

高层建筑深基坑支护结构位移动态监测方法

王贵美^{1,2}, 周建亮¹

(1. 中国矿业大学 力学与土木工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 泛城设计股份有限公司, 浙江 杭州 310015)

摘要:针对高层建筑深基坑支护结构位移监测时,位移轨迹、位移速率以及位移时间变化监测准确性较差问题,本文研究了高层建筑深基坑支护结构位移动态监测方法。对支护结构位移影响因素进行具体分析,生成了影响指标;再对基坑数据进行采集,建立数据集并进行降维处理;计算获取目标函数,结合影响指标建立时间序列模型,依据对模型的计算建立动态变量矩阵;通过对矩阵的计算获取动态监测数据的统计量,完成支护结构的动态监测。研究表明:运用该方法进行监测时,位移移动轨迹监测误差为0.1,位移速率保持在0.9 mm/d以下,且与实际位移速率基本一致,纵向位移量达到202 mm,且与实际沉降量一致。本文方法能够有效应用于高层建筑深基坑支护结构的位移动态监测,为保障高层建筑的稳定性和安全性提供重要的技术支持。

关键词:高层建筑;深基坑;支护结构;位移;动态监测;影响因素;数据降维;监测方法

DOI: 10.11990/jheu.202201035

网络出版地址: <https://link.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240131.0926.004>

中图分类号: P231 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2024)04-0717-05

Dynamic monitoring method for displacing deep foundation pit supporting structures in high-rise buildings

WANG Guimei^{1,2}, ZHOU Jianliang¹

(1. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. ASCITY Design Co., Ltd., Hangzhou 310015, China)

Abstract: The monitoring accuracy of displacement trajectory, displacement rate, and displacement time change is poor when monitoring the displacement of deep foundation pit-supporting structures in high-rise buildings. To solve this problem, this study investigates a dynamic monitoring method for tracking displacement in such structures. The influencing factors of support structure displacement are comprehensively analyzed to identify key indices. Foundation pit data are then collected, and a dataset is created to reduce dimensionality. The objective function is calculated, and a time series model is established by integrating the impact indices. A dynamic variable matrix is established on the basis of the model calculations. By analyzing the matrix, the statistics of the dynamic monitoring data are obtained, thereby completing the dynamic monitoring of the support structure. The experimental results show that the monitoring error of the displacement trajectory is 0.1. The displacement rate is kept below 0.9 mm/d, which is consistent with the actual rates. The longitudinal displacement reaches 202 mm, conforming to the actual settlement. This method can be effectively applied to the dynamic displacement monitoring of deep foundation pit-supporting structures in high-rise buildings. It also provides important technical support for ensuring the stability and safety of high-rise buildings.

Keywords: high-rise building; deep foundation pit; supporting structure; displacement; dynamic monitoring; influencing factor; data dimensionality reduction; monitoring method

随着城市化建设不断发展,大部分国家的城市建筑用地紧张,为节约有限土地,提高活动空间,高

层建筑以及超高层建筑理念受到青睐^[1]。高层建筑在建设过程中,由于建筑的基础埋深较大,在挖掘深基坑时,会遭受周边原有建筑遮挡以及土方失稳等问题^[2]。针对上述问题,为保障高层建筑的建设过程的安全进行,对高层建筑的深基坑支护结构位移数据实时监测,成为高层建筑建设过程中不可缺少的一部分。基于支护受力特性测量方法,根据深

收稿日期:2022-01-14.

网络出版日期:2024-01-31.

基金项目:国家自然科学基金面上基金项目(72171224);教育部人文社科规划基金项目(19YJAZH122);住房和城乡建设部项目(2021-S-048).

作者简介:王贵美,男,正高级工程师;

周建亮,男,教授,博士生导师.

通信作者:王贵美,E-mail: wangguimei1101@163.com.

基坑支护密度确定土体测斜、竖向支护测斜、基坑阳角等参数,使用 ABAQUS 软件结合参数数值,模拟挖掘过程,完成深基坑支护监测^[3-5]。传统该方法在计算挖掘规律时容易产生误差,影响监测效果。

本文通过分析高层建筑深基坑支护结构发生位移情况,得出了土压力分布及弹性地基梁力学参数变化情况是其主要影响因素,并计算变化值。采用遥感技术采集深基坑周围数据并进行降维处理,得到高层建筑深基坑支护结构位移动态监测的目标方程,建立动态变量矩阵,计算动态数据监测统计量,实现动态监测。

1 影响因素的量化分析

对高层建筑深基坑支护结构进行位移监测前,需要分析影响支护结构位移的各项影响因素。其主要因素为土压力分布及弹性地基梁力学性能。为此分别计算高层建筑深基坑支护结构所受实有土压力、附加土压力的分布,并计算弹性地基梁力学参数,为后续监测高层建筑深基坑支护结构位移打下基础。

1.1 土压力分布计算

在高层建筑的建设过程中,深基坑支护结构所承受的土压力主要来自外荷载压力,外荷载压力又分为实有土压力与附加土压力^[6]。

1.1.1 实有土压力

由于深基坑土体挖掘过程中土的黏性不同需要用不同的计算方式。土体无较大黏性时使用库伦土压计算方法,土体黏性较强时,使用朗肯土压力计算法对土体进行计算,计算过程如下。

1) 土体无粘性。

高层建筑在挖掘深基坑时,实有土压为:

$$\begin{cases} \sigma_a = (\gamma z + q)K_a \\ K_a = \cos^2 \varphi / [1 + \sqrt{\sin(\varphi + \delta) \cdot \sin(\varphi - \beta) / (\cos \delta \cdot \cos \beta)}] / \cos \delta \end{cases} \quad (1)$$

式中: σ_a 为设定主动的土压轻度; γ 为深基坑填土厚度; z 为基坑深度; q 为坑后连续荷载分布; K_a 为土压系数; φ 为内摩擦角; δ 为外摩擦角; β 为基坑倾角。

2) 土体强黏性。

高层建筑在深基坑支护过程中,若土体黏性较强,利用朗肯理论对黏性土体压力^[7]计算为:

$$\begin{cases} \sigma'_a = (\gamma z + q)K_a - 2c\sqrt{K_a} \\ K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2) \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ'_a 为黏性土体压力; c 为土体凝聚力。

1.1.2 附加土压力

高层建筑深基坑支护结构发生位移时,基坑挡墙会受到实有土压分为主动土压 σ_a 以及附加主动

过程土压 $\Delta\sigma_a$ 。静止土压与被动土压的差值称作被动过程土压 σ_p , 将其与附加主动过程土压 $\Delta\sigma_p$ 进行整合统称为附加土压力,附加土体压力也分为砂土与黏土 2 类,具体计算结果如下所示:

1) 砂土类附加土体压力计算结果为:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_a = (\Delta\sigma_0 - \Delta\sigma_{acr}) \cdot \frac{\delta/\delta_{acr}}{(1-a) + a\delta/\delta_{acr}} \\ \Delta\sigma_p = (\Delta\sigma_0 - \Delta\sigma_{per}) \cdot \frac{\delta/\delta_{per}}{(1-a') + a'\delta/\delta_{per}} \end{cases} \quad (3)$$

2) 黏土类附加土体压力计算为:

$$\begin{cases} \Delta\sigma_a = (\Delta\sigma_0 - \Delta\sigma_{acr}) \cdot \left(\frac{\delta}{\delta_{acr}}\right) \exp\left(b\left(1 - \frac{\delta}{\delta_{acr}}\right)\right) \\ \Delta\sigma_p = (\Delta\sigma_0 - \Delta\sigma_{per}) \cdot \left(\frac{\delta}{\delta_{per}}\right) \exp\left(b'\left(1 - \frac{\delta}{\delta_{per}}\right)\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中: a 、 b 、 a' 、 b' 为土体相关参数; σ_{acr} 和 σ_{per} 为附加土体的极限位移。计算得出的主动、被动土体压力,完成对静止土压的获取:

$$\sigma_0 = (\gamma z + q)K_0 \quad (5)$$

式中: K_0 为土压系数; σ_0 为计算出的静止土压。

1.2 弹性地基梁力学参数计算

将深基坑支护排桩看作竖置的弹性基梁,将深基坑内的土体与支撑支护结构之间的作用看作二力杆弹簧,土体对支护结构作用简化成主动土体压力,基坑挖掘面以下呈矩形分布结构,挖掘面以上为三角形分布形式。通过 m 法对深基坑内的被动区域进行计算,过程为:

$$f_i = m_i z_i x_i \quad (6)$$

式中: f_i 为设定第 i 个弹簧的反作用力; m_i 为比例系数; z_i 为弹簧的挖掘深度; x_i 为支护结构的水平移动值。

当支护结构侧重于土体压力与弹簧抗力时,使用 m 法获取支护结构挠曲微分方程:

$$\begin{cases} E_I \frac{d^4 x}{dz^4} = e_{aik}(z_i) b_s, & 0 \leq z_i \leq h \\ E_I \frac{d^4 x}{dz^4} = -m z_i x_i + e_{aik}(z_i) b_s, & z_i \geq h \end{cases} \quad (7)$$

式中: I 为深基坑内挡墙的惯性截面矩阵; E_I 为支护结构的抗弯刚度; m 为比例系数; z_i 为选定点至挖掘面的距离; $e_{aik}(z_i)$ 为土体压力分布函数; b_s 为计算宽度。

高层建筑建设从深基坑挖掘开始。挖掘过程中,如出现变形,会对深基坑进行支护^[8],即建筑行业所谓的“先变形后支撑”。通过有限元方法,能够有效地利用节点位移值调整墙体的前期变形。所以在监测深基坑支护结构位移时,需将预加轴力转化为相应的初始应变杆力完成计算。支护结构的初

始应力值 ε 为:

$$\varepsilon = N(AE_g) \quad (8)$$

式中: N 为预加轴力; E_g 为支护结构弹性模量; A 为有限元函数。

2 动态监测

2.1 建立目标函数

根据上节参数计算,设计高层建筑深基坑支护结构位移动态监测方案,对采集到的深基坑周围数据降维处理。深基坑周围数据包括实有土体压力、黏性土体压力、土体极限位移、深基坑墙后填土厚度。在采集深基坑周围数据前埋好测点,获取各项静态数据的初始值。将位移传感器安装在沉降位移的测点上,测深传感器安装在深基坑墙后测点上,获取土体极限位移及深基坑墙后填土厚度数据,利用土压力计和孔隙水压力计,测试实有土体压力及黏性土体压力,获取实测数据。使用主成分分析 (principal component analysis, PCA) 方法对采集数据进行降维^[9]处理。利用 PCA 算法构建增广矩阵模型,实现高维数据的线性无关转化,将原始的高维空间映射到一个低维空间,实现增广矩阵内元素的降维处理。

设定采样数据集为 D , 数据集中的数据量为 X , 建立的数据增广矩阵 X_a , 考虑数据之间的相关性使用 PCA 算法构建增广矩阵模型,过程为:

$$X_a = SP^T + E \quad (9)$$

式中: S 为得分矩阵; P 为荷载矩阵; E 为残差矩阵。基于式(1)建立的增广模型对采集数据进行降维处理,过程为:

$$\begin{cases} \mathbf{x} = [x_1^T, x_{i-1}^T, \dots, x_{i-D}^T] \\ \mathbf{T}^2 = \mathbf{x}^T \mathbf{P} \wedge \mathbf{P}^T \mathbf{x} \\ \mathbf{Q} = \mathbf{x}^T (\mathbf{I} - \mathbf{P} \mathbf{P}^T) \mathbf{P} \mathbf{P}^T \mathbf{x} \end{cases} \quad (10)$$

式中: \mathbf{x} 为降维后的数据; Q 为数据的统计量; \wedge 为相交运算。

为提取数据的自相关动态变量特征建立高层建筑深基坑支护结构位移动态监测目标函数,过程为:

$$\begin{cases} \max_{\mathbf{w}, \boldsymbol{\beta}} \mathbf{w}^T (\boldsymbol{\beta}_1 X_1^T + \boldsymbol{\beta}_2 X_2^T + \dots + \boldsymbol{\beta}_D X_D^T) \cdot \\ (\boldsymbol{\beta}_1 X_1 + \boldsymbol{\beta}_2 X_2 + \dots + \boldsymbol{\beta}_D X_D) \mathbf{w} \\ \text{s. t. } \mathbf{w}^T \mathbf{w} = 1, \boldsymbol{\beta}^T \boldsymbol{\beta} = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\boldsymbol{\beta}$ 为系数向量; \mathbf{w} 为投影向量; $\max_{\mathbf{w}, \boldsymbol{\beta}}$ 为自相关动态变量最大值。

2.2 建立模型

设定位移影响因素为参数指标,结合建立的目标方程构建时间序列回归模型。将时间序列采样数据设定为 z_t, z_{t-1}, \dots, z_1 , 数据残差为 e_t , 自回归 (autoregression, AR) 系数设定为 γ_j 形式,设定数据集中

第 j 个数据为 z_j , 建立数据的自回归模型,过程为:

$$\begin{cases} z_t = \sum_{j=1}^{t-1} \gamma_j z_j + e_t \\ \mathbf{X}_{D+1} = \mathbf{ZC} + \mathbf{F} \end{cases} \quad (12)$$

式中: C 为 AR 系数矩阵; F 为残差矩阵; z_t 为采样数据; \mathbf{X}_{D+1} 为建立的模型; Z 为数据矩阵; D 为数据数量。模型在训练过程中,需要使用最小二乘法将 F 进行最小化处理。

2.3 建立动态变量矩阵

基于上述搜索的 AR 系数向量 $\boldsymbol{\gamma} = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_D)^T$ 、投影向量 $\mathbf{w} \in \mathbf{R}^{m \times 1}$, 以及提取的动态潜变量 $\mathbf{s} = \mathbf{X}\mathbf{w}$, 其中, AR 系数向量为监测数据自回归模型的时间序列向量,投影向量为监测数据投影到数据特征矩阵上的向量,对模型的最小残差进行计算,结果为:

$$J = \min_{\mathbf{w}, \boldsymbol{\gamma}} \left\| s_{D+1} - \sum_{j=1}^D \gamma_j s_j \right\|^2 \quad (13)$$

式中: s_j 为第 j 个数据的动态潜变量; γ_j 为系数; J 为目标函数。由于变量的方差会对目标函数^[10]带来影响,所以在计算过程中,需要设定相关约束条件 s. t. $[\mathbf{w}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{w}] = 1$ 。

基于上述计算结果,通过建立的模型,构建支护结构动态数据的动态变量矩阵,过程为:

$$U_{k,D+1} = [U_{k,1}, U_{k,2}, \dots, U_{k,D}] \boldsymbol{\gamma}_k + F_k \quad (14)$$

式中: $U_{k,D+1}$ 为建立的动态变量矩阵; k 为动态变量数据; $\boldsymbol{\gamma}_k$ 为映射数据数据; F_k 为模型残差变量。

再引入拉格朗日乘子,建立拉格朗日函数 L , 过程为:

$$L = \|\mathbf{X}_{D+1} \mathbf{w} - z(\boldsymbol{\gamma} \otimes \mathbf{w})\|^2 + \lambda(1 - \mathbf{w}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X} \mathbf{w}) \quad (15)$$

式中: $\boldsymbol{\gamma} \otimes \mathbf{w}$ 为数据向量的 Kronecker 卷积^[11-12]。通过建立的函数计算投影向量与系数向量的偏导数 $\partial L / \partial \mathbf{w}$ 和 $\partial L / \partial \boldsymbol{\gamma}$, 由于建立的目标函数值 λ 与向量 \mathbf{w} 存在相关,所以当投影向量 \mathbf{w} 为已知数据的情况下,通过计算可获取系数向量 $\boldsymbol{\gamma}$ 的值。最后可使用建立的 AR 模型,对采集的数据进行计算,获取数据的动态数据监测统计量 T_a^2 , 实现深基坑支护结构的位移监测。过程为:

$$R = e_i \mathbf{A}_a^{-1} \leq \frac{K(n-1)}{n-K} F_\alpha(K, n-K) \quad (16)$$

式中: α 为置信阈值; $F_\alpha(K, n-K)$ 为自由度; \mathbf{A}_a 为协方差矩阵; e_i 为模型残差; n 为数量总数量; K 为动态变量; R 为监测统计值。

算法流程如下:

1) 采集数据并对数据进行降维处理,设定初始训练数据 x_i 以及动态变量 K ;

2)通过对初始训练数据 x_i 以及动态变量 K 的计算,获取目标函数,建立时间序列回归模型;

3)依据模型更新投影向量,并辨别 γ_k 与 w_k 是否收敛。若未进行收敛则需通过模型继续更新 γ_k 与 w_k ;

4)建立动态变量矩阵,计算动态数据监测统计量通过统计结果实现动态监测。

3 动态监测方法实验

为了验证动态监测方法的整体有效性,需要对此方法进行测试。分别采用高层建筑深基坑支护结构位移动态监测方法(方法 1)、富水砂卵石地层深基坑开挖变形监测与数值分析(方法 2)、软土深基坑组合开敞式支护数值模拟与监测分析(方法 3)进行测试。在对深基坑支护结构进行动态监测时,控制 3 种方法的测试对象、测试环境及测试条件一致。

在对深基坑支护结构进行动态监测时,深基坑的位移轨迹、位移速率以及位移随时间变化曲线都会影响监测效果,将该 3 种影响因素作为 3 种性能检测指标,对 3 种监测方法进行测试。

1) 位移轨迹测试。

在对深基坑支护结构位移监测时,产生的位移轨迹可以直观反映出位移监测的监测精度。设定支护结构位移监测 5 周时间,采用方法 1、方法 2 以及方法 3 进行深基坑支护结构监测,对监测过程中的位移轨迹进行测试,测试结果如图 1 所示。

实际位移轨迹 —— 方法1 - - - 方法2 方法3 - - -

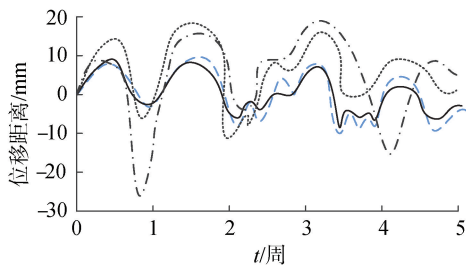


图 1 不同监测方法的位移轨迹测试结果

Fig. 1 Displacement trajectory test results of different monitoring methods

分析图 1 可知,本文所提方法测试出的深基坑支护结构位移轨迹与实际的深基坑支护结构位移轨迹相接近,而方法 2 的支护结构位移轨迹与实际支护结构位移轨迹之间存在差距较大,方法 3 测试结果不理想。本文所提方法由于在深基坑支护结构位移监测前期,全方位分析了深基坑周边的土压力,获取了土压力分布,所以本文所提方法在进行深基坑支护结构位移监测时,能够有效测试出深基坑支护结构的位移轨迹,从而提高监测精度。

2) 位移速率测试。

深基坑支护结构位移监测时,位移速率是否稳定会直接影响监测效果。采用方法 1、方法 2 以及方法 3 进行支护结构动态监测,对 3 种监测方法监测出的位移速率进行测试,测试结果如图 2 所示。

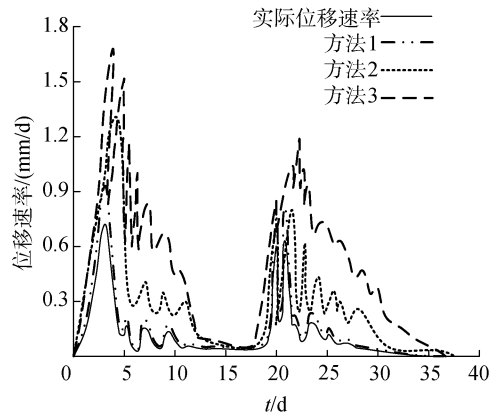


图 2 不同监测方法的位移速率测试结果

Fig. 2 Displacement rate test results of different monitoring methods

分析图 2 可知,本文所提方法测试出的深基坑支护结构位移速率与实际深基坑支护结构位移速率相接近,而方法 2 与方法 3 测试的深基坑支护结构位移速率与实际结果相差较大。由于本文所提方法在进行深基坑位移结构动态监测前,对影响基坑支护结构位移的深基坑弹性初始应力进行了具体分析,所以在进行深基坑位移结果动态监测时测试出的支护结构位移速率与实际深基坑支护结构位移速率相接近。通过该项测试能够证明本文所提方法在进行位移动态监测时的监测效果好。

3) 纵向位移量测试。

基于上述测试结果,采用方法 1、方法 2 以及方法 3 进行动态监测时,对深基坑支护结构纵向位移量(沉降量)进行测试,测试结果如图 3 所示。

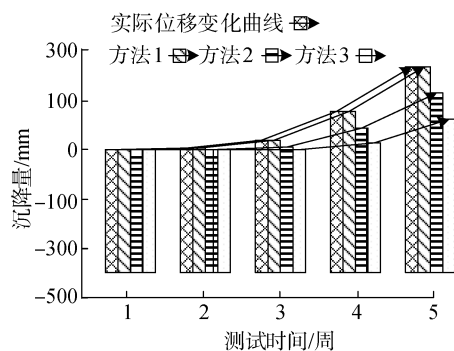


图 3 不同方法的沉降量测试结果

Fig. 3 Settlement test results of different methods

分析图 3 可知,深基坑位移时间变化曲线随着时间的增加而上升。本文所提方法测试出的位移时间变化曲线与深基坑支护结构实际位移时间变化曲

线相一致。而方法2与方法3在支护结构出现位移变化时,未能及时监测出深基坑的位移变化。

综上所述,经过测试本文所提方法监测到的深基坑支护结构位移轨迹与实际深基坑支护结构位移轨迹相接近,并且能有效测试出位移变化速率和位移时间变化曲线,由此证明本文所提方法在进行深基坑支护结构位移监测时的监测效果好。

4 结论

1)该方法能够有效监测高层建筑深基坑支护结构的位移动态。通过使用该方法进行监测,位移移动轨迹的监测误差较小,仅为0.1。该方法能够提供高精度的位移监测数据,接近实际位移情况。具有高精度的监测结果,能够准确地反映结构的实际位移量和沉降量。

2)该方法能够准确监测位移速率,位移速率保持在0.9 mm/d以下,并且与实际位移速率基本一致。可及时捕捉位移速率的微小变化,为及时采取应对措施提供依据。

3)该方法能够准确监测纵向位移量,纵向位移量达到202 mm,并且与实际沉降量一致。在纵向位移量的监测上具有较高精度,能够准确反映支护结构的沉降情况。

未来研究可进一步优化该方法的实时性和自动化程度,以适应更复杂的环境和条件,并拓展其在更多工程领域中的应用。

参考文献:

- [1] 耿佳弟,陈五一,彭志松.基于离散元的岩土基坑边坡渗流耦合计算仿真[J].计算机仿真,2021,38(4):240-243,482.
GENG Jiadi, CHEN Wuyi, PENG Zhisong. Numerical simulation of seepage coupling of rock and soil foundation pit slope based on discrete element method[J]. Computer simulation, 2021, 38(4): 240-243, 482.
- [2] 陈保国,闫腾飞,王程鹏,等.深基坑地连墙支护体系协调变形规律试验研究[J].岩土力学,2020,41(10):3289-3299.
CHEN Baoguo, YAN Tengfei, WANG Chengpeng, et al. Experimental study on compatible deformation of diaphragm wall support system for deep foundation pit[J]. Rock and soil mechanics, 2020, 41(10): 3289-3299.
- [3] 黄晓程,余地华,邓昌福,等.大型深基坑施工内控集约化监测点布设研究[J].施工技术,2020,49(1):41-44.
HUANG Xiaocheng, YU Dihua, DENG Changfu, et al. Research on layout of internal control intensive monitoring points for large deep foundation excavation construction[J]. Construction technology, 2020, 49(1): 41-44.

本文引用格式:

王贵美,周建亮.高层建筑深基坑支护结构位移动态监测方法[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(4):717-721.

WANG Guimei, ZHOU Jianliang. Dynamic monitoring method for displacing deep foundation pit supporting structures in high-rise buildings[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(4): 717-721.

- [4] 罗正东,吴鹏,黄河,等.富水砂卵石地层深基坑开挖变形监测与数值分析[J].建筑结构,2020,50(23):128-133.
LUO Zhengdong, WU Peng, HUANG He, et al. Deformation monitoring and numerical analysis of deep foundation pit excavation in water-rich sandy cobble stratum[J]. Building structure, 2020, 50(23): 128-133.
- [5] 赵凌云,路威,秦景,等.软土深基坑组合开敞式支护数值模拟与监测分析[J].水利水电技术,2020,51(2):155-161.
ZHAO Lingyun, LU Wei, QIN Jing, et al. Numerical simulation and monitoring analysis of composed open-typed support for deep soft soil foundation pit[J]. Water resources and hydropower engineering, 2020, 51(2): 155-161.
- [6] 李阳阳,王士杰,刘明珠.深窄基坑桩锚撑组合支护结构桩顶侧向位移的解析解[J].河北农业大学学报,2020,43(4):116-120.
LI Yangyang, WANG Shijie, LIU Mingzhu. The analytical solutions of the maximum horizontal displacement of the pile head in pile-anchor-support composite retaining structures for deep and narrow foundation excavation[J]. Journal of Hebei Agricultural University, 2020, 43(4): 116-120.
- [7] 杨明辉,吴志勇,赵明华.挡墙后有限宽度土体土拱效应分析及土压力计算方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2020,47(3):19-27.
YANG Minghui, WU Zhiyong, ZHAO Minghua. Soil arch effect analysis and earth pressure calculating method for finite width soil behind retaining wall[J]. Journal of Hunan University (natural sciences), 2020, 47(3): 19-27.
- [8] 莫品强,刘尧,黄子丰,等.复杂支护条件下深基坑支护桩-冠梁-支撑的变形协调及空间效应研究[J].岩土力学,2022,43(9):2592-2601.
MO Pinqiang, LIU Yao, HUANG Zifeng, et al. Compatibility of deformation and spatial effects for retaining pile, crown beam and braces under complex retaining conditions of deep foundation pit[J]. Rock and soil mechanics, 2022, 43(9): 2592-2601.
- [9] 孙玉帅,韦生达,王兴,等.基于主成分分析的基坑开挖对周边建筑物影响分析[J].长春工程学院学报(自然科学版),2023,24(1):16-22.
SUN Yushuai, WEI Shengda, WANG Xing, et al. Analysis on influence on surrounding buildings by deep foundation pit excavating based on principal component analysis[J]. Journal of Changchun Institute of Technology (natural sciences edition), 2023, 24(1): 16-22.
- [10] 陈秀秀,叶盛,洪艳艳,等.黄河骨干水库水沙调度的目标函数构建和应用[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(3):727-739.
CHEN Xiuxiu, YE Sheng, HONG Yanyan, et al. The construction and application of objective function for water and sediment operation of major reservoirs in the Yellow River[J]. Journal of basic science and engineering, 2020, 28(3): 727-739.
- [11] 王鼎衡,赵广社,姚满,等.KCPNet:张量分解的轻量卷积模块设计、部署与应用[J].西安交通大学学报,2022,56(3):135-146.
WANG Dingheng, ZHAO Guangshe, YAO Man, et al. KCPNet: design, deployment, and application of tensor-decomposed lightweight convolutional module[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(3): 135-146.
- [12] PENG Y, YAN S, LIU Y, et al. View graph construction for scenes with duplicate structures via graph convolutional network[J]. IET computer vision, 2022, 16(5): 389-402.