

## 地铁盾构不同角度侧穿既有铁路桥梁桩基变形分析

薛靖<sup>1</sup>, 穆坤<sup>1,2\*</sup>, 张建新<sup>1,2</sup>, 杨磊<sup>3</sup>, 谭千万<sup>3</sup>

(1. 天津城建大学土木工程学院, 天津 300384; 2. 天津城建大学天津市软土特性与工程环境重点实验室, 天津 300384; 3. 中铁二局集团有限公司, 四川 成都 610031)

**摘要:** 地铁盾构隧道侧穿既有铁路桥梁时, 对桥梁桩基会产生不同程度的影响, 而不同的侧穿角度又会引起二者交叉范围内土体和桥桩产生不同的变形。基于天津地铁4号线北段某区间盾构隧道下穿某铁路桥工程, 建立隧道-土体-桩基-桥梁整体三维数值分析模型, 结合工程实测, 针对隧道与铁路桥成85°、80°、76°、70°夹角的4种侧穿工况, 分析不同夹角下隧道掘进对桥梁桩基的影响。结果表明, 穿越角度的改变会对桥梁桩基变形和受力产生不同程度的影响, 穿越角度越小, 其对桥桩变形影响越大, 存在最佳的穿越角度。当实际工程中无法选定最佳穿越角度(90°)时, 在隧道与桥桩间设置隔离桩加固能有效减小地表沉降和桩基变形, 进而对既有桥梁起到保护作用。

**关键词:** 盾构掘进; 穿越角度; 数值模拟; 桥梁桩基; 隔离桩加固

**中图分类号:** U455.34

**文献标识码:** A

## Deformation Analysis of Bridge Pile Foundation of Metro Shield Tunnel Side Passing Existing Railway Bridge at Different Angles

XUE Jing<sup>1</sup>, MU Kun<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Jianxin<sup>1,2</sup>, YANG Lei<sup>3</sup>, TAN Qianwan<sup>3</sup>

(1. School of Civil Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Key Laboratory of Soft Soil Engineering Character and Engineering Environment of Tianjin, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 3. China Railway Erju Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** When a subway shield tunnel passes through an existing railway bridge on the side, it will have varying degrees of impact on the bridge pile foundation, and different angles of passing will cause different deformations in the soil and bridge piles within the intersection range of the two. Based on the construction of a shield tunnel under a railway bridge in the northern section of Tianjin Metro Line 4, a three-dimensional numerical analysis model of the tunnel soil pile foundation bridge system was established. Combined with actual engineering measurements, the impact of tunnel excavation on the bridge pile foundation was analyzed for four lateral crossing conditions at angles of 85°, 80°, 76°, and 70° between the tunnel and the railway bridge. The results indicate that changes in the crossing angle will have varying degrees of impact on the deformation and stress of bridge pile foundations. The smaller the crossing angle, the greater its impact on the deformation of bridge piles, and there exists an optimal crossing angle. When the optimal crossing angle of 90° cannot be selected in practical engineering, setting isolation piles between the tunnel and bridge piles for reinforcement can effectively reduce surface settlement and pile foundation deformation, thereby protecting the existing bridge.

**Key words:** shield tunneling; crossing angle; numerical simulation; bridge pile foundation; pile isolation strengthening

收稿日期: 2023-09-18

基金项目: 天津市自然科学基金重点项目(18JCZDJC39200)

作者简介: 薛靖(1998-), 男, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要从事地铁盾构隧道施工影响方面的研究。

\* 通信作者: 穆坤(1985-), 男, 内蒙古乌兰浩特人, 博士, 讲师, 从事地铁盾构隧道、顶管施工影响方面的研究。

随着城市地铁建设的快速发展,地铁隧道不可避免地需要穿越城市道路、河流、建筑物及高架桥梁等。盾构隧道的掘进不仅使隧道周边土体的应力状态发生变化,同时也将导致地层变形,进而引起建筑物、桥梁桩基沉降、倾斜和偏移<sup>[1-4]</sup>,严重时将引起建筑与桥梁开裂,降低其承载能力,减少使用寿命<sup>[5-6]</sup>。刘明高等<sup>[7]</sup>以深圳地铁隧道盾构掘进穿越春风高架桥项目为背景,研究了盾构掘进参数及地基加固措施对桥梁桩基位移及受力的影响;刘健美<sup>[8]</sup>以广州地铁18号线下穿建筑楼群工程为依托,研究了盾构隧道与桩基不同距离对桩基变形的影响;晏索炜<sup>[9]</sup>以广州轨道交通14号线为例,分析施工时盾构机的受力以及盾构施工对附近桥梁的影响;吴镇等<sup>[10-12]</sup>研究了隔离桩参数对桥梁桩基的位移和变形的影响规律;杜明芳等<sup>[13-14]</sup>通过有限元分析了不同穿越角度对既有建(构)筑物影响。

目前现有研究多集中于掘进参数对桥梁桩基及地表变形的影响,对于盾构隧道侧穿桥梁时穿越角度不同引起的桥梁桩基变形的研究则较少。实际上,盾构侧穿桥梁时会形成一定长度的交叉区,侧穿角度不同会影响到交叉区范围内土体及桥桩变形的不同,侧穿角度不适宜时,有可能造成既有桥梁过大变形,甚至发生失稳。因此,研究地铁盾构不同角度侧穿既有桥梁对探索桥桩变形规律及采取安全措施具有重要的工程意义。

本文以天津地铁4号线北段某区间盾构隧道侧穿某铁路桥工程为背景,结合现场实测结果,采用数值分析方法,研究隧道不同穿越角度对近接桥梁桩基变形及受力的影响,并提出加固控制措施。研究成果可为类似盾构侧穿桥梁工程提供参考。

## 1 工程概况

本例地铁隧道侧穿桥梁区段位于天津市北辰区,隧道采用土压平衡盾构施工,隧道埋深18.148~18.206 m,桥梁形式为预应力简支梁,桥桩桩径1.0 m,桩长26 m,承台高2 m,盾构轮廓外边线距桩基3.83~6.03 m,实际工程隧道与桥梁的穿越夹角为76°,盾构隧道与邻近铁路桥相对位置见图1。区间范围主要穿越土层为粉砂<sup>⑧</sup>层、粉质黏土<sup>⑨</sup>层,水位埋深2.20~2.77 m。穿越段地层剖面见图2。

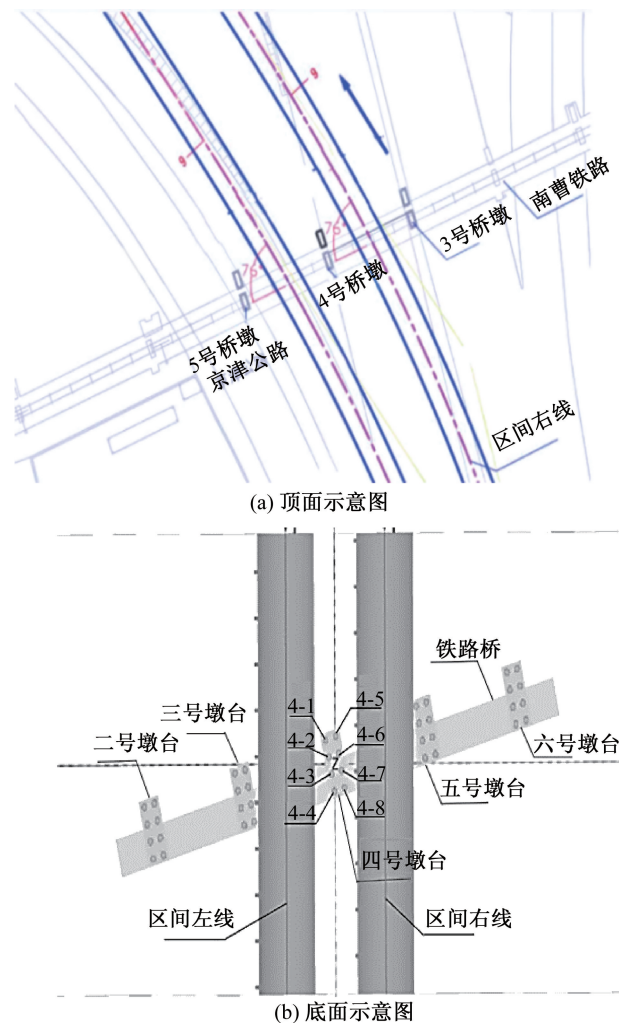


图1 盾构隧道与邻近铁路桥位置平面示意图

Fig. 1 Plane schematic diagram of shield tunnel and adjacent railway bridge position

## 2 数值分析模型建立

### 2.1 分析模型

考虑到盾构施工将会引起周边土体应力及位移变化,进而导致桩基,甚至桥梁发生不稳定。基于本工程,采用Plaxis 3D从隧道-土体-桩基-桥梁整体建立分析模型。模型尺寸为130 m×70 m×52 m,见图3,隧道位于模型的y轴两边对称位置,拱顶距地表19.3 m,隧道外径6.2 m,两隧道轴间距21.09 m,管片厚度0.35 m。

土体采用摩尔库伦(MC)模型,盾构机外壳材料用shell单元模拟,桩基采用嵌入桩单元模拟,具体土层分布和材料物理力学参数见表1。各种材料参数根据地质勘探报告和同地区已有类似研究文献选取。

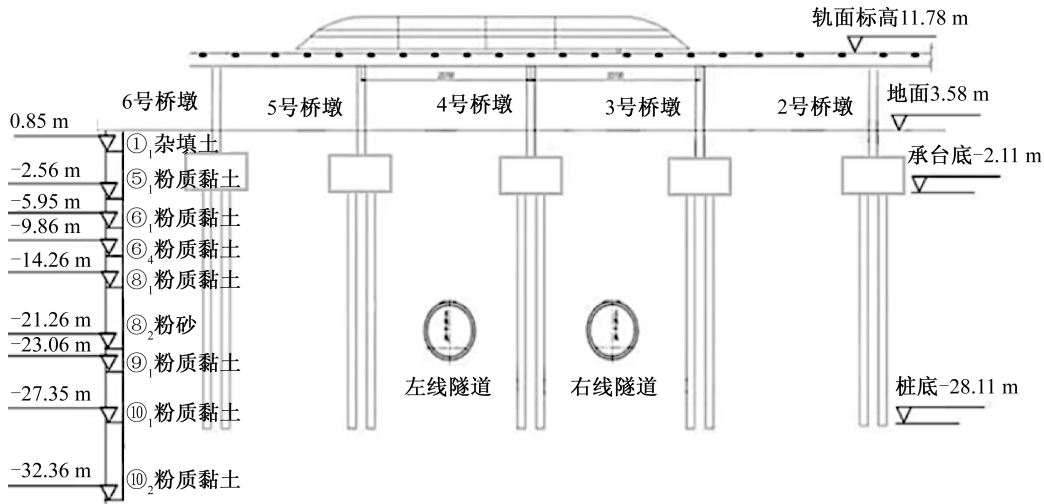


图2 场地地层与桩基剖面图

Fig. 2 Sectional diagram of site strata and pile foundation

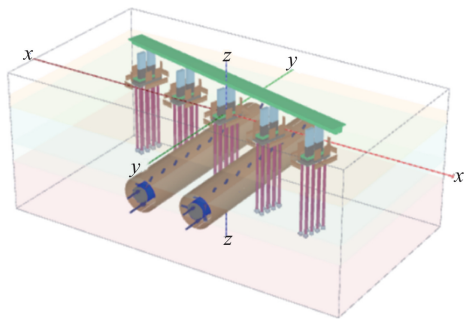


图3 三维计算模型图

Fig. 3 Three-dimensional calculation model diagram

### 2.2 掘进过程模拟

基于实际工况,模拟过程为(1)初始地应力场应力生成;(2)盾构开挖第1环,激活掘进参数(掘进掌子面压力、盾构机械、隧道收缩);(3)关闭掘进参数并激活注浆压力以及千斤顶推力;(4)关闭注浆压力和千斤顶压力,激活隧道衬砌;(5)依步骤2、3、4类推。

左右盾构隧道都按照该步骤进行模拟开挖,先进行右线开挖模拟,开挖完成后进行左线开挖模拟。为简化数值模拟,设置每环掘进7 m,数值

模拟的第1环位置处,盾构机刀盘距桩基35 m,以保证盾构开始影响桩基前进行掘进,盾尾远离桩基35 m后,掘进结束,并保证桩基已经脱离盾构的影响范围。

### 2.3 计算工况

为对比不同穿越角度对桥梁桩基变形的影响,进行了基于正常掘进工作面推力  $P$ 、注浆压力  $P_0$  下,侧穿角度分别为  $85^\circ$ 、 $80^\circ$ 、 $76^\circ$  和  $70^\circ$  四种工况下桩基变形分析。计算时  $P$  在刀盘中心点取值为  $238 \text{ kN/m}^2$ ,梯度为  $14 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$ ,  $P_0$  在拱顶处取值  $312 \text{ kN/m}^2$ ,梯度为  $20 \text{ kN}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$ 。

## 3 盾构掘进对桥梁桩基影响分析

### 3.1 地表沉降

本例隧道盾构实际穿越角度为  $76^\circ$ ,基于该工况,令右线刀盘到达桥梁中心点时的掘进距离  $y=0$ ,到达前  $y$  定义为负值,通过后定义为正值,图4为4、5、6号墩台上部地表沉降与掘进距离关系曲线。

表1 模型计算参数

Tab. 1 Calculated parameters of model

材料	层厚/m	重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量/MPa	泊松比	内摩擦角/ $(^\circ)$	粘聚力/kPa
填土	4.43	17.00	8.00	0.35	12.00	10.00
⑥ <sub>4</sub> 粉质黏土	13.41	19.80	15.20	0.30	12.00	25.00
⑧ <sub>2</sub> 粉砂	7.00	17.00	15.00	0.33	28.75	16.00
⑨ <sub>2</sub> 粉质黏土	18.74	19.80	15.60	0.30	15.00	26.00
管片	—	25.00	$3.55 \times 10^4$	0.17	—	—
盾壳	—	247.00	$2 \times 10^5$	0.17	—	—
桩基	—	20.00	$3 \times 10^4$	0.20	—	—

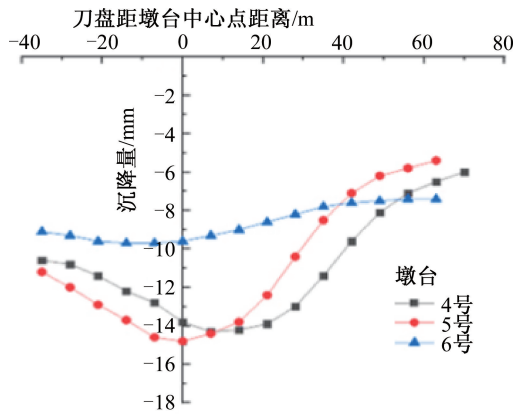


图 4 地表沉降与掘进距离关系曲线

Fig. 4 The relationship curves between surface subsidence and excavation distance

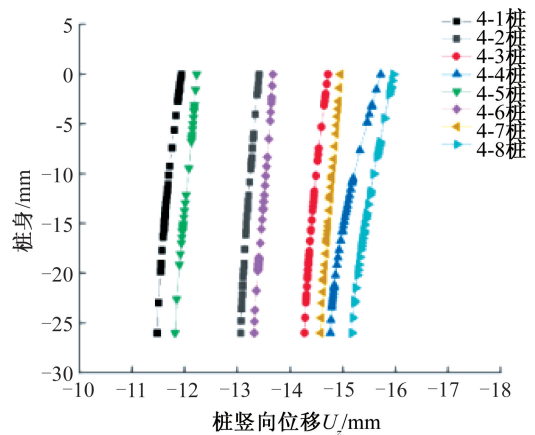
由图 4 可知,5 号墩台上部地表沉降最大,6 号墩台地表沉降曲线较平缓,结合桥梁与隧道位置关系分析,4 号、5 号墩台位于隧道右线的两侧,故上部沉降量较大,且 5 号墩台距隧道右线较 4 号墩台更近,因此上部沉降更大,而 6 号墩台距隧道右线中心超过 25 m,影响较小。从掘进过程分析,当刀盘距中心点距离在 -35 m 到 0 m 时,4、5 号墩台上部地表沉降变化明显,且刀盘先接近 5 号墩台,因此其地表沉降峰值早于 4 号。当刀盘通过中心点后,地表沉降逐渐减小并趋于稳定。所以刀盘至桥桩前的 30 m 在盾构施工时需特别关注。

### 3.2 桥桩变形

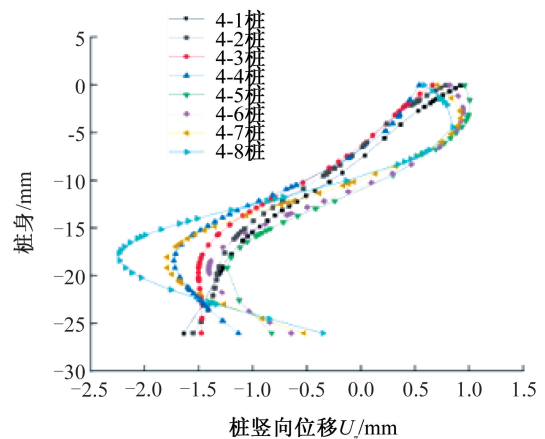
4 号桥墩位于两隧道之间,其受盾构影响最大。在盾构机正常掘进及掘进过后,该墩台各桩变形见图 5 所示。由图 5 可知,4 号墩台各桩竖向位移在 11~16 mm 之间,且各桩桩顶、桩底竖向位移基本一致,表明桩体发生整体下沉,但其沉降量已不满足铁路桥梁变形控制要求 (-8~3 mm),需对其进行加固处理。水平方向上,各桩均向隧道轴线侧发生偏移,由于桩顶墩台限制,各桩桩顶水平位移基本一致,约为 0.7 mm,最大位移点约在 -18 m 处,位于桩底上 1/4 处,最大位移点深度与隧道中心埋深基本一致,表明隧道掘进对桩体最大的影响位置处于隧道埋深深度。

### 3.3 桥桩受力

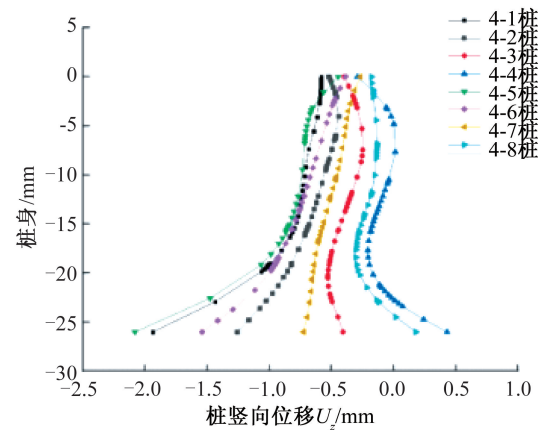
4 号桥墩各桩应力见图 6。可知盾构过程中桥桩在上部结构荷载作用下表现为受压状态,其中 5、6、7 号桩的桩身上方 12 m 受负摩阻力作用,致使轴力先增大后减小,其他桩所受轴力则随着桩长增大而减小。1—6 号桩所受轴力大小基本相



(a) 竖向位移图



(b) 垂直隧道方向位移图



(c) 平行隧道方向位移图

图 5 4 号墩台 1-8 号桩身位移图

Fig. 5 Diagram of pile displacement at No. 4 pier No. 1-8

同,而 4 号和 8 号桩承受轴力较大,其中 4 号桩轴力最大,约为 1 278 kN,而盾构掘进前,其桩身最大轴力为 1 089 kN,盾构掘进致使桩身内力增大 14.8%,增幅明显,表明盾构掘进施工对 4 号墩台下桩体内力影响较大,且离隧道越近,桩体内力越大。同时发现盾构掘进致使桩身在平行隧道方向弯矩略显增大,而垂直隧道方向弯矩明显增大,最大变化幅值达到了 226 kN·m,认为是桩侧土体发

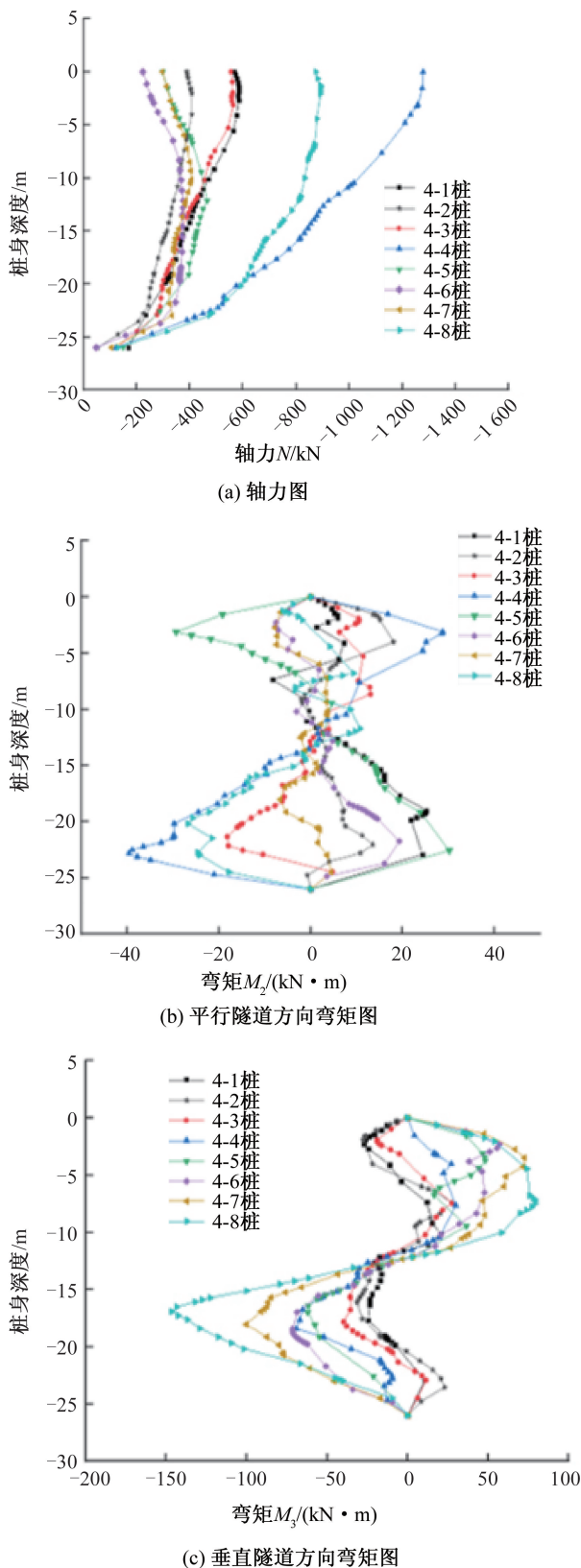


图6 4号墩台1—8号桩身受力图

Fig. 6 Stress diagram of pile body at No. 4 pier No. 1-8

生垂直于隧道轴线方向水平位移所致。

2、3、5、6号墩台各桩受力与位移情况与4号墩台各桩类似,均表现为随着墩台与盾构隧道距

离增加,其位移与受力随着距隧道的距离增大而减小,只是减小的幅度不同。

#### 4 盾构不同侧穿角度影响分析

仍以位于两隧道间的4号墩台为例,不同侧穿角度下4号墩台桩基的最大沉降、最大水平位移和受力情况计算结果见表2。

由表2可知:当注浆压力和掘进工作面推力一定时,侧穿角度对桩基位移及受力存在一定程度影响,穿越角度大小与桥桩沉降呈负相关关系,总体上穿越角度越小桥桩竖向沉降及垂直隧道方向的弯矩越大。当穿越角度从 $85^\circ$ 变成 $70^\circ$ 时,8号桩最大水平位移从2.1 mm增大为2.4 mm,增幅13%。4号桩最大轴力从1 319 kN增大为1 396 kN,增幅5.8%,4号桩平行隧道方向的最大弯矩从 $32.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ 增大为 $49.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$ ,增幅52.3%。当夹角分别为 $80^\circ$ 以及 $76^\circ$ 时,对桥桩最大沉降差与 $85^\circ$ 时相比均为0.1 mm,但当夹角为 $70^\circ$ 时,与 $85^\circ$ 时相比桥桩最大沉降差为0.4 mm,三组数据对比发现,夹角越小桥桩最大沉降量变化幅度越大,当夹角大于 $75^\circ$ 时,对桩基沉降影响幅度远小于较 $75^\circ$ 小的夹角。分析认为随着夹角减小,侧穿时交叉带就越长,桥梁本身的自重效应逐渐增强,导致沉降加剧。因此实际工程中当夹角小于 $75^\circ$ 时应给予重视。

应力方面,当夹角为 $76^\circ$ 时,桩基轴力相对于夹角为 $85^\circ$ 时减小41 kN,降幅3.1%,其他参数几乎没有变化。结合本实际工程周边环境条件和桥梁位置,该工程可得出选择穿越桥梁桩基夹角为 $76^\circ$ 较为合理。

#### 5 桥桩加固影响分析

##### 5.1 隔离桩加固分析

为防止桥桩沉降过大,保证盾构正常施工,依据相关规范<sup>[15]</sup>要求,桥桩沉降控制值在 $-8 \sim 3 \text{ mm}$ 之间,而本工程数值计算结果表明其沉降为 $11 \sim 16 \text{ mm}$ ,为工程安全起见,对桥桩进行了加固处理,对铁路桥墩范围内土体采用 $\phi 600@800$ 旋喷桩进行隔离加固,加固深度为隧顶以上2.37 m、隧道底下2.43 m(总深11.0 m),宽度为沿桥墩范围11.0 m,区间侧穿铁路桥区间隔离桩布置如图7所示。

采用前述计算模型,桥桩加固前后各工况计算结果见表3。

表 2 不同侧穿角度下桩基计算结果

Tab. 2 Calculation results of pile foundation with different side crossing angles

工况	$U_{z,4-8}$ /mm	$U_{x,4-8}$ /mm	$U_{y,4-5}$ /mm	$N_{4-4}$ /kN	$M_{2,4-4}$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	$M_{3,4-8}$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )
85°	15.8	2.1	2.1	1 319	32.5	132.0
80°	15.9	2.3	2.1	1 362	51.2	132.4
76°	15.9	2.2	2.1	1 278	35.6	136.5
70°	16.2	2.4	2.2	1 396	49.5	148.2

注:  $U_{z,4-8}$  为 4—8 号桩的最大竖向位移;  $U_{x,4-8}$  为 4—8 号桩的最大水平向位移;  $U_{y,4-5}$  为 4—5 号桩的最大平行向位移;  $N_{4-4}$  为 4—4 号桩的最大轴力;  $M_{2,4-4}$  为 4—4 号桩的最大平行隧道方向弯矩;  $M_{3,4-8}$  为 4—8 号桩的最大垂直隧道方向弯矩。各参数均选自变形或受力最大的桩基。

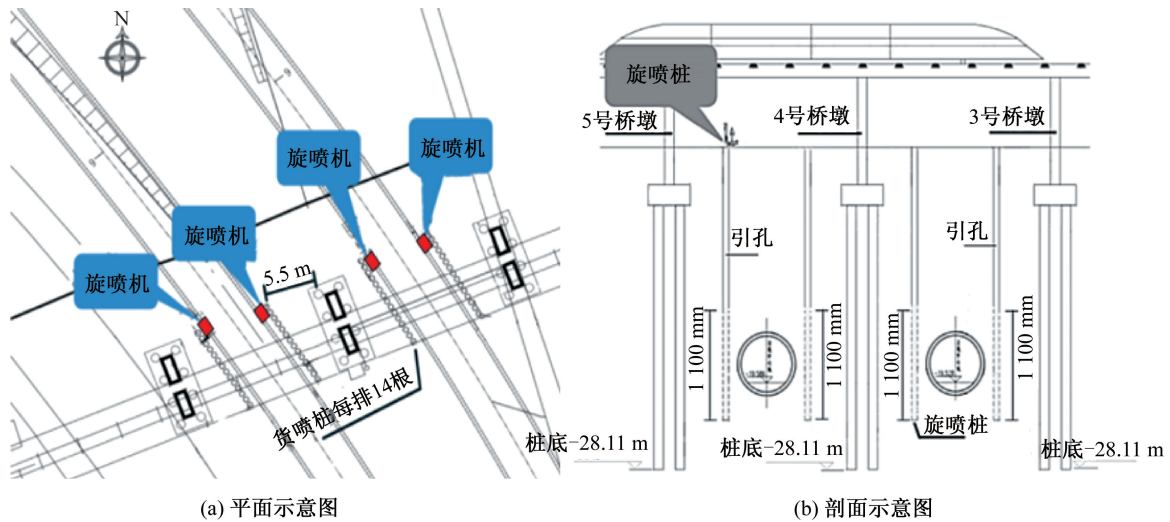


图 7 侧穿铁路桥区间隔离桩布置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the layout of isolation piles in the section of a side crossing railway bridge

表 3 桥桩加固前后计算结果

Tab. 3 Calculation results before and after bridge pile foundation reinforcement

工况	$\mu_{z,4-8}$ /mm	$\mu_{x,4-8}$ /mm	$\mu_{y,4-5}$ /mm	$N_{4-4}$ /kN	$M_{2,4-4}$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )	$M_{3,4-8}$ /( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )
原始	15.9	2.2	2.1	1 278	35.6	136.5
加固后	6.5	1.3	2.0	1 305	40.4	94.6

由表 3 可知, 隔离桩加固后桥桩沉降从 15.9 mm 减小到 6.5 mm, 降幅 59%。桩横向变形从 2.2 mm 减小到 1.3 mm, 降幅 41%, 纵向变形从 2.1 mm 减小到 2.0 mm, 降幅 4.8%。受隔离桩桩间土拱效应影响, 桩基垂直隧道方向的弯矩减小了 35%, 但桩基轴力有所增加。结果表明采用高压旋喷桩隔离加固, 能有效限制隧道周边土体变形, 进而保护桥桩稳定以及隧道周边建(构)筑物的安全。

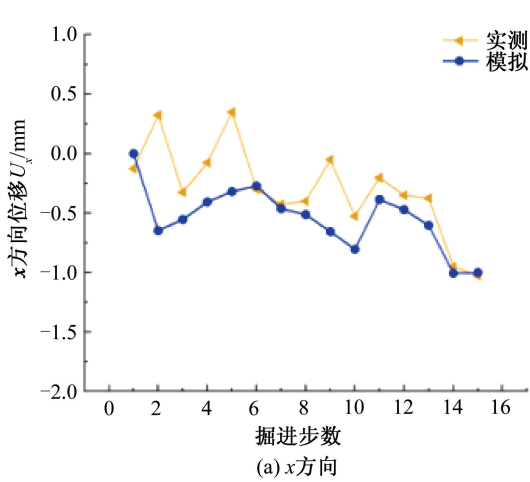
### 5.2 工程实测结果对比

本工程盾构过程中进行了地面沉降和桥桩变形监测。图 8—图 10 分别为 4 号—6 号墩台模拟

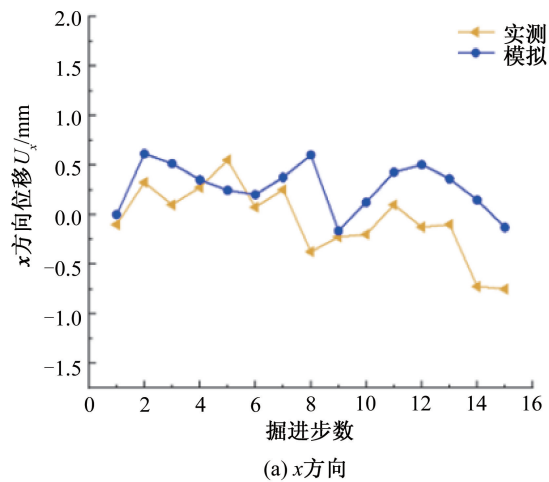
结果与实测数值的对比。由图模拟与实测变形对比曲线可见, 数值模拟与实测结果趋势基本一致, 但两者有所偏差, 分析认为是模拟时地层及其他参数有所概化, 但总的误差在允许范围之内, 认为本文建立的分析模型及参数用于分析本例工程适宜。

## 6 结论

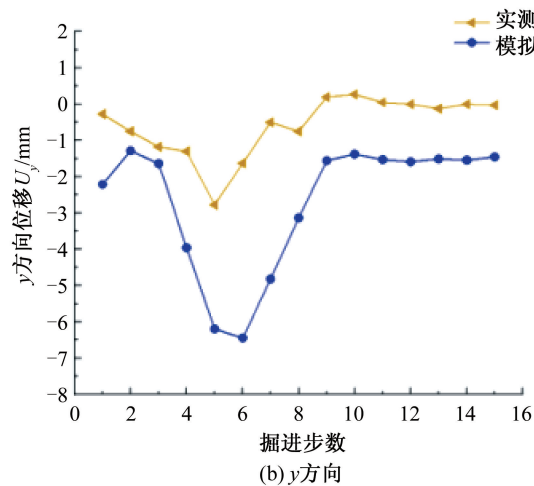
1) 地铁盾构施工对近邻桥桩有较大影响。正常掘进情况下, 同一承台下的桩基距离隧道盾构越近其受力与位移变化越大, 施工中需重点关注距离隧道较近的桩基变形情况, 并加强对周边桥梁和建筑物的监测。



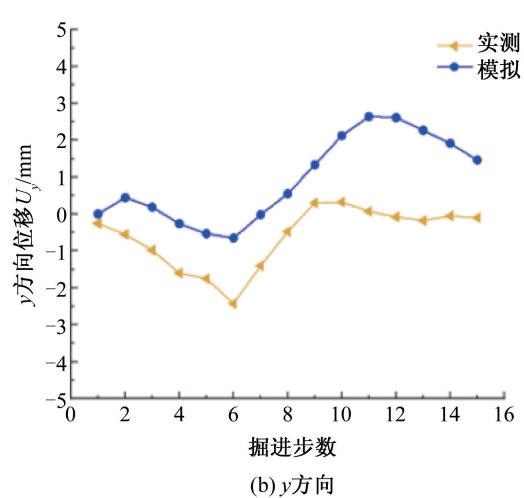
(a) x方向



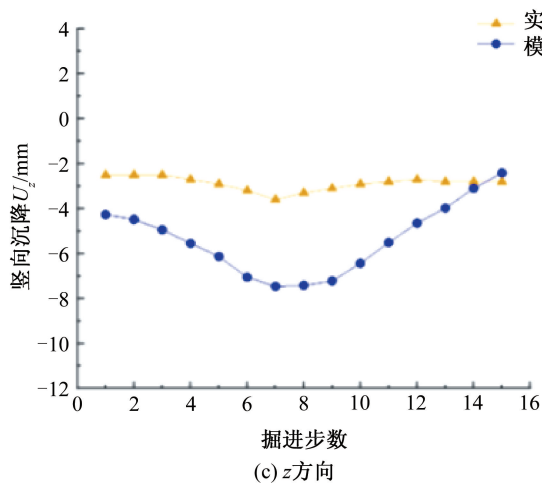
(a) x方向



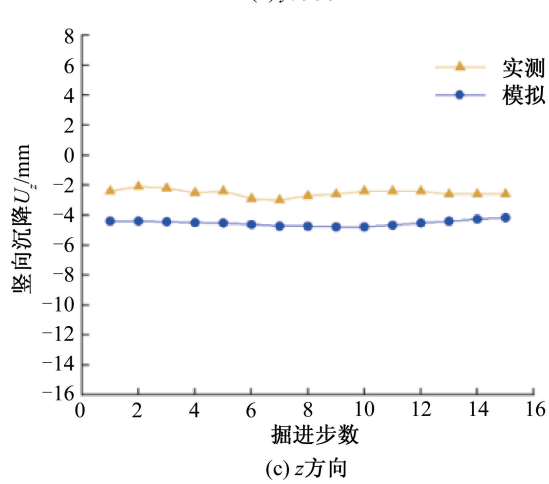
(b) y方向



(b) y方向



(c) z方向



(c) z方向

图8 4号墩台变形模拟值与实测值对比

Fig. 8 The comparison between the simulated value and the measured value of No. 4 pier deformation

图9 5号墩台变形模拟值与实测值对比

Fig. 9 The comparison between the simulated value and the measured value of No. 5 pier deformation

2) 隧道不同侧穿角度对桥梁桩基的变形与受力影响差异明显,随着穿越角度的减小,桥桩的沉降不断增大,受力呈现先增大后减小再增大的趋势。施工中应选择适宜的穿越角度,以减小或控制桩基变形。结合本例工程,盾构侧穿角度选在 $75^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 范围内较为合理,考虑到本工程周边环境

条件,侧穿角度最终选为 $76^{\circ}$ 。

3) 当盾构侧穿对桥桩影响较大时,高压旋喷桩作为隔离桩加固可有效减小隧道盾构引起的周边土体及桥梁桩基变形。实际工程中应遵循“先加固后施工”的保护原则,并在盾构掘进施工过程中加强实时监测。

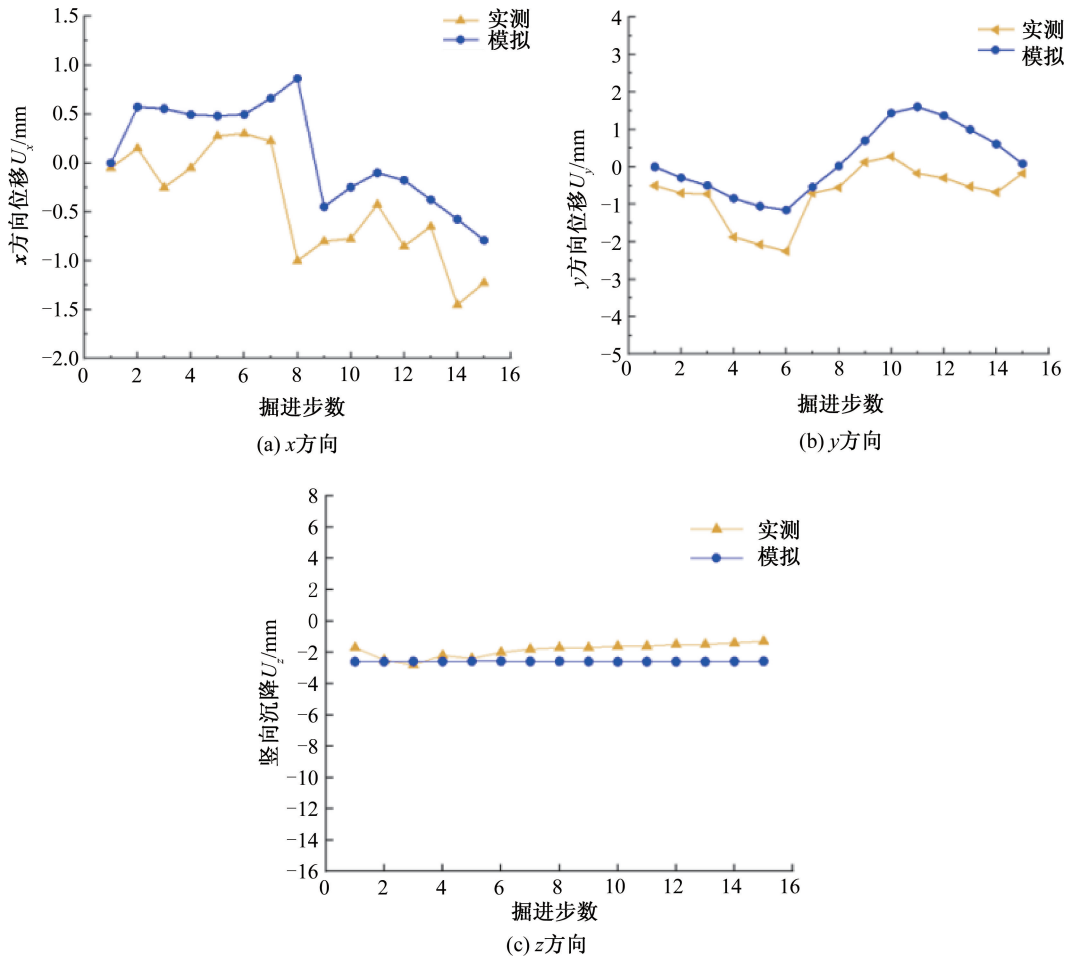


图 10 6 号墩台变形模拟值与实测值对比

Fig. 10 The comparison between the simulated value and the measured value of No. 6 pier deformation

参考文献:

[1] 魏 纲, 庞思远. 双线平行盾构隧道施工引起的三维土体变形研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(9): 2562-2568.

[2] 娄 霜, 赵瑞桐, 徐世达. 盾构隧道近接下穿施工对居民建筑楼群的影响研究[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2018, 31(5): 75-80.

[3] 鞠 鑫. 双线地铁盾构施工引起的地表沉降分析及施工控制[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(8): 1-7.

[4] 周济民. 盾构区间隧道下穿高架桥桩基群施工技术与环境影响预测[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 165-172.

[5] 方 勇, 何 川. 地铁盾构隧道施工对近接桩基的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2008(1): 42-47.

[6] 公伟增. 盾构隧道下穿施工对既有建筑物桩基变形影响及控制分析[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020.

[7] 刘明高, 陈仁东, 孙和美, 等. 超大直径盾构隧道穿越桥梁桩基影响研究[J]. 市政技术, 2019, 37(1): 67-71.

[8] 刘健美. 地铁盾构施工对邻近建(构)筑物桩基的影响[J]. 建筑施工, 2022, 44(1): 18-22.

[9] 晏索炜. 盾构隧道施工斜穿桥梁对桩基的影响分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.

[10] 吴 镇, 张秀山, 王 磊. 小半径曲线叠落盾构隧道下穿京沪高铁隔离桩设置参数研究[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(9): 88-94.

[11] 赵晓勇. 地铁盾构隧道侧穿高铁桥群桩设置隔离桩影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(5): 116-120+126.

[12] 陈发东. 盾构隧道施工对临近桥梁桩基及周围土体影响的模拟研究[J]. 中外公路, 2018, 38(6): 177-181.

[13] 杜明芳, 满景奇, 易领兵, 等. 郑州地铁某盾构区间隧道不同斜向交角下穿施工对铁路的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(S1): 466-472.

[14] 丁祖德, 彭立敏, 施成华. 地铁隧道穿越角度对地表建筑物的影响分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(11): 3387-3392.

[15] 刘 喆, 倪光斌, 林传年, 等. TB 10314—2021《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》内容解析[J]. 铁道标准设计, 2022, 66(6): 184-189.

(责任编辑 王利君)