

盾构隧道近距离侧穿桩基的施工力学响应研究

高俊涛¹, 黄雪阳^{2,3}

(1. 广东省重工建筑设计院有限公司, 广州 510034; 2. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510641;
3. 华南理工大学亚热带建筑科学国家重点实验室, 广州 510641)

摘要:盾构开挖近距离侧穿既有桩基的问题值得关注。采用两阶段位移法,提出了近距离盾构开挖对侧向桩基影响的简化计算方法。以典型工程实例为背景,计算桩基受影响规律,且与三维数值计算结果对比分析。结果表明:盾构开挖引起侧向桩基最大水平位移为4.25 mm,相应弯矩和剪力最大值分别为1 176.09 kN·m、505.1 kN。桩受盾构开挖影响范围可以通过 $45^\circ + \varphi/2$ 的角度扩散计算确定。与数值计算结果对比分析表明,文章提出的计算方法可行,可用于预测盾构开挖引起紧邻既有桩基的扰动。

关键词:盾构隧道;既有桩基;力学响应;两阶段位移法;数值模拟

中图分类号:TU93

文献标志码:A

引言

随着城市地下空间开发和高层建筑的建设,地下建筑物日益增多,新建地下工程不可避免地与原有地下建筑物相互影响。其中隧道开挖对邻近桩基的影响被列为隧道工程最为迫切需要解决的问题之一^[1]。

目前盾构开挖扰动引起的邻近桩基影响分析方法主要有:数值法和解析法。朱逢斌^[2]、刘枫^[3]、龚爱军^[4]、岳鹏飞^[5]通过建立盾构隧道-桩-土层相互作用数值计算模型,计算评估盾构施工对邻近既有桩基的影响,然而盾构施工过程极为复杂,数值计算往往难以刻画出桩基受扰动后的真实力学行为。

黄茂松等^[6]利用分层土体的剪切位移法研究了桩底盾构开挖引起的上部桩基的影响,但仅针对桩端与隧道拱顶相连的情况,存在一定的局限性。熊巨华等^[7]基于荷载传递法和弹性地基模型计算分析了隧道开挖对单桩竖向受力特性的影响,但该方法计算参数选取时存在较大的不确定性。袁海平等^[8]通过桩位移离散点监控数据拟合桩的变形挠曲方程,计算盾构开挖对侧向桩基受力变形特性,其本质是数值计算,同时采用的隧道

-桩-土相互作用模型的合理性值得商榷。

基于此,采用两阶段位移法,提出了近距离盾构开挖对侧向桩基影响的简化计算思路。针对盾构施工情况,第一阶段采用Loganathan和Poulos^[9]提出的解析解计算土体自由位移场;第二阶段视桩基为弹性地基梁,基于第一阶段计算结果,建立桩基扰动后的受力变形特性计算方程,而后,借助有限元法进行三维弹塑性数值计算,对比结果表明,本文提出的桩基扰动理论计算方法可行。

1 侧向桩基受盾构施工扰动响应计算方法

1.1 盾构隧道施工引起的围岩变形

盾构隧道开挖打破了原有应力平衡,进而引起土层与紧邻建筑移动,对于侧向建筑物的影响表现为水平移动,本文采用Loganathan公式^[9]计算围岩附加位移。Loganathan和Poulos在理论分析与实测结果的基础上,采用椭圆形土体移动平面,提出用于估算软土地区不排水条件下因土体损失引起的土体位移计算公式:

$$W = -\varepsilon R^2 x \left\{ \frac{1}{x^2 + (H-z)^2} + \right.$$

收稿日期:2014-01-27

作者简介:高俊涛(1981-),男,湖北咸宁人,硕士,主要从事地下结构设计方面的研究,(E-mail)ligongmvp@163.com

$$\frac{3-4\mu}{x^2+(H+z)^2} - \frac{4z(H+z)}{[x^2+(H+z)^2]^2} \Bigg\} \times \exp\left[\frac{-1.38x^2}{(H+R)^2} - \frac{0.69z^2}{H^2}\right] \quad (1)$$

式中: x 为侧向建筑物与隧道轴线的水平距离; z 为垂直向距离, 由地面向下为正; μ 为隧道围岩泊松比; H 为隧道轴线埋深; R 为隧道的外半径; ε 为地层损失比。具体参数如图 1 所示。

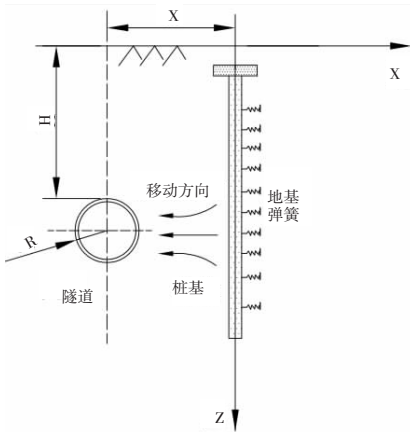


图 1 盾构开挖引起的围岩位移模式

1.2 桩基扰动后受力变形计算

如图 2 所示, 视桥梁桩基为土中的弹性地基梁, 假定地层满足温克尔地基假定, 即满足地基表面任一点的沉降与该点单位面积上所受的力成正比, 且不考虑土层对桩的拉效应。以隧道过圆心横向轴线与桩基交点为坐标原点建立水平坐标系, 根据力平衡和弯矩平衡推导出桩水平向变形基本微分方程^[10]。

$$\frac{dy^4}{dx^4} + 4\alpha y = \frac{q(x)}{EI} \quad (2)$$

式中: $\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$, 为地基梁特征系数; k 为地基反力系数, 参考文献[11], 取 $k = 3E/(1+\mu)(5-6\mu)$, 其中 E

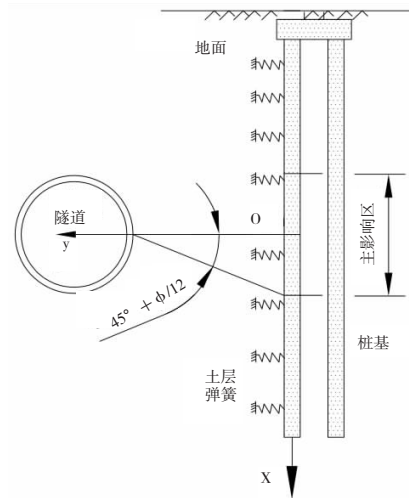


图 2 盾构开挖影响下桩基受力变形模式

为土层弹性模量; μ 为泊松比; EI 为桩的水平抗弯刚度。

求解线性非齐次方程(2), 得到通解为:

$$y = e^{\alpha x} (A \cos \alpha x + B \sin \alpha x) + e^{-\alpha x} (C \cos \alpha x + D \sin \alpha x) + \frac{q(x)}{k} \quad (3)$$

因为在桩基上没有任何荷载, 故 $q(x) = 0$, 于是(3)式可以写成:

$$y = e^{\alpha x} (A \cos \alpha x + B \sin \alpha x) + e^{-\alpha x} (C \cos \alpha x + D \sin \alpha x) \quad (4)$$

2 工程实例计算

2.1 工程简介

广州地铁五号线某区间盾构开挖隧道, 近距离侧向穿过机场高速路立交桩基, 两者最小水平距离为 5.3 m。桥梁桩长 36 m, 桩径为 1.2 m, 盾构隧道埋深约为 15.5 m。隧道和桩基相对位置关系与图 2 一致。根据该项目地质勘查报告与设计方, 土体与隧道结构的参数见表 1、表 2。

表 1 材料物理力学参数

岩土分层	岩土名称	密度 $\rho / (g \cdot cm^{-3})$	固结快剪		压缩模量 /MPa	泊松比	土层厚度 /m
			黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / ^\circ$			
①	人工堆填土	1.90	10.00	18.0	4.7	0.33	1.5
③ ₁	粉质黏土	1.99	19.20	15.2	5.86	0.30	4.5
③ ₃	含泥粉细砂	2.00	5.00	25.0	5.93	0.28	2.3
③ ₄	含泥中细砂	2.01	0.00	30.0	6.52	0.26	5.2
④ ₂	含泥粉细砂	1.90	4.00	29.6	6.89	0.28	10.7
④ ₃	含泥中粗砂	1.98	0.00	32.0	7.40	0.26	9.2
④ ₄	含泥砂卵石	1.90	-	36.0	8.14	0.23	4.8
⑦ ₁	强风化凝灰岩	2.00	-	-	-	-	7.8
	桥梁桩基	2.5	-	-	30000	0.2	-
	桥梁承台	2.5	-	-	30000	0.167	-

表 2 隧道部分结构参数

外径 D/m	内径 d/m	环宽 l_s/m	管片模量 E_c/kPa	螺栓直径 d/mm	长度 l/mm	螺栓个数	螺栓弹性模量 E_j/kPa
6	5.4	1.6	3.45×10^7	30	400	11	2.06×10^8

2.2 桩基受扰动力学特性

考虑到既有左侧桩基更靠近盾构隧道,故本文仅分析左侧桩基受到影响情况。参考文献[12]可知,盾构隧道开挖剪切扰动区可通过隧道边界以 $45^\circ + \varphi/2$ 的角度扩散,其中 φ 为土的内摩擦角。由此计算得到桩基受盾构开挖影响明显的区域为隧道圆心上下两侧约 $2 \times 5.3 \div \cos 59.8 = 21\text{ m}$ 区域内(图 2),而远离隧道轴线处影响很小,在桩顶、底两侧水平位移近似为 0,所以可以把桩基视为无限长梁。桩顶、底有:竖向位移 $y = 0$,转角 $\theta = 0$ 。图 2 中坐标原点处边界满足:转角 $\theta = 0$,位移 $y = W$, W 为盾构开挖 Loganathan 附加位移解。由内力与位移之间的微分关系可以把上述条件变换成 $\theta = dy/dx = 0$ 。

由分析可知,桥梁桩基可视为土中无限长梁。因此图 2 中,当 $x \rightarrow \infty$ 时, $y(x) = 0$ 代入式(4)可得:

$$\infty * (A \cos \alpha x + B \sin \alpha x) = 0 \tag{5}$$

$$\Rightarrow A = 0 \text{ 与 } B = 0 \tag{6}$$

由图 2 中坐标原点边界条件得到:

$$\begin{cases} C - D = 0 \\ W = C \end{cases} \tag{7}$$

所以式(4)可以表示为:

$$y = We^{-\alpha x} (\cos \alpha x + \sin \alpha x) \tag{8}$$

根据位移、弯矩及剪力的微分关系得到桩基的弯矩和剪力表达式为:

$$M = -2EIW\alpha^2 e^{-\alpha x} (\sin \alpha x - \cos \alpha x) \tag{9}$$

$$Q = -4EIW\alpha^3 e^{-\alpha x} \cos \alpha x \tag{10}$$

由土层参数和隧道基坑相对位置,取地层损失率为 1%,计算得到盾构开挖扰动引起的图 2 中 0 点桩基附加位移为 4.25 mm,地基反力系数为 25.5 MPa/m,地基梁特征系数 $\alpha = 0.2$ 。把上述参数代入式(8)计算得到如图 3 所示的桩基水平位移曲线。

由图 3 可知,受盾构开挖影响,桥梁桩基水平产生了向隧道一侧的位移,最大值为 4.25 mm,出现在桩基与隧道横截面水平轴线相交处,其影响范围主要体现在 -8 m 到 -28 m 之间,长约 20 m 范围内,与前述影响区域 21 m 假定相近,由此说明通过隧道边缘 $45^\circ + \varphi/2$ 的角度扩散确定桩基影响区域具备一定可行性。桩基内力如图 4、图 5 所示。受盾构开挖扰动影响,桩基产生的最大弯矩和剪力分别为 1176.09 kN·m、505.1 kN,与位移最大值出现在同一位置。

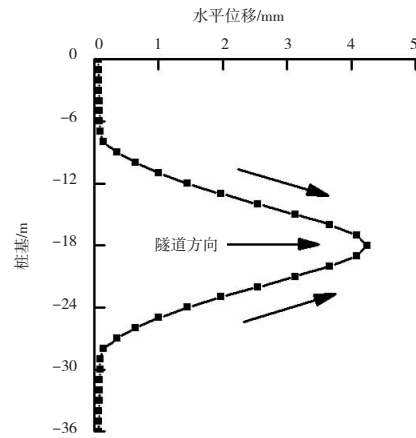


图 3 桩基水平位移曲线

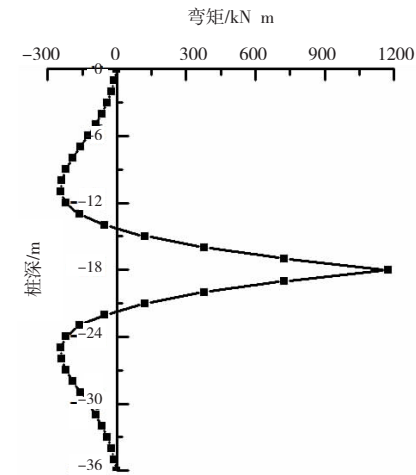


图 4 桩基弯矩曲线

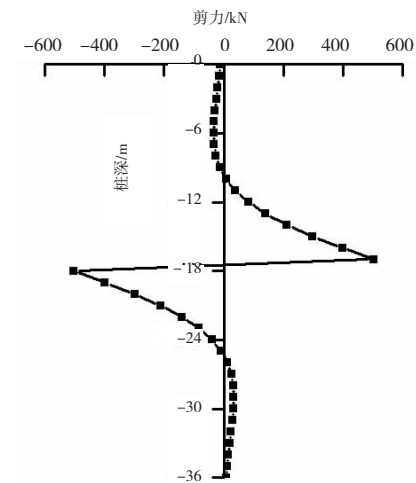


图 5 桩基剪力曲线

2.3 整体数值计算

为了明确本文理论计算方法的合理性,进行三维数值计算与理论计算结果对比。模型计算区域要大于盾构施工引起的沉降槽宽度,盾构施工的沉降槽宽度为15~20 m^[13],结合实际工况,计算模型几何尺寸X、Y、Z分别为55 m、55 m和45 m。模型中土体、管片、螺栓环、注浆体与连续墙采用实体单元,盾壳采用壳单元模拟。其中盾尾空隙注浆通过12 cm厚等代层^[14]模拟,管片环缝接头采用环向连续分布的螺栓环,等效刚度通过式(13)计算。土体采用Mohr-Coulomb模型,管片结构体系采用弹性模型。总体模型与支护结构如图6所示。

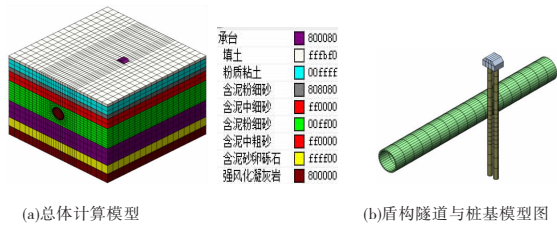


图6 盾构开挖数值计算模型

$$K_{r1} = \frac{nE_j A_j}{2\pi R l t} \tag{13}$$

式中: n 为管片接头螺栓个数; E_j 、 A_j 分别为螺栓的弹性模量和截面面积; R 为隧道计算半径; l 为接头螺栓的作用长度; t 为管片厚度。把表2中隧道结构参数代入(13)式计算得到螺栓环平均刚度 $K_{r1} = 759\ 868.4$ kPa。

结合广州地铁的经验,管片等效直接头刚度为 5.4×10^7 kPa,施工阶段管片环缝面承受的压力为1600 kN/m^[15]。本文将千斤顶力简化为作用于环缝垫板上的压力荷载,其等效压力为5400 kPa。注浆压力作用在管片和土层上,其相应的荷载近似认为随深度线性分布,拱顶为0.3 MPa,拱底为0.45 MPa。

图7为桥梁桩基有限元计算位移云图,提取位移得到图8所示的数值与理论计算结果对比曲线。由图8可知,数值计算与理论计算桩基变形规律较为吻合,最大值为3.94 mm,与本文提出的理论计算结果最大值4.25 mm相差7.3%,说明理论计算方法具备合理性,可用于类似盾构工程开挖引起的紧邻既有结构的位移预测。

由有限元计算可知,本文提出的方法与有限元计算结果较为吻合,因此本文针对侧向开挖引起的扰动,提出的两阶段位移分析法可行。与有限元法相比,本文方法需要的参数较少,概念明确,计算简单易行。

3 结论

(1) 盾构开挖引起侧向紧邻桥梁桩基产生了向隧道

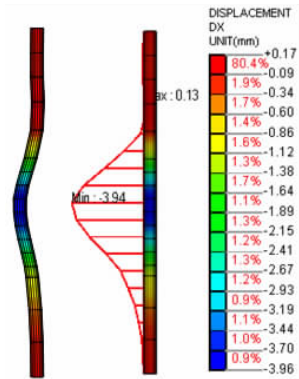


图7 桩基变形云图

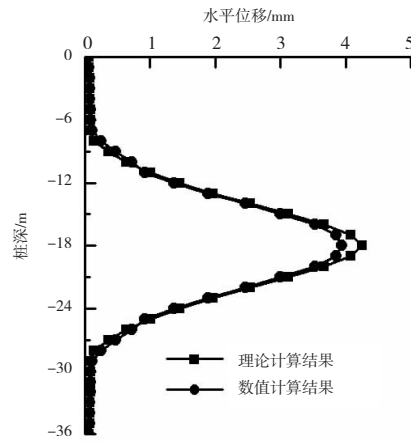


图8 数值与理论计算结果对比

侧的水平位移,最大值为4.25 mm,相应最大弯矩和剪力分别为1176.09 kN·m和505.1 kN,均出现在与隧道轴线对应位置。其受影响范围可以采用隧道与桩基水平距离和 $45^\circ + \varphi/2$ 的角度扩散计算确定。

(2) 针对盾构开挖对侧向桩基的影响分析,提出了通过现有研究成果计算盾构开挖引起的桩基对应点附加位移,而后假定桩基为弹性地基梁,且建立相应的变形方程分析计算。与数值计算结果对比表明,本文提出的计算思路可行,可用于盾构工程开挖引起的紧邻既有桩基的位移预测。

(3) 根据本文实例特点,假定桩基为无限长梁,对于其他类似侧向开挖影响计算,可以视桩基为半无限长梁和短梁计算,此类情况尚需进一步的研究。

参考文献:

[1] Mair R J. Research on tunneling-induced ground movements and their effects on buildings-lessons from the Jubilee line extension[C]. London: CIRIA, Response of Buildings to Excavation induced Ground Movements, 2003.

- [2] 朱逢斌,杨平,Ong C W.盾构隧道开挖对邻近桩基影响数值分析[J].岩土工程学报,2008,30(2):298-302.
- [3] 刘枫,年廷凯,杨庆,等.隧道开挖对邻近桩基工作性能的影响研究[J].岩土力学,2008,28(增刊):615-620.
- [4] 龚爱军,辛振省.盾构近接桥梁施工对桥梁桩基的影响研究[J].铁道标准设计,2008(11):77-79.
- [5] 岳鹏飞,戴泉,何炬.盾构施工下穿建筑桩基的影响研究[J].铁道标准设计,2012(3):77-79.
- [6] 黄茂松,张宏博,陆荣欣.浅埋隧道施工对建筑物桩基的影响分析[J].岩土力学,2006,27(8):1379-1383.
- [7] 熊巨华,王远,刘侃,等.隧道开挖对邻近单桩竖向受力特性影响[J].岩土力学,2013,34(2):475-482.
- [8] 袁海平,王斌,朱大勇,等.盾构近距离侧穿高架桥桩的施工力学行为研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(7):1457-1464.
- [9] Loganathan N,Poulos H G.Analytical prediction for tunneling-induced ground movement in clays[J].Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,1998,124(9):846-856.
- [10] Yang Chunshan,Mo Haihong,Chen Junsheng.Segment opening calculation of shield tunnel based on double-sided elastic foundation beam when tunnel followed by well excavation[J].Electronic Journal of Geotechnical Engineering,2013,18Z:6067-6079.
- [11] Yang Chunshan,Mo Haihong,Chen Junsheng.Numerical study on material optimization of the composite lining of shield tunneling[J].Electronic Journal of Geotechnical Engineering,2013,18R: 3813-3824.
- [12] 蒋洪胜,侯学渊.盾构推进对隧道周围土层扰动的理论与实测分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(9):1514-1520.
- [13] 徐干成,李成学,王后裕,等.地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J].岩土力学,2009,30(增2):269-276.
- [14] 张云,殷宗泽,徐用福.盾构法隧道引起的地表变形分析[J].岩石力学与工程学报,2002,21(3):388-392.
- [15] 杨春山,莫海鸿,陈俊生,等.盾构隧道先隧后井施工法对管片张开量的影响研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增1):2870-2877.

Construction Mechanical Response of a Shield Tunnel Adjacent to Existing Pile Foundation

GAO Juntao¹, HUANG Xueyang^{2,3}

(1. Guangzhou Zhonggong Architectural Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510034, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: More attention has focused on the issue of shield tunneling across existing pile foundation. The two-stage approach was conducted to propose the simplified calculation method of impact on adjacent existing pile foundation by shield tunneling in close range. The influencing law of existing pile was calculated based on a typical engineering example, as well as the result was analyzed and compared with the result which was calculated by three-dimensional numerical simulation. The results show that the maximum horizontal displacement of adjacent existing pile foundation caused by shield tunneling is 4.25mm, and the corresponding bending moments, the shear forces are 1176.09 kN·m and 505.1kN respectively. The influencing scope of existing pile foundation caused by shield tunneling can be determined by $45^\circ + \varphi/2$ angular spread. Through the comparison with numerical calculation results, it is indicated that the method proposed in this work is feasible and it can be used to predict the perturbation of existing pile caused by adjacent shield construction.

Key words: shield tunnel; existing pile foundation; mechanical response; two-stage displacement method; numerical analysis