

盾构隧道施工对桩基沉降影响的简化计算

杜亭萱

(上海市市政工程设计有限公司, 上海市 201306)

摘要: 随着城市化的深入发展,城市内隧道施工频繁涉及近距离穿越桥梁桩基的情况,这就要求评估隧道穿越对桥梁桩基的影响。然而,当前的研究方法虽科学严谨,但对于工程设计人员来说,可操作性不强。针对这一问题,结合美国API规范与《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008),创新提出一种理论算法,旨在为工程设计人员提供一种相对便捷的桩基沉降计算方法。新方法通过分析盾构开挖引起的土体自由场位移以及桩土荷载传递机理来计算盾构施工引起的桩基附加轴力,并据此进一步计算桩基沉降量。经过与数值模拟结果的对比验证,该方法被证明是合理有效的。利用该方法,工程技术人员能在项目初期阶段有效预测桩基受影响程度,从而为后续工程方案的制定提供科学指导。

关键词: 盾构施工;桩基沉降;桩土荷载传递关系;附加轴力

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)05-0202-04

Simplified Calculation on Influence of Shield Tunneling on Settlement of Pile Foundation

DU Tingxuan

(Shanghai Municipal Engineering Design Co., Ltd., Shanghai 201306, China)

Abstract: With the deep development of urbanization, the tunnel construction in cities frequently involves the close crossing of bridge pile foundations, which is necessary to evaluate the impact of tunnel crossing on bridge pile foundation. However, the current study methods are scientific and rigorous, but the operability is not strong for the engineering designers. Aiming at this problem, combined with the American API standards and *Technical Code for Building Pile Foundations* (JGJ 94—2008), a theoretical algorithm is innovatively put forward in order to provide a relatively convenient method for calculating pile foundation settlement for the engineering designers. The new method computes the additional axial force of pile foundation caused by the shield construction through the analysis of free field displacement of soil caused by shield excavation and the load transfer mechanism of pile and soil. And accordingly, the settlement of pile foundation is further calculated. Compared with the numerical simulation results, the proposed method is proved to be reasonable and effective. The engineering technicians can effectively predict the impact on pile foundations at early stage by this method so as to provide the scientific guidance for the formulation of subsequent engineering schemes.

Keywords: shield construction; pile foundation settlement; soil-pile load transfer relationship; additional axial force

0 引言

随着城市地下空间开发日趋完善,隧道选线时,很难做到规避所有地面建(构)筑物,因此隧道施工过程中经常会遇到近距离穿越桥梁桩基的情况,盾构施工会导致周边土体应力场的改变,从而对临近的桥梁桩基产生不利影响。

针对这一问题,国内外学者已经开展了很多研

究,主要集中在模型试验、理论研究以及数值模拟。在模拟试验方面,Logathan^[1]等利用离心机试验研究了隧道在黏性土中开挖对桩基的附加影响;后来,Jacobs^[2]等、Lee^[3]等也同样利用离心机,研究隧道在砂土中施工对临近桩基的影响。在数值分析方面,芮勇勤^[4]等、张宏博^[5]等利用数值模拟方法研究了隧道施工过程中桩基的力学行为。数值分析方法是建立隧道、桩基以及周围土体的整体模型,模拟隧道施工开挖的过程,该方法计算量大、建模复杂,并且参数选取需要依靠一定的经验,不易被设计人员接受。在理论方面,主要有两阶段分析法,第一阶段采

收稿日期: 2024-04-10

作者简介: 杜亭萱(1992—),女,硕士,工程师,从事结构设计工作。

用解析法得到无桩时隧道开挖周围土体的自由位移场,第二阶段将第一阶段得到的结果作用在研究对象上并进行求解。Loganathan^[6]等、Poulos^[7]等、Xu^[8]等提出了比较完善的理论,通过解析解计算隧道施工对桩基的影响,但是解析解采用有限差分法,需要使用编程软件才能进行计算,且解析解矩阵方程复杂,更适用于科学研究,对工程设计人员而言可操作性不高。

在以前研究的基础上,本文提出的解析法也是基于两阶段分析法,先是通过解析法得到无桩情况下隧道施工时土体自由位移场,再通过 API^[9]规范中推荐的桩土荷载传递关系,将位移场转换为附加荷载作用在桩基身上,最后根据《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)^[10]计算桩基最终沉降。

1 基本方程的建立

1.1 隧道开挖引起的土体自由场竖向位移

目前关于隧道开挖引起的土体自由场位移计算的方法很多,主要有解析法、经验法和数值方法。在解析法里,Loganathan^[6]等提出的解析解主要适用于估算隧道开挖引起的土体自由场位移。该方法主要适用黏性土,虽然是基于线弹性理论的,但是能够比较准确的判断隧道开挖引起的土体位移,其计算结果也与实际情况吻合较好。隧道开挖引起的土体自由场竖向位移见图 1。

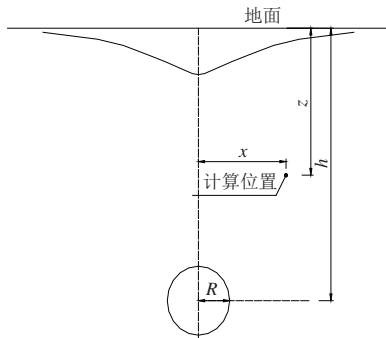


图 1 隧道开挖引起的土体自由场竖向位移示意图

本文利用 Loganatha 等提出的解析解分析隧道开挖对桩基的影响。根据该理论,隧道开挖引起的任意一点的土体竖向位移为:

$$u_y = \varepsilon_0 R^2 \left\{ \frac{z-h}{x^2 + (z-h)^2} + \frac{(3-4\mu)(z+h)}{x^2 + (h+z)^2} - \frac{2z[x^2 - (z+h)^2]}{[x^2 + (z+h)^2]^2} \right\} \cdot \exp \left\{ - \left[\frac{1.38x^2}{(h+R)^2} + \frac{0.69z^2}{h^2} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: ε_0 为平均地层损失率; R 为隧道半径; z 为地表以下深度; h 为隧道中心深度; x 为距离隧道轴线的水平距离; μ 为土体泊松比。

地层损失率与施工方法、土层地质情况、注浆率等有,建议根据施工方式,结合当地施工经验选择合适数值。吴昌胜等^[11]收集了国内 23 个地区盾构施工数据,获得地层损失率取值,并进行统计分析。当缺少当地经验值时,可参考该文献取值。

1.2 隧道开挖引起的桩基沉降

1.2.1 桩-土荷载传递关系

目前桩土界面荷载传递关系的研究有不少,本文计算采用美国 API^[9]规范推荐的桩-土荷载传递关系。桩土相对剪切位移与桩侧摩阻力之间的关系见图 2。

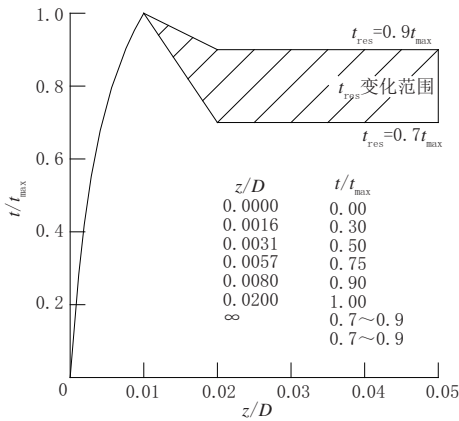


图 2 桩土位移与桩侧阻力关系曲线图

如图 2 所示, t 为桩侧摩阻力标准值,kPa,可根据地勘报告取值; t_{max} 为桩侧极限摩阻力,kPa, $t_{max}=Rt$,其中 $R=2$; D 为桩直径; t_{res} 为剩余桩侧摩阻力,kPa, $t_{res}=0.7\sim 0.9t_{max}$; z 为桩土相对剪切位移, z 的取值可根据下文公式(5)计算所得。

1.2.2 桩基沉降计算

《建筑桩基技术规范》单桩沉降采用单向压缩分层总和法计算土的沉降并计入桩身压缩。桩的最终沉降量可按式计算:

$$s = \phi \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} \Delta z_i + s_e \quad (2)$$

$$\sigma_{zi} = \frac{Q}{L} [\alpha I_{p,i} + (1 - \alpha) I_{s,i}] \quad (3)$$

$$s_e = \xi_e \frac{QL}{E_c A_{ps}} \quad (4)$$

式中: s 为桩基最终沉降; s_e 为计算桩身压缩; ϕ 为桩基沉降计算经验系数; Q 为桩顶附加荷载; L 为桩长; α 为桩端阻力发挥系数; ξ_e 为桩身压缩系数; $I_{p,i}$ 、 $I_{s,i}$ 为桩端阻力和桩侧阻力对第*i*土层的应力影响系数。

1.3 基本方程的建立及求解

假定桩基为刚性结构,桩身任一点处位移均为桩的最终沉降值。桩土之间任意一点的剪切位移为:

$$z_i = s - u_{yi}$$
 (5)

式中: s 为桩的最终沉降值; u_{yi} 为桩上任意一点所在位置处土的位移。当 $u_{yi} > s$ 时,桩会产生负摩阻力,任意一点的负摩阻力值可根据图2计算所得。

桩中性点位于 $u_{yi} = s$,设中性点距离桩顶的距离为 L_1 ,总负摩阻力值为 L_1 范围内负摩阻力总和,该负摩阻力即为盾构侧穿导致桩基产生的附加荷载。为简化计算,该负摩阻力视为一个集中荷载作用在桩顶位置,采用式(2)~式(4),即可计算得到最终的桩基沉降值 s 。由于简化计算中将桩侧负摩阻简化为集中荷载作用在桩顶,该简化方法会导致计算所得的沉降较实际情况大一些。

桩基沉降的计算关键在于如何获得桩侧负摩阻力,而桩侧摩阻力值与桩基沉降又有着直接一对一的关系,具体求解步骤见图3。

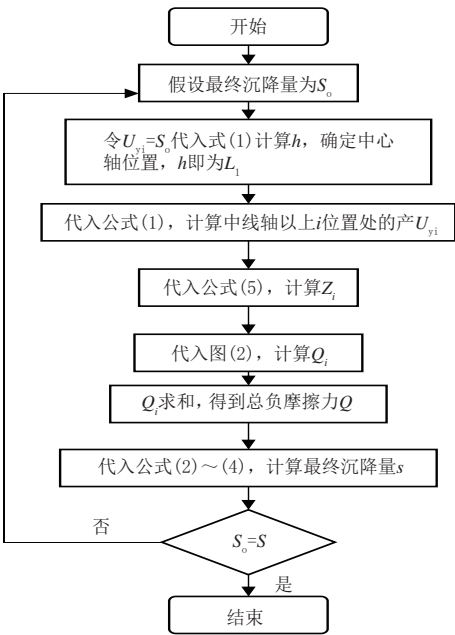


图3 求解步骤流程图

2 算例验证

本文结合某软土地区盾构隧道施工的案例,采用上述计算方法以及数值模拟计算桩基沉降,验证上述算法的合理性。

2.1 模型介绍

隧道外径13.1 m,厚度0.6 m,环宽2 m,混凝土强度等级为C60。隧道中心埋深19 m。桥梁桩基为68 m

的钻孔灌注桩,桩径1 m,混凝土强度等级为C40,距离盾构隧道边净距为3、5、10 m。盾构隧道所处地层主要位于淤泥、粉质黏土、黏土,具有压缩性高、强度低等特点,工程性质差。地下水位埋深0.5 m。盾构隧道与桩基的位置关系见图4。

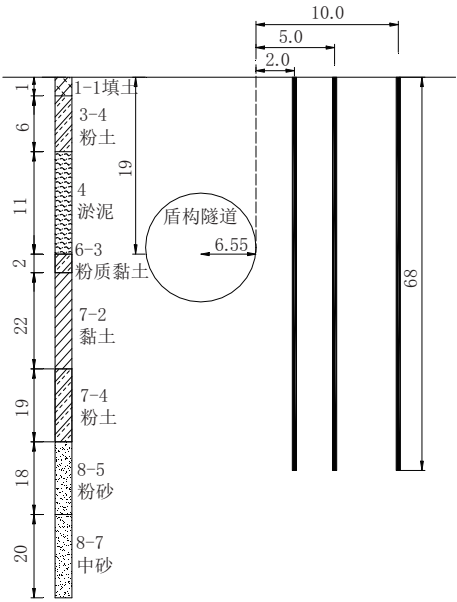


图4 盾构隧道与桩基布置立面图(单位:m)

利用MIDAS GTS软件建立三维模型,模拟盾构隧道侧穿桩基的过程。根据隧道与桩基的相对关系,建立108 m(X)×90 m(Y)×100 m(Z)的数值模型。X方向为隧道水平向,Y方向为隧道纵向,Z方向为竖直方向。

根据桩基距离盾构的距离分别建立模型一(净距3 m)、模型二(净距5 m)、模型三(净距10 m)。三维有限元模型见图5。对三维模型的四周及底面施加法向约束。

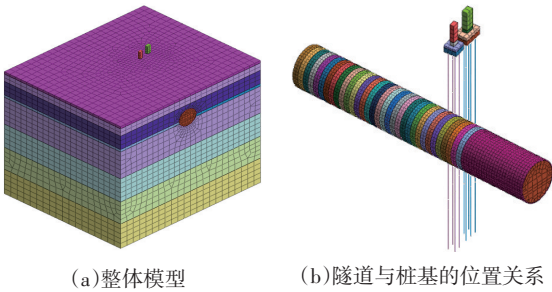


图5 三维有限元模型

2.2 地层与计算参数

土体采用修正莫尔库伦模型,根据地质报告可知,地层自上而下的土层依次为①₁(填土)、③₄(粉土)、④(淤泥)、⑥₃(粉质黏土)、⑦₂(黏土)、⑦₄(粉土)、⑧₅(粉砂)、⑧₇(中砂),各土层厚度及力学参数见表1。

表 1 土层参数的选取

编号	厚度/ m	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	c/kPa	$\varphi/(^\circ)$	压缩模量/ MPa	泊松比
① ₁	2	19	10	20	—	—
③ ₄	6	19.2	7.8	25.3	9.04	
④	11	16.4	6	2.8	1.81	
⑥ ₃	2	20	60.7	12.6	6.32	0.25
⑦ ₂	22	18.2	9.7	18	3.13	0.35
⑦ ₄	19	18.1	7.1	21.8	6.46	0.30
⑧ ₅	18	19.1	3	30	15	0.25
⑧ ₇	20	19.3	1.3	40.4	40	0.28

桩基采用桩单元,考虑桩土之间的接触关系。最终侧摩阻为 $q=K_s s_a$,其中 K_s 为剪切刚度模量, s_a 为桩基允许沉降限值,桩土界面参数见表2。

表 2 桩单元参数

材料	最终侧摩阻/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-2}$)	剪切刚度模量 K_s / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	法向刚度模量 K_n / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)
桩界面	20	1 120	11 200

衬砌采用C60混凝土,在模型中采用板单元进行模拟。本次分析采用等效刚度模型模拟管片,考虑管片接头的存在使管片环整体刚度降低,折减系数 $\eta=0.8$ 。等代层采用弹性材料,其材料为早期浆液,具体参数见表3。

表 3 材料参数参数

材料	弹性模量/MPa	泊松比	容重/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)
衬砌	28.8	0.2	25
等代层	0.05	0.3	21

在数值模型中,通过激活与钝化单元以及改变材料参数来模拟盾构施工,每一施工步骤隧道前进2 m。

2.3 数值分析结果

数值分析结果与公式法计算的桩基沉降见图6和表4。

根据图6可知,公式法计算结果与数值模拟分析结果沉降趋势相吻合,但公式法结果比数值分析结果大10%~20%左右,误差在可接受范围内。该误差产生的原因主要是将桩侧负摩阻简化为集中荷载作用在桩顶,模型一、二、三计算所得的总负摩阻力分别为1 275、892、701 kN。

按照《建筑桩基规范》计算单桩沉降时,重要参数的选择对沉降计算结果影响较大。对结果影响较大的参数有 α (桩端阻力与桩顶荷载之比)以及压缩层厚度。 α 的选择对沉降影响较大,可以根据图2桩端阻力与位移的关系合理选择 α 。另一方面公式法计算的压缩层厚度建议与有限元计算的压缩层厚度

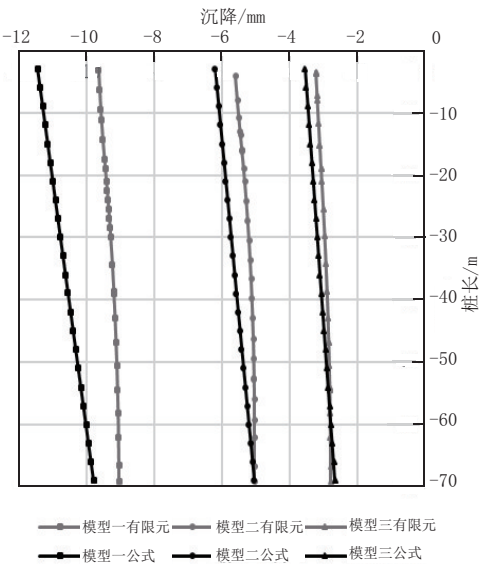


图 6 桩基沉降对比图

表 4 桩基沉降对比表

单位:mm

	计算方法	总沉降	桩底沉降	桩身压缩
模型一	公式法	11.46	9.8	1.66
	数值模拟	9.66	9.04	0.62
模型二	公式法	6.21	5.06	1.15
	数值模拟	5.6	5.05	0.55
模型三	公式法	3.56	2.66	0.9
	数值模拟	3.23	2.79	0.44

相同,这样结果才有可比性,且计算所得沉降值基本吻合。

3 结 论

本文提出了一种计算盾构施工对桩基竖向影响的简化方法,并与数值模拟分析结果进行对比。通过对比可知,该计算结果与数值分析结果差异不大。该方法提供了的算法可直接衡量盾构隧道开挖对桩基的竖向影响,以《建筑桩基规范》为基础,实操性较强,可为工程技术人员在项目前期阶段衡量桩基影响提供一定的指导。

参考文献:

[1] Loganathan N, Poulos H G, Stewart D P. Centrifuge model testing of tunneling-induced ground and pile deformation[J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 293-294.

[2] Jacobsz S W, Standing J R, Mair R J, et al. Centrifuge modelling of tunnelling near driven piles[J]. Soils and Foundation, 2004, 44(1):49-56.

[3] Lee C J, Chiang K H. Responses of single piles to tunneling-induced soil movements in sandy ground[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2007, 44(10): 1224-1241.

[4] 芮勇勤,岳中琦,唐春安,等.隧道开挖方式对建筑物桩基影响的数值模拟分析[J].岩石力学与工程学报,2003,22(5):735-741.

[5] 张宏博,黄茂松,庄纪栋,等.浅埋隧道穿越建筑物桩基的施工力