

DOI: 10.7672/sjgs2026040068

# 地铁盾构隧道开挖对邻近高架桥桩基的影响研究\*

邓三军<sup>1</sup>, 闫鑫雨<sup>2</sup>, 李登峰<sup>3</sup>

(1. 中交(广州)建设有限公司, 广东 广州 511400; 2. 中交第二航务工程局有限公司, 广东 广州 511400; 3. 中国十九冶集团有限公司, 四川 成都 610031)

**[摘要]** 为了研究地铁盾构隧道开挖对邻近高架桥桩基的影响, 依托某市地铁5号线双线盾构隧道工程, 采用数值模拟分析隧道开挖下的土体位移、桥桩位移及桥桩受力, 并对桥桩沉降值的模拟和实测值进行了对比分析。研究表明: 随着桥桩深度的增加, 桥墩处各桩的沉降先减小再趋于平稳, 桥墩处各桩的水平变形总体先增大再减小再增大; 随着桥桩深度的增大, 桥墩处各桩的弯矩先增大再减小, 然后再增大再减小; 在不同桥桩深度下, 桥桩沉降实测值与模拟值相差较小, 可认为模拟值与实测值基本一致。在实际隧道开挖过程中, 建议对桥梁桩基周围地层进行注浆加固, 同时加固高架桥下部地层, 从而减小桥墩桩基的沉降。

**[关键词]** 隧道; 土体沉降; 变形; 数值模拟

**[中图分类号]** U455

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2026)04-0068-06

## Study on Impact of Subway Shield Tunnel Excavation on Adjacent Viaduct Pile Foundations

DENG Sanjun<sup>1</sup>, YAN Xinyu<sup>2</sup>, LI Dengfeng<sup>3</sup>

(1. CCCC (Guangzhou) Construction Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400, China;  
2. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 511400, China;  
3. China 19th Metallurgical Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China)

**Abstract:** To investigate the impact of subway shield tunnel excavation on adjacent viaduct pile foundations, relying on the double-line shield tunnel project of a certain city's subway line 5, numerical simulation was employed to analyze soil displacement, bridge pile displacement, and force on bridge piles under tunnel excavation. A comparative analysis was conducted between simulated and measured values of bridge pile settlement. The research results indicate that as the depth of bridge piles increases, the settlement of each pile at the bridge pier first decreases and then stabilizes, while the horizontal deformation of each pile at the bridge pier generally increases first, then decreases, and finally increases again. With the increase in the depth of bridge piles, the bending moment of each pile at the bridge pier first increases, then decreases, and then increases again. At different depths of bridge piles, the difference between measured and simulated values of bridge pile settlement is relatively small, suggesting that the simulated values are basically consistent with the measured values. During actual tunnel excavation, it is recommended to perform grouting reinforcement on the strata surrounding the bridge pile foundations, while also reinforcing the lower strata of the viaduct, in order to reduce the settlement of the bridge pier pile foundations.

**Keywords:** tunnels; soil settlement; deformation; simulation

### 0 引言

在城市地铁建设过程中, 地铁线路不可避免地会与城市高架桥相交, 地铁隧道开挖将对地层产生扰动, 同时对桥梁桩基造成不同程度的影响。为研究隧道开挖对高架桥桩基的影响, 学者们进行了多

\* 中施企协科技研发项目([2025]37号); 中国中冶重大研发项目(中冶科[2024]3号); 中交第二航务工程局科技课题(EHYF-2025-B-09-012)

[作者简介] 邓三军, 副总经理, 高级工程师, E-mail: 15012667503@139.com

[收稿日期] 2025-09-05

方面研究,王威<sup>[1]</sup>采用数值模拟和现场监测相结合的方法,对地铁隧道不同方案侧穿施工的地表沉降和桥墩位移进行分析;金平等<sup>[2]</sup>对地铁隧道盾构侧穿多个既有立交桥桩工程的影响进行了研究,研究表明:盾构隧道侧穿通过既有桥桩时会引起桥桩水平及竖向不均匀变形,桩体在隧道轴线处产生弯曲及倾斜;彭浪等<sup>[3]</sup>采用数值模拟计算的方法,对软土地层盾构穿越高架桥桩影响进行了研究;汪海波等<sup>[4]</sup>对砂泥岩地层双线盾构隧道近距侧穿铁路桥桩基施工优化进行了分析,分析结果表明:对于单根桩基而言,位于两隧道一侧桩基的弯矩受靠近隧道先行开挖的影响最大;周智<sup>[5]</sup>对地铁盾构隧道下穿既有高铁桥数值模拟及实测施工影响进行了分析,研究表明:盾构施工对桥梁桩基的附加内力较小,既有桥梁的结构刚度能满足其抵抗变形的要求;谭芝文等<sup>[6]</sup>研究了抛填土地层隧道侧穿施工对既有铁路桥墩的影响,研究表明:隧道施工期间的桥墩位移满足控制标准,变形主要产生于掌子面距桥墩群桩前后约2倍隧道洞径范围内。郭彦兵<sup>[7]</sup>依托新建厦门第二西通道主线隧道下穿既有疏港路高架桥及匝道桥桥墩工程,采用数值模拟的方法,分析了主线隧道矿山法开挖对既有桥梁桥墩近接施工时的变形和位移的影响;姜世超<sup>[8]</sup>对盾构隧道侧穿桥桩施工力学效应进行了研究,研究表明:由于叠加效应与竖向荷载的共同作用导致位于中部的桥桩沉降最大;肖桂元等<sup>[9]</sup>研究了软土地区交叠盾构隧道对并行高架桥群桩的水平位移,研究表明:隧道-桩的净距与桩顶水平位移呈正相关,与桩身上部水平位移极大值呈负相关;杜棣宾<sup>[10]</sup>结合某地铁盾构隧道工程实例,对盾构隧道下穿铁路桥梁影响进行了分析。以上学者研究了盾构侧穿多个既有立交桥桩工程的影响,对盾构隧道近距侧穿铁路桥桩基施工优化进行了分析。

然而,学者们未系统地考虑地铁盾构隧道下穿高架桥对桩基变形和受力的影响,基于此,本文依托某市地铁5号线双线盾构隧道工程,采用数值模拟计算的方法,研究了地铁盾构隧道下穿高架桥对桩基的影响,分析了隧道开挖下土体位移变化特征、桥桩位移变化特征以及桥桩受力特征,并对桥桩沉降值的模拟和实测值进行了对比分析。

## 1 工程概况

四川某市地铁5号线双线盾构隧道工程,双线隧道直径为6.2m,最大埋深为18.2m,2条隧道中心间距为18.6m。隧道开挖过程中,与高架桥相交于市区二环路南部,相交角度为84°,隧道与高架桥

关系如图1所示。在隧道下穿区域,隧道外壁与桥桩的最小距离为1.16m,隧道洞身周围主要为中密和密实卵石,根据隧道开挖区地质勘测报告,隧道开挖区最上层为杂填土,然后往下依次为粉质黏土、松散卵石、中密卵石、密实卵石、强风化泥岩、中风化泥岩,其中杂填土厚1.2~4.6m,粉质黏土厚2.5~5.6m,松散卵石厚6.4~9.8m,中密卵石厚8.1~11.4m,密实卵石厚10.3~12.4m,强风化泥岩厚14.3~16.8m,隧道开挖区土体主要为砂卵石土。地下水埋深变化大,在雨量充沛的季节,埋深在4.8~11.4m范围内。

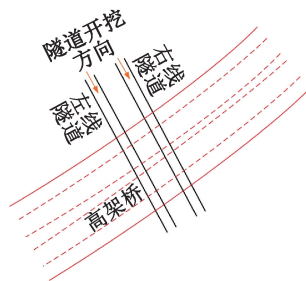


图1 隧道与高架桥关系

Fig. 1 The relationship between tunnels and viaducts

高架桥承台下桥桩有2种,设置编号为L1~L2,L1桩体直径为1.25m,桩长19.6m,L2桩体直径为1.6m,桩长26.4m,承台高度为3.2m。隧道管片采用C50混凝土制成,管片内直径为5.6m,厚度为0.32m,每片长度为1.6m。双线隧道的开挖顺序为先开挖右隧道,至隧道贯通后再开挖左隧道,由于隧道穿越地层主要为卵石土,围岩不稳定,因此隧道开挖采用浅暗挖法进行封闭式掘进。

## 2 数值模拟

### 2.1 模型建立及参数选取

采用MIDAS有限元软件建立模型进行模拟计算,设置隧道直径为6.2m,埋深为16.8m,2条隧道中心间距为18.6m。为减少边界效应,设置模型长124m、宽95m、高54m,设置隧道开挖方向为y向,竖直方向为z向,垂直y方向指向隧道壁面为x方向,如图2所示。

设置岩土体、隧道和桥墩结构为连续的各向同性材料,岩土体采用莫尔-库仑本构模型模拟,隧道和桥墩结构为理想弹塑性材料。隧道结构包括隧道注浆层和管片,桥墩结构包括承台和桥桩,各材料的物理力学参数如表1所示,桩接触单元参数如表2所示。

建模过程中,设置模型底部为固定约束,模型顶面为自由面,模型其他面为法向约束。岩土体、

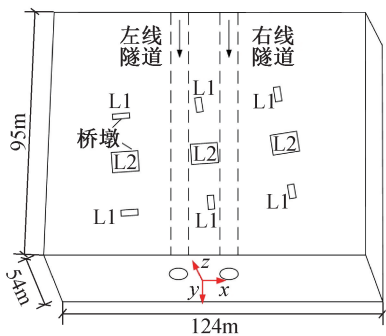


图 2 模拟计算模型

Fig. 2 Simulation calculation model

表 1 各材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of various materials

名称	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	泊松比	黏聚力/ kPa	内摩擦 角/ $(^\circ)$
杂填土	18.2	4.2	0.42	8.2	9
粉质黏土	19.4	6.3	0.28	20.8	15
松散卵石	21.1	18.2	0.23	1.2	28
中密卵石	22.3	20.1	0.21	1.2	24
密实卵石	23.4	38.2	0.18	1.2	36
强风化泥岩	20.8	48.5	0.35	64.5	38
中风化泥岩	23.5	205.4	0.21	310	32
隧道注浆层	21.2	402.8	0.23	—	—
隧道管片	25.2	34 600	0.23	—	—
盾构外壳	78.6	212 000	0.26	—	—
高架桥承台	25.2	32 600	0.22	—	—
高架桥桩体	25.2	30 400	0.22	—	—

表 2 桩接触单元参数

Table 2 Pile contact element parameters

桩径/ m	最终剪力/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	剪切刚 度模量/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	法向刚 度模量/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	桩端承 载力/ kN	桩端弹 簧刚度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )
1.25	108.5	250 800	250 800	524	29 500
1.60	118.4	250 800	250 800	816	41 800

注浆层、承台和桩体采用三维实体单元模拟,管片和盾构外壳采用二维板单元模拟,桥桩采用梁单元模拟,然后对模型进行网格划分,将桥桩和隧道单元网格加密,采用 C3D8R 实体单元将模型分解为 15 762 个单元,16 873 个节点。

## 2.2 研究方案

将距 2 条隧道距离最近的 3 组桥墩作为研究对象,设置编号为桥墩 Z1~Z3,承台高度为 3.2m。桥墩 Z1 和 Z3 承台下桥桩直径为 1.25m,桩长为 19.6m,Z1 承台下桩设置编号为 A1~A2,Z3 承台下桩设置编号为 C1~C2。桥墩 Z2 承台下桩直径为 1.6m,桩长为 26.4m,设置编号为 B1~B6,各桥墩和桩编号分布如图 3 所示。当隧道下穿高架桥时,将对桥梁桩基造成一定影响,为研究土体和桩基的受

力响应,在隧道开挖过程中,对土体沉降、桥桩位移和受力特征进行了分析。

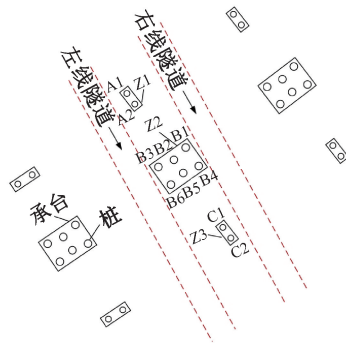


图 3 承台和桩编号分布

Fig. 3 Distribution of bearing platform and pile numbers

## 3 计算结果与分析

### 3.1 隧道开挖下土体位移变化

在隧道开挖过程中,土体埋深不同,土体沿埋深方向受到的影响也不同。本次研究选取  $y = -48\text{m}$  断面,根据土层分布,对第 1~3 层的土体沉降特征进行分析。不同土层下的土体竖向位移分布云图如图 4 所示。

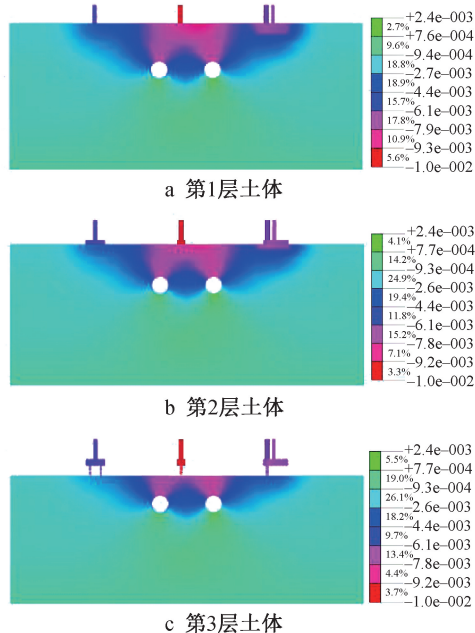


图 4 不同土层的竖向位移分布云图(单位:m)

Fig. 4 Cloud map of vertical displacement distribution in different soil layers(unit:m)

隧道在  $y = -48\text{m}$  断面,承台周围第 1 层土体表层至隧道拱顶间区域的土体表现为沉降,隧道拱底区域至模型底部区域表现为隆起。最大沉降区域位于土体表层,最大隆起区域位于隧道拱底区域,最大沉降为 9.3mm,且右线隧道的沉降值和隆起值均大于左线。隧道开挖过程中,承台周围土体的沉

降主要表现第 1, 2 层土体上, 对第 3 层土体的影响小。

### 3.2 隧道开挖下桥桩位移变化

隧道开挖过程中, 桥墩 Z1~Z3 处各桥桩的沉降变化, 如图 5 所示。

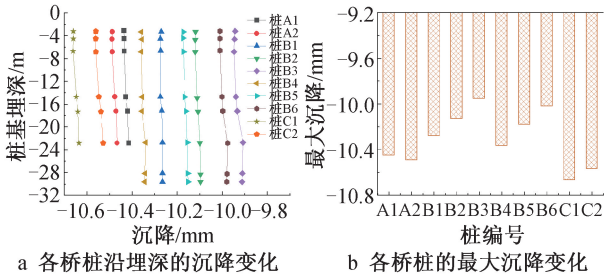


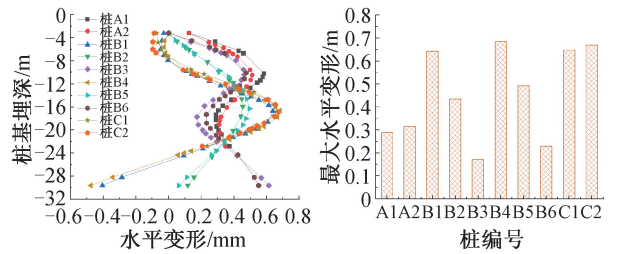
图 5 桥墩 Z1~Z3 处各桥桩的沉降变化

Fig. 5 Settlement changes of each pile at bridge piers Z1~Z3

随着桩深度的增加, 桥墩 Z1~Z3 处各桩的沉降位移先逐渐减小, 然后趋于平稳, 最大沉降值位于桥墩承台下桩顶区域, 即承台往下 3.2m 位置。相比其他承台下桩, 桩 C1 的桩顶沉降最大, 桩 B3 的桩顶沉降最小。整体分析可知, 短桩沉降大于长桩。在桥墩 Z1 承台下, 桩 A1 的最大沉降小于桩 A2; 在桥墩 Z2 承台下, 桥桩 B1~B3 和桥桩 B4~B6 的最大沉降值逐渐减小; 在桥墩 Z3 承台下, 桩 C1 的最大沉降大于桩 C2。由于桥墩 Z1 和 Z3 承台下桩长度为 19.6m, 其末端可能位于密实卵石层, 未触及更稳定的强风化泥岩, 在隧道开挖过程中, 卵石层受到扰动后端承力和侧摩阻力下降, 无法有效抵抗上部结构荷载与土体沉降的双重作用, 表现为沉降量增大。桥墩 Z2 承台下桩长度为 26.4m, 桩长足以穿透全部卵石层, 末端深入强风化泥岩, 强风化泥岩的强度远高于卵石层, 且受开挖扰动极小, 能提供稳定的端承力, 同时长桩的侧摩阻力分布范围相对更广, 整体抗沉能力更强, 从而桩体的沉降量逐渐减小。

隧道开挖过程中, 桥墩 Z1~Z3 处各桥桩的水平变形分布如图 6 所示。

随着桩深度的增大, 桥墩 Z1~Z3 处各桩的水平变形总体呈先增大再减小、然后再增大趋势, 桩 A1, A2, B3, B6 最大水平变形位于桩深 10.2~10.5m 区域, 桩 B1, B2, B4, B5, C1, C2 最大水平变形位于桩深 15.9~16.9m 区域, 其中桩 B4 的水平变形最大, 桩 B3 最小。在桥墩 Z1 承台下, 桩 A1, A2 的最大水平变形分别为 0.29, 0.31mm; 在桥墩 Z2 承台下, 桩 B1~B3 位置, 桥桩最大水平变形分别为 0.64, 0.43,



a 各桥桩沿埋深的水平变形分布 b 各桥桩的最大水平变形分布

图 6 桥墩 Z1~Z3 处各桥桩的水平变形分布

Fig. 6 Horizontal deformation distribution of each bridge pile at piers Z1 to Z3

0.17mm, 桩 B4~B6 位置, 桥桩最大水平变形分别为 0.68, 0.49, 0.23mm, 桥桩最大水平变形逐渐减小。在桥墩 Z1 承台下, 桩 C1 的最大水平变形小于桩 C2。根据以上分析, 随着桩深度的增大, 桥墩 Z1~Z3 处各桩的水平变形总体呈先增大再减小, 然后再增大趋势, 在桩深 10.2~10.5m 区域, 桩 A1, A2, B3, B6 水平变形最大, 桩深 15.9~16.9m 区域, 桩 B1, B2, B4, B5, C1, C2 水平变形最大。在相同承台下, 内桩的水平变形差异核心是桩的平面位置与隧道的水平距离, 距离隧道越近, 土体水平收敛位移越大, 桩体水平变形也越大。隧道开挖时, 土体因应力释放向隧道空洞产生水平收敛位移, 该位移通过桩侧摩阻力传递给桥桩。由于右线隧道先开挖, 土体率先向右侧隧道收敛, 扰动的时效性和初始强度相对较强, 左线隧道后开挖, 扰动存在时间差且受前期右线开挖的土体变形影响, 强度相对较弱。桩 B4 既靠近先开挖的右线隧道, 又处于右线隧道旁的近距离扰动核心区, 右线开挖时, 土体向右侧的水平收敛直接且强烈, 桩身受侧摩阻力影响显著, 相应的水平变形最大, 而桩 B1 受右线扰动的强度虽略弱于桩 B4, 但因靠近右线隧道, 其水平变形量比其他桩大。桩 B3 和桩 B6 距右线隧道距离最远, 其水平变形受隧道开挖的影响相对较小。

### 3.3 隧道开挖下桥桩受力响应

隧道开挖过程中, 桥墩 Z1~Z3 处各桥桩的弯矩分布, 如图 7 所示。

桥墩 Z1 处, 当桩深 < 13.4m 时, 桩 A1, A2 的弯矩为负值, 最大负弯矩位于桩深度 10.2~10.5m 区域, 当桩深 > 13.4m 时, 桩 A1, A2 的弯矩为正值, 最大正弯矩位于桩深度 17.1~17.8m 区域。桥墩 Z2 处, 桩深 13.3~15.2m 区域, 桩 B2, B5 的最大弯矩分别为 -63.81, -78.90kN·m, 桩深 16.5~17.2m 区域, 桩 B1, B3, B4, B6 的最大弯矩分别为 -276.81, 187.16, -317.47, 157.08kN·m。桩 B3, B6 的最大弯矩为正弯矩, 桥桩发生向右的水平位

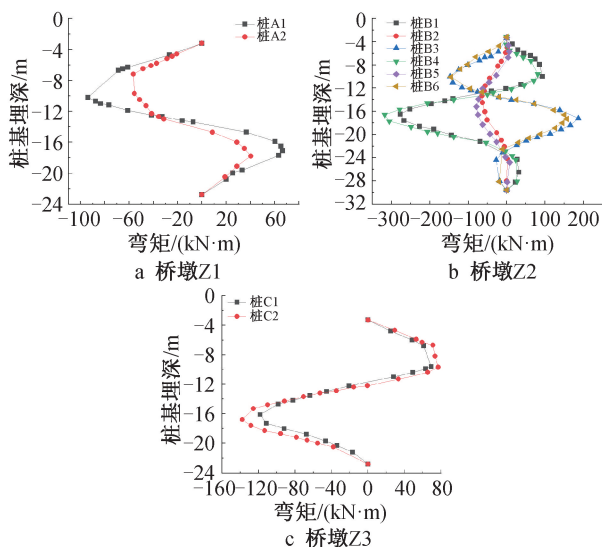


图 7 桥墩 Z1~Z3 处各桥桩的弯矩分布

Fig. 7 Bending moment distribution of each pile at bridge piers Z1~Z3

移,其他桩受到的最大弯矩均为负值,在桩 B1~B6 中,桩 B4 的弯矩最大。桥墩 Z3 处,最大弯矩位于桩深 16.1~16.8m 区域,最大弯矩分别为-118.49, -137.83kN·m,桩 C1 的最大弯矩明显小于桩 C2。

综上所述,随着桩深度的增大,桥墩 Z1~Z3 处各桩的弯矩总体呈先增大再减小,然后再增大再减小趋势,相比其他桩,桩 B4 的弯矩最大。由于桩 B4 靠近先开挖的右线隧道,受土体水平收敛的扰动最强烈,水平变形最大,相应的弯矩最大。桩 B1 靠近右线隧道距离大于桩 B4,受右线扰动相对较弱,水平变形相对较小,最大弯矩值略小于桩 B4。桩 B2 和 B5 位于承台中间,相比桩 B4 受土体扰动较弱,水平变形较小,弯矩也相应减小。

隧道开挖过程中,桥墩 Z1~Z3 处各桥桩受到的轴力分布,如图 8 所示。

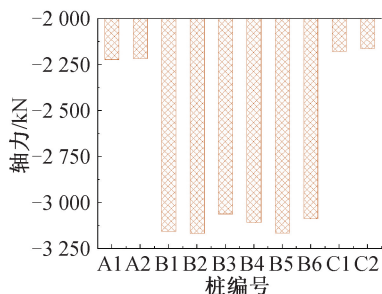


图 8 桥墩 Z1~Z3 处各桥桩的轴力分布

Fig. 8 Axial force distribution of each pile at bridge piers Z1 to Z3

由图 8 可知,在桥墩 Z1~Z3 处,桩 A1, A2 和 C1, C2 受到的轴力明显小于桩 B1~B6 受到的轴力,

其中桩 B2 受到的轴力最大,桩 B5 受到的轴力次之,桩 C2 受到的轴力最小。根据以上分析,由于 Z2 承台的 B1~B6 桩更靠近双线隧道,而 Z1 的桩 A1, A2,以及 Z3 的桩 C1, C2 均距离隧道较远。隧道开挖时,近隧道区域的地层因卸荷发生竖向应力重分布,导致桩周竖向摩阻力变化更剧烈,远离隧道的 A1, A2, C1, C2 桩受土体扰动小,摩阻力变化平缓,相应轴力较小。桥墩上部荷载通过承台传递给桩群,隧道开挖引发土体沉降,将导致承台发生微小倾斜或变形,而 Z2 承台桩数量相对较多,且因位置差异导致荷载分配不均匀,荷载集中效应最显著,最终表现为桩 B2 轴力最大。

### 3.4 桥桩竖向位移数值模拟和实测数据对比

为验证数值模拟的可靠性,选择桥墩 Z2 处桩 B3 作为研究对象,将桩 B3 采用数值模拟计算出的沉降值与实测值进行对比分析,如图 9 所示。随着桩基深度的增加,桩 B3 沉降模拟值与实测值总体均呈减小趋势,且实测值大于模拟值,但相差幅度小,可认为模拟值与实测值基本一致。

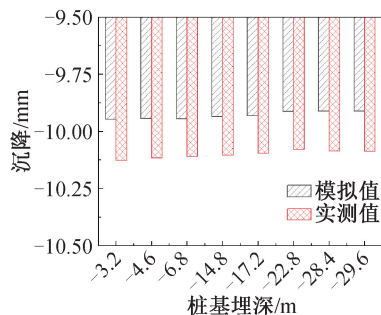


图 9 桩 B3 沉降模拟值与实测值对比

Fig. 9 Comparison of simulated and measured settlement values for pile B3

根据以上分析,桥桩 A1, A2 和 C1, C2 的沉降大,桥桩 B1, B4 的水平变形和弯矩大,因此,在实际隧道开挖过程中,建议对以上桥桩周围地层进行注浆加固,尤其是短桩区域,必要时可布设加固桩对桥墩进行加固,同时对高架桥下部地层进行改良或注浆加固,在土层改良或加固过程中,采用防渗隔离墙分隔桥梁桩基和隧道,减少地下水对施工的影响,防止土层坍塌。通过以上方法,可提高桥桩周围土层的强度和稳定性,降低隧道开挖对桥桩周围土体的影响,确保高架桥运营安全。

## 4 结语

1)随着土体深度的增大,土体沉降逐渐减小,随着桩深度的增大,桥墩 Z1~Z3 处各桩的沉降先逐渐减小,然后趋于平稳,桥墩 Z1~Z3 处各桩的水平变形总体先增大再减小,然后再增大。相比其他

桩,桩 C1 最大沉降值最大,桩 B3 最小;桩 B4 的水平变形最大,桩 B3 最小。

2)随着桩深度的增大,桥墩 Z1~Z3 处各桩的弯矩总体先增大再减小然后再增大再减小,并且桩 A1,A2 和 C1,C2 受到的轴力明显小于桩 B1~B2 受到的轴力。相比其他桩,桩 B4 的弯矩最大,桩 B1 的弯矩次之,桩 B2 受到的轴力最大,桩 B5 次之,桩 C2 最小。

3)在实际隧道开挖过程中,建议对桥梁桩基周围地层进行注浆加固,同时对高架桥下部地层进行改良或注浆加固,加固过程中,采用防渗隔离墙防止地下水对施工的影响,采用以上方法,可减少隧道开挖过程中桥墩桩基的沉降,确保高架桥运营安全。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 王威. 隧道段不同方法侧穿高架桥桩基的施工影响与控制措施研究[J]. 国防交通工程与技术,2024,22(3):37-42.  
WANG W. Construction influence and control measures on pile foundation of viaduct bridge side-crossed by several tunnel sections with different methods [ J ]. Traffic engineering and technology for national defence,2024,22(3):37-42.
- [ 2 ] 金平,吴涛,倪鹏杰,等. 地铁隧道盾构侧穿多个既有立交桥桩工程影响研究[J]. 四川建材,2024,50(1):198-200.  
JIN P, WU T, NI P J, et al. Study on engineering influence of subway tunnel shield passing through multiple existing overpass piles[J]. Sichuan building materials,2024,50(1):198-200.
- [ 3 ] 彭浪,洪俊杰,蒋茂林. 软土地层盾构穿越高架桥桩影响分析[J]. 交通世界,2023(35):146-148.  
PENG L, HONG J J, JIANG M L. Analysis of influence of shield crossing viaduct pile in soft soil stratum[J]. Transpworld,2023(35):146-148.
- [ 4 ] 汪海波,吴悦,徐才厚,等. 砂泥岩地层双线盾构隧道近距侧穿铁路桥桩基施工优化分析[J]. 施工技术(中英文),2023,52(14):60-65.  
WANG H B, LI J Y, YANG Y Q, et al. Optimization analysis of construction of double-line shield tunnel crossing railway bridge

pile foundation at close distance in sandy mudstone stratum[J]. Construction technology,2023,52(14):60-65.

- [ 5 ] 周智. 地铁盾构隧道下穿既有高铁桥数值模拟及实测施工影响分析[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(5):140-144,150.  
ZHOU Z. Numerical simulation and field measured construction influence analysis of metro shield tunnel under-passing existing high-speed railway bridge[J]. Urban mass transit,2023,26(5):140-144,150.
- [ 6 ] 谭芝文,戴亦军,陈灯强,等. 抛填土地层隧道侧穿施工对既有铁路桥墩的影响研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(6):36-40.  
TAN Z W, DAI Y J, CHEN D Q, et al. The influence of tunnel side crossing construction on existing railway bridge piers[J]. Construction technology,2022,51(6):36-40.
- [ 7 ] 郭彦兵. 厦门第二西通道主线隧道下穿既有疏港路高架桥及匝道桥桥墩施工安全性数值分析[J]. 施工技术,2020,49(1):105-108.  
GUO Y B. Numerical analysis of construction safety of main tunnel of Xiamen second west passage through existing Shugang Road viaduct and ramp pier[J]. Construction technology,2020,49(1):105-108.
- [ 8 ] 姜世超. 盾构隧道侧穿桥桩施工力学效应研究[J]. 建筑结构,2023,53(S2):2694-2698.  
JIANG S C. Study on the mechanical effects of bridge pile construction for shield tunnel lateral penetration [ J ]. Building structure,2023,53(S2):2694-2698.
- [ 9 ] 肖桂元,武岳,刘永超,等. 软土地区交叠盾构隧道对并行高架桥群桩的水平位移研究[J]. 建筑科学,2023,39(11):143-151.  
XIAO G Y, WU Y, LIU Y C, et al. Study on horizontal displacement of pile groups of parallel viaduct by overlapping shield tunnel in soft soil area [ J ]. Building science,2023,39(11):143-151.
- [ 10 ] 杜棣宾. 盾构隧道下穿铁路桥梁影响分析[J]. 工程技术研究,2023,8(18):1-4.  
DU D B. Analysis on the influence of shield tunnel undercrossing railway bridges [ J ]. Engineering and technological research,2023,8(18):1-4.