

针对盾构掘进参数的设定,已有学者进行了有价值的研究^[3-4]。如杨旻等^[5]对富水圆砾地层段与圆砾泥岩复合地层段土压平衡盾构掘进参数进行了对比分析,并对圆砾地层土仓压力取值范围的计算方法进行了探讨;颜波等^[6]比较全面地论述了盾构施工各项掘进参数的理论取值依据;马文辉等^[7]以北京南水北调东干渠工程为依托,通过分析既有隧道沉降现场监测数据与盾构施工参数,讨论了左右线既有隧道沉降存在差异的原因,并总结了控制沉降的施工参数经验。

然而,针对下穿既有隧道的近接工程,盾构掘进参数的研究则较少。孙永玉等^[8]结合上海某双层四线叠交隧道工程,提出了软土地区盾构隧道近距离下穿既有隧道施工参数的分区设定方法;李磊等^[9]基于中国首例三层四线叠交的特殊工况,发现下穿施工后的既有隧道沉降随注浆压力比减小而增大;Zhang等^[10]提出了既有隧道沉降预测的简化方法,并对多线推进主要参数的设定提出建议。

已有关于掘进参数的研究,多集中于成本更低的土压平衡盾构施工。从地层适应性来看,泥水平衡盾构具有土层适应性强、对周围土体影响小等优点^[11],更适用于富水地层中近距离下穿既有隧道此类施工难度大、风险高的近接工程。从分析方式来看,现有分析多聚焦于穿越后的参数总结,缺乏针对同地层参数的研究来指导穿越段施工。

随着人工智能技术的发展,模糊数学、神经网络、人工智能等理论方法逐渐应用于岩土工程。研究人员尝试采用一些数据处理模型对大规模的工程数据进行处理分析。周文波等^[12]提出实时性强、有自学功能的多级神经网络数学模型,并通过遗传算法对主要施工参数进行了优化组合;卢浩等^[13]基于等宽离散和K-means聚类两种方法将大量盾构掘进过程中的历史数据离散化并综合对比,利用Apriori算法挖掘得到相关的关联规则。

现有关于人工智能技术应用于盾构掘进参数方面的研究,均侧重技术方法和算法、模型的调整与优化,但实际无法及时对现场参数的调整做出指导,施

工现场掘进参数的调整仍依赖于盾构司机的经验。如何融合人工智能技术与同地层施工经验共同设置和调整下穿段的参数,目前还缺乏相关研究。

本文以昆明某区间隧道近距离下穿既有隧道工程为背景,基于K-means聚类算法,对富水圆砾地层泥水平衡盾构施工的试验段及下穿段掘进参数进行聚类分析,得到最佳掘进参数组合,再以实际下穿掘进参数对最佳掘进参数进行验证。该研究结果可为相似地层中同类近接工程的掘进参数设定与调整提供依据。

1 工程背景及参数选取

1.1 工程背景

多线重叠隧道工程位于昆明地铁5号线昆明北站—圆通公园站区间(以下简称昆圆区间)。5号线昆圆区间线路出昆明北站后,左右线以竖向重叠形式前行,下穿运营中的轨道交通2号线白云路站—火车北站盾构区间,侧穿轨道交通4号线小菜园站—火车北站盾构区间,形成罕见的三线六洞叠交工况(图1)。5号线与2号线既有隧道的平面夹角 $85^{\circ}\sim 86^{\circ}$,竖向净距最小处约2.35 m,各洞衬砌外径均为6.2 m。下穿区间隧道穿越地层主要为富水圆砾土层,圆砾土含量达75%~80%,区间地下水位埋深2.4~5.8 m,交叠区间各线剖面位置关系如图2所示。

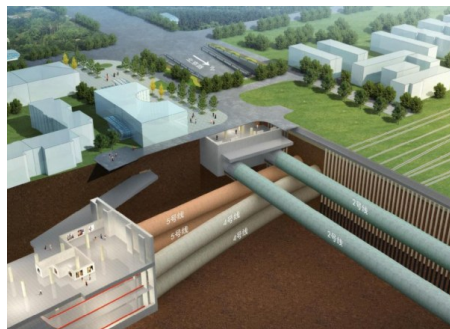


图1 多线叠交空间位置三维示意图

Figure 1 3D multi-line overlapping spatial position

根据施工现场情况,2号线距始发洞门55 m,因此施工单位确定以左线始发前30环(36 m)作为下穿2号线试验段,其后10环(12 m)作为试掘进参数验证段。待左线穿越完成后,总结施工参数及经验教训,为右线穿越提供盾构施工参数及施工经验。

在施工试验段,主要就掘进参数设定与地面沉降关系进行分析,研究此地段区间盾构推进土体沉

均仓压(0.19~0.20 MPa)、同步注浆量(4.5~5.0 m³) 4项参数,选取刀盘扭矩、推力、掘进速度、进排泥浆流量差4项调整幅度较大、具有明显区分度的掘进参数进行K-means综合聚类分析。

2 K-means聚类分析方法

聚类是数据挖掘领域中的一种重要无监督学习方法。聚类是将数据对象按照相似度进行分组,形成多个不同的簇(类),同一簇的对象相似度较大,不同簇的对象相似度较小。K-means算法是基于聚类分析思想的一种算法,也是使用最为广泛的算法之一。它具有原理简单、容易实现、收敛速度快、聚类效果好等优点,十分适合用于盾构掘进参数的多维度综合聚类分析。

K-means聚类算法的基本思想是根据样本点到 N 个初始聚类中心的欧氏距离,将样本分为 N 簇,然后分别计算 N 簇样本点的质心,并将其作为新的 N 个聚类中心。接着,重新计算样本点到新的 N 个聚类中心的欧氏距离,并将样本点重新分类到新的聚类中心。最后,重复这一迭代过程,直到准则函数收敛,从而得到最佳聚类结果。K-means聚类算法流程如图5所示。

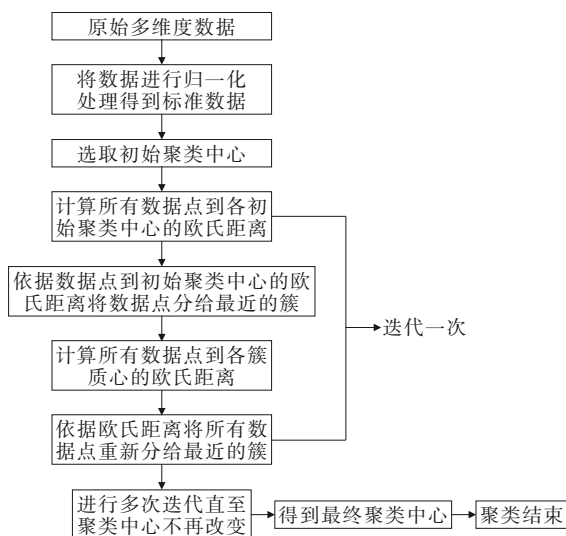


图5 K-means聚类分析流程

Figure 5 Process of K-means cluster analysis

3 试验段掘进参数聚类分析

3.1 构建归一化分析模型

对于量纲不一致的多维度数据集,在进行相关性分析和K-means综合聚类分析之前,应先对数据

进行归一化处理。本文采用Z-score归一化方法对数据集进行归一化处理。这种方法基于原始数据的均值和标准差进行数据的归一化,使得原本量纲不一致的多维度数据可以放在一起进行相关性分析和聚类分析。

本文以试验段掘进环数作为数据集矩阵的行数 i ($i=1,2,\dots,m$),同一环数的不同掘进参数指标作为数据集矩阵的列数 j ($j=1,2,\dots,n$),从而构建了数据集矩阵 U 。

$$U = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix}$$

数据集矩阵 U 中实测数据如表1所示。再依据式(1)、(2)对数据集进行标准化和归一化。

$$z_{ij} = \frac{c_{ij} - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

$$z_{\text{norm}} = \frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \quad (2)$$

式中: c_{ij} 为掘进第 i 环时第 j 个掘进参数指标的原始数值; μ 为同一掘进参数所有样本的均值; σ 为同一掘进参数所有样本的标准差。

得到代表数据集中各数据所占比重的标准矩阵 $Z: Z = (z_{ij})_{m \times n}$, ($i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$),如表2所示。

3.2 选取最佳聚类簇数

聚类簇数 K 的合理取值是保证聚类效果的关键,需要用合理的聚类目标函数对 K 的取值作出评价。可以使用误差平方和(E_{SSE})对聚类质量进行度量。当选取的簇数 K 小于样本实际簇数时, E_{SSE} 可能会迅速下降并出现明显拐点,之后,随着 K 值的继续增大, E_{SSE} 的减小趋势逐渐趋于平缓。在本工程案例中, E_{SSE} 曲线随着 K 取值的增大而变化,当 $K=3$ 时, E_{SSE} 出现明显拐点,之后,随着 K 的继续增大, E_{SSE} 的减小趋势逐渐平缓,如图6所示。因此,将聚类簇数 K 值设置为3较为合理。

3.3 K-means聚类分析

计算样本点到各初始聚类中心的欧氏距离,按距离大小将所有样本点分为3簇。以这3个簇类的质心作为新的聚类中心,计算样本点到新聚类中心的欧氏距离并重新分类。循环迭代过程,直至新的聚类中心与上一批聚类中心的距离符合收敛准则要求停止循环。此时得到的聚类中心(表3)和其对应的原始工程数据(表4)即为最终聚类结果。

表 1 数据集矩阵 U

Table 1 Dataset matrix U

环数	地表变 形/mm	刀盘扭矩/ (kN·m)	推力/ kN	掘进速度/ (mm·min ⁻¹)	进排泥浆流量 差/(m ³ ·h ⁻¹)
1	-1.26	1 200	11 100	12.5	31
2	-2.33	1 300	11 700	17.5	59
3	-3.86	1 360	11 900	17.5	66
4	-3.98	1 560	12 100	17.5	62
5	-2.97	1 560	12 500	17.5	59
6	-1.62	1 770	12 800	17.5	58
7	-1.71	1 820	13 500	17.5	60
8	-1.52	1 670	12 600	17.5	59
9	-1.67	1 710	12 700	17.5	56
10	-2.01	1 600	12 500	17.5	58
11	-1.30	1 760	12 800	17.5	57
12	-0.03	1 900	13 700	17.5	55
13	0.01	1 900	14 000	17.5	55
14	1.22	2 080	14 400	17.5	58
15	1.46	2 100	14 500	17.5	63
16	2.41	2 200	17 500	20.0	71
17	4.15	2 220	17 500	20.0	71
18	2.66	2 250	17 500	20.0	72
19	4.38	2 770	18 500	22.5	73
20	3.66	3 020	18 500	22.5	77
21	4.21	3 050	18 500	22.5	70
22	3.64	2 420	18 000	22.5	70
23	2.70	2 600	18 500	22.5	70
24	0.43	1 920	14 000	17.5	50
25	0.30	1 920	14 000	17.5	50
26	1.89	2 200	16 000	17.5	69
27	2.32	2 200	17 000	20.0	67
28	1.76	3 070	19 000	25.0	68
29	2.72	2 620	18 500	22.5	70
30	3.16	2 670	18 500	22.5	73
31	2.08	2 200	17 000	20.0	73
32	1.83	2 200	17 000	20.0	73
33	0.32	1 970	14 000	17.5	55
34	0.55	2 070	14 400	17.5	58
35	-1.21	1 830	13 500	17.5	57
36	1.65	2 100	15 200	17.5	67
37	2.62	3 070	18 800	25.0	71
38	0.14	1 900	14 000	17.5	51
39	3.15	2 250	17 700	20.0	71
40	3.07	2 300	18 000	22.5	70

表 2 归一化数据矩阵 Z

Table 2 Normalized data matrix Z

环数	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
1	0.33	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.20	0.05	0.08	0.40	0.61
3	0.01	0.09	0.10	0.40	0.76
4	0.00	0.19	0.13	0.40	0.67
5	0.12	0.19	0.18	0.40	0.61
6	0.28	0.30	0.22	0.40	0.59
7	0.27	0.33	0.30	0.40	0.63
8	0.29	0.25	0.19	0.40	0.61
9	0.28	0.27	0.20	0.40	0.54
10	0.24	0.21	0.18	0.40	0.59
11	0.32	0.30	0.22	0.40	0.57
12	0.47	0.37	0.33	0.40	0.52
13	0.48	0.37	0.37	0.40	0.52
14	0.62	0.47	0.42	0.40	0.59
15	0.65	0.48	0.43	0.40	0.70
16	0.76	0.53	0.81	0.60	0.87
17	0.97	0.55	0.81	0.60	0.87
18	0.79	0.56	0.81	0.60	0.89
19	1.00	0.84	0.94	0.80	0.91
20	0.91	0.97	0.94	0.80	1.00
21	0.98	0.99	0.94	0.80	0.85
22	0.91	0.65	0.87	0.80	0.85
23	0.80	0.75	0.94	0.80	0.85
24	0.53	0.39	0.37	0.40	0.41
25	0.51	0.39	0.37	0.40	0.41
26	0.70	0.53	0.62	0.40	0.83
27	0.75	0.53	0.75	0.60	0.78
28	0.69	1.00	1.00	1.00	0.80
29	0.80	0.76	0.94	0.80	0.85
30	0.85	0.79	0.94	0.80	0.91
31	0.72	0.53	0.75	0.60	0.91
32	0.69	0.53	0.75	0.60	0.91
33	0.51	0.41	0.37	0.40	0.52
34	0.54	0.47	0.42	0.40	0.59
35	0.33	0.34	0.30	0.40	0.57
36	0.67	0.48	0.52	0.40	0.78
37	0.79	1.00	0.97	1.00	0.87
38	0.49	0.37	0.37	0.40	0.43
39	0.85	0.56	0.84	0.60	0.87
40	0.84	0.59	0.87	0.80	0.85

一般情况下,对聚类分析的结果进行可视化分析可以采用散点图或热力图等方式。但盾构掘进参数是一个多维的数据集,在权衡清晰传达信息和保

持可视化简洁性后,选用平行坐标系图对聚类结果进行可视化表达,如图 7 所示。

3.4 聚类结果分析

通过 K-means 聚类分析,将昆明轨道交通 5 号线

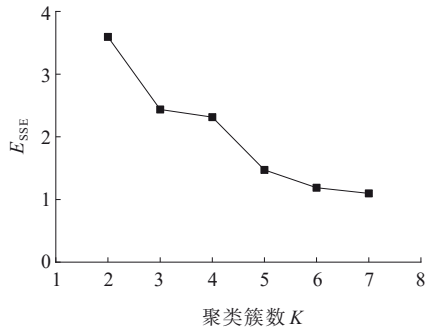


图6 E_{SSE} 随聚类簇数变化曲线图

Figure 6 Variation of E_{SSE} with number of clusters

表3 最终聚类中心

Table 3 Final cluster centers

类别	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
1	0.83	0.71	0.87	0.74	0.87
2	0.56	0.43	0.42	0.40	0.57
3	0.22	0.21	0.17	0.37	0.56

表4 聚类结果及对应掘进参数

Table 4 Clustering results and corresponding tunneling parameters

类别	地表变形/mm	刀盘扭矩/($\text{kN}\cdot\text{m}$)	推力/kN	掘进速度/($\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$)	进排泥浆流量差/($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)
1	2.97	2 536	18 000	21.8	71
2	0.72	2 005	14 380	17.5	57
3	-2.12	1 595	12 480	17.1	57

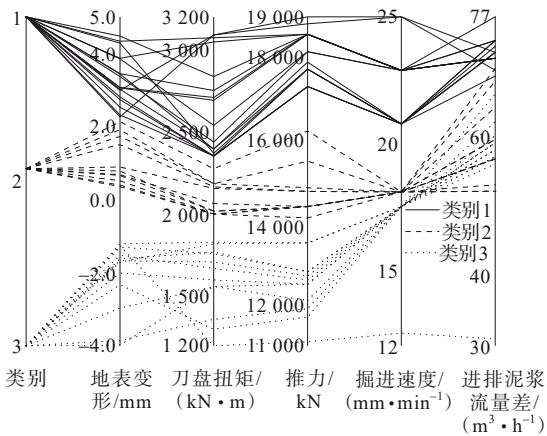


图7 掘进参数聚类平行坐标系图

Figure 7 Parallel coordinate system for clustering of tunneling parameters

试验段40组掘进控制参数和对应监测点的地表变形划分为3个聚类类别。从对应地表变形(表4)来看,类别1中地表处于隆起状态,变形量为2.97 mm;类别3中地表处于沉降状态,变形量为2.12 mm;类别2

对地表变形的控制最佳,变形量为0.72 mm。
泥水平衡盾构具有对土体扰动小、易于控制沉降的优势,试验段全程地表变形量均在监测控制范围内。然而,通过K-means聚类分析可以发现,在同一地层内,掘进参数对地表沉降的影响仍有明显区分度。当扭矩、推力、掘进速度过大时,土体有隆起趋势,如类别1、2所示;而这3项参数较小时,又会引起土体沉降,如类别3所示。因此,从类别2的数据来看,聚类分析得出的富水圆砾地层中泥水平衡盾构施工最佳的掘进参数组合为:平均扭矩2 005 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、推力14 380 kN、掘进速度17.5 mm/min、进排泥浆流量差57 m^3/h 。

4 验证最优参数组合

“盾构-土体-既有隧道”作用体系中,盾构下穿施工对既有隧道的影响正是通过周围土体作为媒介来实现的。因此,在同地层条件下,最优掘进参数组合应同样适用于穿越段。

为验证K-means聚类分析所得主要掘进参数最优组合在下穿段的适用性,本文对下穿段实际施工时的主要参数调整及既有隧道沉降进行了总结分析。下穿段55~95环主要掘进参数实测值如图8所示。

从图8可以看出:新建隧道掘进过程中,当与既有隧道距离尚远时,现场掘进参数在小范围内有波动,但总体来说与本研究对试验段参数进行综合聚类分析所得最优掘进参数组合(刀盘扭矩2 005 $\text{kN}\cdot\text{m}$ 、推力14 380 kN、掘进速度17.5 mm/min、进排泥浆流量差57 m^3/h)吻合较好,这从侧面验证了该最优参数组合的合理性。

4.1 下穿对既有隧道的影响

新建隧道正交下穿对方既有隧道变形的影响主要体现在竖向位移,因此,以既有2号线隧道管片沉降情况(图9)作为既有隧道变形分析对象,其中,Z692和Y695分别为2号线左、右线与5号线轴线交叉点处的监测点位。每个管片取顶部和底部两个监测点位(1和4)的数据绘制成图9。

既有隧道双线均从新建隧道掌子面前方2D(D为洞径)左右开始出现竖向位移^[14],但由于该工程为六线交叠的复杂隧道群,侧面既有4号线因其对土体的遮挡效应^[15],对方2号线的竖向位移起到一定的阻挡作用。因此,既有隧道沉降值微小不能完全归功于新建隧道掘进参数的设定。

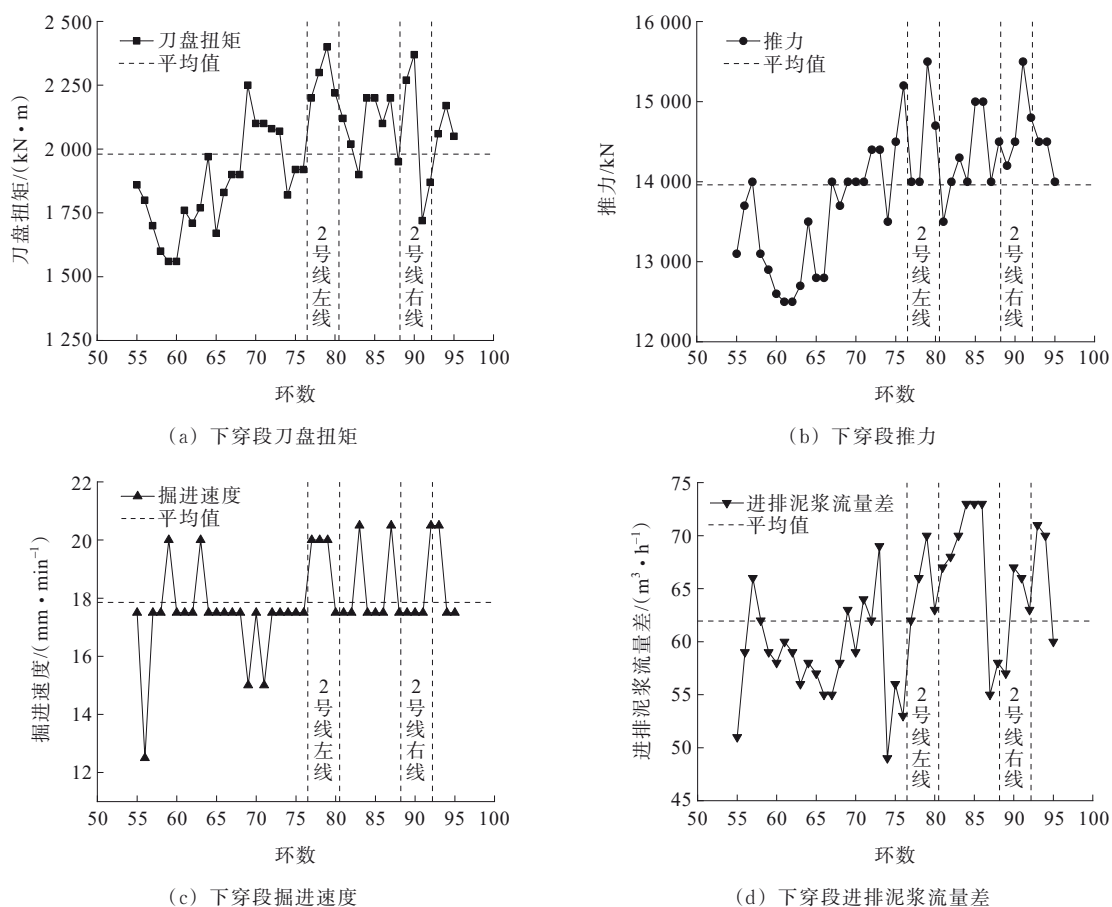


图 8 下穿段泥水盾构掘进参数

Figure 8 Parameters of mud-water shield tunneling in underpass section

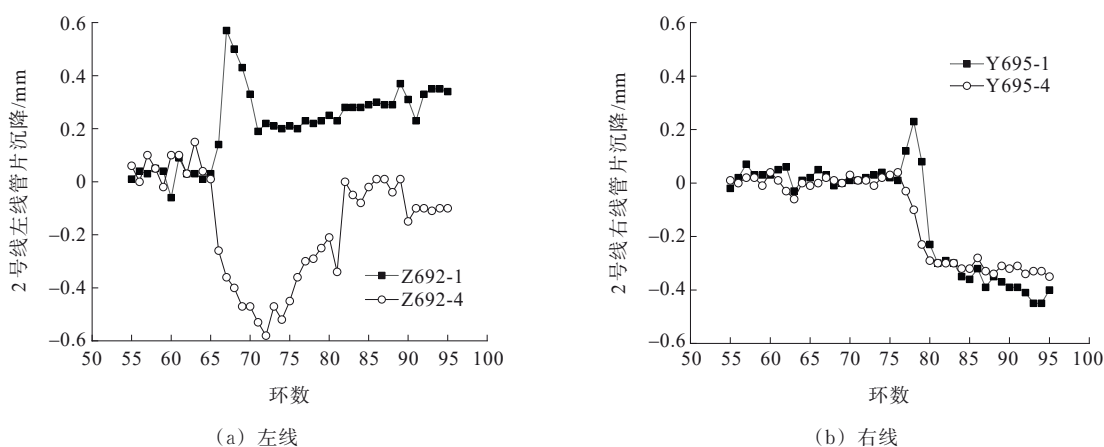


图 9 既有隧道拱顶、拱底沉降时程曲线

Figure 9 Settlement time curve of existing tunnel vault and arch bottom

此外,既有隧道受力改变后在水平方向还会发生变形,横竖向总体呈现“横竖鸭蛋式”变化^[16]。结合既有隧道管片开始发生沉降变化的时间,本文基于掌子面与2号线既有左线隧道的距离,选取3个典型的新建隧道掘进时刻进行既有隧道环向变形分析,分别为:67环(2号线既有左线隧道轴线位于掌子

面前方 $2D$ 左右距离)、79环(2号线既有左线隧道轴线正下方)、91环(2号线既有左线隧道轴线位于掌子面后方 $2D$ 左右距离)。当新建隧道掌子面抵达3个典型掘进节点时,新老隧道轴线交点所在的2号线既有左线隧道横截面环向变形情况如图10所示。

由图10可以看出:当掌子面距离既有隧道 $2D$ 左

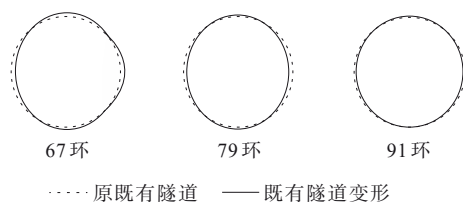


图10 2号线左线横截面环向变形示意图

Figure 10 Left line cross-sectional circular deformation of Line 2

右时,盾构掘进产生的顶推力导致既有隧道左右拱腰均发生远离掌子面方向的变形,此时既有隧道截面并未呈现“鸭蛋式”变形特点。当掌子面位于既有隧道正下方及远离既有隧道时,既有隧道截面环向变形均呈现出典型的“鸭蛋式”变形特点。

结合既有隧道沉降时程曲线可以看出:盾构掘进前期的顶推作用起主导作用,使得既有隧道整体有一定隆起并且拱底和拱腰产生远离掌子面的变形趋势。当掌子面经过既有隧道轴线前后,盾构造成的土体损失又起到主导作用,使得既有隧道整体沉降,拱顶及拱底的变形有所减小,且两侧拱腰向隧道内侧变形。但总体来看,新建隧道穿越前后,既有隧道环向变形不大。

监测显示:既有隧道2号线左线竖向位移为 $-0.58\sim 0.57$ mm,右线为 $-0.45\sim 0.23$ mm,最大竖向位移远小于2号线竖向位移监测预警值(4.00 mm)和监测控制值(8.00 mm),在既有隧道环向变形不大的情况下,对管片竖向位移控制极佳。

4.2 侧穿对既有隧道的影响

新建隧道平行侧穿对既有隧道的影响主要体现在横向,并且对同一深度既有隧道的影响较大。因此,选取与新建5号线右线隧道深度相近的既有4号线左线隧道作为研究对象,分析平行侧穿对既有隧道横向变形的影响。4号线左线在平行穿越段的工后累积水平位移如图11所示。

新建隧道盾构掘进造成土体损失,导致靠近新建隧道一侧土压力减小,因此既有隧道在穿越段整体呈现出朝新建隧道方向的横向变形趋势。虽然偏移量为 $-0.05\sim -2.99$ mm,仍在4号线水平位移监测预警值(5.00 mm)和监测控制值(10.00 mm)以内,但已明显大于上方既有2号线隧道的竖向偏移量。究其原因,多线隧道的特殊空间交叠结构导致既有4号线双线隧道对土体的遮拦效应明显减弱了新建5号线隧道对上方既有2号线造成的竖向沉降,而既有2号线的存在对4号线的水平位移却影响甚微。

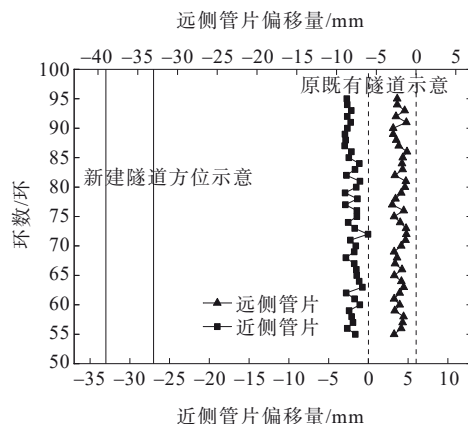


图11 既有隧道拱腰水平变位

Figure 11 Horizontal displacement of arch waist of an existing tunnel

综合来看,本案例在整个新建隧道下穿过程中,掘进参数实测值与本文聚类分析得出的最优参数组合吻合较好。最终,上方既有2号线的竖向位移和侧面既有4号线的水平位移均处于安全可控范围。将该组最优参数组合用于富水圆砾地层新建隧道盾构掘进较为合适。

5 结论

依托实际工程案例,对富水圆砾地层泥水平衡盾构的试验段掘进参数及地表沉降进行了K-means聚类分析,给出了相同地层最佳掘进参数组合;基于实际掘进参数和既有隧道变形监测结果,对同地层中新建隧道的盾构掘进参数给出了建议范围。得到以下结论:

(1) 由K-means综合聚类分析可以看出,同一地层内,当扭矩、推力、掘进速度过大时,土体有隆起趋势,而这3项掘进参数较小时,又引起土体沉降。富水圆砾地层中泥水平衡盾构施工最佳的掘进参数组合为:平均扭矩 $2\,005\text{ kN}\cdot\text{m}$ 、推力 $14\,380\text{ kN}$ 、掘进速度 17.5 mm/min 、进排泥浆流量差 $57\text{ m}^3/\text{h}$ 。

(2) 穿越既有隧道施工中,掘进参数的合理设定对控制既有隧道的变形起重要作用。在工程案例中,新建隧道近距离下穿既有隧道施工参数设定值与最优参数组合吻合较好,且成功地将上方既有隧道的竖向变形与侧面既有隧道的水平变形控制在监测预警值以内。

(3) 基于施工现场实际掘进参数,将K-means算法此类大数据技术应用在地下工程中,挖掘盾构掘进参数及既有隧道沉降间的关联性,可以对同类工

程中地表的沉降进行预测,对穿越既有隧道阶段盾构掘进参数的设置进行指导。验证了大数据技术应用于盾构施工的可行性、创新性、必要性和合理性。

参考文献:

References:

- [1] 张宝刚,谢家冲,黄昕.盾构上穿下既有双线隧道相互作用机制的三维数值分析[J].中外公路,2023,43(6):247-252.
ZHANG Baogang, XIE Jiachong, HUANG Xin. 3D numerical analysis on interaction mechanism of two existing lines over-crossed by shield tunnel[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(6):247-252.
- [2] 李承辉,贺少辉,刘夏冰.粗粒径砂卵石地层中泥水平衡盾构下穿黄河掘进参数控制研究[J].土木工程学报,2017,50(增刊2):147-152.
LI Chenghui, HE Shaohui, LIU Xiabing. Study on parameter control of slurry balance shield tunneling under the Yellow River in coarse-grained sandy pebble stratum[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(sup 2):147-152.
- [3] 张军,李懋鹏.基于机器学习的盾构自主纠偏与参数研究[J/OL].中外公路,1-13[2024-01-26].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240126.1207.004.html>.
ZHANG Jun, LI Maopeng. Research on self-rectification and parameters of shield machine based on machine learning[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-13 [2024-01-26]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20240126.1207.004.html>.
- [4] 罗旭,张召峰,傅鹤林,等.盾构同步注浆参数对地表变形影响研究[J/OL].中外公路,1-14[2024-11-11].<https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20241111.1413.002.html>.
LUO Xu, ZHANG Zhaofeng, FU Helin, et al. Study on the influence of synchronous grouting parameters of shield on surface deformation[J/OL]. Journal of China & Foreign Highway, 1-14[2024-11-11]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1363.U.20241111.1413.002.html>.
- [5] 杨旸,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(增刊1):94-98.
YANG Yang, TAN Zhongsheng, PENG Bin, et al. Study on optimization boring parameters of earth pressure balance shield in water-soaked round gravel strata[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(sup 1):94-98.
- [6] 颜波,杨国龙,林辉,等.盾构隧道施工参数优化与地表沉降控制研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(增刊2):1683-1687.
YAN Bo, YANG Guolong, LIN Hui, et al. Research on shield tunneling parameters optimization and surface subsidence control[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(sup 2):1683-1687.
- [7] 马文辉,彭华,杨成永.盾构近距下穿既有地铁盾构隧道施工参数控制[J].西南交通大学学报,2018,53(1):119-127.
MA Wenhui, PENG Hua, YANG Chengyong. Construction parameters control of shield tunnel underneath traversing existing dual shield tunnels[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(1):119-127.
- [8] 孙王永,周顺华,向科,等.近距离下穿既有隧道的盾构施工参数研究[J].中国铁道科学,2010,31(1):54-58.
SUN Yuyong, ZHOU Shunhua, XIANG Ke, et al. Study on the construction parameters of shield tunnelling in short-distance undercrossing the existing tunnel[J]. China Railway Science, 2010, 31(1):54-58.
- [9] 李磊,张孟喜,吴惠明,等.近距离多线叠交盾构施工对既有隧道变形的影响研究[J].岩土工程学报,2014,36(6):1036-1043.
LI Lei, ZHANG Mengxi, WU Huiming, et al. Influence of short-distance multi-line overlapped shield tunnelling on deformation of existing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(6):1036-1043.
- [10] ZHANG Z G, HUANG M S. Geotechnical influence on existing subway tunnels induced by multiline tunneling in Shanghai soft soil[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 56: 121-132.
- [11] 王梦恕.不同地层条件下的盾构与TBM选型[J].隧道建设,2006,26(2):1-3,8.
WANG Mengshu. Type selection of shield TBMs and hard rock TBMs for different geological conditions[J]. Tunnel Construction, 2006, 26(2):1-3,8.
- [12] 周文波,胡珉.盾构法隧道施工主要参数控制方法研究[J].岩石力学与工程学报,2003,22(增刊1):2430-2433.
ZHOU Wenbo, HU Min. Control study on major parameters for shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(sup 1):2430-2433.
- [13] 卢浩,孙善政,施烨辉,等.基于Apriori算法对地面沉降影响因素的数据挖掘及分析[J].隧道建设(中英文),2018,38(增刊2):104-110.
LU Hao, SUN Shanzheng, SHI Yehui, et al. Data mining and analysis of influence factors for ground settlement based on apriori algorithm[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(sup 2):104-110.
- [14] 何川,苏宗贤,曾东洋.地铁盾构隧道重叠下穿施工对上方已建隧道的影响[J].土木工程学报,2008,41(3):91-98.
HE Chuan, SU Zongxian, ZENG Dongyang. Influence of metro shield tunneling on existing tunnel directly above[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(3):91-98.
- [15] 张治国,黄茂松,王卫东.遮拦叠交效应下地铁盾构掘进引起地层沉降分析[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1750-1761.
ZHANG Zhiguo, HUANG Maosong, WANG Weidong. Analysis of ground settlements induced by subway shield excavation considering sheltering overlapped effects[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9):1750-1761.
- [16] 魏新江,张默爆,丁智,等.盾构穿越对既有地铁隧道影响研究现状与展望[J].岩土力学,2020(增刊2):1-20.
WEI Xinjiang, ZHANG Mobao, DING Zhi, et al. Research status and prospect of shield tunneling on preexisting metro tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020(sup 2):1-20.