

文章编号: 1006-2467(2021)06-0698-09

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2020.026

上方长距离基坑开挖引起的共线隧道变形研究

陈 拴¹, 吴怀娜¹, 陈仁朋¹, 沈水龙², 刘 源¹

(1. 湖南大学 土木工程学院, 长沙 410082; 2. 汕头大学 工学院, 广东 汕头 515063)

摘 要: 上方基坑开挖由于应力释放及坑底回弹, 不可避免导致既有隧道产生上浮变形, 长距离共线时其影响更为显著. 在考虑环间剪切错台变形的铁木辛柯简化模型基础上, 结合 Winkler 地基模型, 提出了一种上方基坑开挖下土-隧道相互作用解析模型. 利用叠加原理将该模型应用于上方长距离基坑开挖引起的共线隧道变形实例分析. 通过计算结果与实测数据对比验证了该模型的准确性. 分析结果表明, 上方主体结构施工后, 隧道上浮变形明显回落, 但局部差异沉降增加, 导致隧道内力和环缝变形显著增加. 隧道渗漏水位置并非位于隧道上浮变形最大处, 而是位于接头张开量最大处与接头错台变形最大处之间. 因此, 实际工程中不应仅关注隧道总变形, 同时应关注差异沉降引起的接缝张开及错台变形. 虽然隧道变形中剪切变形占比约为 21.41%, 但其引起的接缝错台变形较为显著, 其对接缝防水有重要影响, 理论分析中不容忽视.

关键词: 基坑; 隧道; 解析模型; 上浮变形; 剪切错台

中图分类号: TU 753; U 456.3

文献标志码: A

Deformation of a Collinear Tunnel Induced by Overlying Long-Distance Excavation

CHEN Shuan¹, WU Huaina¹, CHEN Renpeng¹, SHEN Shuilong², LIU Yuan¹

(1. Department of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Engineering, Shantou University, Shantou 515063, Guangdong, China)

Abstract: Overlying excavation will inevitably cause uplift of the existing tunnel due to the stress relief and rebound of soil, and the impact will be more significant when the long-distance is in line. Based on the Timoshenko simplified model of tunnel which considers the shearing dislocation between rings, and combining with the Winkler foundation model, an analytical model for soil-tunnel interaction analysis of overlying excavation was established. Based on the superposition principle, the model proposed was applied to a case study of tunnel deformation induced by overlying long-distance collinear excavation. By comparing the calculated results with the measured data, the accuracy of the proposed model was verified. The analysis results show that after the construction of the upper main structure, the uplift deformation of the tunnel has significantly decreased, but the local differential settlement increases, resulting in a significant increase in the internal force of the tunnel and the deformation of the annular joint. The groundwater leakage generally occurs not at the location with the maximum uplift of tunnel, but between the location with the maximum opening of joint and the location with the maximum shearing dislocation.

收稿日期: 2020-01-19

基金项目: 国家自然科学基金 (51878267, 51938005) 资助项目

作者简介: 陈 拴 (1994-), 男, 陕西省安康市人, 硕士生, 从事盾构隧道结构变形机理方面的研究.

通信作者: 吴怀娜, 女, 副教授, 电话 (Tel.): 0731-88821342; E-mail: wuhn@hnu.edu.cn.

As a result, not only the total deformation but also the opening and dislocation deformation of joints caused by differential settlement should be concerned in practice. Although the shear deformation generally accounts for about 21.41% of tunnel deformation, the induced shearing dislocation is significant compared with the opening caused by bending, which can be more important for waterproof in joints. The analytic model should not neglect the shearing deformation of the tunnel.

Key words: excavation; tunnel; analytical model; uplift deformation; shearing dislocation

近年来,我国各大城市掀起了轨道交通建设的高潮,截至 2019 年底,我国共有 44 个城市开通轨道交通.同时,由于城市建设和改造速度的加快,已建地铁沿线出现了大量新建、改建和扩建的工程项目.地铁隧道多采用盾构法修建,盾构隧道的衬砌是由管片通过螺栓拼接而成,其变形控制要求往往达到毫米级.邻近工程建设不可避免会引起地层扰动,使既有隧道产生变形^[1],过大变形可导致管片开裂、渗漏水及道床脱开等病害,严重时甚至可能引发列车安全事故.近年来,由于邻近施工诱发的隧道破坏事故屡见不鲜,如台北捷运线邻近基坑开挖导致连续 60 余环衬砌道床脱离达 20 mm,41 环衬砌因受损严重^[2-3].宁波地铁 1 号线^[4]因邻近基坑开挖导致左线隧道 375 环范围出现不同程度的接头变形、渗漏水及管片开裂.上述安全事故多以侧方基坑开挖为主.然而,近年来一些城市修建的城市快速道路、综合管廊等使得地铁隧道上方出现长距离共线基坑开挖工程.隧道上方基坑开挖将导致下方土体应力释放、地层回弹,进而引发既有隧道产生上浮变形,而长距离基坑开挖的影响尤为严重,相关的研究仍鲜见报道.

针对基坑开挖引起的隧道变形预测,国内外学者采用现场实测^[2-4]、数值模拟^[5-8]、模型试验^[9-10]以及理论分析^[11-14]等方法开展了大量研究.其中,理论分析方法由于概念清晰,适用性广,具有重要的研究意义和实用价值.现场实测及反分析表明,盾构隧道纵向变形是由管片环刚性转动引起的弯曲变形、环间错台变形共同组成的^[15-16].现有纵向理论模型可分为两类^[16]:① 纵向管片环-接头模型,采用梁单元或壳单元模拟管片环、弹簧模拟接头;② 纵向等效连续化模型,将隧道简化为均质梁并通过等效刚度考虑环间接头的刚度弱化效应.相比之下,纵向等效连续化模型由于计算简单而被广泛采用.然而,传统的纵向等效连续化模型通常将隧道简化为均一刚度的欧拉伯努利梁,即假设隧道为纯弯变形,与实际不符.Wu 等^[16]基于铁木辛柯梁理论建立了能同时考虑弯曲变形和剪切错台的纵向结构模型,并给出了

环间张开量和错台量的确定方法.

本文在 Wu 等^[16]提出的隧道纵向铁木辛柯梁简化模型的基础上,引入 Winkler 地基模型,提出了一种上方基坑开挖引起隧道变形的解析模型,进而利用叠加原理推广至长距离共线基坑开挖对隧道的影 响 分 析. 依 托 深 圳 某 长 距 离 共 线 基 坑 工 程, 验 证 本 研 究 模 型 的 有 效 性, 并 进 一 步 探 讨 了 长 距 离 基 坑 开 挖 对 下 方 隧 道 上 浮 变 形 和 渗 漏 水 的 影 响 机 制.

1 上方基坑开挖引起隧道变形解析模型

本文采用 2 阶段分析法分析上方基坑开挖引起的共线隧道纵向变形和接头变形.阶段 1:假定土体为弹性半无限空间的弹性体,隧道为无限长连续体,不考虑既有隧道的影响,采用 Mindlin 弹性解计算基坑开挖引起的土体附加应力.阶段 2:将隧道纵向的铁木辛柯梁简化模型^[16]与 Winkler 地基相结合,建立土-隧道相互作用模型,将阶段 1 附加应力施加于隧道上,进而获得基坑开挖引起的隧道纵向变形和内力的解析解.

1.1 基坑开挖引起的隧道附加应力

图 1 为基坑与隧道相对位置平面图,分别以基坑平面中心 O' 和隧道中心 O 为原点建立 $\xi'-\eta'$ 全局坐标系和 $x-y$ 局部坐标系, OO' 为原点连线, $O'x'$ 为 x 轴的平行线, χ 为 ξ' 轴与 x 轴之间的夹角, s 为原点连线 OO' 的长度, v 为 ξ' 轴与原点连线 OO' 之间的夹角, χ 、 v 均以逆时针旋转为正,反之为负.

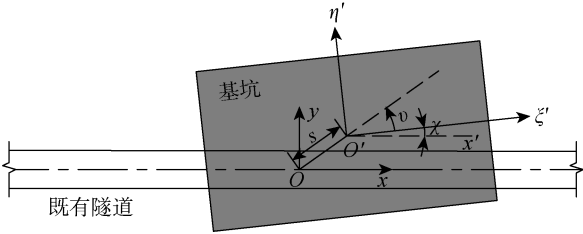


图 1 基坑与既有隧道相对位置平面图
Fig. 1 Plan of relative position of excavation and existing tunnel

基坑开挖引起的隧道上任意位置 (x, y) 的附加应力 $f(x, y)$ 为

$$f(x, y) = \iint_{\Gamma} \frac{p d\xi d\eta}{8\pi(1-\nu)} \left[-\frac{(1-2\nu)(Z_0-H)}{R_1^3} + \frac{(1-2\nu)(Z_0-H)}{R_2^3} - \frac{3(Z_0-H)^3}{R_1^5} - \frac{3(3-4\nu)Z_0(Z_0+H)^2 - 3H(Z_0+H)(5Z_0-H)}{R_2^5} - \frac{30HZ_0(Z_0+H)^3}{R_2^7} \right] \quad (1)$$

式中: Γ 为积分区域; p 为坑底卸载应力, $p = \sum_{i=1}^{i=m} \gamma_i h_i$, γ_i 为第 i 层土的重度, h_i 为第 i 层土的厚度, m 为开挖区域的土层数; ν 为土体的泊松比; Z_0 为隧道轴线距地表的埋深; H 为基坑开挖深度;

$$R_1 = \sqrt{(X-\xi')^2 + (Y-\eta')^2 + (Z_0-H)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{(X-\xi')^2 + (Y-\eta')^2 + (Z_0+H)^2}$$

其中, X, Y 为计算点在 $\xi'-\eta'$ 全局坐标系下的坐标, 与 $x-y$ 局部坐标系之间满足:

$$X = x \cos \chi + y \sin \chi + s \cos \nu \quad (2)$$

$$Y = -x \sin \chi + y \cos \chi + s \sin \nu \quad (3)$$

基于 Mindlin 解的附加应力计算方法, 可以考虑不同相对位置对隧道的影响。

1.2 土-隧道相互作用模型

Wu 等^[16] 基于铁木辛柯梁理论提出了考虑剪切错台变形的纵向等效连续化模型。该模型把隧道理想化为一个均质的铁木辛柯梁, 采用综合考虑衬砌环和接头影响的等效弯曲刚度和等效剪切刚度。图 2 为隧道纵向的铁木辛柯梁简化模型示意图。图中: M, Q 分别为弯矩和剪力; l_s 为管片环宽度; l_b 为螺栓长度; $abcd$ 和 $cdef$ 分别表征变形前管片单元和接头单元的形状; $abc'd'$ 和 $c'd'e'f'$ 分别表征变形后管片单元和接头单元的形状; θ, θ_s 及 θ_j 分别为弯矩作用下计算单元的转角、混凝土管片环的转角及环缝引起的转角; u, u_s 及 u_j 分别为剪力作用下计算单元的位移、混凝土管片环的位移及环缝引起的位移。

根据铁木辛柯梁理论, 隧道满足以下平衡方程、

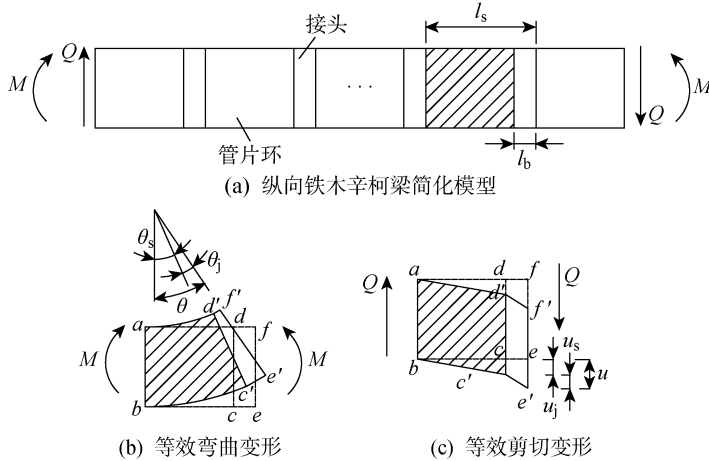


图 2 隧道纵向的铁木辛柯梁简化模型示意图^[16]

Fig. 2 Illustration of Timoshenko beam simplified model of tunnel in longitudinal direction^[16]

几何方程和物理方程^[17]:

$$Q = \frac{dM}{dx} = M', \quad \frac{dQ}{dx} - q = M'' - q \quad (4)$$

$$\varphi = \frac{dw}{dx} - \gamma, \quad k_c = -\frac{d\varphi}{dx} = -\frac{d^2w}{dx^2} + \frac{d\gamma}{dx} \quad (5)$$

$$M = (EI)_{eq} k_c, \quad Q = (\kappa GA)_{eq} \gamma \quad (6)$$

式中: M', M'' 为分别为弯矩的一阶、二阶导数; q 为外荷载; φ 为管片环旋转角; w 为隧道中性轴的竖向位移, 即隧道上浮变形; γ 为剪切角; k_c 为中性轴的曲率; $(EI)_{eq}$ 为隧道纵向等效弯曲刚度, 其中 E 为弹性模量, I 为第二惯性矩; $(\kappa GA)_{eq}$ 为隧道纵向等效剪切刚度, 其中 κ 为铁木辛柯剪切系数(对于环形隧

道, $\kappa = 0.9$), G 为切变模量, A 为管片环横截面积。

$(EI)_{eq}$ 及 $(\kappa GA)_{eq}$ 基于几何等效确定, 其计算公式如下^[16]:

$$(EI)_{eq} = E_s I_s \frac{\zeta l_s}{\zeta(l_s - \lambda l_b) + \lambda l_b} \quad (7)$$

$$(\kappa GA)_{eq} = \xi \frac{l_s}{\frac{l_b}{n\kappa_b G_b A_b} + \frac{l_s - l_b}{\kappa_s G_s A_s}} \quad (8)$$

式中: E_s 为混凝土管片弹性模量; I_s 为隧道截面惯性矩; ζ 为环缝转动刚度系数, $\zeta = \frac{\cos^3 \psi}{\cos \psi + (\psi + \pi/2) \sin \psi}$, ψ 为中性轴的夹角^[18]; λ 为

环缝影响长度相对系数; ξ 为考虑凹凸榫、混凝土管片摩擦力的剪切刚度修正系数; n 为纵向螺栓数量; κ_b 为螺栓的铁木辛柯剪切系数,圆形截面 κ_b 为0.9; G_b 为螺栓切变模量; A_b 为螺栓横截面积; κ_s 为管片环的铁木辛柯剪切系数,圆环截面 κ_s 为0.5; G_s 为管片环切变模量; A_s 为管片环横截面积。

Wu等^[16]进一步推导环缝的最大张开量 Δ 、环间最大错台量 δ 的计算公式如下:

$$\Delta = \frac{M\lambda l_b}{E_s I_s} \frac{1}{\xi} (r + r \sin \phi) \tag{9}$$

$$\delta = l_s \tan \gamma = l_s \tan \frac{Q}{(\kappa GA)_{eq}} \tag{10}$$

式中: r 为隧道半径。

本文在Wu等^[16]提出的隧道纵向铁木辛柯梁简化模型的基础上,引入Winkler地基,建立土-隧道相互作用模型,并给出外荷载作用下隧道内力和变形的解析解^[19]。图3为Winkler地基-铁木辛柯梁模型示意图,图中 $q(x)$ 为纵向 x 位置作用在隧道的外荷载。

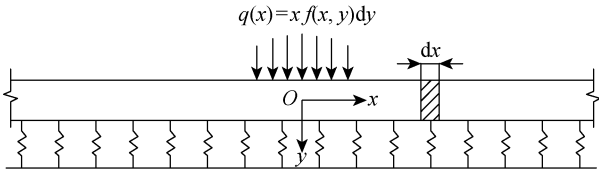


图3 Winkler地基-铁木辛柯梁的土-隧道相互作用模型示意图

Fig. 3 Illustration of soil-tunnel interaction model of Winkler foundation-Timoshenko beam

取足以覆盖隧道影响范围的纵向计算长度 L 作为模型分析范围。将作用在隧道纵向上的外荷载 $q(x)$ 以Fourier级数展开,即

$$q(x) = D_0 + \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cos \frac{n\pi x}{L} \tag{11}$$

式中: $q(x) = \int_{-r}^r f(x, y) dy$, $f(x, y)$ 由式(1)确定;

$$D_0 = \frac{1}{L} \int_0^L q(x) dx; D_n = \frac{2}{L} \int_0^L q(x) \cos \left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx.$$

由铁木辛柯梁理论和弹性地基梁理论可得Winkler地基上有限长梁的力的平衡方程为

$$\frac{dQ}{dx} = k_e w - q(x) \tag{12}$$

式中: k_e 为等效地基土压缩基床系数, $k_e = 2kr$, k 为地基土基床系数。

将式(4)、(5)代入式(12),并令 $D = (EI)_{eq}$, $C = (\kappa GA)_{eq}$,由此可得:

$$D \frac{d^2 \varphi}{dx^2} - C \varphi + C \frac{dw}{dx} = 0 \tag{13}$$

$$C \frac{d\varphi}{dx} - C \frac{d^2 w}{dx^2} + k_e w = q(x) \tag{14}$$

由(13)、(14)推导得Winkler地基上铁木辛柯梁变形控制方程:

$$D \frac{d^4 w}{dx^4} - \frac{k_e D}{C} \frac{d^2 w}{dx^2} + k_e w = q(x) - \frac{D}{C} \frac{d^2 q(x)}{dx^2} \tag{15}$$

将式(11)代入上式,则 w 的通解为

$$w = (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x) e^{\alpha x} + (c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x) e^{-\alpha x} + \frac{D_0}{k_e} + \sum_{n=1}^{\infty} d_n \cos \frac{n\pi x}{L} \tag{16}$$

式中: $c_1 \sim c_4$ 为常数; α, β, d_n 分别为

$$\alpha = \sqrt{\sqrt{\frac{k_e}{4D}} + \frac{k_e}{4C}} \tag{17}$$

$$\beta = \sqrt{\sqrt{\frac{k_e}{4D}} - \frac{k_e}{4C}} \tag{18}$$

$$d_n = \frac{D_n \left[1 + \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \frac{D}{C} \right]}{D \left(\frac{n\pi}{L} \right)^4 + \frac{k_e D}{C} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 + k_e} \tag{19}$$

上式仅在 $k_e < 4C^2/D$ 时成立,当 $k_e \geq 4C^2/D$ 时,令式(18)中 β 为 $i\beta$ 。

梁任意截面的旋转角为

$$\varphi = (c_5 \cos \beta x + c_6 \sin \beta x) e^{\alpha x} + (c_7 \cos \beta x + c_8 \sin \beta x) e^{-\alpha x} + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \left[\frac{D}{C} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^3 - \left(1 - \frac{Dk_e}{C^2} \right) \left(\frac{n\pi}{L} \right) \right] d_n - \frac{n\pi D}{LC^2} D_n \right\} \sin \frac{n\pi x}{L} \tag{20}$$

式中:

$$c_5 = c_1 \left[\alpha \left(1 - \frac{Dk_e}{C^2} \right) + \frac{D}{C} (\alpha^3 - 3\alpha\beta^2) \right] + c_2 \left[\beta \left(1 - \frac{Dk_e}{C^2} \right) + \frac{D}{C} (3\alpha^2\beta - \beta^3) \right] \tag{21}$$

$$c_6 = c_1 \left[-\beta \left(1 - \frac{Dk_e}{C^2} \right) + \frac{D}{C} (\beta^3 - 3\alpha^2\beta) \right] + c_2 \left[\alpha \left(1 - \frac{Dk_e}{C^2} \right) + \frac{D}{C} (\alpha^3 - 3\alpha\beta^2) \right] \tag{22}$$

$$c_7 = c_3 \left[-\alpha \left(1 - \frac{Dk_e}{C^2} \right) + \frac{D}{C} (-\alpha^3 + 3\alpha\beta^2) \right] + c_4 \left[\beta \left(1 - \frac{Dk_e}{C^2} \right) + \frac{D}{C} (3\alpha^2\beta - \beta^3) \right] \tag{23}$$

$$c_8 = c_3 \left[-\beta \left(1 - \frac{Dk_e}{C^2} \right) + \frac{D}{C} (\beta^3 - 3\alpha^2\beta) \right] + c_4 \left[-\alpha \left(1 - \frac{Dk_e}{C^2} \right) + \frac{D}{C} (-\alpha^3 + 3\alpha\beta^2) \right] \tag{24}$$

上述 w 和 φ 表达式中 $c_1 \sim c_8$ 可通过以下边界条件确定:

$w|_{x=0}=0;$

$\varphi|_{x=0}=0$

$w|_{x=L}=0;$

$\varphi|_{x=L}=0$

(25)

当 $c_1 \sim c_8$ 确定后, w 和 φ 即可得出, 则 M 和 Q 可由式(4)~(6)求得. 已知 M 、 Q 后, 由式(9)、(10)确定管片环的张开量和错台量.

2 工程实例分析

2.1 工程概况

深圳某地下快速道路基坑工程与既有地铁隧道长距离共线, 共线段达 3.09 km, 基坑采用明挖法施工, 主体段开挖宽度 39.7~46.0 m, 局部宽度达 52.0 m, 开挖深度 8.4~16.3 m, 隧道拱顶距离基坑底板 6.2~14.9 m. 基坑围护结构为钻孔灌注桩, 直径 1.0 m, 间距 1.2 m. 图 4 为典型断面 I 基坑与隧道相对位置关系图. 该断面基坑开挖宽度和深度分别为 46.0 及 16.3 m, 左线隧道距离基坑围护结构 8.0 m, 左、右线隧道轴线间距 13.0 m, 基坑底板与隧道拱顶最小垂直距离为 6.2 m. 表 1 为隧道衬砌和螺栓参数.

表中 D_e 和 t 分别为隧道外径和衬砌厚度; ν_s 为混凝土衬砌的泊松比; D_b 、 E_b 和 ν_b 分别为纵向螺栓直径、弹性模量和泊松比.

本文取该工程其中 340 m 共线段进行分析, 图 5 为其地质剖面图. 场地上覆土层为素填土, 填砂或

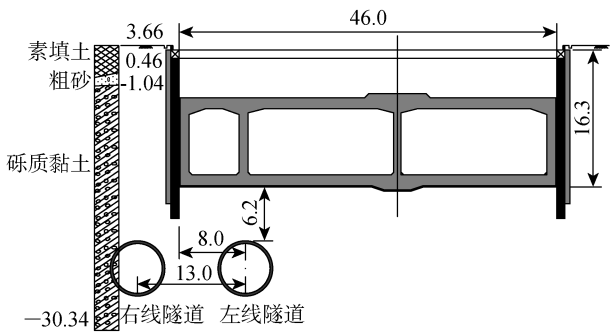


图 4 典型断面 I 基坑与隧道相对位置(m)

Fig. 4 Relative position between excavation and tunnel for typical section I (m)

表 1 隧道衬砌和螺栓参数

Tab. 1 Parameters of segmental lining and bolt

管片参数	数值	纵向螺栓参数	数值
D_e/m	6.70	n	16
t/m	0.35	D_b/m	0.03
l_s/m	1.50	l_b/m	0.40
E_s/GPa	34.50	E_b/GPa	206
ν_s	0.20	ν_b	0.30

填石交替出现, 局部夹杂淤泥质黏土粗砂. 其下为厚度 3~12 m 的砾质黏土层, 下伏全风化和强风化花岗岩. 基坑底板全部位于砾质黏土层, 隧道下卧土层为砾质黏土或全风化花岗岩. 表 2 为场地土层物理力学参数. 表中: γ_s 为土体天然重度; e_0 为孔隙比;

表 2 土层物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanical parameters of soil layers

参数	$\gamma_s/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	e_0	$w_0/\%$	c_0/kPa	$\varphi_0/(^{\circ})$	E_{s0}/MPa
素填土	17.5	—	—	0	12	—
粗砂	20.0	—	—	0	30	30
砾质黏土	17.7	1.004	33.3	25	23.5	28
全风化花岗岩	19.5	0.865	27.6	30	28	70

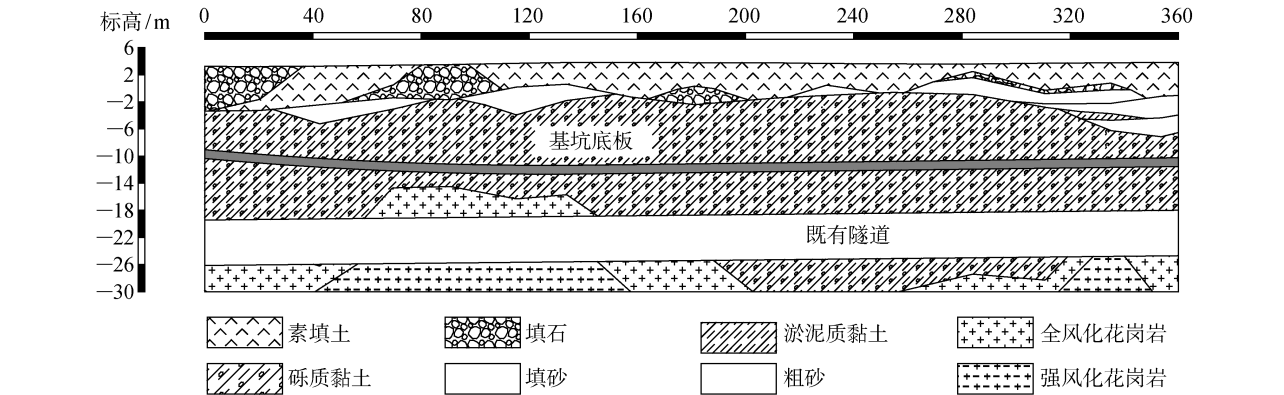


图 5 隧道沿线地质剖面图

Fig. 5 Geological section along tunnel

w_0 为含水量; c_0 为黏聚力; φ_0 为内摩擦角; E_{s0} 为变形模量。

为减小长距离共线基坑开挖对既有地铁隧道的影响,土方开挖采用分层分段开挖方法. 本文研究其中 4 个开挖工况,如表 3 所示,工况 1-1 表示第 1 个工况的第 1 个开挖步,1-2 表示第 1 个工况的第 2 个开挖步,以此类推. 表中 L_e 和 H_e 分别为开挖长度和开挖深度. 现场对隧道变形进行实时监测,并对隧

表 3 开挖工况
Tab.3 Excavation conditions

工况	L_e /m	H_e /m
1-1	73~99	12.0
1-2	158~188	8.0
2-1	73~99	16.3
2-2	197~207	16.3
2-3	167~197	10.0
3-1	73~99	16.3
3-2	151~207	16.3
4-1	73~107	16.3
4-2	144~213	16.3
4-3	107~144	11.3
4-4	157~197	主体结构施工

道渗漏水情况进行调查. 在工况 4-4 主体结构施工完成后,首次发现左线隧道 193~212 m 多处发生不同程度渗漏水,断面 I (即 207 m 处)最大上浮量达 20.5 mm,超过变形控制标准值(20.0 mm),其内弧面管片局部压溃脱落,接头渗漏严重. 右线隧道位于围护结构外侧,基坑开挖引起的上浮量小(不超过 5.0 mm),无渗漏水现象。

2.2 结果分析

2.2.1 模型验证 基于本文提出的 Winkler 地基-铁木辛柯梁模型对该工程变形较为严重的左线进行分析. 根据表 1 所获得隧道弯曲刚度有效率 $\eta=1/7$,剪切刚度修正系数 $\xi=0.68$,并由式(7)、(8)确定 $(EI)_{eq}=1.83\times10^8\text{ kN}\cdot\text{m}^2$, $(\kappa GA)_{eq}=1.97\times10^6\text{ kN}$. 根据主体结构截面形式所得的结构荷载为 $P_s=130\text{ kPa}$. 并且由步骤 3 通过反演分析可以确定出砾质黏土和全风化花岗岩的基床系数分别为 13.44 MPa/m 和 21.0 MPa/m,将上述参数代入所提的土-隧道相互作用模型,可得不同开挖工况下的隧道变形和内力. 对分段开挖引起的隧道变形,分别计算各段引起隧道变形和内力,并通过叠加的方法确定总变形量和总内力。

图 6 为计算的隧道上浮量与实测结果对比图,

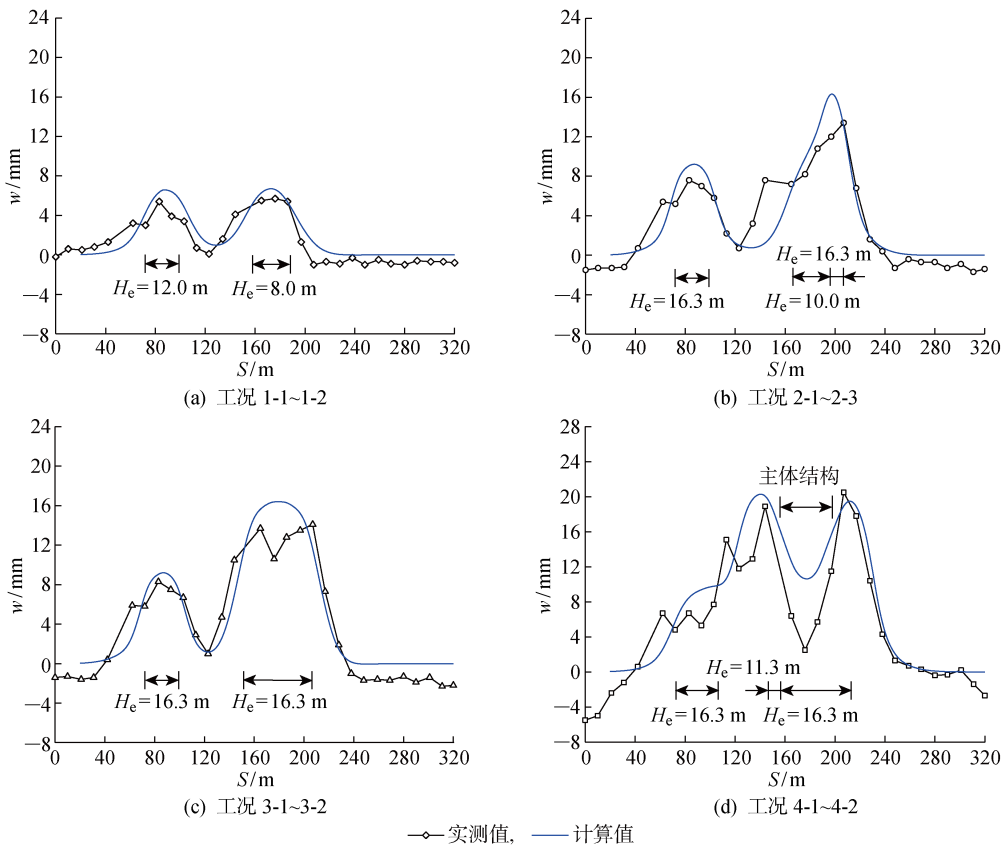


图 6 隧道变形理论计算结果与现场实测结果对比

Fig.6 Comparison of theoretical calculation results of tunnel deformation with field measured results

图中 S 为距离。由图可知,隧道上浮变形理论计算结果与现场实测均呈现双峰状,工况 4-4 施工完成后隧道最大上浮量达 20.5 mm,与理论计算的最大上浮量 20.3 mm 较为接近。二者从趋势和幅值上均较为吻合,表明本文提出的土-隧道相互作用模型能较好地预测上方基坑开挖引起的隧道变形,同时说明基于叠加原理分析长距离开挖引起的共线隧道变形是合理的。根据图 6 可以判断,基坑开挖到底时,其变形影响范围可延伸到开挖范围外侧 40 m 左右。

2.2.2 隧道渗漏水分析 现场观测表明工况 4-4 主体结构施工完成后出现隧道渗漏水,而此前并未观测到渗漏水。为探明其原因,将工况 4-3 和 4-4 下的隧道内力和接头变形进行对比,如图 7 所示。由图

7(a)可知,长度为 40 m 的主体结构施工完成后,约 80 m 范围隧道结构上浮变形显著回落,最大减小量达 11.4 mm,但局部出现沉降槽,差异沉降量约为 10 mm/40 环。

图 7(b)、7(c)为隧道弯矩和剪力图。可知,主体结构施工后,内力显著增大,其变化范围约 110 m。主体结构范围内隧道弯矩由 504.7 kN·m 变成 -3 160.9 kN·m,两侧弯矩峰值由 3 624.9 kN·m 变成 5 549.1 kN·m。剪力方向不变,两侧最大剪力由 148.5 kN 和 -92 kN 提高到 363.5 kN 和 -350.1 kN。由图 7(d)、7(e)为主体结构施工前后接头变形图。由图可见,接头张开量和错台量的变化趋势与隧道弯矩和剪力相对应,较之主体结构未施工时,环缝弯曲张开和剪切错台量显著增加。

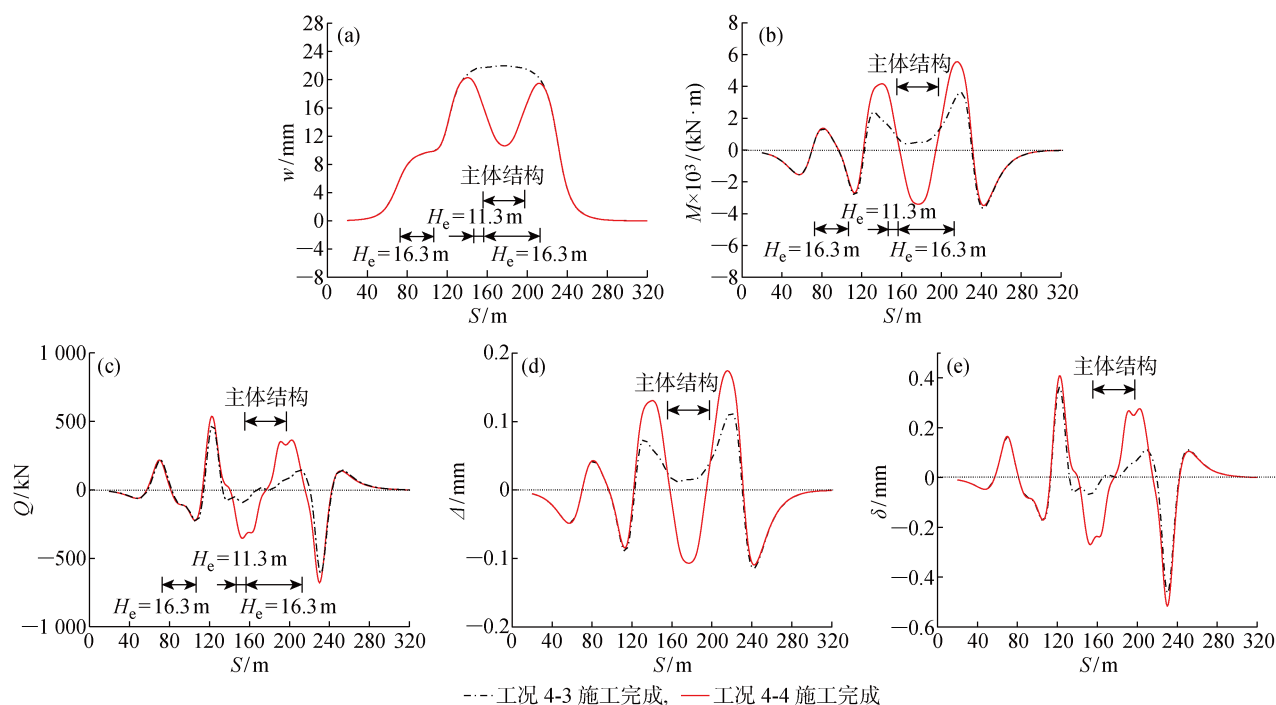


图 7 主体结构施工前后隧道内力和接头变形

Fig. 7 Joint deformation and internal force of tunnel before and after construction of structure

图 8 为工况 4 隧道上浮变形、接缝变形与渗漏水位置关系图。隧道在 193~212 m 出现连续渗漏,主要位于环与环之间接缝。对比渗漏区域与隧道变形可以发现,渗漏区域并非位于上浮最大值处,因为此处隧道上浮量虽大,但接缝变形表现出张开量大、剪切变形量小的特点。渗漏区域主要位于接缝张开量最大值与接头错台变形最大值之间。同时,也进一步说明隧道渗漏水是由弯曲变形和剪切变形共同作用所致,即隧道纵向变形是弯曲张开、剪切错台兼而有之。传统的模型将隧道变形简化为纯弯模式,忽略了环间剪切变形,将导致计算结果的不准确性。

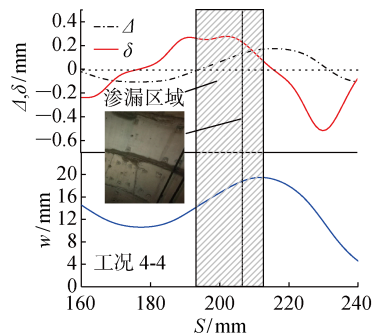


图 8 工况 4-4 隧道接缝变形与渗漏水位置分析

Fig. 8 Analysis of tunnel joint deformation and water leakage location for 4-4

2.2.3 隧道剪切变形占比 隧道的弯曲和剪切变形机理不同,前者由管片环刚体旋转,环缝张开变形为主,后者则由管片环与环错台累积而成.本节进一步探究两者在隧道上浮变形中发挥的作用.图 9 为工况 4-4 时 w 、弯曲变形 w_b 、剪切变形 w_s 沿纵向分布图.可以看出,剪切变形占总变形的比例最大仅 21.72%,但根据上节接缝变形分析,其引起的接缝错台变形最大值较弯曲引起的最大张开量更大,其对渗漏水的影响有着重要的影响.表 4 统计了不同工况下隧道上浮变形达到峰值时剪切变形的占比 P .由表 4 可知,当隧道上浮变形达到峰值时剪切变形的占比一般为 21.72%~27.04%,隧道上浮变形达到最大时剪切变形的平均占比为 21.41%.

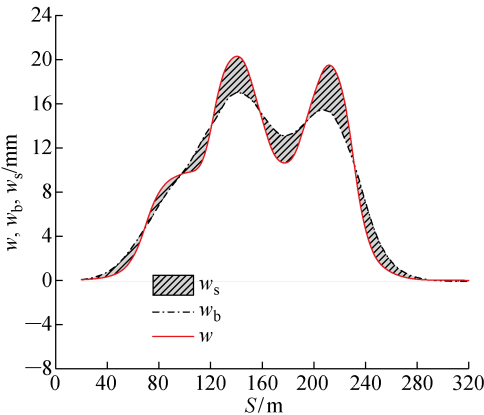


图 9 工况 4-4 的隧道纵向变形

Fig. 9 Longitudinal deformation of tunnel under excavation condition of 4-4

表 4 剪切变形与隧道最大上浮变形的占比
Tab. 4 Ratio of shear deformation to the maximum uplift deformation of tunnel

工况	S/m	w /mm	w_s /mm	P /%
1-2	87	6.59	1.78	27.04
1-2	173	6.70	1.59	23.68
2-3	87	9.21	2.47	26.86
2-3	198	16.32	5.10	31.23
3-2	87	9.20	2.39	26.00
3-2	179	16.40	1.61	9.83
4-4	87	8.95	0.91	10.13
4-4	141	20.28	3.28	16.19
4-4	212	19.49	4.23	21.72
			平均	21.41

3 结论

本研究提出了一种用于分析上方基坑开挖引起

的共线隧道结构变形的解析模型,结合深圳某长距离共线基坑开挖工程进行分析,得出如下结论:

(1) 基于考虑隧道剪切错台的铁木辛柯梁简化模型,引入 Winkler 地基模型,提出了一种上方基坑开挖下土-隧道相互作用解析模型,推导了其在任意荷载下的解析解.利用叠加原理将该模型推广至上方长距离基坑开挖引起的共线隧道变形分析.通过实例分析表明本研究模型具有较好的合理性,同时上方基坑分段开挖引起的共线隧道上浮变形满足叠加原则.

(2) 主体结构施工后,隧道上浮变形明显回落,但局部差异沉降增加,导致隧道内力显著增大,环缝接头张开量和错台量明显增加.隧道渗漏水位置并非位于隧道上浮变形最大处,而是位于接头张开量最大处与接头错台变形最大处之间.进一步说明隧道变形是由接缝弯曲张开和环间错台共同作用所致.实际工程中不应仅关注隧道总变形,同时应关注接缝张开及错台变形.

(3) 通过统计不同工况下隧道上浮变形达到峰值时剪切变形所占比例发现,隧道上浮变形最大处剪切变形仅占 21.72%~27.04%,平均占比为 21.41%,但其引起的接缝错台变形最大值较弯曲引起的最大张开量更大,其对接缝防水有重要影响.理论模型中考虑剪切错台变形的影响十分重要.

参考文献:

[1] CHEN R P, ZHU J, LIU W, *et al.* Ground movement induced by parallel EPB tunnels in silty soils [J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2011, 26(1): 163-171.

[2] CHANG C T, SUN C W, DUANN S W, *et al.* Response of a Taipei Rapid Transit System (TRTS) tunnel to adjacent excavation[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2001, 16(3): 151-158.

[3] HWANG R N, CHEN B S, WU T E. Damages to metro tunnels due to adjacent excavations [DB/OL]. [2020-01-15]. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-81-322-2377-1_25.

[4] 王立峰,庞晋,徐云福,等. 基坑开挖对近邻运营地铁隧道影响规律研究[J]. **岩土力学**, 2016(7): 2004-2010.
WANG Lifeng, PANG Jin, XU Yunfu, *et al.* Influence of foundation pit excavation on adjacent metro tunnels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016 (7): 2004-2010.

[5] CHEN R P, MENG F Y, LI Z C, *et al.* Investigation of response of metro tunnels due to adjacent large

- excavation and protective measures in soft soils[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2016, 58: 224-235.
- [6] 姚爱军, 张剑涛, 郭海峰, 等. 地铁盾构隧道上方基坑开挖卸荷-加载影响研究[J]. **岩土力学**, 2018, 39(7): 2318-2326.
- YAO Aijun, ZHANG Jiantao, GUO Haifeng, *et al.* Influence of unloading-loading of foundation on shield tunnel underneath [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(7): 2318-2326.
- [7] 郑刚, 杜一鸣, 刁钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. **岩土工程学报**, 2016, 38(4): 599-612.
- ZHENG Gang, DU Yiming, DIAO Yu, *et al.* Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(4): 599-612.
- [8] 郑刚, 刘庆晨, 邓旭. 基坑开挖对下卧运营地铁隧道影响的数值分析与变形控制研究[J]. **岩土力学**, 2013, 34(5): 1459-1468.
- ZHENG Gang, LIU Qingchen, DENG Xu. Numerical analysis of effect of excavation on underlying existing metro tunnel and deformation control[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(5): 1459-1468.
- [9] NG C W W, SHI J W, HONG Y. Three-dimensional centrifuge modelling of basement excavation effects on an existing tunnel in dry sand [J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2013, 50(8): 874-888.
- [10] 张玉伟, 谢永利, 翁木生. 非对称基坑开挖对下卧地铁隧道影响的离心试验[J]. **岩土力学**, 2018, 39(7): 2555-2562.
- ZHANG Yuwei, XIE Yongli, WENG Musheng. Centrifugal test on influence of asymmetric foundation excavation to an underlying subway tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(7): 2555-2562.
- [11] 周泽林, 陈寿根, 陈亮, 等. 基坑施工对下卧地铁隧道上抬变形影响的简化理论分析[J]. **岩土工程学报**, 2015, 37(12): 2224-2234.
- ZHOU Zelin, CHEN Shougen, CHEN Liang, *et al.* Analysis of uplift deflection of subway tunnel due to adjacent pit excavation [J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(12): 2224-2234.
- [12] 欧雪峰, 张学民, 刘学勤, 等. 基坑开挖与降水引起下卧隧道变形的解析计算方法[J]. **铁道学报**, 2019(3): 147-154.
- OU Xuefeng, ZHANG Xuemin, LIU Xueqin, *et al.* Analytic calculation method of underlying tunnel deformation caused by excavation and dewatering of upper pit[J]. **Journal of the China Railway Society**, 2019(3): 147-154.
- [13] 周顺华, 何超, 肖军华. 环间错台效应下基坑开挖引起临近地铁盾构隧道变形的能量计算法[J]. **中国铁道科学**, 2016, 37(3): 53-60.
- ZHOU Shunhua, HE Chao, XIAO Junhua. Energy method for calculating deformation of adjacent shield tunnels due to foundation pit excavation considering step between rings[J]. **China Railway Science**, 2016, 37(3): 53-60.
- [14] 周泽林, 陈寿根, 涂鹏, 等. 基坑开挖对邻近隧道影响的耦合分析方法[J]. **岩土力学**, 2017, 39(4): 1440-1449.
- ZHOU Zelin, CHEN Shougen, TU Peng, *et al.* Coupling method for analyzing the influence on existing tunnel due to adjacent foundations pit excavation [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2017, 39(4): 1440-1449.
- [15] 王如路. 上海地铁盾构隧道纵向变形分析[J]. **地下工程与隧道**, 2009, 19(4): 1-6.
- WANG Rulu. Analysis on the longitudinal deformation of shield tunnel of Shanghai Metro[J]. **Underground Engineering and Tunnels**, 2009, 19(4): 1-6.
- [16] 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.
- [17] TIMOSHENKO S P. On the correction for shear of the differential equation for transverse vibrations of prismatic bars[J]. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, 1921, 41(245): 744-746.
- [18] LIAO S M, PENG F L, SHEN S L. Analysis of shearing effect on tunnel induced by load transfer along longitudinal direction[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2008, 23(4): 421-430.
- [19] YIN J H. Closed-form solution for reinforced Timoshenko beam on elastic foundation[J]. **Journal of Engineering Mechanics**, 2000, 126(8): 868-874.

(本文编辑:陈晓燕)