

文章编号:1006-2467(2022)04-0474-12

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.067

基于 Kerr 地基模型的基坑开挖 引起下卧既有隧道受力变形

冯国辉^{1,2,3}, 徐 兴⁴, 侯世磊⁵, 范润东⁶

杨开放¹, 管凌霄³, 徐长节^{1,3,7,8}

(1. 浙江大学 滨海和城市岩土工程研究中心, 杭州 310058; 2. 浙江大学 平衡建筑研究中心, 杭州 310028; 3. 华东交通大学 江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 南昌 330013; 4. 杭州浙大福世德勘测设计有限公司, 杭州 310030; 5. 中铁十四局集团第四工程有限公司, 济南 250002; 6. 浙江杭海城际铁路有限公司, 浙江 嘉兴 314000; 7. 江西省地下空间技术开发工程研究中心, 南昌 330013; 8. 华东交通大学 轨道交通基础设施性能监测与保障国家重点实验室, 南昌 330013)

摘 要: 基坑开挖导致的土体卸载作用会引起邻近下卧既有隧道隆起变形, 甚至会干扰隧道的正常运营. 提出了一种基坑开挖引起下卧隧道纵向变形的简化计算方法, 将隧道简化成无限长 Euler-Bernoulli 梁搁置在三参数的 Kerr 地基模型, 提出了剪切层弯矩的计算假设, 利用有限差分法并结合隧道两端的边界条件得到隧道纵向变形差分解. 结果表明: 与既有文献中有限元数据和实测数据对比, 证明了 Kerr 地基模型的准确性; 与将隧道简化成 Euler-Bernoulli 梁搁置在 Pasternak 地基模型相比, Kerr 地基模型更具有优越性. 地基模量、隧道埋深的增大会引起隧道纵向位移及内力的减小; 隧道刚度的增大会引起隧道纵向位移的减小但会引起隧道内力的增大.

关键词: 基坑开挖; 既有隧道; Euler-Bernoulli 梁; Kerr 地基模型; 有限差分法

中图分类号: TU 753 **文献标志码:** A

Deflections of Adjacent Underground Tunnel Induced by Excavation Based on Kerr Foundation Model

FENG Guohui^{1,2,3}, XU Xing⁴, HOU Shilei⁵, FAN Rundong⁶

YANG Kaifang¹, GUAN Lingxiao³, XU Changjie^{1,3,7,8}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. Center for Balance Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310028, China; 3. Jiangxi Key Laboratory of Infrastructure Safety Control in Geotechnical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 4. Hangzhou Zhejiang University First Investigation and Design Co., Ltd., Hangzhou 310030, China; 5. Fourth Engineering Co., Ltd., China Railway 14th Bureau Group, Jinan 250002, China; 6. Zhejiang Hanghai Intercity Railway

收稿日期: 2021-03-03

基金项目: 国家自然科学基金-高铁联合基金(U1934208), 国家杰出青年科学基金(51725802), 浙江省自然科学基金委员会-华东院联合基金(LHZ19E080001), 国家自然科学基金(51878276), 临近深基坑交通荷载对土体力学特征影响及围护结构安全性研究(20192ACB20001), 浙江大学平衡建筑研究中心配套资金(20203512-10C)

作者简介: 冯国辉(1996-), 男, 安徽省合肥市人, 博士生, 主要从事土与结构相互作用方面研究.

通信作者: 徐长节, 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 0571-88206752; E-mail: xucj@zju.edu.cn.

Co., Ltd., Jiaxing 314000, Zhejiang, China; 7. Engineering Research and Development Centre for Underground Technology of Jiangxi Province, Nanchang 330013, China; 8. State Key Laboratory of Performance Monitoring and Protecting of Rail Transit Infrastructure, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The soil unloading effect caused by the adjacent excavation will influence both the uplift and the deformation of the adjacent existing tunnel, and even interfere with the normal operation of the tunnel. A simplified calculation method for the longitudinal deformation of the underlying tunnel caused by foundation pit excavation is proposed. The tunnel is simplified into an infinitely long Euler-Bernoulli beam resting on a three-parameter Kerr foundation model. The difference method is combined with the boundary conditions at both ends of the tunnel to obtain the longitudinal deformation difference decomposition of the tunnel. The accuracy of the proposed method is proved by comparing it with the finite element simulation method and some cases study. Compared with the tunnel simplified as the Euler-Bernoulli beam which is placed upon the existing Pasternak foundation model, the Kerr foundation model has more advantages. As the elastic modulus of soil mass and the depth of tunnel axis increase, the longitudinal deflection and the inner force of the tunnel will decrease. The inner force of the tunnel will increase with the increment of the stiffness of the tunnel.

Key words: excavation; existing tunnel; Euler-Bernoulli beam; Kerr foundation model; finite different method

随着社会发展带动城市地下空间的拓展,城市地铁的运行能够较大程度上缓解城市地面交通压力,其安全性也越来越受重视.基坑开挖必然会对附近既有隧道或者管线产生较大的不利影响^[1-5].这是由于基坑的逐步开挖会使得基坑下方的土体产生扰动,并进一步对邻近隧道的应力应变场产生较大的影响,甚至可能造成隧道管片的开裂、渗水、接头破裂等严重的安全问题.

目前,已有大量国内外专家对基坑开挖引起邻近隧道隆起展开了深入研究.数值模拟^[6-7]可充分考虑基坑施工工序、地层地质变化以及隧-土之间非线性相互作用等比较复杂的情况,常用于地质条件复杂情况下基坑开挖对下卧隧道的影响. Zheng 等^[8]采用三维有限元软件,分析研究了邻近基坑开挖对下卧隧道的影响.为了更好地反映基坑开挖对邻近隧道的变形受力影响, Chen 等^[9-11]分别基于不同工况和不同施工方法下对深基坑开挖引起邻近隧道隆起及其内力变化进行研究.由于三维有限元建模复杂且费用较高,不便于工程设计的初步评价及快速评估.为了进一步理解基坑开挖对邻近隧道的影响,也有大量学者^[12-15]进行了一系列离心机试验,但是离心机试验对设备仪器的要求较高,试验测试结果的准确性很大程度上依赖于测试者对仪器设备及其操作的熟练程度.

相较于前面的两种评价方法,理论解析法简单实用,可以快速评价隧道在邻近开挖下的变形响应.理论解析方法大部分是将既有隧道模拟成 Euler-Bernoulli 梁的两阶段分析法:第 1 阶段是利用 Mindlin 解计算基坑开挖引起隧道轴线处的附加应力,此过程可通过复合辛普森公式求解 Mindlin 公式积分计算;第 2 阶段是将得到的附加应力作用在隧道上,计算在对应弹性地基上的变形响应.在最新的理论分析文献中, Zhang 等^[16]基于 Mindlin 解获得基坑开挖引起隧道附加应力,采用 Winkler 地基模型利用 Galerkin 方法将控制方程转换成一维有限元方程,并进一步获得方程解析. Liang 等^[17]在考虑基坑开挖坑底卸载引起隧道轴线上的附加应力的基础上,再将隧道简化成 Euler-Bernoulli 梁之放置在 Pasternak 地基模型上利用差分法获得隧道变形及其内力解析,与数据模拟得到的结果及实测数据吻合较好.康成等^[18]引入非线性 Pasternak 地基模型来考虑隧道-地基之间的相互作用,建立非线性土体下隧-土相互作用控制微分方程,并采用有限差分法获得隧道隆起变形半解析解. Zhang 等^[19]考虑管线在非均质土体中受到上覆卸载作用的变形响应,并用 Pasternak 地基模型解析得到隧道纵向位移.为了提高预测基坑开挖引起隧道隆起变形的精度. Liang 等^[20-21]在考虑基坑开挖坑底卸载引起

隧道轴线上的附加应力的基础上,将隧道简化成 Timoshenko 梁之放置在单参数 Winkler 和双参数 Pasternak 地基模型上利用有限差分法获得隧道变形解析解,并与实测数据对比验证了方法的合理性. Timoshenko 梁能够考虑隧道的剪切效应,能相对更准确地预测隧道变形.

综上所述,大多数解析方法都是将隧道搁置在单参数或者双参数地基模型上^[22-23].为更加准确预测隧道纵向变形,本文在既有研究的基础上提出了一种新的简化解析方法,将既有隧道简化成 Euler-Bernoulli 梁搁置在三参数 Kerr 地基模型上研究基坑开挖引起下卧既有隧道的力学变形响应.采用二阶段法求解基坑开挖引起下卧既有隧道的纵向变形响应.第1阶段是利用 Mindlin 解获得基坑开挖对隧道轴线产生的附加应力,第2阶段将隧道简化成 Euler-Bernoulli 梁搁置在 Kerr 地基模型上,再根据 Kerr 地基模型特性建立既有隧道纵向变形平衡微分方程.然后基于本文提出的剪切层弯矩假设,利用有限差分法求得隧道纵向位移解析解.最后通过工程实测进行对比,验证解析解的准确性,并与可退化的 Pasternak 地基模型对比,验证本文方法的优越性.系统分析了不同的地基模量、隧道埋深、隧道刚度对既有隧道结构变形的影响,一系列分析结论对于实际工程具有一定的借鉴意义.

1 分析方法

1.1 基本假定

针对本文计算模型的特点,可将计算模型做如下基本假定:

(1) 既有隧道假定为无限长的 Euler-Bernoulli 梁搁置在弹性地基模型上.

(2) 隧道与土体之间作用满足 Kerr 地基模型要求.

(3) 隧道与周围土体是共同变形,不考虑隧道-地基之间存在相对位移.

(4) 隧道轴线处附加应力可由 Mindlin 解计算.

1.2 隧道变形理论推导

在基坑卸载引起下卧既有隧道隆起变形的工况背景下,将隧道简化成 Euler-Bernoulli 梁搁置在 Kerr 地基模型上,如图1所示.图中 q 为基坑开挖引起既有隧道轴线处的附加应力; x 方向为沿隧道轴线水平向坐标轴, z 方向为沿隧道中心点竖向坐标轴; H 为基坑深度; z_0 为隧道轴线距离地表的深度; D 为隧道直径;Kerr 地基模型中, $w(x)$ 为隧道竖向

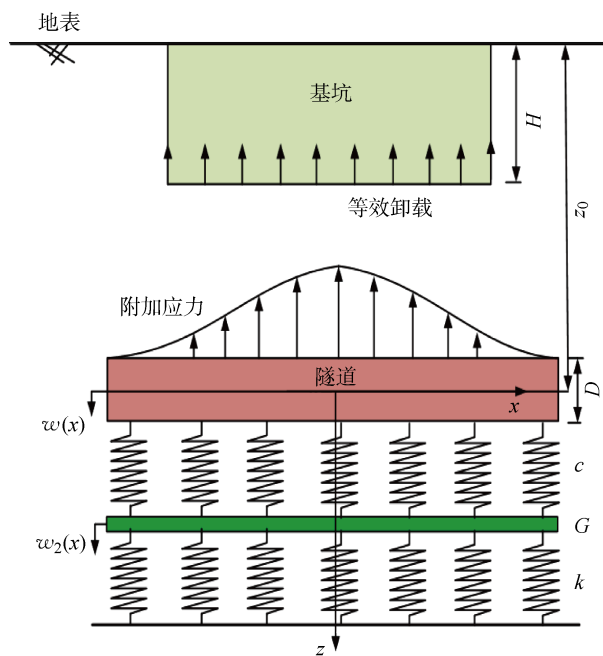


图1 Kerr地基模型

Fig. 1 Kerr foundation model

变形; $w_2(x)$ 为地基剪切层的变形量; c 为上层弹簧刚度; G 为剪切层刚度; k 为下层弹簧刚度.

根据 Kerr 地基模型理论知,隧道变形 $w(x)$ 满足:

$$w(x) = w_1(x) + w_2(x) \quad (1)$$

式中: $w_1(x)$ 为上层弹簧的变形量.利用两层弹簧的受力特性得到

$$p_1(x) = cw_1(x) = c[w(x) - w_2(x)] \quad (2)$$

$$p_2(x) = kw_2(x) \quad (3)$$

式中: $p_1(x)$ 为隧道下方弹簧反力; $p_2(x)$ 为剪切层下方弹簧反力.

对于剪切层受力特性有

$$p_1(z) = -G \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} + kw_2(x) \quad (4)$$

将式(2)~(4)合并可得

$$w(x) = \left(1 + \frac{k}{c}\right)w_2(x) - \frac{G}{c} \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} \quad (5)$$

根据材料力学知识, $w(x)$ 满足曲率方程:

$$\frac{d^2 w(x)}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (6)$$

式中: M 为隧道受到的弯矩; E 为隧道结构弹性模量; I 为隧道横截面惯性矩.

考虑到隧道单元体受力变形情况(见图2),获得单元体竖向受力平衡方程:

静力平衡,

$$Q + dQ + p_1(x)Ddx = Q + q(x)Ddx \quad (7)$$

弯矩平衡,

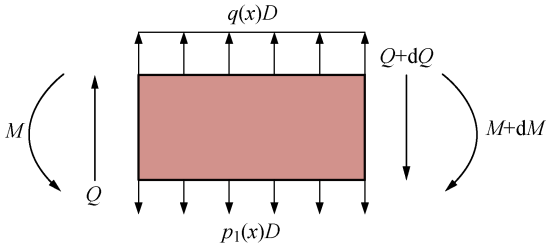


图2 单元受力分析

Fig. 2 Force analysis of element

$$M + dM + (Q + dQ)dx + p_1(x)D \frac{(dx)^2}{2} = q(x)D \frac{(dx)^2}{2} + M \quad (8)$$

式中: Q 为单元体所受的剪力; dx 为单元体宽度; dQ 和 dM 分别为单元体沿着 x 方向的剪力和弯矩增量。

假设其剪切层满足

$$\frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} = -\frac{M_s}{EI} \quad (9)$$

式中: M_s 为剪切层的弯矩。

结合式(5)~(9),可得:

$$\frac{EIG}{Dc} \frac{d^6 w_2(x)}{dx^6} - \frac{EI(c+k)}{Dc} \frac{d^4 w_2(x)}{dx^4} +$$

$$G \frac{d^2 w_2(x)}{dx^2} - k w_2(x) = -q(x) \quad (10)$$

式(10)为6阶平衡微分方程,是将隧道简化成 Euler-Bernoulli 梁搁置在 Kerr 地基模型上的控制方程,考虑到方程为高阶非齐次方程,较难得到解析解,可利用差分法将其简化成:

$$A_1(w_2)_{i-3} + B_1(w_2)_{i-2} + C_1(w_2)_{i-1} + D_1(w_2)_i + C_1(w_2)_{i+1} + B_1(w_2)_{i+2} + A_1(w_2)_{i+3} = -q_i \quad (11)$$

式中: $i = 0, 1, \dots, n$; A_1, B_1, C_1, D_1 均为式(10)简化后系数; $(w_2)_i$ 为隧道第 i 个节点处地基剪切层位移; q_i 为基坑开挖引起隧道 x 方向上第 i 点的附加应力。利用差分特性可知:

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_1 \\ D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ -6 & -1 & 0 & 0 \\ 15 & 4 & 10 & 0 \\ -20 & -6 & -2 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} EIG/Dcl^6 \\ EI(c+k)/Dcl^4 \\ G/l^2 \\ k \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: l 为差分节点单元长度, $l = L/n$, L 为隧道轴线长度,隧道离散有 $n+7$ 个节点单元(首尾共有6个虚拟单元),隧道单元离散化如图3所示。

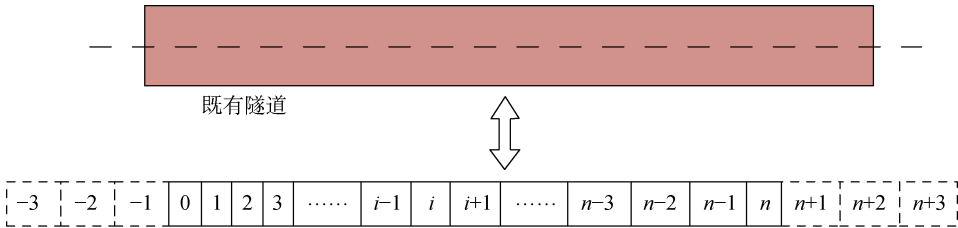


图3 隧道单元离散化

Fig. 3 Discretization of tunnel element

最后,隧道的纵向位移(即隧道竖向变形) $w(x)$ 、弯矩 $M(x)$ 、剪力 $Q(x)$ 的表达式为

$$w_i = \left(1 + \frac{k}{c}\right) w_2 - \frac{G}{c} \frac{d^2 w_2}{dx^2} = -\frac{G}{cl^2} (w_2)_{i-1} + \left(\frac{c+k}{c} + \frac{2G}{cl^2}\right) (w_2)_i - \frac{G}{cl^2} (w_2)_{i+1} \quad (13)$$

$$M_i = -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \Big|_i = -EI \left(\gamma \frac{d^2 w_2}{dx^2} - \frac{G}{c} \frac{d^4 w_2}{dx^4} \right)_i = -EI \left[-\frac{G}{cl^4} (w_2)_{i+2} + \left(\frac{\gamma}{l^2} + \frac{4G}{cl^4} \right) (w_2)_{i+1} - \left(\frac{2\gamma}{l^2} + \frac{6G}{cl^4} \right) (w_2)_i + \left(\frac{\gamma}{l^2} + \frac{4G}{cl^4} \right) (w_2)_{i-1} - \frac{G}{cl^4} (w_2)_{i-2} \right] \quad (14)$$

$$Q_i = \frac{dM}{dx} \Big|_i = -EI \left(\gamma \frac{d^3 w_2}{dx^3} - \frac{G}{c} \frac{d^5 w_2}{dx^5} \right)_i = -EI \left[-\frac{G}{2cl^5} (w_2)_{i+3} + \left(\frac{\gamma}{2l^3} + \frac{5G}{2cl^5} \right) (w_2)_{i+2} - \left(\frac{\gamma}{l^3} + \frac{7G}{2cl^5} \right) (w_2)_{i+1} + \left(\frac{\gamma}{l^3} + \frac{7G}{2cl^5} \right) (w_2)_{i-1} - \left(\frac{\gamma}{2l^3} + \frac{5G}{2cl^5} \right) (w_2)_{i-2} + \frac{G}{2cl^5} (w_2)_{i-3} \right] \quad (15)$$

式中: w_i, M_i, Q_i 分别为隧道 x 方向上第 i 点的隆起位移、弯矩、剪力; $\gamma = 1 + \frac{k}{c}$ 。

为了消去6个虚拟单元,可根据实际两端边界条件进行简化,无限长隧道两端受到基坑开挖的影

响很小,可将两端简化成两个自由端,这样可知隧道自由端弯矩 $M = 0$,剪切层弯矩 $M_s = 0$,剪力 $Q = 0$,即

$$\left. \begin{aligned} M_{S_0} &= -EI \frac{d^2 w_2}{dx^2} \Big|_{i=0} = 0 \\ M_0 &= -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \Big|_{i=0} = 0 \\ Q_0 &= \frac{dM}{dx} \Big|_{i=0} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{S_n} &= -EI \frac{d^2 w_2}{dx^2} \Big|_{i=n} = 0 \\ M_n &= -EI \frac{d^2 w}{dx^2} \Big|_{i=n} = 0 \\ Q_n &= \frac{dM}{dx} \Big|_{i=n} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

$K =$

$$\begin{bmatrix} D_1 + 2C_1 + 4B_1 + 8A_1 & -4B_1 - 10A_1 & 2B_1 + 2A_1 & 2A_1 & & & & & & \\ C_1 + 2B_1 + 2A_1 & D_1 - B_1 & C_1 - A_1 & B_1 & A_1 & & & & & \\ B_1 + 2A_1 & C_1 - A_1 & D_1 & C_1 & B_1 & A_1 & & & & \\ A_1 & B_1 & C_1 & D_1 & C_1 & B_1 & A_1 & & & \\ & & A_1 & B_1 & C_1 & D_1 & C_1 & B_1 & A_1 & \\ & & & A_1 & B_1 & C_1 & D_1 & C_1 & B_1 & A_1 \\ & & & & A_1 & B_1 & C_1 & D_1 & C_1 & B_1 & A_1 \\ & & & & & A_1 & B_1 & C_1 & D_1 & C_1 & B_1 & A_1 \\ & & & & & & A_1 & B_1 & C_1 & D_1 & C_1 & B_1 & A_1 \\ & & & & & & & A_1 & B_1 & C_1 & D_1 & C_1 & B_1 & A_1 \end{bmatrix}_{(n+1) \times (n+1)}$$

至此,得到 $w_2(x)$ 位移的解析解,将得到的结果代入式 (13) ~ (15) 即可得到隧道的 $w(x)$ 、 $M(x)$ 、 $Q(x)$. 值得注意的是,当 Kerr 地基模型中 $c=0$ 时,本文解析退化成 Euler-Bernoulli 梁下 Pasternak 地基模型解析.

1.3 Kerr 地基模型参数确定

Kerr 地基模型参数的确定对于计算结果的正确性起到关键作用,根据简化弹性空间法^[24]可以得到:

$$\left. \begin{aligned} c &= 3k \\ k &= 4E_s/(3z_0) \\ G &= 2E_s z_0/[9(1 + \nu)] \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

式中: E_s 和 ν 分别为土体弹性模量和泊松比. 然而,简化弹性空间法虽然操作简便,但由于引入许多假设,从而导致计算精度并不高,故需要调整各个参数取值来满足实测要求. 为了得到更精确的计算结果, Klar 等^[25]提出了可考虑实际工况下的修正地基基床系数:

$$\left. \begin{aligned} c &= 1.9k \\ k &= 4E_s/(3z_0) \\ G &= 2E_s z_0/[9(1 + \nu)] \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中: M_0 、 M_n 分别为隧道第 0 个节点、第 n 个节点处弯矩; M_{S_0} 、 M_{S_n} 分别为隧道第 0 个节点、第 n 个节点处剪切层弯矩; Q_0 、 Q_n 分别为隧道第 0 个节点、第 n 个节点处剪力.

此时可以根据边界情况得到 $w_2(x)$ 的矩阵近似解为

$$w_2 = -qK^{-1} \quad (18)$$

式中: K 为求解式 (10) 的向量矩阵; w_2 、 q_i 表示如下:

$$\left. \begin{aligned} w_2 &= [(\omega_2)_0 \quad (\omega_2)_1 \quad \cdots \quad (\omega_2)_{n-1} \quad (\omega_2)_n]^T \\ q_i &= [q_0 \quad q_1 \quad \cdots \quad q_{n-1} \quad q_n]^T \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

K 可表示为

1.4 隧道附加应力计算

图 4 所示为邻近矩形基坑建在既有隧道上方,其中基坑长、宽分别为 L_1 、 B_1 . 以基坑中点 O 作为全局坐标系的原点,经过 O 点以基坑长边为方向建立坐标系 x 轴正方向,经过 O 点以基坑短边为方向建

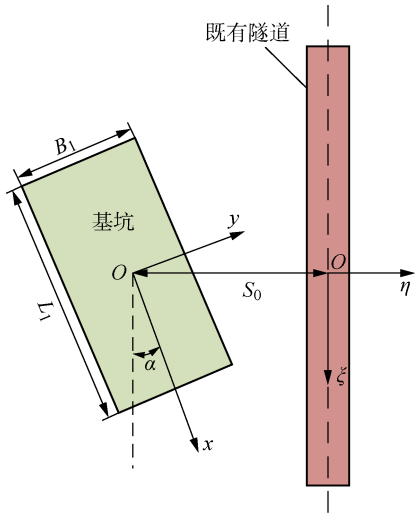


图 4 基坑与既有隧道相对位置俯视图
Fig. 4 Top view of correlation position between existing tunnel and excavation

立坐标系 y 轴正方向。为了研究隧道不与基坑边缘平行的情况,建立辅助坐标系 $\xi O'\eta$,以 O' 建立关于隧道轴线的平面坐标系,隧道轴线方向为 ξ 方向,与 ξ 方向垂直建立 η 方向。隧道轴线与基坑中心 O 点的最短距离为 S_0 ,隧道轴线方向与全局坐标成 α 角,利用 Mindlin 解,可求得邻近基坑开挖对下卧隧道中线位置处的附加应力。

基坑坑底卸荷作用在隧道轴线的附加应力由 Mindlin 解得,隧道轴线上任一点 (ξ, η, z_0) 在坑底矩形均布荷载单位力 $p dx dy$ ($p = \gamma_s H, \gamma_s$ 为土体重度) 作用下引起隧道纵向附加应力 $q(x)$, 其计算式为

$$q(x) = \int_{-\frac{B_1}{2}}^{\frac{B_1}{2}} \int_{-\frac{L_1}{2}}^{\frac{L_1}{2}} \frac{p d\xi d\eta}{8\pi(1-\nu)} \left[-\frac{(1-2\nu)(z_0-H)}{R_1^3} - \frac{30Hz_0(z_0+H)^3}{R_2^7} - \frac{3(z_0-H)^3}{R_1^5} - \frac{3(3-4\nu)z_0(z_0+H)^2-3H(z_0+H)(5z_0-H)}{R_2^5} + \frac{(1-2\nu)(z_0-H)}{R_2^3} \right] \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z_0-H)^2} \\ R_2 &= \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z_0+H)^2} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

式中: (x_1, y_1) 为在 $\xi O'\eta$ 坐标系下点 (ξ, η) 投射在 xOy 坐标系中的坐标。

由于隧道轴线与坑壁不是平行关系,需要将隧道轴线上的坐标系纳入基坑的全局坐标系,将 $\xi O'\eta$ 坐标系纳入 xOy 坐标系中,其关系如下:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \eta \sin \alpha + S_0 \sin \alpha \\ y_1 &= \eta \cos \alpha + S_0 \cos \alpha \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

2 算例验证

为了验证本文方法的准确性,收集了上海外滩地下通道基坑上跨既有延安东路隧道工程^[6]及上海东方路交叉路路口基坑开挖上跨浅埋 2 号地铁线工程^[17]的实测数据及相关研究文献,并与本文方法计算结果进行了对比分析。

2.1 上海外滩地下通道基坑上跨既有延安东路隧道工程

上海外滩地下通道基坑可简化成矩形基坑,基坑长、宽、深分别为 50、10、11 m。既有的延安东路隧道是较长距离公路隧道,可分为南北两条隧道,隧道外径为 11 m,衬砌厚度为 55 cm,基坑长边与南北两条线隧道的夹角分别为 90° 和 75° ,其中基坑坑底与南北两条线隧道拱顶的距离分别为 7.1 和 5.4 m。

基于近距离开挖引起邻近隧道变形响应,黄宏伟等^[6]利用有限元软件建立基坑开挖引起邻近既有隧道力学变形响应的三维模拟分析,与现场实测数据进行了对比,并给出了北线隧道的实测数据以及有限元数据对比结果。为了凸显本文方法的合理性,本算例也取隧道北线变形进行计算,计算简图如图 5 所示。场地地质条件及土体参数详见文献^[6]。

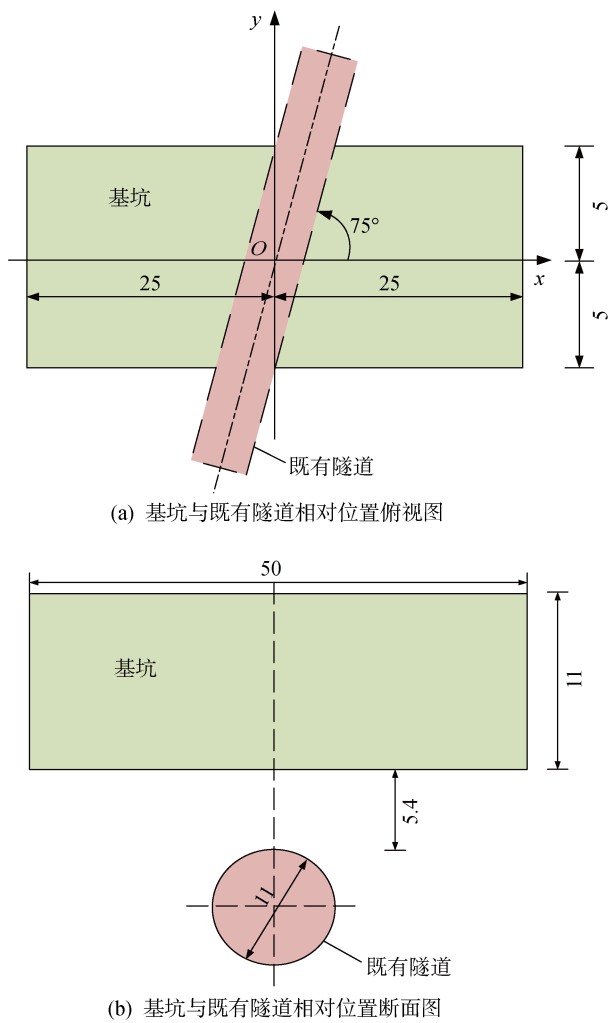


图 5 基坑与既有隧道相对位置图(m)
Fig. 5 Relative position between existing tunnel and excavation (m)

由志波由纪夫等^[26]方法可计算出隧道的抗弯刚度为 $399 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$ 。其隧道埋深 20.9 m,隧道位于④淤泥质黏土中,地基土弹性模量取 30.8 MPa。图 6 所示为本文计算结果与工程实测和有限元数据(图中表示为 FEM)的对比,其中工程实测和有限元数据来自文献^[6]。由图 6 可见,3 种不同手段获得的隧道竖向变形趋势是一样的,通过本文方法计算得到的隧道纵向最大位移为 7.8 mm,略大于实测最大位移 6.6 mm。有限元数据计算得到最大位移

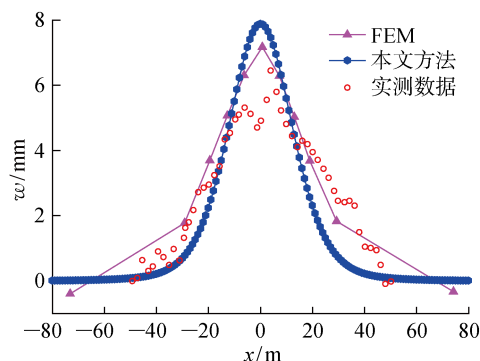


图6 隧道纵向计算、有限元及实测数据对比

Fig. 6 Comparison of calculated, finite element and measured results of longitudinal deformation of tunnel

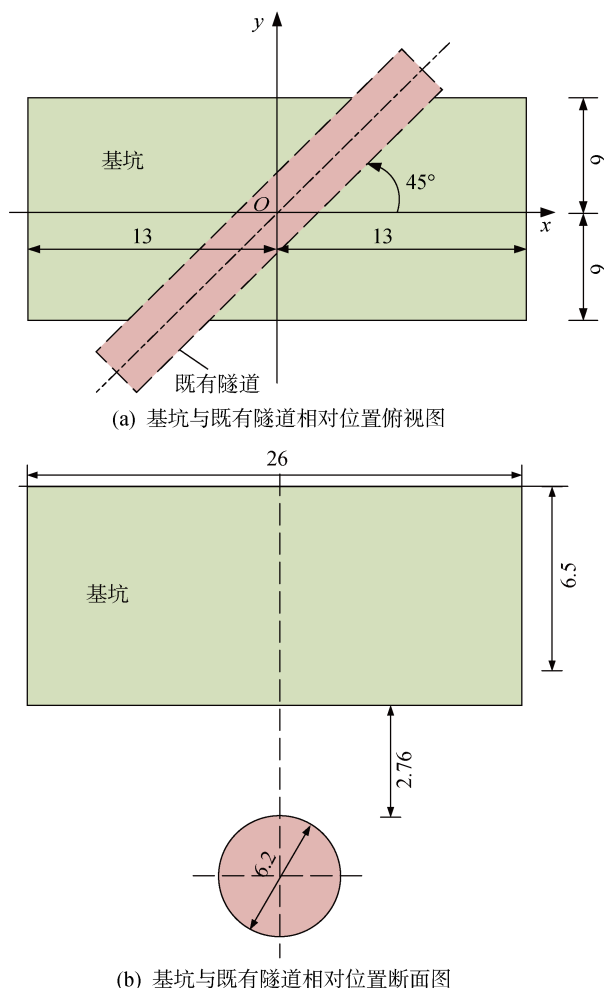
为 7.2 mm,更贴近实测数据,这是由于考虑到工程实际概况中隧道隔离墙的分隔作用抑制了基坑开挖对下卧隧道的影响,在模拟时可将此因素纳入数据处理的结果中。由于本文简化计算方法比较理想化,所得出来的计算结果会稍大于数值模拟结果,但是总体来说,本文计算结果与既有有限元和实测数据较为符合,验证了本文方法的合理性,在误差允许的范围内,本文方法仍具有一定的参考价值。

2.2 上海东方路交叉路路口基坑开挖上跨浅埋2号地铁线工程

上海东方路交叉路路口基坑^[17]位于上海浦东新区,为了简化计算,可将其简化成矩形基坑,基坑长度为 26 m,宽度为 18 m,开挖深度为 6.5 m。上海地铁 2 号线从基坑底部近距离穿过,2 号线隧道采用暗挖盾构施工方式建造,隧道外径为 6.2 m,衬砌厚度为 35 cm,隧道轴线与地面的竖向净距约为 12.36 m,隧道顶部与基坑竖向净距约为 2.76 m,基坑边缘与既有隧道形成夹角 45°。上海地铁 2 号线是上海地区客流量最多的地铁线路之一,因此需要进行必要的监测技术以确保地铁 2 号线的安全。基于此,实际工程过程中采取了一系列措施以保证隧道变形在合理的范围内。Liang^[17]对本工程概况和实测结果分析进行了详述。本算例同样基于此工况展开研究,计算简图如图 7 所示,并将本文方法得到的两种计算结果和实测数据进行了对比。

由志波由纪夫等^[26]法可计算隧道的抗弯刚度为 $136 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$ 。既有隧道位于淤泥质黏土土层中,隧道位于④淤泥质黏土中,但是考虑到地层土的改善,地基土弹性模量取 20 MPa ^[17]。将本文 Kerr 地基模型中参数 c 取值为 0 时,此时隧道将简化成 Euler-Bernoulli 梁搁置在 Pasternak 地基模型上。图 8 所示为两种计算结果与工程实测数据的对比,其

中工程实测数据来自文献[17],图中 E-P 法代表 Euler-Bernoulli 梁搁置在 Pasternak 地基模型上。从图 8 可以看出,由于 E-P 法没有考虑参数 c ,使得计算结果与实测数据偏差较大。本文方法考虑了 c 的



(b) 基坑与既有隧道相对位置断面图

图7 基坑与既有隧道相对位置图(m)

Fig. 7 Relative position between existing tunnel and excavation (m)

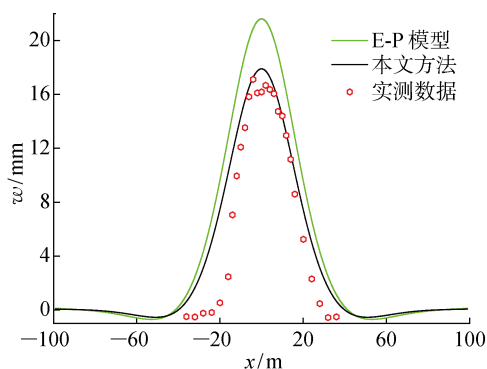


图8 隧道纵向变形计算及实测数据对比

Fig. 8 Comparison of calculation and measured results of longitudinal deformation of tunnel

影响,计算结果与实测数据较为符合,其结果仍稍大于实测数据,这是由于实际工程中采取很多措施以防止隧道隆起,而本文无法考虑这些因素. 总体来说,通过与实测数据对比,本文方法仍具有较强的合理性和准确性,对相关工程起到一定的借鉴意义.

3 参数分析

为了研究地基弹性模量、隧道轴线埋深以及隧道刚度变化对既有隧道受力变形的影响,假设其工程概况为:基坑长、宽、高为 50、20、10 m,土体弹性模量 $E_s = 20 \text{ MPa}$,隧道轴线距离地表深度 $z_0 = 15 \text{ m}$,土体泊松比 $\nu = 0.35$,隧道与基坑边缘夹角 $\alpha = 0^\circ$,土体重度 $\gamma_s = 18 \text{ kN/m}^3$,隧道刚度 $EI = 136 \text{ GN} \cdot \text{m}^2$,隧道直径 $D = 6.2 \text{ m}$,基坑与隧道中心距离 $S_0 = 0$. 本文在研究某一参数对隧道-土相互作用的影响时,其余参数不变.

3.1 土体模量变化对隧道受力变形的影响

为了研究隧道受力变形与地基模量之间的关系,取 6 组不同的土体模量进行分析,分别为 $E_s = 5, 10, 20, 40, 80, 150 \text{ MPa}$,并采用本文方法计算隧道变形及弯矩.

图 9 和 10 分别为不同地基模量下,采用本文方法计算得到的隧道竖向位移曲线和最大位移 w_{\max} 变化曲线. 从图 9 可以看出,隧道位移曲线呈现出正对称分布特点,随着地基模量的增大,隧道位移迅速减小且其影响范围也在逐渐减小,在地基弹性模量从 5 MPa 增加到 150 MPa 过程中,隧道最大隆起位移降到开始的 7.1%,隧道正向隆起范围从 $\pm 50 \text{ m}$ 减小到 $\pm 20 \text{ m}$. 从图 10 可以看出,地基模量增加时,隧道最大变形位移量逐渐减小,其减小速率在变缓.

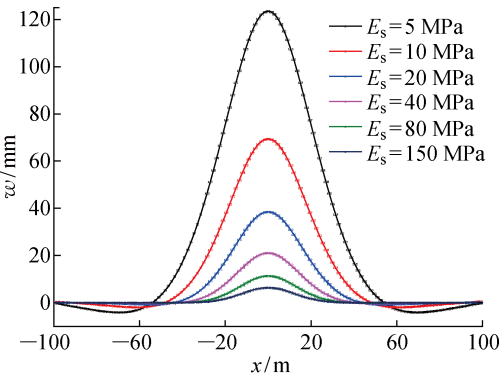


图 9 隧道-土在不同地基模量下隧道位移曲线
Fig. 9 Deflection curves of tunnel in different elastic model conditions

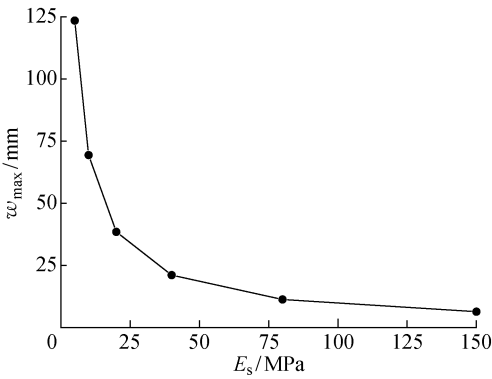


图 10 隧道-土在不同地基模量下隧道最大位移曲线
Fig. 10 Maximum deflection curves of tunnel in different elastic model conditions

图 11 和 12 分别为不同地基模量下,采用本文方法计算得到的隧道弯矩和最大弯矩 M_{\max} 变化曲线. 由图 11 可以看出,弯矩变化曲线呈现出正对称分布的特点,随着地基模量的逐渐增大,隧道的正、负弯矩值均迅速减小,当地基模量达到 150 MPa 时,基坑开挖引起邻近隧道弯矩值较小. 隧道最大正

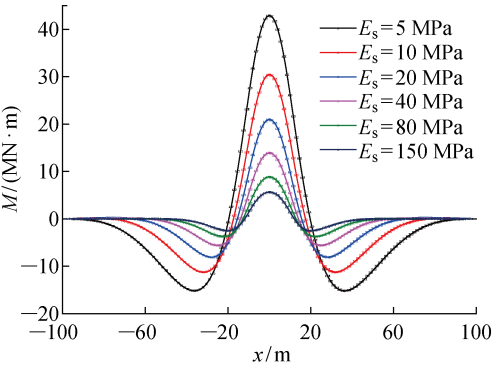


图 11 隧道-土在不同地基模量下隧道弯矩曲线
Fig. 11 Bending moment curves of tunnel in different elastic model conditions

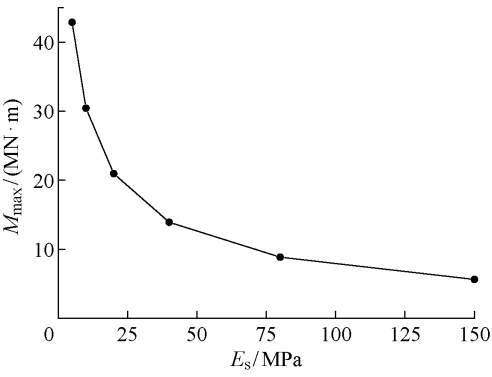


图 12 隧道-土在不同地基模量下隧道最大弯矩曲线
Fig. 12 Maximum bending moment curve of tunnel in different elastic model conditions

弯矩值均出现在隧道中轴线处,即 $x=0$ 处,随着地基模量的增大,隧道最大负弯矩则由远离隧道轴线处向轴线中心靠近,由此可得地基模量变化不会引起隧道正弯矩位置改变,但最大负弯矩位移则逐渐向隧道中心线靠拢. 从图 12 可以看出,随着地基模量的增加,隧道最大弯矩值在减小,且其速率也在变缓,当地基模量增加到 150 MPa 时,弯矩为之前的 12.8%.

图 13 和 14 分别为不同地基模量下,采用本文方法计算得到的隧道剪力和最大剪力 Q_{\max} 变化曲线. 由图 13 可以看出,与位移和弯矩曲线不同,剪力曲线呈现出反对称分布的特点,随着地基模量的逐渐增大,隧道的正、负剪力值均迅速减小. 由于剪力图为反对称图形,以 $x>0$ 侧为例,随着地基模量的增大,隧道最大负弯矩和最大正弯矩均由远离隧道轴线处向隧道轴线中心靠近,由此可得地基模量变化不会引起隧道剪力分布出现慢慢“紧缩”的状态. 从图 14 可以看出,地基模量的增加,隧道最大剪力值会逐渐减小,但其速率也在减小,当地基模量增加

到 150 MPa 时,剪力为之前数值的 19.8%.

3.2 隧道轴线埋深变化对隧道受力变形的影响

为了研究隧道受力变形与隧道轴线深度之间的关系,取 6 组不同的隧道轴线埋深进行分析,分别为 $z_0=14, 18, 22, 26, 30, 34$ m,并采用本文方法计算隧道变形及内力.

图 15~17 分别为不同隧道轴线埋深下,采用本文方法计算得到的隧道纵向最大位移 w_{\max} 、最大弯矩 M_{\max} 和最大剪力 Q_{\max} 变化曲线. 从图 15 可以看出,随着隧道埋深的增大,隧道的纵向位移从 39 mm 逐渐减小到 21 mm,降幅接近 46%,其速率基本保持不变. 但是由图 16 可以看出,随着隧道埋深的增大,弯矩降幅接近 69%,其降幅速度也在逐渐减小. 由图 17 可以看出,隧道剪力值随着隧道埋深的增大也会逐渐减小,降幅接近 80%,降幅速度也在减小. 总体而言,随着隧道埋深的增加,隧道变形及其内力均在大幅度减小,说明隧道变形及其内力对基坑与隧道之间的间距的变化较为敏感,实际

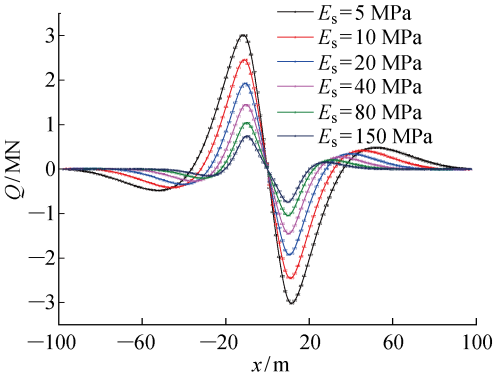


图 13 隧道-土在不同地基模量下隧道剪力曲线
Fig. 13 Shear force curves of tunnel in different elastic conditions

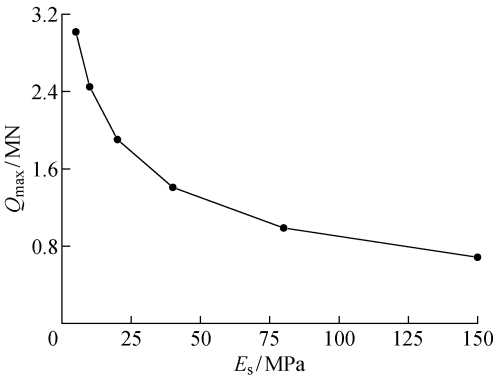


图 14 隧道-土在不同地基模量下隧道最大剪力曲线
Fig. 14 Maximum shear force curve of tunnel in different elastic model conditions

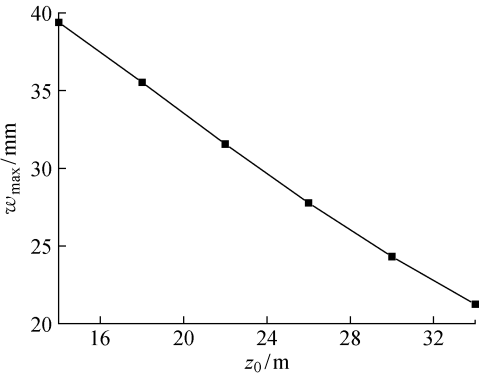


图 15 隧道-土在不同隧道轴线埋深下隧道最大位移曲线
Fig. 15 Maximum deflection curve of tunnel in different depths of tunnel axis

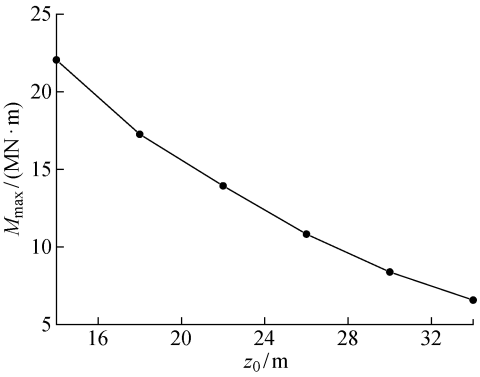


图 16 隧道-土在不同隧道轴线埋深下隧道最大弯矩曲线
Fig. 16 Maximum bending moment curve of tunnel in different depths of tunnel axis

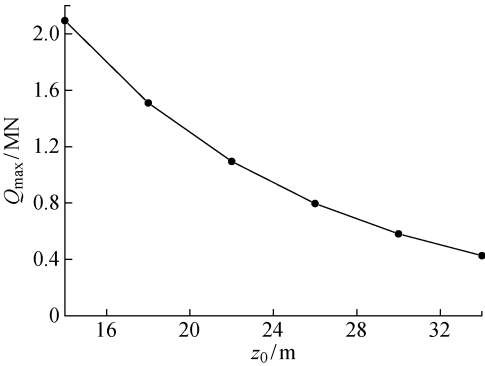


图 17 隧道-土在不同隧道轴心埋深下隧道最大剪力曲线
Fig. 17 Maximum shear force curve of tunnel in different depths of tunnel axis

工程中可通过增大基坑-隧道间距来降低基坑开挖对邻近下卧隧道的影响。

3.3 隧道刚度变化对隧道受力变形的影响

为了研究隧道受力变形与隧道刚度之间的关系,取 7 组不同的隧道刚度进行分析,取为 $\phi = \alpha_s(EI)$, 其中 ϕ 为参数分析隧道抗弯刚度值, α_s 为初始隧道抗弯刚度修正系数,系数可取为 $\alpha_s = 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 50, 100$, 采用本文方法计算隧道变形及内力。

图 18~20 分别为不同隧道刚度下,采用本文方法计算得到的隧道纵向最大位移 w_{\max} 、最大弯矩 M_{\max} 和最大剪力 Q_{\max} 变化曲线。从图 18 可以看出,随着隧道刚度的增大,隧道的纵向位移从 49 mm 逐渐减小到 17 mm,降幅接近 65%,减小速率逐渐缓慢。但是由图 19 可以看出,随着隧道刚度的增大,弯矩增幅接近 42 倍,增幅速度也在逐渐减小。由图 20 可以看出,隧道剪力值随着隧道刚度的增大也会迅速增大,增幅接近 7.7 倍,增幅速度也在减小。出现此种情况的原因是,随着隧道刚度的增大,隧道抵抗

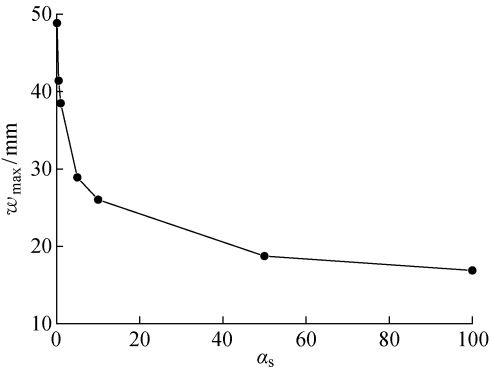


图 18 隧道-土在不同隧道刚度下隧道最大位移曲线
Fig. 18 Maximum deflection curve of tunnel in different stiffnesses of tunnel

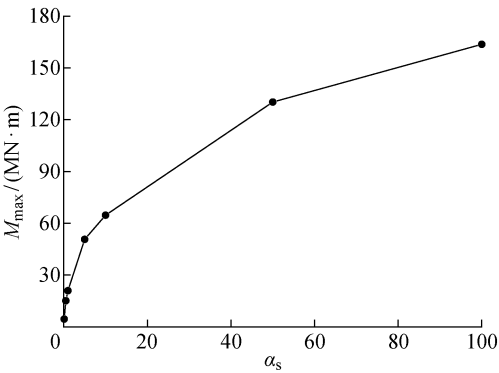


图 19 隧道-土在不同隧道刚度下隧道最大弯矩曲线
Fig. 19 Maximum bending moment curve of tunnel in different stiffnesses of tunnel

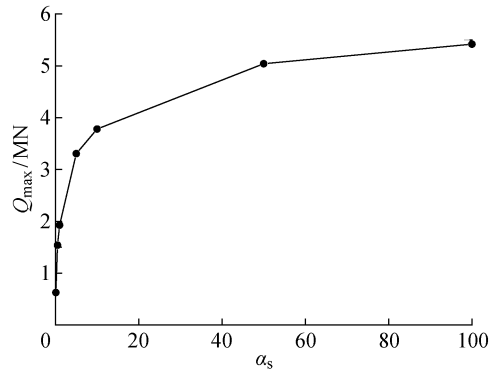


图 20 隧道-土在不同隧道刚度下隧道最大剪力曲线
Fig. 20 Maximum shear force curve of tunnel in different stiffnesses of tunnel

变形的能力逐渐增加,基坑开挖对隧道轴线处的附加应力主要由周围土体承受转换到既有隧道来承受。但总体而言,随着隧道刚度的增加,隧道变形在逐渐减小但其内力却在大幅度增大,考虑到隧道变形及其内力行业规范的要求,在实际工程中选取适当的隧道管片刚度对隧道建设是非常有意义的。

4 结论

本文基于两阶段法提出了一种可应用于估算基坑开挖引起下卧既有隧道变形响应的简化计算方法。得到的结论如下:

(1) 将隧道简化成无限长的 Euler-Bernoulli 梁,将其搁置在三参数 Kerr 地基模型上,提出了剪切层弯矩计算的假设,采用有限差分法并考虑隧道两端的边界条件得到隧道纵向变形解析解。

(2) 将收集到的上海外滩地下通道基坑上穿已建延安路隧道工程和上海东方路交叉路口基坑开挖上跨浅埋 2 号地铁线工程实测数据,与本文计算方法进行对比,分析得出本文计算结果与实测数

据及有限元结果基本吻合. 相比于 Pasternak 地基模型, 本文方法更具有优越性.

(3) 本文对基坑开挖对邻近下卧隧道纵向受力变形不同影响因素的研究结果表明, 随着地基模型的增大, 基坑开挖对下卧隧道的影响呈现非线性减小, 但当地基模型足够大时(如参数分析中地基模型达到 150 MPa), 基坑开挖对下卧隧道几乎无影响. 隧道埋深的增加会引起隧道变形及其内力近乎线性减小, 隧道刚度的增大会引起隧道变形非线性减小, 但会导致隧道内力非线性增大.

参考文献:

- [1] ZHANG X M, OU X F, YANG J S, *et al.* Deformation response of an existing tunnel to upper excavation of foundation pit and associated dewatering[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2017, 17(4): 04016112.
- [2] 陈仁朋, 孟凡衍, 李忠超, 等. 邻近深基坑地铁隧道过大位移及保护措施[J]. **浙江大学学报(工学版)**, 2016, 50(5): 856-863.
CHEN Renpeng, MENG Fanyan, LI Zhongchao, *et al.* Considerable displacement and protective measures for metro tunnels adjacent deep excavation[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2016, 50(5): 856-863.
- [3] YONG T, YE L. Responses of shallowly buried pipelines to adjacent deep excavations in Shanghai soft ground[J]. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, 2018, 9(2): 05018002.
- [4] ZHENG G, YANG X Y, ZHOU H Z, *et al.* A simplified prediction method for evaluating tunnel displacement induced by laterally adjacent excavations[J]. **Computers and Geotechnics**, 2018, 95: 119-128.
- [5] ZHENG G, YANG X Y, ZHOU H Z, *et al.* Reply to the discussion on "A simplified prediction method for evaluating tunnel displacement induced by laterally adjacent excavations" by Far *et al* [J]. **Computers and Geotechnics**, 2019, 109: 297.
- [6] 黄宏伟, 黄栩, SCHWEIGER F H. 基坑开挖对下卧运营盾构隧道影响的数值模拟研究[J]. **土木工程学报**, 2012, 45(3): 182-189.
HUANG Hongwei, HUANG Xu, SCHWEIGER F H. Numerical analysis of the influence of deep excavation on underneath existing road tunnel[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2012, 45(3): 182-189.
- [7] WEN X, PANG C R. Influence of foundation pit excavation on existing shield tunnel and its protection range[J]. **Applied Mechanics and Materials**, 2014, 580-583: 1258-1263.
- [8] ZHENG G, WEI S W. Numerical analyses of influence of overlying pit excavation on existing tunnels [J]. **Journal of Central South University of Technology**, 2008, 15(2): 69-75.
- [9] 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.
- [10] LI M G, CHEN J J, WANG J H, *et al.* Comparative study of construction methods for deep excavations above shield tunnels[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 71: 329-339.
- [11] NG C W W, SUN H S, LEI G H, *et al.* Ability of three different soil constitutive models to predict a tunnel's response to basement excavation[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52(11): 1685-1698.
- [12] NG C W W, SHI J W, MAŠÍN D, *et al.* Influence of sand density and retaining wall stiffness on three-dimensional responses of tunnel to basement excavation [J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52(11): 1811-1829.
- [13] 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.
- [14] HUANG X, HUANG H W, ZHANG D M. Centrifuge modelling of deep excavation over existing tunnels[J]. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering**, 2014, 167(1): 3-18.
- [15] ZHANG J F, CHEN J J, WANG J H, *et al.* Prediction of tunnel displacement induced by adjacent excavation in soft soil[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2013, 36: 24-33.
- [16] ZHANG Z G, HUANG M S, WANG W D. Evaluation of deformation response for adjacent tunnels due to soil unloading in excavation engineering[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2013, 38: 244-253.
- [17] LIANG R Z, WU W B, YU F, *et al.* Simplified method for evaluating shield tunnel deformation due to adjacent excavation [J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2018, 71: 94-105.
- [18] 康成, 叶超, 梁荣柱, 等. 基坑开挖诱发下卧盾构隧道纵向非线性变形研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2020, 39(11): 2341-2350.
KANG Cheng, YE Chao, LIANG Rongzhu, *et al.* Nonlinear longitudinal deformation of underlying

- shield tunnels induced by foundation excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(11): 2341-2350.
- [19] ZHANG Z, ZHANG M, ZHAO Q. A simplified analysis for deformation behavior of buried pipelines considering disturbance effects of underground excavation in soft clays[J]. **Arabian Journal of Geosciences**, 2015, 8(10): 7771-7785.
- [20] 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.
- LIANG Rongzhu, LIN Cungang, XIA Tangdai, *et al.* Analysis on the longitudinal deformation of tunnels due to pit excavation considering the tunnel shearing effect[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2017, 36(1): 223-233.
- [21] LIANG R Z, XIA T D, HUANG M S, *et al.* Simplified analytical method for evaluating the effects of adjacent excavation on shield tunnel considering the shearing effect[J]. **Computers and Geotechnics**, 2017, 81: 167-187.
- [22] 应宏伟, 程康, 俞建霖, 等. 考虑地基变形连续的基坑开挖诱发邻近盾构隧道位移预测[J]. **浙江大学学报(工学版)**, 2021, 55(2): 318-329.
- YING Hongwei, CHENG Kang, YU Jianlin, *et al.* Prediction of shield tunnel displacement due to adjacent basement excavation considering continuous deformation of ground[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2021, 55(2): 318-329.
- [22] 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.
- ZHANG Zhiguo, ZHANG Mengxi, WANG Weidong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 2085-2092.
- [23] 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(Sup.1): 195-207.
- XU Riqing, CHENG Kang, YING Hongwei, *et al.* Deformation response of a tunnel under foundation pit unloading considering buried depth and shearing effect[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(Sup.1): 195-207.
- [24] MORFIDIS K. Research and development of methods for the modeling of foundation structural elements and soil[D]. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki, 2003.
- [25] KLAR A, VORSTER T E B, SOGA K, *et al.* Soil-pipe interaction due to tunnelling: Comparison between Winkler and elastic continuum solutions[J]. **Géotechnique**, 2005, 55(6): 461-466.
- [26] 志波由纪夫, 川島一彦, 大日方尚己, 等. シールドトンネルの耐震解析に用いる長手方向覆工剛性の評価法[C]//**土木学会論文集**. 日本: 土木学会論文編集委員会, 1988: 319-327.

(本文编辑:陈晓燕)