

基坑开挖卸载对下卧已建盾构隧道变形计算方法 的改进

李俊逸¹, 潘丽东², 胡敏云^{1*}, 彭孔曙³

(1. 浙江工业大学 岩土工程研究所, 浙江 杭州 310014; 2. 浙江保利房地产开发有限公司, 浙江 杭州 310000;
3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311100)

摘 要:针对基坑开挖引起的下卧隧道隆起变形问题,本文介绍了基于 Kerr 地基模型的二阶段法理论计算方法;根据国内东部地区 17 个基坑开挖卸载对已建下卧盾构隧道工程影响的监测资料分析,提出了考虑工程措施影响的隧道最大隆起量估算公式;结合具体工程,比较了理论计算方法、经验估算公式与实测数据,结果表明理论方法具有合理性但是存在较大的计算误差。为此,根据经验最大隆起量对基于 Kerr 地基模型的二阶段法进行了修正,提出了可考虑采用工程控制措施的下卧已建盾构隧道竖向变形计算方法。最后,结合某工程实例的数值模拟及实测数据,对本文提出的方法进行了检验。

关键词: 基坑卸载; 下卧隧道; Kerr 地基模型; 最大隆起量

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2019)03-0010-10

作者简介: 李俊逸 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩土工程方面的研究工作。E-mail: 2111906030@zjut.edu.cn。

A modified calculation method of heave deformation of underlying tunnel caused by excavation

LI Jun-yi¹, PAN Li-dong², HU Min-yun^{1*}, PENG Kong-shu³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;
2. Poly Zhejiang Real Estate Development Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;
3. Power China Huadong Engineering Corporation Ltd., Hangzhou 311100, China)

Abstract: Aiming at the calculation of heave deformation of underlying tunnel caused by excavation, this paper introduces the two-stage method based on Kerr foundation model. According to the analysis of the monitoring data from 17 analogical cases in eastern China, the empirical estimation formula for maximum heave deformation of underlying tunnel and the associated impact engineering control measures is proposed. Combining both engineering and theoretical calculation methods, the empirical estimation formula and the measured data were compared. The results showed that the theoretical method was very reasonable but was associated with large roundoff errors. Therefore, based on the empirical maximum heave deformation, the two-stage method with regard to Kerr foundation model was modified to establish the calculation method of the vertical deformation of underlying shield tunnel with some engineering control measures. Finally, the modified method was tested by comparing with both the numerical simulation and the measured data results.

Key words: excavation unloading; underlying tunnel; kerr foundation model; maximum heave deformation

0 引 言

随着我国各大城市地铁交通建设的推进和地下空间利用的发展,在已建下卧地铁盾构隧道的上方进行基坑施工的情况逐渐增多。地铁隧道上方基坑工程的施工会使已建隧道产生竖向位移、水平位

移和收敛变形,对已建地铁隧道的运营和维护产生不利影响,需要加以控制,其中往往以控制竖向隆起变形为主^[1]。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51878616)

收稿日期: 2019-12-10

*通讯作者: 胡敏云 (E-mail: huminyun@zjut.edu.cn)

为了认识基坑开挖卸载引起下卧已建盾构隧道隆起变形的机理并建立合理的计算方法, 工程技术人员开展了理论分析、工程实测和数值模拟研究。理论分析主要是采用弹性地基梁解析方法^[2-3], 可以获得基坑卸载影响下隧道纵向隆起变形计算公式。目前理论分析中采用的弹性地基模型有 Winkler 模型^[4]、在 Winkler 模型基础上增加一个剪切层使各弹簧间产生联系而得到的二参数 Pasternak 模型^[5]和对 Pasternak 模型进一步发展而得到的三参数 Kerr 地基模型^[6]。工程实测是认识隧道竖向变形规律最直接有效的方法。李志高等^[7]通过基坑开挖引起下卧隧道位移的实测分析发现隧道竖向隆起变形曲线与正态分布的曲线样式相似, 因此在基坑开挖的中间部位会出现隧道最大隆起量, 而隧道最大隆起量是衡量隧道安全与否的控制标准, 假如能在基坑开挖前合理地预测基坑开挖引起下卧已建盾构隧道的最大隆起量和隧道纵向隆起的主要影响范围, 将对后续的基坑工程设计和施工安排有着重要的参考依据。为此, 魏纲^[8]通过案例统计分析提出了预测隧道最大隆起量的经验公式, 该公式考虑了基坑卸载比 N 和基坑开挖宽度的影响, 但是没有反映堆载反压等工程控制措施对隧道隆起量的影响。数值模拟方法可以综合反映土层、工程参数及施工过程的影响, 胡瑞灵^[9]、李瑛等^[10]对此做了针对性的研究, 可为工程设计提供参考。

由上述可知, 虽然已有的各种研究做了有益的探索, 但是对于基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的计算, 现有的弹性地基梁模型考虑的地层情况过于理想化, 且没有考虑实际工程中为了控制隧道变形而采取的工程措施的影响; 最大隆起量的经验计算方法的可靠性有赖于大量工程实测的统计且缺乏理论依据, 还不能反映隧道纵向隆起变形特征和影响范围。

为了进一步探讨基坑卸载对下卧隧道竖向变形影响的合理计算方法, 本文结合国内类似工程案例实测分析, 修正了隧道最大隆起量的经验公式, 并将最大隆起量经验公式与基于 Kerr 地基模型二阶段法的理论方法相结合, 提出修正计算方法, 以期为基坑卸载引起的下卧隧道竖向变形的预测提供参考。

1 隧道纵向隆起变形理论分析方法

1.1 Kerr 地基模型的引入

在考虑开挖卸载对下卧已建盾构隧道隆起变形影响时, 常采用的分析方法是二阶段法, 所谓的

二阶段法就是将理论计算过程分成两个阶段, 第一阶段利用 Mindlin 弹性半空间应力解计算基坑开挖卸载引起下方盾构隧道结构的附加应力, 接着第二阶段基于 Kerr 地基模型将第一阶段得到的附加应力作用在隧道上, 进而得到了隧道纵向变形的计算方法。

Kerr 地基简化计算模型如图 1 所示。模型中包含了两个刚度分别为 c 和 k 的假想弹簧及一个剪切刚度为 G 的剪切层, 它的计算结果相比于 Winkler 模型、Pasternak 模型更加合理准确^[11]。因此为了得到更为精确的结果, 本文将采用基于 Kerr 地基模型的二阶段法来进行计算。

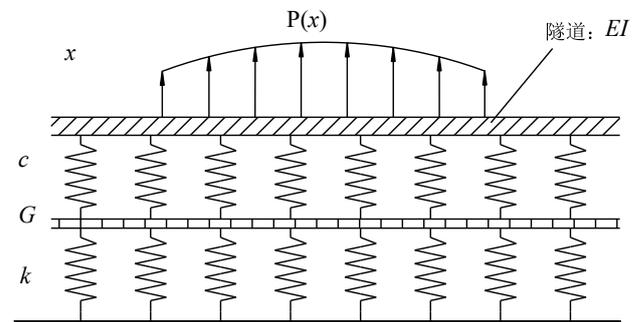


图 1 Kerr 地基模型

Figure 1 Kerr foundation model

1.2 二阶段法的计算过程

采用 Kerr 地基模型 (图 1) 计算在基坑开挖卸载作用下盾构隧道纵向变形情况时, 做以下假设:

(1) 已建盾构隧道视为 Kerr 弹性地基上的无限长梁, 其中该无限长梁宽度为 D , 刚度为 EI (EI 需考虑隧道管片接缝存在导致的刚度折减, 即引入隧道纵向刚度有效率);

(2) 隧道底与地基表面接触;

(3) 隧道变形与下方地基变形协调;

(4) 不考虑隧道与地基间的摩擦力及侧向土体作用。

假设隧道上作用的荷载为 $p(x)$, 在该荷载作用下隧道的挠度 w 为

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

w_1 为上层弹簧的变形量, w_2 为剪切层的变形量, 若隧道以及剪切层下方的应力分别为 q_1 与 q_2 :

$$q_1(x) = cw_1 = c(w - w_2) \quad (2)$$

$$q_2(x) = kw_2 \quad (3)$$

对于剪切层, 有:

$$q_1(x) = -G \frac{d^2 w_2}{dx^2} + k w_2 \quad (4)$$

通过式(2)、(4)可得:

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

隧道受荷的平衡微分方程为:

$$EI \frac{d^4 w}{dx^4} + q_1 D = p D \quad (6)$$

将式(4)、(5)代入(6),并化简得

$$\frac{d^6 w_2}{dx^6} - \frac{c+k}{G} \frac{d^4 w_2}{dx^4} + \frac{Dc}{EI} \frac{d^2 w_2}{dx^2} - \frac{Dkc}{EIG} w_2 = -\frac{Dc}{EIG} p \quad (7)$$

式(7)是以剪切层变形为未知量的六阶微分方程,解出 w_2 的表达式为

$$w_2(x) = A_1 e^{-\rho x} + A_2 e^{\rho x} + e^{-Mx} (A_3 \cos Nx + A_4 \sin Nx) + e^{Mx} (A_5 \cos Nx + A_6 \sin Nx) \quad (8)$$

上式中, ρ 可根据 Ψ_1 的值开方后得到, M 与 N 可根据 Ψ_2 与 Ψ_3 的值开方后得到, Ψ_1 、 Ψ_2 与 Ψ_3 的求解公式如下:

$$\psi_1 = \frac{c+k}{3G} + \frac{1}{3} \left[\sqrt[3]{\frac{1}{2}(S + \sqrt{S^2 + T})} + \sqrt[3]{\frac{1}{2}(S - \sqrt{S^2 + T})} \right] \quad (9)$$

$$\psi_{2,3} = \frac{c+k}{3G} - \frac{1}{6} \left[\sqrt[3]{\frac{1}{2}(S + \sqrt{S^2 + T})} + \sqrt[3]{\frac{1}{2}(S - \sqrt{S^2 + T})} \right] \pm \frac{\sqrt{3}}{6} i \left[\sqrt[3]{\frac{1}{2}(S + \sqrt{S^2 + T})} - \sqrt[3]{\frac{1}{2}(S - \sqrt{S^2 + T})} \right] \quad (10)$$

其中

$$S = 9abc - 2b^2 - 27a^2d, T = 4(3aC - b^3)$$

$$a = 1, b = -\frac{c+k}{G}, C = \frac{Dc}{EI}, d = -\frac{Dkc}{EIG}$$

式(7)是以剪切层变形为未知量的六阶微分方程,解出 w_2 的表达式并代入式(5)即可得到隧道的变形。首先求解Kerr地基上的盾构隧道受集中荷载作用的解,考虑问题的对称性,以下仅讨论 $x \geq 0$ 的部分。此时,式(7)的特解为 $w_2^* = 0$,同时考虑边界条件,当 x 趋近于 $+\infty$ 时,为 $w_2 = 0$,故 w_2 可化简为:

$$w_2(x) = A_1 e^{-\rho x} + e^{-Mx} (A_3 \cos Nx + A_4 \sin Nx) \quad (11)$$

另外 $x=0$ 时:

$$\begin{cases} \frac{dw}{dx} = 0 \\ \frac{dw_2}{dx} = 0 \\ EI \frac{d^3 w}{dx^3} = \frac{PD}{2} \end{cases}$$

通过以上边界条件求解 A_1 、 A_3 、 A_4 的矩阵方程如下式(12)

$$\begin{bmatrix} -\rho & -M & N \\ -\rho^3 & 3MN^2 - M^2 & 3M^2N - N^3 \\ -\rho^5 & 10M^3N^2 - 5MN^4 - M^5 & 5M^4N - 10M^2N^3 + N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_3 \\ A_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ -cDp/(2GEI) \end{Bmatrix} \quad (12)$$

求得 w_2 后进而通过式(5)求得隧道变形 w :

$$w(x) = B_1 e^{-\rho x} + e^{-Mx} (B_3 \cos Nx + B_4 \sin Nx) \quad (13)$$

假定由于基坑开挖卸载引起隧道轴线(x 轴)上任一点 ξ 上作用的附加荷载为 $F(\xi)d\xi$,根据式(13)该荷载引起隧道轴线上任意点 x 的位移为:

$$dw(x) = B_1 e^{-\rho|x-\xi|} d\xi + e^{-M|x-\xi|} (B_3 \cos N|x-\xi| + B_4 \sin N|x-\xi|) d\xi \quad (14)$$

对于式(12)在隧道附加荷载分布范围内积分,即可得到由于开挖卸载引起的下卧已建隧道纵向变形:

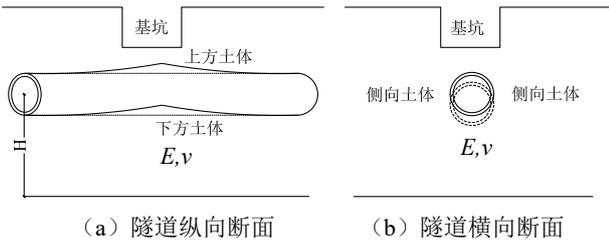
$$w(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} dw(x) \quad (15)$$

1.3 二阶段法参数选取

在使用弹性地基梁模型计算实际工程问题时,遇到很重要的一个问题就是地基参数如何取值^[12]。目前确定地基参数取值主要用到两种方法,第一种是通过现场加载试验直接得到参数,但是该方法成本高、耗时长;第二种方法是简化弹性空间法,地基模型中的地基参数可以用包含弹性模量 E 、泊松比 ν 和地基厚度 H 之间的关系表达式来确定,该方法最为简便,参数获取容易,适合推广使用,但参数精度可能不高。

若采用简化弹性空间法^[13],对于厚度为 H ,弹性模量为 E ,泊松比为 ν 的地基,如图2所示,Kerr

地基模型中的参数取值为: $c=3k$, $k=4E/3H$, $G=4HG_s/9$, $G_s=E/(1+2\nu)$ 。



(a) 隧道纵向断面 (b) 隧道横向断面

图 2 上方卸载对隧道隆起变形的影响

Figure 2 Effect of upper unloading on heave of tunnel

但是采用简化弹性空间法确定参数时, 只考虑了弹性模量 E 、泊松比 ν 和地基厚度 H , 无法考虑实际工程中采取的土体加固、设置抗拔桩等施工加固措施以及土体分段、分层开挖等时空效应因素的影响, 因此用该方法得到的隧道纵向隆起变形与实测结果偏差较大。

2 隧道最大隆起量经验公式

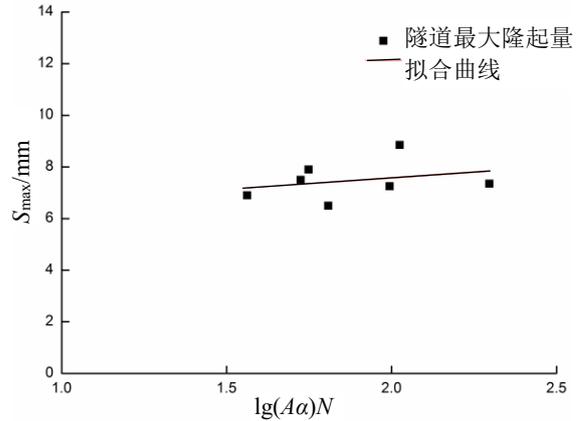
为了认识实际工程中隧道隆起变形发生的情况, 本节调查了 17 个国内基坑开挖遇到下方已建盾构隧道的工程案例, 对基坑开挖引起的隧道最大竖向位移 S_{max} 实测数据进行统计分析, 见表 1。由表 1 可见, 这些工程都位于我国东部地区, 隧道位置及隧道下方土层多以软弱黏土为主, 工程勘察报告提供的压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ 取值在 2.3~6.9 MPa 之间。为了控制隧道的隆起变形, 基坑开挖前均采取了一些工程控制措施, 如土体加固, 设置抗拔桩和分层分块开挖。这些工程的控制措施稍有差异, 7 个工程采用坑底堆载进一步控制隧道隆起, 而另外 10 个工程没有采用, 为此表 1 中以是否进行堆载加以区别。

隧道最大隆起量 S_{max} 的影响因素很多, 包括基坑的平面尺寸、开挖深度和采用的工程加固方法等。借鉴文献^[7]提出的隧道最大隆起量经验预测方法, 本文通过对表 1 中的数据进行拟合, 得到修正后的经验公式 (16), 拟合结果如图 3 所示。

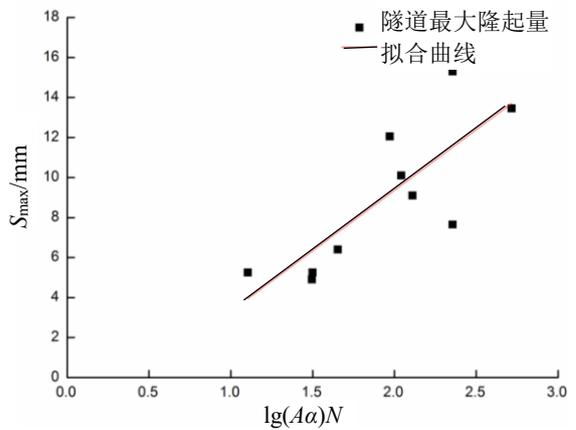
$$\begin{cases} \text{在有堆载情况下:} \\ S_{max} = 0.831\lg(A\alpha)N + 5.90 \\ \text{在无堆载情况下:} \\ S_{max} = 5.911\lg(A\alpha)N - 2.40 \end{cases} \quad (16)$$

其中 $\alpha=2\sqrt{ab}/(a+b)$ (a 、 b 分别为基坑的长边长

度与短边长度), $A=a \cdot b$, $N=h/H$ (h 、 H 分别为基坑开挖深度与隧道顶埋深)。



(a) 有堆载



(b) 无堆载

图 3 隧道最大隆起量与基坑参数变化关系

Figure 3 Relationship between maximum heave of tunnel and foundation pit parameters

3 基于 Kerr 地基模型计算方法修正

3.1 计算方法比较

以表 1 中上海外滩地下通道工程^[18]为例, 将基于 Kerr 地基模型的二阶段法计算结果、最大隆起量经验公式 (16) 预测结果与实测结果进行比较。

上海外滩地下通道工程中基坑坑底与延安东路下行线隧道拱顶距离仅为 5.4 m, 上跨基坑为矩形, 长度 50 m, 宽度 10 m, 开挖深度约为 11 m。延安东路下行线隧道的外径为 11 m, 衬砌厚度为 55 cm, 计算宽度为 10.45 m, 轴线埋深为 23.3 m。隧道纵向刚度有效率为 1/7, 取纵向抗弯刚度为 $1.258 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ 。场地工程地质参数见表 2。

表1 软土地区基坑工程上跨隧道工程案例

Table 1 Engineering cases of foundation pit with overlying tunnel in soft soil area

类型	工程编号	工程名称	下方地铁线路	交叉角度 $\delta/^\circ$	隧顶距坑底 S/m	基坑深度 h/m	上跨长度 l/m	基坑宽度 b/m	隧顶埋深 H/m	影响长度 L/m	S_{max}/mm	
											上行	下行
有堆载	1	上海新金桥广场基坑 ^[14]	1号	70	4	5.0	38	130	9.0	70	7.9	9.8
	2	上海世纪大道杨高路立交 ^[15]	2号	80	6.9	7.4	30	100	14.4	76	7.0	8.8
	3	上海南京路下沉广场 ^[16]	1号		3	3.8	50	100	7.0	80	6.4	8.1
	4	上海8号线某风井 ^[17]	1号上行线		7.6	9.1	40	50	16.6	75	6.5	
	5	上海外滩通道上行线 ^[18]	南线隧道	90	7.1	11	10	50	18.1	65	6.9	
	6	上海外滩通道下行线 ^[18]	北线隧道	75	5.4	11	10	50	16.4	65		7.5
	7	杭州金沙湖绿轴下沉式广场 ^[19]	1号	90	3.17	5.3	51	100	8.5	110	6.8	7.9
无堆载	8	上海东方路下立交隧道 ^[11]	2号	45	2.76	6.5	26	18	9.26	80	11.8	12.3
	9	上海东西通道浦东段拓建线 ^[20]	2号	26	4	11	150	29	14.2	150	14.7	12.2
	10	东西通道浦东段拓建右转弯匝道 ^[20]	2号	40	2.2	7.3	68	10	9.5		8.6	11.6
	11	东西通道浦东段拓建银东下立交 ^[20]	2号	70	7	8.2	70	20	15.2		7.6	5.2
	12	上海某深基坑 ^[9]	11号	47	4.15	8.0	79	40	11.8	80	14.7	15.9
	13	上海雅居乐广场 ^[21]	1号	90	3.6	5.0	100	46	8.6	150	10.2	8.0
	14	天津西站北广场出租车入口通道 ^[22]	1号	60	4.8	4.0	10	100	10.0	30	4.3	6.2
	15	天津西站北广场子牙河路U型槽 ^[23]	1号	90		4.5	28	100	10.1	50	4.0	6.5
	16	杭州延安路某地下通道工程 ^[7]	1号	90	3.9	8.0	14.83	11.4	11.9	32	4.9	
	17	杭州铁路东站西广场 ^[10,24]	1号	90	5.3	9.6	100	100	16.3		6.5	8.8

表2 场地工程地质参数

Table 2 Engineering geological parameters of the site

土层名称	层厚/m	含水率/%	重度/(kN/m ³)	孔隙率	压缩模/MPa
①填土	6				
②粉质黏土	2.5	32.2	18.4	0.93	6.04
③黏土及粉质黏土	4.5	39.6	17.7	1.11	3.44
④淤泥质黏土	9	49.4	16.9	1.39	2.41
⑤黏土	10	36.7	17.8	1.07	3.85
⑤ ₃ 粉质黏土	16	34.0	17.9	1.01	4.94
⑦ ₁ 砂质粉土	5	28.2	18.7	0.82	10.30
⑦ ₂ 粉质砂土	11	27.2	17.7	0.82	13.71

在应用基于 Kerr 地基模型的二阶段法进行计算时,需要的与地基相关的参数包括土体刚度 E 和泊松比 ν 。土体刚度 E 采用了土体的回弹模量,⑤、⑤₃、⑦₁ 以及⑦₂ 各土层的回弹模量分别为

23.10 MPa, 29.64 MPa, 61.8 MPa 和 82.26 MPa; 隧道下方地基土层厚度取为 2.5 D^[10]; 根据各土层厚度加权平均后得到地基弹性模量 E 为 30.56 MPa。计算中泊松比取为 0.3。

基于 Kerr 地基模型的二阶段法结果与实测结果对比情况如图 3 所示。由图 3 曲线对比可见, 虽然采用基于 Kerr 地基模型的二阶段法得到的隧道纵向隆起变形与实测结果 (尤其是隧道最大隆起变形量 S_{max}) 相差较大, 但是在基坑影响范围内, 采用基于 Kerr 地基模型的二阶段法得到沿隧道纵向的隆起变形计算结果与实测结果曲线拐点基本一致, 趋势较为相似, 说明该计算方法有合理性。在有堆载情况下, 根据经验公式 (16) 得到的最大隆起量计算值为 $S_{max}=10.25$ mm, 这与实测最大隆起量更接近, 因为经验公式可以考虑工程控制措施的影响, 因而可以给出更合理的预测。

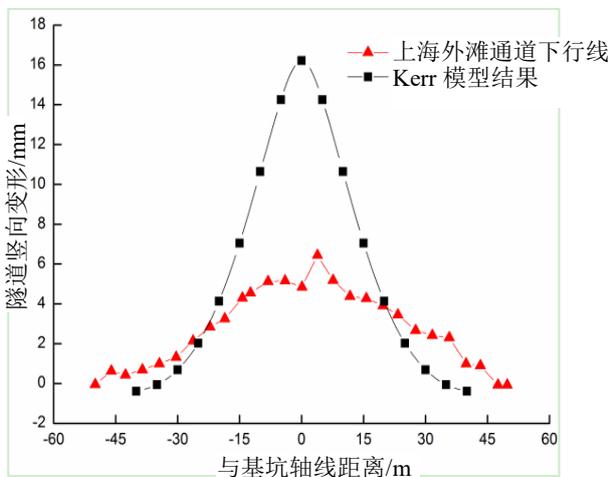


图 4 隧道纵向变形对比图

Figure 4 Comparison of longitudinal deformation of the tunnel

3.2 修正计算方法

通过以上的计算比较可以知道, 基于 Kerr 地基模型的二阶段法得到的隧道纵向隆起变形计算方法是合理的, 但是由于没有考虑地基加固等工程措施的影响, 计算误差较大, 为此, 可以采用经统计分析得到的隧道最大隆起量经验公式对其进行修正。修正方法如下:

(1) 将经验公式 (16) 得到的最大隆起量 S_{max1} 修正 Kerr 地基模型计算得到的隧道最大隆起量 S_{max2} , 得到修正系数 $\beta = \frac{S_{max1}}{S_{max2}}$ 。

(2) Kerr 地基模型的二阶段法得到的隧道纵向隆起变形曲线拐点保持不变。则计算曲线上拐点 (可取为基坑边界点) 范围内各点乘以修正系数 β_s ($\beta_s=1\sim\beta$)。

(3) 沿隧道纵向隆起变形包络面积保持不变。上述修正也可以根据最大隆起量、拐点位置及

曲线包络面积等通过拟合曲线获得。

4 工程实例分析

由于实际工程问题的复杂多样性, 而传统解析法、经验方法往往有局限性, 对于基坑工程分析, 数值模拟分析方法是目前最有效的辅助手段。本节结合工程实例, 采用 Plaxis 软件进行模拟, 并与工程实测和第 3 节提出的修正计算方法进行比较。

4.1 工程概况及地质条件

杭州九沙河河道基坑开挖工程上跨地铁 1 号线, 位于德胜东路与规划稼东路交叉口位置。该河道基坑工程下方有 2 条已建地铁 1 号线盾构区间隧道。河道基坑开挖完成后建成河底距离地铁 1 号线左右线盾构隧道顶净距约为 3 m, 如图 5 所示。

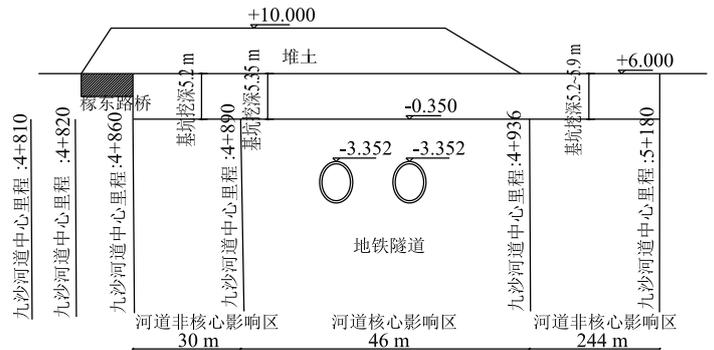


图 5 河道基坑与地铁隧道结构位置关系

Figure 5 Location relationship between foundation pit of river and subway tunnel structure

其中核心区区域 (图 5 中 K4+890~K4+936 段) 基坑周边地面高程约为 +6 m, 基坑位置堆土平均高程 +10 m, 河道底板底高程 -0.35 m, 河底标高 0.5 m, 河道底板厚 750 m, 素混凝土垫层 100 mm, 基坑挖深约为 6.35 m; 非核心区区域 (图 5 中 K4+860~K4+890 段) 基坑周边地面场平高程 5.60 m, 河道挡墙底高程为 0.4 m, 河道基坑挖深为 5.2 m; 非核心区区域 (K4+936~K5+180 段) 基坑周边地面场平高程 5.60~6.30 m, 河道挡墙底高程为 0.4 m, 河道基坑挖深为 5.2~5.9 m。其中核心区区域剖面图如图 6。

基坑各土层物理力学指标见表 3, 根据基坑开挖面的实际工程状况, 基坑开挖面位于②₂层砂质粉土层。

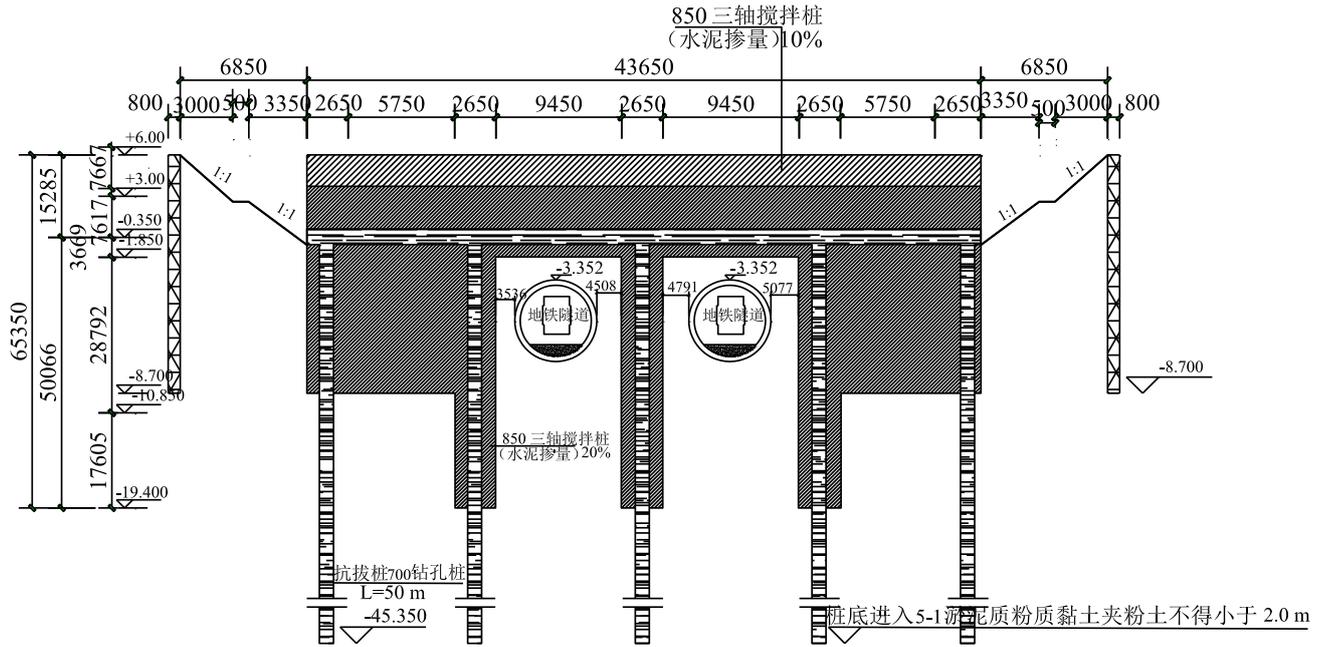


图 6 核心区基坑剖面图

Figure 6 Profile of core area of the foundation pit

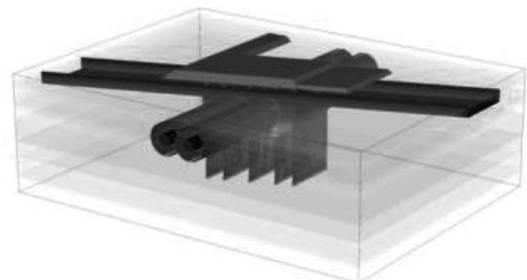
4.2 有限元计算模型

本文采用有限元软件 Plaxis 3D 对九沙河河道核心区区域建模，其中基坑长为 46 m，宽为 30 m，基坑挖深为 6.35 m。根据工程经验，基坑开挖影响深度为挖深的 2~4 倍，影响宽度为挖深的 3~4 倍，因此建立长为 215 m，宽为 150 m，深为 40.3 m 的计算模型，建立的有限元整体模型如图 7。土体本构模型采用硬化模型 (HS 模型)，各土层计算参数见表 4。盾构隧道、抗拔桩、底板等混凝土结构选用弹性模型进行模拟。由于盾构隧道存在接缝，隧道横线刚度与纵向刚度折减率不同，隧道的纵向刚度有效率取 1/6^[25]，隧道的横向刚度有效率取 0.7。抗拔土方开挖顺序从基坑边缘向内部进行，计算到基坑开挖完成后的最终隧道上、下行线的竖向位移云图，见图 8；最终最大竖向变形 S_{max} 计算值见表 5。由表 5 可知，当基坑土方全部卸载完成后，下方隧道竖向隆起变形达到最大，隧道上行线和下行线顶部竖向变形都比底部竖向位移要大，说明在基坑开挖完成后，受基坑卸载影响隧道横断面在垂直方向产生了“拉伸”变形；隧道上行线的顶底部最大竖向位移均比隧道下行线大，这是因为在基坑开挖前隧道上行线一侧的堆土厚度比较大 (见图 5)，所以上行线一侧的卸载效应更明显。

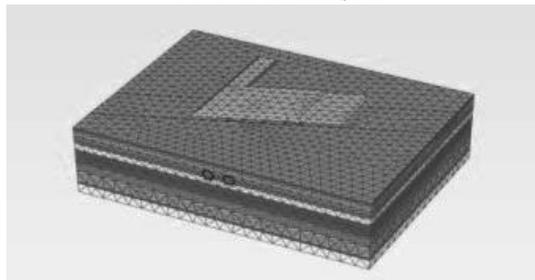
桩、底板、隧道的相关计算参数见表 6。有限元网格划分采用正四面体单元，接触面采用 GOODMAN 单元。

图 9 给出了采用修正 Kerr 地基模型的二阶段法

计算结果与数值计算结果 (以上行线为例) 和现场监测数据的对比。可以看出，理论计算、数值计算与隧道纵向变形曲线的监测结果基本一致。从最大隆起量计算结果来看，现场实测的隧道最大竖向位移为 5.4 mm，利用本文修正的 Kerr 模型得到的理论隧道最大竖向位移为 7.91 m，数值模拟得到的隧道最大竖向位移为 8.63 m，其中理论计算和数值模拟的结果比现场实测结果稍大，说明修正的 Kerr 地基模型的二阶段法应用于本案例是偏于安全的。



(a) 三维有限元模型



(b) 有限元模型网络划分

图 7 有限元模型

Figure 7 Finite element model

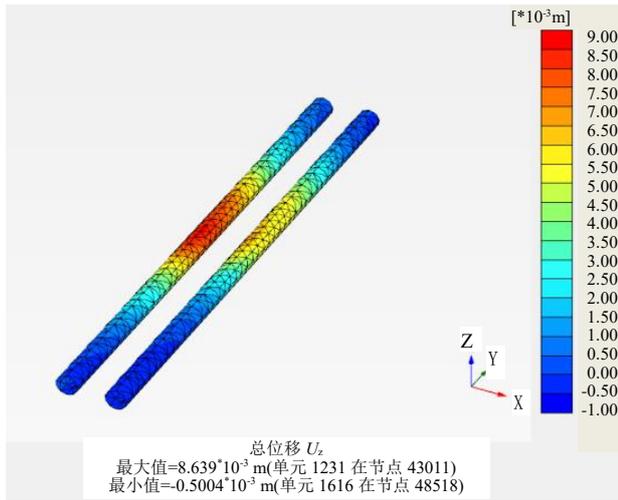


图 8 隧道竖向位移云图

Figure 8 Vertical displacement contour of the tunnel

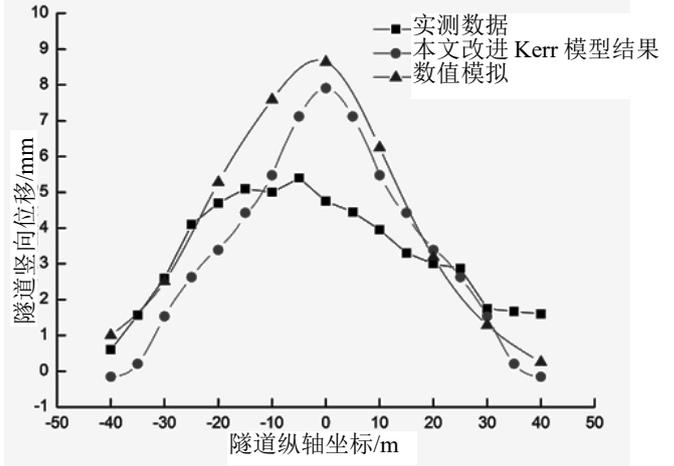


图 9 隧道竖向位移对比图

Figure 9 Comparison of vertical displacement of the tunnel

表 3 各土层物理力学参数

Figure 3 Physical and mechanical parameters of each soil layer

土层编号	土层名称	物理指标	抗剪强度指标		渗透系数	
		γ /(kN/m ³)	c /kPa	φ /°	K_h /(10 ⁻⁶ cm/s)	K_v /(10 ⁻⁶ cm/s)
① ₁	耕土	18				
① ₂	杂填土	18	10	14	200	200
① ₃	素填土	18	5	18	150	150
② ₁	砂质粉土	19.5	7	2	270	130
② ₂	砂质粉土	19.5	5	28	300	120
② ₃	砂质粉土、夹粉砂	19.6	5	26	350	200
② ₄	粉砂	19.5	4.5	33	500	400
② ₅	粘质粉土、夹砂质粉土	19	5	25		

表 4 各土层 HS 模型计算参数

Figure 4 Calculation parameters of HS model of each soil layer

土层名称	c'	φ'	ψ	E_{50}^{ref} /MPa	E_{oed}^{ref} /MPa	E_{ur}^{ref} /MPa	ν_{ur}	p_{ref} /kPa	K_0	m	R_f
杂填土	8	10	0	20	20	60	0.2	100	0.83	0.5	0.9
素填土	8	10	0	20	60	60	0.2	100	0.83	0.5	0.9
砂质粉土	5.5	28	0	68	68	204	0.2	100	0.53	0.5	0.9
砂质粉土 夹粉砂	4.5	30	0	96	96	288	0.2	100	0.50	0.5	0.9
粉砂	4	33	3	128	128	384	0.2	100	0.46	0.5	0.9
粘质粉土	8	27	0	80	80	240	0.2	100	0.55	0.5	0.9
淤泥质粉质粘土	12.5	15	0	32	32	96	0.2	100	0.74	0.5	0.9
淤泥质粘土	11	20	0	28	28	84	0.2	100	0.66	0.5	0.9
灰色粉质粘土	18	21	0	52	52	156	0.2	100	0.64	0.5	0.9
含砂粉质粘土	25	21	0	96	96	288	0.2	100	0.64	0.5	0.9
粉砂夹粉质粘土	25	22	0	192	192	576	0.2	100	0.63	0.5	0.9

表5 隧道的最大竖向变形值
Figure 5 Maximum vertical deformation of the tunnel

工况	上行线		下行线	
	顶部/mm	底部/mm	顶部/mm	底部/mm
最终土方开挖	8.63	6.88	6.30	4.59

表6 材料取值参数
Figure 6 Material parameters

名称	材料类型	弹性模量 /kPa	EA /(kN/m)	EI /(kN·m ² /m)	泊松比
抗拔桩	弹性	3×10^7	1.2×10^7	1.6×10^5	0.15
底板	弹性	3×10^7	2.3×10^7	1.1×10^6	0.2
隧道	弹性	3.45×10^7	1.1×10^7	1.1×10^5	0.15

5 结 论

本文针对上跨基坑开挖卸载对下卧已建隧道隆起变形的影响开展研究,通过工程案例提出了最大隆起量经验计算公式,并对基于 Kerr 地基模型的隧道竖向位移计算方法进行了修正,主要结论如下。

(1) 基坑开挖卸载引起的下卧隧道最大隆起量经验公式是在我国东部软弱土地区工程案例的基础上提出的,考虑了基坑尺寸参数和卸载比的影响,并综合了基坑下部土体加固、隧道周边设置抗拔桩以及采用分层分块开挖等工程控制方法的影响,但是计算时应区分是否采用了基坑底部堆载处理方法;

(2) 采用隧道最大隆起量经验公式对二阶段法 Kerr 地基模型得到的隧道纵向隆起变形进行修正,可以估算隧道纵向隆起变形和基坑开挖对下卧隧道变形的影响范围,可为工程设计和施工控制提供参考。

(3) 基于 Kerr 地基模型的隧道纵向变形修正计算方法的可靠性依赖于最大隆起量经验公式的合理性,因此,应注重更多类似工程的实测分析和总结,以便不断完善经验公式、为工程设计和施工提供科学参考。

参考文献:

- [1] 王晓男,张昌桔,杨守臻. 软土地区盾构隧道近距离下穿地铁隧道群施工影响分析研究[J]. 地基处理, 2019, 1(1): 79-83.
- [2] 陈郁,李永盛. 基坑开挖卸载引起下卧隧道隆起的计算方法[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(1): 91-94.
- [3] 黄宏伟,黄栩, Schweiger F. Helmut. 基坑开挖对下卧运营盾构隧道影响的数值模拟分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 182-189.
- [4] Winkler E. Die lehre von der elastizitat und festigkeit[M]. Prague: Dominicus, 1867. (Winkler E. Theory of elasticity and strength[M]. Prague: Dominicus, 1867. (in German))
- [5] Pasternak P L. On a new method of analysis of an elastic foundation by means of two-constants[D]. Moscow: Gosudarstvennoe Izdatelstvo Literaturi po Stroitelstvu I Arkhitecture. 1954. (in Russian)
- [6] Kerr A D. A study of a new foundation model[J]. Acta Mechanica 1/2, 1965: 135-147.
- [7] 李志高,刘浩,刘国彬,毕海民. 基坑开挖引起下卧隧道位移的实测分析[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(4): 620-623.
- [8] 魏纲. 基坑开挖对下方既有盾构隧道影响的实测与分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(5): 1421-1428.
- [9] 胡瑞灵. 深基坑施工引起运营隧道变形的数值分析[J]. 中国市政工程, 2012(2): 92-95.
- [10] 李瑛,刘金友,黄锡刚,袁静,刘兴旺. 大面积卸荷对下卧地铁隧道影响的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 643-646.
- [11] 黄栩,黄宏伟,张冬梅. 开挖卸荷引起下卧已建盾构隧道的纵向变形研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1241-1249.
- [12] Kerr A D. On the determination of foundation model parameters[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(11): 1334-1340.
- [13] Morfidis K. Research and development of methods for themodeling of foundation structural elements and

- soil[D].Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki, 2003.
- [14] 王卫东, 吴江斌, 翁其平. 基坑开挖卸载对地铁区间隧道影响的数值模拟[J]. 岩土力学, 2004, 25(S11): 251-255.
- [15] 吉茂杰, 陈登峰. 基坑工程影响隧道位移的施工工艺控制方法[J]. 中国市政工程, 2001(2): 36-39+42.
- [16] 周裕倩, 袁金荣, 张中杰. 基坑施工过程仿真模拟及环境保护[J]. 地下空间, 2004, 24(5): 719-722.
- [17] 王如路, 刘海. 地铁运营隧道上方深基坑开挖卸载施工的监控[J]. 地下工程与隧道, 2005(1): 22-26.
- [18] 徐凌. 软土盾构隧道纵向沉降研究[D]. 上海: 同济大学, 2005.
- [19] 肖鸣, 陈志良. 地铁隧道上方下沉式广场深基坑施工技术[J]. 施工技术, 2014, 43(17): 4-6.
- [20] 温锁林. 近距离上穿运营地铁隧道的基坑明挖施工控制技术[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 451-454.
- [21] 李家平. 基坑开挖卸载对下卧地铁隧道影响的数值分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(S): 1345-1349.
- [22] 郑振鹏. 天剑西站北广场上穿工程对既有隧道结构的保护设计[J]. 中外建筑, 2010(7): 162-163.
- [23] 曹美娟, 许平. 横沟子在子牙河南路下穿西站北广场地道中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2014(6): 41-47.
- [24] 张迪. 杭州铁路东站西广场大基坑开挖对其下地铁盾构隧道的影响与控制[J]. 隧道建设, 2013, 33(11): 897-902.
- [25] 黄宏伟, 徐凌, 严佳梁等. 盾构隧道横向刚度有效率研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(1): 11-18.


 简讯

2020年岩土工程西湖论坛：岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践 (2020年10月23~25日, 杭州) (一号通知)

在广泛征求意见的基础上, 岩土工程西湖论坛(2020)的主题定为: 岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践, 并拟定于2020年10月24~25日(23日报到)在杭州花家山庄召开。建筑工程中基坑、地下工程中隧道和边坡工程中滑坡等工程事故, 大部分都涉及到地下水, 本次会议拟开展岩土工程地下水控制的新技术、新方法、新设备、新工艺等进行交流, 旨在促进我国岩土工程技术水平不断提升, 更好地为工程建设服务。会前将围绕该主题组织有关专家学者编写专著岩土工程西湖论坛系列丛书第4册《岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践》, 并在中国建工出版社出版。

会议主题: 岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践

专题研讨会: 岩土工程西湖论坛(2020)

出版专著:

将围绕该主题组织有关专家学者编写专著岩土工程西湖论坛系列丛书第4册《岩土工程地下水控制理论、技术及工程实践》, 并在中国建工出版社出版。

联系人: 宋秀英

电话: 0571-88208775

邮箱: xysong2020@163.com

浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心网址:

<http://www.zjdxyt.com>