

基坑开挖诱发侧方隧道变形的 PCA-MLR 预测方法

孙进^{1,2}, 赵伏田³, 王磊^{1,2}, 祁高^{1,2}, 单浩⁴

(1. 江苏省城市地下空间开发利用与安全防护工程研究中心, 江苏 南京 210000;

2. 江苏省地质矿产局第一地质大队, 江苏 南京 210000;

3. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098;

4. 徐州工程学院 土木工程学院, 江苏 徐州 221018)

摘要: 研究基坑开挖对侧方隧道变形的影响是岩土工程领域的热点与难点问题。为预测基坑开挖诱发临近侧方隧道变形, 首先通过主成分分析方法 (PCA) 对侧方隧道变形指标影响因素进行降维处理并获取其主要成分指标, 然后采用多元线性回归方法 (MLR) 建立隧道变形指标与主成分指标间的关系模型, 最后基于工程实例验证提出的 PCA-MLR 预测模型的正确性。研究结果表明: PCA-MLR 模型考虑了基坑开挖诱发侧方隧道变形的高维度影响因素耦合作用, 且实现了低维度主成分指标与变形指标间的关系模型建立。采用 PCA-MLR 模型预测的隧道最大水平及竖向位移与实测值的相对误差均小于 10%, 验证了提出模型的正确性与适用性。

关键词: 基坑开挖; 侧方隧道; 主成分分析; 多元线性回归

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)03-0107-06

Prediction of Displacement of Lateral Tunnel Induced by Foundation Pit Excavation Based on the PCA-MLR Model

SUN Jin^{1,2}, ZHAO Futian³, WANG Lei^{1,2}, QI Gao^{1,2}, SHAN Hao⁴

(1. Urban Underground Space Development and Utilization and Safety Protection Engineering Research Center, Nanjing, Jiangsu 210000, China;

2. The 1st Geological Brigade of Jiangsu Geology & Exploration Bureau, Nanjing, Jiangsu 210000, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

4. College of Civil Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou, Jiangsu 221018, China)

Abstract: The influence of foundation pit excavation on the displacement of adjacent tunnel has been a hot and difficult issue in the geotechnical engineering. In order to predict the displacement of lateral tunnel induced by foundation pit excavation, the dimensionality of the influencing factors on the displacement of lateral tunnel is reduced and the principal components of that are obtained based on the Principal Component Analysis (PCA). Then, the relationship between the principal component with low-dimensional and the displacement of lateral tunnel is established using Multiple Linear Regression (MLR). Lastly, the accuracy of PCA-MLR prediction model is verified based on the actual projects. The results show that the coupling effect of the high-dimensional influencing factors on the displacement of lateral tunnel induced by foundation pit excavation was considered. Besides, the low-dimensional principal components were used to establish the MLR model. The maximum horizontal and vertical displacement of lateral tunnel induced by foundation pit excavation were predicted using PCA-MLR model. The relative error between predicted and monitoring values were less than 10%, indicating the accuracy and applicability of the developed model.

Keywords: foundation pit excavation; lateral tunnel; principal component analysis; multiple linear regression

收稿日期: 2024-01-30

修稿日期: 2024-03-01

基金项目: 江苏省地质工程环境智能监控工程研究中心开放基金 (2023-ZNJKJJ-06); 江苏省卓越博士后计划 (2023ZB583); 江汉大学精细爆破国家重点实验室开放基金 (PBSKL2023B5)

作者简介: 孙进 (1982—), 男, 高级工程师, 主要从事地质勘探与基坑安全监控方面的研究。E-mail: 461042384@qq.com

通讯作者: 赵伏田 (1989—), 男, 博士, 研究员, 主要从事岩土材料力学行为测试与数值模拟方面的研究。E-mail: zhaofutian000@163.com

随着我国城镇化建设的飞速发展及城市地下轨道工程的高度开发,新建基坑工程与既有地下隧道的空间位置关系越发复杂且呈现密集化分布的趋势。新建基坑工程中土方开挖卸荷过程势必会改变周围岩土体的应力状态,进而对临近隧道产生附加应力和附加变形。大量工程实践已证明基坑开挖会导致临近既有隧道发生开裂现象,甚至造成破坏与坍塌^[1]。因此,如何在城市建筑物群密集区域进行基坑工程的设计和施工时,深刻认识与正确评估基坑开挖过程对临近既有隧道的影响至关重要。

国内外学者通过理论研究、现场测试与数值模拟等方法开展了大量研究工作。基于 Mindlin 位移场解答与 Winkler 弹性地基模型的两阶段分析方法^[2-4]实现了从理论层面解析了邻近开挖对既有软土隧道纵向受力变形的影响。然而,理论解析往往需要对隧道与土体模型进行简化,且忽略了隧道与土体间的相互作用,因此预测结果与实际情况存在一定的差异。另外,学者们基于实际工程现场监测和数值计算方法对该问题进行研究,并基于大量测试结果提出了一些经验预测模型,如魏纲等^[5-6]考察了基坑开挖深度、隧道与基坑的净距离、基坑开挖宽度对临近隧道最大水平位移的影响,并建立了幂函数、指数型函数及对数函数关系。郭鹏飞等^[7]建立了隧道最大隆起变形与基坑开挖面积间的对数型函数关系。刘波^[8]提出了一系列适用于软黏土地层、粉砂性地层、风化岩地层等不同地质条件的隧道最大水平位移及竖向位移经验预测公式。上述建立的经验预测公式能够便捷地服务于现场,且对特定工程的预测结果较为良好,然而由于公式中所选取的影响因素有限,预测精度同样不太理想。因此,如何评估基坑开挖过程中更多因素对临近隧道变形的影响并构建普适性更广的预测模型至关重要。随着计算机技术蓬勃发展,基于大数据的智能预测方法不断涌现,如神经网络模型、灰色理论、支持向量机法等^[9-11]。尽管这些智能预测模型能够实现从更高维度上预测隧道变形,但预测精度过于依赖样本数据量及对样本数据的学习与训练过程。

综上所述,如何识别与处理更多影响因素及构建因变量与自变量间的关系模型是实现准确预测隧道变形的关键。PCA-MLR 模型^[12]具有处理多维数据、去除样本数据冗余信息、消除变量间相关性、数据降维处理及构建关系模型等显著优势,被广泛应用于医学、经济学等领域。然而,目前尚未见关于采用 PCA-MLR 方法预测基坑开挖过程诱发侧方隧道

变形的报道。为此,本文提出一种基于 PCA-MLR 方法的基坑开挖诱发侧方隧道变形预测模型,并通过实际工程案例验证模型的正确性,以期为后续类似工程提供参考。

1 基于 PCA-MLR 的隧道变形预测方法

基于 PCA-MLR 的隧道变形预测方法的主要过程包括:(1)通过文献调研与分析,构建量化的影响因素与目标参数样本数据集;(2)采用 PCA 方法进行主成分识别与降维处理,实现将高维度的影响因素指标转化为低维度的主成分指标;(3)采用 MLR 方法构建主成分指标与变形指标间的关系模型。图 1 为 PCA-MLR 隧道变形预测模型的计算流程图。

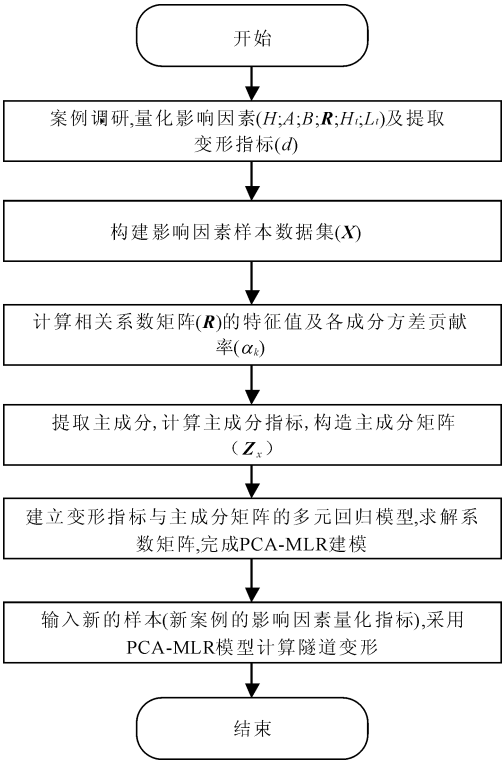


图 1 PCA-MLR 预测模型流程图

1.1 影响因素与变形指标选取

基坑的土方开挖与降水往往是同步进行的,其中土方开挖卸荷过程是一个应力释放过程,会导致基坑的围护结构向坑内发生移动,从而造成侧方隧道同步产生水平位移。另外,基坑降水过程中土中的孔隙水压力减小,导致有效应力增加,进而造成侧方隧道发生竖向位移。实际上基坑开挖过程诱发侧方隧道变形的影响因素众多,具体包括场地的地质与水文条件、基坑的设计与施工过程、侧方隧道与基坑的空间位置关系等^[5-8]。

为便于现场施工人员更为直观地理解与应用本文提出的预测模型,本文从众多的影响因素中选取了6个量化的主要影响因素(如图2所示),分别为基坑开挖深度(H)、基坑沿隧道横向的开挖宽度(A)、基坑沿隧道纵向的开挖宽度(B)、隧道半径(R)、隧道拱顶埋深(H_t)与隧道拱腰至基坑支护结构水平距离(L_t),各参数的几何特征详见图1。考察的目标参数为临近隧道的最大水平位移(δ_h)和最大竖向位移(δ_v)。

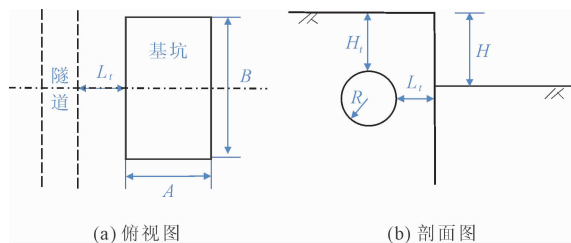


图2 基坑与侧方隧道几何尺寸及相对位置关系

1.2 主成分分析与降维处理

根据基坑开挖诱发侧方隧道变形的影响因素构造造成 m 维矩阵:

$$\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_j, \dots, x_m] \quad (1)$$

采用PCA方法将 m 维数据降维至 m' 维,主要步骤如下:

- (1) 将各维数据去均值使得 x_j 的均值等于0。
- (2) 计算 $\mathbf{X}$ 的 m 维数据间的相关系数矩阵 $\mathbf{Y}$:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mm} \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{Y}$ 中第 i 行第 j 列元素 r_{ij} 为原始数据 $\mathbf{X}$ 的 $x_i(t)$ 与 $x_j(t)$ 的相关系数,则:

$$r_{ij} = r_{ji} = \frac{\sum_{k=1}^N (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{l=1}^N (x_{il} - \bar{x}_i)^2 \sum_{l=1}^N (x_{jl} - \bar{x}_j)^2}} \quad (3)$$

式中: $\bar{x}_i$ 和 $\bar{x}_j$ 分别为 $x_i(t)$ 和 $x_j(t)$ 的平均值, x_{il} 为 $x_i(t)$ 中第 l 个指标值。

- (3) 计算相关矩阵 $\mathbf{Y}$ 的 m 个特征值: $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_m > 0$, 然后计算各特征值对应的特征向量 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_m$ 。
- (4) 计算方差贡献率

$$\alpha_k = \frac{\lambda_k}{\sum_{j=1}^m \lambda_j} \quad (4)$$

将 α_k 由大到小排序,当前 m' 个成分的方差贡献率累计值大于某一阈值时,即:

$$\alpha_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^{m'} \alpha_k > \text{阈值} \quad (5)$$

则认为这 m' 个主要成分的特征值和特征向量反映原数据的最重要的特征信息,可以舍去其余($m - m'$)个特征值和特征向量,实现降维。

(5) 计算主成分荷载

设提取出来的 m' 个主要成分分别为 $z_{x1}, z_{x2}, \dots, z_{xm'}$, 即主成分矩阵 $\mathbf{Z}_x$ 可表示成:

$$\mathbf{Z}_x = [z_{x1}, z_{x2}, \dots, z_{xm'}] \quad (6)$$

$\mathbf{Z}_x$ 特征值为 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_{m'}$, 可确定其分别对应的特征向量为 $\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \dots, \mathbf{e}_{m'}$, 然后计算样本数据的 m 个分量在 m' 个主成分上的载荷矩阵 $\mathbf{P}$ 。载荷矩阵第 k 行第 j 列元素 p_{kj} 可用下式计算:

$$p_{kj} = \sqrt{\lambda_k} e_{kj} \quad (7)$$

式中: $k = 1, 2, \dots, m', j = 1, 2, \dots, m$, e_{kj} 为特征向量 $\mathbf{e}_k$ 的第 j 个分量。则主成分与样本数据间存在如下关系:

$$\mathbf{Z}_x = \mathbf{P}\mathbf{X} \quad (8)$$

1.3 影响因素主成分指标与变形指标的关系模型建立

采用MLR方法建立隧道变形指标 C 与影响因素主成分矩阵 $\mathbf{Z}_x$ 的 n 个分量间的多元线性回归模型,并利用最小二乘法进行求解系数矩阵:

$$C = b_0 + b_1 z_{x1} + b_2 z_{x2} + \dots + b_{m'} z_{xm'} \quad (9)$$

式中: $b_0, \dots, b_{m'}$ 为待定系数,其计算公式为:

$$\begin{cases} b_0 = d_0 - \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^{m'} w_{ik} \bar{z}_{xk} d_i \right) \\ b_1 = w_{11} d_1 + w_{21} d_2 + \dots + w_{n1} d_n \\ b_{m'} = w_{1m'} d_1 + w_{2m'} d_2 + \dots + w_{nm'} d_n \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\bar{z}_{xk}$ 为 $\mathbf{Z}_x$ 各分量的均值。

2 案例分析与模型验证

2.1 样本数据集的构建

通过文献调研选取了20个工程实例用于构建样本数据集(详见表1),其中,前15个案例作为训练样本,用于建立PCA-MLR变形预测模型,后5个案例作为预测样本,用于验证所提出的预测方法的正确性。由于本文选取的影响因素指标主要为反映基坑与侧方隧道空间位置关系的几何参数,因此调研的工程案例应尽可能考虑不同的地质条件及基坑设计参数。为此,表1中给出的工程案例包含的典型地层有淤泥质黏土、粉质黏土、砂质粉土和强风化花岗岩,基坑围护结构形式有地下连续墙、钻孔灌注

桩与旋挖咬合桩,基坑支撑体系主要为钢筋混凝土 支撑结合钢支撑。

表 1 基坑开挖诱发侧方隧道变形案例统计

序号	项目名称	影响因素						变形参数	
		H/m	A/m	B/m	R/m	H_t/m	L_t/m	δ_h/mm	δ_v/mm
1	上海闸北区大宁商业中心基坑 ^[13]	6.45	230.0	240.0	6.0	11.8	5.45	4.0	-7.1
2	上海地铁 7 号线静安寺车站 ^[14-15]	25.09	13.05	23.71	6.2	8.5	15.0	3.0	-1.3
3	上海裕年国际商务大厦基坑 ^[16]	10.0	43.0	70.0	6.2	7.0	7.2	4.8	-3.3
4	中国东部地区某附属楼基坑 ^[4]	7.0	30.0	20.0	6.0	10.0	4.0	1.4	-6.8
5	宁波东部新城某基坑工程 ^[17-18]	11.3	100.0	240.0	6.2	13.8	7.5	50.9	-25.15
6	宁波东部新城某基坑工程 ^[17-18]	11.0	100.0	140.0	6.2	15.5	28.0	5.6	-3.0
7	宁波某基坑工程 ^[19]	14.0	50.0	300.0	6.2	14.0	15.5	15.3	-9.6
8	长沙某深基坑工程 ^[20]	9.6	40.0	60.0	6.2	7.5	18.5	1.39	-0.67
9	杭州某综合体基坑工程 ^[21]	13.0	75.0	251.0	6.2	7.3	8.3	1.52	-4.26
10	杭州萧山区某深基坑工程 ^[6]	15.8	75.8	200.0	6.2	11.2	9.5	11.9	-6.3
11	杭州萧山区某深基坑工程 ^[6]	15.8	75.8	200.0	6.2	11.2	12.4	10.5	-1.0
12	杭州市上城区某基坑工程 ^[22]	10.35	87.6	31.9	6.2	10.4	28.9	5.7	-2.0
13	杭州江干区某基坑工程 ^[23]	5.7	192.0	186.0	6.2	10.9	24.0	1.7	-3.1
14	深圳招商银行分行基坑工程 ^[24]	20.75	69.0	95.0	6.2	18.63	6.658	7.3	-5.13
15	深圳招商银行分行基坑工程 ^[24]	20.75	69.0	95.0	6.2	18.63	13.874	4.2	-3.24
16	上海城市规划馆基坑 ^[25]	11.5	63.0	45.0	6.2	7.0	7.0	18.7	-4.0
17	广州地铁琶洲站 ^[26]	29.0	304.0	75.0	6.2	5.6	33.0	20.0	-4.15
18	苏州工业园某基坑 ^[27]	17.1	74.0	58.0	6.2	12.5	10.1	18.0	-8.2
19	合肥大学城某基坑 ^[28]	16.0	314.0	185.0	6.2	12.0	15.4	25.8	-2.2
20	济南某基坑项目 ^[29]	9.5	256.0	172.0	6.2	11.8	16.7	11.6	-5.2

注:隧道最大水平位移以向基坑方向移动为正;隧道最大竖向位移以沉降为负。

2.2 数据降维处理与主成分矩阵构建

根据表 1 给出的影响因素构造 6 维矩阵,并采用 PCA 方法中给出的公式(1)—公式(5)计算各成分的特征值 λ_i 与方差贡献率 α_j 。根据计算结果绘制特征值碎石图,方差贡献率直方图及计算累计贡献率 α_{sum} ,见图 3。提取主成分时通常需满足两个基本条件:(1)成分的特征值大于 1;(2)累计的方差贡献率大于 0.7。因此,本文根据图 3 给出的 PCA 主成分分析计算结果提取了三个主成分,其特征值分别为 2.037,1.422 和 1.266,累计的方差贡献率为 0.787。通过主成分的提取实现了将影响因素 6 维矩阵简化为 3 维主成分矩阵,提取的主成分矩阵可保留原 6 维矩阵中 78% 的参数信息。

采用公式(6)—公式(8)计算提取主成分的荷载矩阵并得到式(11)的主成分计算公式。从计算结果可以看出,主成分 $\mathbf{Z}_{x1}$ 主要反映了影响因素中的基坑开挖深度(H),基坑沿隧道横向的开挖宽度(A)和隧道半径(R)的耦合作用;主成分 $\mathbf{Z}_{x2}$ 主要反映了影响因素中的基坑沿隧道纵向的开挖宽度(B),隧道半径(R)和隧道拱顶埋深(H_t)的耦合作用;主成分 $\mathbf{Z}_{x3}$ 主要反映了影响因素中的基坑开挖深

度(H),隧道拱顶埋深(H_t)与隧道拱腰至基坑支护结构水平距离(L_t)的耦合作用。表 2 给出了 3 维主成分矩阵的详细指标。

$$\begin{cases} \mathbf{Z}_{x1} = 0.79x_1 - 0.77x_2 - 0.46x_3 + 0.67x_4 + \\ \qquad 0.15x_5 + 0.21x_6 \\ \mathbf{Z}_{x2} = 0.22x_1 + 0.64x_2 + 0.83x_3 + 0.67x_4 + \\ \qquad 0.93x_5 + 0.57x_6 \\ \mathbf{Z}_{x3} = 0.7x_1 + 0.17x_2 - 0.42x_3 + 0.47x_4 - \\ \qquad 0.7x_5 + 1.32x_6 \end{cases} \quad (11)$$

2.3 主成分矩阵与变形指标的关系模型建立与模型检验

采用 MLR 方法中的公式(9)和公式(10)分别建立隧道变形指标最大水平位移 δ_h 、最大竖向位移 δ_v 与影响因素主成分矩阵 $\mathbf{Z}_x$ 的线性回归模型,详见公式(12)。

$$\begin{cases} \delta_h = 0.247 + 0.055\mathbf{Z}_{x1} + 0.045\mathbf{Z}_{x2} - \\ \qquad 0.130\mathbf{Z}_{x3}, R^2 = 0.857 \\ \delta_v = -5.692 + 0.087\mathbf{Z}_{x1} + 0.076\mathbf{Z}_{x2} + \\ \qquad 0.120\mathbf{Z}_{x3}, R^2 = 0.921 \end{cases} \quad (12)$$

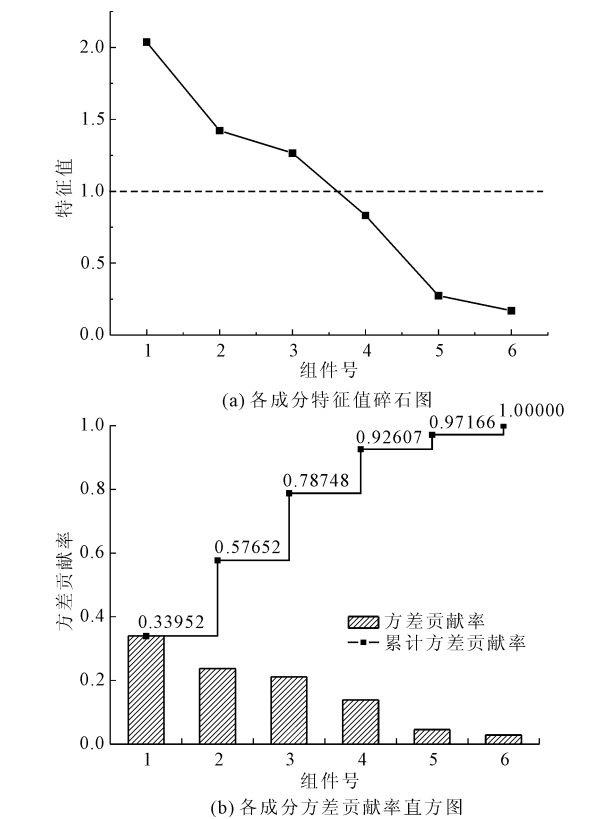


图 3 PCA 主成分分析计算结果

表 2 主成分指标			
序号	主成分 Z_{x1}	主成分 Z_{x2}	主成分 Z_{x3}
1	-275.47	365.92	-64.46
2	7.45	54.16	-8.54
3	-50.69	102.59	-21.57
4	-20.41	52.94	-7.10
5	-170.67	286.95	-88.56
6	-120.35	217.15	-20.48
7	-155.93	310.09	-113.73
8	-41.65	99.19	-3.04
9	-155.95	274.86	-93.01
10	-130.06	237.97	-74.56
11	-129.45	239.63	-70.73
12	-62.17	115.12	28.03
13	-218.07	306.49	-22.51
14	-72.09	152.85	-44.03
15	-70.58	156.96	-34.51

采用 F 检验法判断对上述建立的关系模型是否显著,表 3 给出了回归方程的检验统计量。从统计结果可以看出两个模型的 F 统计量分别为 10.125 和 16.357,均大于 $F_{0.05}(3,11) = 3.587$,说明在 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平上建立的回归方程具有显著的线性关系。

表 3 PCA-MLR 模型检验统计量

模型	数据类型	平方和	自由度	均方	F 统计量	$F_{0.05}$
最大水平位移预测模型	回归	517.449	3	172.483	10.125	3.587
	残差	19201.301	11	1746.391		
	总计	19727.75	14			
最大竖向位移预测模型	回归	157.233	3	52.411	16.357	3.587
	残差	9430.146	11	857.286		
	总计	9587.379	14			

2.4 PCA-MLR 预测模型的正确性验证

为进一步检验所建立的预测模型的正确性及适用性,以表 1 中的后 5 个工程案例(序号 16~20)作为预测样本来检验模型的正确性。表 4 为侧方隧道变形实测值与预测值对比,结果表明隧道最大水平位移实测值与预测值间相对误差均小于 5%,隧道最大竖向位移实测值与预测值间相对误差均小于 10%,验证了本文所提出的预测方法的正确性。此外,通过对比 PCA-MLR 模型与单一线性回归模型(MLR)的预测结果,发现隧道最大水平位移预测精度普遍提高约 8.1%,隧道最大竖向位移的预测精度普遍提高约 10.1%,进一步验证了本文提出的预测模型的优越性。

3 结 论

本文提出了基于 PCA-MLR 方法的基坑开挖诱发侧方隧道变形预测模型,并通过案例验证了模型的正确性与适用性,得出主要结论如下:

(1) 采用 PCA 方法提取的主成分矩阵不仅能够反映原样本数据集中多个量化影响因素的综合效应,而且实现了将 6 维的样本数据降至 3 维,便于后续建立影响因素与变形指标间的关系模型。

表 4 隧道变形实测值与预测值对比

序号	项目名称	最大水平位移 δ_h/mm			最大竖向位移 δ_v/mm		
		实测值	PCA-MLR 预测值 /相对误差	MLR 预测值 /相对误差	实测值	PCA-MLR 预测值 /相对误差	MLR 预测值 /相对误差
1	上海城市规划馆基坑 ^[25]	18.7	18.5/1.1%	17.1/8.5%	-4.00	-3.71/7.2%	-3.37/15.7%
2	广州地铁琶洲站 ^[26]	20.0	20.6/3.0%	17.6/11.5%	-4.15	-4.02/3.1%	-3.69/11.1%
3	苏州工业园某基坑 ^[27]	18.0	18.3/1.6%	16.3/9.4%	-8.20	-7.93/3.3%	-7.06/13.9%
4	合肥大学城某基坑 ^[28]	25.8	25.1/2.7%	23.4/9.3%	-2.20	-2.02/8.2%	-1.69/23.1%
5	济南某基坑 ^[29]	11.6	11.5/0.8%	10.3/11.2%	-5.20	-4.96/4.6%	-4.51/13.2%

(2) 建立的 PCA-MLR 模型能够较好地预测基坑诱发的侧方隧道变形,隧道最大水平位移的预测值与实测值相对误差均小于 5%,隧道最大竖向位移的预测值与实测值相对误差均小于 10%。此外,相比于单一的 MLR 回归模型,PCA-MLR 模型在隧道最大水平位移的预测精度上提高约 8.1%,在隧道最大竖向位移的预测精度上提高约 10.1%。

参考文献:

- [1] 张治国,黄茂松,王卫东. 邻近开挖对既有软土隧道的影响[J]. 岩土力学,2009,30(5):1373-1380.
- [2] 张治国,张孟喜,王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学,2011,32(7):2085-2092.
- [3] Zhang J F, Chen J J, Wang J H, et al. Prediction of tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft soil[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013,36(6):24-33.
- [4] 姜兆华,张永兴. 基坑开挖对邻近隧道纵向位移影响的计算方法[J]. 土木建筑与环境工程,2013,35(1):7-11.
- [5] 魏 纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学,2013,34(5):1421-1428.
- [6] 魏 纲,厉 京,宣海力,等. 大型深基坑开挖对旁边地铁盾构隧道影响的实测分析[J]. 铁道科学与工程学报,2018,15(3):718-726.
- [7] 郭鹏飞,杨龙才,周顺华,等. 基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J]. 岩土力学,2016,37(S2):613-621.
- [8] 刘 波. 软弱地层中基坑开挖卸荷引起临近既有地铁盾构隧道变形及控制方法研究[D]. 南京:东南大学,2022.
- [9] Chang C T, Sun C W, Duan S W, et al. Response of a Taipei Rapid Transit System (TRTS) tunnel to adjacent excavation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001,16(3):151-158.
- [10] 木林隆,林剑鸿,康兴宇,等. 基于过程响应的基坑开挖诱发临近隧道变形智能预测[J]. 建筑科学,2020,36(S1):227-232.
- [11] 刘鑫菊,郑 刚,周海祚,等. 临近基坑开挖引起的隧道变形预测分析[J]. 重庆大学学报,2022,45(7):37-44.
- [12] 林跃东,许巧玲,严哲钦. 基于 PCA-MLR 的公共建筑能耗报警阈值计算[J]. 福州大学学报(自然科学版),2017,45(6):907-911.
- [13] 王卫东,沈 健,翁其平,等. 基坑工程对邻近地铁隧道影响的分析与对策[J]. 岩土工程学报,2006,28(S1):1340-1345.
- [14] 高广运,高 盟,杨成斌,等. 基坑施工对运营地铁隧道的变形影响及控制研究[J]. 岩土工程学报,2010,32(3):453-459.
- [15] 艾鸿涛,高广运,冯世进. 临近地铁隧道的深基坑工程的变形分析[J]. 岩土工程学报,2008,30(S1):31-36.
- [16] 邵 华,王 蓉. 基坑开挖施工对邻近地铁影响的实测分析[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(S1):1403-1408.
- [17] 陈仁朋,孟凡衍,李忠超,等. 邻近深基坑地铁隧道过大位移及保护措施[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,50(5):856-863.
- [18] 杨雨冰,周 彪,谢雄耀. 邻近基坑施工作用下盾构隧道横向变形及开裂特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(S2):4082-4093.
- [19] 杨 骏,李夫杰. 深基坑施工对临近地铁盾构隧道的影响原理及规律研究[J]. 南京理工大学学报,2016,40(4):493-503.
- [20] 黄 戡,马启昂,詹艳云. 深基坑开挖降水对邻近地铁隧道的影响[J]. 公路工程,2018,43(2):145-150.
- [21] 袁 静,刘兴旺,陈卫林. 杭州粉砂土地基深基坑施工对邻近地铁隧道、车站的影响研究[J]. 岩土工程学报,2012,34(S1):398-403.
- [22] 丁 智,张 霄,金杰克,等. 基坑全过程开挖及邻近地铁隧道变形实测分析[J]. 岩土力学,2019,40(S1):415-423.
- [23] 曾晓鑫,丁文湘,彭 玲,等. 隔离桩桩径对基坑开挖引起既有地铁隧道位移的影响[J]. 铁道建筑,2017(6):95-97.
- [24] 左殿军,史 林,李铭铭,等. 深基坑开挖对邻近地铁隧道影响数值计算分析[J]. 岩土工程学报,2014,36(S2):391-395.
- [25] 贾 坚. 逆作开挖深基坑控制卸载变形的方法与实践[J]. 岩土工程学报,2007,29(2):304-308.
- [26] 王利军,邱俊筠,何忠明,等. 超大深基坑开挖对邻近地铁隧道变形影响[J]. 长安大学学报(自然科学版),2020,40(6):77-85.
- [27] 张林元,周山龙,徐忠民,等. 邻近既有轨道交通区间隧道深基坑施工技术研究[J]. 苏州大学学报(工科版),2012,32(6):76-82.
- [28] 李顺群,马伟亮,叶茂松,等. 基坑开挖对邻近既有隧道变形的影响[J]. 济南大学学报(自然科学版),2022,36(3):252-260.
- [29] 张兵兵,卢伟晓,李为腾. 基坑开挖对临近既有地铁隧道影响分析[J]. 科学技术与工程,2020,20(35):14673-14680.