

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.06.009

基于土层重力效应的近邻双孔隧道地层位移计算和扰动分区

杨海涛¹, 晏莉¹, 吴昊¹, 傅金阳², 唐锐¹, 钟涛¹

(1. 长沙理工大学土木工程学院, 湖南长沙 410114; 2. 中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075)

摘要: 为分析近邻双孔隧道施工的相互影响, 利用复变函数和 Schwarz 交替法求解基于土层重力效应且洞室发生收敛变形的地层位移解析函数, 通过设置位移约束点对地层位移进行修正, 最终获得了土层重力效应下近邻双孔隧道开挖的解析模型。采用该解析模型分析了迭代次数、位移约束及洞室水平变形对地层位移的影响规律。结果表明: 当迭代次数为 2 时, 计算结果已满足精度要求; 设置竖向位移约束边界使地表相对沉降曲线整体发生向下偏移, 左侧水平位移约束边界则使相对水平变形向左侧发生一定量的偏移; 随着洞室水平变形系数的增大, 地层相对竖向变形随之增大而相对水平变形却随之减小, 且对两者的影响程度不一致。基于地层位移判别准则, 获得了基于几何近接度和埋深比的双孔隧道的强、弱、无影响分区。

关键词: 近邻双孔隧道; 重力效应; 复变函数; 地层变形; 影响分区

中图分类号: U455 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)06-0067-10

Ground displacement calculation and disturbance zoning of adjacent twin-bore tunnel based on gravity effect of soil layers

YANG Haitao¹, YAN Li¹, WU Hao¹, FU Jinyang², TANG Rui¹, ZHONG Tao¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: To analyze the mutual influence of adjacent twin-bore tunnel's construction, complex function and Schwarz alternation method were used to solve the analytical function of ground displacement based on the gravity effect of soil layers and the convergent deformation of tunnel chamber, and the ground displacement was corrected by setting displacement constraints, so that an analytical model of adjacent twin-bore tunnel under the gravity effect of soil layers was finally obtained. Based on the model mentioned above, this study analyzed the influence of iteration number, displacement binding, and horizontal chamber deformation on the strata displacement, and the results shows that the calculation meets the accuracy requirements with iteration number of 2. It should be noted that by comparing the results corrected by displacement with those without the displacement correction, setting the boundary condition of vertical displacement makes the relative displacement curve of ground surface shifted downward as a whole, and the left horizontal displacement boundary condition can make horizontal deformation shift leftward at a certain amount. With the increase of chamber's horizontal deformation coefficient, the relative vertical deformation of strata will increase while the relative horizontal deformation will decrease, and the effects on them are different. Based on the criterion of ground displacement, the strong, weak and no influence zones of the twin-core tunnel with geometric proximity and buried depth ratio are obtained.

Key words: adjacent twin-bore tunnel; gravity effect; complex variable function; stratum deformation; impact zoning

目前,盾构隧道技术在我国的应用越来越广泛^[1],对于城市地铁而言,大多数会采用平行双线盾构隧道施工,然而受线路选择、既有构筑物及水文地质等条件的影响和制约,隧道的间距越来越小,双孔隧道开挖后

基金项目: 国家自然科学基金项目(51408067);湖南省教育厅优秀青年项目(18B136)
作者简介: 杨海涛(1995—),男,博士研究生,主要从事岩土隧道研究。E-mail:363999432@qq.com
通信作者: 晏莉(1979—),女,副教授,博士,主要从事岩土工程研究。E-mail:23266373@qq.com
引用本文: 杨海涛,晏莉,吴昊,等. 基于土层重力效应的近邻双孔隧道地层位移计算和扰动分区[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(6):67-76.
YANG Haitao, YAN Li, WU Hao, et al. Ground displacement calculation and disturbance zoning of adjacent twin-bore tunnel based on gravity effect of soil layers[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(6):67-76.

周围地层的应力重分布远比单孔隧道复杂,对周边既有建筑物、基础及地层变形的影响更为显著。因此,研究近邻双孔盾构隧道施工对实际工程具有十分重要的现实意义。

目前国内外学者研究盾构隧道施工对地层位移影响及扰动分区的方法主要有经验公式^[2-3]、数值仿真^[4-5]、模型试验^[6-8]和解析法等。解析法是基于数学原理和力学理论严格推导的精确解,尽管对所求问题进行了一定量的简化,然而其计算原理清晰、易于编程且计算效率高,故解析法在隧道开挖问题上得到了广泛的运用。常用的解析法有复变函数法、随机介质理论^[9-10]、应力函数法^[11-12]、Mindlin 解^[13-14]、镜像法^[15-16]等。相较于其他几种解析方法,复变函数可以将一个复杂半无限平面开孔转换成一个圆环区域,然后在圆环区域求解原问题的解,最后利用逆映射变化获得原问题的解,这正是其他解析方法解决隧道开挖问题所不具有的优势,故复变函数法被广泛运用于岩土工程开孔问题。Zhang 等^[17]运用复变函数理论和 Schwarz 交替法求解了任意布置方式下两任意形状隧道的解析解,得到多次迭代后的应力场和位移场;晏莉等^[18-19]利用复变函数结合 Schwarz 交替法获得了洞周受到均布径向荷载和均布径向位移边界作用下的浅埋双孔平行隧道的应力场和位移场;Kong 等^[20]将隧道体积收缩与非体积收缩叠加作为初始位移边界条件,利用 Schwarz 交替法求得了双孔平行隧道的位移分布;张治国等^[21]以单洞发生椭圆化变形为位移边界条件,利用复变函数和 Schwarz 交替法求解了双线隧道任意布置方式下的地层位移解析解。

综上所述,国内外学者利用复变函数求解浅埋双孔隧道的理论解已经取得了很多有用的成果。然而,大部分研究并未考虑隧道上覆土层重力的影响。实际上对于浅埋隧道而言,上覆土层自重是主要的外荷载,在计算过程中不宜被忽略,同时由于双孔隧道在施工过程中会相互影响,因此双洞与单洞在洞室收敛变形上有一定的差异,在理论计算分析时不能直接将单洞的收敛变形用于双洞。基于此,本文在前人的研究基础上,考虑了隧道上覆土层重力效应,同时基于单洞收敛变形,提出利用隧道水平变形反映近邻双孔隧道之间的相互影响,并借助计算机编程获得了上述问题的解析解;同时分析了不同因素下近邻双孔隧道地层变形的基本规律,结合地层判别准则对近邻双线隧道施工引起的地层扰动分区开展了进一步的研究,获得了基于隧道埋深与间距的地层影响分区。

1 近邻双孔隧道开挖的理论求解

1.1 问题描述

半无限平面近邻双孔隧道开挖问题如图 1 所示。隧道布置方式为平行布置,假设土层为均质线弹性体,隧道 1、2 埋深均为 h , r_1 为隧道开挖半径,两孔隧道之间的间距为 d ,隧道 1、2 的局部坐标系分别为 $x_1O_1y_1, x_2O_2y_2$,其坐标原点分别位于两隧道中心对称轴正上方与地表边界交汇处。

1.2 求解思路

对于浅埋近邻双孔隧道开挖问题,可以利用复变函数和 Schwarz 交替法联合求解。交替法的本质是将多连通域问题分解为一系列单连通域问题,然后对每一个单连通域问题进行力学分析,将每个单连通域的解进行叠加,最终求得多连通域问题。定义解析函数 φ_m^q 和 ψ_m^q 的上标 q 表示迭代次数,下标 m 表示隧道的编号; f_{mn}^g 表示第 g 次迭代 m 隧道对 n 隧道的附加面力,第一次迭代详细求解如下:

a. 假定平面 z 仅存在隧道 1,基于土层重力效应且洞室发生收敛变形,利用复变函数理论可以求解出隧道 1 开挖引起地层位移的解析函数 $\varphi_1^1(z_1)$ 和 $\psi_1^1(z_1)$ 。

b. 假定此时平面 z 仅存在隧道 2,同样利用复变函数理论可以获得隧道 2 在土层自重作用下且洞室发生收敛变形的解析函数 $\varphi_2^1(z_2)$ 和 $\psi_2^1(z_2)$ 。与隧道 1 不同的是,此时由于隧道 1 先期开挖会对隧道 2 产生额外的附加面力 $f_{12}^1(\sigma_2)$,为了满足隧道 2 零面力的要求,需要对隧道 2 施加反向的附加面力 $-f_{12}^1(\sigma_2)$, $-f_{12}^1(\sigma_2)$ 可以利用傅里叶级数显示逼近它,随后利用复变函数理论获得这部分附加反面力引起的解析函数 $\varphi_2'^1(z_2)$ 和 $\psi_2'^1(z_2)$ 。

c. 利用隧道 2 的解析函数 $\varphi_2^1(z_2)$ 、 $\psi_2^1(z_2)$ 、 $\varphi_2'^1(z_2)$ 和 $\psi_2'^1(z_2)$ 可以求解隧道 2 开挖对隧道 1 产生的附加面力 $f_{21}^1(\sigma_1)$ 。

此时第一次迭代已完成,隧道 2 周边已经满足附加面力为零的要求,将各个应力函数叠加即为第一次

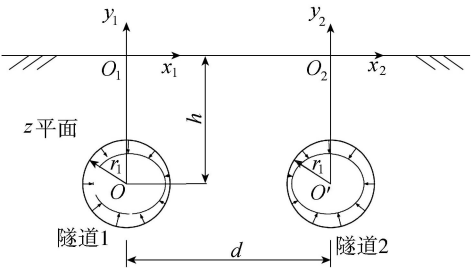


图 1 半无限平面内近邻双孔圆形隧道
Fig. 1 Twin-bore circular tunnel in a semi-infinite plane

Schwarz 交替法的迭代结果。为了获得高精度的近似解,需要反复迭代求解,最后将各次迭代以后得到的解析函数进行叠加,假设叠加后的复变函数分别为 $\varphi(\zeta)$ 和 $\psi(\zeta)$ (ζ 可以为 ζ_1, ζ_2):

$$\begin{cases} \varphi(\zeta) = \sum_{q=1}^M \varphi_1^q(\zeta_1) + \varphi_2^q(\zeta_2) \\ \psi(\zeta) = \sum_{q=1}^M \psi_1^q(\zeta_1) + \psi_2^q(\zeta_2) \end{cases} \tag{1}$$

式中 M 为最终迭代次数。根据 Muskhelishvili 平面问题复变函数解法,地层各点位移的计算公式为^[22]

$$u + iv = \frac{1}{2G} \left[\kappa \varphi(\zeta) - \frac{\omega(\zeta)}{\omega'(\zeta)} \overline{\varphi'(\zeta)} - \overline{\psi(\zeta)} \right] \tag{2}$$

式中: u, v 分别为地层水平位移和竖向位移; G 为剪切模量; κ 为与泊松比 μ 有关的一个常数,平面应变 $\kappa = 3 - 4\mu$; $\omega(\zeta)$ 为映射函数。

2 半无限平面单洞开挖的求解

2.1 基本假设

浅埋单孔盾构隧道开挖的基本假设:①隧道纵向长度远大于截面直径,符合平面应变问题;②在盾构隧道施工过程中,孔隙水压力消散缓慢,不考虑地下水渗流对盾构施工的影响;③地表和隧道洞室均为小变形,在迭代计算过程中,映射函数形式基本保持不变。

2.2 基本方程和映射函数

图 2(a) 为直角坐标系半无限平面隧道简图, A 为坐标原点, B 为无穷远处, R 区域为半无限平面中除隧道开挖断面以外的围岩区域, γ 为土体容重, E 为土体弹性模量。利用共形映射将 z 平面的 R 区域映射为 ζ 平面含圆环的 R' 区域,如图 2(b) 所示。映射函数表达式为^[23]

$$z = \omega(\zeta) = -ih \frac{1 - \alpha^2}{1 + \alpha^2} \frac{1 + \zeta_1}{1 - \zeta_1} \tag{3}$$

其中

$$\alpha = h - \sqrt{h^2 - r_1^2} / r_1$$

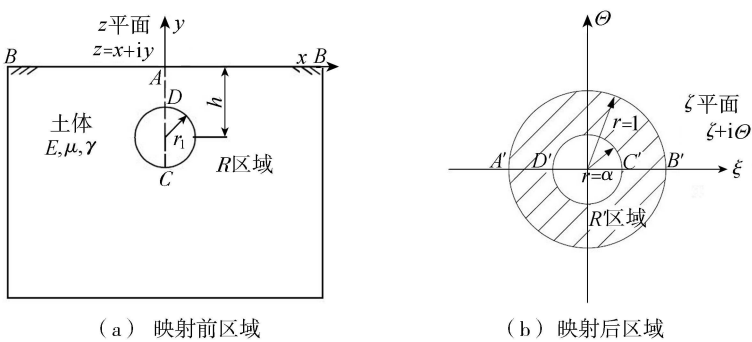


图 2 基本模型计算示意图

Fig.2 Calculation diagram of basic model

Strack 考虑了浅埋隧道开挖上覆土层重力效应,获得解析函数的一般表达式,利用映射函数可以将隧道开挖的复变函数解析表达式表示为^[24]

$$\varphi(\zeta) = \frac{-F_x - iF_y}{2\pi(1 + \kappa)} \left[\kappa \ln \left(-\frac{i2a}{1 - \zeta} \right) + \ln \left(-\frac{i2a\zeta}{1 - \zeta} \right) \right] + \varphi_0(\zeta) \tag{4}$$

$$\psi(\zeta) = \frac{F_x - iF_y}{2\pi(1 + \kappa)} \left[\ln \left(-\frac{i2a}{1 - \zeta} \right) + \kappa \ln \left(-\frac{i2a\zeta}{1 - \zeta} \right) \right] + \psi_0(\zeta) \tag{5}$$

其中

$$F_x = 0 \quad F_y = i\pi r^2 \quad a = ih(1 - \alpha^2) / (1 + \alpha^2)$$

$$\varphi_0(\zeta) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} a_k \zeta^k + \sum_{k=1}^{\infty} b_k \zeta^{-k} \quad \psi_0(\zeta) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \zeta^k + \sum_{k=1}^{\infty} d_k \zeta^{-k}$$

式中 $a_0, a_k, b_k, c_0, c_k, d_k$ 为待定系数,根据所求问题的边界条件确定。

2.3 边界条件确定洛朗级数系数

假设地表无应力, z 平面的地表边界通过映射到 ζ 平面, 此时 $|\zeta|=1$, 即地表边界条件可写为

$$\varphi(\zeta) + \omega(\zeta) \frac{\overline{\varphi'(\zeta)}}{\omega'(\zeta)} + \overline{\psi(\zeta)} = 0 \tag{6}$$

将式(3) ~ (5)代入式(6)可得:

$$\varphi_0(\sigma) + \frac{1}{2}(1 - \sigma^{-2}) \overline{\varphi_0'(\sigma)} + \overline{\psi_0(\sigma)} = f(\sigma) \tag{7}$$

其中

$$f(\sigma) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} B_k \sigma^k \quad B_k = \begin{cases} 0 & (k \leq -2) \\ \kappa \frac{F_x - iF_y}{4\pi(1 + \kappa)} & (k = -1) \\ \frac{F_x - iF_y}{4\pi} & (k = 0) \\ \frac{F_x - iF_y}{4\pi(1 + \kappa)} & (k = 1) \\ 0 & (k \geq 2) \end{cases}$$

联立 $\varphi_0(\zeta)$ 、 $\psi_0(\zeta)$ 、 B_k 的表达式可得:

$$c_0 = \bar{B}_0 - \bar{a}_0 - a_1/2 - b_1/2 \tag{8}$$

$$c_k = \bar{B}_{-k} - \bar{b}_k + (k - 1)a_{k-1}/2 - (k + 1)a_{k+1}/2 \quad (k = 1, 2, 3, \cdots) \tag{9}$$

$$d_k = \bar{B}_k - \bar{a}_k + (k - 1)b_{k-1}/2 - (k + 1)b_{k+1}/2 \quad (k = 1, 2, 3, \cdots) \tag{10}$$

通过共形映射后, z 平面上的洞室边界映射在 ζ 平面上, 此时 $|\zeta|=\alpha$, 洞周位移边界条件在 ζ 平面上为

$$\kappa\varphi(\zeta) - \omega(\zeta) \frac{\overline{\varphi'(\zeta)}}{\omega'(\zeta)} - \overline{\psi(\zeta)} = 2G(u_0 + iv_0) = f(\zeta) \tag{11}$$

将式(3) ~ (5)代入式(11)可得:

$$(1 - \alpha\sigma) \left[\kappa\varphi_0(\alpha\sigma) - \frac{\omega(\alpha\sigma)}{\omega'(\alpha\sigma)} \overline{\varphi_0'(\alpha\sigma)} - \overline{\psi_0(\alpha\sigma)} \right] = 2G(1 - \alpha\sigma)g(\alpha\sigma) + (1 - \alpha\sigma)h(\alpha\sigma) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} D_k \sigma^k \tag{12}$$

式中 $g(\alpha\sigma)$ 为隧道收敛变形, 它与初始位移边界条件有关。

令 $2G(1 - \alpha\sigma)g(\alpha\sigma) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} A_k \sigma^k$ 、 $(1 - \alpha\sigma)h(\alpha\sigma) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \sigma^k$, 其中重力不平衡项 C_k 的具体表达式见文献[25]。 A_k 的具体形式与隧道收敛变形密切相关, 研究表明, 近邻双线隧道其断面收敛变形与单洞收敛变形具有较大区别, 其不仅发生径向收缩、椭圆化变形、整体下沉, 同时还受邻近隧道的影响, 水平方向也会发生变形^[26], 以右侧隧道为例, 4 种变形通过叠加得到最终洞室变形形态如图 3 所示。右侧隧道的初始位移边界条件为

$$u_R(\theta) = -u_\varepsilon + u_\delta \cos(2\theta) - u_v \sin \theta + u_T \cos \theta \tag{13}$$

式中: u_ε 、 u_δ 、 u_v 、 u_T 与 u_0 有关; u_0 为盾构与衬砌的半径差, 可以通过地层损失率 $V_L(u_0 = 8r_1(1 - \sqrt{1 - V_L})/7)$ 计

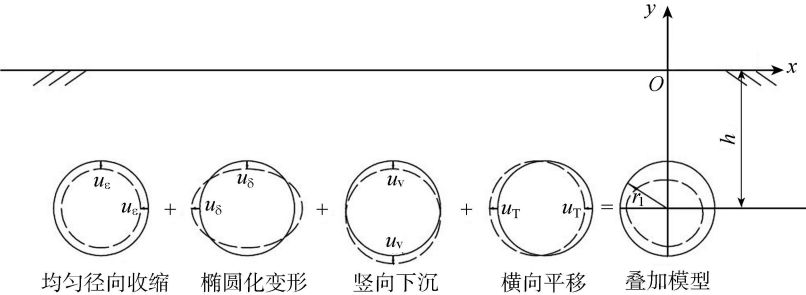


图3 近邻隧道右线的变形模式

Fig.3 Deformation mode of right line of adjacent tunnels

算, V_L 与隧道施工方法、水文地质条件等有关。

关于隧道边界径向收缩^[23]、椭圆化变形^[27]以及竖向下沉^[28]的 A_k 解析函数均已给出,本文通过数学推导获得了隧道水平变形的解析函数 A_k :

$$A_k = Gu_i \begin{cases} -(1 - \alpha^2) & k = 0 \\ -\alpha(1 - \alpha^2) & k = 1 \\ -(\alpha^2 - 1)\alpha^{k-2} - (1 - \alpha^2)\alpha^k & k \geq 2 \end{cases} \quad (14)$$

最后将各种变形对应的解析函数叠加,令 $u_e/u_c = \tau, u_\delta/u_c = \chi, u_v/u_c = \rho, u_T/u_c = \eta$,则可得:

$$A_k = Gu_0 \begin{cases} i\alpha^{-k-1}(1 - \alpha^2)^2\chi & k \leq -1 \\ i[-2\alpha\tau - 2\alpha\chi - (\alpha^2 + 1)\rho] + \eta[-(1 - \alpha^2)] & k = 0 \\ 2i\tau + 2i\alpha^2(2 - \alpha^2)\chi + (3\alpha - \alpha^3)i\rho + \eta[-\alpha(1 - \alpha^2)] & k = 1 \\ i\alpha^{k-3}(1 - \alpha^2)^2[-3 + (k + 1)(1 - \alpha^2)]\chi - i(\alpha^2 - 1)^2\alpha^{k-2}\rho - \\ \eta[(\alpha^2 - 1)\alpha^{k-2} + (1 - \alpha^2)\alpha^k] & k \geq 2 \end{cases} \quad (15)$$

将 $\varphi_0(\zeta), \psi_0(\zeta), C_k$ 、式(3)、式(8)~(10)、式(15)代入式(12)可得:

$$\alpha^{2k}(1 - \alpha^2)(k + 1)\bar{a}_{k+1} - \alpha^{2k+2}(\kappa\alpha^{-2k-2} + 1)b_{k+1} = (1 - \alpha^2)\alpha^{2k}k\bar{a}_k - \alpha^{2k}(\kappa\alpha^{-2k} + 1)b_k + \\ D_{-k}\alpha^k + \alpha^{2k}B_{-k} - \alpha^{2k+2}B_{-(k+1)} \quad (k \geq 1) \quad (16)$$

$$(\kappa\alpha^{2k+2} + 1)\bar{a}_{k+1} + (1 - \alpha^2)(k + 1)b_{k+1} = \alpha^2(\kappa\alpha^{2k} + 1)\bar{a}_k + (1 - \alpha^2)kb_k + \\ \bar{D}_{k+1}\alpha^{k+1} + \bar{B}_{k+1} - \alpha^2\bar{B}_k \quad (k \geq 1) \quad (17)$$

$$(1 - \alpha^2)\bar{a}_1 - \alpha^2(\kappa\alpha^{-2} + 1)b_1 = D_0 + B_0 - \alpha^2B_{-1} - (\kappa + 1)a_0 \quad (18)$$

$$(\kappa\alpha^2 + 1)\bar{a}_1 + (1 - \alpha^2)b_1 = \bar{D}_1\alpha + \alpha^2(\kappa + 1)\bar{a}_0 - \alpha^2\bar{B}_0 + \bar{B}_1 \quad (19)$$

2.4 位移场修正

研究^[29]表明,在半无限平面中开挖隧道引起周边围岩的位移和应力变化仅为洞周的部分区域,当超过其影响区域后,隧道开挖引起的围岩位移几乎为零。因此,本文参照数值模拟方法,在隧道开挖周边一定的区域内设置位移约束边界。

考虑到竖向位移和水平位移的差异,需要分别采用不同的位移边界条件进行约束,如图 4 所示。在计算半无限平面任意一点位移 (x, y) 的竖向位移时,需要减去对应的位移约束点 $(x, -h - tr_1)$ 的竖向位移,其中 t 的取值一般为 6~10,最后得到该点的竖向位移相对值^[30]。对于水平位移而言,当计算点 (x, y) 位于两孔隧道中轴线左侧时,计算点 (x, y) 的水平位移减去左侧位移约束边界上对应点的水平位移 $(-tr_1 - d/2, y)$,最后得到该点的水平位移相对值;当计算点 (x, y) 位于隧道中轴线右侧时,计算点 (x, y) 的水平位移减去右侧位移约束边界上对应点的水平位移 $(tr_1 + d/2, y)$,最后得到该点的水平位移相对值。

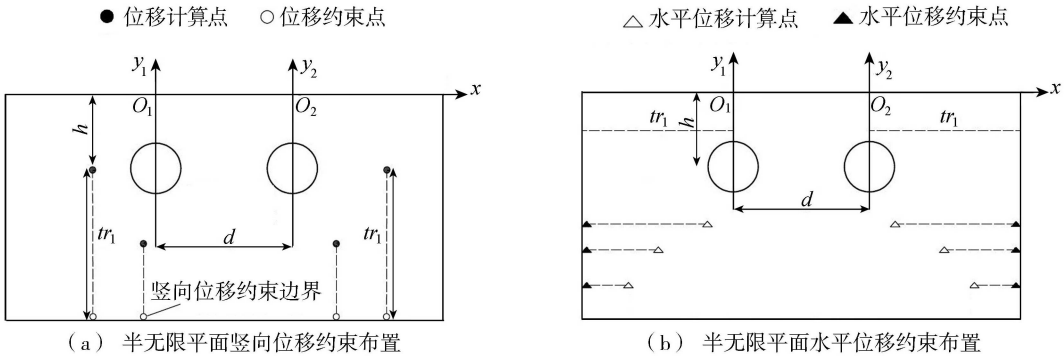


图 4 地层位移约束边界

Fig. 4 Displacement constraint boundary of strata

2.5 程序编制

由于 $\alpha < 1$, 因此不难得出,随着 k 的增大,当 $k > N_1$ (N_1 为某一较大正整数)时, $A_k, A_{-k}, C_k, C_{-k}, B_k, B_{-k}$ 会趋于 0; 利用 Matlab 编制计算程序:

- a. 取任意虚数为 a_0 的初始值,代入式(16)~(17)可得 a_k 、 b_k 。
- b. 当 k 大于某一整数时,根据等式两边的收敛性不难看出,可推出 $a_{k+1} = -\bar{b}_k$ 趋于一个定值 C ,为了确保 $\varphi(z)$ 、 $\psi(z)$ 的收敛性,即当 k 大于某一正整数时, $\lim a_{k+1} = \lim -\bar{b}_k = 0$ 。因此,将 $a_0 + C$ 作为新的 a_0 继续计算,判断 $-a_{k+1}$ 、 $\bar{b}_k$ 是否趋于零;当 C 趋于一个非常接近零的常数,迭代结束。
- c. 将上述计算的 a_0 、 a_k 、 b_k 代入式(8)~(10)可求得 c_0 、 c_k 、 d_k ,即洛朗级数各项系数均已确定。

3 近邻双孔隧道地层位移影响因素分析

以 Ghaboussi 等^[31]利用有限元获得双孔圆形隧道断面收敛变形为例,并结合晏莉^[26]提出的平行两洞收敛变形为位移控制边界条件,将近邻双孔隧道收敛变形的函数表达式写为

$$u_R(\theta) = -\frac{12}{8}u_0 + \frac{3}{8}u_0\cos(2\theta) - \frac{u_0}{2}\sin\theta - \frac{u_0}{4}\cos\theta$$

(20)

$$u_L(\theta) = -\frac{12}{8}u_0 + \frac{3}{8}u_0\cos(2\theta) - \frac{u_0}{2}\sin\theta + \frac{u_0}{4}\cos\theta$$

(21)

3.1 迭代次数对地层位移的影响

式(20)(21)作为洞室的位移控制边界条件,土体的 $E=50\text{ MPa}$, $\gamma=20\text{ kN/m}^3$, $\mu=0.25$, $V_L=0.96\%$ 。双孔隧道的直径 D 均为 6 m , $h=12\text{ m}$, $d=9\text{ m}$,选取图1隧道1左侧 $x=1\text{ m}$ 的地层横向水平位移,如图5所示。

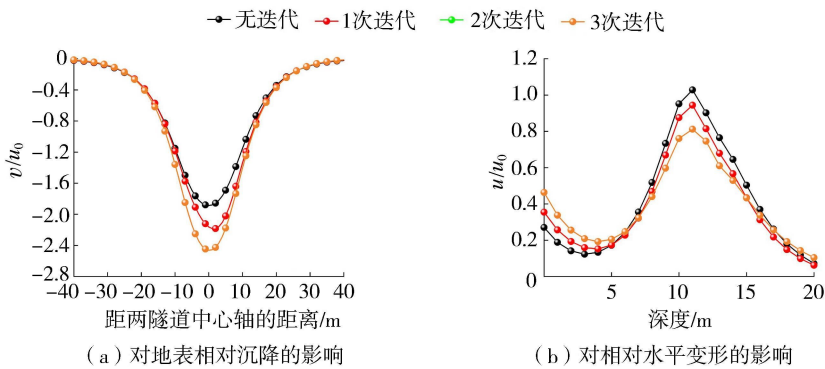


图5 迭代次数对地层位移的影响

Fig.5 Influence of iteration times on stratum displacement

由图5(a)可知,随着迭代次数的增加,相对地表沉降也随之增大,当不考虑迭代时,相对地表沉降最大值仅为1.88,当迭代次数为2时,此时相对地表沉降最大值为2.46,二者相差0.58,由此表明迭代次数对地层沉降变形具有重要影响,且第二次迭代与第三次迭代的地表相对沉降保持一致,说明交替法的迭代次数为2时计算结果精度已经满足要求。第一次迭代后,地表相对沉降最大值不仅在数值上发生较大的变化,其相对位置也向右发生一定偏移,主要原因:由于第一次迭代过程中,隧道2不仅有自身引起的地表位移,同时还包含了隧道1开挖对于隧道2的附加面力,因此在第一次迭代结束后,隧道2引起的相对地表位移较大,故相对地表沉降曲线发生向右的偏移。由图5(b)可知,随着迭代次数的增加,相对地层水平位移逐渐减小,当迭代次数超过2时,相对地层位移曲线形态保持一致,即在隧道上方土体变形表现为先减少后增加,并随后在隧道中心深度 h 附近处达到最大值,随后水平位移迅速减少。不考虑迭代的相对水平变形最大值为1.03,迭代次数为2时,相对水平变形为0.81,两者相差0.22,相比地表沉降而言,迭代对相对水平位移的影响相对较小。综上可知,当迭代次数为2时,已达到工程精度要求。

3.2 位移修正对地层位移的影响

为了探究设置竖向、水平位移约束点对地层位移的影响,分析不考虑位移场修正和考虑位移场修正对相对地表沉降和相对水平位移的影响,如图6所示。

由图6(a)可知,无论是否考虑竖向位移修正,地表相对竖向位移曲线均呈现“V”形曲线,考虑不同竖向位移约束距离的地表沉降曲线基本保持一致,说明竖向位移约束设置在 $-h-6r_1$ 至 $-h-8r_1$ 对地层位移的改变量相对较小,因此可认为当竖向距离超过 $-h-6r_1$ 后,隧道开挖对地层变形影响可以忽略不计。当竖向位移

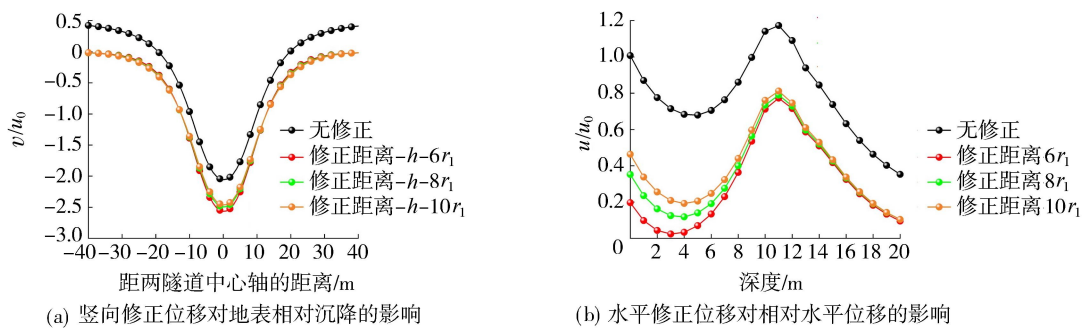


图 6 位移约束对地层位移的影响

Fig. 6 Influence of displacement constraint on stratum displacement

约束距离为 $-h-6r_1$ 时,地表相对最大沉降值为 2.56,当未考虑位移约束时,地表相对最大沉降为 2.05,在距隧道中心距离 $x=\pm 40\text{ m}$ 时,考虑位移约束的地表相对沉降值为 -0.01 ,而未考虑位移约束的相对地表沉降值为 0.42,两者的差值分别为 0.51 和 0.43,不难得出,通过设置竖向位移约束点,地表沉降相对曲线整体向下发生一定量的偏移,由此说明设置相对位移约束对地层沉降有较大的影响。由图 6(b)可知,地层水平位移约束对水平变形最大影响位于地表附近,当不考虑地层水平位移约束时,地表水平位移最大值为 1,当考虑位移水平约束时,地层相对水平位移最大值分别为 0.20、0.35、0.46,最大差值为 0.80,可以看出,考虑左侧水平位移约束后,此时相对水平位移曲线向左侧发生一定的偏移,且随着深度方向的增大,影响就相对越小。同理,由对称性可知,右侧水平位移与左侧类似。综上可知,地层位移修正对地层竖向、水平变形均有较大的影响。

3.3 水平变形对地层位移的影响

为了探究洞室水平收敛变形对地层位移的影响,其他影响因素保持不变,分析不同水平变形系数 η 对地层变形的影响,如图 7 所示。

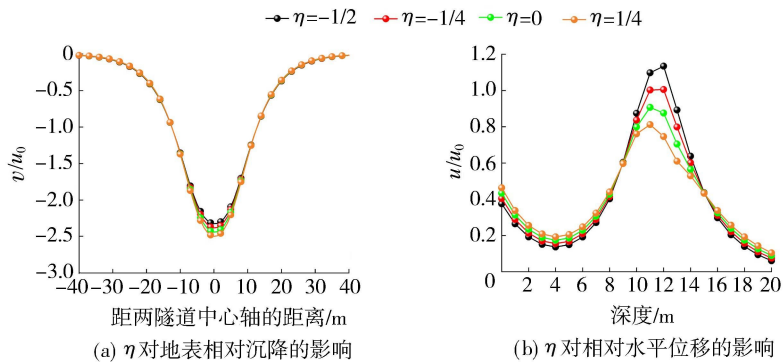


图 7 洞室水平收敛变形对地层位移的影响

Fig. 7 Effect of horizontal convergence deformation of cavern on ground displacement

由图 7(a)可知,随着 η 的增大,地表沉降槽影响宽度基本保持不变,相对地表沉降曲线呈现“V”形分布,而地表相对最大沉降则缓慢增大,其值分别为 2.32、2.38、2.44、2.5,由此可见,水平变形系数对地表相对最大沉降是呈线性变化的。由图 7(b)可知,随着 η 的增大,相对水平位移最大值逐渐减少,其值分别为 1.13、1.00、0.9、0.81,说明水平变形系数对地层竖向沉降与水平变形完全相反,洞室水平变形对地层水平位移的影响明显高于地层沉降。综上可知,与其他 2 种影响因素相比,洞室水平变形对地层位移的影响相对较小。

4 地层扰动影响分区

目前,关于近接隧道施工的影响分区可以分为 3 个标准,即强、弱和无影响区。对于强弱影响区域的划分,可以根据仇文革^[32]所提出的判别准则,从地层和结构 2 个方面考虑,一般可以分为 5 个基本准则,即强度、塑性区、位移、应力、刚度准则。通过第 3 节分析可获得近邻双孔隧道地表位移,故本文拟以位移判别准则分析近接影响度分区。近接影响判定基本公式为 $C_{ij} = K_{ij}\alpha_{0ij}\alpha_{1ij}\alpha_{2ij}\alpha_{3ij}\alpha_{4ij}\alpha_{5ij}$,其中 i 为近接施工类型, j 为

判定准则, K_{ij} 为影响综合系数, $\alpha_{0ij} \sim \alpha_{5ij}$ 为修正系数。

4.1 相关影响修正系数的确定

a. K_{ij} 以 $S/D=1, H=1.5D$ 为基准工况, 此时的地表沉降为 25.4 mm, 即 $K_{ij}=25.4$ 。其中 S 为两孔隧道的净距, H 为拱顶到地表的中心距离。

b. α_{0ij} 为几何近接度的修正系数, 以 $S/D=1$ 为基准, 根据地表沉降与几何近接度的统计关系可得修正回归公式:

$$v = 45.16e^{-2.152(S/D)} + 18.83 \quad (R^2 = 0.9824) \quad (22)$$

根据式(22), 可得地表沉降最大值 U 与 S/D 的关系式为

$$U = 45.16e^{-2.152(S/D)} + 18.83 \quad (S/D \geq 0) \quad (23)$$

将式(23)与基准工况的地表沉降 K_{ij} 比值, 即为影响修正系数, 即修正系数 a_{0ij} 的表达式:

$$a_{0ij} = 1.778e^{-2.152(S/D)} + 0.741 \quad (S/D \geq 0) \quad (24)$$

当 $S/D=1$ 时, 应有 $a_{0ij}=1$, 对 a_{0ij} 的表达式进行修正, 最终可得:

$$a_{0ij} = 1.867e^{-2.152(S/D)} + 0.778 \quad (S/D \geq 0) \quad (25)$$

c. α_{1ij} 为位置的修正系数, 本文以平行隧道为基准, 则 $\alpha_{1ij}=1$ 。

d. 本文以土压平衡盾构法施工, 故施工方法的修正系数 α_{2ij} 可取为 1。

e. 本文以研究的地层为基准, 故地质条件的影响修正系数 α_{3ij} 取为 1。

f. α_{4ij} 为埋深影响的修正系数, 以 $H=1.5D$ 为基准, 当 $S/D=1$ 时, 可得到地表沉降与埋深的回归公式:

$$v = 27.56 (H/D)^{-0.2355} \quad (R^2 = 0.9958) \quad (26)$$

根据式(26), 可得 U 与 H/D 的关系:

$$U = 27.56 (H/D)^{-0.2355} \quad (H/D \geq 1.5) \quad (27)$$

式(27)与基准工况地表沉降 25.4 mm 的比值, 即为影响修正系数 a_{4ij} , 其表达式为

$$a_{4ij} = 1.085 (H/D)^{-0.2355} \quad (H/D \geq 1.5) \quad (28)$$

当 $H/D=1.5$ 时, 应有 $\alpha_{4ij}=1$, 故对曲线拟合回归公式进行修正:

$$a_{4ij} = 1.105 (H/D)^{-0.2355} \quad (H/D \geq 1.5) \quad (29)$$

g. 本文为同时新建的双孔隧道工程, 劣化度可以定为 1, 即 $\alpha_{5ij}=1$ 。

最终可得几何近接度和埋深比的最大地表沉降 U 表达式:

$$U = 28.07 [1.867e^{-2.152(S/D)} + 0.778] (H/D)^{-0.2355} \quad (30)$$

4.2 影响区域划分

基于地表沉降判别准则的影响分区标准可知, 地表沉降与影响度呈单调递增关系, 构造影响度与地表沉降的函数关系:

$$I_{ij} = [\ln(U + 10) - \ln 10] / \ln 2 \quad (31)$$

式中 I_{ij} 为近接影响度。

影响分区可以分为几何近接度和埋深比的几个集合的形式:

$$\begin{cases} \{(S/D, H/D) \mid K_{ij}\alpha_{0ij}\alpha_{4ij} \geq 2\} & M_1(\text{强影响区}) \\ \{(S/D, H/D) \mid 1 \leq K_{ij}\alpha_{0ij}\alpha_{4ij} < 2\} & M_2(\text{弱影响区}) \\ \{(S/D, H/D) \mid K_{ij}\alpha_{0ij}\alpha_{4ij} < 1\} & M_3(\text{无影响区}) \end{cases} \quad (32)$$

分区界线:

$$[\ln(U + 10) - \ln 10] / \ln 2 = I_{ijL} \quad (I_{ijL} = 1, 2) \quad (33)$$

将式(30)代入式(33)可得:

$$I_{ijL} = 1.443 \ln [2.807 (1.867e^{-2.152(S/D)} + 0.778) (H/D)^{-0.2355} + 1] \quad (34)$$

$$H/D = \left[\frac{5.241e^{-2.152(S/D)} + 2.184}{e^{0.693I_{ijL}} - 1} \right]^{4.246} \quad (35)$$

综上可得关于影响度为 1 和 2 关于 S/D 和 H/D 的 2 个控制方程, 以 S/D 为 x 轴, H/D 为 y 轴, 则可获得

基于埋深与间距的影响分区,如图 8 所示。

由图 8 可知,不同埋深、间距决定了近邻双孔隧道的分区界限,当两孔隧道间径比 $S/D<1$ 时,随着埋深比的减少,地层扰动区域影响级别从弱影响区逐渐演化至强影响区,当埋深比 $H/D<4$ 时,随着间径比的减少,影响级别从弱影响区转换至强影响区域,无影响区域与弱影响区域的埋深比是以 $H/D=4$ 为界限,而弱影响区域与强影响区域的埋深比则以 $H/D=1$ 为分区界限。

5 结 论

- a. 迭代次数对地层位移的影响并不相同,随着迭代次数的增加,地层相对地表沉降随之增加,而相对水平变形却随之减少。当迭代次数超过 2 时,迭代对地层位移的影响可以忽略不计。
- b. 当不设置竖向位移约束时,地层相对竖向变形最大值为 2.05,而设置竖向约束后的地层竖向变形最大值为 2.56,两者相差 0.51,水平位移约束对地层水平变形的影响主要集中在地表附近,两者最大差值为 0.8。
- c. 洞室水平变形 η 对地层相对竖向变形、水平变形的影响完全相反,且对水平变形的影响程度明显高于竖向变形,与其他 2 种因素而言,水平变形对地层变形的影响最小。
- d. 通过地层位移判别准则,以几何近接度和埋深比对隧道近接影响分区进行划分,最后结果表明:强、弱影响区域的埋深比 H/D 分界界限为 1,弱、无影响区域的埋深比 H/D 分界界限为 4。

参考文献:

[1] 朱伟,钱勇进,王璐,等. 长距离盾构隧道掘进的主要问题及发展趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):138-149. (ZHU Wei,QIAN Yongjin,WANG Lu,et al. Main problems and development trend of long-distance shield tunneling[J]. Journal of Hohai University (Natural Science),2023,51(1):138-149. (in Chinese))

[2] 白海卫,宋守信,王剑晨. Peck 公式在双线盾构隧道施工地层变形中的适应性分析[J]. 北京交通大学学报,2015,39(3):30-34. (BAI Haiwei,SONG Shouxin,WANG Jianchen. An adaptability study of Peck formula applied to predicting ground settlements induced by double shield tunneling[J]. Journal of Beijing Jiaotong University,2015,39(3):30-34. (in Chinese))

[3] 宫亚峰,王博,魏海斌,等. 基于 Peck 公式的双线盾构隧道地表沉降规律[J]. 吉林大学学报(工学版),2018,48(5):1411-1417. (GONG Yafeng,WANG Bo,WEI Haibin,et al. Surface subsidence law of double-line shield tunnel based on Peck formula [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology),2018,48(5):1411-1417. (in Chinese))

[4] 王明年,张晓军,苟明中,等. 盾构隧道掘进全过程三维模拟方法及重叠段近接分区研究[J]. 岩土力学,2012,33(1):273-279. (WANG Mingnian,ZHANG Xiaojun,GOU Mingzhong,et al. Method of three-dimensional simulation of shield tunnel boring process and study of adjacent partitioning of overlapped segment[J]. Rock and Soil Mechanics,2012,33(1):273-279. (in Chinese))

[5] 叶治,付岸然,刘华北. 盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(3):279-287. (YE Zhi,FU Anran,LIU Huabei. Effect of seepage erosion of tunnel crown on ground settlement and structural deformation in shield tunnelling[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(3):279-287. (in Chinese))

[6] 郑余朝. 三孔并行盾构隧道近接施工的影响度研究[D]. 成都:西南交通大学,2007.

[7] 凌昊,仇文革,孙兵,等. 双孔盾构隧道近接施工离心模型试验研究[J]. 岩土力学,2010,31(9):2849-2853. (LING Hao,QIU Wenge,SUN Bing,et al. Study of adjacent construction of two tube shield tunnels by centrifugal model test[J]. Rock and Soil Mechanics,2010,31(9):2849-2853. (in Chinese))

[8] MA S,SHAO Y,LIU Y,et al. Responses of pipeline to side-by-side twin tunnelling at different depths: 3D centrifuge tests and numerical modelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2017,66:157-173.

[9] 施成华,彭立敏,刘宝琛. 盾构法施工隧道纵向地层移动与变形预计[J]. 岩土工程学报,2003,25(5):585-589. (SHI Chenghua,PENG Limin,LIU Baochen. Prediction of longitudinal movement and deformation of stratum in longitudinal section due to tunnel construction by shield[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2003,25(5):585-589. (in Chinese))

[10] 蔡海兵,彭立敏,郑腾龙. 隧道水平冻结壁强制解冻期地表沉降的预测方法[J]. 岩土力学,2015,36(12):3516-3522. (CAI

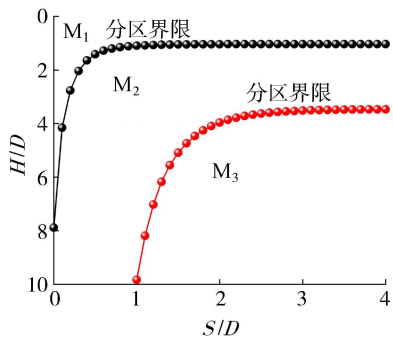


图 8 基于 S/D 和 H/D 的影响分区界限曲线

Fig. 8 Boundary curve of impact zoning based on S/D and H/D

- Haibing, PENG Limin, ZHENG Tenglong. A method for predicting ground surface settlement in the artificial thawing period of tunnel horizontally frozen wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(12): 3516-3522. (in Chinese))
- [11] BOBET A. Analytical solutions for shallow tunnels in saturated ground[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2001, 127(12): 1258-1266.
- [12] CHOU W I, BOBET A. Prediction of ground deformations in shallow tunnels in clays[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, 17(1): 3-19.
- [13] 唐晓武, 朱季, 刘维, 等. 盾构施工过程中的土体变形研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 417-422. (TANG Xiaowu, ZHU Ji, LIU Wei, et al. Research on soil deformation during shield construction process[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 417-422. (in Chinese))
- [14] 梁荣柱, 夏唐代, 林存刚, 等. 盾构推进引起地表变形及深层土体水平位移分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(3): 583-593. (LIANG Rongzhu, XIA Tangdai, LIN Cungang, et al. Analysis of ground surface displacement and horizontal movement of deep soils induced by shield advancing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(3): 583-593. (in Chinese))
- [15] LOGANATHAN N, POULOS H G. Analytical prediction for tunneling-induced ground movements in clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, 124(9): 846-856.
- [16] 叶飞, 苟长飞, 陈治, 等. 盾构隧道同步注浆引起的地表变形分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(4): 618-624. (YE Fei, GOU Changfei, CHEN Zhi, et al. Ground surface deformation caused by synchronous grouting of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(4): 618-624. (in Chinese))
- [17] ZHANG L, YANG Z, LYU A. Analytics study on the problem of two holes having arbitrary shapes and arrangements in plane elastostatics[J]. Science in China(Series D: Earth Sciences), 2001, 2: 146-158.
- [18] 晏莉, 阳军生, 刘宝琛. 浅埋双孔平行隧道开挖围岩应力和位移分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 413-419. (YAN Li, YANG Junsheng, LIU Baochen. Stress and displacement of the surrounding rock in shallow twin-parallel tunnel[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(3): 413-419. (in Chinese))
- [19] FU J, YANG J, YAN L, et al. An analytical solution for deforming twin-parallel tunnels in an elastic half plane[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2014, 39(5): 524-538.
- [20] KONG F, LU D, DU X, et al. Elastic analytical solution of shallow tunnel owing to twin tunnelling based on a unified displacement function[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 68: 422-442.
- [21] 张治国, 张成平, 奚晓广. 双线隧道不同布置方式下相互作用影响的地层位移解析[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(2): 262-271. (ZHANG Zhiguo, ZHANG Chengping, XI Xiaoguang. Closed solutions to soil displacements induced by twin-tunnel excavation under different layout patterns[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(2): 262-271. (in Chinese))
- [22] MUSKHELISHVILI N I. Mathematical theory of elasticity[M]. Leyden: International Publishing, 1954.
- [23] VERRUIJT A. Deformations of an elastic half plane with a circular cavity - ScienceDirect[J]. International Journal of Solids and Structures, 1998, 35(21): 2795-2804.
- [24] STRACK O E, VERRUIJT A. Complex variable solution for a deforming buoyant tunnel in a heavy elastic half-plane[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26: 1235-1252.
- [25] YANG G, ZHANG C, MIN B. Complex variable solution for tunneling-induced ground deformation considering the gravity effect and a cavern in the strata[J]. Computers and Geotechnics, 2021, 135: 104154.
- [26] 晏莉. 并行隧道施工相互影响分析及应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [27] STRACK O E. Analytic Solutions of elastic tunneling problems[M]. Den Haag: DUP Science, 2002.
- [28] 黄迅轩. 浅埋隧道开挖的三维地层损失模型与复变函数计算方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [29] 雷国辉, 孙华圣, 吴宏伟. 半无限平面问题的相对位移[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1224-1230. (LEI Guohui, SUN Huasheng, WU Hongwei. A study of relative displacements in semi-infinite plane[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1224-1230. (in Chinese))
- [30] 晏莉, 杨海涛. 盾构隧道施工引起地层位移的复变函数修正解[J]. 水资源与水工程学报, 2022, 33(4): 192-201. (YAN Li, YANG Haitao. Corrected solution of complex function for ground displacement caused by shield tunnel construction[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022, 33(4): 192-201. (in Chinese))
- [31] GHABOUSI J, RANKEN R E. Interaction between two parallel tunnels[J]. International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics, 2010, 1(1): 75-103.
- [32] 仇文革. 地下工程近接施工力学原理与对策的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.