

地铁盾构隧道小净距穿越高架桥桩基数值模拟分析

吴晓腾¹, 李海生¹, 贾宝新²

(1. 中铁十八局集团南京地铁项目部, 南京 210000; 2. 辽宁工程技术大学土木与交通学院, 阜新 123000)

摘要:针对南京地铁3号线部分路段小净距穿越高架桥桩基问题,适当简化后建立了隧道、管片及桩基的三维数值模型。模拟结果表明,地铁盾构小净距穿越高架桥对地表和桩基的受力和变形将会带来影响,地表最大变形量大于桩基顶部变形量,隧道右帮下侧管片出现应力集中。通过与现场监测结果对比,现场监测值与数值模拟结果吻合,建议今后施工时控制好施工参数,加强跟踪监测,必要时进行跟踪注浆加固。研究结果为本工程的顺利实施提供了参考。

关键词:盾构;小净距施工;桩基;数值分析

中图分类号:U212

文献标志码:A

文章编号:1674-4764(2012)S2-0061-04

Numerical simulation analysis on small clear spacing crossing viaduct pile foundation of shielded subway tunnels

Wu Xiao-teng¹, Li Hai-sheng¹, Jia Bao-xin²

(1. The project department of Nan Jing subway of the 18th Bureau Group of China, Nan Jing 210000, P. R. China

2. Institute of Civil Engineering and Transportation of Liaoning Technical University, Fuxin 123000, P. R. China)

Abstract: Aimed at the problem of the in partial section of the Nanjing Metro Line 3, the three-dimensional pattern of tunnel, segment and pile foundation was established after appropriate simplification. The simulation results showed that, the Overpass pile foundation of Shield Tunneling to Adjacent Metro Shield Tunnel will have effect on the force and deformation of the earth's surface and pile foundation, the maximum deformation value of the earth's surface is larger than that of the pile foundation top, stress concentration appeared in right working slope lower side segment of tunnel. Through the comparison with field monitoring results, the field dates is consistent with the Numerical Simulation Results, the execution parameters are advised to be well controlled in the further construction, in the same time strengthening the track monitoring, tracking grouting reinforcement should be carried when necessary. The research results could provide reference for the smooth going of the project.

Key words: shield tunnel; tunneling close to; pile foundation; numerical analysis

随着我国社会经济飞速发展,城市建设日新月异,但由于城市土地资源有限,城市规模扩展受到限制,因此地下空间被不断地开发利用,隧道盾构法以其施工速度快、安全高效、地表变形小、对地面环境干扰小等优点成为城市地下空间开发的主要方法。

盾构施工对土体的扰动表现为盾构对土的挤压和松动、加载与卸载、孔隙水压上升与下降所引起土性的变异、地表隆起与下沉等。盾构施工引起的地层损失和盾构隧道周围受扰动或受剪切破坏的重塑土再固结,是地面沉降的基本原因。与其他形式的隧道盾构施工相比,小净距盾构施工对已建高架桥基础的影响预测及控制问题更为复杂、施工难度更大。基于此,地铁盾构引起的现存桩基承载力、下沉量问题必须做出深入研究^[1-4]。

文献[5]分析地铁施工对邻近桥桩影响研究现状,介绍典型实例和处理方法,提出目前研究中亟待解决的关键问题,并对未来的研究途径做出展望。建成后的垂直小净距穿

越高架桥桩基安全分析等很有研究价值,可以为南京地铁3号线盾构小净距穿越高架桥复杂工况地表沉降做出预测,为高质量建设地铁提供可靠的技术支撑,为地铁沿线建筑与工程的安全性做出预测,可谓意义重大。

本文采用FLAC3D数值分析软件分析南京地铁3号线盾构推进过程中,从已有高速高架桥桩基下穿过,盾构施工对桩基应力和位移的影响,从而对工程的可行性和风险进行判断。

1 工程概况

南京地铁3号线吉印大道站-秣周路站部分区间段需要从已有高速高架桥下绕越,绕越高速为预应力连续箱梁桥,采用1000桩基础,桩长46m,盾构隧道与桩基础最小净距约1.9m,桩顶距地面5m,盾构区间与绕越高速桩基之间采取地表压密注浆加固方式,该路段拟采用盾构法施工,隧道直径6.2m,隧道底板标高-13.392~-4.382m。隧道顶部距离地面xxm,隧道将桩基一侧穿过,其中隧道外侧距桩基

的水平距离仅为 2 m 左右,如图 1 所示。

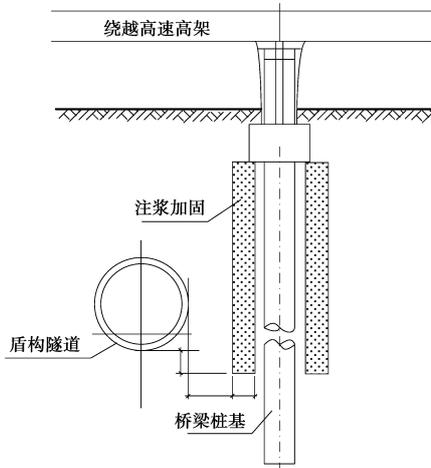


图 1 盾构区间邻近桥基时加固示意图

该段区间段土体物理力学指标如表 1 所示。隧道穿越土层及基础底板下岩土层主要为③-1b1-2 粉质粘土、③-2b2-3

粉质粘土(局部为②-2b4 淤泥质粉质粘土、③-2c-d2-3 粉砂夹粉土),其中②-2b4 淤泥质粉质粘土为软弱土层、③-2c-d2-3 粉砂夹粉土为易扰动土层,其他为可~硬塑土层。线路区内地质构造相对简单,地层产状一般比较和缓,走向北西,倾角小于 30°。据区域地质资料反映,区内仅发育低序次 NE 和 NW 二组断裂,对基岩面的起伏变化有一定的影响。

2 计算模型

2.1 模型建立

本计算采用 Ansys 软件建立三维模型,然后导入到 FLAC3D 软件进行计算,得出合理的模拟结果,为现场施工做出指导。模型尺寸长×宽×高为 50 m×30 m×40 m,隧道位于模型中上部,隧道中线两侧各 25 m,沿隧道盾构方向为 30 m,隧道为圆形断面,半径为 3.1 m,三层管片支护,共厚 3 500 mm。管片单元采用六面体单元,土体及桥基采用四面体单元,图 2 中三维模型共 409 323 个单元,91 207 个节点,为尽可能准确地考察隧道、桥基变形和受力情况,模型中隧道、桥基附近单元格较密,远离隧道、桥基处单元划分较疏。

表 1 土体物理力学指标

土层编号	土体名称	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 E_{s1-2}/MPa	粘聚力 C_q/kPa	内摩擦角 $\varphi_q/(\text{°})$	含水量 $w/\%$	土重度 $\gamma/\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	孔隙比 e	层底埋深/ m
①-2b2-3	素填土	0.316	7.11			28.2	19.3	0.824	0.00~3.00
②-1b2-3	粉质粘土	0.319	5.97	32.1	10.8	29.5	19.3	0.832	3.00~14.50
②-1c-d3-4	粉土夹粉砂	0.430	4.64	10.0	21.0	33.1	18.8	0.915	5.70~8.70
②-2b4	淤泥质、粉质粘土	0.850	2.99	11.4	5.1	43.2	17.7	1.236	5.40~17.50
②-3b3-4	粉质粘土	0.368	5.15	28.0	11.0	28.4	19.3	0.814	8.00~17.50
③-1b1-2	粉质粘土	0.231	7.79	49.4	13.2	24.5	20.0	0.699	3.10~26.50
③-1c-d3-4	粉土夹粉砂	0.241	8.06	7.9	26.3	27.9	19.3	0.787	6.90~18.00
③-2b2-3	粉质粘土	0.275	6.42	33.2	12.5	24.0	20.0	0.686	19.80~33.00
③-2c-d2-3	粉砂夹粉土	0.156	10.49	4.8	25.3	19.1	20.7	0.552	27.00~32.90
③-3b1-2	粉质粘土	0.220	8.26	49.8	13.2	23.3	20.2	0.668	26.00~28.60
③-4e	粉质粘土夹砾石	0.186	9.08			18.7	20.4	0.580	26.30~34.60
K1g-2	强风化泥质粉砂岩	0.125	12.47	45.0	16.0	12.9	21.2	0.441	30.05~40.00

表 2 土体和材料参数

名称	弹性模量/GPa	泊松比	容重/ $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$
管片	210.0	0.26	7 850
桩基	31.5	0.24	2 500
注浆层	25.5	0.20	2 400

2.3 模拟结果分析

计算时,首先开挖盾构并迅速拼装盾构管片成环,采用错缝拼装方法,再进行注浆加固。模拟中的隧道变形是在准静态下完成的,总长 30 m,每次开挖 3 m,分 10 步开挖,每次开挖后隧道顶底板变形速率较大,有明显的拐点,而后变形速率减小,变形基本停止,进入稳定阶段,与实际情况相符合。

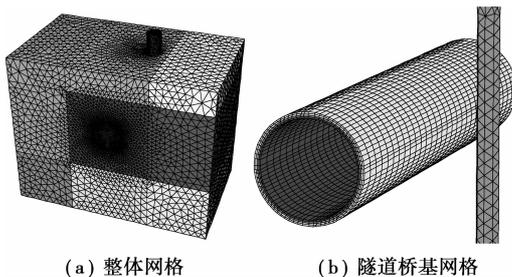


图 2 模型网格划分

2.2 材料计算参数

土体材料参数详见表 1,管片、桩基、混凝土结构视为弹性体,具体参数见表 2,运用 Mohr-Coulomb 屈服准则判断土体的破坏。

2.3.1 小净距穿越高架桥对地表土体变形的影响 按照 Peck 理论分析,盾构开挖引起的地表沉降曲线近似呈高斯分布,会形成一个沉降槽^[6],根据模拟结果绘制了南京地铁 3 号线小净距穿越高架桥情况下地表土体沉降曲线,如图 3 所示。

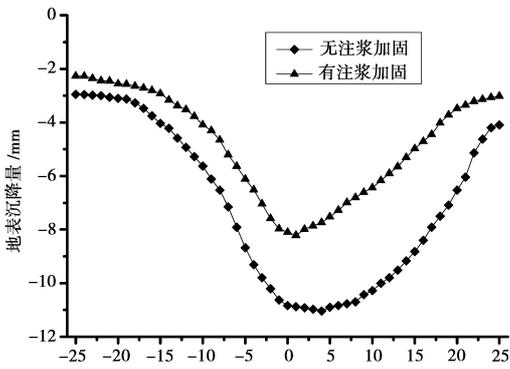


图 3 隧道施工引起的地表沉降

由图 3 中可以看出,高架桥桥基无注浆加固时,靠近高架桥一侧的土体变形大于另一侧,随着盾构的继续进行,地表沉降继续发展,但趋势明显趋于稳定,最大沉降量发生在隧道与桥基之间上方,约 11 mm 左右;桥基有注浆加固时,地表沉降量明显降低,最大沉降量向隧道一侧移动,最大沉降量约 8 mm。

2.3.2 小净距穿越高架桥受力影响分析 通过模拟隧道穿越已有高架桥桩基,其最大主应力分布如图 4 和图 5 所示,由图 4 和图 5 中可以看出,最大主应力位于桥梁桩基底部,隧道顶板、侧底 45°位置主应力较大,注浆加固起到了一定的效果。图 3 中隧道右帮中部距离桥基 2 m,该处最大主应力较小,桩基的影响最大主应力得到了一定程度的释放。

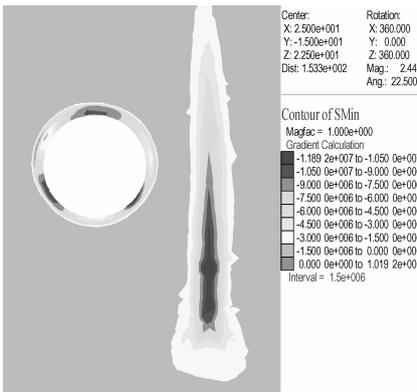


图 4 桩基中截面处桩基与隧道最大主应力分布云图

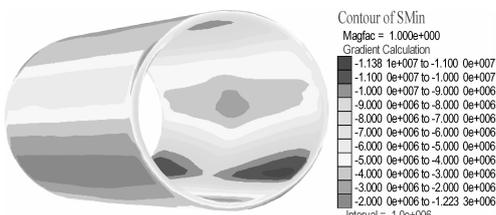


图 5 隧道管片三维最大主应力云图

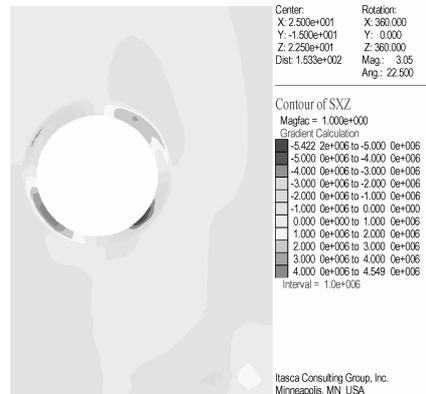


图 6 桩基中截面处桩基与隧道剪切应力云图

小,隧道右帮下侧剪切应力较大,主要原因为盾构机向前推进过程中,土体与管片单元摩擦加大,导致剪切应力加大,现场施工时应适当调整施工参数,减小盾构推力,匀速推进。

2.3.3 净距对隧道穿越高架桥位移影响分析 当隧道埋在 12 m 情况下,取隧道与高架桥间净距为 1.0 m、2.0 m、3.0 m、4.0 m、5.0 m 和 6.0 m 下重新进行有限元模拟,在地表和桩基顶部设置监测点,监测其位移变化,得到图 7 和图 8 所示结果。

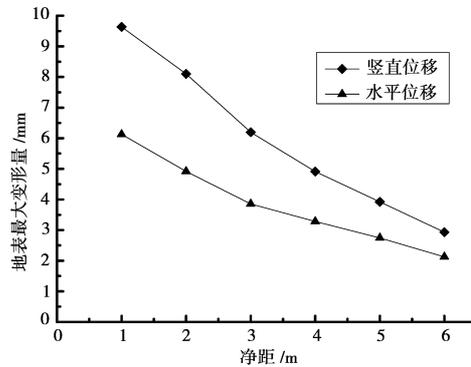


图 7 不同净距下地表最大变形量

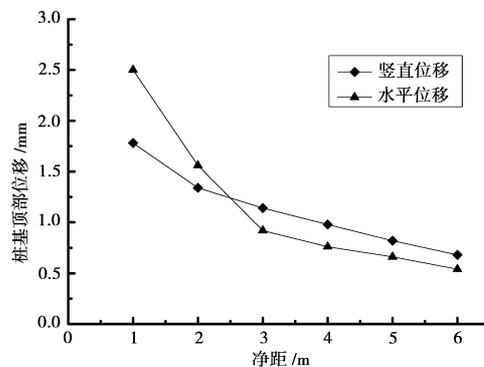


图 8 不同净距下桩基顶部位移变化

隧道开挖对地表变形、桩基顶部位移变化的影响是设计者最关心的问题之一。在图 7 模拟的不同净距下,盾构小净距穿越高架桥桩基引起的地表水平位移和竖直位移在 10 mm 以下,且竖向位移大于水平位移。图 8 模拟的不同净距下,桩基顶部竖直位移和水平位移随着净距的增加而减小,净距越小位移变化率越快,当净距小于 2.5 m 时,桩顶水平

由图 6 可以看出,盾构穿越桩基附近其剪切应力影响较

位移大于竖直位移。

3 计算结果与现场监测数据对比

在南京地铁三号线盾构小净距穿越高架桥桩基础施工中对桩轴力进行了实测,本文重点就盾构过程中桥墩轴力和竖向位移进行分析。在桩基顶部向下约2 m处向桩身钻孔,钻入深度约为桩径的1/3,安装应力盒,并用速凝混凝土浇注振捣密实堵孔,保持应力盒受力状态良好并能灵敏反应桩内轴力的变化情况。同时,桩基竖向位移监测采用精密水准测量方法,控制网采用一等水准测量精度要求施测,观测点采用二等水准测量精度要求施测,监测精度为0.3 mm。监测第一天盾构机掘进到高架桥附近,第二天开始下穿施工,现场监测过程中,每天记录一次数据。

桩基轴力、竖向位移计算值与实测值对比情况如图9和图10所示。由图9和图10可知,隧道施工对桩基轴力和竖向位移影响的实测值与数值模拟结果在总体规律上较为吻合,所不同的是桩基轴力实测值大于计算值,桩基竖向位移实测值小于计算值,主要原因在于:FLAC3D数值模拟考虑的是桩基底段轴力变化情况,而现场实测值是桩顶附近轴力变化情况;同时这两部分侧摩擦阻力不同,现场实测含有侧向摩擦阻力,而计算中未考虑,故桩基竖向位移实测值小于计算值,其在数值上有一定的差异,总体趋势相同,因此可以说明本文中数值模拟结果的可靠性。

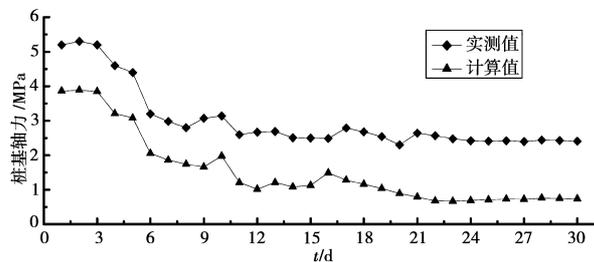


图9 桩基轴力实测值与计算值对比曲线

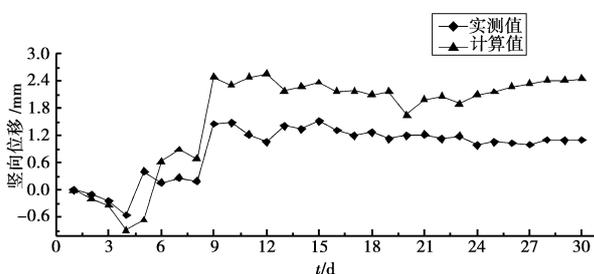


图10 桩基竖向位移实测值与计算值对比曲线

盾构未到达桩基阶段,桩基竖向位移曲线变化较小,现场实测竖向位移在0.3 mm附近;盾构到达桩基阶段,土体扰动加剧,带动桩基快速产生向上位移,桩基竖向位移迅速由负向转正向,盾构过程中,不断的开挖支护导致桩基轴向应力、竖向位移波动,现场实测桩基竖向位移控制在1.5 mm以下;盾构离开桩基阶段,土体扰动减小,隧道管片支护作用明显,桩基位移进入稳定阶段,现场实测竖向位移在1 mm附近。

4 结论

通过模拟地铁盾构小净距穿越高架桥桩基的整个施工过程,分析了隧道小净距从已有高架桥桩基穿过程受力和变形,得出以下主要结论和建议:

1)盾构推进过程中,地表和桩基的受力和变形受到整个施工过程的影响,地表最大变形量大于桩基顶部变形量,隧道右帮下侧管片应力较大,注浆加固时对减小地表和桩基的受力和变形影响效果显著。

2)从仿真模拟计算结果知,净距对隧道穿越高架桥桥基和地面的位移影响较大,施工时应适当调整施工参数、减小盾构推力,匀速推进。

3)通过与现场监测对比分析,桩基轴力和竖向位移实测值与数值模拟结果在总体规律上吻合,数值模拟结果可以为现场提供参考。

4)为了保证现场施工过程中桩基的安全稳定,建议控制好施工参数,加强跟踪监测,必要时进行跟踪注浆加固。

参考文献:

- [1] Loganathan N, Poulos H G, Stewart D P. Centrifuge Model Testing of Tunneling-induced Ground and Pile Foundation[J]. Geotechnique, 2000, 50(3): 283-294.
- [2] 杨晓杰,邓飞皇,聂雯,等. 地铁隧道近距离穿越施工对桩基承载力的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1290-1295.
- [3] 李强,王明年,李德才,等. 地铁车站暗挖隧道施工对既有桩基的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 184-190.
- [4] 邵华,张子新. 盾构近距离穿越施工对已运营隧道的扰动影响分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增2): 545-549.
- [5] 何海健,刘维宁,项彦勇,等. 地铁施工对邻近桥桩影响的研究现状与探讨[J]. 都市轨道交通, 2006, 5(19): 85-88.
- [6] Peck R B. Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground [M]. New York: Published by ASCE, 1984.

(编辑 詹燕平)