

城市地下隧道近接既有铁路桥梁桩基 施工力学行为分析

赵 玥

(中国铁路西安局集团有限公司宝鸡工务段, 陕西 宝鸡 721001)

摘 要:以某穿越铁路桥梁基础工程为研究对象,通过理论分析、数值模拟的方法,分析盾构在穿越过程中桩基的位移、弯矩、地表沉降规律。结论如下:桩基横向位移与弯矩的变化主要集中在盾构隧道所在深度;桩基距离盾构隧道越近,横向位移与弯矩变化越明显;两隧道间的桩基弯矩远大于隧道两侧的桩基弯矩;两隧道间的桩基随着右线、左线的开挖,弯矩与位移表现先增大后减小的变化趋势,并在右线隧道完全贯穿桩基础时位移、弯矩最大,最大值约为工程开挖完成后的 3~4 倍。

关键词:施工力学;盾构隧道;近接施工;数值模拟

中图分类号: X947

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)10-0217-04

0 引 言

随着国民经济的发展,基坑工程也在向深、大、随着我国城市化进程发展,早期规划建设的铁路运输线路周边建筑逐渐繁荣,与之而来则是新建工程近接既有工程安全性问题,城市新建隧道穿越既有铁路运输线路是其中难点之一。

目前,国内已有许多成功穿越桩基础的案例,如广州地铁穿越德坭立交桥工程^[1]、广州地铁侧穿华南快速高架桥桩基工程等^[2]。众多学者针对盾构隧道穿越桩基础施工过程做了研究,其中郭现钊^[3]采用理论分析、数值模拟、工程类比等研究方法,研究了盾构隧道下穿广深铁路时对桥梁结构、桩基础的位移影响。刘欣然等^[4]学者考虑地层蠕变特性,分析了在盾构穿越近接桥梁施工时,桥梁结构持续变形的变化规律。邱红胜等^[5]采用有限元模拟盾构隧道施工对不同倾角斜桩的影响,得出开挖面距斜桩前后 2 倍隧道直径范围内会引起隧道侧一桩身产生较大背洞位移及较大的附加正弯矩。双线隧道不同的开挖顺序对桩基础的影响也存在差异。

基于上述研究,本文依托于某城市隧道穿越既有铁路线路工程为例,采用数值模拟方法,对该隧道近距离穿越铁路桥梁桩基础的影响进行研究,分析

桩基础在盾构穿越过程中的变形规律,可为后期施工提供参考。

1 工程概述

1.1 工程概况

该近接工程区间段全长 1.47 km,隧道穿越铁路专线桥最近距离仅为 2.86 m,近接施工对桩基础影响较大。铁路专线桥全长 1 655.70 m,为简支梁桥,主跨采用 68 m 系杆拱,桥台采用双线 T 形空心桥台,采用摩擦桩基础。0# 墩桥桩长 25 m,桩径 1.5 m,1#、2# 桥墩桩长 37 m,桩径 1.5 m。隧道埋深约为 11.6 m,区间隧道与铁路专线桥相对位置见图 1。

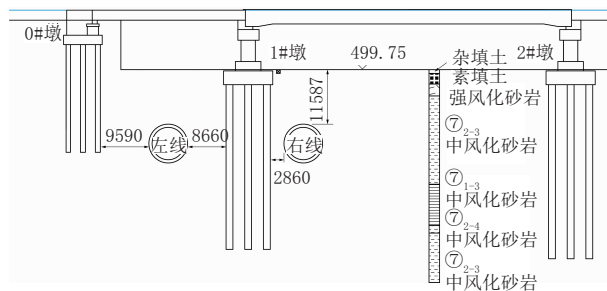


图 1 隧道与铁路专线桥相对位置

1.2 工程地质

表 1 表示的是盾壳、管片、桩基承台、预制梁板等结构的物理参数,上述材料在数值计算中均考虑为弹性本构。隧道穿越地层物理参数见表 2,在数值计算过程中,岩土体服从摩尔-库伦破坏准则。

收稿日期: 2023-10-30

作者简介: 赵玥(2000—),女,学士,从事铁路运营管理工作。

表 1 隧道结构相关物理参数

名称	弹性模量 /MPa	密度 /(kg·m ⁻³)	泊松比
盾壳	210 × 10 ³	7 800	0.2
管片	33.5 × 10 ³	2 500	0.2
桩基、承台	30 × 10 ³	2 500	0.2
预制梁板	32.5 × 10 ³	2 500	0.2

表 2 隧道围岩物理参数

名称	厚度 /m	弹性模量 /MPa	密度 /(kg·m ⁻³)	泊松比	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
素填土	3.0	9.0	1 850	0.3	10	8
强风化砂岩	2.0	120.0	2 330	0.2	70	30
中风化砂岩	14.5	120.0	2 450	0.12	700	34
中风化泥岩	7.5	160.0	2 380	0.1	550	34
中风化砂岩	22.0	280.0	2 450	0.08	800	40

2 盾构穿越桥梁桩基础影响分析

盾构隧道穿越既有桥梁基础时,隧道、围岩、既有桥梁桩基与上部桥梁结构之间相互作用,可以理解为盾构隧道掘进引起四周土体的变形并向周围传递,位移变形作用于桩基础上,经向上传递对桥梁产生影响^[6]。按围岩分级理论,隧道在开挖过程中围岩可划分为 3 个区域:Ⅰ区塑性破坏区、Ⅱ区弹性区、Ⅲ区无影响区,见图 2(a)。

盾构隧道在开挖过程中难免会引起地层变形并产生地表“沉降槽”^[7]。盾构隧道开挖引起地表沉降整体可划分为 5 个阶段,见图 2(b)。在此过程中地表沉降整体可以分为五个阶段:初期沉降、盾构到附近的沉降、盾构通过时的沉降、盾尾脱出瞬间以及通过后的固结沉降。

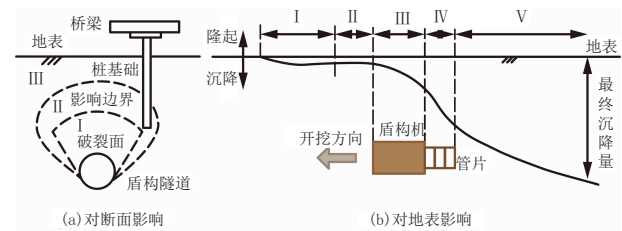


图 2 盾构引起地表位移过程

3 盾构穿越桥梁桩基础数值分析

3.1 计算模型

为减小边界效应的影响,结合实际取数值模型长 50 m、宽 50 m、最高处为 55 m,整体三维数值模型见图 3。桥梁桩基础采用 Pile 结构单元,桩单元与

隧道围岩间的力学效应由剪切弹簧与法向弹簧模拟。桩单元与桥梁墩台处采用固结连接。模型边界面施加法向约束,上表面自由。参照实际设置右线隧道先行施工,然后左线隧道再次施工,设置图 3 中的 A~E 桩作为桥梁桩基应力应变的监测点。

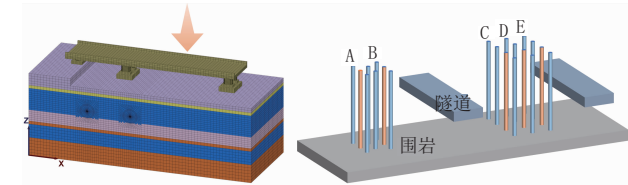


图 3 三维模型示意图

3.2 计算结果分析

3.2.1 桩单元位移分析

图 4 表示的是盾构隧道在开挖完成后桩基础沿 X 方向上的位移随埋深的变化曲线。可知隧道施工开挖完成后各桩 X 方向的最大位移与盾构隧道所在开挖面平齐。A、B 桩位于双线隧道的左侧,且桩端与盾构隧道圆心等平面,桩基随着埋深的增加 X 方向位移逐渐增大,在桩端处达到最大,A 桩较 B 桩更加远离左行隧道,X 方向位移表现更小,A、B 桩沿 X 方向最大横向位移分别为 3.39 mm 与 4.68 mm。C、D、E 桩位于双线隧道中夹岩,双线隧道开挖完成后,D、E 桩表现为随着埋深的增加,桩基础沿着 X 负方向的位移先增大后减小,并在桩端上部向 X 正向运动,最大负向位移为 1.75 mm 与 4.12 mm,C 桩表现与其不同,在隧道圆心所在平面以上,桩基础的向 X 负方向移动,在隧道圆心以下则表现为正方向移动,这是由于 C 桩距离左线隧道最近距离为 8.66 m,E 桩距离右线隧道最近距离为 2.86 m,两者间的距离差距较大,C 桩受到左行隧道的开挖影响向着 X 正方向运动,而对 E 桩影响较小。

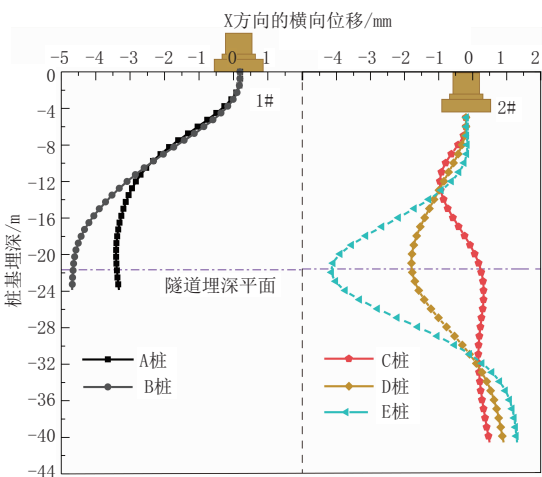


图 4 桩单元横向位移曲线图

提取盾构隧道在临近、穿越、远离桩基础3个状态下桩基随埋深的位移变化曲线,见图5。盾构穿越桩的基础区间分别对应盾构管片环的第22环至31环,其中取22环为临近环、26环为穿越环、31环为远离环。因B桩距离右线隧道较远,左线隧道和右线隧道在掘进过程中对B桩X方向位移产生的影响差异明显。在右线隧道掘进临近桩单元时,B桩桩端沿X负方向位移为0.77 mm,在盾壳远离桩单元时,桩端沿X负方向横向位移为1.12 mm,增长量为42%。在左线隧道掘进临近桩单元时,桩端沿X方向位移为3.2 mm,是右线隧道掘进临近桩基时位移的1/4.2,是右线隧道远离桩基时位移的1/2.85。在左线隧道远离桩基时,桩端沿X负方向位移为4.48 mm,左线隧道在穿越桩基区间整个过程中,桩端位移减小约40%,最终位移是右线隧道远离桩基时的1/4。

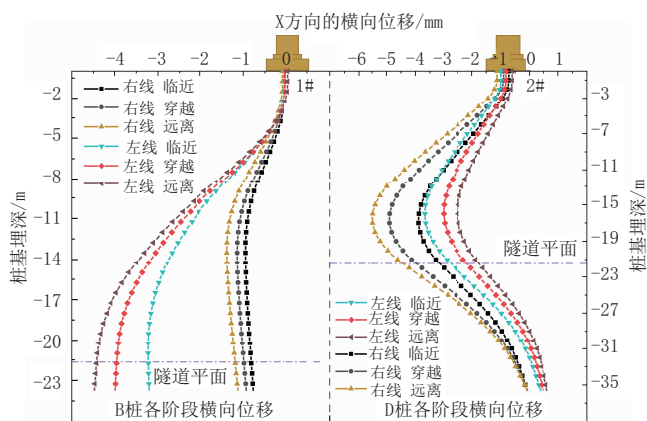


图5 B、D桩在不同开挖步下的位移变化

与B桩的效果不相同的是,D桩在右线隧道开挖完成后桩基X方向的位移大于左线隧道开挖完成后桩基X方向的位移,D桩位于左右线隧道之间,在左线隧道开挖时,将桩基向其初始位置挤回,桩基沿X方向的位移减小。右线隧道临近桩基时,D桩沿X方向的最大位移为3.89 mm,在右线隧道掘进远离桩基时,桩基础沿X方向的最大位移为5.47 mm,与右线隧道临近桩基时增加了40%。在左线隧道临近桩基时,桩基础沿X方向位移为3.64 mm,桩基础位移减小,与右线隧道临近桩基时相比减小6%,与右线隧道远离桩基时相比减小33.5%。在左线隧道远离桩基时,桩基础沿X方向位移为2.48 mm,与左线隧道临近桩基时相比减小31.8%,与右线隧道远离桩基时相比减小54.7%。

3.2.2 桩单元弯矩分析

图6表示的是桩基在开挖完成后,桩基础沿Y方向上的弯矩随埋深的变化,可以看出C、D、E桩基

的弯矩较A、B桩的弯矩大。因为桩基础可以认为是一端固结于桥墩,另一端自由,并在长度方向上受到土压弹簧作用的结构模型,C、D、E桩基在中部位置受到强制位移作用,更易产生大的弯矩。C、D、E桩在桩基连接桥台位置弯矩最大,是因为桩基嵌入桥梁墩台中,在连接位置处出现应力集中。随着埋深的增加,在地下7.5 m处C、D、E桩弯矩减小至0,桩基间弯矩开始存在差异变化,C桩承受正弯矩且直至桩端位置均位于较小的变化水平。D、E桩表现则不相同,在地下7.5 m后还存在两个弯矩的反弯点,分别为15.6 m与25.7 m。这两个反弯点间,D桩的弯矩峰值比E桩小,最大正弯矩与最大负弯矩分别为528.9 kN·m与276.4 kN·m,E桩最大正弯矩与最大负弯矩分别为805.3 kN·m与1 160.4 kN·m,是D桩的1.52倍和4.2倍,E桩的负弯矩数值上大很多主要是因为桩基础与右行隧道的间距太近。

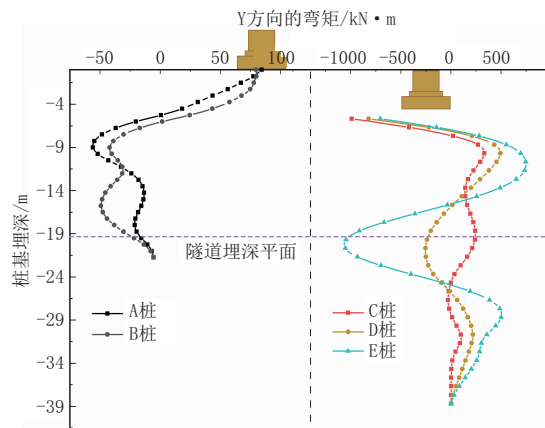


图6 桩单元Y轴方向弯矩图

图7表示在不同开挖步下Y轴方向的桩基弯矩变化。随着右行隧道穿越桩基础时间步长的增加,B逐渐受到隧道开挖的影响,4.5 m处的正弯矩与10.5 m处的负弯矩逐渐增大。因为隧道在开挖过程中,隧道周围地层因开挖的卸载效应,会在隧道的正上方与两侧斜上方发生位移变化,隧道的两侧的土体向斜上方向运动,整体移动呈现“V”字形。B桩因距离右行隧道较远,围岩位移传递至B桩地埋深在10.5 m,在此位置呈现负弯矩最大点,桩基础固接与桥梁墩台,在4.5 m处表现为正弯矩最大点。随着左线隧道的开挖,B桩桩端位置距离左线隧道圆心较近,B桩桩端仅受到土压弹簧作用,因此负弯矩最大点下移并随着开挖时间步逐渐增大。图中D桩位移变化曲线相对应,桩基埋深18 m处受到盾构隧道开挖引起的位移变化量最大,因此在此位置的桩基受到的负弯矩最大,桩基础固接于桥梁墩台,沿桩

长上存在地层弹簧的作用,在桩基位移最大处上下存在两点正弯矩的最大点。伴随着右线隧道开挖穿越桩基础过程,D桩受到的最大正负弯矩均表现为增大的趋势,但在左侧隧道开始临近桩基础时,D桩沿X方向的位置逐渐减小,Y轴方向的弯矩也表现为减小。同时由上图也可以发现,盾构隧道在穿越桩基础时,桩单元受到的最大弯矩并非完全出现在施工完成后,也可能出现在施工过程中,因此关注施工中的应力荷载对结构安全来说也是十分重要的。

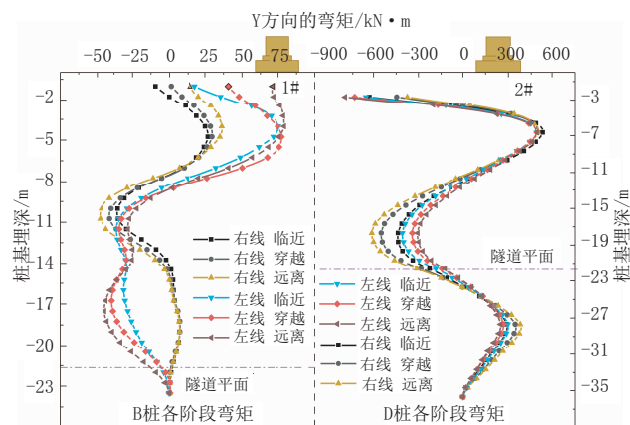


图7 B、D桩在不同开挖步下Y向弯矩变化

3.2.3 开挖面位移分析

图8是在双线隧道开挖过程中开挖面位移云图,在盾构隧道拱顶以上的土体表现为沉降运动,最大沉降量发生在拱顶位置,最大量级为7.4 mm;拱底位置则变现为隆起运动,最大的隆起量为1.78 cm。地表位置处形成由盾构隧道开挖引起的“W”形状的沉降槽,在盾构隧道穿越正上方沉降量最大,在中夹岩的正上方沉降量相比较小。

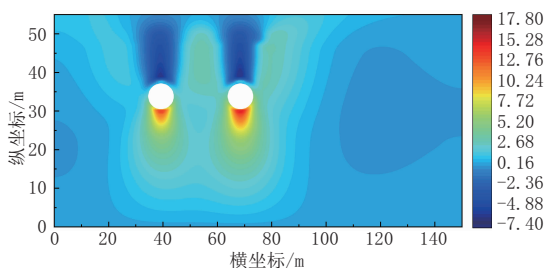


图8 开挖面位移云图(单位:mm)

4 结论

采用有限差分软件分析在盾构隧道穿越过程中桩基与地层的位移与应力变化,分析对既有运营铁路的影响,得出如下结论:

(1)盾构隧道穿越桥梁桩基时会引起桩基发生横向位移变化主要集中在盾构隧道所在深度;距离盾构隧道越近的桩基横向位移变化越大;位于双线盾构隧道两侧的桩基,随着左右线开挖过程桩基位移逐渐增大,而位于双线盾构隧道中间桩基,在开挖过程中横向位移先增大后减小。

(2)桩基在隧道开挖过程中产生较大的Y轴弯矩,位于双线隧道中间的桩基弯矩远大于位于双线隧道两侧的桩基弯矩;桩基在盾构隧道所在深度上产生较大的横向负弯矩,在隧道顶部以上或隧道底部以下因地层约束作用存在横向正弯矩;该工程中桩基最大负弯矩位于距离右行隧道最近的E桩,且处于盾构所在深度位置,在施工中应加强保护。

(3)双线隧道中间桩基随着左右线的开挖弯矩与位移表现先增大后减小的变化,在右线隧道远离桩基础时位移、弯矩最大,随着左线隧道的开挖逐渐减小,最大值约为开挖完成后应力应变的3~4倍,在开挖过程中应加强对桩基的监测与保护。

参考文献:

- [1] 吕文龙,王嘉豪.地铁盾构隧道开挖对邻近立交桥桩基影响分析[J].华南地震,2021,41(4):107-114.
- [2] 丰土根,况梦祥,沈正伟,等.双线盾构隧道侧穿既有桥桩影响分析及加固优化[J].河北工程大学学报(自然科学版),2021,38(3):55-62.
- [3] 郭现钊.地铁盾构隧道近距离下穿广深铁路影响分析及防护措施研究[J].铁道标准设计,2021,65(8):107-112,133.
- [4] 刘欣然,李兆平,张存,等.考虑地层蠕变特性的盾构隧道施工对邻近桥桩影响和保护措施[J].中国安全生产科学技术,2021,17(10):79-84.
- [5] 邱红胜,符传邦.盾构隧道施工对邻近斜桩的影响研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2021,45(5):925-929.
- [6] 李亚翠,杨新安,裴子钰,等.土岩复合地层盾构掘进对桥梁变形影响分析[J].地下空间与工程学报,2019,15(2):533-542.
- [7] 吴锋波,郑卫强,齐剑峰,等.地铁双线盾构区间地表横向沉降槽参数分析[J].地下空间与工程学报,2021,17(5):1653-1663.

(上接第173页)

- [J].人民黄河,2019,41(增刊2):239-241.
- [6] 曹梦云,肖永久,李丹等.基于有限元分析的桥墩钢模的结构优化分析[J].城市道桥与防洪,2023(4):115-118.

- [7] SL 677—2014,水工混凝土施工规范[S].
- [8] GB/T 706—2016,热轧型钢[S].
- [9] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].