

软土大直径盾构隧道极端近距离穿越桩基影响规律研究

杜 峰

(上海申铁投资有限公司,上海市 200030)

摘 要:以上海轨道交通市域线机场联络线工程为例,研究了软土大直径盾构隧道在极端近距离条件下侧穿桩基的影响规律。基于 PLAXIS 3D 有限元软件建立了考虑大直径盾构施工过程的数值分析模型,揭示了不同地层损失率对桥台、桥桩变形及桩基附加弯矩的影响规律。结果表明:当地层损失率为 2.5‰ 时,桥台和桥桩的最大变形均小于 10 mm,变形控制在允许范围内;通过加固盾构隧道穿越段土体以及桥桩承台区域可有效控制盾构隧道近距离侧穿桩基的影响。

关键词:桩基;极端近距离穿越;地层损失率;数值模拟;变形特征;大直径盾构隧道

中图分类号: U445.43

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)12-0179-06

0 引 言

随着城市轨道交通的快速发展,位于软土地层当中的桩基工程施工愈发增多。由于软土层的地质条件较差,复杂的地下基础设施情况使得盾构隧道施工时需综合考虑地质、结构及施工工艺等多方面因素影响^[1]。在盾构隧道掘进期间,桩基受到的力和变形可能会进一步导致地基沉降及结构损伤,因此,在软土地层中如何控制盾构隧道近距离穿越桩基的变形成为当前工程实践中的重要问题。

城市中的盾构施工往往会对邻近桩基造成不良影响。为确保桩基稳定,研究盾构穿越时桩基的受力特性及变形规律至关重要^[2-4]。目前,相关学者对盾构施工的影响因素进行了研究。吴飞翔^[5]通过建立三维数值模型,研究了不同桩距距离条件下盾构掘进对桩基位移和内力的影响,分析了整体加固与局部加固对桩基位移和应力变化的影响。刘志宏^[6]研究了隧道下穿高铁桩板复合地基,发现采用先右线后左线的施工方式对桩板复合地基的变形影响较小,同时,设置隔离桩能有效减少桩板两端的变形。李明睿等^[7]模拟了盾构隧道近距离下穿桩基的施工过程,研究了双线盾构掘进时桩基位移的变化,结果表明开

挖过程将导致桩基发生沉降、侧移及倾斜。目前,对于大直径盾构隧道在软土地层中近距离穿越桩基对桥台、桥桩及墩柱的变形影响规律尚不明确,仍需进一步研究。

依托上海市轨道交通市域线机场联络线(西段)2标段工程,本文针对软土大直径盾构隧道极近距离下穿高架桥桩基的问题,采用有限元模拟进行了施工全过程的数值分析。考虑不同的地层损失率,揭示盾构隧道掘进对高架桥桥台、桥桩及南北匝道墩柱变形的影响,分析桥桩附加弯矩的变化规律。研究结果为类似工程的安全施工提供技术支持。

1 工程概况

1.1 工程简介

本项目受工程环境限制,隧道必须以近距离通过 G60 高架桥的主桥桩和南北匝道桩基。隧道经过 G60 高架桥的平面布局示意如图 1 所示,图 2 所示为穿越段的示意图。

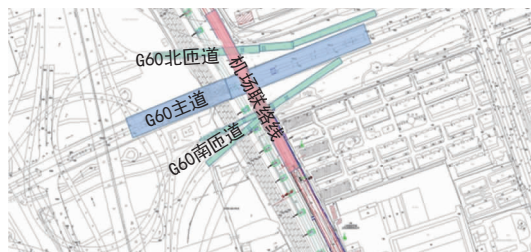


图 1 机场线与 G60 高架桥平面图

收稿日期: 2024-05-17

作者简介: 杜峰(1974—),男,本科,正高级工程师,从事地铁工程管理工作。

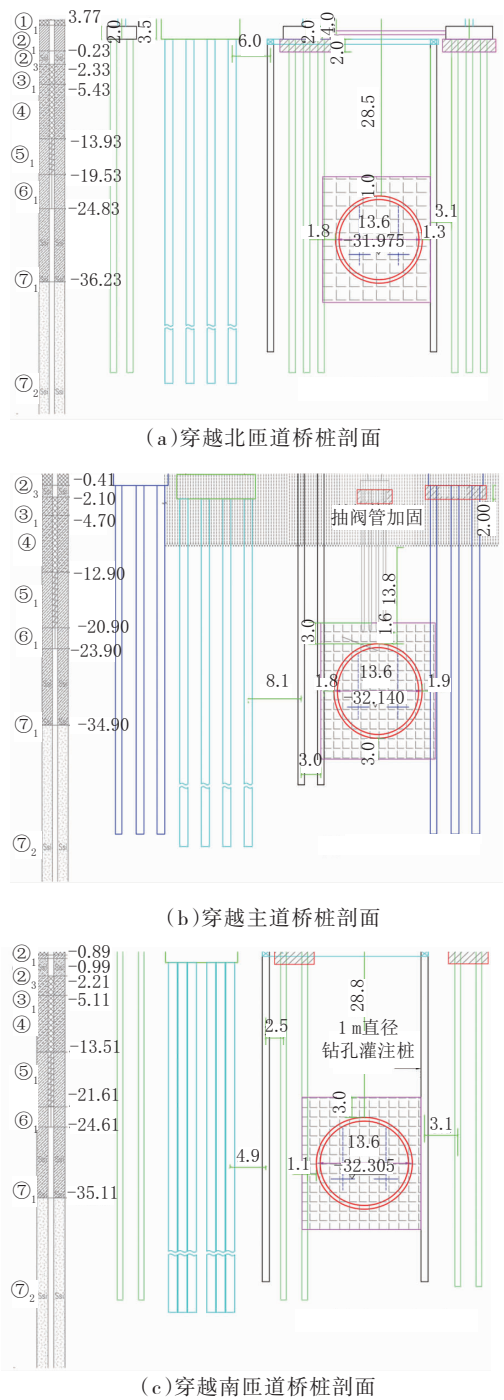


图2 机场线穿越 G60 匝道和主桥桩剖面示意图(单位:m)

本文以上海轨道交通市域线机场联络线(西段)2 标段作为研究对象,其区间全长 4 939.7 m,隧道的最大覆土厚度为 35.8 m,盾构区间全线与沪昆高铁并行,主要穿越的地层为淤泥质粉质黏土、粉质黏土、砂质粉土中夹有黏土、粉砂层等。盾构隧道的外径为 13.6 m,内径为 12.5 m,壁厚 0.55 m,采用 C60 混凝土,管片环宽 2 m,设计为“6+2+1”的 9 分块方式。

机场线侧的 G60 高架桥墩段为单洞双线隧道,轨道面距离拱顶外侧约 9.12 m。隧道顶部埋深约 28.5 m,如图 3 所示。G60 高架桥北匝道桩基的桩长

为 52 m,桩底标高为 -50.4 m,隧道边缘与桥桩桩基之间的净距为 1.8 m;G60 高架桥主道桩基础桩长 50.2 m,桩底标高为 -50.6 m;另一段桩长 50 m,桩底标高为 -48.3 m。由于隧道线路紧邻高架桥桩基,施工期间难免会扰动周围地形,进而影响桥梁结构的沉降变形。本文分析中的施工参数影响统一使用地层损失率表示。

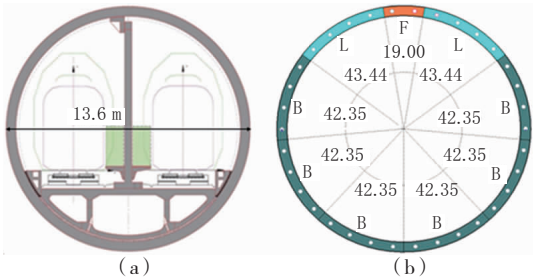


图3 机场线下穿 G60 高架桥段隧道结构断面示意图

1.2 工程地质条件

场地范围内各土层的物理力学指标如表 1 所列。项目区域的地下水平均水位埋深为 0.5~0.7 m,承压水的埋深范围为 3~12 m,设计中考虑最不利承压水位为 3 m。

表 1 土层物理力学性质参数

编号	土层	厚度 / m	黏聚力 c/kPa	摩擦角 $\varphi/^\circ$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	填土	1.1	1.0	10.0	18.9	5.00×10^{-5}
2	黏土	1.7	21.8	14.2	18.9	3.00×10^{-7}
3	黏质粉土	7.2	3.2	28.8	19.4	3.00×10^{-4}
4	淤泥质粉质黏土	8	11.2	13.8	17.6	1.00×10^{-6}
5	淤泥质粉质黏土	7.6	12.4	14.6	17.7	2.00×10^{-7}
6	粉质黏土	6.2	15.2	15	17.8	1.00×10^{-6}
7	粉质黏土	8.2	43.6	15.7	19.5	1.00×10^{-6}
8	粉砂	7.1	3.0	31.8	19.7	1.86×10^{-3}
9	粉砂	8.5	3.4	32.2	20.0	6.03×10^{-3}

2 盾构隧道穿越桩基的数值分析模型

2.1 数值计算模型

利用 PLAXIS 3D 有限元软件构建数值模型,并对模型进行简化处理:(1)将土体假定为各向同性的水平分层连续材料;(2)仅计算竖向自重应力;(3)假设隧道施工过程中发生的应力与应变属于小变形范围,不考虑大变形问题。

本文的模拟对象为通过 MJS 工法对预定桩段的土体进行加固后,盾构隧道穿越对 G60 高架桥桥桩及南北匝道的附加位移影响。地层加固措施如下:(1)在隧道横截面上,隧道周围左右各外扩 1 m,隧

道底部下 1 m 到粉质黏土层底部范围内的土体通过 MJS 高压旋喷加固,纵向加固范围为盾构隧道通过 G60 高架桥桩基前后 6 m;(2)将 G60 桥桩承台向外扩展 0.5 m,并使用厚度为 2 m 的袖阀管进行注浆加固。盾构掘进至 G60 高架桥北匝道桩基正前方后,推进穿越北匝道桩群,穿越北匝道后继续推进到主道桩基群,随后推进通过南匝道桩群,直到盾构隧道完全通过高架桥墩。

图 4 所示为盾构侧穿 G60 高架桥的三维模型示意图。整体模型纵向长度为 200 m,横向宽度为 120 m,竖向高度为 80 m,共划分节点 227 108 个,单元 141 738 个。根据地质勘察报告,土体使用弹塑性模型模拟,并基于摩尔-库伦屈服准则和相关联流动法则进行计算。依据地勘报告选择土体参数,注浆弹性模量为 5 GPa,重度为 23 kN/m³,泊松比为 0.2,结构的主要物理力学参数见表 2。

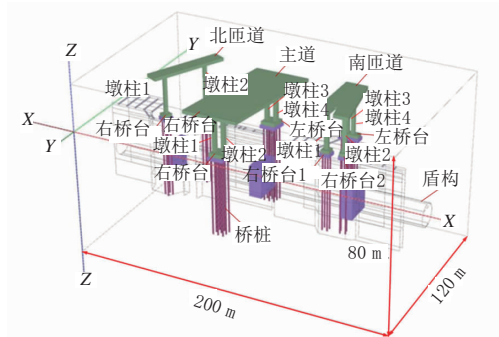


图 4 盾构侧穿 G60 高架桥三维数值模型

表 2 结构关键物理力学参数

不同结构类型	弹性模量 E/GPa	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	泊松比 ν
桩基	36.5	24	0.2
管片	34.5	25	0.3
钢支撑	200	78	0.2

土体使用实体单元模拟,隔离墙采用板单元模拟,管片衬砌通过线弹性模型模拟,衬砌管片采用均质圆环单元模拟。每掘进一环后,立即施加 0.3 MPa 的注浆压力。模型侧面法向约束,顶面保持自由状态,底部为固定约束。

2.2 施工过程模拟

根据现场情况,模拟分为 37 个施工步骤,主要施工情况如图 5 各图所示,具体步骤如下:

(1)初始阶段:激活土层状态及初始边界条件,完成初始地应力平衡,进行桥梁及隔离墙施工,激活桥梁及隔离墙结构,开展隧道穿越 G60 高架桥附近土体的加固工作。

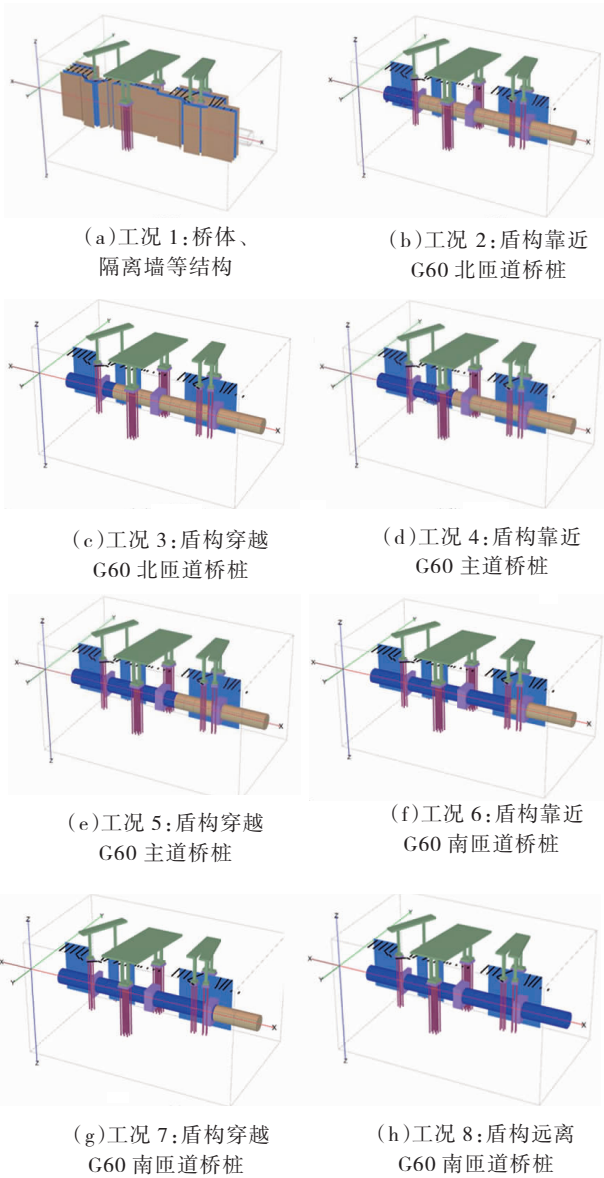


图 5 盾构侧穿 G60 高架施工示意图

(2)盾构掘进模拟:每个掘进区段分为两步完成,第一步钝化土体,立即施加注浆压力和掌子面压力,第二步固定掌子面压力,激活开挖区的隧道衬砌与土体界面单元,并引入地层损失效应。

3 隧道侧穿 G60 高架施工全过程诱发响应规律

3.1 地层损失率 2.5%工况

3.1.1 盾构隧道穿越 G60 桥台变形响应

地层损失率为 2.5%时,盾构施工引起的最大沉降与水平位移详如图 6 所示。

随着地层损失率减小,南北匝道和主道桥台的附加沉降和水平位移发展规律基本不变,但隧道施工对地层的扰动明显减少,桥台的附加位移也有所减小。盾构隧道穿越完高架后,北匝道桥台的最大沉

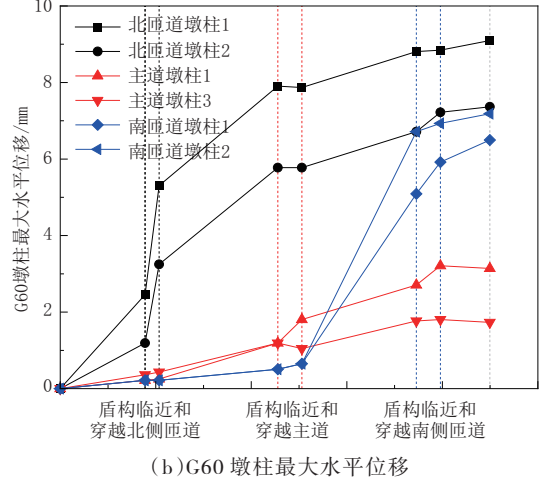
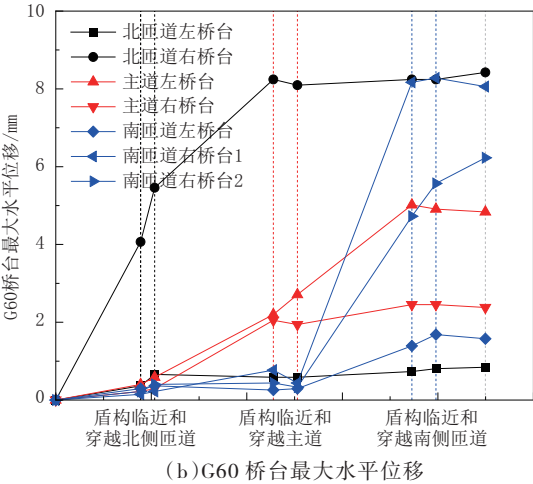
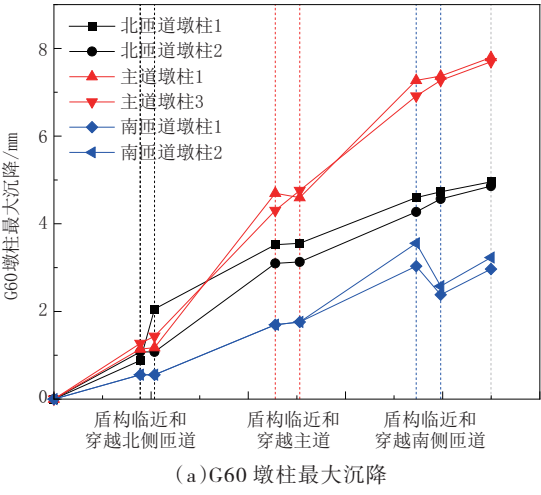
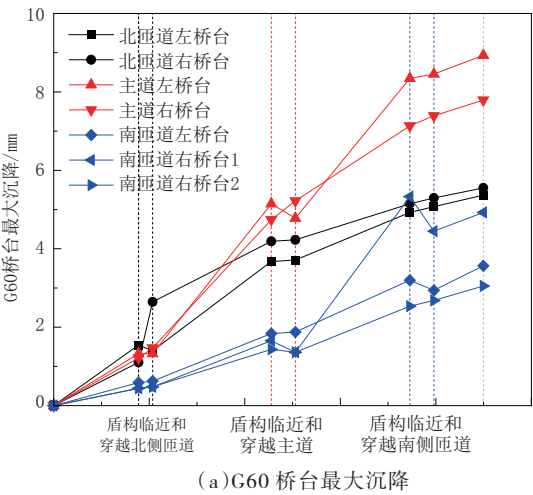


图 6 G60 高架桥台最大沉降与水平位移

图 7 盾构侧穿 G60 高架墩柱最大沉降和水平位移

降为 5.537 mm,最大水平位移为 6.331 mm;主道桥台的最大沉降为 8.908 mm,最大水平位移为 3.763 mm;南匝道桥台的最大沉降为 4.897 mm,最大水平位移为 6.209 mm,桥台的最大水平位移和最大沉降均小于 10 mm。盾构隧道侧穿 G60 高架桥时造成的桥台最大水平位移和沉降结果如表 3 所列。

表 3 G60 桥台最大水平和沉降 单位:mm		
位置	水平变形	竖直变形
G60 北匝道左桥台	0.650	5.396
G60 北匝道右桥台	6.331	5.537
G60 主道左桥台	3.763	8.908
G60 主道右桥台	1.780	7.778
G60 南匝道左桥台	1.190	3.562
G60 南匝道右桥台 1	6.209	4.897
G60 南匝道右桥台 2	4.67	3.042

盾构掘进造成 G60 北匝道、主道及南匝道墩柱最大沉降与水平位移如图 7 所示。

墩柱的沉降和水平位移变化与桥台的变化规律相吻合。当盾构接近桥墩时,显著的附加变形开始在

墩柱发生;随着盾构逐步远离,墩柱受其影响的变形逐渐减小。随着地层损失率的减小,盾构隧道侧穿高架桥南北匝道和主道时,墩柱的附加位移也相应减小。各墩柱的最大附加位移量如表 4 所列。当盾构掘进时,北匝道墩柱的最大沉降为 4.952 mm,最大水平位移为 9.106 mm,最大差异沉降为 0.098 mm;主道墩柱的最大沉降为 7.795 mm,最大水平位移为 3.125 mm,最大差异沉降为 0.789 mm;南匝道墩柱的最大沉降为 4.414 mm,最大水平位移为 7.168 mm,最大差异沉降为 2.135 mm。实际施工过程中,北匝道墩柱的实测最大累积沉降为 5.250 mm,实测最大累积水平位移为 6.480 mm;主道墩柱的实测最大累积沉降为 5.690 mm,实测最大累积水平位移为 4.670 mm;南匝道墩柱的实测最大累积沉降为 2.200 mm,实测最大累积水平位移为 4.490 mm。通过图 8 可以看出,监测结果与模拟结果基本吻合,表明数值模型合理。综上所述,当地层损失率为 2.5‰时,南北匝道与主道的桥台和墩柱的最大水平位移、最大沉降和最大差异沉降均控制在 10 mm 以内。

表 4 G60 高架墩柱最大附加位移量 单位:mm

位置	最大沉降量	最大水平位移	最大差异沉降量
G60 北匝道墩柱 1	4.952	9.106	0.098
G60 北匝道墩柱 2	4.854	7.359	
G60 主道墩柱 1	7.795	3.125	0.789
G60 主道墩柱 2	7.554		
G60 主道墩柱 3	7.674	1.739	
G60 主道墩柱 4	7.006		
G60 南匝道墩柱 1	2.953	6.505	2.135
G60 南匝道墩柱 2	2.279		
G60 南匝道墩柱 3	4.414	7.168	
G60 南匝道墩柱 4	2.516		

表 5 G60 高架墩柱差异水平位移及倾斜率

位置	水平位移差 /mm	倾斜率
G60 北匝道墩柱 1	3.592	1/7 266
G60 北匝道墩柱 2	6.221	1/4 195
G60 主道墩柱 1	2.179	1/11 978
G60 主道墩柱 2	4.346	1/6 055
G60 主道墩柱 3	1.258	1/20 747
G60 主道墩柱 4	0.962	1/27 136
G60 南匝道墩柱 1	5.811	1/4 491
G60 南匝道墩柱 2	1.393	1/18 736
G60 南匝道墩柱 3	2.648	1/9 856
G60 南匝道墩柱 4	4.688	1/5 567

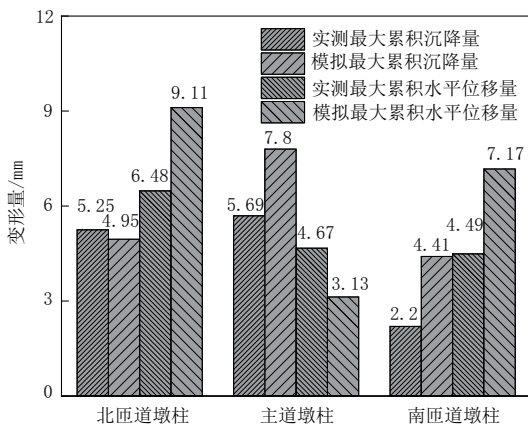


图 8 盾构侧穿 G60 高架墩柱实测值和模拟值对比

3.1.2 盾构隧道穿越 G60 高架桥墩柱倾斜响应

假设桥梁的上层主体是刚性体,当地层损失率设置为 2.5‰时,盾构隧道穿越 G60 高架桥导致墩柱出现倾斜现象,水平位移差出现在墩柱的顶部与底部之间。墩柱的倾斜率通过其水平位移差与初始高度之比来计算,详见表 5。数值计算结果表明:G60 北匝道墩柱的最大水平位移差为 6.221 mm(墩柱 2),其初始高度为 26.1 m,对应的最大倾斜率为 1/4 195;G60 主道墩柱的最大水平位移差为 4.346 mm(墩柱 2),计算出的最大倾斜率为 1/6 055;G60 南匝道墩柱的最大水平位移差为 5.811 mm(墩柱 1),计算的倾斜率为 1/4 491。总的来说,通过对隧道穿越 G60 高架桥的相关土体加固后,G60 高架桥南北匝道与主道的墩柱倾斜率均控制在 1/3 500 以内,符合设计规范要求。

3.2 桩基附加弯矩分析

在高架桥桩基附近,隧道进行近距离穿越时,盾构隧道施工产生的水平力会对桩基产生附加弯矩,需要对桩基的承载力进行验算。当地层损失率设置为 2.5‰时,盾构隧道侧穿后,G60 高架南北匝道及主道桥桩的最大附加弯矩分布如图 9 所示。G60 北

匝道的最大附加弯矩为 493.47 kN·m,出现在盾构隧道侧穿时距离最近的右侧桩群;G60 主道的最大附加弯矩为 491.85 kN·m,出现在盾构隧道侧穿时距离最近的左侧桩群;G60 南匝道的最大附加弯矩为 482.56 kN·m,出现在盾构隧道侧穿时距离最近的右侧桩群。由图 9 可知,在隧道通过的相应标高位置附近,各桥桩出现额外弯曲力矩的极值。因此,盾构隧道侧穿桥桩时,应重点监测隧道埋深处桥桩的内力和变形情况。如果无法进行监测,应精细管理隧道掘进过程中对结构产生的干扰,并特别重视承台发生的形变,必要时应采取注浆加固,防止桥桩产生过大的附加弯矩。

4 结 语

本文建立了盾构隧道穿越 G60 高架主道及南北匝道全过程扰动的数值分析模型,分析了软土大直径盾构隧道极端近距离穿越 G60 高架桥南北匝道与主道的桥台、桥桩位移及墩柱倾斜的影响规律,主要结论如下:

- (1)大型盾构机以较短距离接近高架桥梁桩基时,盾构隧道侧穿施工产生的水平力会对桩基产生附加弯矩;
- (2)当地层损失率控制在 2.5‰时,G60 高架南北匝道与主道桥墩柱的最大倾斜率均小于 1/3 500,满足设计安全要求;
- (3)盾构隧道掘进对 G60 南北匝道桥桩的水平扰动较大,主要原因在于南北匝道部分桥桩位于隔离墙内部,其中,南匝道桥桩距离隧道开挖较近,而 MJS 加固区域相对较小,导致南匝道桥桩出现向隧道开挖方向的最大水平位移;
- (4)当地层损失率控制在 2.5‰时,G60 高架桥

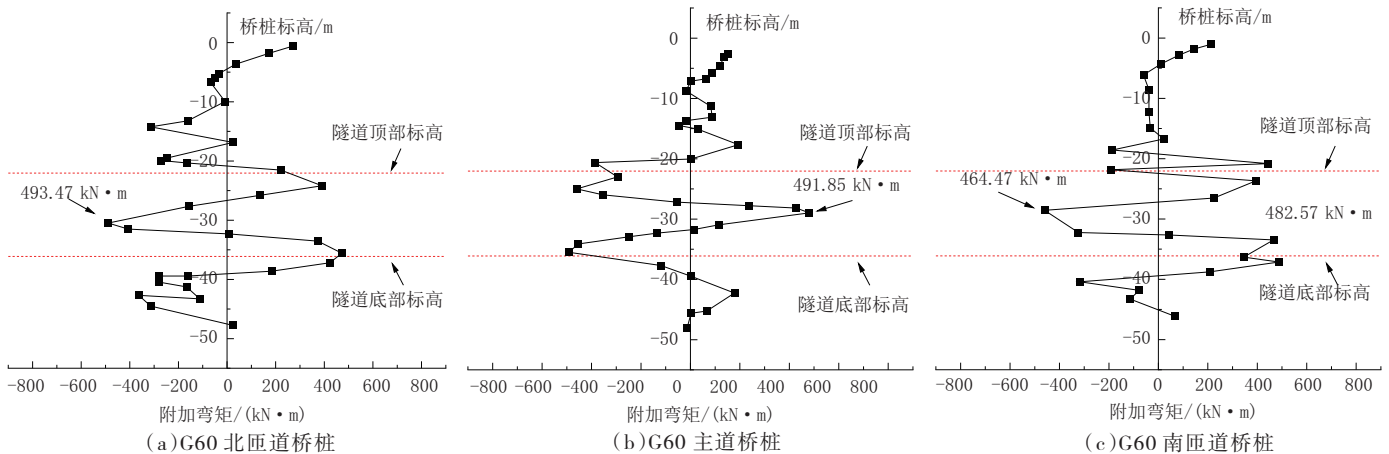


图 9 G60 南北匝道及主道桥桩最大附加弯矩

南北匝道与主道的承台、墩柱的最大水平位移、最大沉降和最大差异沉降均控制在 10 mm 以内。

参考文献:

- [1] 何卫. 暗挖地铁隧道下穿高速铁路路基沉降规律与控制措施研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [2] 常富贵.地铁盾构侧穿高速铁路桥梁桩基施工技术与应用[J].工程建设与设计,2018(24):204-205.
- [3] 田红卫.盾构隧道邻近既有建筑物施工风险评价研究[D].兰州:兰州交通大学,2015.

- [4] Nematollahi M, Dias D. Three-dimensional numerical simulation of pile-twin tunnels interaction-Case of the Shiraz subway line [J]. Tunneling and Underground Space, 2019(86):75-88.
- [5] 吴飞翔. 盾构隧道超近距侧穿桥梁桩基的影响分析及应对措施[D].武汉:武汉理工大学,2023.
- [6] 刘志宏.盾构下穿在建高铁桩板复合地基变形规律及施工参数优化研究[D].兰州:兰州交通大学,2023.
- [7] 李明睿,陈国平,范秀江,等.盾构施工对临近桩基影响的数值模拟及参数分析[J].土木与环境工程学报(中英文),2022,44(1):45-52.

(上接第 174 页)

吊装施工时,对盾构隧道产生安全影响,该文提出两种计算方法:

(1)采用该文提出的荷载结构分析和二维有限元分析两种计算方法对隧道结构进行安全初步评估,对比其监控数据,具有可行性,可供类似工程参考。

(2)采用二维有限元计算方法计算位移结果略偏大于荷载结构分析方法,类似工程可采用该两种方法计算进行相互校核,当计算结果较大时,应采取相关措施或调整桥梁方案保证地铁结果的安全,如增大起重机吊车的支撑面积减小扩散应力,或增大

避让地铁距离,以保证前期桥梁方案的可行性和工程建设的安全性。

参考文献:

- [1] 谷鸿飞.新建建筑物地基静力荷载对下伏隧道影响研究[J].水利与建筑工程学报,2020,18(2):195-199.
- [2] 蔡武林.深基坑开挖对临近地铁车站及区间影响的数值模拟分析[J].水利与建筑工程学报,2016,14(6):222-226.
- [3] 孙廉威,秦建设,洪义,等.地面堆载下盾构隧道管片与环缝接头的性状分析[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(8):1509-1518.
- [4] 邵华,黄宏伟,张东明,等.突发堆载引起软土地盾构隧道大变形整治研究[J].岩土工程学报,2016,38(6):1036-1043.