

基于回归分析的顶管沉降预测分析及管理措施

李范竹

(上海宏渠工程咨询监理有限公司, 上海市 201399)

摘要: 随着城市化进程的加速和地下空间开发需求的增加,顶管施工技术因对地面交通和周围环境的较小干扰,已成为城市管线建设与改造的重要手段。然而,在顶管施工过程中不可避免引发土体扰动会导致地表沉降,将严重威胁周边建筑物及基础设施的安全。为了有效控制地表沉降,结合Peck经验公式,提出了基于回归分析的修正模型,以提高在复杂地质条件下的预测精度。通过对多个地区的施工数据进行验证,改进后的Peck公式能够准确预测地表沉降量,尤其在上海市及类似地质条件下的应用效果显著。结果表明,当修正系数 α 取值为0.8~1.1、 β 取值为0.7~0.9时能够更精准地反映土体变形的规律,为顶管施工中沉降控制提供了科学依据。通过引入智能化监测与预警系统,未来在顶管施工中的沉降管理将更加精细化与智能化。

关键词: 顶管施工;地表沉降;Peck公式;回归分析

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)04-0135-06

Predictive Analysis and Management Measures for Pipe Jacking Settlement Based on Regression Analysis

LI Fanzhu

(Shanghai Hongqu Engineering Consulting and Supervision Co., Ltd., Shanghai 201399, China)

Abstract: With the acceleration of urbanization and the increasing demand for underground space development, the pipe jacking technology has become an important means for urban pipeline construction and renovation due to the relatively small disturbance to ground traffic and the surrounding environment. However, soil disturbance during pipe jacking construction will lead to the ground surface settlement, which poses a serious threat to the safety of surrounding buildings and infrastructure. To effectively control the ground surface settlement, a modified model based on regression analysis is proposed in combination with Peck empirical formula to improve the prediction accuracy under complex geological conditions. By verifying the construction data from multiple regions, the improved Peck formula can accurately predict the ground surface settlement, especially in the Shanghai area and similar geological conditions, the application effect is remarkable. The result shows that when the correction factor α is between 0.8 and 1.1 and β is between 0.7 and 0.9, the laws of soil deformation can be accurately reflected, providing a scientific basis for the control of settlement in pipe jacking construction. The introduction of intelligent monitoring and early warning systems will lead to more refined and intelligent settlement management in future pipe jacking construction.

Keywords: pipe jacking construction; ground surface settlement; Peck formula; regression analysis

0 引言

随着城市化进程的加速与地下空间开发需求的激增,顶管施工作为一种非开挖地下管道敷设技术,因对地面交通、周边环境干扰小的优势,已成为城市管线建设与改造的核心手段之一。然而,顶管施工过程中不可避免会引发土体扰动,导致地表沉降或隆起,严重时可能威胁周边建(构)筑物、地下管线及

既有设施的安全。因此,精准预测土体沉降规律并实施有效控制,是保障顶管工程安全、提升城市地下空间开发质量的关键科学与技术问题。

顶管施工引起的土体沉降本质上是地层损失与施工应力共同作用的结果。前者源于管道顶进过程中土体的超挖、塌落或注浆填充不足,后者则由顶进正面推力、工具管与土体摩擦力及后续管道与土体相互作用等动态应力引发。

对于顶管工程引起的沉降,通常采用理论分析方法、经验公式方法和数值模拟方法。理论分析方法研究中通常结合Peck公式或者对Peck公式修正

收稿日期: 2025-08-19

作者简介: 李范竹(1992—),女,本科,工程师,注册监理工程师,从事水利水电、市政公用工程施工监理工作。

来预测地表沉降。传统的Peck公式对顶管施工引起的地面沉降预测精度较差。因此,Yang和Li^[1]、Tang等^[2]将实际工程的沉降、Peck公式的拟合结果和随机介质理论预测的沉降进行了比较,通过研究明确了顶管沉降通过宽度的预测范围,并对大型矩形顶管沉降预测方法提出了建议。Ma等^[3]通过三维数值模拟研究了隧道埋深变化对顶管施工引起的地面沉降分布特征的影响。根据顶管法反复扰动地层的特点,结合现场实测数据,提出了修正的Peck公式。郑馨等^[4]通过利用线性回归的数学方法,修正了传统Peck公式中关于最大沉降系数和沉降槽宽度系数的验证方法。Liu等^[5]通过数值模拟等方法对比了同一工程下顶管和盾构开挖沉降的差异,并对矩形Peck公式进行了修改。赵鹏才^[6]对流砂地层顶管施工土体变形规律进行了总结,并提出了相应的控制措施。冯振鲁^[7]验证了线性回归方法在盾构作业地表沉降预测中的适用性。耿弈等^[8]对超大直径顶管作业中的Peck公式运用进行了修正,使其可以适用于复杂的软土地层。杨杰^[9]在富水软土工况中对Peck公式进行了修正,并用力学模型进行了验证。Gao Yanxia等^[10]使用Peck公式对富水砂卵石地层隧道施工地表沉降进行了预测,并提出相应的施工方案。阮晨成等^[11]考虑土体参数条件随机场对矩形顶管作业地表沉降进行了分析。沈青松等^[12]基于随机介质理论和Peck公式改进了矩形顶管的地表沉降的计算公式。胡红敏等^[13]借助物理模型对Peck公式进行了修正,实现了顶管施工在复杂地形中的沉降预测。

综上所述,本文基于回归分析对Peck公式进行了修正,并通过实际验证了其在上海地区顶管作业中对沉降预测的准确性,并提出结合智能化监测系统和数据分析方法,进一步优化沉降控制措施。

1 地表沉降机制

顶管施工引起的土体变形与盾构施工法有诸多相似之处,尤其是在地表沉降的形成和发展过程中。顶管施工时,机头在土层中的切削作用导致土体的局部变形,进而引发地表沉降。沉降过程通常经历瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降几个阶段。其中,固结沉降主要发生在施工完成后,且通常在后期考虑。受到土层结构、地下水位、土层性质等多方面因素的影响,不同土层的沉降特征各异。对于特殊土层如流砂层,开挖面上方可能形成塌落拱效应,随着开挖范围的增大,拱效应会向外扩展,并在某些条件下

形成稳定结构。然而,施工过程中往往会破坏拱效应的完整性,导致土体与地表相连时产生沉降和塌陷。

土层变形的特点受土层性质、厚度和完整性差异的影响,不同土层的变形特征及应力重分布影响范围各不相同。地表沉降的幅度与施工过程中土体应力的释放密切相关,土体无法及时恢复原状时,可能导致地表不均匀沉降,影响周围建筑物或基础设施的安全性。松散的砂土层较为容易产生明显沉降,而黏土层由于塑性变形较大,沉降范围可能更广。为了减小地表沉降带来的影响,顶管施工过程中需要对土体承载力、地下水位、土层结构等因素进行详细分析和监测。

Peck R. B.^[14]于1969年首次提出了地层损失的概念,收集隧道开挖导致的地表沉降的数据。通过对大量实测数据进行数理分析,总结出地表沉降槽的形状近似呈高斯曲线分布(见图1),并在此基础上制定了地面沉降预测的Peck经验公式。研究发现,在不排水条件下,地面变形被认为是由地层损失引起的,地表沉降的体积应等于地层损失的体积。

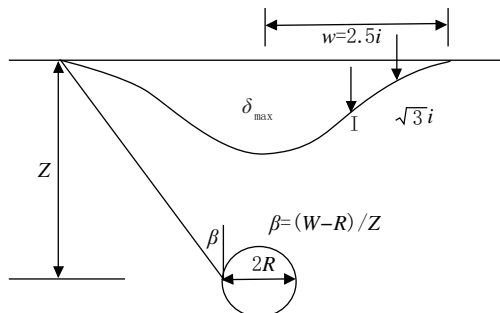


图1 Peck公式曲线

$$S(x) = S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)$$

$$S_{\max} = \frac{V_i}{i\sqrt{2\pi}}$$

式中: S_x 为横断面上距中轴线为 x 的沉降量; $S_{\max}$ 为沉降曲线中最大沉降量; x 为距离隧道轴线水平距离; i 为地面沉降槽宽度系数; V_i 为地层损失率。

Attenwell等^[15]在沉降槽宽度的参数取值方面进行了深入研究,通过对实际测量数据进行回归分析,探讨了沉降槽宽度与隧道埋深之间的关系。

$$i = Kz_0$$

$$W = 2.5i$$

式中: K 为沉降槽宽度系数; W 为沉降槽的总宽度; z_0 为隧道中轴线与地面的垂直距离。

2 回归分析

对大量实测数据研究分析得知,在众多因素的

影响下,实测点很难绘制成一条光滑的曲线,为了使 Peck 公式可以更好地预测软土地区的沉降,需要对 Peck 公式进行回归分析。

在 Peck 公式中, $S_{\max}$ 和 i 共同定义了地面沉降的特征曲线:

$$S_x = S_{\max} \exp \left[-\frac{x^2}{2i^2} \right]$$

对两边取对数得

$$\ln S(x) = \ln S_{\max} + \frac{1}{i^2} \times \left(-\frac{x^2}{2} \right)$$

令

$$Y = \ln S(x) \quad X = -x^2/2$$

使用 Y 和 X 作为回归变量进行回归分析。设 $\ln S(x)$ 和 $\frac{1}{i^2}$ 作为回归后的线性系数:

$$\begin{aligned} S_{xx} &= \sum \left(\frac{-x_i^2}{2} \right)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum \frac{x_i^2}{2} \right)^2 \\ S_{xy} &= \sum \left[\left(\frac{-x_i^2}{2} \right) \ln S(x_i) \right] - \frac{1}{n} \sum \left(\frac{-x_i^2}{2} \right) \sum \ln S(x_i) \\ S_{yy} &= \sum \ln^2 S(x_i) - \frac{1}{n} \left[\sum \ln S(x_i) \right]^2 \\ b &= \frac{S_{xy}}{S_{xx}}, \quad a = \frac{1}{n} \left[\sum \ln S(x_i) - b \sum \left(\frac{-x_i^2}{2} \right) \right] \end{aligned}$$

式中: a 为回归方程中的常数项; b 为回归方程中的线性系数; x_i 为第 i 个沉降监测点到隧道中心线的距离; n 为样本点个数。

使用数理统计学中的 r 检验方法来确定拟合优度。拟合优度表示变量 $\ln S(x)$ 的监测值与回归曲线的接近程度。

$$r = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx} \times S_{yy}}}$$

当 $r>0.8$ 时, X 和 Y 高度相关。当 $0.5<r<0.8$ 时, X 与 Y 显著相关。当 $0.3<r<0.5$ 时, X 与 Y 的相关性较低。当 $r<0.3$ 时, X 与 Y 不相关。在此基础上,经线性回归得到 $S_{\max}$ 和 i 的最优拟合参数:

$$\begin{aligned} S_{\max} &= \exp(a) \\ i &= \frac{1}{\sqrt{b}} \end{aligned}$$

对表 1 进行计算得到 $S_{xx}=180\,393.7$, $S_{yy}=6.653$, $S_{xy}=1\,077.25$, $a=0.005\,97$, $b=2.598$, 得到:

$$\ln S(x) = 2.598 + 0.005\,97 \times \left(\frac{-x^2}{2} \right)$$

验证实测数据后,断面 1 $r=0.967\,1$, 断面 2 $r=0.985\,8$, 断面 3 $r=0.990\,2$ 。

表 1 回归参数

样本点	到轴线中心的距离	$S(x)/\text{mm}$	$-x^2/2$	$\ln S(x)$
1	-10	-8.85	-50	2.18
2	-5	-11.10	-12.5	2.407
3	-2	-12.79	-2	2.549
4	0	-13.27	0	2.586
5	2	-15.17	-2	2.719
6	5	-13.36	-12.5	2.592
7	10	-12.97	-50	2.563
8	20	-3.04	-200	1.112

各监测断面的线性相关系数(r 值)均大于 0.8, 与 Peck 理论的期望值有较强的相关性。

说明采集到的监测结果是可靠的, Peck 公式拟合曲线准确地反映了研究区内实际地面沉降情况, 依据最小二乘法将各监测断面实测数据进行线性回归, 各断面回归曲线如图 2 所示。

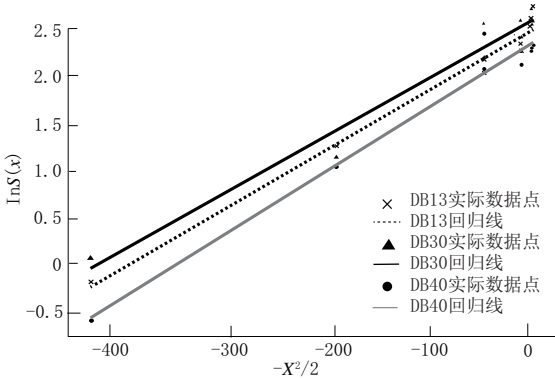


图 2 回归曲线

2.1 Peck 公式修正

如图 3 所示, Peck 经验公式的现场实测值与预测结果存在显著差异, 表明经验公式不能对复杂地质构造的地面沉降进行合理预测。因此, 需要对传统的经验公式进行改正。

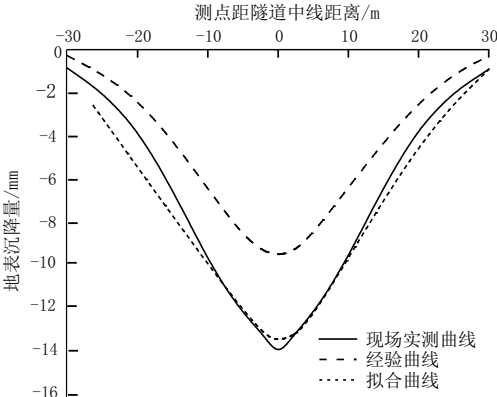


图 3 拟合曲线与实测曲线对比

基于实测数据和回归分析结果的对比, 对影响沉降曲线的两个主要因素地表沉降最大值($S_{\max}$)和沉降槽宽度(i)引入修正系数 α 和 β , 修正后的 Peck

公式如下。

$$S(x) = \alpha S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2\beta i^2}\right)$$

从图4~图6中可以看出,Peck公式拟合的曲线与实测地表沉降量的曲线基本一致。这表明将线性回归方法运用在实测地表变形数据的拟合中,从而预测地铁隧道施工引发的地表沉降的方法可行性强。但受复杂的地质条件、施工工艺等因素的影响,拟合曲线与实测数据之间仍存在一定差距。为此,需要对Peck公式进行优化改进,使其更适用于上海地区的地质条件,进而能够更准确地分析隧道开挖引起的地表沉降规律。

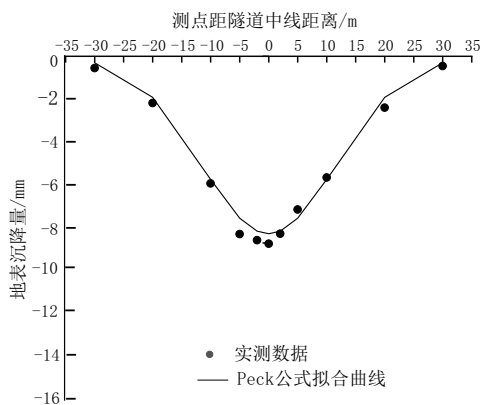


图4 断面1

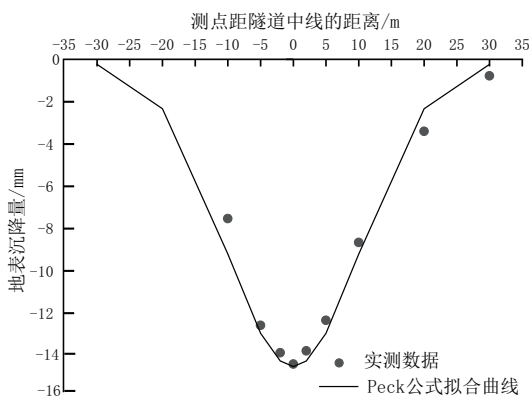


图5 断面2

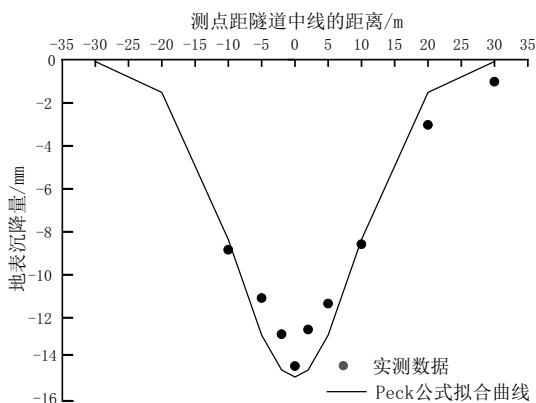


图6 断面3

选取多个地区数据进行实验,得到 α 的区间范围为0.8~1.1, β 的区间范围为0.7~0.9,修正好Peck公式可以很好地预测本工程的地表沉降。

通过选取修正系数 α 和 β 的上限值组合0.8和1.1、下限值组合为0.7和0.9进行检验。结果显示,任意非限值修正系数组合得到的改进预测曲线均落在对应限值修正系数所得到的预测曲线范围内(见图7)。

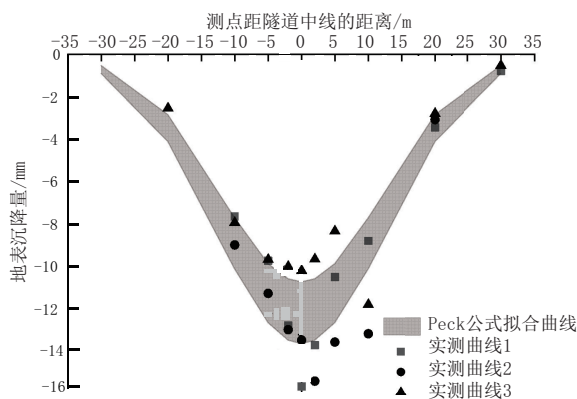


图7 改进后Peck公式区间和实测数据对比

多数实测数据落在上限曲线和下限曲线之间的范围内,表明改进后的曲线与实测数据的吻合度得到了提升,并验证了在上海地区及类似地质条件和工况工程的背景下,使用改进后的Peck公式预测地表沉降的可行性得到了加强。具体来说,通过修正Peck公式中的地表最大沉降和沉降槽宽度,能够减少在模拟施工过程中的沉降变化的误差,使结果更准确。当修正系数 α 取值为0.8~1.1, β 取值为0.7~0.9时,所预测的地表沉降量的精度明显提高,尤其在考虑到上海地区特有的土层结构、地下水位波动及施工方法等复杂因素时,改进后的公式仍能够保持较高的预测准确性。这表明该方法不仅适用于上海地区的地下管道施工,也可广泛应用于其他具有相似地质条件和工况的地区。

3 工程实例分析

3.1 工程概况

崇明线配套曹路杨家沟(中群河—浦东运河)、中群河(唐家圈路—曹路杨家沟)河道建设工程位于曹路镇,曹路杨家沟位于东靖路南侧,本次按规划实施中群河—浦东运河段1 437 m,含华东路桥下、浦东运河连接段总疏浚长度1 528 m,规划口宽30 m,底宽10 m,底高0.00 m,陆域宽度6×2 m。曹路杨家沟主要工程内容为开挖土方75 197 m³、疏浚土方

15 650 m³,新建护岸 2 715 m、护底 1 246 m、3 m 宽防汛通道 6 542 m²,栏杆 2 715 m,桥梁 1 座等。中群河位于崇明线停车场西侧,本次按规划实施唐家圈路—曹路杨家沟段 740 m,含东靖路桥下总疏浚长度 786 m。规划宽 20 m,底宽 8 m,底高 0.50 m,陆域宽度 6×2 m。中群河主要工程内容为开挖土方 33 348 m³、疏浚土方 6 655 m³,新建护岸 1 475 m、护底 412 m、栏杆 1 475 m,桥梁 1 座等。

经现场踏勘及查询招标文件等资料,共线区域隧道顶标高为-8 m 以下。根据地铁实施保护要求,以及类似项目的建设要求,地铁实施范围 50 m 为保护区域。

3.2 地质情况

区间隧道覆土埋深 23.34~32.7 m,最大纵坡为 +3.5‰,主要涉及土层为①黏土、②粉质黏土、③砂质粉土、④粉砂。

3.3 回归分析

根据地勘资料并结合修正后的 Peck 公式,对当修正系数 α 取值在 0.8 至 1.1 之间、 β 取值为 0.7~0.9 时,现场沉降监测数据与理论计算基本吻合:

$$S(x) = \alpha S_{\max} \exp\left(-\frac{x^2}{2\beta i^2}\right)$$

沉降监测点的设置位于岸坡处,即隧线进入河道区域前,隧线轴线上方最大沉降约 12 mm。考虑后期河道的养护及疏浚,对河床底部的扰动,可能对地铁轨道造成潜在的风险,因此共线区域采用全断面钢筋混凝土护底,隧线 50 m 保护区域的河道护坡结构进行提前、加固施工,保证施工质量,减少后期对地铁线路的影响。

4 沉降控制管理措施

顶管施工引起的地表沉降是一个复杂的过程,影响因素多且变化迅速,因此,必须实施一系列科学合理的管理措施。以下是沉降控制的主要措施,分别从施工前的土层分析与监测、施工过程中的优化措施、沉降监测与预警系统的设置三个方面展开。

4.1 施工前的土层分析与监测

在顶管施工开始之前,进行全面的土层分析与现场勘探是沉降控制的第一步。通过对施工区域的土层结构、地下水位、土体力学性质等进行详细分析,能够为后续的沉降预测和控制提供科学依据。具体来说,首先需要利用钻孔勘探、地质雷达、原位测试等手段,获得土层的分布信息及土质的物理力

学参数,如土壤的弹性模量、黏聚力和摩擦角等。这些信息有助于预测不同土层的沉降特征和反应,评估潜在的地表沉降范围和变化幅度。此外,地下水位的测试同样重要,因为水位波动会影响土体的稳定性,尤其在软土或流砂层中,地下水位的变化可能加剧沉降风险。最后,通过设置沉降监测点并进行初步的沉降监测,可以为施工后期的动态监测提供对比数据,为沉降预测模型提供基础数据支持。

4.2 施工过程中的优化措施

顶管施工过程中,土体的扰动是导致地表沉降的主要因素,因此优化施工方案和控制施工参数是沉降控制的关键。首先,合理选择顶管的推进速度和推进压力是至关重要的。推进速度过快或推进压力过大会导致土体剧烈扰动,特别是在松散的砂土或流砂层中,可能引发较大的地表沉降。因此,针对不同土层类型,应根据其物理力学性质来调整推进速度,避免过度扰动土层。对于较软的土层或水敏性土层,建议采用较低的推进速度;而在较硬的土层中,可以适当提高推进压力以提高施工效率。此外,注浆技术在顶管施工中也发挥着重要作用。通过适时注浆,可以填充因顶管推进而产生的空隙或裂缝,增强土层的稳定性,防止沉降的发生。在施工过程中,针对可能的土层松动区域,及时注浆以加固土体,是防止大范围沉降的重要手段。同时,顶管机头的设计也应根据土层特性进行调整。采用适合土层特性的刀盘和扩孔设计,可以减少对土体的破坏,降低沉降风险。

4.3 沉降监测与预警系统的设置

在顶管施工中,沉降监测与预警系统的智能化应用能够大大提升沉降控制的效率和响应速度。通过利用先进的传感技术、大数据分析、物联网(IoT)和人工智能(AI)算法,沉降监测不仅能实时获取沉降数据,还能通过智能算法对数据进行分析和预测,提前识别潜在的沉降风险,从而及时采取有效的应对措施。

智能传感器与物联网(IoT)技术的应用使得沉降监测更加精确和实时。通过在施工区域布设多个智能传感器,可以实时采集地表沉降、土体压力和位移等数据,并通过物联网技术将数据传输至集中控制系统。这些传感器可以通过无线网络进行远程监控,使得施工人员能够随时获取沉降数据,而不必现场人工检查,大大提高了监测的效率。

借助大数据分析技术,沉降监测数据可以被存

储并用于长期分析,通过对历史沉降数据的学习和比对,系统能够识别出不同土层和施工条件下的沉降模式。在数据积累的基础上,系统能够识别潜在的风险点,提前预测沉降趋势,进而实现对沉降发生的准确预警。

人工智能(AI)算法的引入使得沉降预警系统的预测能力得到进一步提升。人工智能(AI)可以通过机器学习对大量历史监测数据进行深度分析,从中提取出潜在的规律性与异常模式,构建更加精准的沉降预测模型。当系统监测到沉降量接近预设的安全阈值时,人工智能(AI)系统能够及时发出警报,提前预测并评估潜在风险,从而为施工人员提供决策支持。通过智能算法的支持,沉降预警的响应时间减少和预测精度提高。

智能决策支持系统的引入进一步增强了沉降控制的应急响应能力。结合实时监测数据和智能算法,系统不仅能够发出预警,还能够通过分析施工条件、地质特性和周围环境等多个因素,为施工团队提供科学的应急措施。例如,系统可以自动调整施工参数(如推进速度、注浆量等),或者在必要时建议暂停施工,并启动自动加固措施。这样,智能化的决策支持系统能够根据实时数据和预测结果,帮助施工团队快速、准确地作出应对决策。

通过智能化沉降监测与预警系统,能够实时感知和响应地表沉降的变化,使得顶管施工的风险可控且反应迅速,从而有效确保施工过程中土体稳定,避免地表沉降对周围环境、建筑物和基础设施造成不利影响。这种结合智能技术的沉降控制管理方式,不仅提高了施工安全性,也推动了现代化施工技术的发展。

5 结论

本研究通过对顶管施工过程中地表沉降的机制进行分析,提出了修正后的Peck公式,以提高在复杂地质条件下的预测精度。通过回归分析对传统Peck公式中的最大沉降系数和沉降槽宽度系数进行了修正,得到了更符合实际工程情况的沉降预测模型。在多个工程数据集上的验证结果表明,修正后的Peck公式能够有效地提高预测精度,尤其是在上海地区及类似地质条件下,能够更好地模拟施工过程中的沉降变化。通过合理选取修正系数的范围,修正后的公式提供了更可靠的预测结果,为顶管施工

中地表沉降的控制和管理提供了有力的技术支持。

本研究的结论不仅为上海地区的顶管施工提供了实用的预测工具,也为其他地区具有相似地质条件的地下管道施工提供了参考。未来,结合智能化监测系统和数据分析方法,进一步优化沉降控制措施,将有助于进一步提高施工的安全性和环境友好性。

参考文献:

- [1] Yang X, Li Y. Research of surface settlement for a single arch long-span subway station using the Pipe-roof Pre-construction Method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2018: 72210-72217.
- [2] Jun T, Shengcai L, Yongfu Z. Measurement and analysis of settlement induced by rectangular pipe jacking in silt stratum[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021.
- [3] Ma S, Li M, Jin J, et al. The influence of shallow buried double-line parallel rectangular pipe jacking construction on ground settlement deformation[J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(1): 1911-1916.
- [4] 郑馨,麻凤海. 长春地层地铁隧道施工的Peck公式改进[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(3): 732-736.
- [5] Liu X, Li P, Liu J, et al. Differential analysis and prediction optimization of ground surface settlement induced by quasi-rectangular shield and pipe jacking tunnelling[J]. Advances in Civil Engineering, 2022, 2022(1): 3884494.
- [6] 赵鹏才. 流砂地层顶管施工土体变形规律及控制措施研究[D]. 重庆: 重庆科技学院, 2021.
- [7] 冯振鲁. 基于线性回归方法的Peck公式适应性研究[J]. 公路, 2023, 68(5): 418-422.
- [8] 耿奔, 房鹏帅, 荆哲, 等. 基于修正Peck公式的软土地层超大直径顶管施工地表沉降特性研究[J]. 湖南城市学院学报(自然科学版), 2023, 32(5): 7-14.
- [9] 杨杰. 软土地区盾构隧道地表沉降规律研究[J]. 现代交通技术, 2023, 20(3): 78-83.
- [10] Gao, Yanxia, et al. Modification of Peck formula to predict surface settlement of tunnel construction in water-rich sandy cobble strata and its program implementation[J]. Sustainability, 2022: 14545.
- [11] 阮晨成, 周宇清, 王萌, 等. 考虑土体参数条件随机场的矩形顶管施工地表沉降分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2025, 42(3): 32-40.
- [12] 沈青松, 陈烨, 叶盛华, 等. 基于随机介质理论和Peck公式的矩形顶管地表沉降改进计算方法[J]. 岩土工程技术, 2025, 39(4): 504-510.
- [13] 胡红敏, 孔得宽, 王荣斗. 基于修正Peck模型的顶管施工软土地层地表沉降规律研究[J]. 河北工业科技, 2025, 42(1): 52-61.
- [14] Peck R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[J]. Proc. 7th Int. Con. SMFE, State of the Art, 1969(10): 225-290.
- [15] Attewell P B, Farmer I W. Ground settlement above shield driven tunnels in clay[J]. Tunnels & Tunnelling International, 1975, 7(1): 38-45.