

王伟,王兴,周勋,等.砂卵石地层盾构区间地表沉降影响因素聚类分析.吉林大学学报(地球科学版), 2024, 54(1):219 - 230. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220088.

Wang Wei, Wang Xing, Zhou Xun, et al. Cluster Analysis of Influencing Factors of Surface Subsidence in Shield Interval of Sandy Gravel Stratum. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2024, 54(1):219 - 230. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.20220088.

砂卵石地层盾构区间地表沉降影响因素 聚类分析

王伟¹, 王兴¹, 周勋², 韦生达²

1. 长春工程学院土木工程学院, 长春 130012

2. 中交路桥北方工程有限公司, 北京 100024

摘要: 为了掌握盾构掘进参数和地质条件对砂卵石地层盾构区间地表沉降的综合影响规律, 依托成都地铁某盾构区间, 结合团队前期地表沉降与掘进参数的关系, 确定了总推力、刀盘转速、螺旋机转速、上覆土层厚度、地下水位、卵石层厚度 6 种聚类指标, 利用 K 均值聚类算法对各参数指标的实际监测数据进行聚类, 综合分析各个指标对地表沉降的影响。结果表明: 1) 根据 K 均值聚类结果把监测点即施工地段划分为 3 种地表沉降风险等级, 监测点 1—3 为危险(I 级), 监测点 7—13、16—19、25—34 为较危险(II 级), 监测点 4—6、14—15、20—24 为安全(III 级)。2) 根据聚类结果可知, 在特定范围内掘进参数、地层构造与地表沉降之间具有正、负相关性关系。3) 通过分析地层构造、掘进参数与地表沉降的关系, 得出当上覆土层厚度较大、地下水位较小、卵石层厚度较大时, 掘进参数控制范围为总推力 29 034.00~31 181.95 kN, 刀盘转速 1.25~1.32 r/min, 螺旋机转速 6.13~6.98 r/min; 当上覆土层厚度较小、地下水位较小、卵石层厚度较小时, 掘进参数控制范围为总推力 34 419.89~36 867.28 kN, 刀盘转速 1.44~1.45 r/min, 螺旋机转速 5.74~6.99 r/min。

关键词: 砂卵石地层; 盾构; 地表沉降; 聚类分析

doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20220088

中图分类号: TU455.43

文献标志码: A

Cluster Analysis of Influencing Factors of Surface Subsidence in Shield Interval of Sandy Gravel Stratum

Wang Wei¹, Wang Xing¹, Zhou Xun², Wei Shengda²

1. School of Civil Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China

2. China Communication North Road and Bridge Co., Ltd., Beijing 100024, China

收稿日期: 2022-04-03

作者简介: 王伟(1982—), 男, 副教授, 博士, 主要从事地铁深基坑结构力学性质与稳定性评价等方面的研究, E-mail: 16695496@qq.com

基金项目: 吉林省科技厅发展计划项目(20220203058SF); 中交路桥建设有限公司科技研发项目(ZJLJ-2018-44)
Supported by the Science and Technology Development Program of Jilin Province(20220203058SF) and the Research and Development Project of China Communication Road and Bridge Construction Co., Ltd.(ZJLJ-2018-44)

Abstract: In order to grasp the comprehensive influence law of shield tunneling parameters and geological conditions on surface subsidence between shield intervals in sandy gravel stratum, a shield interval of Chengdu Metro is chosen as a case study, combined with the relationship between the surface subsidence and tunneling parameters of the our study team in the early stage, the total thrust, cutter head speed, screw machine speed, overlying soil thickness, groundwater level and gravel stratum thickness are determined as clustering indexes. The K - means algorithm is applied to cluster the actual monitoring data of each parameter index, and the influence of each index on the surface subsidence is analyzed comprehensively. The research results show that: 1) According to the results of K - means clustering, the monitoring points, corresponding to construction sections, are divided into three risk levels of surface subsidence, 1 - 3 is strong dangerous (Grade I), 7 - 13, 16 - 19, 25 - 34 are weak dangerous (Grade II), 4 - 6, 14 - 15, 20 - 24 are safe (Grade III). 2) According to the clustering results, there is a positive and negative correlation between tunneling parameters, stratum structure and surface subsidence in a specific range. 3) Through an analysis of the relationship between geological structure, tunneling parameters and surface settlement, it is determined that when the overlying soil layer is thick, the groundwater level is low, and the gravel layer is thick, the control range of excavation parameters is a total thrust of 29 034.00 - 31 181.95 kN, cutterhead rotation speed of 1.25 - 1.32 r/min, and screw conveyor rotation speed of 6.13 - 6.98 r/min. When the overlying soil layer is thin, the groundwater level is low, and the gravel layer is thin, the control range of excavation parameters is a total thrust of 34 419.89 - 36 867.28 kN, cutterhead rotation speed of 1.44 - 1.45 r/min, and screw conveyor rotation speed of 5.74 - 6.99 r/min.

Key words: sandy gravel stratum; shield; surface subsidence; clustering analysis

0 引言

在地铁工程建设中,盾构掘进时对土体的扰动是引起地表沉降的主要原因,但由于地铁工程周边环境通常较为复杂,大量潜在风险不易被识别;因此,掌握地表沉降的影响因素,进而对盾构掘进参数进行合理控制,是降低风险隐患、确保盾构施工顺利进行的重中之重。国内外学者对盾构掘进引起地表沉降的影响因素进行了大量研究,如采用经验公式、回归分析、数值模拟和反演计算等方法^[1-5]分析了隧道埋深、同步注浆量、土仓压力、顶推力等对地表沉降规律的影响,提出增加隧道埋深、同步注浆、土仓压力、顶推力、降低刀盘扭矩等减小地表沉降的措施。一些学者利用 PFC 2D/3D、ABAQUS、MIDAS 等软件^[6-8]对盾构施工工序、地下水位、隧道埋深、土仓压力和同步注浆等诸多因素引起的地表沉降进行了模拟计算,提出了地表横向沉降随隧道埋深的增加逐渐减小,随隧道直径、土体应力释放率的增大逐渐增大,当隧道埋置较深时可以通过增大土仓压力来减小前方沉降等认识。刘丹娜等^[9]采用 PFC2D 离散元和 ABAQUS 有限元软件分析了盾构穿越标准段和建筑物段时的地表沉降规律,并根据监测数

据和盾构机实际参数获得了掘进参数控制范围。数据挖掘是在庞大而复杂的数据集中发现和提取先前未知、有效的模式及关系的一种方法,近年来,一些学者把粗糙集、遗传算法、循环神经网络等数据处理模型和机器学习方法^[10-14]应用到大规模工程数据的处理分析中。如江帅等^[15]通过建立横向地表沉降动态预测模型,实现了同一监测位置沉降曲线随掌子面推进不断变化的规律。采用机器学习方法主要是通过隧道几何、地层和掘进参数等信息来进行盾构掘进地表沉降预测与控制的研究,对于沉降控制的研究尚处于起步阶段,针对掘进参数的推荐与调整方法还需持续深入研究^[16]。这些方法虽有助于利用所提取的信息建立分类模型或者识别数据集中未知的趋势和关系,并综合分析施工过程中庞大的指标信息,最终实现对施工过程中潜在风险及发展趋势的预测;但并未实现对数据的沉降风险等级划分,很难将盾构施工沉降风险与现场施工地段较好地结合,在掘进参数的推荐与调整时也很少考虑特定地层构造的影响。如:胡珉等^[17]提出了利用 K 均值聚类算法对盾构掘进参数进行设定的类比设定法;魏伟青等^[18]通过对竖向渗透系数、黏聚力、内摩擦角等 7 个地层指标进行 K 均值快速聚类,总结了

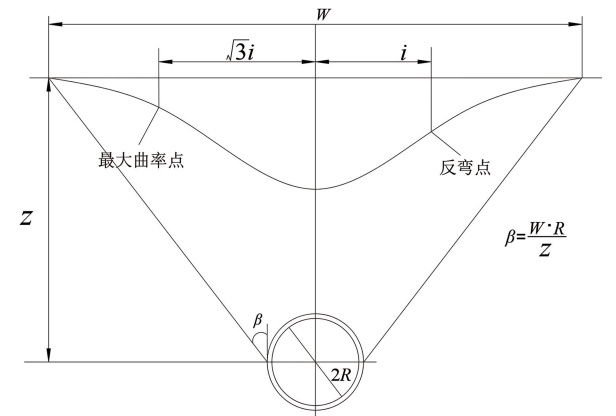
盾构地表沉降规律,并对地表沉降量进行定量分析预测;卢浩等^[19]采用等宽离散和 K 均值聚类离散 2 种方法进行数据离散化处理,并利用 Apriori 算法进行了关联规则分析。实际工程中,地表沉降受掘进参数、地层构造、周边环境等多因素综合影响,这些影响因素往往随盾构掘进而实时变化,在同一路具有相似沉降变形量的盾构区间段,其掘进参数、地层构造以及周边环境究竟存在何种关联,目前相关研究较少开展。

本文以成都轨道交通 17 号线市五医院站—凤溪河站区间盾构工程为依托,利用 K 均值聚类算法构建“掘进参数-地层构造-地表沉降”三维模型,并对地铁盾构施工中引起地表沉降量的总推力、刀盘转速、螺旋机转速、上覆土层厚度、地下水位、卵石层厚度进行综合聚类,通过分析各监测断面所对应的地表沉降量、掘进参数以及地层构造等因素的内在关系,提出地铁盾构掘进参数控制范围,以期为砂卵石地层盾构区间地表沉降量风险等级的划分以及盾构掘进参数的调整提供理论依据和数据参考。

1 盾构区间地表沉降原理及影响因素

1.1 地表沉降原理

由 Peck 公式可知,隧道开挖引起的地表沉降沿开挖断面呈正态分布,如图 1 所示。其主要原因与盾构掘进引起地层损失、开挖面土体扰动及再固结有关。如图 2 所示,盾构掘进时,掌子面前方的土体受扰动而形成空洞,造成地层失稳,同时,前方一



R. 隧道半径; i. 沉降槽宽度系数; Z. 隧道深度; W. 沉降槽宽度; β . 隧道周围地层内摩擦角。

图 1 隧道地表沉降横向分布图

Fig.1 Transverse distribution of surface settlement of tunnel

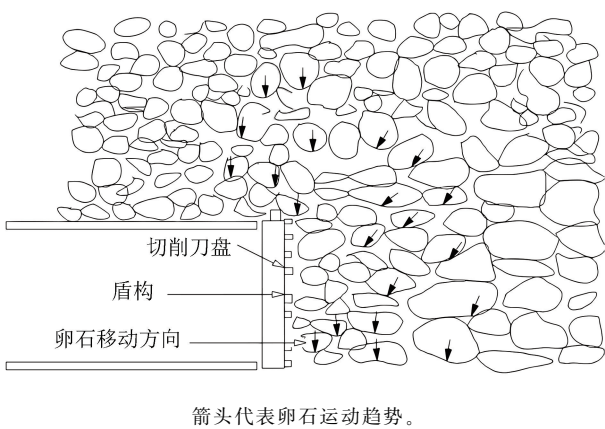


图 2 开挖过程地层失稳机理图

Fig.2 Formation instability mechanism diagram during excavation

定范围内土体因刀盘挤压而形成隆起,随着松散土体被排出,隆起的土体再次固结引起沉降。砂卵石由于其结构松散,黏聚力低,地层灵敏度高,盾构掘进时极易引起地表沉降。

1.2 地表沉降影响因素

影响盾构掘进区间地表沉降的因素较多,有客观因素和主观因素,其中:客观因素包括地层构造和周边建筑物密集程度等^[20],这些因素对沉降的影响是客观存在且无法避免的;主观因素主要指掘进参数,施工中可以通过调整控制掘进参数来降低因盾构掘进而引起的地表沉降。本文将影响地面沉降的因素归纳为地层构造与掘进参数两大类进行分析,暂不讨论周边建筑物密集程度。

地层构造包括上覆土层厚度、地下水位和卵石层厚度。其中:上覆土层厚度是影响地表沉降的重要因素之一。它决定了隧道顶部能否形成压力拱,进而控制土颗粒移动并减小扰动。当隧道施工经过富水砂卵石层时,由于砂卵石地层透水能力强,地下水位造成的流水渗透力及静水压力都会影响掌子面的受力,同时砂卵石地层中细砂粒物质会随着水体流失,地层结构变得疏松。卵石层厚度越大,点对点传递受力的范围就越广,地层扰动范围就越大,越容易造成地层失稳。但当卵石层厚度较大时,卵石形成的骨架作用较强,重新建立应力平衡后会有良好的支撑作用。

掘进参数主要包括总推力、刀盘转速、螺旋机转速、刀盘扭矩、推进速度和同步注浆等。选择适宜的掘进参数可有效控制地面沉降和掌子面稳定,减少刀具的损耗,使盾构维持良好的姿态。总推力的控

制对地表沉降具有直接影响作用。总推力过大,刀盘总推力大于被动土压力,容易挤压土体导致地面隆起;总推力过小,掌子面前方土体容易坍塌导致沉降。刀盘转速和螺旋机转速对地层扰动后卵石颗粒的移动具有直接影响。当刀盘转速和螺旋机转速较小时,单位时间内刀盘产生的扰动较小,同时螺旋出土器排出卵石颗粒的速度较慢;当刀盘转速和螺旋机转速增大后地层受到的扰动程度明显增大,同时土体开挖量和排出量也相应增大,导致单位时间内发生移动的卵石颗粒明显增加,地表位移变化明显^[21]。此外,刀盘扭矩、推进速度、同步注浆、掌子面压力等掘进参数也会对接地表沉降产生一定程度的影响。其中,掘进速度与总推力直接相关,刀盘扭矩可以由刀盘转速直观反映出来^[22],掌子面压力与总推力、掘进速度、地层构造等综合因素相关,各因素之间存在一定的相关性。

2 K 均值聚类分析模型

2.1 K 均值聚类基本原理

K 均值聚类是先根据初始的划分方法对最靠近质心的对象进行归类,然后通过迭代逐次更新各聚类中心值,直到得到最好的聚类结果。假设样本集为 V , 有 m 个样本 $V_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 每个样本有 n 个指标数据组成指标集 $\{X_j\} (j = 1, 2, \dots, n)$, 如果 n 个指标量纲不唯一,则需要将每个数据 $c_{i,j}$ 运用 Z 分数进行归一化处理:

$$z_{i,j} = \frac{c_{i,j} - \mu}{\sigma} \quad (1)$$

式中: μ 为所有样本的均值; σ 为所有样本数据的标准方差; $c_{i,j}$ 为第 i 个监测点的第 j 项指标的原始数值。

聚类中心的集合为 $\{K_k\} (k = 1, 2, \dots, h)$, h 为聚类中心数,每个聚类中心对应一个簇。随机选择 h 个聚类中心作为初始聚类中心,根据样本中的数据对象与各聚类中心的欧氏距离,按最近准则将数据分到最近的聚类中心所对应的类:

$$d = \sqrt{\sum_{i=1}^m |c_{i,j} - K_k|^2} \quad (2)$$

式中, d 为样本点到聚类中心的欧氏距离。

将数据样本按照最小距离原则分配到临近的聚类簇:

$$J = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^h r_{i,k} \|c_{i,j} - O_{k,j}\|^2; \quad (3)$$

$$O_{k,j} = \frac{\sum_{i=1}^m r_{i,k} c_{i,j}}{\sum_{i=1}^m r_{i,k}} \quad (4)$$

式中: J 为样本与聚类中心距离的平方差之和; $O_{k,j}$ 为第 k 个簇的聚类中心; $r_{i,k}$ 为聚类过程中的系数,当数据点 $c_{i,j}$ 被归类到第 k 簇时为 1, 否则为 0。

将每个类别中所有对象所对应的均值作为该类别的聚类中心,计算目标函数值。循环并更新聚类中心直到每个聚类不再发生变化为止。使用误差平方和 E_{ss} 对 k 值进行检验^[23]:

$$E_{ss} = \sum_{k=1}^h \sum_{x \in S_k} (d(O_{k,j}, c_{i,j}))^2 \quad (5)$$

式中, S_k 为第 k 个簇中数据点的集合。

随着 k 的增加,数据集划分更加精细, E_{ss} 逐渐变小并趋于稳定,聚类程度回报也随之减小。当 E_{ss} 下降突然变暖时,聚类中心为最佳值,若大于该值,则无法带来更多的聚类程度回报。

2.2 分析模型构建

以盾构区间工程为例,选取 m 个勘测点组成聚类对象集,每个勘测点中包含 g 个掘进参数 c_g 和 l 个地层构造参数 c_l 共 $g + l$ 个指标数据。 n 个指标数据组成指标集,合并组成指标集矩阵 U :

$$U = \begin{bmatrix} c_{1,1} & \cdots & c_{1,g} & c_{1,g+1} & \cdots & c_{1,g+l} \\ c_{2,1} & \cdots & c_{2,g} & c_{2,g+1} & \cdots & c_{2,g+l} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{m,1} & \cdots & c_{m,g} & c_{m,g+1} & \cdots & c_{m,g+l} \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过 Z 分数对聚类样本 $c_{i,j}$ 进行归一化处理,得到由不同指标中不同量值所占比重 $z_{i,j}$ 组成的标准矩阵 Z :

$$Z = (z_{ij})_{m \times n}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

假设结果分为 r 个等级,每个聚类类别中包含的对应指标集为 $B = \{T_{r,g}, A_{r,l}\}$, $T_{r,g}$ 为第 r 个等级的第 g 个掘进参数, $A_{r,l}$ 为第 r 个等级的第 l 个地层构造参数。则指标集与沉降等级、聚类类别组成等级划分模型:

$$(G, C, B) = \begin{bmatrix} G_1 & C_1 & (T_{1,1} \cdots T_{1,g}, A_{1,1} \cdots A_{1,l}) \\ G_2 & C_2 & (T_{2,1} \cdots T_{2,g}, A_{2,1} \cdots A_{2,l}) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ G_r & C_r & (T_{r,1} \cdots T_{r,g}, A_{r,1} \cdots A_{r,l}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: G 为地表沉降风险等级; C 为聚类类别。

3 案例分析

3.1 工程概况

成都轨道交通 17 号线市五医院站—凤溪河站盾构区间全长 1 610.186 m,施工区间均为第四系(Q_4)地层覆盖,地表多为人工填土(Q_4^{ml})覆盖,其下为全新统冲积(Q_4^{al})粉细砂及卵石土,上更新统冰水沉积、冲积(Q_3^{fgl+al})粉细砂及卵石土。隧道洞深穿越地层有 2-9-2 中密卵石土、2-5-2 中密—密实粉细砂、2-9-3 密实卵石土、3-8-3 密实卵石土。其中,卵石成分以花岗岩、灰岩、砂岩为主,其余以中、细砂充填。隧道主要穿越地层为中密—密实卵石土。其中,中密卵石土层厚为 2.5~6.9 m,卵石体积分数为 60%~70%,密实卵石土层的卵石体积分数大于 70%。上覆土层厚度变化大,轨面最大埋深约 36.1 m,最小埋深约 9.5 m。卵石土分选性、均匀性差,透水性强,富水性良好,沿线地下水位随季节变化较大,区内主要为砂土、卵石土中赋存的孔隙潜水。本区间范围内地下水静止水位埋深为 3.80~7.30 m。盾构区间位置及地质勘测点分布情况如图 3 所示,盾构穿越主要土层条件如表 1 所示。

3.2 数据筛选

研究团队针对盾构掘进参数对地表沉降的敏感性进行了前期研究^[24],指出推进速度与总推力、刀盘转速、螺旋机转速等有关,同时受地质条件的影响;而刀盘扭矩和螺旋机扭矩主要与地质条件、土仓压力以及渣土改良效果有关。为了消除线性相关的影响,剔除推进速度、刀盘扭矩和螺旋机扭矩 3 种因素。为了进一步验证选取参数的有效性,根据 34 个地质勘测点数据和团队前期相关研究^[25]进行沉降

影响因素灰色关联分析,结果显示 6 个参数与地表沉降的关联度均大于 0.6,说明所选因素与地表沉降有较强的相关性。各样本点对应的灰色关联系数如图 4 所示。本文选取总推力、刀盘转速、螺旋机转速、上覆土层厚度、地下水位、卵石层厚度 6 个参数作为地表沉降的影响因素进行分析。

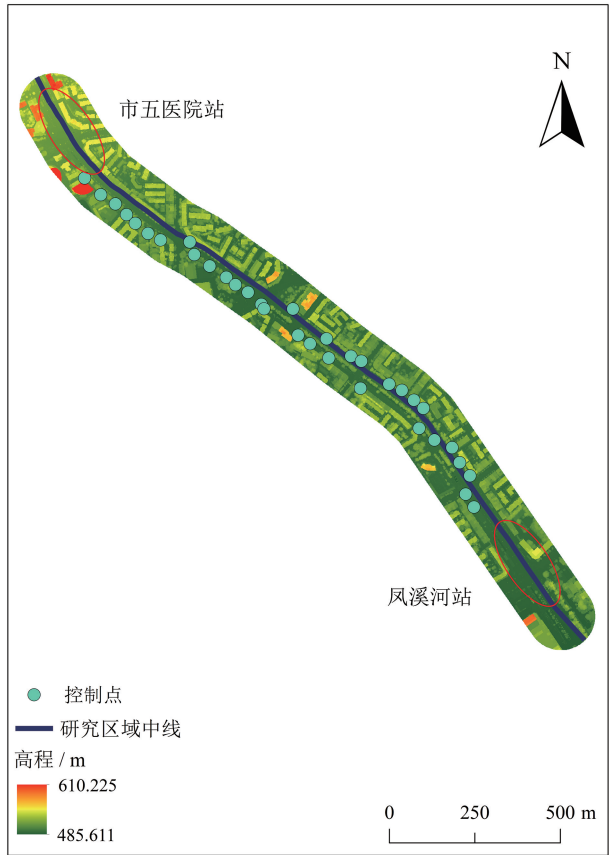


图 3 盾构隧道走向及勘测点分布
Fig.3 Shield tunnel direction and survey points distribution

表 1 盾构区间地层基本物理指标

Table 1 Physical indexes of stratum in shield section

地层编号	地层名称	天然密度/ (g/cm ³)	内摩擦角/ (°)	变形模量/ MPa	泊松比	渗透系数/ (m/d)	承载力/ kPa	土层厚度/ m
1-2	人工填土	1.90					110	1.0~3.4
2-9-1	稍密卵石土	2.00	33	25	0.32	35	300	2.2~5.5
2-9-2	中密卵石土	2.10	36	30	0.30	30	500	2.5~6.9
2-5-2	中密—密实粉细砂	1.85	25	11	0.30	5	120	0.6~0.7
2-9-3	密实卵石土	2.20	38	50	0.25	28	650	4.9~10.2
3-8-3	密实卵石土	2.20	43	50	0.25	28	700	未见底

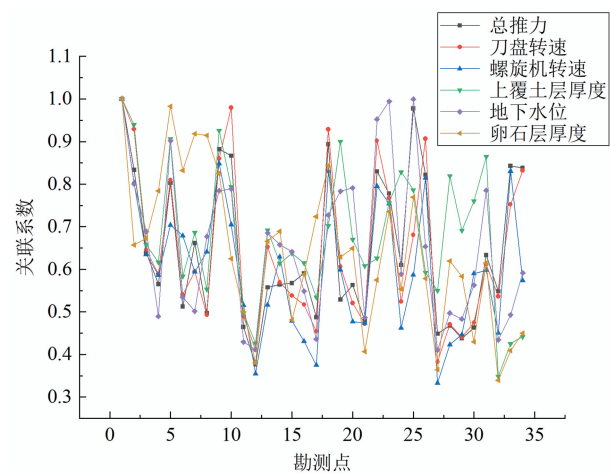


图 4 沉降影响因素与地表沉降的关联系数

Fig.4 Correlation coefficient between subsidence influencing factors and surface subsidence

为了反映上覆土层厚度和卵石层厚度对地表沉降的影响,以勘探孔位置为基准划分监测断面。本区间共计 34 个地质勘测点,将盾构掘进至每个勘探孔所在监测断面时,在该位置处所产生的最大地表沉降量与其对应的 3 种掘进参数(总推力、刀盘转速、螺

旋机转速)和 3 种地层构造因素(上覆土层厚度、地下水位、卵石层厚度)进行分析,得到监测断面与勘测点对应关系见图 5。各监测断面处的实测数据见表 2。

3.3 模型构建

根据式(1)对表 2 中的数据进行归一化处理,并建立标准化矩阵。根据式(6)结合沉降安全分析评判 k 值选择的合理性。随着聚类数 k 的增大,样本划分不断精细, E_{ss} 会不断减小。当 k 小于真实聚类簇时, k 的增大会大幅度增加每个簇的聚合程度,而 E_{ss} 的下降幅度会骤减,并随着 k 值的继续增大而趋于平缓。如图 6 所示,本案例 E_{ss} 变化存在明显的拐点,即 $k=4$ 时出现骤降,故选择 $k=4$ 进行聚类最为适宜。

根据式(2)计算各样本数据与聚类中心的欧氏距离,按距离最近准则将它们分到距离其最近的聚类中心所对应的类中,并确定 3 个组别,初始聚类中心如表 3 所示。将每个类中所有对象所对应的均值作为该类的聚类中心,计算目标函数值,并对聚类中心进行更新,直到每个聚类不再发生变化为止,得到最终聚类中心,如表 4 所示。

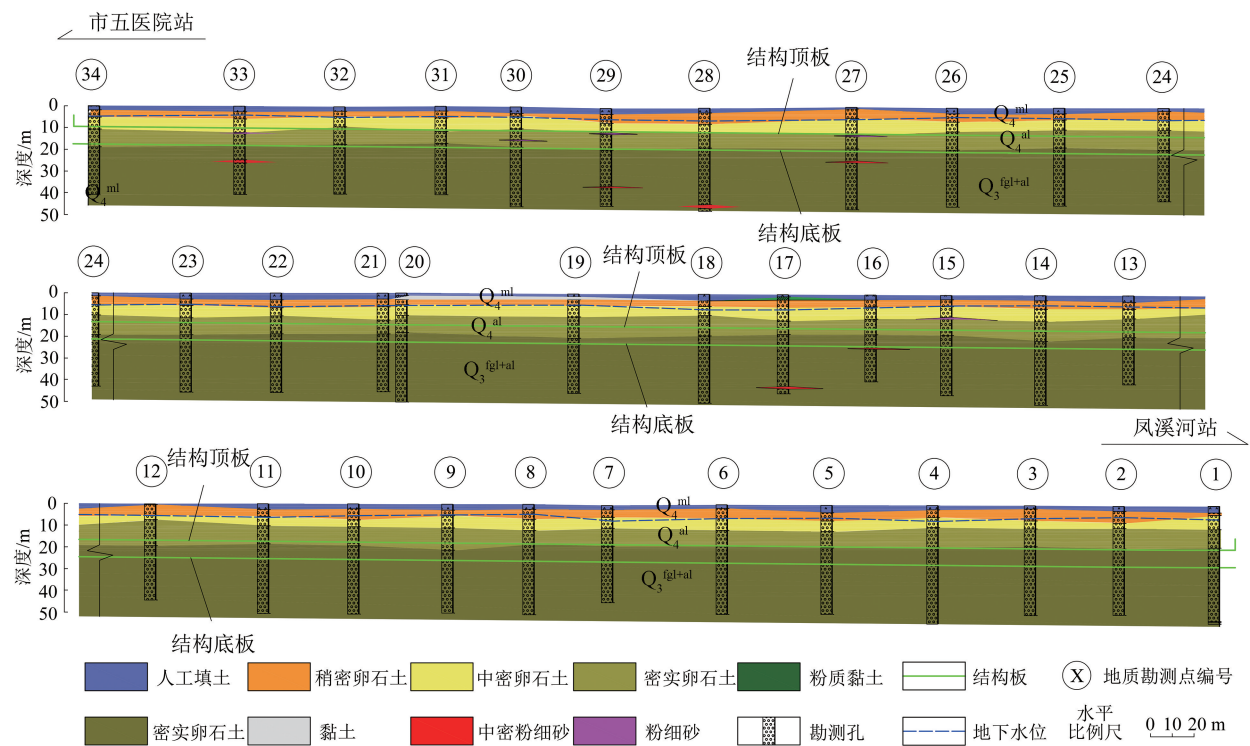


图 5 盾构区间纵向断面图

Fig.5 Longitudinal section diagram of shield interval

表 2 地铁盾构施工诱发地表沉降量监测点实测数据

Table 2 Test data of surface subsidence monitoring points induced by subway shield construction

勘测点	地表沉降量/mm	总推力		刀盘转速		螺旋机转速		上覆土层厚度		地下水位		卵石层厚度	
		监测数据/kN	归一化	监测数据/(r/min)	归一化	监测数据/(r/min)	归一化	监测数据/m	归一化	监测数据/m	归一化	监测数据/m	归一化
1	−19.56	33 521.67	0.39	1.44	0.66	6.54	0.19	20.15	1.55	6.20	−0.89	16.38	1.10
2	−18.82	35 572.25	1.00	1.44	0.61	5.50	−0.99	20.03	1.51	5.20	0.28	11.53	−0.38
3	−14.24	33 809.75	0.47	1.44	0.65	6.62	0.28	19.87	1.46	5.90	−0.54	7.99	−1.46
4	−12.94	34 935.43	0.81	1.45	0.82	6.61	0.27	19.53	1.35	7.30	−2.19	13.07	0.09
5	−17.56	26 012.83	−1.84	1.46	0.88	7.23	0.98	19.12	1.23	5.90	−0.54	14.56	0.54
6	−11.46	35 422.00	0.95	1.45	0.81	5.36	−1.15	18.91	1.16	6.30	−1.01	7.96	−1.47
7	−13.10	30 930.10	−0.38	1.45	0.78	6.59	0.24	18.06	0.90	7.20	−2.07	11.69	−0.33
8	−9.89	33 746.11	0.45	1.46	0.89	5.12	−1.42	18.24	0.95	4.60	0.99	9.04	−1.14
9	−18.12	33 271.13	0.31	1.45	0.76	5.48	−1.02	17.87	0.84	4.90	0.63	13.46	0.21
10	−19.63	36 193.33	1.18	1.46	0.84	5.21	−1.32	17.63	0.76	5.40	0.05	11.57	−0.37
11	−7.01	31 127.58	−0.33	1.26	−2.04	5.38	−1.12	17.31	0.66	6.30	−1.01	13.95	0.36
12	−3.21	32 958.36	0.22	1.26	−2.05	6.95	0.66	16.73	0.48	5.40	0.05	15.89	0.95
13	−11.83	33 435.09	0.36	1.25	−2.20	6.98	0.70	16.62	0.45	5.16	0.33	13.97	0.36
14	−9.79	29 574.27	−0.79	1.26	−2.04	5.18	−1.36	16.36	0.37	4.70	0.87	11.85	−0.28
15	−10.04	29 841.75	−0.71	1.35	−0.65	6.88	0.57	16.01	0.26	4.90	0.63	17.15	1.33
16	−9.30	27 454.45	−1.42	1.35	−0.68	7.38	1.15	15.82	0.20	5.47	−0.04	13.47	0.21
17	−6.72	28 951.78	−0.97	1.35	−0.66	7.64	1.44	15.62	0.14	6.10	−0.78	8.72	−1.24
18	−19.08	30 725.10	−0.44	1.35	−0.66	7.04	0.76	15.42	0.08	7.20	−2.07	17.48	1.43
19	−13.41	37 748.25	1.64	1.45	0.72	6.65	0.32	14.93	−0.08	5.10	0.40	16.01	0.99
20	−9.43	29 034.00	−0.95	1.35	−0.70	6.70	0.37	14.63	−0.17	3.80	1.93	12.28	−0.15
21	−7.78	31 360.50	−0.26	1.37	−0.44	6.19	−0.20	14.45	−0.22	5.70	−0.31	18.32	1.69
22	−19.39	36 634.30	1.31	1.35	−0.76	5.65	−0.83	14.01	−0.36	6.30	−1.01	10.25	−0.77
23	−16.35	32 752.30	0.16	1.42	0.34	6.52	0.16	13.62	−0.48	5.20	0.28	10.78	−0.61
24	−10.91	29 292.33	−0.87	1.45	0.76	7.41	1.18	13.30	−0.58	5.60	−0.19	15.67	0.88
25	−15.15	26 340.17	−1.75	1.45	0.81	7.34	1.11	12.90	−0.71	4.80	0.75	15.12	0.71
26	−18.70	28 460.80	−1.12	1.45	0.82	6.99	0.71	12.41	−0.86	4.30	1.34	9.75	−0.92
27	−4.09	27 390.10	−1.44	1.45	0.82	7.84	1.67	12.38	−0.87	5.70	−0.31	17.58	1.46
28	−8.83	33 979.21	0.52	1.45	0.70	7.36	1.13	11.30	−1.20	5.90	−0.54	12.37	−0.12
29	−6.05	31 689.27	−0.16	1.35	−0.66	6.03	−0.39	10.69	−1.39	5.20	0.28	10.86	−0.58
30	−7.63	32 311.33	0.03	1.35	−0.64	4.80	−1.79	11.01	−1.29	4.80	0.75	17.14	1.33
31	−12.18	30 477.36	−0.52	1.35	−0.68	6.25	−0.14	10.98	−1.30	4.70	0.87	15.28	0.76
32	−28.06	34 419.89	0.65	1.45	0.78	5.43	−1.07	10.25	−1.53	4.90	0.63	7.71	−1.54
33	−22.88	36 114.75	1.16	1.45	0.76	6.99	0.70	10.10	−1.58	4.10	1.57	7.45	−1.62
34	−21.51	40 067.20	2.33	1.44	0.63	4.79	−1.80	9.57	−1.74	4.70	0.87	8.10	−1.42

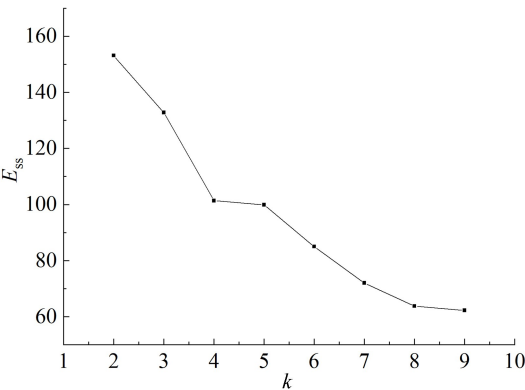


图 6 E_{ss} 随 k 的变化曲线
Fig.6 Variation curve of E_{ss} with k

表 3 初始标准化聚类中心

Table 3 Cluster center of initial standardized						
类别	总推力	刀盘 转速	螺旋机 转速	上覆土 层厚度	地下 水位	卵石 层厚度
1	2.33	0.63	−1.80	−1.74	0.87	−1.42
2	−0.79	−2.04	−1.36	0.37	0.87	−0.28
3	−1.84	0.88	0.98	1.23	−0.54	0.54
4	1.64	0.72	0.32	−0.08	0.40	0.99

3.4 结果分析

根据《成都轨道交通建设工程监控量测管理办法》及相关规范^[26-28]要求,可据此将地表沉降量控制标准划分为危险、较危险和安全 3 个等级,如表 5 所示。因此,将类别 1 地段划归为危险等级(Ⅰ级),对应综合沉降量为 24.15 mm,监测点为 1—3;类别

4 对应综合沉降量为 15.58 mm,类别 3 对应综合沉降量为 12.26 mm,将类别 4 和 3 划归为较危险等级(Ⅱ级),监测点分别为 7—13、16—19、25—34;将类别 2 地段划归为安全等级(Ⅲ级),对应综合沉降量为 8.50 mm,监测点分别为 4—6、14—15、20—24。

以相关沉降控制标准为依据,通过 K 均值聚类算法利用盾构掘进参数和 34 个沉降监测点对应的勘测数据进行聚类分析,综合考虑盾构掘进过程中的盾构机参数和地层信息因素进行数据的聚类分析。通过勘察点对应的监测点断面将盾构隧道推进路线进行分段,实现了施工沿线过程中潜在沉降风险的等级划分,有助于盾构掘进的安全稳定进行。

根据聚类结果绘制地表沉降量与影响因素聚类中心关系,如图 7 所示。由图 7a 可知,盾构总推力在 31 181.95~36 867.28 kN 之间时,地表沉降量随总推力的增加而增大,当盾构推力过大时在盾构施工中容易造成地面隆起,导致后期沉降过大;而当顶推力过小时易造成掌子面负压,导致掌子面失稳。由图 7b 可知,刀盘转速在 1.32~1.45 r/min 之间时,地表沉降量随刀盘转速的增加而增大,当刀盘转速增大时单位时间内刀盘产生的扰动较大,增加了地层损失率,故地表沉降量变化较为明显。由图 7c 可知,当螺旋机转速在 5.74~6.13 r/min 之间时,地表沉降量随螺旋机转速的增大而减小。当螺旋机转速较小时,渣土的排出效率较低,导致掌子面内部压力大于外部压力,而当螺旋机转速过大时,渣土的排出效率较高,导致掌子面内部压力小于外部压力;故螺旋机转速过大或过小都不利于掌子面的平衡,使

表 4 最终聚类中心及对应工程数据对比

Table 4 Comparison of final cluster centers and corresponding engineering data

沉降 等级	类别	地表沉降 量/mm	总推力		刀盘转速		螺旋机转速	
			归一化	实际数据/kN	归一化	实际数据/(r/min)	归一化	实际数据/(r/min)
Ⅰ级	1	24.15	1.38	36 867.28	0.72	1.45	−0.72	5.74
	4	15.58	0.69	34 544.72	0.59	1.44	−0.44	5.99
Ⅱ级	3	12.26	−1.04	28 734.09	0.31	1.42	1.12	7.36
	2	8.50	−0.31	31 181.95	−1.21	1.32	−0.27	6.13
沉降 等级	类别	地表沉降 量/mm	上覆土层厚度		地下水位		卵石层厚度	
			归一化	实际数据/m	归一化	实际数据/m	归一化	实际数据/m
Ⅰ级	1	24.15	−1.61	9.97	1.03	4.57	−1.53	7.75
	4	15.58	0.80	17.74	−0.42	5.80	−0.35	11.64
Ⅱ级	3	12.26	−0.29	14.25	−0.26	5.66	0.33	13.86
	2	8.50	−0.22	14.48	0.44	5.07	0.58	14.67

表 5 地表沉降量控制标准

Table 5 Control standards of surface settlement			
风险等级	危险(Ⅰ级)	较危险(Ⅱ级)	安全(Ⅲ级)
地表沉降量/mm	(30,20)	(20,10)	(10,0)

土体更容易发生扰动,导致地面沉降量变大。由图 7d 可知,上覆土层厚度在 9.97~14.48 m 之间时,地面沉降量随覆土厚度的增大而减小,当地下埋深较小时地层损失更容易传递至地面导致地面沉降过大,而当埋深过大时隧道支护压力随之变大,也会增加地表沉降量的风险。由图 7e 可知,当地下水位在 5.07~5.80 m 时,地面沉降量随地下水位的增大而增大。这是由于地下水位较小时,地下水位较高,对开挖面的支护压力较大,再加上地下水的流动性大,稳定性较差故更容易发生沉降。由图 7f 可知,卵石层厚度在 7.75~14.67 m 之间内,地表沉降量随卵

石层厚度的增大而减小,当卵石层厚度偏低时很难形成平衡拱,不利于阻止地层变形向上方的发展,故地层损失率较大,更容易发生沉降。

在盾构施工中,地表沉降量受复杂地层构造、周边环境等多因素综合影响,这些影响因素并非单独存在,单一因素对地表沉降量产生影响的同时也受到其他因素的制约。综合来看,在上覆土层厚度较小、地下水位较浅、卵石层厚度较小地段,盾构总推力较大,刀盘转速较大,螺旋机转速较小。聚类中心为此类别数据的均值,根据上述地层构造和掘进参数与地表沉降量的关系可确定参数范围。即若指标与沉降量为递增关系,则取此类别最小值与聚类中心区间,若指标与沉降量为递减关系,则取此类别聚类中心与最大值区间,以此可以获得不同地层构造对应的盾构掘进参数推荐值范围,如表 6 所示。当上覆土层厚度较大、地下水位较小、卵石层厚度较大

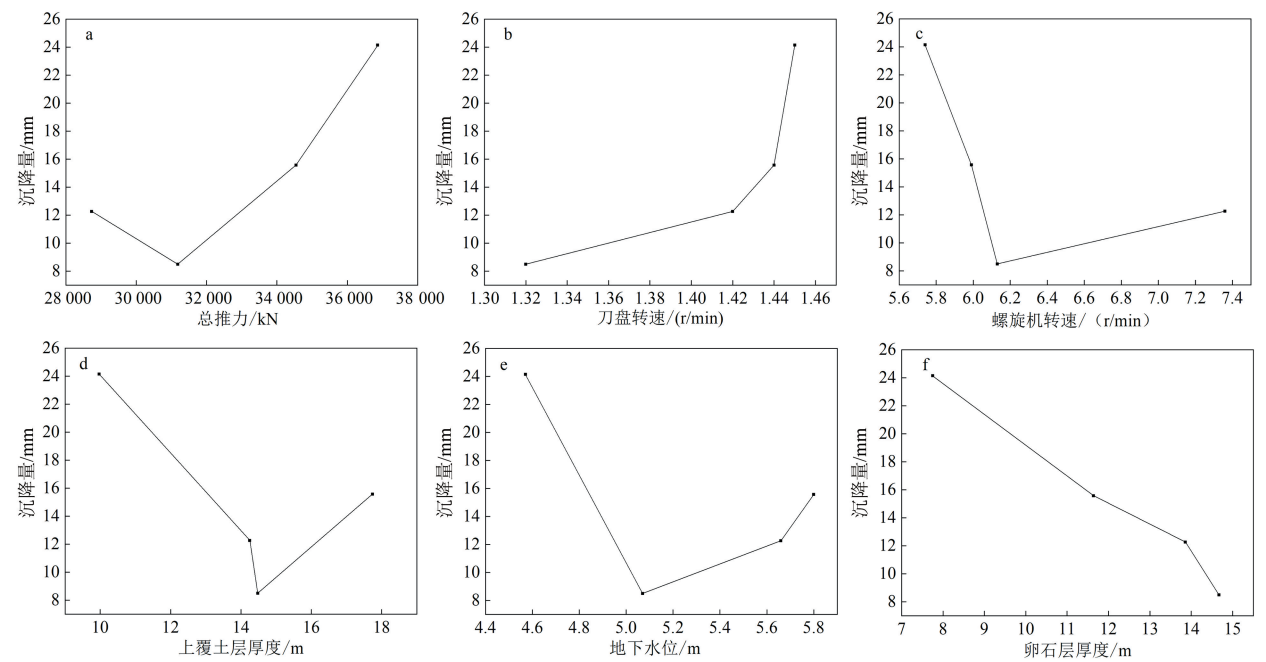


图 7 地表沉降量与影响因素聚类中心关系

Fig.7 Relationship between surface settlement and cluster centers of influence factors

表 6 不同风险等级对应的掘进参数控制范围

Table 6 Control range of tunneling parameters corresponding to different risk levels						
风险等级	测点编号	类别	地表沉降量/mm	总推力/ kN	刀盘转速/(r/min)	螺旋机转速(r/min)
Ⅰ级	1—3	1	24.15	34 419.89~36 867.28	1.44~1.45	5.74~6.99
		4	15.58	30 930.10~34 545.72	1.35~1.44	5.99~6.65
Ⅱ级	7—13、16—19、25—34	3	12.26	26 012.83~28 734.09	1.35~1.42	7.36~7.84
Ⅲ级	4—6、14—15、20—24	2	8.50	29 034.00~31 181.95	1.25~1.32	6.13~6.98

时,对应安全掘进参数控制范围为总推力 29 034.00~311 81.95 kN,刀盘转速 1.25~1.32 r/min,螺旋机转速 6.13~6.98 r/min;当上覆土层厚度较小、地下水位较小、卵石层厚度较小时,对应安全掘进参数控制范围为总推力 34 419.89~36 867.28 kN,刀盘转速 1.44~1.45 r/min,螺旋机转速 5.74~6.99 r/min。

4 结论

1)提出了利用 K 均值聚类算法结合盾构掘进参数和地质条件等实测数据对盾构掘进致地表沉降量的影响因素聚类分析方法。本方法以多维度的方式对数据进行自发组织的聚类并分级,消除了人为分类的主观性。通过大量的地层信息和掘进参数数据,依据地表沉降量的变化规律划分出不同安全等级,并提出相应的掘进参数控制范围,为砂卵石地区盾构施工提供参考。

2)通过对案例中 34 个监测断点的聚类分析可知,盾构总推力在 31 181.95~36 867.28 kN 之间时,地表沉降量随总推力的增加而增大;刀盘转速在 1.32~1.45 r/min 之间时,地表沉降量随刀盘转速的增加而增大;当螺旋机转速在 5.74~6.13 r/min 之间时,地表沉降量随螺旋机转速的增大而减小,但区间变动不大;上覆土层厚度在 9.97~14.48 m 之间时,地面沉降随覆土厚度的增大而减小;当地下水位在 5.07~5.80 m 时,地面沉降量随地下水位的增大而增大;卵石层厚度在 7.75~14.67 m 之间内,地表沉降量随卵石层厚度的增大而减小。

3)由“掘进参数-地层构造-地表沉降”三维模型分析结果可知:当覆土厚度较大、地下水位较小、卵石层厚度较大时,对应安全掘进参数控制范围为总推力 29 034.00~31 181.95 kN,刀盘转速 1.25~1.32 r/min,螺旋机转速 6.13~6.98 r/min;当覆土厚度较小、地下水位较小、卵石层厚度较小时,对应安全掘进参数控制范围为总推力 34 419.89~36 867.28 kN,刀盘转速 1.44~1.45 r/min,螺旋机转速 5.74~6.99 r/min。

参考文献 (References):

[1] 付君宜,陈发达,沈志平,等.岩溶山区城市地下隧道工程地质灾害风险分析[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(3):100-108.
Fu Junyi, Chen Fada, Shen Zhiping, et al. Risk Analysis of the Geological Hazards During Urban

Tunnel Construction in Mountainous Karst Areas[J]. China Journal of Geological Hazards and Prevention, 2023,34(3):100-108.
[2] 王海涛,苏鹏,孙昊宇,等.软岩地层盾构隧道施工引起的地层沉降预测[J].岩石力学与工程学报,2020,39(增刊2):3549-3556.
Wang Haitao, Su Peng, Sun Haoyu, et al. Prediction of Ground Settlement Caused by Shield Construction in Soft Rock Ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020,39(Sup.2):3549-3556.
[3] 马文辉,杨成永,彭华,等.卵石地层中地铁盾构近距下穿盾构隧道施工沉降控制[J].太原理工大学学报,2020,51(3):372-379.
Ma Wenhui, Yang Chengyong, Peng Hua, et al. On Settlement Control of Shield Tunnels Underneath the Shield Tunnel at Close Range in the Cobble Stratum [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2020,51(3):372-379.
[4] 韩文君,严红霞,欧建军.富水地层盾构掘进引起地铁隧道地表沉降规律研究[J].城市轨道交通研究,2020,23(8):31-34,39.
Han Wenjun, Yan Hongxia, Ou Jianjun. Research on Metro Tunnel Formation Subsidence Pattern Caused by Shield Tunneling in Water-Rich Stratum [J]. Urban Rail Transportation Research, 2020,23(8):31-34,39.
[5] 赵一行,詹刚毅,石钰锋,等.土岩复合地层超深圆形基坑内衬墙作用效果及优化[J].吉林大学学报(地球科学版),2023,53(2):526-540.
Zhao Yixing, Zhan Gangyi, Shi Yufeng, et al. Effect and Optimization of the Inner Lining Wall of the Ultra-Deep Circular Foundation Pit in the Soil-Rock Composite Stratum [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2023,53(2):526-540.
[6] 江英超,方勇,何川,等.砂卵石地层盾构施工滞后沉降形成的细观研究[J].地下空间与工程学报,2015,11(1):171-177,265.
Jiang Yingchao, Fang Yong, He Chuan, et al. Study on Delayed Settlement Formation Induced by Shield Tunneling in Sandy Cobble Strata [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015,11(1):171-177,265.
[7] 张坤勇,陈恕,王耀.盾构地表沉降的数值分析及归一化模型建立[J].地下空间与工程学报,2019,15(3):842-849.
Zhang Kunyong, Chen Shu, Wang Yao. Numerical

- Simulation and Normalized Model of Surface Settlement Induced by Shield Tunneling Excavation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019,15(3):842-849.
- [8] 于德海,舒娇娇,秦凯凯.盾构地铁隧道穿越既有铁路桥的沉降分析[J].水文地质工程地质,2020,47(2):148-152.
- Yu Dehai, Shu Jiaojiao, Qin Kaikai. An Analysis of the Settlement of a Shield Tunnel Passing Under the Operating Railway Bridge[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020,47(2):148-152.
- [9] 刘丹娜,周勋,王伟,等.砂卵石地层盾构区间地表沉降变化规律及参数控制研究[J].公路,2022,67(8):410-416.
- Liu Danna, Zhou Xun, Wang Wei, et al. Study on Variation Regularity and Parameter Control of Surface Subsidence in Shield Zone of Sandy Cobble Strata[J]. Highway, 2022,67(8):410-416.
- [10] 李洛宾,龚晓南,甘晓露,等.基于循环神经网络的盾构隧道引发地面最大沉降预测[J].土木工程学报,2020,53(增刊1):13-19.
- Li Luobin, Gong Xiaonan, Gan Xiaolu, et al. Prediction of Maximum Ground Settlement Induced by Shield Tunneling Based on Recurrent Neural Network[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(Sup.1):13-19.
- [11] Tashayo B, Behzadafshar K, Tehrani M S, et al. Feasibility of Imperialist Competitive Algorithm to Predict the Surface Settlement Induced by Tunneling [J]. Engineering with Computers, 2019,35(3):917-923.
- [12] Moghaddasi M R, Noorian-Bidgoli M. ICA-ANN, ANN and Multiple Regression Models for Prediction of Surface Settlement Caused by Tunneling [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2018,79:197-209.
- [13] 秦胜伍,张延庆,张领帅,等.基于Stacking模型融合的深基坑地面沉降预测[J].吉林大学学报(地球科学版),2021,51(5):1316-1323.
- Qin Shengwu, Zhang Yanqing, Zhang Lingshuai, et al. Prediction of Ground Settlement Around Deep Foundation Pit Based on Stacking Model Fusion[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021,51(5):1316-1323.
- [14] 阮永芬,邱龙,乔文件,等.基于改进极限学习机模型的盾构掘进引发地表最大沉降预测[J].水文地质工程地质,2023,50(5):124-133.
- Ruan Yongfen, Qiu Long, Qiao Wenjian, et al. Prediction of the Maximum Ground Settlement Caused by Shield Tunneling Based on the Improved Limit Learning Machine Model[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023,50(5):124-133.
- [15] 江帅,朱勇,栗青,等.隧道开挖地表沉降动态预测及影响因素分析[J].岩土力学,2022,43(1):195-204.
- Jiang Shuai, Zhu Yong, Li Qing, et al. Dynamic Prediction and Influence Factors Analysis of Ground Surface Settlement During Tunnel Excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022,43(1):195-204.
- [16] 陈仁朋,邹聂,吴怀娜,等.盾构掘进地表沉降机器学习预测与控制研究综述[J].华中科技大学学报(自然科学版),2022,50(8):56-65.
- Chen Renpeng, Zou Nie, Wu Huaina, et al. State of the Art and Prospect of Prediction and Control for Surface Settlement Caused by Shield Tunneling Based on Machine Learning [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022,50(8):56-65.
- [17] 胡珉,樊杰.基于K-means聚类算法的盾构掘进参数设定方法研究[J].隧道建设,2018,38(11):1772-1777.
- Hu Min, Fan Jie. Research on Parameter Setting Method of Shield Tunneling Based on K-means Clustering Algorithm [J]. Tunnel Construction, 2018,38(11):1772-1777.
- [18] 魏伟青,陈磊,骆汉宾.基于聚类分析的越江地铁隧道地质安全评价[J].土木工程与管理学报,2015,32(1):72-76.
- Wei Weiqing, Chen Lei, Luo Hanbin. Geological Safety Evaluation of Cross-River Metro Tunnel Based on Clustering Analysis [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015,32(1):72-76.
- [19] 卢浩,孙善政,施焯辉,等.基Apriori算法对地表沉降影响因素的数据挖掘及分析[J].隧道建设,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.
- [20] 潘涛.软土地区双线区间盾构隧道施工对周边地表以及建筑物沉降的影响[J].水文地质工程地质,2022,49(1):101-108.
- Pan Tao. Influences of Double-Track Shield Tunnel Construction on Settlements of Adjacent Ground and Buildings in a Soft Soil Area[J]. Hydrogeology and

- Engineering Geology,2022,49(1):101-108.
- [21] 江英超. 盾构掘进对砂卵石地层的扰动机理研究[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- Jiang Yingchao. Study on the Soil Disturbance Mechanism of Shield Tunneling in Sandy Cobble Stratum [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [22] 徐前卫,贺翔,龚振宇,等.砂卵石地层盾构微扰动施工及掘进控制研究[J].铁道工程学报,2020,37(9):72-77.
- Xu Qianwei, He Xiang, Gong Zhenyu, et al. Research on the Micro-Disturbance Construction and Tunneling Parameters Control of Earth Pressure Balance Shield Machine in Sandy Cobble Stratum [J]. Journal of Railway Engineering, 2020, 37(9): 72-77.
- [23] 成卫青,卢艳红.一种基于最大最小距离和 SSE 的自适应聚类算法[J].南京邮电大学学报(自然科学版),2015,35(2):102-107.
- Cheng Weiqing, Lu Yanhong. Adaptive Clustering Algorithm Based on Maximum and Minimum Distances, and SSE [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2015, 35(2): 102-107.
- [24] 韦生达,刘丹娜,彭鑫,等.基于灰色理论的砂卵石地层盾构施工参数控制对地表沉降影响分析[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(2):84-94.
- Wei Shengda, Liu Danna, Peng Xin, et al. Analysis of Influence of Shield Construction Parameters Controlling on Ground Settlement in Sandy Pebble Stratum Based on Grey Theory [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2022, 41(2): 84-94.
- [25] 郎秋玲,王伟,高成梁.基于组合权重与灰色关联度分析法的地铁深基坑开挖稳定性评价[J].吉林大学学报(地球科学版),2020,50(6):1823-1832.
- Lang Qiuling, Wang Wei, Gao Chengliang. Stability Evaluation of Deep Foundation Pit of Metro Based on Grey Correlation Analysis with Combined Weights [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(6): 1823-1832.
- [26] 城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013 [S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- Technical Specifications for Urban Rail Transit Engineering Monitoring: GB 50911—2013 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2013.
- [27] 城市轨道交通工程测量规范:GB/T 50308—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- Urban Rail Transit Engineering Survey Specification: GB/T 50308—2017 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2017.
- [28] 盾构法隧道施工及验收规范:GB 50446—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.
- Code for Construction and Acceptance of Shield Tunnels: GB 50446—2017 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2017.