

文章编号:1673-9469(2025)05-0071-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.05.009

结构下穿隧道地表沉降变形解析预测方法

徐泽全¹,张正^{2*},赵伏田¹,刘军¹,王晓东²,沈阳²

(1. 河海大学土木与交通学院,江苏南京 210098;2. 中铁二十四局集团有限公司,上海 200040)

摘要: 考虑地表建(构)筑物结构荷载作用下隧道开挖引起的地表沉降,将结构荷载等效简化为均布荷载,分别针对半空间结构荷载作用下围岩的变形场与半空间无荷载下埋隧洞建立解析模型,根据两个模型的计算结果预测结构下穿隧道条件下的地表沉降变形。对于半空间结构荷载作用下围岩的变形场,通过对地表施加的均布荷载进行积分,得到半空间的应力分布解答式,进而计算得到半空间由建筑物荷载引起的位移场分布。对于半空间无荷载下埋隧洞,基于浅埋隧道问题的简化形式,采用 Airy 应力函数得到半无限空间中隧道开挖引起的位移场表达式。在两个解答的基础上,得到地表建筑物荷载影响下下穿隧道引起地表沉降变形的解析解。通过该解析预测结构荷载与隧道开挖共同作用下的地表沉降特征,并绘制沉降曲线分析地表沉降规律,将理论计算的沉降变形与实测沉降数据进行比较。结果显示,计算值与实测值相对误差为 3.9%,证明计算模型能够较好描述建筑物荷载和隧道开挖的耦合效应,验证了计算模型的准确性与适用性。

关键词: 地表沉降;结构荷载;下穿隧道;Airy 应力函数;沉降监测

中图分类号: U451

文献标识码: A

Analytical Prediction Method of Ground Settlement Deformation of Tunnel Under Structure

XU Zequan¹, ZHANG Zheng^{2*}, ZHAO Futian¹, LIU Jun¹, WANG Xiaodong², SHEN Yang²

(1. College of Civil and Transportation, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. China Railway 24th Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: The analytical prediction method for ground settlement deformation of underground tunnels considering the surface building (structure) load-induced ground settlement due to tunnel excavation takes the structural load as an equivalent distributed load. It establishes analytical models for the deformation field of surrounding rock under the action of half-space structural load and the buried tunnel under the condition of no load in the half-space. Based on the calculation results of the two models, the ground settlement deformation under the condition of structure-underpass tunnels is predicted. For the deformation field of the surrounding rock under the action of the half-space structural load, the integral of the uniformly distributed force applied to the surface is used to obtain the stress distribution formula of the half-space, and then the displacement field distribution caused by the building load in the half-space is calculated. For the buried tunnel under the condition of no load in the half-space, the Airy stress function is used to obtain the displacement field expression of the tunnel excavation in the semi-infinite space based on the simplified form of the shallow-buried tunnel problem. On the basis of the two solutions, the analytical solution for the ground settlement deformation caused by the underpass tunnel under the influence of surface building loads is obtained. Through this analytical prediction, the ground settlement characteristics under the combined action of structural load and tunnel excavation are analyzed,

收稿日期:2024-07-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778211)

第一作者:徐泽全(2000—),男,江苏连云港人,博士研究生,从事岩土工程方面的研究。

* 通信作者:张正(1990—),男,上海人,硕士,高级工程师,从事地下空间方面的研究。

and the settlement curve is drawn to analyze the surface settlement pattern. The calculated settlement deformation and the measured settlement data are compared, and the result shows that the relative error between the calculated value and the measured value is 3.9%, which proves that the calculation model can well describe the coupling effect of building load and tunnel excavation, and verifies the accuracy and applicability of the calculation model.

Key words: ground settlement; building structural load; underpass tunnel; Airy stress function; field monitoring

随着我国城市化进程的推进,为了缓解城市交通压力,地铁建设规模持续扩大^[1]。伴随轨道交通线网的扩展,不可避免地出现结构下穿隧道的情况。虽然隧道掘进技术已较为成熟,但在施工过程中仍会对周围岩土体产生扰动,改变其应力状态,进而引起周边环境发生沉降变形^[2]。在此背景下,准确预测结构荷载作用下隧道开挖诱发的地表沉降,对保障隧道施工安全具有重要意义。

目前,关于结构下穿隧道地表沉降变形的评估方法主要包括经验法^[3-4]、监测法^[5-6]、数值模拟法^[7-8]和解析法^[9]。早在1969年Peck^[10]便以大量实际工程为背景,提出了沉降变形的正态分布曲线并应用至今。张运强等^[11]在Peck经验法的基础上引入适用于不同地层的参数,建立了三维条件下下穿隧道引起地表沉降的经验公式。Fu等^[12]通过对隧道施工现场地层和建筑物变形的监测,研究地表沉降和建筑物变形在隧道施工中的响应。罗燕平等^[13]为研究浅埋连拱隧道在施工中的变形特征,开展了施工现场的长期监测,获得了地表沉降及围岩变形规律。Ding等^[14]采用模型试验方法,研究了隧道截面不同初始椭圆度和不同附加荷载作用对隧道纵向沉降的影响。Ren等^[15]建立了穿越建筑物的双线隧道有限元模型,得到了地表沉降与建筑物、隧道的相对位置有关,沉降位置与隧道开挖顺序无关的结论。王万锋等^[16]基于盾构隧道下穿加油站建立三维有限元模型,研究了加油站地表及油罐在盾构施工中的沉降规律。Islam等^[17]建立了浅埋背驮式双隧道的有限元模型,分析了几何参数、施工顺序和隧道间相互作用对地表沉降的影响。Wang等^[18]基于弹性和黏弹性理论,采用复变函数计算得到了附加荷载作用下的地表变形。张治国等^[19]基于Airy应力函数,考虑隧道衬砌与土体相互作用,推导得出隧道开挖引发地表沉降的解析公式。

解析法充分体现了围岩中应力分布的力学机制,且应用简便,具有普适性。现有基于Airy应力函数的研究认为,隧道开挖引起地表沉降的主要

原因是围岩应力的重新分布,未考虑地表建筑物荷载的影响。对于埋深较浅的隧道,建筑物荷载的影响不可忽略。因此,本文基于浅埋隧道问题,采用简化的Airy应力函数,推导了隧道开挖中考虑建筑物荷载影响的位移场表达式,并通过与实测数据进行对比,验证解析模型的正确性。

1 结构下穿隧道地表变形的解析计算模型

隧道区间下穿既有建筑物的示意图如图1所示。图中, L 为隧道总长, m ; H 为隧道埋深, m ; R_0 为隧道半径, m ; S 为隧道轴线与建筑物的最短距离, m 。

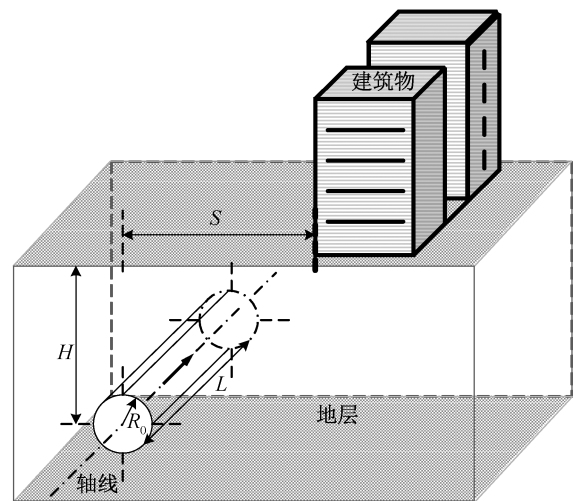


图1 建筑物与隧道位置关系图

Fig. 1 Relationship between the location of buildings and tunnels

为简化计算,将场地和围岩近似为均匀、各向同性的线弹性体,且围岩应力各向等压,将建筑物荷载等效为地表均布荷载。不考虑建筑物的基础类型及埋置深度,建立了隧道掘进诱发地表沉降的计算模型,如图2所示。将隧道掘进诱发的地表沉降计算简化为平面孔洞问题,隧道简化为圆形。图2中,建筑物宽度为 B ,点 (r, θ) 为极坐标系下半无限空间任意一点,地表建筑等效为均布荷载 $q(x)$,均布荷载的中心点位置为 C ,作用范围为 x_1-x_2 。

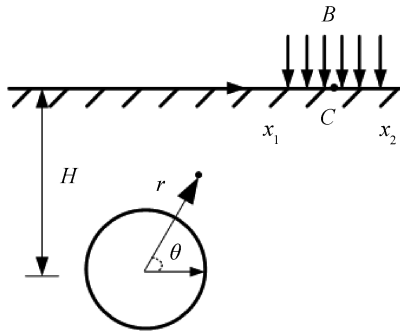


图 2 简化计算模型

Fig. 2 Simplified calculation model

隧道开挖诱发地表沉降计算过程分为以下几个步骤:(1)将地基视为半无限空间,推导直角坐标系下建筑均布荷载作用引起的半无限空间位移场;(2)推导极坐标系下隧道开挖引起半无限空间位移场;(3)通过坐标变换,实现建筑均布荷载作用引起的半无限空间位移场和隧道掘进引起半无限空间位移场的叠加,求得考虑地表建筑物均布荷载作用下隧道掘进开挖诱发的地表沉降解析解。

2 结构荷载作用下围岩变形解析计算方法

2.1 半空间应力解

将地基视为半无限空间,建立以隧道中心线为纵坐标,水平地面为横坐标,隧道中心线与水平面的交点为坐标原点的直角坐标系,如图 3 所示。推导建筑均布荷载作用下隧道拱顶竖向位移 u_0 与隧道拱腰水平位移 v_0 。

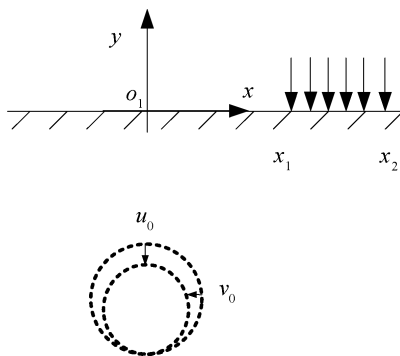


图 3 均布荷载作用下引起隧道变形示意图
Fig. 3 Schematic diagram of tunnel deformation caused by uniform load

Flamant^[20]给出了在半无限空间地面某一点处竖向集中力作用下的应力和位移解,通过对地表作用的均布荷载进行积分,可以得到半无限空间在均布荷载作用下的应力解,见式(1)一式(3)。

$$\sigma_x = \frac{2}{\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{b(a-x)^2 q(x)}{[b^2 + (a-x)^2]^2} dx \quad (1)$$

$$\sigma_y = \frac{2}{\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{b^3 q(x)}{[b^2 + (a-x)^2]^2} dx \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{2}{\pi} \int_{x_1}^{x_2} \frac{q(x)b^2(a+x)}{[b^2 + (a+x)^2]^2} dx \quad (3)$$

式中: σ_x 为水平应力, N/m^2 ; σ_y 为竖向应力, N/m^2 ; τ_{xy} 为切向应力, N/m^2 ; (a, b) 为半无限空间中任意一点的坐标。

2.2 半空间位移解

Flamant^[20]的位移解基于半无限平面完全自由的假设,适用于半无限平面问题。然而,在实际工程中,地层常受到不可压缩层的约束,使垂直位移为 0。针对这一情况,Wang 等^[18]根据岩土工程实际情况对位移解进行修正,推导出满足不可压缩地层条件下均布荷载作用的半空间位移解,见式(4)(5)。

$$u_x = \frac{1+\nu}{\pi E} \left\{ (1-2\nu) \int_{x_1}^{x_2} q(x) \left[\arctan\left(\frac{a-x}{-b}\right) + \arctan\left(\frac{a-x}{2h+b}\right) \right] dx + \int_{x_1}^{x_2} q(x) \times \left[\frac{-b(a-x)}{b^2 + (a-x)^2} + \frac{(a-x)(2h+b)}{(2h+b)^2 + (a-x)^2} \right] dx \right\} \quad (4)$$

$$u_y = \frac{1+\nu}{\pi E} \left\{ -2(1-\nu) \int_{-\infty}^{+\infty} q(x) \times \ln \left[\frac{\sqrt{b^2 + (a-x)^2}}{\sqrt{(2h+b)^2 + (a-x)^2}} \right] dx - \int_{-\infty}^{+\infty} q(x) \times \left[\frac{(a-x)^2}{b^2 + (a-x)^2} - \frac{(a-x)^2}{(2h+b)^2 + (a-x)^2} \right] dx \right\} \quad (5)$$

式中: u_x 为水平位移, m ; u_y 为竖向位移, m ; E 为半无限空间杨氏模量, MPa ; ν 为半无限空间泊松比; h 为垂直位移为 0 的水平面深度,通常取两倍的隧道埋深或者不可压缩岩层的深度, m 。

3 半空间无荷载下埋隧洞围岩变形解析计算方法

3.1 应力函数

基于简化计算的假设,将隧道开挖引起地表沉降简化为半无限空间中平面应变条件下的圆形孔洞问题。对于极坐标下平面应变

问题, Goodier 等^[21]给出了应力函数 φ 的一般形式:

$$\begin{aligned} \varphi = & a_0 \ln r + b_0 r^2 + c_0 r^2 \ln r + d_0 r^2 \theta + a'_0 \theta + \\ & \frac{1}{2} a_1 r \theta \sin \theta + (b_1 r^3 + a'_1 r^{-1} + b'_1 r \ln r) \cos \theta - \\ & \frac{1}{2} c_1 r \theta \cos \theta + (d_1 r^3 + c'_1 r^{-1} + d'_1 r \ln r) \sin \theta + \\ & \sum_{n=2}^{\infty} (a_n r^n + b_n r^{n+2} + a'_n r^{-n} + b'_n r^{-n+2}) \cos(n\theta) + \\ & \sum_{n=2}^{\infty} (c_n r^n + d_n r^{n+2} + c'_n r^{-n} + d'_n r^{-n+2}) \sin(n\theta) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: a_0, a_1, \dots, a_n ; a'_0, a'_1, \dots, a'_n ; b_0, b_1, \dots, b_n ; b'_1, \dots, b'_n ; c_0, c_1, \dots, c_n ; c'_0, c'_1, \dots, c'_n ; d_0, d_1, \dots, d_n ; d'_0, d'_1, \dots, d'_n 是由边界条件确定的待定常数。

为了求解浅埋隧道应力解和位移解, Park^[22]将应力函数简化为

$$\begin{aligned} \varphi = & a_0 \ln r + b_0 r^2 + c_0 r^2 \ln r - \frac{1}{2} c_1 r \theta \cos \theta + (d_1 r^3 + \\ & c'_1 r^{-1} + d'_1 r \ln r) \sin \theta + (a_2 r^2 + b_2 r^4 + a'_2 r^{-2} + \\ & b'_2) \cos 2\theta + (c_3 r^3 + d_3 r^5 + c'_3 r^{-3} + d'_3 r^{-1}) \sin 3\theta \end{aligned} \quad (7)$$

3.2 边界条件与一般位移解

隧道开挖诱发地表沉降的弹性解需满足平衡方程、变形协调方程和边界条件。根据假设条件得到边界条件如下:

$$\sigma_r \Big|_{r=R_0} = \tau_{r\theta} \Big|_{r=R_0} = 0 \quad (8)$$

$$\sigma_y \Big|_{r \rightarrow \infty} = -\gamma(h - r \sin \theta) \quad (9)$$

$$\sigma_x \Big|_{r \rightarrow \infty} = -k\gamma(h - r \sin \theta) \quad (10)$$

$$U_r \Big|_{r=R_0} = -\frac{u_0 + 2v_0}{4} + \frac{u_0 - 2v_0}{4} \cos 2\theta - \frac{u_0}{2} \sin \theta \quad (11)$$

$$U_\theta \Big|_{\theta = \pm \pi/2} = 0 \quad (12)$$

式中: σ_r 为极坐标系下径向应力, N/m^2 ; U_r 为极坐标系的径向位移, N/m^2 ; γ 为土的重度, kN/m^3 ; k 为土的侧压力系数。

弹性力学中应力函数与应力分量的关系见式(13)一式(15)。对于弹性阶段的土体, 根据应力与应变关系、应变与位移关系可得径向、切向位移, 见式(16)一式(17)。

$$\begin{aligned} \sigma_r = & \frac{d\varphi}{rdr} + \frac{d^2\varphi}{r^2d\theta^2} = a_0 r^{-2} + 2b_0 + c_0 + 2c_0 \ln r + \\ & (2d_1 r - c'_1 r^{-3} + d'_1 r^{-1}) \sin \theta - 2(a_2 + 3a'_2 r^{-4} + \\ & 2b'_2 r^{-2}) \cos 2\theta - 3(c_3 r + d_3 r^3 + 6c'_3 r^{-5} + \\ & 5d'_3 r^{-3}) \sin 3\theta \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = & \frac{d^2\varphi}{dr^2} = -a_0 r^{-2} + 2b_0 + 3c_0 + 2c_0 \ln r + (6d_1 r + \\ & 2c'_1 r^{-3} + d'_1 r^{-1}) \sin \theta + 2(a_2 + 6b'_2 r^2 + \\ & 3a'_2 r^{-4}) \cos 2\theta + 2(3c_3 r + 10d_3 r^3 + 6c'_3 r^{-5} + \\ & d'_3 r^{-3}) \sin 3\theta \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \tau_{r\theta} = & -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{d\varphi}{rd\theta} \right) = -(2d_1 r - 2c'_1 r^{-3} + d'_1 r^{-1}) \cos \theta + \\ & 2(a_2 + 3b'_2 r^2 - 3a'_2 r^{-4} - b'_2 r^2) \sin 2\theta - \\ & 6(c_3 r + 2d_3 r^3 - 3c'_3 r^{-5} - d'_3 r^{-3}) \cos 3\theta \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} u_r = & \frac{1+\nu}{E} \left\{ -a_0 r^{-1} + 2(1-2\nu)b_0 r - c_0 r + \right. \\ & 2(1-2\nu)c_0 r \ln r + [(1-4\nu)d_1 r^2 + c'_1 r^{-2} + r + \\ & (1-2\nu)d'_1 \ln r] \sin \theta - 2[a_2 r + 2\nu b_2 r^3 - (1- \\ & \nu)b'_2 r^{-1}] \cos 2\theta - [3c_3 r^2 + (1+4\nu)d_3 r^4 - \\ & \left. 3c'_3 r^{-4} - (5-4\nu)d'_3 r^{-2}] \sin 3\theta \right\} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} u_\theta = & \frac{1+\nu}{E} \left\{ 4(1-\nu)c_0 r \theta - [(5-4\nu)d_1 r^2 + c'_1 r^{-2} - \right. \\ & \nu c_1 - (1-\nu)c_1 \ln r + (1-2\nu)d'_1(1-\ln r) \cos \theta + \\ & 2[a_2 r + (3-2\nu)b_2 r^3 + a'_2 r^{-3} - (1-\nu) \times \\ & b'_2 r^{-1} \sin 2\theta - [3c_3 r^2 + (7-4\nu)d_3 r^4 + 3c'_3 r^{-4} - \\ & \left. (1-4\nu)d'_3 r^{-2}] \cos 3\theta \right\} \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\tau_{r\theta}$ 为极坐标系下切应力, N/m^2 ; u_r 为径向位移, m ; u_θ 为切向位移, m 。

3.3 考虑初始应力状态

考虑地应力的初始状态, 将式(7)中的应力函数用平均应力和偏应力组合, 见式(18)。

$$\varphi = \frac{P_m}{2} r^2 + \frac{P_d}{2} r^2 \cos 2\theta \quad (18)$$

式中: $P_m = -[(1+k)/2]\gamma(H - r \sin \theta)$, $P_d = -[(1-k)/2]\gamma(H - r \sin \theta)$ 。

根据弹性力学中应力函数与应力分量的关系可知:

$$\begin{aligned} \sigma_r = & -\frac{(1+k)}{2}\gamma H + \frac{(3+k)}{4}\gamma H \sin \theta + \frac{(1-k)}{2} \times \\ & \gamma H \cos 2\theta - \frac{(1-k)}{4}\gamma H \sin 3\theta \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = & -\frac{(1+k)}{2}\gamma H + \frac{(1+3k)}{4}\gamma H \sin \theta - \frac{(1-k)}{2} \times \\ & \gamma H \cos 2\theta + \frac{(1-k)}{4}\gamma H \sin 3\theta \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \tau_{r\theta} = & \frac{(1-k)}{4}\gamma r \cos \theta - \frac{(1-k)}{2}\gamma H \sin 2\theta - \\ & \frac{(1-k)}{4}\gamma r \cos 3\theta \end{aligned} \quad (21)$$

3.4 隧道开挖后位移解

考虑地层初始应力状态,根据式(13)一式(15)和式(19)一式(21)可得到隧道开挖后的应力解。根据原位应力状态下的应力方程可以得到土体开挖后的位移解见式(25)(26)。

$$\sigma_r = a_0 r^{-2} - \frac{(1+k)}{2} \gamma H + \left[\frac{(3+k)}{4} \gamma r - 2c'_1 r^{-3} + d'_1 r^{-1} + c_1 r^{-1} \right] \sin\theta + \left[\frac{(1-k)}{2} \gamma H - 6a'_2 r^{-4} + 4b'_2 r^{-2} \right] \cos 2\theta - \left[\frac{(1-k)}{4} \gamma r^3 + 12c'_3 r^{-5} + 10d'_3 r^{-3} \right] \sin 3\theta \quad (22)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{(1+k)}{2} \gamma H - a_0 r^{-2} + \left[\frac{(1+3k)}{4} \gamma r + 2c'_1 r^{-3} + d'_1 r^{-1} \right] \sin\theta - \left[\frac{(1-k)}{2} \gamma H - 6a'_2 r^{-4} \right] \cos 2\theta + \left[\frac{(1-k)}{4} \gamma r + 12c'_3 r^{-5} - 6d'_3 r^{-3} \right] \sin 3\theta \quad (23)$$

$$\tau_{r\theta} = \left[\frac{(1-k)}{4} \gamma r + 2c'_1 r^{-3} - d'_1 r^{-1} \right] \cos\theta - \left[\frac{(1-k)}{2} \gamma H + 6a'_2 r^{-4} + 2b'_2 r^2 \right] \sin 2\theta - \left[\frac{(1-k)}{4} \gamma r - 12c'_3 r^{-5} - 6d'_3 r^{-3} \right] \cos 3\theta \quad (24)$$

$$u_r = \frac{1+\nu}{E} \left\{ -a_0 r^{-1} + [c'_1 r^{-2} + c_1(1-\nu) \ln r + (1-2\nu)d'_1 \ln r] \sin\theta + 2[a'_2 r^{-3} + 2(1-\nu)b'_2 r^{-1}] \cos 2\theta - [3c'_3 r^{-4} - (5-4\nu)d'_3 r^{-2}] \sin 3\theta \right\} \quad (25)$$

$$u_\theta = \frac{1+\nu}{E} \left\{ 4(1-\nu)c_0 r\theta - [(5-4\nu)d_1 r^2 + c'_1 r^{-2} - \nu c_1 - (1-\nu)c_1 \ln r + (1-2\nu)d'_1(1-\ln r)] \cos\theta + 2[a_2 r + (3-2\nu)b_2 r^3 + a'_2 r^{-3} - (1-\nu)b'_2 r^{-1}] \sin 2\theta - [3c_3 r^2 + (7-4\nu)d_3 r^4 + 3c'_3 r^{-4} - (1-4\nu)d'_3 r^{-2}] \cos 3\theta \right\} \quad (26)$$

将边界条件式(8)一式(12)代入式(22)一式(26)得到式(27)。

$$\begin{cases} a_0 = \frac{ER_0[-(u_0+2v_0) + (u_0-v_0)\cos\theta - 2u_0\sin\theta]}{4(1+\nu)} \\ a'_2 = -\frac{(1-k)}{4}\gamma HR_0^4; b'_2 = \frac{(1-k)}{4}\gamma HR_0^2 \\ c_1 = -\gamma R_0^2; c'_1 = \frac{1}{8}\left(k - \frac{\nu}{1-\nu}\right)\gamma R_0^4 \\ c'_3 = \frac{1-k}{12}\gamma R_0^6; d'_1 = \frac{(1-\nu)}{4}\gamma R_0^2 \\ d'_3 = \frac{(1-k)}{8}\gamma R_0^2 \end{cases} \quad (27)$$

将 $k=1$ 代入上式即可得到无荷载下半无限空间下埋隧道开挖引起的位移解为

$$u_r = \frac{[-(u_0+2v_0) + (u_0-v_0)\cos\theta - 2u_0\sin\theta]R_0}{4} + \frac{(1+\nu)\sin\theta}{E} \left[\frac{(1-2\nu)}{8(1-\nu)}\gamma R_0^4 r^{-2} - (1-\nu)\gamma R_0^2 \ln r + \frac{(1-\nu)(1-2\nu)}{4}\gamma R_0^2 r^{-2} \ln r \right] \quad (28)$$

$$u_\theta = -\frac{(1+\nu)}{E} \left[\frac{(1-2\nu)}{8(1-\nu)}\gamma R_0^4 r^{-2} + \gamma R_0^2 \nu + \gamma R_0^2(1-\nu) \ln r + \frac{(1-\nu)(1-2\nu)(1-\ln r)}{4}\gamma R_0^2 \right] \cos\theta \quad (29)$$

4 结构下穿隧道地表变形计算方法

由于在极坐标系下半无限空间无荷载下埋隧道位移解析式(28)(29)中带有 $\ln r$ 项,浅埋隧道的位移会随着半径的增加而增加,与边界条件 $u|_{r \rightarrow \infty} = 0$ 不符, Park^[22] 提出用 $-u_\theta$ 代替 u_θ , 根据坐标转换公式(30)(31)可将极坐标系转换为直角坐标系。

$$u_y = u_r \sin\theta - u_\theta \cos\theta \quad (30)$$

$$u_x = u_r \cos\theta - u_\theta \sin\theta \quad (31)$$

将局部直角坐标系下均布荷载引起的半无限空间位移解和局部极坐标系下隧道开挖引起的半无限空间位移解转换到如图 4 所示的整体直角坐标系中,进行位移场叠加,即得到隧道开挖中考虑结构荷载的地表沉降解,见公式(32)(33)。

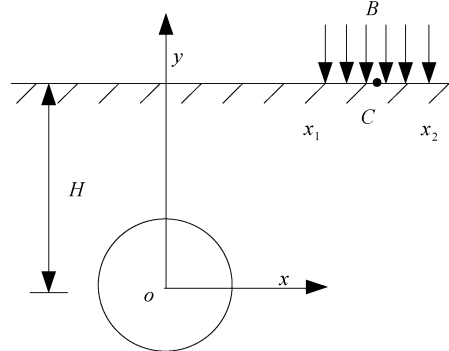


图 4 整体坐标系

Fig. 4 Global coordinate system

$$u_y = \frac{1+\nu}{\pi E} \left\{ -2(1-\nu) \int_{x_1}^{x_2} q(x) \ln \left[\frac{\sqrt{(b-H)^2 + (a-\varepsilon)^2}}{\sqrt{(2h+b-H)^2 + (a-\varepsilon)^2}} \right] dx - \int_{x_1}^{x_2} q(x) \left[\frac{(a-x)^2}{(b-H)^2 + (a-x)^2} - \frac{(a-x)^2}{(2h+b-H)^2 + (a-x)^2} \right] dx - \frac{[-(u_0+2v_0) + (u_0-v_0)\cos\theta - 2u_0\sin\theta]R_0\sin\theta}{4} - \frac{(1+\nu)}{E} \left[\frac{(1-2\nu)}{8(1-\nu)} \gamma R_0^4 r^{-2} - (1-\nu) \gamma R_0^2 \ln r + \frac{(1-\nu)(1-2\nu)}{4} \gamma R_0^2 r^{-2} \ln r \right] \sin^2\theta - \frac{(1+\nu)}{E} \left[\frac{(1-2\nu)}{8(1-\nu)} \gamma R_0^4 r^{-2} + \gamma R_0^2 \nu + \gamma R_0^2 (1-\nu) \ln r + \frac{(1-\nu)(1-2\nu)(1-\ln r)}{4} \gamma R_0^2 \right] \cos^2\theta \right\} \quad (32)$$

$$u_x = \frac{1+\nu}{\pi E} \left\{ (1-2\nu) \int_{x_1}^{x_2} q(x) \left[\arctan\left(\frac{a-x}{-b-H}\right) + \arctan\left(\frac{a-x}{2h+b-H}\right) \right] dx + \int_{x_1}^{x_2} q(x) \left[\frac{(-b-H)(a-x)}{(b-H)^2 + (a-\varepsilon)^2} + \frac{(a-x)(2h+b-H)}{(2h+b-H)^2 + (a-x)^2} \right] dx + \frac{(1+\nu)}{E} \left[\frac{(1-2\nu)}{8(1-\nu)} \gamma R_0^4 r^{-2} + \gamma R_0^2 \nu + \gamma R_0^2 (1-\nu) \ln r + \frac{(1-\nu)(1-2\nu)(1-\ln r)}{4} \gamma R_0^2 \right] \cos^2\theta \right\} \quad (33)$$

5 计算结果验证

5.1 测点位置与地层参数

某地铁施工区间下穿既有 X-7 建筑物,隧道与建筑物的位置关系如图 5 所示。隧道总长 883.036 m,拱顶埋深 15.52~25.07 m,隧道直径为 6.2 m。图 5

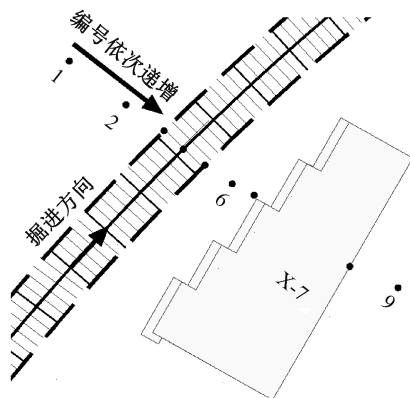


图 5 X-7 建筑物与隧道平面位置关系及测点布置图

Fig. 5 Relationship between buildings and tunnels X-7

Planar position relationship between buildings and tunnels and layout of measurement points

中的圆点代表地表沉降监测点,其编号按照箭头指示方向递增。当隧道掘进至侧穿 X-7 建筑物区段时,隧道中心线与建筑物最短距离为 9.5 m。

地铁施工区间近地表地层主要由全新统(Q4)人工填土及粉质黏土组成,盾构区间穿越地层主要为粉质黏土层和中风化泥岩。隧道掘进涉及的土层和建筑物的物理力学指标如表 1 所示。

5.2 理论计算与实测对比

为验证解析分析方法的合理性、可行性及计算结果的准确性,在侧穿 X-7 建筑物隧道两侧选取具有代表性的地表沉降监测点,将地表沉降的实测值和解析计算结果进行对比分析,选取如图 6 所示的隧道横断面,分析地表沉降变形随隧道中心线与建筑物距离的变化规律。

由图 6 可以看出,理论计算值与实测值曲线的整体趋势基本一致,均呈“V”形特征,符合经典 Peck 理论预测隧道开挖引起地表沉降的规律。隧道掘进引起地表最大沉降实测值为 5.6 mm,理论

表 1 地层及建筑物的物理力学指标

Tab. 1 Physical and mechanical indicators of strata and buildings

名称	天然重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	孔隙比	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)
杂填土	19.0	5	0.30	0.35	5.0	8.0
素填土	20.1	6	0.50	0.38	25.0	13.0
粉砂	19.4	10	0.70	0.29	6.0	30.0
粉质黏土	18.8	15	0.72	0.38	15.6	16.8
中风化泥岩	19.0	30	0.30	0.35	5.0	8.0
建筑物	20.0	34 500	—	0.20	—	—



图6 地表沉降的对比

Fig. 6 Comparison of surface subsidence

计算值为 5.38 mm,二者相对误差为 3.9%,在可接受范围内,验证了计算模型的准确性与适用性。另外,最大沉降位置位于隧道截面中心线正上方的地表处,沉降值随着距隧道中心线水平距离的增大而减小,当距隧道中心线水平距离约 7~8 倍隧道半径时,地表沉降趋于 0。

地表建筑物荷载的存在加剧了地层的沉降,最大沉降值位于建筑物下方。受建筑物荷载的影响,建筑物所在一侧的地表沉降衰减速率低于无建筑物一侧,由于建筑物荷载的附加作用,沉降曲线在建筑物影响区域呈现明显的平缓化变形。建筑物所在一侧的实测值与理论计算值的相对误差比其他区域明显增大。

6 结论

1) 本文建立了考虑地表建筑物荷载作用的半无限空间隧道掘进引发地表沉降的简化模型,结果表明模型计算结果与实测数据吻合良好。

2) 在地表建筑物荷载作用下,地表最大沉降出现在隧道中心线正上方的地表处,沉降值随距隧道中心线水平距离增大而减小。

3) 隧道侧穿建筑物时,建筑物荷载显著影响地表沉降,主要作用范围为建筑物边界至隧道中心线之间,沉降值随距建筑物水平距离增大而减小。

参考文献:

[1] 刘恒鑫. 城市轨道交通规划与城市发展的互动作用[J]. 人民交通, 2020(5): 87+89.
LIU H X. The interaction between urban rail transit planning and urban development[J]. People's Transporta-

tion, 2020(5): 87+89.

- [2] 贺美德, 刘军, 乐贵平, 等. 盾构隧道近距离侧穿高层建筑的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 603-608.
HE M D, LIU J, LE G P, et al. Study of impact of shield tunneling side-crossing on adjacent high buildings[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(3): 603-608.
- [3] O'REILLY M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom—their magnitude and prediction[C]//Proceedings of Tunnelling. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1982: 173-181.
- [4] MAIR R J, TAYLOR R N, BRACEGIRDLE A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays[J]. Geotechnique, 1993, 43(2): 315-320.
- [5] 邹浩, 陈金国. 软土地区盾构下穿施工对铁路路基影响分析——以杭州地铁2号线某区间现场监测为例[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(2): 199-206.
ZOU H, CHEN J G. Analysis of influence of shield tunneling in soft soil on upper railway subgrade: a case study of site monitoring of a section on Hangzhou Metro Line No. 2[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(2): 199-206.
- [6] 唐艳. 铁路隧道下穿高速公路工程风险评估管理方法研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 220-226.
TANG Y. Research on risk assessment and management methods for projects of railway tunnels passing under expressways[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 220-226.
- [7] 廖斯韬, 李南南, 郑卫强. 输水隧洞下穿并行高速公路施工安全风险评价[J]. 水力发电, 2024, 50(2): 58-64.
LIAO S T, LI N N, ZHENG W Q. Assessment on construction safety risk of water conveyance tunnels under-crossing and parallel to expressway[J]. Water Power, 2024, 50(2): 58-64.
- [8] SAGASETA C. Analysis of undrained soil deformation due to groundloss[J]. Géotechnique, 1987, 37(3): 301-320.
- [9] VERRUIJT A, BOOKER J R. Surface settlements due to deformation of a tunnel in an elastic half plane[J]. Géotechnique, 1998, 48(5): 709-713.
- [10] PECK R B. Deep excavations and tunnelling in soft ground[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico City: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 1969: 225-290.
- [11] 张运强, 曹文贵, 周苏华, 等. 基于Peck公式的盾构隧道施工引起的地层三维沉降预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(1): 153-161.

- ZHANG Y Q, CAO W G, ZHOU S H, et al. Prediction of three-dimensional subface and subsurface settlement caused by shield tunnelling based on Peck formula[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2021, 18 (1): 153-161.
- [12] FU J Y, YANG J S, ZHANG X M, et al. Response of the ground and adjacent buildings due to tunnelling in completely weathered granitic soil[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 43: 377-388.
- [13] 罗燕平, 刘得第, 王生, 等. 软岩浅埋连拱隧道施工围岩变形特征分析[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2023, 40 (2): 91-97.
- LUO Y P, LIU D D, WANG S, et al. Deformation characteristics of surrounding rock during construction of shallow multi arch tunnel with soft rock in seasonal frozen area[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2023, 40 (2): 91-97.
- [14] DING Z, ZHANG X, HE S H, et al. Experimental and theoretical study on longitudinal deformation and internal force of shield tunnel under surcharge[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2024, 144: 105506.
- [15] REN T, ZHANG H L, GUO Y C, et al. Numerical simulation of ground surface settlement of underpass building in tunnel boring machine double-line tunnels[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 937524.
- [16] 王万锋, 陈宇华, 赵凯, 等. 地铁隧道近接下穿城市沉降敏感区影响及优化分析[J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2024, 41 (1): 81-89.
- WANG W F, CHEN Y H, ZHAO K, et al. Influence and optimization analysis of subway tunnels close to and under the settlement sensitive area[J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2024, 41 (1): 81-89.
- [17] ISLAM M S, ISKANDER M. Three-dimensional numerical investigation of ground settlement caused by piggy-back twin tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 134: 104970.
- [18] WANG H N, CHEN X P, JIANG M J, et al. The analytical predictions on displacement and stress around shallow tunnels subjected to surcharge loadings [J]. *Tunneling Underground Space Technology*, 2018, 71: 403-427.
- [19] 张治国, 白乔木, 赵其华. 带衬砌浅埋隧道开挖受非对称收敛变形影响的地层位移和衬砌应力分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6): 1202-1213.
- ZHANG Z G, BAI Q M, ZHAO Q H. Elastic analysis of ground displacement and liner stress induced by shallow shield excavation considering non-uniform convergence deformation with liner[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 35(6): 1202-1213.
- [20] FLAMANT A. Sur la répartition des pressions dans un solide rectangulaire chargé transversalement[J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, 1892, 114: 1465-1468.
- [21] GOODIER J N, TIMOSHENKO S. *Theory of elasticity* [M]. New York: McGraw-Hill, 1970.
- [22] PARK K H. Elastic solution for tunneling-induced ground movements in clays[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2004, 4(4): 310-318.

(责任编辑 张爱丽)