



# 考虑降水作用时基坑开挖对邻近既有隧道变形的影响

陈佳冰, 吴大志, 王冉, 韩硕

(浙江理工大学建筑工程学院, 杭州 310018)

**摘要:** 针对现有研究分析基坑开挖对邻近既有隧道影响时, 常忽略或过度简化降水作用的问题, 提出了一种能精细考虑潜水含水层中基坑开挖与降水协同作用的隧道纵向变形解析预测方法。该方法采用两阶段分析框架: 第一阶段, 融合 Mindlin 解、井点应力叠加法与有效应力原理, 计算隧道轴线处的总附加应力; 第二阶段, 将隧道简化为搁置在 Kerr 三参数地基模型上的欧拉梁, 建立控制方程并利用有限差分法求解以得到隧道变形。通过完整工程案例验证该方法的有效性, 并系统开展隧道及降水井相关参数敏感性分析, 揭示各关键因素对隧道变形的影响规律与控制机理。结果表明: 井点降水可显著抑制基坑开挖引起的隧道隆起, 且该方法可更精确预测隧道变形; 隧道直径增大会增加其绝对变形但减小相对变形, 埋深增加可显著降低施工扰动; 在一定程度上增大井坑间距、减少降水井半径或降深, 能有效缓和降水对隧道的不利影响, 隧道变形风险随其与基坑距离的增大而衰减。该方法弥补了简化方法在精细化考虑降水效应方面的不足, 可为邻近既有隧道的基坑工程设计与安全控制提供更为可靠的理论预测工具。

**关键词:** 基坑开挖; 井点降水; 隧道纵向变形; Kerr 地基模型; Mindlin 解

**中图分类号:** TU 46+3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2026)05-0268-12

**引文格式:** 陈佳冰, 吴大志, 王冉, 等. 考虑降水作用时基坑开挖对邻近既有隧道变形的影响[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2026, 55(3): 268-279.

**Reference Format:** CHEN Jiabing, WU Dazhi, WANG Ran, et al. Assessment of the impact of foundation pit excavation on adjacent existing tunnel deformation under dewatering conditions[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(3): 268-279.

## Assessment of the impact of foundation pit excavation on adjacent existing tunnel deformation under dewatering conditions

CHEN Jiabing, WU Dazhi, WANG Ran, HAN Shuo

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** To address the limitation of existing methods in analyzing the impact of foundation pit excavation on adjacent existing tunnels, which often neglect or oversimplify the effect of dewatering, this paper proposes an analytical method for predicting tunnel longitudinal deformation that finely considers the coupled effects of both excavation and dewatering in phreatic aquifers. The method is based on a two-stage analytical framework. In the first stage, the total additional stress acting on the tunnel axis is calculated by integrating Mindlin's solution, the well-point stress superposition method, and the principle of effective stress in soils. In the second stage, the tunnel is simplified as an Euler-Bernoulli beam resting on a three-parameter Kerr foundation model. The governing differential equation is established and solved using the finite difference method to obtain the tunnel deformation. The validity and accuracy of the proposed method are verified through a complete engineering case study, and a systematic parametric sensitivity analysis of tunnel and dewatering well-related factors is conducted, revealing the influence patterns and

收稿日期: 2025-12-09 网络出版日期: 2026-03-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52238009)

作者简介: 陈佳冰(2001—), 男, 浙江湖州人, 硕士研究生, 主要从事基坑工程与隧道工程方面的研究。

通信作者: 吴大志, E-mail: wudz@zstu.edu.cn

control mechanisms of key factors on tunnel deformation. The results show that: well-point dewatering can significantly mitigate the tunnel heave induced by excavation, and the proposed method enables more precise prediction of tunnel deformation; an increase in tunnel diameter leads to greater absolute deformation but reduced relative deformation, while greater burial depth significantly mitigates construction disturbance; increasing the well-to-pit spacing, reducing the well radius, or decreasing the dewatering depth can effectively alleviate the adverse effects of dewatering on the tunnel; the risk of tunnel deformation decays with increasing distance from the foundation pit. This method addresses the shortcomings of simplified methods in the refined consideration of dewatering effects, providing a more reliable theoretical prediction tool for the design and safety control of foundation pit engineering adjacent to existing tunnels.

**Key words:** foundation pit excavation; well-point dewatering; tunnel longitudinal deformation; Kerr foundation model; Mindlin solution

## 0 引言

随着城市地下轨道交通的快速发展,既有地铁隧道邻近区域的基坑开挖工程大量涌现。基坑开挖及降水会显著改变周边土体应力场,对既有隧道产生不利影响,严重威胁地铁运营安全。因此,准确分析施工扰动对既有隧道的影响,具有重要的理论价值与工程现实意义<sup>[1-4]</sup>。

理论解析法因其概念清晰、计算高效,是分析基坑开挖对邻近既有隧道影响的主流方法之一,尤其适用于初步分析和评估。目前在理论解析法研究中两阶段分析法<sup>[5]</sup>应用广泛,该方法可细分为两阶段位移法<sup>[6]</sup>和两阶段应力法<sup>[7]</sup>。这两种分析法的主要区别在于一阶段考虑隧道的受力形式方面,前者着眼于求解隧道上方的土体位移值,而后者则优先求解隧道轴线处的附加应力值。众多学者在理论解析法领域展开深化研究。Wu等<sup>[8]</sup>为刻画盾构隧道管片接头效应,采用非连续的 Timoshenko 梁并考虑了隧道的剪切变形;梁荣柱等<sup>[9]</sup>在 Timoshenko 梁模型基础上提出了考虑隧道剪切效应的两阶段分析方法和隧道管片间的错台转角变形模式;徐日庆等<sup>[10]</sup>、程康等<sup>[11]</sup>在考虑隧道剪切效应的基础上进一步考虑了隧道的埋深效应,并提出了隧道最大变形简化预测公式;张志伟等<sup>[12]</sup>则探讨了盾构隧道接头非线性转动刚度的影响机制,进一步揭示了隧道管片的细化变形。除了理论解析法外,还有学者通过数值模拟<sup>[13-14]</sup>、模型实验<sup>[15]</sup>和现场实测<sup>[16]</sup>等方法展开相关研究。

以上理论研究多聚焦于基坑开挖卸荷这一单一因素,然而在实际工程中,基坑降水作为工程施工中不可或缺的一环,会导致土体孔隙水压力消散、有效应力增加,对隧道及周边构筑物产生不容忽视的影响。目前,针对降水影响的研究主要依赖于数值模

拟。汪鹏程等<sup>[17]</sup>、周守强等<sup>[18]</sup>运用 PLAC3D 软件分析了基坑降水对邻近既有隧道的影响模式,发现降水会导致既有隧道明显沉降。为揭示复杂渗流与地质条件下隧道的非线性变形模式,莫小兵等<sup>[19]</sup>运用有限元-离散元耦合法分析了地下水位变化对既有隧道的变形影响。但由于降水建模流程困难,且耗时较长,故有学者尝试采用大井法<sup>[20-23]</sup>进行理论解析研究。大井法把基坑降水过程等效为单井降水,基于 Dupuit 假设和有效应力原理推导得到基坑降水产生的附加应力,最终得到土体卸荷和降水作用下隧道轴线处的变形模式。该方法在工程初步分析中具有优势,但其简化处理难以精确反映真实井点布置的局部效应与空间叠加特性。因此,在理论解析框架内,如何精细考虑基坑开挖与井点降水的协同作用,仍是当前研究的薄弱环节。

针对上述问题,本文在前人研究的基础上,研究了在潜水含水层中基坑开挖和坑外井点降水协同作用下的下卧既有隧道变形机理。解析过程采用两阶段分析法。在一阶段中,首先利用 Mindlin 解<sup>[24]</sup>得到基坑开挖坑底和侧壁卸荷对隧道产生的附加应力;其次运用井点降水附加应力叠加法和土体有效应力原理,得到各井点在隧道轴线任意一点处的附加应力叠加值。在二阶段中,将上述两部分附加应力叠加得到的总附加应力作为荷载,引入能更好地反映地基剪切变形与非线性特征的 Kerr 地基模型,建立相应隧道变形平衡微分方程,并运用有限差分法进行高效数值求解。基于以上理论基础,通过完整工程案例,将本文计算方法结果与未考虑降水、大井法、数值模拟及现场监测数据进行对比,以验证本文预测方法的有效性和准确性。此外,系统开展隧道和降水井的相关参数敏感性分析以揭示各因素对隧道变形的影响规律。本文研究可为类似施工条件

的基坑工程提供一套概念清晰、计算相对简便且更贴合工程实际的理论解析预测方法,对完善相关设计理论与保障施工安全具有一定的参考价值。

## 1 基坑开挖及井点降水引起的附加应力计算

在基坑工程施工过程中,通常遵循“先降水、后开挖”的施工顺序。若开挖基坑下方存在既有盾构隧道,那么该隧道受到的附加应力主要来源于两部分:一是土体开挖卸荷产生的附加应力,二是基坑降水导致的地下水位变化所产生的附加应力。隧道的最终变形响应由这两部分附加应力叠加作用产生,

因此需要对开挖和降水过程分别进行理论分析,以计算各自在隧道轴线处产生的附加应力。

### 1.1 基坑开挖土体卸荷附加应力计算

基坑开挖卸荷对下卧既有隧道作用的计算模型简图如图1所示。模型中,矩形基坑长、宽、开挖深度分别为 $L$ 、 $B$ 、 $h$ ;隧道埋深为 $z_0$ ,直径为 $D$ ,隧道轴线与基坑中心直线距离记为 $l$ 。以基坑中心为原点 $O$ ,建立空间坐标系 $O$ -XYZ。为便于后续计算与分析,将 $X$ 轴方向上2个侧壁记为①和②,将 $Y$ 轴方向上2个侧壁记为③和④。基坑开挖坑底土体竖向作用简化为均布荷载 $P_1$ ,坑侧所受水平方向的合力简化为 $P_2$ 。

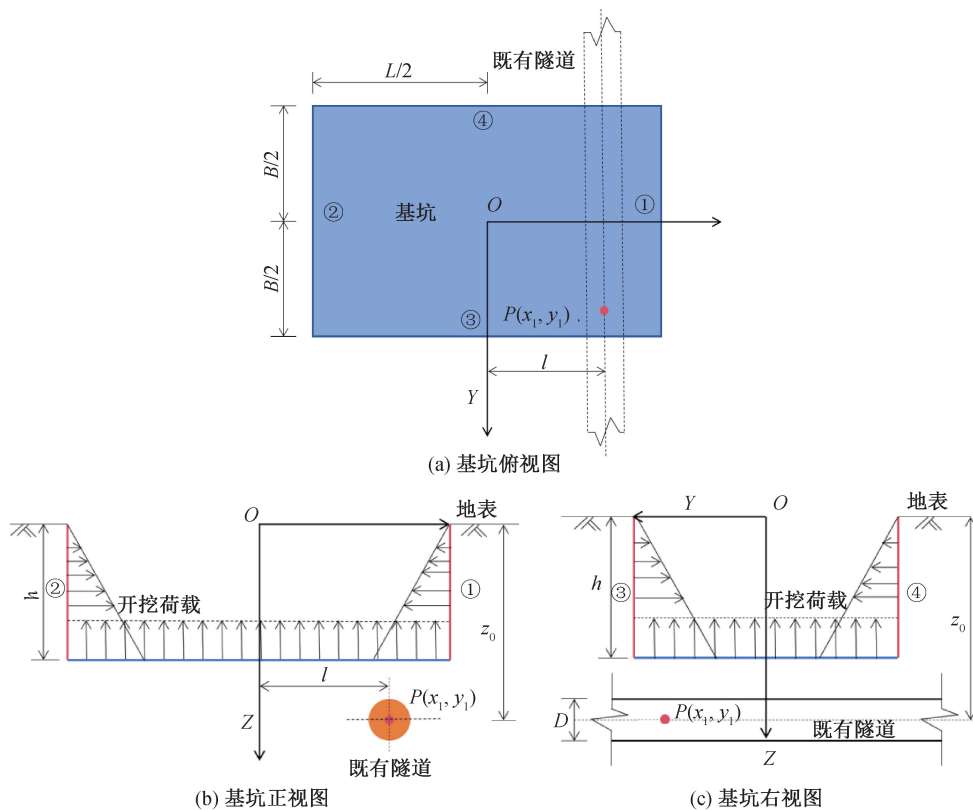


图1 基坑开挖对下卧隧道影响简图

#### 1.1.1 坑底土体卸荷应力计算

根据 Mindlin 基本应力解可知,坑底土体开挖卸荷引起的附加应力计算公式为:

$$p_1 = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\gamma h}{8\pi(1-\nu)} \cdot \left[ \frac{(1-2\nu)(z_0-h)}{T_1^3} - \frac{(1-2\nu)(z_0-h)}{T_2^3} + \frac{3(z_0-h)^3}{T_1^5} + \frac{3(3-4\nu)z_0(z_0+h)^2 - 3h(z_0+h)(5z_0-h)}{T_2^5} + \frac{30hz_0(z_0+h)^3}{T_2^7} \right] dx dy \quad (1)$$

其中: $\nu$ 为土体泊松比; $\gamma$ 为土体重度, $\text{kN}/\text{m}^3$ ;  $T_1$ 、

$T_2$ 是隧道与基坑中心的相对位置关系。 $T_1$ 、 $T_2$ 可用式(2)计算:

$$\begin{cases} T_1 = \sqrt{(X-x_1)^2 + (Y-y_1)^2 + (z_0-h)^2} \\ T_2 = \sqrt{(X-x_1)^2 + (Y-y_1)^2 + (z_0+h)^2} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $X$ 、 $Y$ 分别为 $O$ -XYZ坐标系下既有隧道上任意一点的横坐标和纵坐标, $x_1$ 和 $y_1$ 为隧道轴线上任意一点的横坐标和纵坐标。

#### 1.1.2 侧壁土体卸荷应力计算

在考虑基坑侧壁土体卸荷产生的附加荷载时,要对基坑的4个侧壁分别计算,并进行叠加。以①号侧壁为例,由空间坐标系 $O$ -XYZ可得①号侧壁

上任意一点的坐标为 $(L/2, y, z)$ ;依据 Mindlin 基本应力解,得到①侧壁卸荷作用于隧道上任意一点处的竖向附加应力为:

$$\sigma_1 = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \int_0^h -\frac{\beta K_0 \gamma (x_1 - L/2) \tau}{8\pi(1-\nu)} \left\{ \frac{-1+2\nu}{R_1^3} + \frac{1-2\nu}{R_2^3} + \frac{3(z_0-z)^2}{R_1^5} + \frac{3(3-4\nu)(z_0+z)^2}{R_2^5} - \frac{6z[\tau+(1-2\nu)(z_0+z)]}{R_2^5} + \frac{30z_0z(z_0+z)^2}{R_2^7} \right\} dy dz \quad (3)$$

其中: $\beta$ 为折减系数; $K_0$ 为静止土压力系数; $R_1$ 、 $R_2$ 是隧道与基坑中心的相对位置关系。 $R_1$ 、 $R_2$ 可用式(4)计算:

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{(x_1 - L/2)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_0 - z)^2} \\ R_2 = \sqrt{(x_1 - L/2)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_0 + z)^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中: $x_1$ 、 $y_1$ 为隧道轴线上任意一点的横坐标和纵坐标。

同理,记侧壁②—④上任意一点坐标分别为 $(-L/2, y, z)$ 、 $(x, B/2, z)$ 、 $(x, -B/2, z)$ ,根据 Mindlin 基本应力解得到这 3 个侧壁土体卸荷对隧道上任意一点产生的竖向附加应力分别为 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 、 $\sigma_4$ 。最后将 4 个侧壁产生的附加应力进行叠加,得到基坑侧壁卸荷产生的总附加应力:

$$p_2 = \sum_{i=1}^4 \sigma_i \quad (5)$$

将上述计算所得的基坑坑底和侧壁卸荷产生的附加应力进行叠加,得到基坑开挖土体卸荷对下卧既有隧道轴线任意一点处产生的总竖向附加应力:

$$p = p_1 + p_2 \quad (6)$$

## 1.2 基坑井点降水引起的附加应力计算

在既有理论研究中,常采用大井法来评估基坑降水对隧道的影响,即将整个基坑简化为单井,基于 Dupuit 假设与有效应力原理获得附加应力解析解。该方法在资料不完备时,可对隧道受降水的影响进行初步评估,但在实际工程采用群井降水的工况下,大井法的简化处理会引入显著误差。为精细刻画降水影响,采用井点应力叠加法,基于稳定渗流场下的势叠加原理,分别计算每个降水井在隧道轴线处产生的附加应力并进行叠加,计算结果包含了井间干扰效应,可更精细反映隧道所受的总应力场。下面给出在群井降水时,由降水引起的隧道竖向附加应

力理论解析过程。

Dupuit 假设一般适用于含水层厚度不大、流场基本稳定、以径向流动为主导且抽水降深相对于含水层厚度较小的情况,适用于本文对工程的初步应用和解析预测。故在计算前给出以下假设:a)所有降水井均为潜水完整井,井点能够完全渗透地下水层并在整个降水深度范围内有效抽水;井点分布均匀且排水能力一致,地下水流动均匀;b)各井点降水形成的区域漏斗稳定,地下水为稳定流运动且符合达西定律;c)含水层不透水层水平。需要说明的是,以上假设主要适用于中国东南沿海平原地区常见的以黏性土、粉土为主的潜水含水层条件,如杭州等地。降水井点与基坑的平面关系见图 2,其中任意井点  $j$  的平面坐标记为 $(x_j, y_j)$ ,隧道轴线上任意一点  $i$  记为 $(x_i, y_i)$ 。

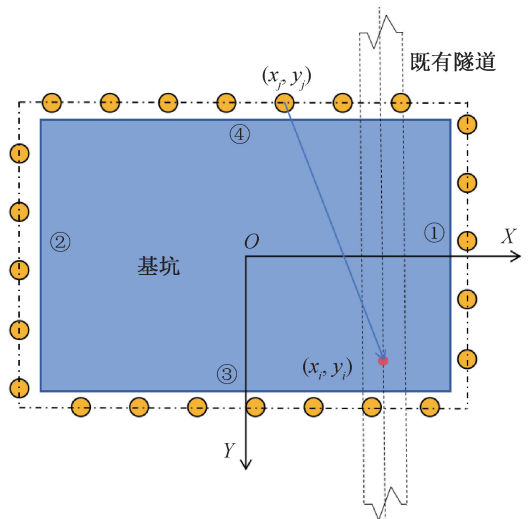


图 2 基坑与降水井点位置关系平面图

基于上述假设,可以求得潜水完整井的降水曲线,再通过叠加原理,得到隧道轴线上任意一点  $i$  在井点降水作用下的降水曲线表达式:

$$H^2 - h_i^2 = \sum_{j=1}^n \frac{q_j}{\pi k} \ln \frac{R_j}{r_{ij}} \quad (7)$$

其中: $H$ 是潜水含水层的厚度,m; $q_j$ 是所考虑井群作用的第  $j$  口降水井的单井流量, $\text{m}^3/\text{d}$ ; $k$ 是含水层的渗透系数, $\text{m}/\text{d}$ ; $R_j$ 是单井的降水影响半径,m; $r_{ij}$ 是第  $j$  口降水井与点  $i$  的距离,m。

记单井  $j$  降水后的水位高度为  $h_w$ ,降水影响半径为  $R_j$ ,则单井降水曲线示意图如图 3 所示。

单井降水影响半径  $R_j$  和流量  $q_j$  分别由库萨金公式和 Dupuit 公式求得,如式(8)—(9)所示:

$$R_j = 2s_w \sqrt{Hk} \quad (8)$$

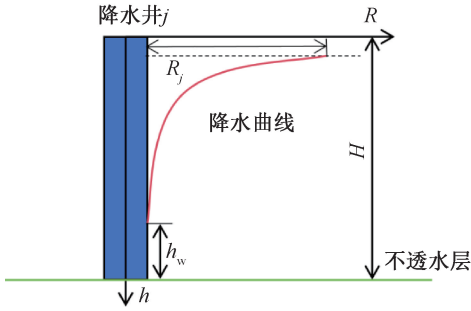


图3 单井降水曲线示意图

$$q_j = \frac{\pi k (H^2 - h_w^2)}{\ln(R_j/r)} \quad (9)$$

其中: $s_w$  为单井的降水深度,  $m$ ;  $r$  为降水井的井径,  $m$ 。

由此可得地下水位降深曲线表达式:

$$h_i = H - \sqrt{H^2 - \sum_{i=1}^n \frac{q_j}{\pi k} \ln(R_j/r_{ij})} \quad (10)$$

依据有效应力原理, 基坑降水后土体有效应力的增大, 可归因于水位下降所导致的孔隙水压力降低。最终得到基坑井点降水对下卧既有隧道引起的附加应力:

$$\sigma_w = \left( H - \sqrt{H^2 - \sum_{i=1}^n \frac{q_j}{\pi k} \ln(R_j/r_{ij})} \right) (\gamma + \gamma_w - \gamma_s) \quad (11)$$

其中: $\gamma$  为土体天然重度,  $kN/m^3$ ;  $\gamma_w$  为水的重度,  $kN/m^3$ ;  $\gamma_s$  为土体饱和重度,  $kN/m^3$ 。

综合上述分析, 根据叠加原理, 基坑开挖与井点降水共同作用下, 下卧既有隧道轴线处的总附加应力表达式为:

$$\sigma = p + \sigma_w \quad (12)$$

## 2 Kerr 地基模型下考虑井点降水的隧道方程解析

### 2.1 隧道模型选取与控制方程

采用两阶段应力法分析基坑开挖对邻近既有隧道的影晌时, 合理的隧道-地基模型是理论分析的基础。三参数 Kerr 地基模型引入剪切层和两层弹簧层, 相较于传统的地基模型, Kerr 地基模型能够合理考虑土体的剪切变形效应, 可更好地反映地基的非线性变形特征, 故本文将作为地基模型进行理论分析。同时, 为模拟隧道的纵向弯曲变形, 选用计算简便且易于与地基模型耦合解析的欧拉梁模型。图 4 所示为 Kerr 地基模型示意图, 理论解析过程基于以下假定: a) 将既有隧道视为搁置在 Kerr 地基模型上的欧拉梁;

b) 隧道周围土层均质且与隧道的变形协调;  
c) 止水帷幕进入土体含水层深度较小, 其影响可忽略。

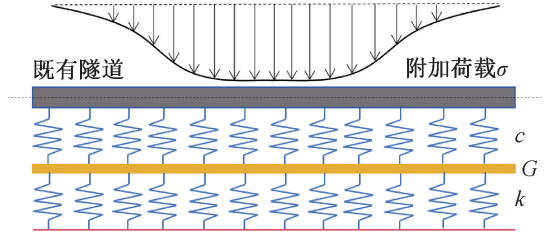


图4 Kerr 地基模型示意图

根据 Kerr 地基模型的相关理论, 将上方隧道的竖向变形记为  $\omega(x)$ , 地基模型的第一层弹簧和剪切层变形量分别为  $\omega_1(x)$  和  $\omega_2(x)$ , 由此可以得到隧道位移  $\omega(x)$  的表达式:

$$\omega(x) = \omega_1(x) + \omega_2(x) \quad (13)$$

记第一层和第二层弹簧反力分别为  $p_1(x)$  和  $p_2(x)$ , 弹簧刚度分别为  $c$  和  $k$ , 剪切层刚度为  $G$ 。由此可得两层弹簧的地基反力  $p_1(x)$  和  $p_2(x)$  表达式:

$$\begin{cases} p_1(x) = c\omega_1(x) = c[\omega(x) - \omega_2(x)] \\ p_2(x) = k\omega_2(x) \end{cases} \quad (14)$$

同时可以得到中间剪切层受力表达式:

$$p_1(x) = k\omega_2(x) - G \frac{d^2\omega_2(x)}{dx^2} \quad (15)$$

将上述式(13)~(15)联立, 可以得到盾构隧道竖向变形  $\omega(x)$  的方程表达式:

$$\omega(x) = \left(1 + \frac{k}{c}\right) \omega_2(x) - \frac{G}{c} \frac{d^2\omega_2(x)}{dx^2} \quad (16)$$

根据隧道的受力平衡分析, 可以得到考虑基坑开挖和井点降水协同作用下的下卧既有隧道位移方程:

$$EI \frac{d^4\omega(x)}{dx^4} + p_1(x)D = \sigma(x)D \quad (17)$$

将式(15)~(16)代入式(17), 可以得到欧拉梁搁置在 Kerr 地基模型上的隧道位移控制方程:

$$\frac{EIG}{Dc} \frac{d^6\omega_2(x)}{dx^6} - \frac{EI(c+k)}{Dc} \frac{d^4\omega_2(x)}{dx^4} + \frac{Gd^2\omega_2(x)}{dx^2} - k\omega_2(x) = -\sigma(x) \quad (18)$$

其中: $E$  是隧道的弹性模量,  $MPa$ ;  $I$  是隧道截面惯性矩,  $mm^4$ ;  $D$  是既有隧道的外径,  $m$ ;  $c$ 、 $k$  分别是 Kerr 地基模型第一层和第二层弹簧的弹性系数;  $G$  是 Kerr 地基模型中间剪切层的剪切刚度。

## 2.2 隧道模型相关参数

### 2.2.1 隧道等效抗弯刚度

鉴于盾构隧道管片接头的存在导致隧道纵向刚度远低于连续管片,纵向等效连续化模型被广泛用于确定其等效抗弯刚度,计算公式如下:

$$(EI)_{\text{eq}} = \frac{\cos^3 \phi}{\cos \phi + (\phi + \pi/2) \sin \phi} E_c I_c \quad (19)$$

其中: $E_c I_c$  是盾构隧道的抗弯刚度,  $\text{MN} \cdot \text{m}^2$ ;  $\phi$  是隧道纵向断面中性轴的转角,  $(^\circ)$ 。

### 2.2.2 Kerr 模型参数选取

根据文献[25-26],Kerr 地基模型中第一层弹簧的弹性系数取  $c = 7k$ ,第二层弹簧弹性系数  $k$  以及剪切层剪切刚度  $G$  的取值表达式分别为:

$$k = \frac{1.3E_s}{D(1-\nu^2)} \left[ \frac{E_s D^4}{(EI)_{\text{eq}}} \right]^{1/12} \quad (20)$$

$$G = \frac{E_s t}{6(1+\nu)} \quad (21)$$

其中: $E_s$  为周围土体的弹性模量,  $\text{MPa}$ ;  $\nu$  为土体泊松比;  $t$  为土体剪切层的厚度,  $\text{m}$ ,一般取值为盾构隧

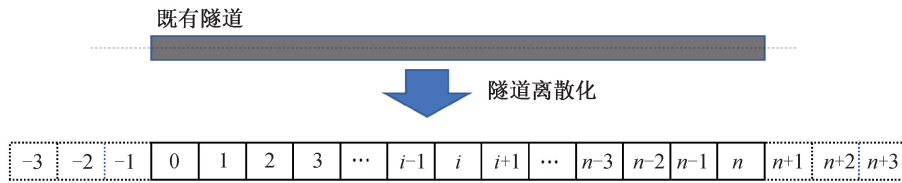


图5 隧道离散分析示意图

网格密度  $n$  的取值决定了单一离散单元的长度,影响最终计算结果的精度。网格越密集,数值解越精确,所得的隧道变形曲线也更连续光滑。但随着网格密度的增加,后续矩阵方程求解也会越复杂,故对  $n$  进行合理取值至关重要。经过相关分析,最终采用  $n=100$  的网格密度,在确保计算精度的同时兼顾了计算效率。

由于隧道两端无约束,可知隧道两端的弯矩和剪力均为 0,且地基中间剪切层的弯矩和剪力也是 0,自由端弯矩和剪力可以表示为:

$$\begin{cases} M_0 = M_n = -EI \frac{d^2 \omega_2(x)}{dx^2} = 0 \\ Q_0 = Q_n = -EI \frac{d^3 \omega_2(x)}{dx^3} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

由此,可得边界条件:

$$\begin{cases} M_0 = -EI \frac{(\omega_2)_1 - 2(\omega_2)_0 + (\omega_2)_{-1}}{h^2} = 0 \\ M_n = -EI \frac{(\omega_2)_{n+1} - 2(\omega_2)_n + (\omega_2)_{n-1}}{h^2} = 0 \end{cases} \quad (24)$$

道外径的 2.5 倍<sup>[27]</sup>,即  $t = 2.5D$ 。

### 2.3 控制方程求解

鉴于六阶非齐次微分方程数学求解的复杂性,本文采用有限差分法对该控制方程进行数值求解。

将上方六阶非齐次微分方程在  $[0, L]$  上进行离散分析,在两侧边界各设置 3 个虚拟节点,分别记为  $-3, -2, -1$  和  $n+1, n+2, n+3$ ,整条盾构隧道离散为  $n+7$  个单元,示意图如图 5 所示。

由有限差分法可得各微分项的差分表达式:

$$\begin{cases} \frac{d^6 \omega}{dx^6} \approx \frac{\omega_{i-3} - 6\omega_{i-2} + 15\omega_{i-1} - 20\omega_i + 15\omega_{i+1} - 6\omega_{i+2} + \omega_{i+3}}{h^6} \\ \frac{d^4 \omega}{dx^4} \approx \frac{\omega_{i-2} - 4\omega_{i-1} + 6\omega_i - 4\omega_{i+1} + \omega_{i+2}}{h^4} \\ \frac{d^2 \omega}{dx^2} \approx \frac{\omega_{i-1} - 2\omega_i + \omega_{i+1}}{h^2} \end{cases} \quad (22)$$

其中: $h=L/n$  为长度  $L$  的隧道离散为  $n$  段之后的单元长度; $i$  为隧道上差分后的每个节点,取值记为  $0, 1, 2, \dots, (n-1), n$ 。

$$\begin{cases} Q_0 = -EI \frac{(\omega_2)_2 - 2(\omega_2)_1 + 2(\omega_2)_{-1} - (\omega_2)_{-2}}{2h^3} = 0 \\ Q_n = -EI \frac{(\omega_2)_{n+2} - 2(\omega_2)_{n+1} + 2(\omega_2)_{n-1} - (\omega_2)_{n-2}}{2h^3} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

上述边界条件的设定依据圣维南原理,将两端视为自由端且假定地基剪切层在边界处无弯矩和剪力作用。这种处理合理地模拟了实际隧道在远离局部扰动区受力状态,对本文所关注的基坑开挖与降水影响区变形预测结果影响较小,适用于对隧道变形的初步理论解析。

基于以上边界条件,再考虑对称性逼近,令五阶差分值为 0,就可以得到虚拟节点的实际节点表达式,如式(26)所示:

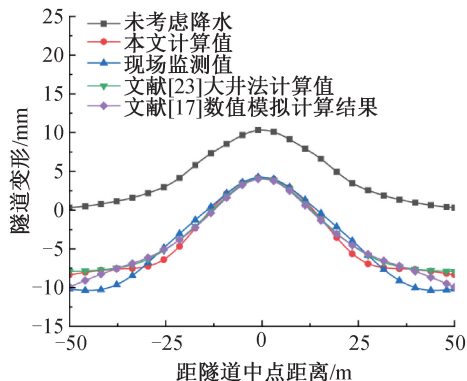
$$\begin{cases} (\omega_2)_{-1} = 2(\omega_2)_0 - (\omega_2)_1 \\ (\omega_2)_{-2} = 4(\omega_2)_0 - 4(\omega_2)_1 + (\omega_2)_2 \\ (\omega_2)_{-3} = 8(\omega_2)_0 - 8(\omega_2)_1 + (\omega_2)_3 \end{cases} \quad (26)$$

结合上方所得的位移边界条件,可以得到关于

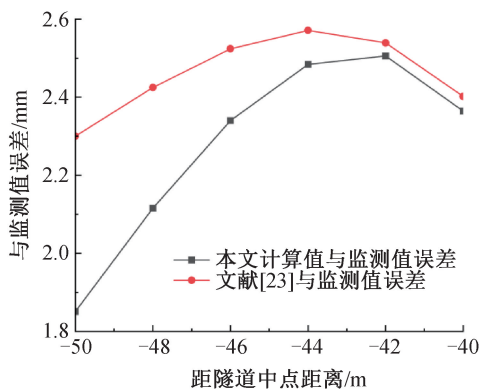


表 1 土体物理参数取值

土体参数	取值
土体重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	18.2
土体饱和重度 $\gamma_s/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	20.3
泊松比 $\nu$	0.28
静止土压力系数 $K_0$	0.6
土体弹性模量 $E_s/\text{MPa}$	83.57
渗透系数 $k/(\text{m}\cdot\text{d}^{-1})$	0.138



(a) 不同方法计算结果



(b) 不同方法计算误差 (与监测值)

图 7 隧道竖向位移对比曲线

力时,计算得到的隧道中点处最大隆起值达 10.36 mm;而考虑基坑开挖和井点降水的协同作用(本文方法),该值大幅降低至 4.23 mm,变形减小一半以上,且影响范围约在 10 倍基坑宽度范围以内。这证明基坑降水工程能有效减少下卧既有隧道的隆起变形,且考虑降水效应是此类研究分析中不可忽视的实际工程因素。

其次,本文方法优于传统简化算法。通过与大井法<sup>[23]</sup>的误差对比,本文方法所得到的隧道位移曲线在所取区间端部与监测值的差异更小,计算精度更高。

最后,本文方法的有效性与准确性得到充分验证。其计算结果与考虑降水的精细数值模拟结果<sup>[17]</sup>趋势一致,且预测的隧道位移曲线形态和最大

位移值均与现场监测数据吻合良好。这表明本文模型能够较好地刻画基坑开挖与井点降水协同作用下下卧既有隧道的竖向变形规律,为类似施工条件下的工程提供了理论计算依据,从而有效调控下卧既有隧道的竖向变形。

## 4 参数敏感性分析

为深入探究各关键参数的影响规律,基于本文工程案例构建基坑-隧道模型,进行系统的参数敏感性分析。分析选取变量包括隧道直径、隧道埋深、井坑间距、降水井半径、降水深度和坑隧相对位置;分析采用控制变量法,不改变其余因素的参数取值。

### 4.1 隧道直径

为探讨隧道直径  $D$  的变化对隧道竖向变形的影响规律,选取 5 组不同的隧道直径参数,并进行相关分析,其大小分别为 4.0、5.0、6.0、7.0 m 和 8.0 m。图 8 展示了不同隧道直径取值下,考虑井点降水作用时的隧道轴线处竖向变形趋势,从图中可以看出:当隧道直径  $D$  由 4.0 m 增大到 8.0 m 时,隧道的最大隆起值由 3.33 mm 增大到 4.90 mm,最大沉降值由 6.37 mm 增大到 10.01 mm。这一现象主要源于隧道直径增大会导致其抗弯刚度显著提高,进而使其在基坑开挖卸荷及降水引发的附加应力场中承担并传递更大的力学作用,表现为绝对变形量的增加。

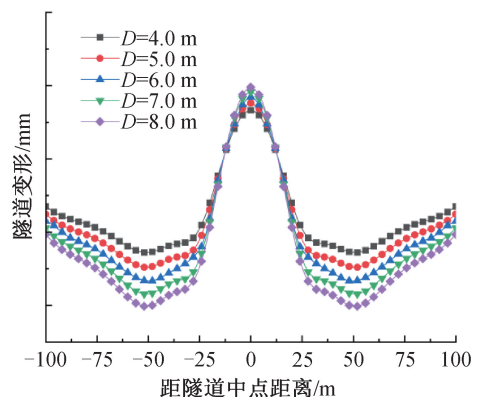


图 8 不同隧道直径下隧道变形曲线

从相对变形的角度分析(变形/直径),如图 9 所示,隧道的相对变形  $\delta$  随着直径  $D$  的增加而呈现下降趋势。其原因是随着隧道抗弯刚度增大,隧道抵抗变形的能力也增强了。因此,在工程设计中选定隧道直径大小时,需综合权衡绝对变形控制与结构相对刚度之间的平衡,并非直径越大越有利。

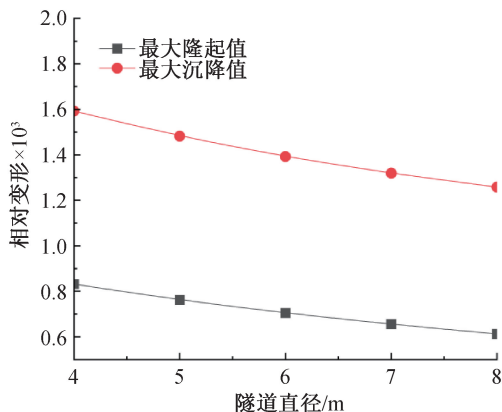


图9 不同隧道直径下相对变形趋势曲线

### 4.2 隧道埋深

为研究隧道埋深  $z_0$  对既有隧道竖向变形的影响,选取五组隧道埋深不同的参数,进行相关分析,其深度分别为 18.0、20.0、22.0、24.0 m 和 26.0 m。

不同埋深下隧道轴线处的变形趋势及最大变形值变化分别如图 10 和图 11 所示,从图中可以看出:随着隧道埋深的增加,隧道的最大隆起值和最大沉降值均逐渐减小,且最大隆起值的减小幅度更为显著。其机理为:埋深增大意味着隧道与基坑的直线距离增加,土体开挖卸荷所产生的附加应力对隧道的影响也随之减弱,从而导致隧道变形减小。因此,从控制变形的角度来看,在同等条件下,增加隧道埋深能有效减小基坑施工引起的隧道变形。

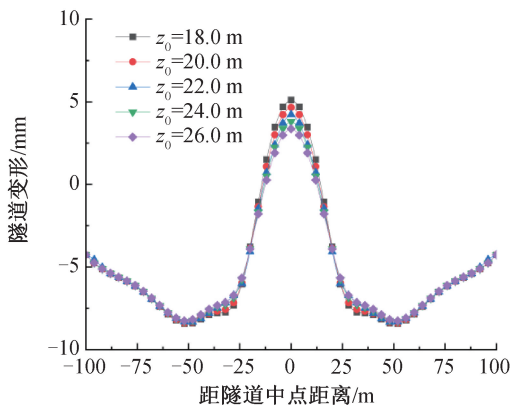


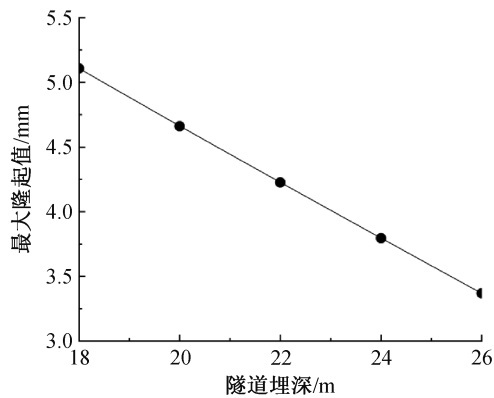
图10 不同埋深下隧道变形曲线

### 4.3 井坑间距

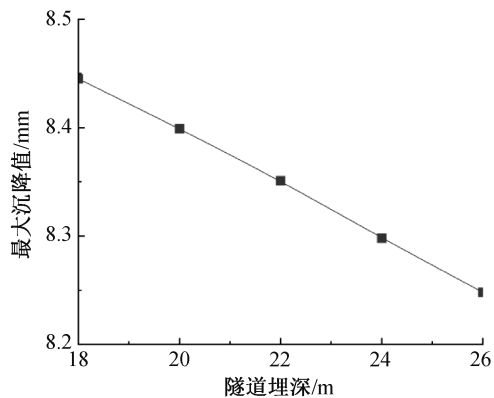
为探究井坑间距  $l_d$  对下卧既有隧道竖向变形的影响机制,保持各井点与基坑的相对方位不变,以单一变量原则考察间距变化的影响。选取 5 组井坑间距不同的参数,其大小分别为 1.0、2.0、3.0、4.0 m 和 5.0 m。

不同井坑间距下隧道轴线处的竖向变形曲线如图 12 所示,从图中可以看出:随着井坑间距由 1.0 m 逐渐增大至 5.0 m 时,隧道中点处的隆起值由

4.90 mm 逐渐减少至 3.63 mm,且变化幅度在基坑内部区域更加明显。其机理在于:当排水井紧邻基坑布置时,坑外土体的地下水位在短距离内急剧下降,形成较大的水力梯度,导致隧道上方所受的附加应力集中释放,引起隧道中点附近的明显变形;反之,当降水井布置远离基坑时,地下水位降落曲线趋于平缓,应力释放更为分散,传递至隧道的附加应力及由此引发的竖向变形相应减弱。因此,在工程实践中,井坑间距的确定需在有效降低基坑水位与最小化对邻近既有隧道的不利影响之间寻求平衡,从而实现安全与经济的统一。



(a) 最大隆起值



(b) 最大沉降值

图11 不同埋深下隧道最大变形趋势曲线

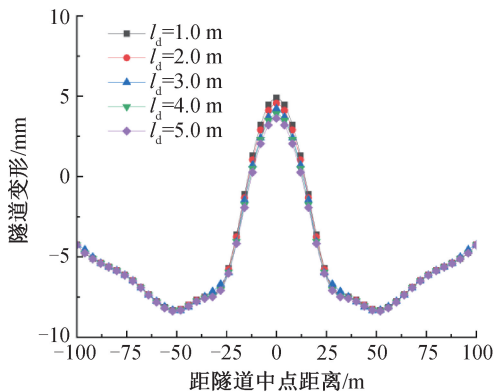


图12 不同井坑间距下隧道变形曲线

#### 4.4 降水井半径

为研究降水井半径  $r$  对隧道竖向变形的影响,保持井坑间距  $l_d$  不变,选取 5 组井径不同的参数并进行相关分析,其大小分别为 0.3、0.5、0.7、0.9 m 和 1.1 m。不同降水井半径下的下卧既有隧道轴线处变形趋势如图 13 所示,从图中可以看出:在所设置的井径参数范围内,随着井径的增大,隧道的最大隆起值和最大沉降值均呈增大趋势。其中沉降值的变化幅度更为显著。

根据前述理论推导部分可知:降水井半径直接影响单井流量的大小。半径  $r$  增大时,单井抽水能力增强,形成的降水漏斗曲线更深、更陡,导致在相同的布置条件下,坑外水位下降更加明显,使下卧既有隧道所受附加应力与相应竖向变形增大;反之,半径  $r$  减小则降水漏斗曲线平缓,对隧道的变形影响减弱。

因此,在工程设计中,降水井半径  $r$  的选取需综合权衡:虽然增大井半径可提升工程效率,但也会加剧对邻近隧道的不利影响。故应在满足基坑降水要求的前提下,通过优化井径,寻求降水效能与隧道安全保护之间的最佳平衡。

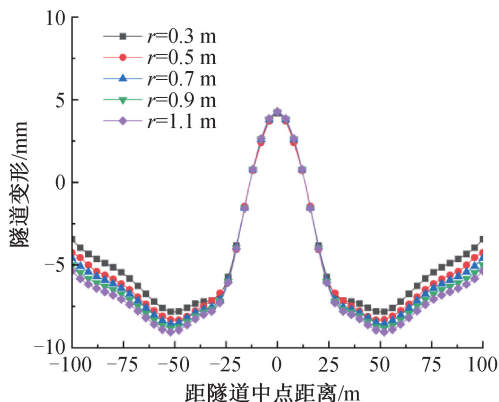


图 13 不同井半径下隧道变形曲线

#### 4.5 降水深度

为定量研究降深  $s_w$  对下卧既有隧道竖向变形的影响,基于以下假定进行参数分析:各降水井为潜水完整井,均匀分布,地下水流场稳定且无外界干扰,每个降水井的降深一致且降水至坑底所设位置处。选取 5 组降深不同的工况进行相关分析,分别为 13.0、14.0、15.0、16.0 m 和 17.0 m。不同降水深度下隧道轴线处的变形趋势如图 14 所示。其影响机理为:降水深度  $s_w$  的增大会导致土体孔隙水压力降低幅度增加,使得有效应力显著增大。由降水主导的附加应力场增强,会部分抵消基坑开挖土体卸荷产生的附加应力,使隧道中点处的隆起值减小,

甚至可能逐渐转化为沉降。而对于远离基坑开挖区域处,隧道沉降量则会增大。反之,在井点降深  $s_w$  减小时,隧道中点处隆起值增大,边缘处沉降值减小。

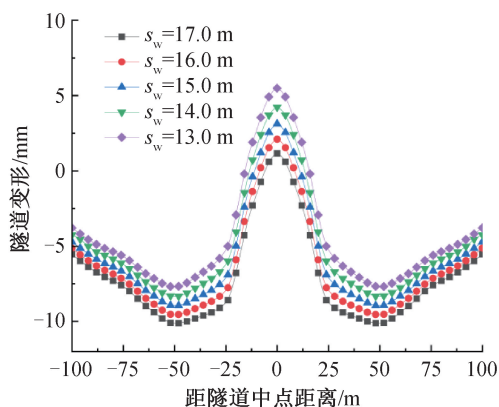
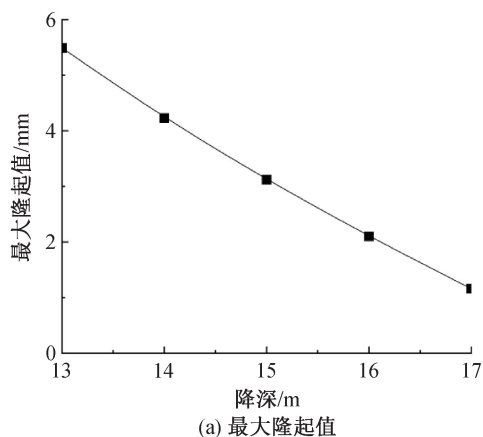
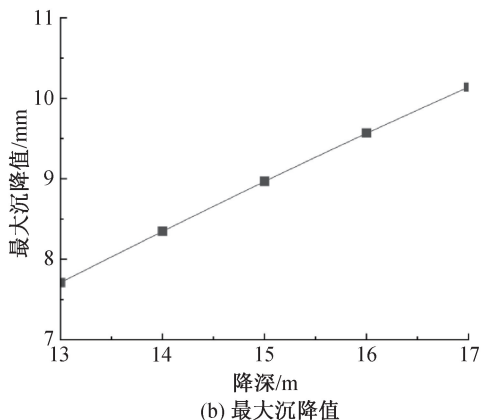


图 14 不同水位降深下隧道变形曲线

图 15 定量描述了隧道最大变形值随  $s_w$  的变化规律:当  $s_w$  从 13.0 m 增加至 17.0 m 时,隧道最大隆起值由 4.49 mm 急剧减小至 1.16 mm,而最大沉降值则由 7.71 mm 增大至 10.14 mm。这表明降水深度是影响隧道变形的一个高敏感参数。在实际工程中,过大的降深会显著加剧邻近隧道的沉降变形,故需要基于理论预测值进行优化控制。



(a) 最大隆起值



(b) 最大沉降值

图 15 不同水位降深下隧道最大变形趋势曲线

#### 4.6 坑隧相对位置

为探究坑隧水平距离  $l$  对隧道竖向变形的影响,选取 7 组不同的距离参数 ( $l$  为 8.0、18.0、28.0、38.0、48.0、58.0 m 和 68.0 m),并进行相关分析。隧道变形随坑隧相对位置的变化规律如图 16 所示,从图中可以看出:当隧道位于基坑下方邻近区域时,隧道中心处的隆起变形较为显著;而在隧道超出基坑开挖投影范围之后,隧道中心处的变形由隆起转变为沉降,且整体的位移曲线趋于水平(最大位移差减小)。这一规律源于基坑开挖卸荷与降水引起的附加应力场在空间上的衰减效应。当隧道紧邻或位于基坑下方时,处于高应力扰动区内,变形响应剧烈且不均匀;随着距离增大,隧道逐渐移出主要扰动区,所受附加应力大幅减弱,因此变形量值与差异均减小,安全性相应提高。

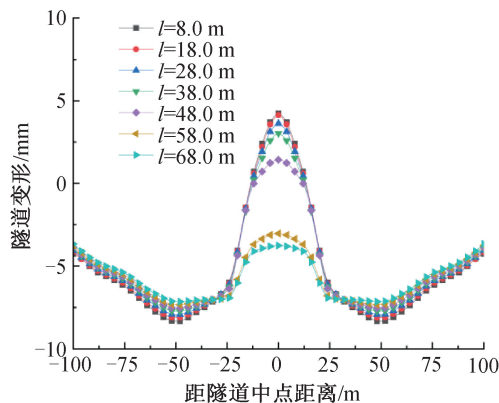


图 16 不同坑隧距离下隧道变形曲线

由上述分析可知,坑隧相对位置是影响隧道变形大小与分布形态的关键空间参数。当基坑开挖不得不邻近隧道时,需要采取严格的变形控制措施;而随着坑隧相对距离增大,隧道受施工扰动的影响迅速降低。

## 5 结论

本文基于两阶段分析法,提出了一种考虑基坑开挖与井点降水协同作用下的下卧既有隧道纵向变形解析预测方法。一阶段,采用 Mindlin 解与井点应力叠加法计算了基坑开挖卸荷和坑外井点降水综合作用对隧道产生的附加应力;二阶段,将隧道简化为搁置在 Kerr 地基模型上的欧拉梁,通过有限差分法求解得到既有隧道轴线处的变形值。基于上述方法,系统开展了案例验证和关键参数的敏感性分析,主要结论如下:

a) 案例结果表明,本文方法的计算结果与监测数据吻合良好,且相较于忽略或简化降水的计算方法,能更精细地反映群井降水的空间效应,特别是在

隧道变形曲线的端部区域,其预测精度相较于大井法等简化方法有明显提升。

b) 隧道的直径和埋深是控制其变形响应的内在因素。隧道直径增大使其抵抗变形能力提升;隧道埋深的增加则有效降低了基坑施工扰动对既有隧道的影响效果。

c) 降水井的布置、尺寸与水位降深对隧道变形具有精细化调控作用。适当增大井坑间距能有效平缓水力梯度,减弱隧道竖向变形;降水井半径增大会导致坑外水位下降更加明显,从而加剧隧道变形;降水深度的增加导致土体有效应力增大,会抑制隧道的中部隆起,但同时可能加剧基坑投影区以外隧道的沉降。

d) 坑隧相对水平距离是决定隧道安全状态的关键空间参数。当隧道位于基坑投影区下方或紧邻时,变形最为显著;随着距离增大,变形迅速衰减并趋于均匀。

本文建立了一套考虑基坑开挖和井点降水双重扰动的下卧既有隧道变形预测理论框架,克服了传统方法常忽略或简化降水效应的局限性,不仅揭示了各因素影响的内在力学机制,还提炼出了可用于指导设计与施工的定性规律和量化关系,实现了从理论分析到工程应用的衔接。

本文研究基于均质土体和地下水流稳定等假定,为提升模型对复杂工程条件的适用性,后续研究可在以下方面展开:进一步考虑复杂地层或者非稳定渗流条件下的适用性,如地层非均匀性、地下水动态变化等;深化参数分析,探讨多因素耦合效应,并研究隧道与基坑斜交等复杂空间工况下的隧道三维力学响应;进一步研究 Kerr 地基模型参数在复杂地层中的确定方法,并探索能更准确反映隧道接头力学行为的分析模型。

## 参考文献:

- [1] 刘波, 范雪辉, 王园园, 等. 基坑开挖对临近既有地铁隧道的影响研究进展[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(S2): 253-258.
- [2] Vinoth M, Aswathy M S. Behaviour of existing tunnel due to adjacent deep excavation: a review[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 16(9): 1132-1151.
- [3] 丁智, 张霄, 梁发云, 等. 软土基坑开挖对邻近既有隧道影响研究及展望[J]. 中国公路学报, 2021, 34(3): 50-70.
- [4] Zhang Y, Tao L J, Liu J, et al. Construction techniques and mechanical behavior of newly-built large-span tunnel ultra-short distance up-crossing the existing shield tunnel with oblique angle [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023,

- 138; 105162.
- [5] 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.
- [6] Feng G H, Xu C J, Liang L J, et al. Simplified method for evaluating the response of existing tunnel induced by adjacent excavation [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2023, 47(1): 54-81.
- [7] 黄明华, 钟煜轩, 陆锦斌, 等. 基于非连续地基梁模型的基坑开挖诱发下卧盾构隧道变形分析[J]. 岩土力学, 2025, 46(2): 492-504.
- [8] Wu H N, Shen S L, Liao S M, et al. Longitudinal structural modelling of shield tunnels considering shearing dislocation between segmental rings [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 50: 317-323.
- [9] 梁荣柱, 林存刚, 夏唐代, 等. 考虑隧道剪切效应的基坑开挖对邻近隧道纵向变形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(1): 223-233.
- [10] 徐日庆, 程康, 应宏伟, 等. 考虑埋深与剪切效应的基坑卸荷下卧隧道的形变响应[J]. 岩土力学, 2020, 41(S1): 195-207.
- [11] 程康, 徐日庆, 应宏伟, 等. 既有隧道在上覆基坑卸荷下的形变响应简化算法[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(3): 637-648.
- [12] 张志伟, 郑刚, 程雪松, 等. 考虑接头非线性转动效应的盾构隧道纵向变形简化解[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(8): 1583-1594.
- [13] Zhang D M, Xie X C, Li Z L, et al. Simplified analysis method for predicting the influence of deep excavation on existing tunnels[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 121: 103477.
- [14] Zheng G, Du Y M, Cheng X S, et al. Characteristics and prediction methods for tunnel deformations induced by excavations[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 12(3): 361-397.
- [15] Chen R P, Xu Y, Wang H L, et al. Effect of adjacent excavation on the mechanical response of proximal soil and tunnels in normally consolidated clay: centrifuge model testing and numerical simulation[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2025, 26(10): 931-949.
- [16] 许四法, 周奇辉, 郑文豪, 等. 基坑施工对邻近运营隧道变形影响全过程实测分析[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(5): 804-812.
- [17] 汪鹏程, 王景, 周守强. 上跨既有隧道的深基坑降水开挖施工数值模拟分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2020, 43(4): 499-506.
- [18] 周守强, 汪鹏程, 王景. 潜水地区深基坑降水开挖对下卧隧道影响分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2022, 45(3): 356-361.
- [19] 莫小兵, 郝世全, 李伟, 等. 富水岩溶地区新建隧道对上跨既有隧道渗流场及应力场的影响机制[J]. 安全与环境工程, 2025, 32(2): 151-159.
- [20] 管凌霄, 徐长节, 王雪鹏, 等. 基坑开挖及降水引起下卧隧道变形的解析解[J]. 岩土力学, 2023, 44(11): 3241-3251.
- [21] 孟非, 乔世范, 陈道龙, 等. 基坑开挖及降水引起既有盾构隧道变形分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(1): 246-258.
- [22] 杨开放, 管凌霄, 徐长节, 等. 考虑时间效应的基坑预降水引起邻近管道变形的解析计算研究[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(S2): 151-157.
- [23] 管凌霄, 徐长节, 罗青, 等. 基于 Kerr 地基模型基坑开挖及降水引起的下卧隧道变形[J]. 工程力学, 2025, 42(10): 145-153.
- [24] Mindlin R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, 7(5): 195-202.
- [25] Attewell P B, Yeates J, Selby A R. Soil Movement Induced by Tunneling and Their Effects on Pipelines and Structures[M]. London: Blackie and Son Ltd., 1986: 128-132.
- [26] Tanahashi H. Formulas for an infinitely long Bernoulli-Euler beam on the Pasternak model[J]. Soils and Foundations, 2004, 44(5): 109-118.
- [27] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[D]. 上海: 同济大学, 2005: 117-118.

(责任编辑:康 锋)