

基坑开挖过程中埋地管线沉降位移解析计算

卢玉林, 何金泽, 陈晓冉, 王 丽

Analytical computation of settlement displacement of buried pipeline caused by excavation

LU Yulin, HE Jinze, CHEN Xiaoran, and WANG Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210066>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

北京不同区域明挖基坑地表沉降变形特征研究

Characteristics of surface settlement and deformation of open cut foundation pit in different areas of Beijing

张建全, 张克利, 程贵方 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 131-139

盾构地铁隧道穿越既有铁路桥的沉降分析

An analysis of the settlement of a shield tunnel passing under the operating railway bridge

于德海, 舒娇娇, 秦凯凯 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 148-152

双排桩双梁组合支护刚度计算的改进与位移分析

Improved calculation of the rigidity of double-row piles and double-beam composite support and displacement analysis under different soil properties

官凤梧, 刘晨, 郭文娟, 李晨光, 封占英, 张银铂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 109-116

深厚软土地区基坑墙底抗隆起稳定性Prandtl计算式的讨论

A discussion of the Prandtl calculation formula for anti-uplift stability of the bottom of a foundation pit wall in deep soft soil areas

阳吉宝 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 61-69

武汉地区厚互层土中基坑抗突涌破坏评价方法研究

Study of evaluation method of anti-uprush stability of foundation pit with thick interbedded soil layers in Wuhan

熊宗海, 冯晓腊, 张红章, 范卫琴, 程华强 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 134-140

基坑降水对声纳渗流检测精度的影响分析

Influence of foundation pit dewatering on sonar seepage detection accuracy

江杰, 魏丽, 钟有信, 胡盛斌, 杨杉楠 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 73-80



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210066

卢玉林, 何金泽, 陈晓冉, 等. 基坑开挖过程中埋地管线沉降位移解析计算 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(2): 144-154.
LU Yulin, HE Jinze, CHEN Xiaoran, et al. Analytical computation of settlement displacement of buried pipeline caused by excavation[J].
Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(2): 144-154.

基坑开挖过程中埋地管线沉降位移解析计算

卢玉林^{1,2}, 何金泽^{1,2}, 陈晓冉³, 王 丽^{1,2}

(1. 防灾科技学院土木工程学院, 北京 101601; 2. 中国地震局建筑物破坏机理与防御重点实验室, 北京 101601; 3. 防灾科技学院地质工程学院, 北京 101601)

摘要: 基坑开挖会诱发邻近埋地管线产生沉降变形, 获取管线变形量对评估管线的正常使用和安全具有重要意义。基于弹性地基梁理论, 建立地下管线沉降位移的计算公式, 并分析地表中心沉降量和计算长度对管线沉降位移的影响; 根据埋地管线与基坑边缘的几何关系, 将计算长度取值依据界定为 5 种工况; 通过与两个标定算例对比, 验证解析方法的合理性; 以北京某基坑工程为例, 分析管线沉降位移的时空变化规律。研究结果表明: 不同时期的沉降位移计算值和实测值变化趋势一致, 但计算值略高于实测值; 地表中心沉降量对管线沉降位移影响显著, 输入值越大, 沉降曲线形状越“凹”, 输入值越小, 沉降曲线越平缓; 管线沉降位移自中心点向两端降低速率依次增加, 在边界点附近降低速率减小, 范围约为计算长度的 1/10。所提方法在管线沉降预估方面偏于保守, 是现有埋地管线沉降理论的一个补充, 可为施工前期预判管线沉降分布提供重要参考依据。

关键词: 基坑开挖; 地下管线; 沉降位移; 解析分析

中图分类号: TU478

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)02-0144-11

Analytical computation of settlement displacement of buried pipeline caused by excavation

LU Yulin^{1,2}, HE Jinze^{1,2}, CHEN Xiaoran³, WANG Li^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Institute of Disaster Prevention, Beijing 101601, China; 2. Key Laboratory of Building Collapse Mechanism and Disaster Prevention, China Earthquake Administration, Beijing 101601, China; 3. School of Geological Engineering, Institute of Disaster Prevention, Beijing 101601, China)

Abstract: Excavation can induce the settlement deformation of adjacent buried pipeline. Obtaining the deformation is of great significance for evaluating the normal use and safety of pipeline. In this study, based on the elastic foundation beam theory, the calculation formula of the settlement displacement of buried pipeline is derived, and the influence of the two parameters of the surface center settlement and the calculation length on the settlement displacement of pipelines is emphatically analyzed. According to the geometric relationship between the buried pipeline and the edge of the foundation pit, the calculation length can be used to divide into five working conditions. The rationality of the analytical method is verified by comparing with two cases. In the case of excavation in Beijing, the spatio-temporal variation rules of settlement displacement of buried pipeline were analyzed. The results show that the varied trend of the calculated settlement displacement in different periods is

收稿日期: 2022-10-27; 修订日期: 2023-05-11

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 廊坊市科学技术研究与发展计划项目(2021011065); 河北省自然科学基金项目(E2021512002)

第一作者: 卢玉林(1983—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩土力学与边坡稳定性研究。E-mail: yllu@cidp.edu.cn

consistent with that from measurement, but the calculated value is slightly higher than the measured value. The surface center settlement has a significant influence on the pipeline settlement displacement. larger input causes more concave settlement curve, and smaller input leads to smoother settlement curve. The decreasing rate of settlement displacement increases from the central point to end, and decreases near the boundary point, with the range of about one tenth of the calculated length. The proposed method in this study is conservative in the evaluation of pipeline settlement, which is a supplement to the existing settlement calculation theory of buried pipelines, and can provide a important information for predicting the distribution of pipeline settlement in the early stage of construction.

Keywords: foundation pit excavation; buried pipeline; settlement displacement; analytical analysis

城市中的基坑工程受场地和周围环境的约束, 逐步向异形、超深方向发展, 而周边毗邻的管线受基坑开挖的影响越来越明显, 合理地分析邻近埋地管线的沉降位移对防止工程事故具有重要意义^[1-2]。

基坑开挖对埋地管线沉降影响的研究方法很多, 主要有理论解析法、数值模拟法、模型试验法和现场监测法。在理论解析法方面, 研究人员试图通过建立严格力学模型探寻管线沉降位移的解析式并与试验数据或监测数据对比, 以验证方法的可行性。目前, 理论解析方法主要依赖两种力学模型, 一种是 Winkler 地基梁模型, 一种是 Pasternak 地基梁模型。李大勇等^[3]、龚晓南等^[4]、姜峰^[5]、姜兆华等^[6]基于 Winkler 地基梁模型, 给出不同条件下地下管线位移的解析解, 并讨论相关影响因素, 为解析方法的应用提供了基础。何小龙等^[7]、Zhao 等^[8]、Zhu 等^[9]以 Pasternak 地基梁模型为基础, 推导管土分离的计算力学模型, 提出开挖影响下的管线响应分析方法, 弥补了 Winkler 模型未考虑剪应力的遗憾。作为解析方法的补充, Tan 等^[10]、刘红岩等^[11]、张建全等^[12]采用实测数据拟合管线沉降曲线, 提出了地下管线变形的经验公式法。Zhang 等^[13]、Yu 等^[14]、童建军等^[15]通过数值模拟研究隧道开挖对现有管道位移的影响, 分析了各参数与地表沉降的关系。以上研究成果在基坑开挖引起的埋地管线位移及其环境影响评价方面提供了一定的理论依据, 也进一步说明此类问题在工程中具有重要研究价值。

基于上述研究成果的思路, 将基坑开挖对地下管线上方地表沉降的变形方程定义为三角函数, 通过解析法给出了管线沉降量的挠曲线方程和初参数表达式。基于标定算例和工程案例验证了计算方法的合理性, 重点讨论了计算边界长度、管线中心上方地表沉降量的取值依据及其对管线沉降量的影响。

1 管线沉降计算模型

1.1 计算模型

基于弹性地基梁理论, 地下管线的变形主要来源于两部分, 一部分是原始荷载作用产生的变形, 即管线自重、管内物重以及管线上方覆土压力自重等产生的变形, 另一部分是基坑开挖所产生的变形^[3,16]。根据工程实测资料发现, 基坑开挖时地下管线的变形表现为曲线形式, 中间大、两端小, 即在沉陷区内呈下凹曲线, 非沉陷区基本水平^[11]。建立基坑开挖时的地下管线的受力模型如图 1 所示。

由于原始荷载产生的变形在基坑开挖前已经完成, 因此仅考虑基坑开挖过程产生的沉降位移, 使计算问题得到简化。对于管线受影响的沉陷区长度范围, 一般取值为基坑纵向长度的 2 倍(管线与基坑平行)^[15,17-19]。刘建航等^[18]也指出, 垂直于坑壁方向的地表沉降区最外边界长度与基坑围护墙高度存在如下关系

$$z_0 = H \tan\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1)$$

式中: H ——围护墙高度/m;

φ ——围护墙体穿越土层的平均内摩擦角/(°);

z_0 ——沉降区最外边界长度/m。

通过式(1)可以估算管线所在位置与围护墙以及地表沉降宽度的关系。

本文主要关注沉陷区的管线沉降位移, 即竖向位移。通过对比实际工程资料以及前人的工作可以得出, 理想条件下的管线分布中的沉降值沿中心观测点呈对称式分布, 具有数学上偶函数的特点, 可用曲线的对称性来描述。由于三角函数满足上述曲线特征要求, 且受控参数简单, 便于数学解析, 因此基于解析计算实用性的考量, 建立沉陷区管线上方地表沉降曲线方程为三角函数, 即

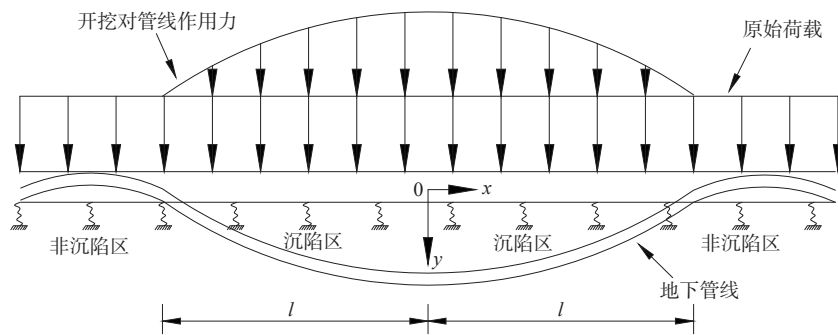


图1 地下管线受力模型

Fig. 1 Mechanics model of buried pipeline

$$y(x) = A \cos(\omega x + \alpha_0) \quad (2)$$

式中: A ——沉降曲线振幅/m;

ω 、 α_0 ——待定系数;

x ——计算位置至管线中心长度/m。

定义中心点对应位置的地表沉降量(即地表中心沉降量)为 δ , 在沉陷区与非沉陷区交界处定义为全固端约束, 则有边界条件为:

$$\begin{cases} x=0, & y=\delta \\ x=l, & y=0 \\ x=-l, & y=0 \end{cases}$$

式(2)中的3个待定系数的解为:

$$\begin{cases} A=\delta \\ \alpha_0=0 \\ \omega=\pi/2l \end{cases}$$

由此可知, 式(2)为:

$$f(x) = \frac{k_v \delta}{EI\beta^3} \int_0^x \phi_4[\beta(x-z)] \cos\left(\frac{\pi}{2l}z\right) dz = \frac{k_v \delta}{EI\beta^3} \frac{\frac{1}{4\beta} \cos\left(\frac{\pi}{2l}x\right) - \frac{1}{4\beta} \phi_1(\beta x) + \frac{\pi^2}{4l^2} \frac{1}{4\beta^3} \phi_3(\beta x)}{1 + \frac{\pi^4}{16l^4} \frac{1}{4\beta^4}} \quad (6)$$

所以, 地下管线沉陷区挠曲线方程就可以表示为:

$$w(x) = f(x) + w_0 \phi_1(\beta x) + \theta_0 \frac{1}{\beta} \phi_2(\beta x) - \frac{M_0}{EI\beta^2} \phi_3(\beta x) - Q_0 \frac{1}{EI\beta^3} \phi_4(\beta x) \quad (7)$$

式中: β ——特征系数, 表示为 $\beta = \sqrt[4]{\frac{k_v}{4EI}}$;

EI ——管线抗弯刚度/($\text{kN} \cdot \text{m}^2$);

$\phi_1(\beta x)$ 、 $\phi_2(\beta x)$ 、 $\phi_3(\beta x)$ 、 $\phi_4(\beta x)$ ——克雷洛夫函数;

w_0 ——中心位置所对应的管线竖向位移/m;

θ_0 ——中心位置所对应的转角/rad;

M_0 ——中心位置对应的弯矩/($\text{kN} \cdot \text{m}$);

Q_0 ——中心位置对应的剪力/kN。

$$y(x) = \delta \cos\left(\frac{\pi}{2l}x\right) \quad (3)$$

在不考虑管线自重、管内体重及上覆土压力的情况下, 由基坑开挖所引起的基坑纵向切面对应位置的沉陷区方程 $w(x)$ 为:

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} = -k_v w(x) + k_v y(x) \quad (4)$$

式中: k_v ——地基竖向基床换算系数/kPa, 表示为 $k_v = k_0 D$;

k_0 ——地基竖向基床系数/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$);

D ——地下管线外径/m。

由此可知, 地下管线的竖向位移微分方程可以表示为:

$$EI \frac{d^4 w(x)}{dx^4} = -k_v w(x) + k_v \left[\delta \cos\left(\frac{\pi}{2l}x\right) \right] \quad (5)$$

根据初参数法^[14], 可将式(5)的解表示为竖向位移通解和竖向位移修正项的组合, 其中竖向位移修正项为:

1.2 边界条件及系数

根据沉陷区曲线方程的对称性可知, 在计算区间 $(-l, l)$ 范围内, 当中心位置 $x=0$ 时, 应有最大弯矩和最大挠度, 因此可以推断出该位置的剪力和转角为零, 即:

$$\begin{cases} x=0, & \theta_0=0 \\ x=0, & Q_0=0 \end{cases}$$

由此可知, 地下管线沉陷区挠曲线方程简化为:

$$w(x) = f(x) + w_0 \phi_1(\beta x) - \frac{M_0}{EI\beta^2} \phi_3(\beta x) \quad (8)$$

对式(8)进行求导, 可以得到沉陷区曲线转角方程为:

$$\theta(x) = f'(x) - 4\beta w_0 \phi_4(\beta x) - M_0 \frac{1}{EI\beta} \phi_2(\beta x) \quad (9)$$

$$\begin{cases} x=l, & w_l=0 \\ x=l, & \theta_l=0 \end{cases}$$

定义沉陷区与非沉陷区的交界位置不产生任何位移, 即 $x=l$ 位置的边界点为全固端约束, 则该位置的挠度和转角为零, 即边界条件为:

将边界条件带入式(8)和式(9), 由此解出式中的初参数 w_0 和 M_0 为

$$w_0 = \frac{k_v \delta}{\left(1 + \frac{\pi^4}{16l^4} \frac{1}{4\beta^4}\right)} \left[\frac{\frac{\pi^2}{4l^2} \frac{1}{4\beta^2} \phi_2(\beta l) + \phi_4(\beta l) - \frac{\pi}{2l} \frac{1}{4\beta}}{\beta^2 \phi_2(\beta l)} - \frac{\frac{\pi^2}{4l^2} \frac{1}{4\beta^3} \phi_3(\beta l) - \frac{1}{4\beta} \phi_1(\beta l)}{\beta \phi_3(\beta l)} \right] / EI\beta^2 \left[\frac{\phi_1(\beta l)}{\phi_3(\beta l)} + \frac{4\phi_4(\beta l)}{\phi_2(\beta l)} \right]$$

$$M_0 = \frac{k_v \delta}{EI\beta^3} \frac{1}{\left(1 + \frac{\pi^4}{16l^4} \frac{1}{4\beta^4}\right)} \left[\frac{\frac{\pi^2}{4l^2} \frac{1}{4\beta^3} \phi_3(\beta l) - \frac{1}{4\beta} \phi_1(\beta l)}{\phi_1(\beta l)} + \frac{\frac{\pi^2}{4l^2} \frac{1}{4\beta^2} \phi_2(\beta l) + \phi_4(\beta l) - \frac{\pi}{2l} \frac{1}{4\beta}}{4\beta \phi_4(\beta l)} \right] / \frac{1}{EI\beta^2} \left[\frac{\phi_3(\beta l)}{\phi_1(\beta l)} + \frac{\phi_2(\beta l)}{4\phi_4(\beta l)} \right]$$

将初参数带回式(8), 就得到了地下管线沉陷区挠曲线方程的具体形式。

2 算例验证

以文献[3]提供的工程案例为标定算例1, 工程位于杭州市, 基坑深度为 8.8 m, 采用钢筋混凝土灌注桩围护, 桩长 20 m, 距基坑 2.3 m 处, 有一外径为 2 000 mm、内径为 1 680 mm 的圆形预制输水管道, 其混凝土强度等级为 C30, 沿管道长度方向每隔 5 m 设置一个观测点, 根据管道所在地区勘察资料, 地基竖向基床系数 $k_0=10\,000\text{ kN/m}^3$ 。输水管道与基坑的位置平面关系详见文献[3]。

根据本文计算方法, 管线中心至测点端部距离为 15 m, 所以输入参数 $l=15\text{ m}$ 。计算管道的抗弯刚度为:

$$EI = 3 \times 10^{10} \times \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} = 3 \times 10^{10} \times \frac{3.14 \times (2^4 - 1.68^4)}{64} = 11.83 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

将上述参数代入初参数方程, 可计算出初参数 $w_0=33.22\text{ mm}$, $M_0=5\,789.13\text{ kN} \cdot \text{m}$ 。取标定算例 4—7 号测点实测值、文献值与本文的计算值进行比较, 并以 4 号测点为坐标原点, 对比结果如图 2 所示, 可见实测值与本文结果变化趋势吻合较好, 相比文献结果更接近实测值。采用本文方法计算的 4 号测点相对误差为 12.71%, 小于文献值 15.2%。

以文献[20]提供的工程案例为标定算例 2, 工程位于上海市, 基坑平面形状为矩形, 长 166 m, 宽 68.4 m, 施工方案为逆作法。管线为煤气管线, 管径为 500 mm, 壁厚为 4 mm, 距基坑边为 10.5 m, 弹性模量 $E=200\text{ GPa}$, 泊松比为 0.3, 地基竖向基床系数 $k_0=10\,000\text{ kN/m}^3$ 。煤气管线与基坑的位置平面关系及土层参数详见文献[20]。

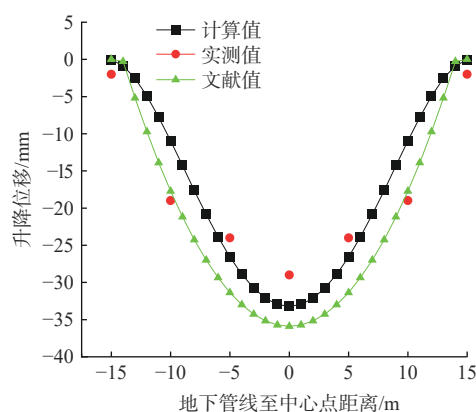


图 2 计算值与标定算例 1 比较

Fig. 2 Comparison of calculation values and case 1

根据本文计算方法, 管线中心至测点端部距离为 90 m, 所以输入参数 $l=90\text{ m}$, 竖向基床换算系数 $k_v=10\,000\text{ kN/m}^3 \times 0.5\text{ m}=5 \times 10^6\text{ Pa}$ 。计算管道的刚度, 按照薄壁圆筒刚度计算为

$$EI = 200 \times 10^9 \times \pi r^3 \delta = 200 \times 10^9 \times 3.14 \times 0.25^3 \times 0.004 = 39.25 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

以该算例的理论最大沉降位移值为标定值, 计算初参数为 $w_0=32.99\text{ mm}$, $M_0=394.15\text{ kN} \cdot \text{m}$ 。取标定算例的测点实测值、文献值与本文的计算值进行比较, 如图 3 所示, 计算值与实测值吻合较好。经对比, 测点实测数据与计算值相对误差为 11.99%, 小于文献值 18.0%。

通过与上述两个标定算例的对比可知, 本文所述方法的计算结果与实测数据相对误差要优于文献结果, 说明本文所述方法是合理的。文献[3]和文献[20]分别以 Winkler 地基梁模型和 Pasternak 地基梁模型建立了沉降位移解析式, 但表达式过于复杂, 数学表述上并不简练。本文以三角函数为位移曲线原型, 得到

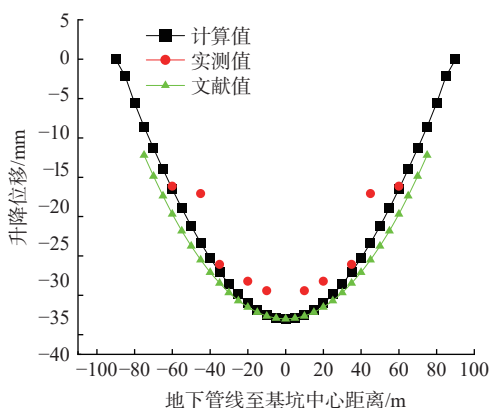


图3 计算值与标定算例2比较

Fig. 3 Comparison of calculation values and case 2

了受控参数简单的表达式,为工程应用提供了基础。由于地下管线沉降位移实测数据要受测点位置、监测设备以及外界施工扰动的影响,其值与计算值还存在一定的偏差,但总体吻合度较好,因此可通过解析计算进行沉降位移预测,为合理的施工提供有效参考。

3 管线沉降位移分析案例

3.1 工程概况

项目位于北京市,基坑开挖平均深度为21.0 m,根据拟建工程场地及周边环境特点,基坑采用桩锚支护。开挖方式为中心岛开挖,即从周边向下逐层挖至设计标高以上1 m,并从周边逐渐向中间收缩。基坑所在区域主要土层物理参数如表1所示。

表1 土层物理参数
Table 1 Physical parameters of soil

| 土层 | 厚度/m | 黏聚力/kPa | 内摩擦角/(°) | 重度/(kN·m ⁻³) |
|-------|-----------|---------|----------|--------------------------|
| 杂填土 | 0.5 | 0 | 8 | 16.5 |
| 粉质黏土 | 0.5~5.6 | 16.8 | 22 | 19.3 |
| 砂质黏土 | 0.9~7.3 | 18.5 | 20 | 19.2 |
| 粉质黏土 | 4.7~10.6 | 30.6 | 12 | 20.6 |
| 粉细砂 | 0.8~6.5 | 6 | 15 | 17.4 |
| 粉质黏土 | 3.5~21.5 | 17.6 | 20 | 19.1 |
| 风化花岗岩 | 19.2~27.5 | 33 | 22 | 21.5 |

基坑的上口线周长为450 m,周长所围的区域面积为10 660 m²。基坑东侧分布有电力管线,管线隧道至基坑上口线水平距离介于8.5~30.0 m之间,基坑侧壁支护等级为一级。电力管线隧道结构形式为圆拱直墙式,断面净尺寸为2.0 m×2.3 m,单孔净宽2.0 m,矢高0.45 m,净高2.3 m,采用复合衬砌,混凝土强度等级为C30,初衬厚度为0.25 m,二衬厚度为0.25 m,电力管线隧道断面几何尺寸如图4所示。

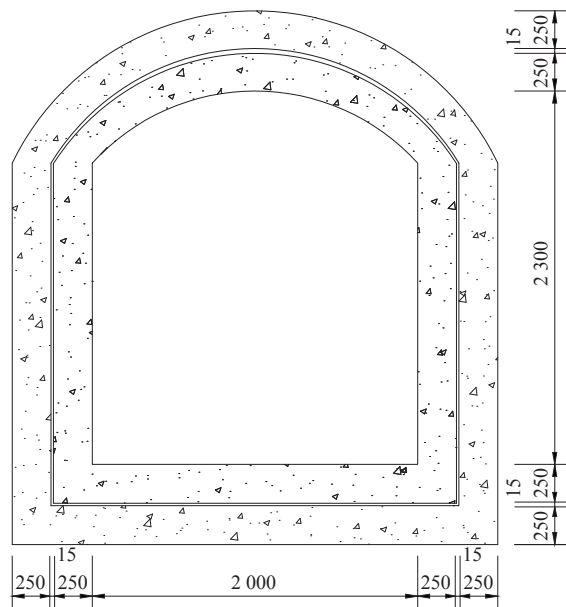


图4 管线隧道断面图(单位:mm)
Fig. 4 Pipeline tunnel section (unit: mm)

3.2 管线测点布设

基坑东侧的电力管线与基坑侧壁并非完全平行,东侧坑壁具有明显的“阴阳角”特点,管线与基坑位置关系如图5所示。

测点沿管线长度方向共布设9个点位,总监测长度约为150 m,测点编号为GX01—GX09,其中GX02—GX08测点间距均为20 m, GX01—GX02间距为12 m, GX08—GX09间距为15 m。CX4和CX5是东侧坑壁的两个测斜孔,管线中心测点至基坑边缘的最小距离如表2所示。

3.3 管线沉降位移分析

3.3.1 沉降位移分析

根据现场施工要求,对不同施工时期的沉降曲线进行分析,选取GX04—GX06沉降曲线如图6所示。施工期分为5个阶段,具体为:Ⅰ期护坡桩施工(第0~14天);Ⅱ期冠梁施工、基坑开挖(第15~30天);Ⅲ期锚索施工、基坑开挖(第31~56天);Ⅳ期锚索施工、基坑开挖(第57~72天);Ⅴ期锚索施工、基坑开挖(第73~93天)。

从图6可以看出,基坑开挖前,管线沉降量与施工时间基本为线性关系,在整个开挖期间,受不同时期开挖深度和锚杆支护等因素影响,管线沉降量出现了明显波动。在第93天,基坑开挖、支护完成,此后受支护桩锚固力的作用,管线沉降位移增幅减小,趋于稳定。

3.3.2 输入参数计算

根据土层力学参数,管线所在位置的平均内摩擦

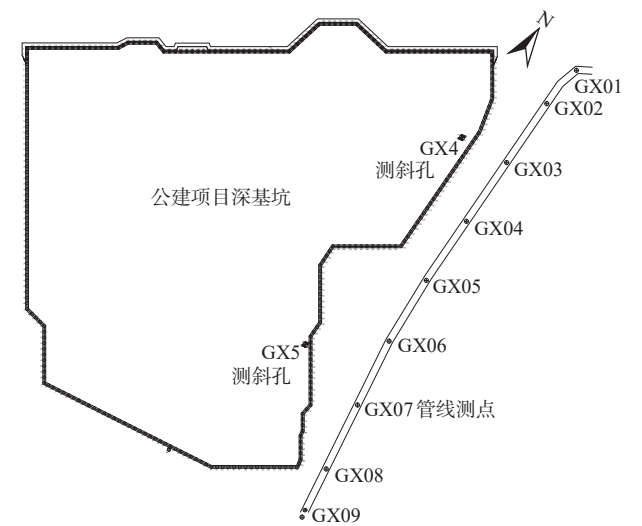


图 5 测点与基坑平面位置关系

Fig. 5 Location of measuring points and plane of foundation pit

表 2 测点距基坑边缘长度

Table 2 Length between measuring point and foundation pit

| 测点编号 | 距离/mm | 测点编号 | 距离/mm |
|------|--------|------|--------|
| GX01 | 23 617 | GX02 | 14 549 |
| GX03 | 11 209 | GX04 | 10 744 |
| GX05 | 11 497 | GX06 | 17 048 |
| GX07 | 13 250 | GX08 | 7 778 |
| GX09 | 13 174 | | |

角为 $\varphi=17^\circ$, 由公式(1)得到受基坑开挖影响管线的沉陷区最外边界长度为

$$z_0 = H \tan \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right) = 25 \times \tan \left(45 - \frac{17}{2} \right) = 18.49 \text{ m}$$

电力管线隧道所用混凝土强度等级为 C30, 其弹性模量为 $E=3.0 \times 10^4 \text{ MPa}$, 管线隧道断面截面惯性矩简化为一空心矩形, 则隧道抗弯刚度为

$$\begin{aligned} EI &= 3 \times 10^{10} \times \left(\frac{BH^3 - bh^3}{12} \right) = \\ &= 3 \times 10^{10} \times \frac{3.03 \times 3.3^3 - 2 \times 2.3^3}{12} = \\ &= 2.19 \times 10^{11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \end{aligned}$$

沉陷区的空间分布虽然呈现类椭球体形状特点, 但对于确定点的管线沉降值可分步计算实现, 计算流程为先依据测斜孔曲线, 计算坑壁处的沉降值, 再根据管线与坑壁的距离计算出管线的沉降值, 由此得到了观测点处的管线沉降值。以 GX05 点为例, 定义 GX05 测点所在位置为计算原点, GX05→GX09 为坐标正向。根据表 2 中测点至基坑边缘的距离可知, 绝大多数测点都在沉陷区宽度影响范围之内, 因此计算长度

可取值为影响范围内的管线有效长度, 即 GX01—GX09 的间距。经计算总长度为 147 m, 所以基坑沉陷区计算长度取整数为 $l=150 \text{ m}$ 。根据土层参数, 取基床系数 $k_0=1.0 \times 10^7 \text{ N/m}^3$, 管道直径按短边长取值, 则竖向基床换算系数为 $k_v=1.0 \times 10^7 \times 3.03=30.3 \text{ MPa}$ 。中心管道上方地表沉降量由测斜数据拟合测算, 由于基坑中心对应的管线位置未布设测斜孔, 而垂直于 GX03 点位置有测斜孔 CX4, 根据式(2)地表沉陷曲线函数可以反算出中心位置沉降量 δ 。以 GX05 为中心原点, 至 GX03 距离为 40 m, 施工期为Ⅲ期时 CX4 孔的测斜数据如图 7 所示。

拟合侧移曲线, 计算测斜变形与围护结构组成区域的面积为 $S_w=19.22 \times 10^4 \text{ mm}^2$ 。根据 Peck 等人的研究成果, 可假定地表沉降区面积与围护结构侧向面积相等, 这样的假设虽与实际条件有一定的误差, 但在基坑开挖、支护过程等遵守规范设计和施工的条件下, 其误差结果较小, 有利于实现解析化^[11]。基于这样的假定条件, 可求解出 GX03 位置的最大沉降位移为:

$$\delta_{\max} = \frac{2S_w}{x_0} = \frac{2 \times 19.22 \times 10^4}{18490} = 20.79 \text{ mm}$$

定义基坑沉陷区最外边界长度范围内的地表沉降曲线为三角形分布, GX03 测点至基坑边缘的距离为 11 209 mm, 则该点正上方的地表沉降值为:

$$\delta_{\text{GX03}} = \frac{20.79 \times (18\,490 - 11\,209)}{18\,490} = 8.19 \text{ mm}$$

根据式(3)可解算出中心位置对应管线上方的地表沉降位移为

$$\delta = \frac{8.19}{\cos \left(\frac{\pi}{2 \times 150} \times 40 \right)} = 8.96 \text{ mm}$$

同理, 可以计算Ⅱ期和Ⅳ期管线中心上方对应的地表沉降量分别为 6.88 mm 和 5.02 mm。

3.3.3 计算值与实测值对比

提取Ⅱ期的测点沉降位移与计算值比较如图 8 所示。从图 8 可以看出, 测点实测值与计算值的变化趋势吻合较好, 但计算值普遍高于实测值。GX01—GX05 测点的对比结果要好于 GX06—GX09 的测点结果, 主要原因在于 GX01—GX05 测点与基坑边线基本平行, 计算结果较为理想; 自 GX05 测点以后, 基坑侧壁出现了明显的阳角, 而基坑边线与管线不平行的实际情况造成了计算值与实测值误差偏大, 但测点沉降位移变化趋势与计算结果基本相似。对于不同施工期, 测点计算值偏高的结果对初步预测地下管线的沉降位移

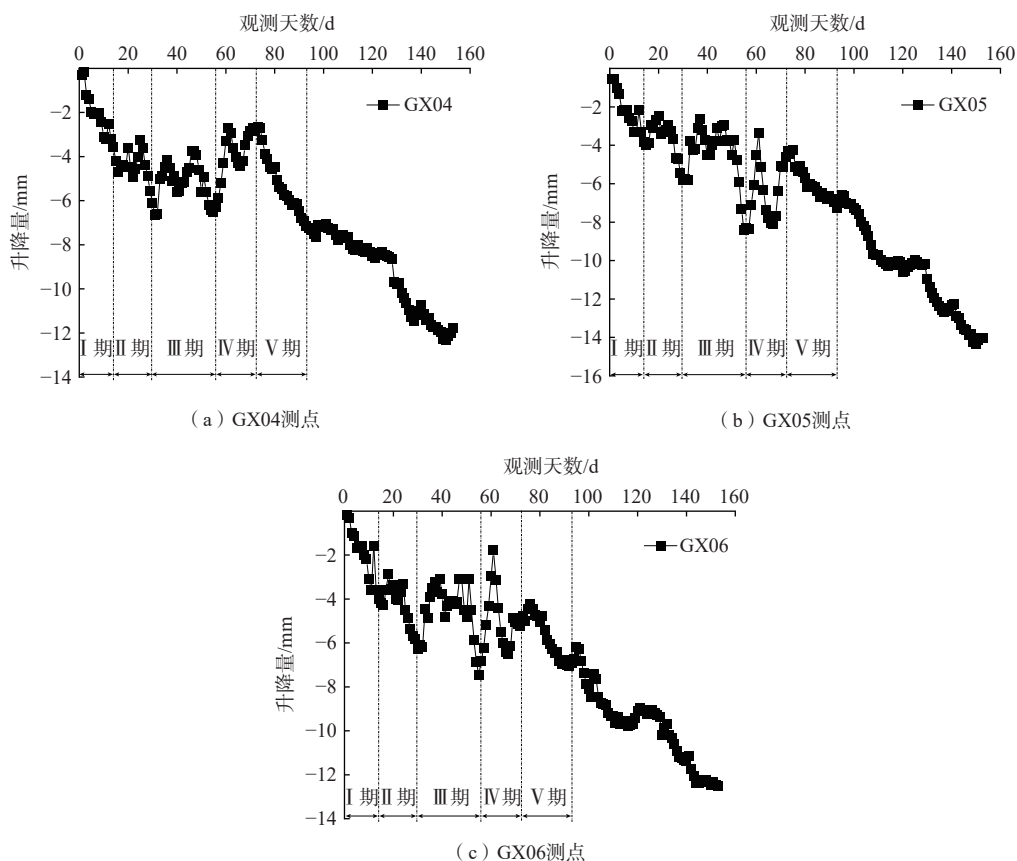


图 6 管线升降量随时间变化关系

Fig. 6 Pipeline settlement changes with time

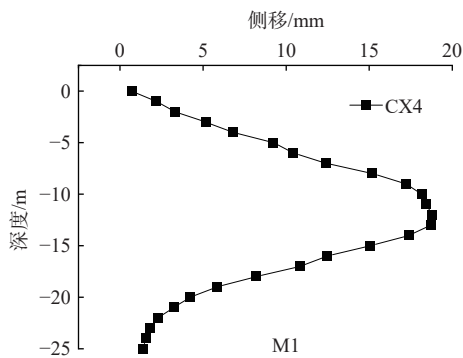


图 7 CX4 测斜曲线

Fig. 7 Inclinator curve of CX4

有利,可做出相对安全的判断。

从图 8 还可以看出, GX07 测点实测位移小于 GX08 值,这是因为 GX07 测点至基坑边线距离要大于 GX08 测点至基坑距离,约为 2 倍关系,受沉陷区宽度范围影响,至基坑边线距离越远,管线的沉降位移越小。此外, GX08 测点与基坑阴角部位毗邻,其位移值相对要偏大。

图 9 是测点实测值与计算值的误差柱状图,负值代表计算值小于实测值。从图 9 中可以看出,大多数测点的计算值要高于实测值,而误差最大的点为 GX07

测点,当测点接近计算长度的边界时,管线两端的测点受边界收敛效应的影响,计算值要小于实测值。从误差沿管线轴线的分布情况可以看出,应用本文计算方法得到的沉降位移计算值在评估管线沉降方面是偏于保守的。

提取不同施工时期 GX07—GX09 测点实测位移如图 10 所示。从图 10 可以看出,不同时期的 GX07 点位移都要小于其他两点。对 GX09 测点而言,其至基坑边线距离与 GX07 测点距离近似相等,但位移要大于 GX07 测点值,这是因为 GX09 测点与 GX08 测点相邻,管线变形的连续性导致了 GX09 测点也相对较高。

3.3.4 输入参数分析

地下管线沉降位移计算的主要输入参数包括,竖向基床系数 k_0 、抗弯刚度 EI 、管径 D 、地表沉降值 δ 和计算长度 l 等。5 个参数对管线沉降量影响的定量程度是不同的,一般而言地下管线埋深较浅,埋深区域土层以人工填土和软质黏性土居多,按照工程经验,软质黏性土的地基竖向基床系数通常在 $10 \times 10^3 \sim 40 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$ 之间。根据文献 [3] 和文献 [20] 的结果,当输入的基床换算系数大于 $12 \times 10^3 \text{ kN/m}^3$ 时,其对管

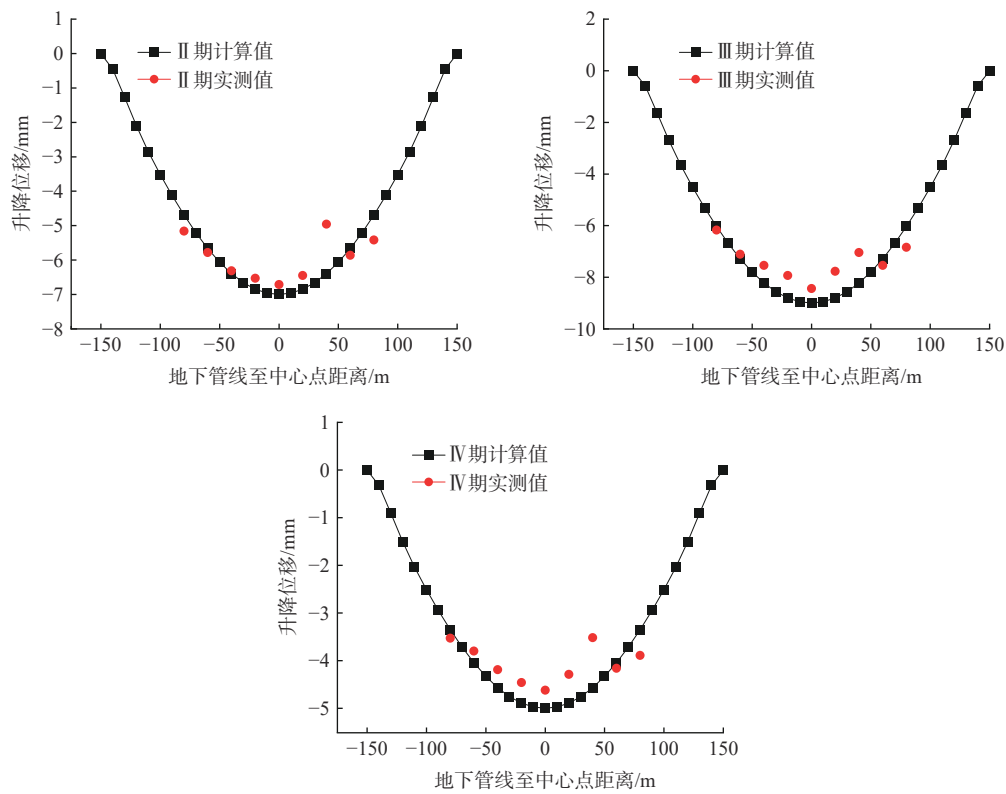


图 8 不同时期实测值与计算值比较

Fig. 8 Comparison of calculation values and measured values in different construction time

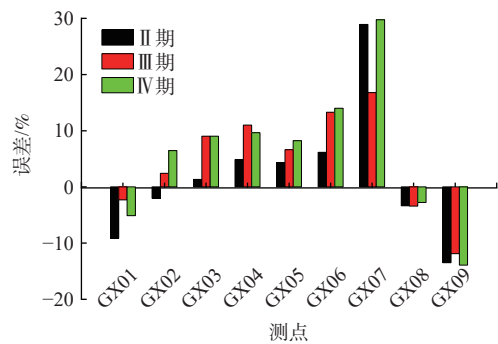


图 9 测试值与计算值误差

Fig. 9 Errors between measured value and calculated value

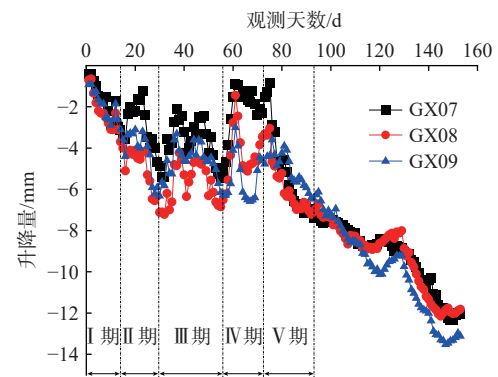


图 10 GX07—GX09 测点沉降量随时间变化关系

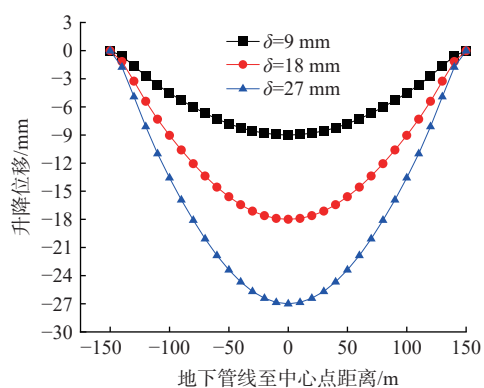
Fig. 10 Changes of pipeline settlement GX07 to GX09 with time

线竖向位移的影响已非常小。此外,在工程敷设地下管线前,通常要对地基土进行加固处理,其基床系数要比正常值偏高,这也将显著降低对管线竖向位移的影响。对于管径 D 和抗弯刚度 EI ,只要材质确定,该值就是确定的。由此可知,对于确定的工程, k_0 、 D 和 EI 的取值范围是有限的,取值的偏差对最终的管线沉降量影响并不大,可以不做讨论。此处重点讨论中心地表沉降值 δ 和计算长度 l 对管线沉降量的分布影响。

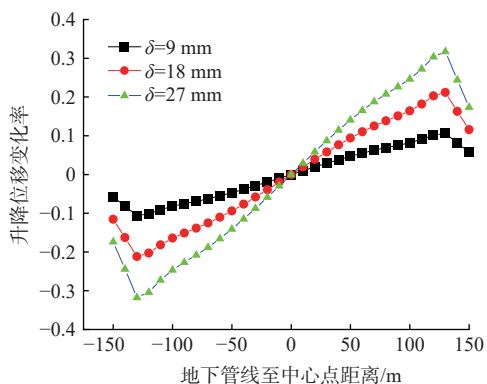
(1) 沉降量 δ 取值的影响

以Ⅲ期的管线沉降位移曲线为基础,再分别计算 $2\delta=18\text{ mm}$ 和 $3\delta=27\text{ mm}$ 时的管线沉降量,对比如图 11 所示。从图 11(a)可以看出, δ 越大,沉降曲线形状越“凹”, δ 越小,沉降曲线形状越缓,这表明地表沉降量对管线的竖向位移影响是非常大的。从图 11(b)也可以看出, δ 越大,沿管线长度方向的沉降量变化率越大, δ 的取值对沉降位移影响显著。受计算边界条件的影响,当 $l=140\text{ m}$,沉降曲线降幅出现拐点,即边界点的影响范围约为 $l/10$ 。

δ 取值主要来源于测斜孔数据,其大小受实际监测数据的约束,文献 [3] 和文献 [20] 中涉及的相关参数同样根据实际地面沉陷曲线取值,因此合理布置管



(a) 升降量曲线



(b) 升降量沿管线长度变化率

图 11 不同 δ 条件下的管线升降曲线Fig. 11 Pipeline settlement curves with different δ

线周围的测斜孔是非常重要的,对前期的设计方案提出了更高的要求。如果地下管线附近未布设测斜孔,可采用基坑周围相似土层位置的测斜孔数据进行计算,但应考虑一定的位移偏差。

(2) 计算长度 l 取值的影响

地下管线沉降位移分析模型的假定条件是管线与基坑边缘平行,受场地与周围环境的约束,很多基坑的平面形状表现为“多边形”,即管线与基坑边缘并不完全平行。管线与基坑是否平行、沿基坑长度范围内的管线是否都在沉陷区长度边界区内,都对计算长度的取值提出了挑战。基于这一实际问题,提出了管线与基坑位置关系的分类依据,为计算长度的取值提供了理论基础。

一般情况下,地下管线可视为直线,但基坑边线却形状各异,对计算长度的取值可分为以下几种工况进行选取,如图 12 所示。

工况 1: 基坑边线为直线,与管线平行,且沉陷区宽度范围内都有管线,即范围内的管线长度与基坑边线长相等,则管线与基坑边线视为平行关系,这是理想的计算模型管线分布状态,则计算长度为基坑边线长度或沉陷区宽度范围内的管线实际长度。

工况 2: 基坑边线为直线,与管线不平行,沉陷区

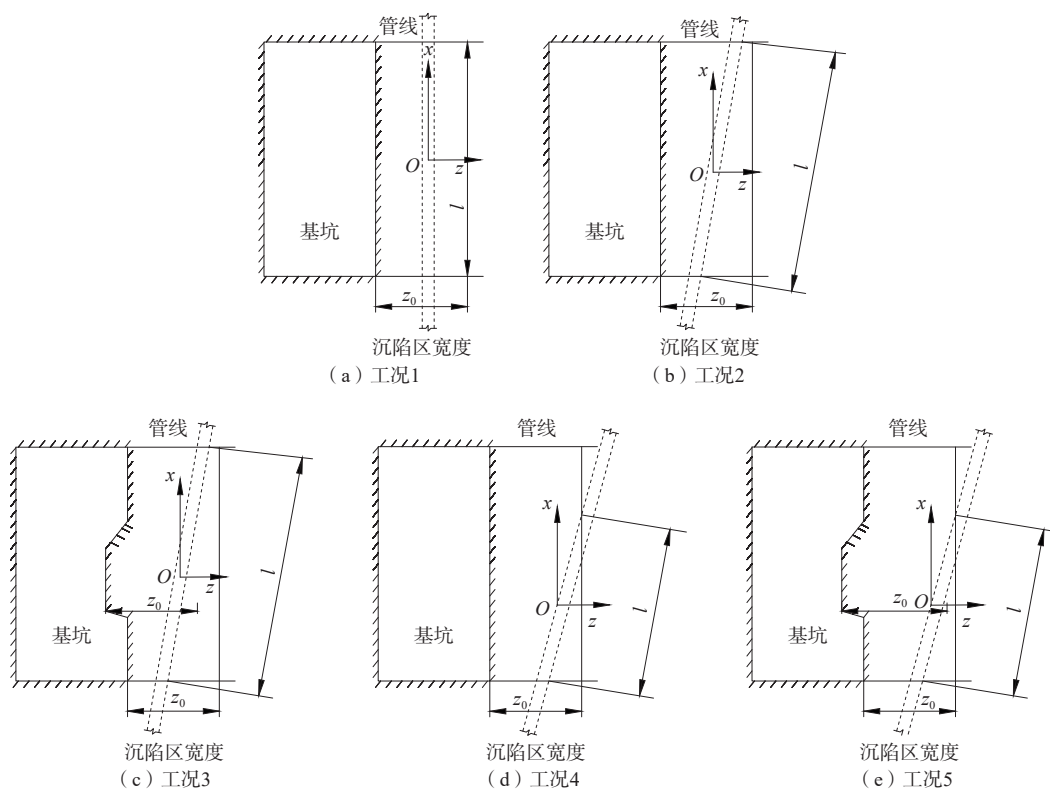


图 12 不同工况下的计算长度取值

Fig. 12 Calculation length under different working conditions

宽度范围内都有管线, 则计算长度可按沉陷区宽度影响范围内的管线实际长度取值。

工况 3: 基坑边线并非直线, 与管线不平行, 但沉陷区宽度范围内都有管线, 则计算长度也可按沉陷区宽度影响范围内的管线实际长度取值。

工况 4: 基坑边线为直线, 与管线不平行, 沉陷区宽度范围内仅有部分管线, 则计算长度取值为受影响段的管线实际长度, 但管线中心上方地表沉降值需由相应测斜数据求出。

工况 5: 基坑边线并非直线, 与管线不平行, 但沉陷区宽度范围内也仅有部分管线, 则计算长度取值同样为受影响段的管线实际长度, 管线中心上方地表沉降同样也需由相应测斜数据求出。

上述计算长度的选取以沉陷区宽度范围内受影响的管线实际长度为基准值, 更符合基坑平面为非规则图形的实际工况。本文列举的基坑平面为非矩形, 基坑边线与管线不完全平行, 经计算沉陷区外边界长度为 18.49 m。选定的测点 GX02—GX09 至基坑的最大距离为 14.55 m, 都在沉陷区宽度范围内, 仅有 GX01 测点超出范围, 因此本工程案例中的基坑满足工况 3 的界定条件。综上, 管线计算长度 l 可取值为 150 m, 计算结果较为理想。

4 结论

(1) 根据弹性地基梁理论, 推导了地下管线沉陷区的挠曲线方程和初参数表达式, 通过与标定算例对比验证了解析方法的合理性。通过对比工程案例中不同施工时期的管线沉降量分布, 实测值与计算值吻合较好, 说明采用文中提供的方法可初步预测基坑开挖对邻近埋地管线的沉降位移。

(2) 输入参数 δ 对管线沉降量的影响表现为, δ 越大, 对管线的沉降位移影响越大, δ 越小, 沉降位移曲线越平缓, 而 δ 的取值依赖于测斜数据的准确性。因此, 在基坑支护设计初期, 应重点考虑测斜孔的位置分布, 布设在管线毗邻区域及基坑边缘的凸起部位是非常有必要的。

5 建议

对于沉陷区计算长度的取值, 应根据管线至基坑边缘的距离判定, 除基坑边线与管线平行的理想状态外, 当管线分布在沉陷区宽度范围内时, 计算长度取值为沉陷区宽度范围内的管线实际长度。当沉陷区仅存在部分管线时, 计算长度取值为沉陷区宽度范围

内受影响管线的实际长度, 但坐标原点及管线中心上方地表沉降量也应做相应的调整。对管线与基坑是否平行进行分类, 并作为计算长度取值的理论依据, 是针对公式参数中管线计算长度这一输入参数而设计的, 结果是符合实际的。当基坑形状复杂时, 可根据这一分类关系进行分段计算, 以保证计算结果的可靠性。

参考文献 (References):

- [1] 李向群, 张兆辉, 孙超. 基坑开挖对周边地下管线影响研究现状及展望 [J]. 吉林建筑大学学报, 2015, 32(4): 13 - 18. [LI Xiangqun, ZHANG Zhaozhui, SUN Chao. Situation and prospects of excavation impact on adjacent underground pipelines [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2015, 32(4): 13 - 18. (in Chinese with English abstract)]
- [2] DONG Yuepeng, BURD H J, HOULSBY G T. Finite-element investigation of excavation-induced settlements of buildings and buried pipelines [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2022, 148(10): 04022072.
- [3] 李大勇, 张士乔, 龚晓南. 深基坑开挖引起临近地下管线的位移分析 [J]. 工业建筑, 1999, 29(11): 36 - 41. [LI Dayong, ZHANG Tuqiao, GONG Xiaonan. Analysis of the displacements of buried pipelines caused by deep excavations [J]. Industrial Construction, 1999, 29(11): 36 - 41. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 龚晓南, 孙中菊, 俞建霖. 地面超载引起邻近埋地管道的位移分析 [J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 305 - 310. [GONG Xiaonan, SUN Zhongju, YU Jianlin. Analysis of displacement of adjacent buried pipeline caused by ground surcharge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 305 - 310. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 姜峥. 基坑开挖引起邻近管线变形的理论解析 [J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(2): 362 - 368. [JIANG Zheng. Theoretical analysis on deformation of pipeline caused by adjacent foundation pit excavation [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(2): 362 - 368. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 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. [JIANG Zhaohua, ZHANG Yongxing. Calculation of influence on longitudinal deformation of adjacent tunnels due to excavation [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2013, 35(1): 7 - 11. (in Chinese with English abstract)]

- [7] 何小龙, 杨天鸿, 周云伟, 等. 考虑管-土分离的基坑开挖引起邻近地下管线位移分析 [J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2019, 41(6): 9 – 16. [HE Xiaolong, YANG Tianhong, ZHOU Yunwei, et al. Analysis of pipeline displacement induced by adjoining foundation pit excavation considering pipeline-soil separation[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2019, 41(6): 9 – 16. (in Chinese with English abstract)]
- [8] ZHAO Shengwu, LI Xiaoli, LI Xin, et al. Analysis of pipeline deformation caused by shield tunnel excavation that obliquely crosses existing pipelines[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(3): 1 – 14.
- [9] ZHU Jinlong, ZHU Dayong. Deformation of pipelines induced by the construction of underlying twin-tunnel[J]. *Tehnički Vjesnik*, 2020, 27(4): 1311 – 1315.
- [10] TAN Yong, LU Ye. Responses of shallowly buried pipelines to adjacent deep excavations in Shanghai soft ground[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2018, 9(2): 05018002.
- [11] 刘红岩, 李厚恩, 黄好诗, 等. 基于实测地表位移的基坑开挖引起邻近地下管线位移的计算 [J]. *工业建筑*, 2011, 41(10): 72 – 74. [LIU Hongyan, LI Houen, HUANG Yushi, et al. Displacement calculation of nearby underground pipeline caused by deep excavation based on field test of ground displacement[J]. *Industrial Construction*, 2011, 41(10): 72 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 张建全, 张克利, 程贵方. 北京不同区域明挖基坑地表沉降变形特征研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(6): 131 – 139. [ZHANG Jianquan, ZHANG Keli, CHENG Guifang. Characteristics of surface settlement and deformation of open cut foundation pit in different areas of Beijing[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(6): 131 – 139. (in Chinese with English abstract)]
- [13] ZHANG Kunyong, CHAVEZ TORRES J L, ZANG Zhenjun. Numerical analysis of pipelines settlement induced by tunneling[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019, 2019: 1 – 10.
- [14] YU Cheng, HAN Chuanjun, XIE Rui, et al. Mechanical behavior analysis of buried pipeline under stratum settlement caused by underground mining[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2020, 188: 104212.
- [15] 童建军, 王明年, 于丽, 等. 成都地铁车站深基坑周围地表沉降规律研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(3): 97 – 101. [TONG Jianjun, WANG Mingnian, YU Li, et al. A study of the land subsidence around the deep foundation pit of the Chengdu subway station[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(3): 97 – 101. (in Chinese with English abstract)]
- [16] PECK R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C]//*Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Mexico City, 1969: 225 – 290.
- [17] 龙驭球. 弹性地基梁的计算 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1981. [LONG Yuqiu. Calculation of elastic foundation beam[M]. Beijing: People's Education Press, 1981. (in Chinese)]
- [18] 刘国彬, 王卫东. 基坑工程手册 [M]. 2 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. [LIU Guobin, WANG Weidong. Foundation pit engineering manual[M]. 2nd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)]
- [19] 龚士良, 叶为民, 陈洪胜, 等. 上海市深基坑工程地面沉降评估理论与方法 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2008, 19(4): 55 – 60. [GONG Shiliang, YE Weimin, CHEN Hongsheng, et al. Theory and methodology on assessment of land subsidence caused by excavation engineering for deep foundation pit in Shanghai[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2008, 19(4): 55 – 60. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 吴伟. Pasternak 地基上基坑开挖对邻近地下管线影响的解析分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(2): 212 – 216. [WU Wei. Analytical analysis of the impact on adjacent underground pipelines due to foundation pit excavation on the Pasternak foundation[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(2): 212 – 216. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 王支农