

# 基坑降水引发的沉降理论计算及预测研究\*

Theoretical Calculation and Prediction of Settlement Caused by Foundation Pit Precipitation

彭伟

(陕西铁路工程职业技术学院, 陕西 渭南 714000)

**摘要:** 为有效掌握基坑沉降变形规律, 以基坑所处地质条件为基础, 先结合有效应力原理, 利用分层综合计算基坑降水引发的沉降理论值; 其次, 再以基坑施工过程中的现场沉降监测数据为基础, 通过变形预测来佐证理论计算值的准确性。分析结果表明: 在基坑沉降的理论计算结果中, 沉降理论计算值均不同程度的小于沉降监测值, 且随着与降水井中心距离的增加, 沉降值具持续减小特征; 在基坑沉降的预测研究结果中, 所得预测结果的相对误差均值介于 2.02%~2.09%, 说明 ILSO-RVM-CT 在基坑沉降变形预测中具有较强的预测能力, 且预测结果显示基坑沉降变形后续还会具小速率增加特征, 说明基坑沉降变形趋于稳定。

**关键词:** 基坑; 降水; 沉降理论计算; 变形预测

中图分类号: TU470 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 01-0100-07

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.01.018

PENG Wei

(Shaanxi Railway Engineering Vocational and Technical Couage, Weinan 714000, China)

**Abstract:** To effectively grasp the deformation law of foundation pit settlement, based on the geological conditions of the foundation pit, combined with the principle of effective stress, the layered comprehensive method is used to calculate the theoretical value of settlement caused by foundation pit precipitation; Secondly, based on the on-site settlement monitoring data during the excavation construction process, the accuracy of theoretical calculation values is supported by deformation prediction. The analysis results show that in the theoretical calculation results of foundation pit settlement, the settlement theoretical calculation values are to varying degrees smaller than the settlement monitoring values, and the settlement values have a continuous decreasing characteristic as the distance from the center of the drainage well increases; In the research results of predicting foundation pit settlement, the average relative error of the predicted results is between 2.02% and 2.09%, indicating that ILSO-RVM-CT has strong predictive ability in predicting foundation pit settlement deformation, and the prediction results show that the settlement deformation of foundation pit will continue to increase at a small rate, indicating that the settlement deformation of foundation pit tends to be stable.

**Keywords:** excavation dewatering; theoretical calculations; on site monitoring; deformation prediction

## 0 引言

在基坑开挖过程中, 若地下水高于开挖深度,

\* 基金项目: 陕西铁路工程职业技术学院科研基金 (KY2022-09)。

作者简介: 彭伟 (1983—), 男, 本科, 讲师, 主要研究方向: 土建类工程施工教学和管理。

收稿日期: 2023-08-14

降水处理是必要的, 且受地下水赋存条件影响, 基坑降水很易碰到潜水、承压水共存的情况; 同时, 基坑降水会引发土体沉降变形, 开展其理论计算是必要的, 且为掌握基坑沉降的发展规律, 开展其变形预测也尤为重要<sup>[1-2]</sup>。在基坑沉降理论计算结果中, 胡长明等<sup>[3]</sup>构建了黄土区基坑的沉降简化计算方法; 于澜涛等<sup>[4]</sup>修正了基坑沉降计算系数, 有效提高了基坑沉降计算精度; 上述研究为基坑沉降理

论计算提供了相应思路,但均未涉及潜水、承压水共同降水引发的沉降计算,因此,仍需针对此类情况开展相应的理论计算。在基坑沉降预测研究中,李晓生<sup>[5]</sup>通过数值拟合开展了砂卵石层沉降预测分析;王涛等<sup>[6]</sup>利用数值模拟分析了降水引起基坑周边地表沉降的发展规律;上述研究为基坑沉降预测提供了思路,但均未结合基坑沉降实测结果的预测研究,也存在拓展研究空间。

综合上述,本文以基坑所处地质条件为基础,先通过有效应力原理,将基坑潜水、承压水下降时的沉降计算划分为3部分,即潜水降水引起沉降、减压降水引起承压层沉降和减压降水引起上覆土层沉降,再利用分层总和法最终得出沉降总量;同时,结合沉降现场监测成果,对比沉降计算结果,并通过变形预测,进一步掌握基坑沉降变形特征。本文研究,旨在有效掌握基坑降水引发的沉降规律,为现场安全施工提供一定的理论支持。

## 1 实例概况

拟建工程为车站基坑,平面形态近似呈矩形(见图1),中心里程为YK15+125 m,主体内径长度180 m,标准段内径宽度为25 m,标准段深度为12.5 m,顶板覆土厚度设计为1.5 m;车站主体结构设计为两层岛式车站,结构形式为双柱三跨箱型框架,并于车站端口设置出风口和风亭,施工方法为明挖顺作法。

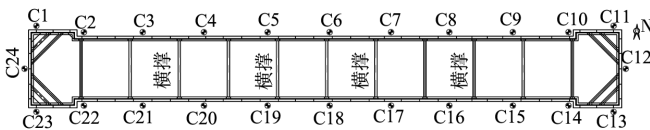


图1 基坑平面形态示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the plane shape of the foundation pit

根据钻探资料,区内地层自上而下依次为填土、粉砂夹粉土、粉质黏土和粉砂,其中,填土为素填土,岩性多为黏性土,杂色,局部含有少量的碎石、角砾(含量少于10%),局部可见上层滞水,平均厚度为1.3 m;粉砂夹粉土多为褐黄色、黄色,稍湿~湿,可塑为主,局部可见软塑,平均厚度为4.2 m;粉质黏土为青灰色、褐黄色,软塑~可塑,局部含少量角砾(含量少于5%),遇水易软化,均一性较好,平均厚度为3.5 m;粉砂多呈黄色、褐黄色,稍密~中密,稍湿~湿,均一性较好,揭露厚度大于13.5 m。根据室

内试验成果,各类地层的物理力学参数见表1。

表1 各类地层的物理力学参数

土层名称	重度 / (kN/m <sup>3</sup> )	压缩模量 / MPa	孔隙比	平均层厚 / m	含水层情况
①填土	18.8	4.2	0.859	1.3	上层滞水
②粉砂夹粉土	19.6	11.3	0.720	4.2	潜水
③粉质黏土	19.5	7.9	0.738	3.5	—
④粉砂	19.4	13.2	0.735	>13.5	承压水

根据现场调查,基坑周边条件较为复杂,其纵向为近似沿既有道路展布,北侧为住宅小区建筑群,上部层数24层,下部地下室一层,基础形式为桩基础;南部为商业楼层,地上设计6层,下部层数三层,基础形式为筏板基础。

## 2 坑降水引发的沉降理论计算

### 2.1 计算方法的构建

据GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》规定要求,基坑降水引发的沉降可通过分层总和法进行计算,即:

$$S = \sum_{i=1}^n P_0 h_i / E_{si} \quad (1)$$

式中:  $S$  为基坑沉降计算值;  $P_0$  为降水引起的附加沉降;  $h_i$  为相应分层;  $E_{si}$  为对应压缩模量。结合《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011)的分层综合法计算原理,其计算过程中,基坑降水引发的附加应力曲线及计算深度示意图见图2。

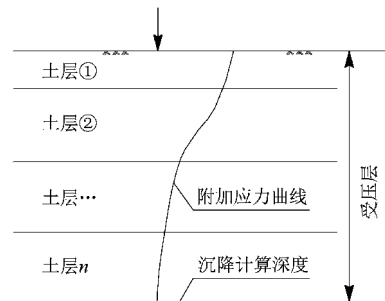


图2 基坑降水引发的沉降示意图

Fig. 2 Schematic diagram of settlement caused by foundation pit dewatering

由于项目区内地下水类型有潜水、承压水,因此,结合降水引发附加沉降的激励,对式(1)进行改进,即将沉降计算量进一步划分为3个组成部分,具体为:

$$S = S_0 + S_1 + S_3 \quad (2)$$

## 岩土力学

式中： $S_0$  为潜水降水引起潜水层的沉降变形； $S_1$  为减压降水引起承压层的沉降变形； $S_2$  为减压降水引起上覆土层的沉降变形。

### 2.1.1 潜水降水引起沉降的计算方法

结合工程实例，由于基坑开挖深度已超过了潜水深度，因此，区内潜水是以疏干为目的，其结构示意图如图 3 所示。



图 3 潜水降水引发沉降示意图

Fig. 3 Schematic diagram of settlement caused by groundwater precipitation

当潜水下降后，潜水含水层的有效应力会增加，即水重度会转变为土体附加应力，在此条件下，潜水降水引起单层地层的沉降  $S_{0i}$  计算为：

$$S_{0i} = r_w h_i^2 / 2E_{si} \quad (3)$$

式中： $r_w$  为水重度； $h_i$  为相应计算层的厚度； $E_{si}$  为相应计算层的压缩模量。

根据潜水降水影响范围内地层力学参数差异，相应划分计算层即可，且结合分层总和法叠加原理，将潜水降水引起地层沉降总量表示为：

$$S_0 = \sum_{i=1}^m S_{0i} = \sum_{i=1}^m (r_w h_i^2 / 2E_{si}) \quad (4)$$

式中： $m$  为潜水降水影响范围内分层数。

### 2.1.2 减压降水引起承压层沉降的计算方法

基坑开挖至承压水含水层，此时，需减压降水。减压降水的目的与潜水降水的目的一致，但其引发沉降的机理存在差异，即：在减压降水前，承压含水层中均充满承压水，其水头高度要高于本身水头高度，上覆地层还会收到承压水的反支撑力，当进行减压降水后，上覆地层会失去反支撑力，承压含水层的有效应力也会随之变化，进而引发沉降变形。

结合以往经验，多是通过 Dupuit 模型开展承压

水引发的沉降计算，其计算模型如图 4 所示。

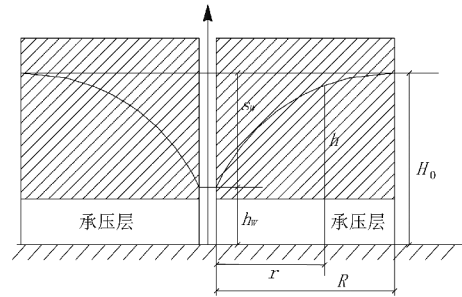


图 4 承压水降水引发沉降示意图

Fig. 4 Schematic diagram of settlement caused by confined water precipitation

据 Dupuit 模型原理，承压水减压后的等效附加应力  $p$  可表示为：

$$p = r_w Q \ln(R/r) / 2\pi T \quad (5)$$

式中： $Q$  为减压降水量； $R$  为降水井影响半径； $r$  为计算点距减压井的距离； $T$  为导水系数。在等效附加应力计算基础上，并结合土层一维压缩计算原理，将减压降水引起承压层的沉降计算公式表示为：

$$S_1 = r_w Q \ln(R/r) / 2\pi k E_{1s} \quad (6)$$

式中： $k$  为渗透系数； $E_{1s}$  为承压含水层的压缩模量。

### 2.1.3 减压降水引起上覆土层沉降的计算方法

类比，在等效附加应力和土层一维压缩计算原理基础上，将减压降水引起上覆单层地层的沉降计算公式表示为：

$$S_{2j} = r_w Q h_j \ln(R/r) / 2\pi T E_{sj} \quad (7)$$

再结合分层总和法原理，将减压降水引起上覆地层的总沉降计算公式表示为：

$$S_2 = \sum_{j=1}^m (r_w Q h_j \ln(R/r) / 2\pi T E_{sj}) \quad (8)$$

### 2.1.4 基坑降水引起沉降的总计算方法

据 2.1.1~2.1.3 节，构建了基坑降水条件下不同成因造成的沉降计算公式，且三者引起的沉降互不影响，因此，将三者叠加即为基坑降水引发的最终沉降  $S$ ，公式为：

$$S = \sum_{i=1}^m (r_w h_i^2 / 2E_{si}) + r_w Q \ln(R/r) / 2\pi k E_{1s} + \sum_{j=1}^m (r_w Q h_j \ln(R/r) / 2\pi T E_{sj}) \quad (9)$$

## 2.2 计算成果分析

在基坑沉降计算过程中，于基坑四周各选取一个监测点或降水井进行示例性分析，即 C6、C12、

C18 和 C24 监测点进行计算分析。以 2.1 节基坑沉降理论计算为基础, 经计算结果和现场监测成果统计, 得到 4 个点的沉降实测值和计算值, 如图 5 所示。据图 5 可知, 基坑沉降计算值均不同程度的小于其实测值, 且 4 个监测点的计算值相对实测值的减小幅度依次为 6.64%、10.04%、5.35% 和 8.29%。

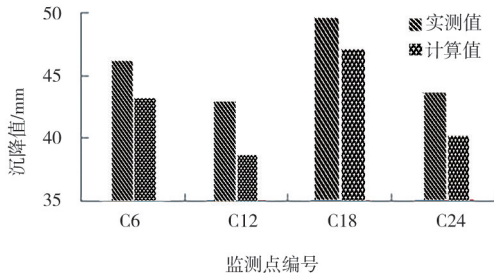


图 5 4 个点的沉降实测值和计算值对比

Fig. 5 Comparison between measured and calculated settlement values at four points

为进一步掌握降水井对沉降的影响规律, 以降

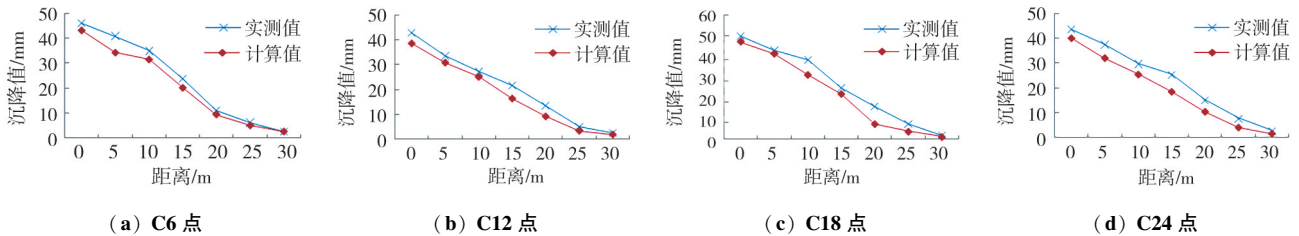


图 6 基坑降水井四周的沉降结果对比

Fig. 6 Comparison of settlement results around the drainage well in the foundation pit

### 3 基坑沉降预测研究

#### 3.1 预测方法的构建

由于相关向量机 (Relevance Vector Machine, RVM) 能在 Mercer 定理约束条件下开展较强的非线性变形预测, 因此, 以其为基础开展基坑沉降预测模型构建。据 RVM 原理, 将其训练函数  $t_i$  表示为:

$$t_i = \sum_{i=1}^N w_i K(x_i) + w_o + z_i \quad (10)$$

式中:  $N$  为训练样本数;  $w_i$  为权重值;  $K(x_i)$  为激励函数;  $w_o$  为偏差值;  $z_i$  为噪声值。

经 RVM 的使用经验, 其应用过程中参数  $w_i$  和  $z_i$  对预测精度具有一定影响, 因此, 进一步提出通过狮群算法 (Loin Swarm Optimization, LSO) 开展此两参数优化处理, 其优化流程详见文献 [7]; 但是, LSO 的寻优流程存在一定不足, 结合以往经验, 再

水井为中心, 统计其向四周扩散的沉降结果, 如图 6 所示, 将影响规律统计如下:

(1) 以降水井为中心, 随着与降水井中心距离的增加, 沉降值具有持续减小特征, 且也均是计算值偏小。其主要原因应是 2.1 节理论计算过程中将基坑支护结构考虑为绝对刚性, 但在实际情况下, 基坑支护结构均会不同程度的出现水平变形。

(2) 沉降最大点重点集中于降水井附近, 且降水井引起的沉降变形范围相对较广, 30 m 范围内仍有沉降, 因此, 合理设置降水井是十分必要的。

(3) 不论与降水井的距离是多少, 4 个监测点的计算值始终小于实测值, 其中, C6 监测点的减小幅度范围为 6.64%~20.94%, 均值为 13.36%; C12 监测点的减小幅度范围为 7.31%~31.30%, 均值为 18.70%; C18 监测点的减小幅度范围为 4.13%~52.86%, 均值为 24.33%; C24 监测点的减小幅度范围为 8.29%~47.96%, 均值为 27.36%。

进一步对 LSO 进行改进处理, 改进措施主要是对狮王位置、母狮位置和幼狮位置进行更新方式构建。

#### (1) 狮王位置更新方式构建

狮王在狮群中具有最高的社会地位, 传统 LSO 的狮王位置多是通过正态分布方式进行更新, 具有较强的随机性、盲目性, 致使其收敛能力降低, 因此, 将狮王位置更新方式  $g_i^{k+1}$  修正为:

$$g_i^{k+1} = g_i^k - A \times D \quad (11)$$

式中:  $g_i^k$  为前一位置处的狮王位置;  $A$  为系数因子;  $D$  为距离因子。

#### (2) 母狮位置更新方式构建

在狮群结构中, 母狮作用主要是搜寻猎物, 并重点完成捕捉猎物, 其原位置更新方式较为传统, 将其更新方式  $m_i^{k+1}$  修正为:

$$m_i^{k+1} = \frac{p_i^k + p_c^k}{2} (1 + a_{fj}) \quad (12)$$

岩土力学

式中： $p_i^k$ 为第  $k$  代母狮的历史最优解； $p_c^k$ 为第  $k$  代其他母狮的历史最优解； $a_f$ 为母狮扰动因子； $r$ 为正态随机参数。

(3) 幼狮位置更新方式构建

幼狮在狮群中的作用主要是跟随狮群进行学习，其位置更新方式包括：移动到狮王附近进食；跟随母狮开展捕猎学习和长大后被狮王逐出，因此，幼狮位置计算方式较多，将其更新方式  $n_i^{k+1}$ 修正为：

$$n_i^{k+1} = \begin{cases} \frac{q^k + q_i^k}{2}(1 + a_c r) & q \leq \frac{1}{3} \\ q_i^k + \beta(q^k - q_i^k) + a\xi & \frac{1}{3} < q \leq \frac{2}{3} \\ \frac{q^k + q_i^k}{2}(1 + a_c r) & q > \frac{2}{3} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $q$ 为幼狮位置因子； $q^k$ 为第  $k$  代其他幼狮的历史最优解； $q_i^k$ 为第  $k$  代幼狮的历史最优解； $a_c$ 为幼狮扰动因子； $a$ 为步长因子； $\xi$ 为随机因子。

根据上述，通过改进狮群算法 (Improved Loin Swarm Optimization, ILSO) 开展 RVM 参数  $w_i$  和  $z_i$  的寻优处理，即初步将基坑沉降变形预测模型确定为 ILSO-RVM。

考虑到基坑沉降变形具有很强的非线性特征，ILSO-RVM 的预测结果也会存在一定的预测误差，为确保预测精度，再进一步通过混沌理论 (Chaos Theory, CT) 进行预测误差的补充预测<sup>[8-9]</sup>。

按照 CT 原理，先计算预测误差的混沌判别参数  $\lambda$ ：

$$\lambda = \frac{1}{t_M - t_0} \sum_{i=0}^M \ln \frac{l_i}{L_i} \quad (14)$$

式中： $t_M$ 为计算时刻变量； $t_0$ 为原始时刻变量； $L_i$ 为原始距离参数； $M$ 为序列长度； $l_i$ 为重构距离参数。

当  $\lambda > 0$  时，说明可以通过混沌理论开展预测误差的补充预测，且在满足此要求条件下，将预测误差序列进行相空间重构，并以  $\psi_i$  点为基础，将其与  $\psi_j$  的距离  $d$  参数表示为：

$$d = \min_j \|\psi_i - \psi_j\| \quad (15)$$

式中： $\psi_i$ 、 $\psi_j$ 为相应的相空间节点。 $d$  值保持最小时，可以反推出预测误差的预测值，即完成其补充预测，因此，将基坑沉降预测模型最终确定为 ILSO-RVM-CT。

最后，为合理评价预测效果，将相对误差  $E_i$  作为评价指标，其值越小，说明预测精度越高，相应计算公式为：

$$E_i = |P_i - R_i|/P_i \quad (16)$$

式中： $P_i$ 为沉降实测值； $R_i$ 为沉降预测值。

3.2 基坑沉降变形特征

在基坑沉降实测过程中，共计布设了 24 个监测点 (具体布置见图 1)，按照两天一次的频率进行沉降值统计，得到 37 期变形监测成果，具体见表 2。据表 2 可知，基坑沉降实测值范围为 32.81~52.48 mm，均值为 43.28 mm。

表 2 24 个监测点的沉降实测值

Table 2 Settlement measurement values of 24 monitoring points

																								/mm
C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	C12	C13	C14	C15	C16	C17	C18	C19	C20	C21	C22	C23	C24	
32.81	39.21	35.74	40.55	43.48	46.25	51.23	44.41	48.02	43.75	45.61	42.85	41.10	38.52	34.12	36.45	38.78	49.78	49.71	44.72	47.82	52.48	47.05	50.41	43.65

限于篇幅，难以对所有监测点均进行沉降预测分析，且一般来说，沉降值越大，其代表性应越强，因此，以变形最大的 4 个监测点 C7、C18、C21 和 C23 进行后续预测分析；经统计，得到 C7、C18、

C21 和 C23 监测点的变形时间曲线，如图 7 所示。据图 7 可知，在监测过程中，4 个监测点的沉降变形呈持续增加趋势，只是波动起伏存在差异。

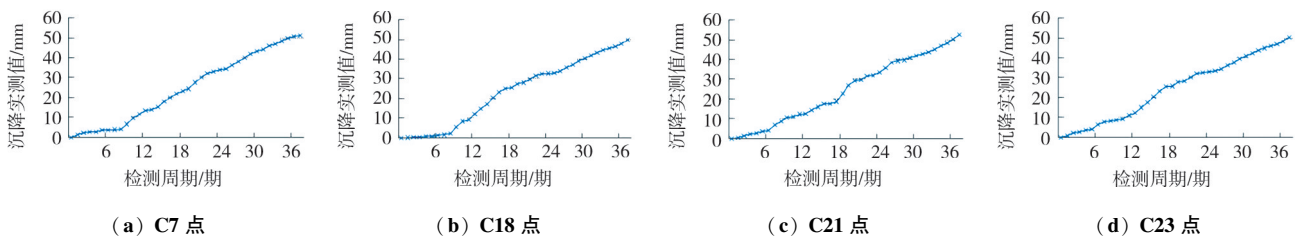


图 7 基坑沉降变形曲线

Fig. 7 Settlement deformation curve of foundation pit

为进一步掌握 C7、C18、C21 和 C23 监测点的沉降变形规律，对四者的沉降变形速率特征参数进行统计，结果为：C7 的沉降变形速率范围为 0.08 ~ 3.23 mm/期，均值为 1.38 mm/期；C18 的沉降变形速率范围为 0.10 ~ 3.19 mm/期，均值为 1.34 mm/期；C21 的沉降变形速率范围为 0.08 ~ 4.53 mm/期，均值为 1.42 mm/期；C23 的沉降变形速率范围为 0.238 ~ 3.11 mm/期，均值为 1.36 mm/期。

### 3.3 预测成果分析

由于基坑沉降预测模型为 ILSO-RVM-CT，为验

证组合、优化过程的合理性，以 C7 监测点为例，通过 33~37 周期验证预测来进行评价。经统计，得到 C7 监测点在不同组合、优化过程中的预测结果见表 3。据表 3 可知，在 33~37 周期相应验证节点处，从 RVM→LSO-RVM→ILSO-RVM→ILSO-RVM-CT，对应  $E_t$  值据不同程度的减小特征，且四类模型的  $E_t$  均值依次为 3.17%、2.51%、2.39% 和 2.08%，因此，随持续组合及优化过程，预测精度得以持续增加，充分验证了 ILSO-RVM-CT 适用于基坑沉降变形预测。

表 3 C7 监测点在不同组合、优化过程中的预测结果  
Table 3 Prediction results of C7 monitoring points in different combinations and optimization processes

监测周期/期	$P_t$ 值/mm	RVM 的预测结果		LSO-RVM 的预测结果		ILSO-RVM 的预测结果		ILSO-RVM-CT 的预测结果	
		$R_t$ 值/mm	$E_t$ 值/%	$R_t$ 值/mm	$E_t$ 值/%	$R_t$ 值/mm	$E_t$ 值/%	$R_t$ 值/mm	$E_t$ 值/%
33	46.93	45.43	3.21	45.80	2.41	45.77	2.49	45.97	2.05
34	48.65	47.13	3.12	47.42	2.54	47.47	2.43	47.63	2.09
35	50.03	48.54	2.97	48.78	2.49	48.81	2.42	48.95	2.15
36	50.70	49.03	3.28	49.40	2.56	49.54	2.28	49.65	2.06
37	51.23	49.57	3.24	49.91	2.57	50.03	2.34	50.19	2.03

利用 ILSO-RVM-CT 得到 C7、C18、C21 和 C23 监测点的预测结果，见表 4。据表 4 可知，C7 的  $E_t$  均值为 2.08%，C18 的  $E_t$  均值为 2.02%，C21 的  $E_t$

均值为 2.09%，C23 的  $E_t$  均值为 2.06%，说明 ILSO-RVM-CT 在基坑沉降预测中不仅具有较高的预测精度，还具有较强的预测稳健性。

表 4 C7、C18、C21 和 C23 监测点的预测结果  
Table 4 Prediction results of monitoring points C7, C18, C21 and C23

监测周期/期	C7			C18			C21			C23		
	$P_t$ 值/mm	$R_t$ 值/mm	$E_t$ 值/%	$P_t$ 值/mm	$R_t$ 值/mm	$E_t$ 值/%	$P_t$ 值/mm	$R_t$ 值/mm	$E_t$ 值/%	$P_t$ 值/mm	$R_t$ 值/mm	$E_t$ 值/%
33	46.93	45.97	2.05	44.46	43.54	2.06	45.25	44.31	2.07	45.08	44.13	2.12
34	48.65	47.63	2.09	45.45	44.55	1.99	46.85	45.88	2.08	46.09	45.16	2.01
35	50.03	48.95	2.15	46.51	45.57	2.02	48.16	47.15	2.11	47.16	46.21	2.02
36	50.70	49.65	2.06	47.87	46.87	2.08	50.13	49.05	2.16	48.54	47.55	2.04
37	51.23	50.19	2.03	49.71	48.73	1.97	52.48	51.41	2.03	50.41	49.35	2.10
38	—	50.59	—	—	49.37	—	—	51.79	—	—	49.92	—
39	—	51.03	—	—	49.92	—	—	52.01	—	—	50.43	—
40	—	51.41	—	—	50.43	—	—	52.46	—	—	50.94	—
41	—	51.76	—	—	50.84	—	—	53.11	—	—	51.20	—

根据表中 38~41 期的预测结果统计，得到 C7、C18、C21 和 C23 监测点在此 4 期的沉降预测速率均值依次为 0.39、0.53、0.42 和 0.46 mm/期，说明基坑沉降变形后续还会进一步增加，但增加速率较小，变形趋于稳定方向发展。

## 4 结论

通过对基坑降水引发的沉降理论计算及预测研究，得到以下结论：

(1) 潜水降水、减压降水引发地层变形的机理是不同的，以分层总和法构建沉降计算公式是可行的，并经计算，得出沉降理论计算值均不同程度的小于沉降监测值，且随与降水井中心距离的增加，沉降值具持续减小特征。

(2) ILSO-RVM-CT 在基坑沉降变形预测中具有较强的预测能力，得出基坑沉降变形后续还会具小速率增加特征，说明基坑沉降变形趋于稳定。

## 岩土力学

### 参 考 文 献

- [1] 程康, 徐日庆, 应宏伟, 等. 考虑开挖全过程的基坑坑外任意地表沉降实用计算方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54 (5): 1851-1862.
- [2] 韩文君, 赵宇豪, 闫鑫, 等. 常州地区基坑降水引起的地面沉降计算方法 [J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26 (1): 55-59, 64.
- [3] 胡长明, 林成, 赵金凤, 等. 黄土深基坑降水诱发的地基附加应力和沉降简化计算 [J]. 中国安全生产科学技术, 2022, 18 (4): 160-167.
- [4] 于澜涛, 徐光黎. 基坑降水引起地表沉降计算系数  $M_s$  的修正 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22 (2): 700-706.
- [5] 李晓生. 富水深厚砂卵石地层深基坑降水引起的地层沉降预测 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2023, 44 (1): 77-83, 9.
- [6] 王涛, 施斌, 王鑫永, 等. 漫滩二元地层基坑开挖及降水引起的地表沉降预测 [J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40 (5): 724-731.
- [7] 刘政伟, 崔琳, 张熠鑫. 改进狮群优化算法的鲁棒波束形成 [J]. 计算机工程与设计, 2023, 44 (3): 770-776.
- [8] 郝付军. 运营桥梁的变形程度评价和预测分析 [J]. 噪声与振动控制, 2022, 42 (4): 121-126, 137.
- [9] 王娟, 王兴科. 软土地区基坑侧位移动形预警及预测 [J]. 长江科学院院报, 2021, 38 (8): 91-96, 103.

(上接第 99 页)

向下部土体扩大, 坑底的隆起位移向临河侧的浅部土体扩散。

### 参 考 文 献

- [1] 郑刚, 朱合华, 刘新荣, 等. 基坑工程与地下工程安全及环境影响控制 [J]. 土木工程学报, 2016, 49 (6): 1-24.
- [2] 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.
- [3] 陈骏峰, 冯美果. 基于饱和-非饱和渗流理论的基坑防渗措施分析 [J]. 岩土力学, 2009, 30 (5): 1425-1430.
- [4] 董建军, 吴军虎. 渗流作用下河岸深基坑支护结构稳定性分析 [J]. 防灾减灾工程学报, 2014, 34 (5): 543-550.
- [5] 汪映红, 董城, 陈乐. 水位变化对临河基坑边坡稳定性的影响 [J]. 水运工程, 2019 (3): 121-125.
- [6] 孙俊. 考虑临河有限土体与水位影响的基坑支护土压力研究 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019.
- [7] 陶俊. 临河条件下承压水深基坑开挖稳定性与降水风险源分析 [D]. 苏州: 苏州科技大学, 2020.
- [8] 罗飞, 朱大勇, 蒋泽锋, 等. 邻河深大复杂基坑整体稳定分析 [C] // 《工业建筑》2016 年增刊 I. 北京, 《工业建筑》杂志社, 2016: 574-579.
- [9] 王宝存, 朱大勇, 王小金, 等. 邻水深基坑开挖室内模型试验研究 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2016, 39 (6): 790-794.
- [10] 何蕃民, 彭涛, 邓安, 等. 临河富水砂卵石层深基坑降水方案分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (32): 13386-13393.
- [11] 刘波, 席培胜, 章定文. 偏压作用下非等深基坑开挖效应数值分析 [J]. 东南大学学报 (自然科学版), 2016, 46 (4): 853-859.
- [12] 孙小力, 孙铁成, 张旭, 等. 地铁基坑开挖数值模拟及变形特征研究 [J]. 施工技术, 2020, 49 (7): 41-44, 53.
- [13] 胡安峰, 陈博浪, 应宏伟. 土体本构模型对强度折减法分析基坑整体稳定性的影响 [J]. 岩土力学, 2011, 32 (S2): 592-597, 603.