

杨平,曲孟洋,葛玉飞,等.软土地层盾构侧穿高铁桥墩变形分析[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(2):205-215. DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250456

YANG Ping, QU Mengyang, GE Yufei, et al. Analysis of deformation of high-speed railway bridge piers subjected to lateral shield tunneling in soft soil layers[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(2): 205-215. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20250456

## 软土地层盾构侧穿高铁桥墩变形分析

杨平<sup>1</sup>, 曲孟洋<sup>1</sup>, 葛玉飞<sup>2</sup>, 丁宇浩<sup>1</sup>

(1. 南京林业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 中铁三局集团华东建设有限公司, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 为分析软土地层中门式隔离结构对地表沉降、高铁桥墩位移的控制效果及隔离结构自身受力状态, 依托南京地铁6号线盾构侧穿沪宁城际高铁桥墩工程, 建立三维模型, 将模拟值与现场实测值进行对比, 验证三维模型的可靠性, 并在此基础上分析隔离桩关键参数的敏感性, 提出最优参数组合。研究结果表明: 盾构推进引起的地层位移呈“V”形分布, 符合Peck曲线; 桥墩位移具有动态响应特征, 其变形主要发生在盾构进入影响区至离开影响区的阶段; 门式隔离结构对影响区段变形控制效果显著, 可有效控制高铁桥墩位移; 隔离桩厚度、进入隧道底深度及与盾构距离对地表沉降与桥墩位移的控制效果影响显著; 采用厚度1.2 m、进入隧道底深度3.0 m、与盾构距离1.0 m的隔离桩, 并设置间距为6.0 m的连系梁, 可在保障高铁安全运营的同时兼顾工程经济性。研究结论为类似软土地层盾构侧穿敏感构筑物的工程设计提供参考。

**关键词:** 高铁桥墩; 盾构侧穿; 门式隔离结构; 软土地层; 变形控制

中图分类号: TU478

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)02-0205-11

## Analysis of deformation of high-speed railway bridge piers subjected to lateral shield tunneling in soft soil layers

YANG Ping<sup>1</sup>, QU Mengyang<sup>1</sup>, GE Yufei<sup>2</sup>, DING Yuhao<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. China Railway Third Bureau Group East China Construction limited company, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** To analyze the control effect of the portal isolation structure on ground settlement and the displacement of high-speed railway bridge piers in soft soil layers, as well as the stress state of the isolation structure itself, a three-dimensional model was established based on the Nanjing Metro Line 6 shield side-crossing the Shanghai-Nanjing intercity high-speed railway bridge pier project. The simulated results were compared with the field measured values to verify the reliability of the three-dimensional model. On this basis, the sensitivity of the key parameters of the isolation pile was analyzed and the optimal parameter combination was proposed. The results show that the ground displacement caused by shield tunneling is distributed in a “V” shape, which conforms to the Peck curve. The displacement of the pier exhibits dynamic response characteristics, with its deformation mainly occurring during the stage when the shield enters and exits the affected area. The portal isolation structure has a significant effect on the deformation control of the affected section, which can effectively control the displacement of high-speed railway bridge piers. The thickness of the isolation pile, the depth into the tunnel bottom and the distance from the shield have a significant effect on the control effect of surface settlement and pier displacement. An isolation pile with a thickness of 1.2 m, a depth of 3.0 m into the bottom of the tunnel, and a distance of 1.0 m from the shield is adopted, and a connecting beam with a spacing of 6.0 m is set up, which can ensure the safe operation of the high-speed railway while taking into account the engineering economy. The research conclusions can provide design reference for similar projects of shield side-crossing sensitive structures in soft soil layer.

收稿日期: 2025-10-23

修回日期: 2026-01-04

接受日期: 2026-01-08

责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178337)

作者简介: 杨平(1964-), 男, 江西宜春人, 硕士, 教授, 主要从事地下工程方面的研究。E-mail: yangping@njfu.edu.cn

**Keywords:** high-speed railway bridge piers; lateral shield tunneling; portal isolation structure; soft soil layers; deformation control

## 0 引言

随着中国城市化与区域交通一体化进程的加快,软土地层中盾构隧道侧穿高铁桥墩的复杂工况日益增多<sup>[1-2]</sup>。软土具有强度低、压缩性高、触变性显著等特性,在盾构掘进扰动下易产生显著变形,导致邻近高铁桥墩产生过大的沉降与水平位移,严重影响高速铁路运营安全。因此,针对软土地层中盾构侧穿高铁桥墩这一特殊工况,亟需研究合理有效的隔离结构形式,并深入分析盾构施工过程中地表、高铁桥墩及隔离结构自身的变形规律,以确保施工安全和高铁运营稳定。

目前,针对盾构侧穿桥桩的研究主要集中在模型试验、理论分析、数值模拟和实测研究四个方面。SOOMRO 等<sup>[3]</sup>采用离心模型试验,研究双叠隧道推进施工顺序对既有桥梁桩基的影响。SUN 等<sup>[4]</sup>通过理论与数值解对比,验证小推力及减小盾构直径对控制桩顶位移的有效性。戴正彬等<sup>[5]</sup>结合数值模拟与理论分析,系统探讨了隔离加固措施对地层变形的调控作用。SU 等<sup>[6]</sup>研究表明,在富水地层中,盾构穿越大直径桩基会显著加剧地层沉降与桩基弯矩响应,建议盾构与桩基保持大于 2 倍隧道直径的净距。唐泽人等<sup>[1]</sup>发现,在多种隔离桩布置形式中,门式隔离桩结构对沉降的控制效果最为显著,并揭示沉降槽呈现以隧道轴线为中心、近桩侧沉降显著增大的非对称“V”形分布特征。部分研究基于现场实测方法对施工工艺与隔离加固措施的实际效果进行分析<sup>[7]</sup>。黄建华等<sup>[8]</sup>通过工程实测与模拟分析表明,顶管穿越及并行施工会对既有盾构隧道产生变形影响,且变形大小与距离、施工位置及影响区域密切相关。YE 等<sup>[9]</sup>利用 MJS 工法对盾构下穿区域的地层进行加固,显著降低了既有地下通道的竖向变形。上述研究虽然丰富了盾构侧穿敏感构筑物的变形控制技术体系,但针对门式隔离结构参数对地表、桥墩及自身受力行为的耦合影响机理与参数优化策略,仍缺乏系统研究。

因此,作者依托南京地铁 6 号线花园路站至红山新城站区间工程,构建三维数值模型,系统分析盾构施工过程中门式隔离结构对地层及桥墩变形的调控机理,开展关键参数敏感性研究,提出

适用于软土地层的最优隔离结构设计方,以期类似工程的安全施工与设计优化提供科学依据。

## 1 工程概况

南京地铁 6 号线花园路站至红山新城站区间右线(上行线)隧道全长为 985.71 m,埋深为 8.38~18.10 m。左线(下行线)隧道有效长度为 1 017.17 m,埋深为 8.20~14.82 m。盾构侧穿高铁桥墩区段的平面布置见图 1。

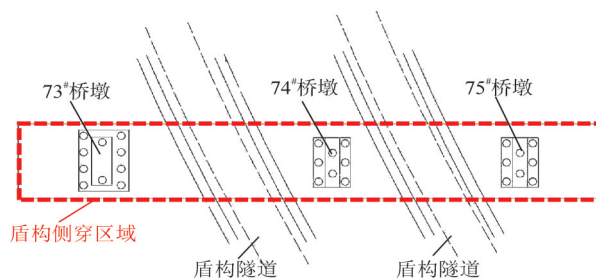


图 1 盾构侧穿高铁桥墩平面

Fig.1 shield side through the high-speed railway pier plane

区段位于岗间坳沟地貌单元内,穿越杂填土、多层粉质黏土及不同风化程度的闪长岩,盾构段主要穿越粉质黏土层。地表水系受唐家山沟影响,与地铁线路存在空间交叉。地下水系统可分为潜水与基岩裂隙水两类,两者水力联系较弱。侧穿段左线隧道拱顶埋深为 13.0 m,右线隧道拱顶埋深为 12.2 m,侧穿高铁桥墩区段剖面见图 2。

为解决隧道与高铁桥桩近距离侧穿过程中的变形控制难题,采用门式隔离结构。该结构通过灌注桩与连系梁形成稳固的门式框架,可有效降低开挖引起的土体位移风险,保障隧道施工及高铁桥桩的安全稳定。

采用的门式隔离结构以直径为 1 m、间距为 1.2 m 的钻孔灌注桩为基础,桩身延伸至隧道底板以下 3 m。顶部设置 1 m×0.8 m 冠梁,并沿纵向每 6 m 布置 0.6 m×0.8 m 连系梁,形成空间受力体系。施工采用跳孔工艺,邻近桥桩区域使用全回转钻机配合钢套筒护壁,钢筋笼焊接定位准确。混凝土灌注过程中控制沉渣厚度小于 100 mm,充盈系数为 1.0~1.3,桩体垂直度误差不超过 0.5%,桩位偏差不大于 20 mm,从而确保桩基承载性能。

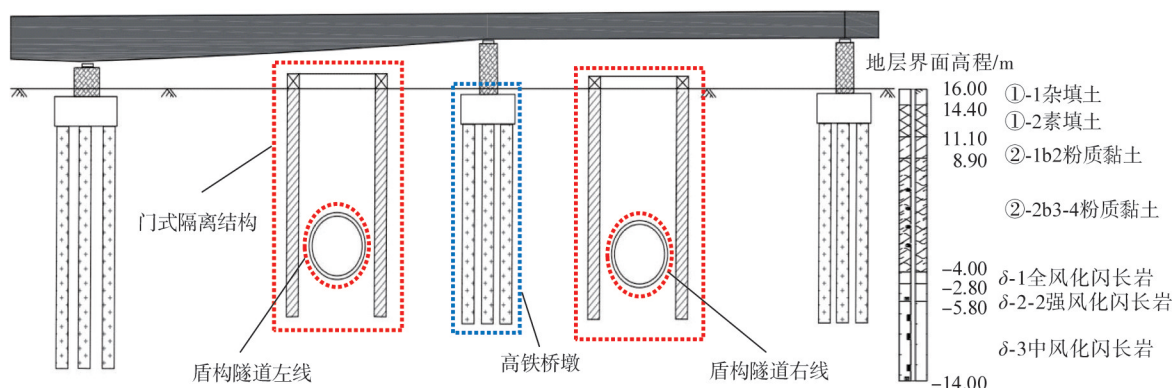


图2 侧穿高铁桥墩区间剖面

Fig.2 cross section shield side-crossing through high-speed railway bridge pier section

## 2 盾构侧穿高铁桥墩数值模型

以南京地铁6号线花园路站至红山新城站区间侧穿段为研究对象,建立数值模型。为简化模型,提出如下基本假定:①土体为半无限空间线弹性体,忽略边界效应及地下水作用的影响,研究区域地下水水力联系较弱,渗流效应较小。②所有材料(土体与结构材料)均为均质、连续且各向同性。③外载荷主要包括土体及隧道管片结构的自重,以及高铁列车产生的动载荷。

### 2.1 几何模型及边界条件

几何模型尺寸为85 m×66 m×30 m(长×宽×高),表面设为自由边界,底部约束竖向与水平位移,四周边界约束水平位移,边界条件设置见图3。左线隧道拱顶埋深为13.0 m,右线为12.2 m,隧道直径为6.2 m。

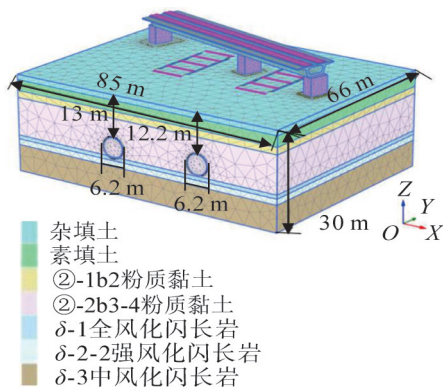


图3 几何模型及网格单元划分

Fig.3 geometric model and mesh division

以高速铁路桥梁结构、盾构隧道和隔离结构为研究对象,模型整体结构见图4。在动载荷模拟<sup>[10]</sup>方面,仅考虑列车轴重的影响。轨道不平顺所引发的高频微幅振动主要影响乘客舒适度与轮轨接触力,而软土地层工后沉降、桥墩位移等宏观变形主要由低频大振幅载荷主导。当车速不高于

200 km/h时,轨道不平顺引起的振动位移增量有限,因此可不考虑叠加效应<sup>[11-12]</sup>。高铁列车单个车轮静载为75 kN,轮轨接触面积为0.15 m×0.10 m,轮距为1 435 mm。将高铁列车载荷等效为作用在钢轨接触单元上的均布面力<sup>[13]</sup>,采用双向移动线载荷模拟高铁列车载荷。移动速度按实际列车运行速度设为160 km/h,移动方向与高铁线路实际走向一致。

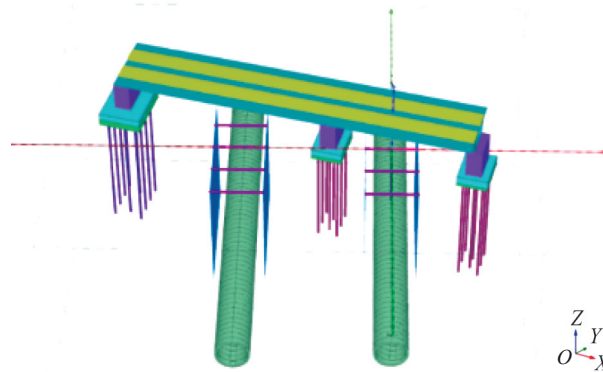


图4 模型整体结构

Fig.4 overall structure of the model

### 2.2 参数确定

在数值模拟中,土体采用小应变硬化模型(Hs-small),混凝土采用线弹性模型。本工程中,盾构穿越的土层具有强触变性与高压缩性,施工引起的地层扰动以小应变为主。Hs-small模型能够更准确地模拟小应变范围内土体刚度的非线性变化规律,相较于忽略刚度非线性的摩尔-库仑模型以及适用于大应变固结的修正剑桥模型,该模型更符合盾构施工的扰动特性。

土层参数取值参考文献[14]和文献[15]及工程勘察报告,盾构相关参数依据现行规范<sup>[16]</sup>与文献[17]合理选取,高铁结构参数则基于沪宁城际铁路竣工图纸确定。具体参数见表1与表2。

表 1 土层小应变硬化本构模型参数  
Tab.1 parameters of constitutive model for small strain hardening of soil layers

| 土层性质                 | 厚度/m | $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$ | $E_{50}^{\text{ref}}/\text{MPa}$ | $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}/\text{MPa}$ | $C'/\text{kPa}$ | $\varphi'/(^{\circ})$ | $G_0/\text{MPa}$ |
|----------------------|------|----------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------|-----------------|-----------------------|------------------|
| 杂填土                  | 1.6  | 19.4                                   | 6.0                                      | 6.0                              | 30.0                                    | 19.4            | 19.4                  | 60.0             |
| 素填土                  | 1.7  | 18.8                                   | 5.0                                      | 5.0                              | 25.0                                    | 18.8            | 18.8                  | 50.0             |
| ②-1b2 粉质黏土           | 3.9  | 19.6                                   | 5.2                                      | 5.2                              | 26.0                                    | 19.6            | 19.6                  | 52.0             |
| ②-2b3-4 粉质黏土         | 1.8  | 18.9                                   | 4.9                                      | 4.9                              | 24.5                                    | 18.9            | 18.9                  | 49.0             |
| $\delta$ -1 全风化闪长岩   | 12.3 | 18.9                                   | 5.6                                      | 5.6                              | 28.0                                    | 18.9            | 18.9                  | 56.0             |
| $\delta$ -2-2 强风化闪长岩 | 12.9 | 15.3                                   | 5.9                                      | 5.9                              | 29.2                                    | 15.3            | 15.3                  | 57.0             |
| $\delta$ -3 中风化闪长岩   | 13.8 | 25.8                                   | 6.1                                      | 5.3                              | 29.1                                    | 25.8            | 25.8                  | 59.0             |

注: $\gamma$ 为土体容重; $E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ 为初始切线弹性模量; $E_{50}^{\text{ref}}$ 为参考割线模量; $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ 为卸载-再加载剪切模量; $C'$ 为土体有效黏聚力; $\varphi'$ 为土体有效内摩擦角; $G_0$ 为初始剪切模量。

表 2 结构线弹性本构模型参数  
Tab.2 parameters of structural linear elastic constitutive model

| 名称    | 厚度/m | 容重 $\gamma$<br>$/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$ | 弹性模量 $E$<br>$/(\text{10}^4\cdot\text{MPa})$ | 泊松比 $\mu$ |
|-------|------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------|
| 盾构机盾壳 | 0.14 | 190.00                                          | 2.30                                        | 0         |
| 混凝土管片 | 0.35 | 27.00                                           | 3.10                                        | 0.1       |
| 高铁桥梁  |      | 26.50                                           | 3.45                                        | 0.2       |
| 高铁轨道板 | 0.20 | 25.00                                           | 3.65                                        | 0.2       |
| 高铁桥墩  |      | 24.50                                           | 3.15                                        | 0.2       |
| 高铁桩台  |      | 24.50                                           | 3.15                                        | 0.2       |
| 高铁桩基  | 1.20 | 24.20                                           | 3.60                                        | 0.2       |

数值模拟核心参数与实际工况保持一致。隔离结构采用门式布置,连系梁间距为 6 m,隔离桩进入隧道底板以下的深度为 3 m、厚度为 1.2 m,

与盾构净距为 1.0 m。

3 模拟结果分析

3.1 盾构隧道轴线断面地层及地表位移分析

盾构轴线断面各工况竖向位移云图见图 5 (正值表示隆起,负值表示沉降)。工况 1 为左线进入影响区;工况 2 为左线进入桥面正下方;工况 3 为左线离开影响区;工况 4 为右线进入影响区;工况 5 为右线进入桥面正下方;工况 6 为右线离开影响区。影响区根据盾构施工对地层与桥墩的扰动阈值界定:横向以隧道轴线为中心,向两侧各延伸 1.5 倍隧道直径,范围约为 9.3 m;纵向自盾构刀盘前端开始,至盾尾脱离后 3 倍隧道直径处结束,长度约为 18.6 m。

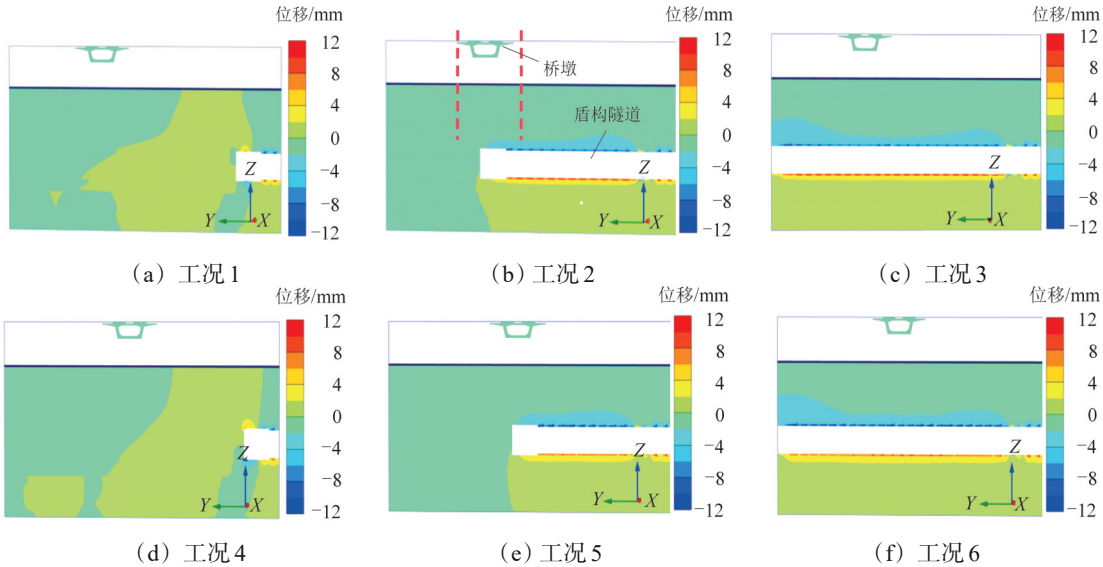


图 5 盾构轴线断面各工况竖向位移云图

Fig.5 vertical displacement cloud map of shield tunnel axis section under various working conditions

盾构施工过程中,土层竖向位移呈现明显的阶段性变化。在工况 1 和工况 2 下,地层最大沉降量达 10 mm,中轴线附近土层沉降最显著。工况 3 下,新的沉降中心随盾构推进方向迁移,竖向位

移影响范围缩小至新沉降中心区域的 0.5 倍,体现了土体应力重分布与固结沉降特征,沉降形态逐渐向新的平衡状态过渡。

左线施工完成后,按工况 4、工况 5、工况 6

的顺序推进右线施工。右线沉降规律与左线相似,工况5下,地层最大沉降量为12 mm。

右线各工况下隧道拱顶与拱底土体竖向位移见图6。右线盾构进入影响区时,拱顶沉降最大值为-8.51 mm,刀盘前方隆起5.21 mm;拱底隆起最大值为9.01 mm,刀盘前方沉降-6.29 mm,呈现对

称分布特征。盾构施工至桥面正下方时,拱顶沉降最大值达-11.10 mm(为进入影响区时的1.3倍),拱底隆起最大为8.98 mm,位移波动范围进一步扩大。盾构离开影响区后,拱顶与拱底土体竖向位移趋于稳定,已掘进区域土体固结良好,受后续掘进影响较小。

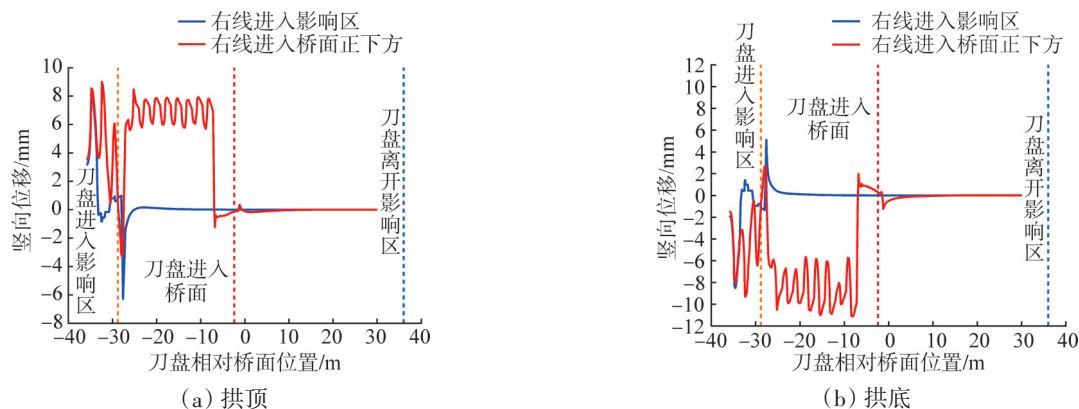


图6 不同工况下隧道拱顶与拱底土体竖向位移

Fig.6 vertical displacement of soil at the arch crown and arch bottom of tunnels under different working conditions

各工况下地表竖向位移云图见图7(正值表示隆起,负值表示沉降)。可知,盾构推进过程中,桩台结构的刚性约束限制了土体水平位移,导致其产生隆起变形。在盾构近距离施工阶段,这种挤压力直接作用于桩台周边土体,进一步加剧了

土体隆起。在盾构掘进过程中,门式隔离结构通过侧向约束有效抑制了地层位移。隔离结构区域内地表沉降量明显小于非隔离区,其中隔离区最大沉降值较相邻区域降低了71%。

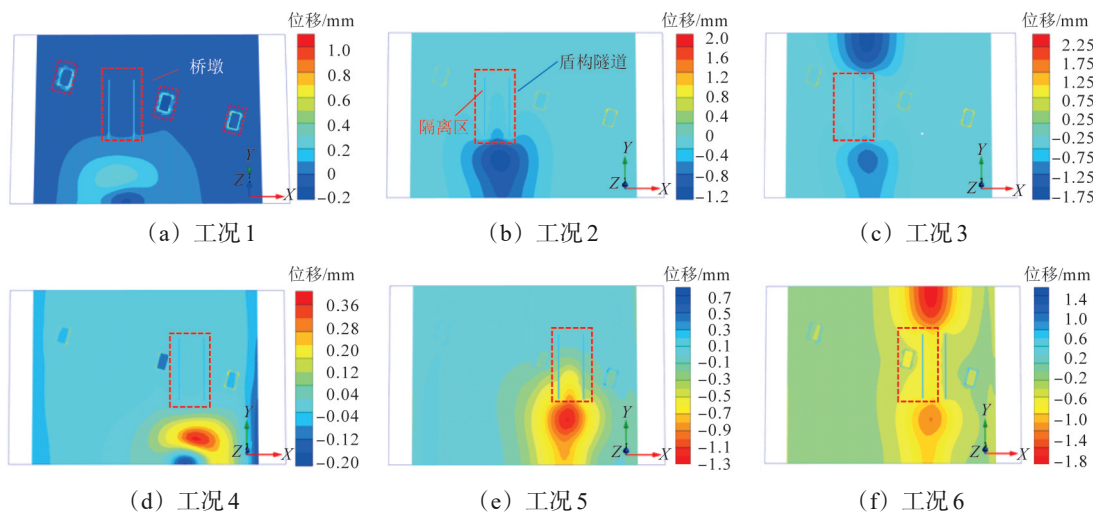


图7 各工况地表竖向位移云图

Fig.7 vertical displacement cloud map of ground surface under various working conditions

地表沉降与左右隧道轴线距离关系见图8。可知,左、右线盾构分别通过后,地表竖向位移以隧道轴线为对称轴,向两侧呈非线性递减,呈现出“中心极值-双侧渐近”的“V”形分布。左线隧道中心线最大沉降值为-1.39 mm,右线为-1.21 mm。结合文献[18]~文献[20],可基于式(1)和式(2)计算地面沉降槽宽度系数。

根据Peck理论公式,盾构隧道施工诱发的地表沉降槽的沉降量通常服从高斯分布规律<sup>[19]</sup>

$$S(x) = S_{\max} \exp(-x^2/2i^2), \quad (1)$$

式中:  $S_{\max}$  为地表沉降的最大值;  $x$  为测点距离隧道轴线的横向水平距离;  $i$  为沉降槽宽度。

由式(1)可知,当沉降量衰减至最大沉降量  $S_{\max}$  的  $1/e$  (0.368) 倍时,  $x = \sqrt{2}i$ 。左右线隧道依

据上述公式及线性插值法,可分别求得左线沉降槽宽度 $i_z=10.61\text{ m}$ ,右线沉降槽宽度 $i_y=10.41\text{ m}$ 。

依据文献[19],沉降槽宽度可表示为

$$i=Kh, \tag{2}$$

式中: $K$ 为地面沉降槽宽度系数; $h$ 为隧道轴线埋深。

由式(2)可求得左线宽度系数 $K_z=0.66$ ,右线宽度系数 $K_y=0.68$ ,与文献[20]提出的南京地区软土地层沉降槽宽度系数修正值范围(0.35~0.75)相符。

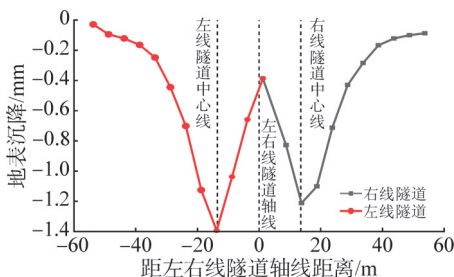


图8 地表沉降与左右隧道轴线距离关系

Fig.8 relationship between surface subsidence and the distance between the left and right tunnel axes

### 3.2 高铁桥墩位移分析

盾构侧穿区间涉及高铁73#、74#、75#三座桥

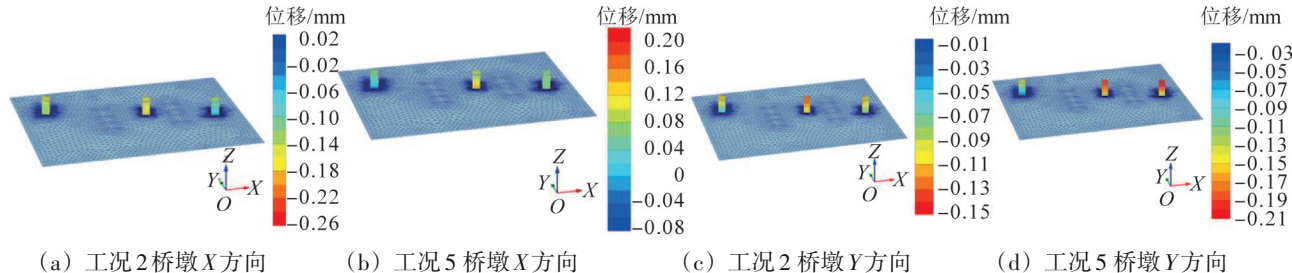


图 10 桥墩各工况水平位移云图

Fig.10 horizontal displacement cloud map of bridge pier under various working conditions

表 3 桩基轴力  
Tab.3 pile axial forces

| 桩基编号   | 桩基轴力/kN |        | 最大变化率/% |
|--------|---------|--------|---------|
|        | 初始最大值   | 开挖后最大值 |         |
| 73#右侧桩 | 932     | 858    | -7.04   |
| 73#中间桩 | 1 200   | 1 104  | -8.00   |
| 73#左侧桩 | 976     | 927    | -5.02   |
| 74#右侧桩 | 908     | 853    | -6.06   |
| 74#中间桩 | 1 236   | 1 180  | -4.53   |
| 74#左侧桩 | 902     | 820    | -9.09   |
| 75#右侧桩 | 1 075   | 994    | -7.53   |
| 75#中间桩 | 1 314   | 1 241  | -5.56   |
| 75#左侧桩 | 1 098   | 1 005  | -8.47   |

由图 10 和表 3 可知,盾构双线贯通后,桩基轴力整体呈下降趋势,其中 74#桥墩桩基的轴力变

化最为显著,最大轴力变化为-9.09%,最小为-4.53%。桩基轴力下降的主要原因是隧道开挖扰动地层,破坏了桩土协同受力模式。施工引起土层沉降与应力释放,导致桩侧摩阻力部分丧失;土体再固结后作用于桩基的附加应力降低,桩基承担的竖向载荷相应减少,最终表现为轴力减小。综上,选取最不利情况下的 74#桥墩进行变形分析。

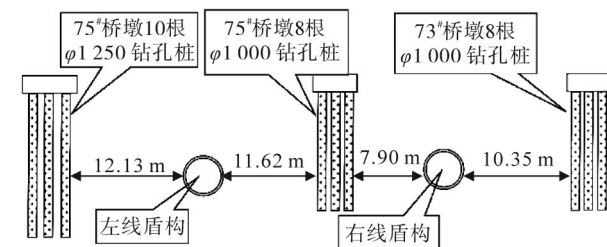


图 9 左右线盾构与高铁桥桩距离关系

Fig.9 distance relationship between left and right shield tunneling and high-speed railway bridge piles

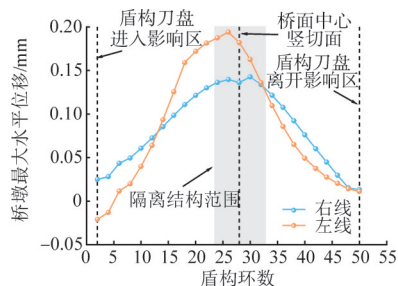
选取两种最不利工况(工况 2 与工况 5),对桥墩水平位移进行分析,模拟结果见图 10(位移朝向隧道为正值,远离隧道为负值)。图中从左至右依次为 75#、74#与 73#桥墩。邻近盾构施工区域的 74#桥墩水平位移明显大于远离施工区域的桥墩。桩基轴力汇总见表 3。

74#桥墩在盾构掘进过程中的水平与竖向位移最大值变化规律见图 11。盾构侧穿时,水平位移呈现双曲线扰动差异与阶段特征: $X$ 向(垂直掘进方向)左线施工引起位移扩散,右线则导致位移场转移; $Y$ 向(掘进方向)左线施工驱动纵向位移传递,右线进一步叠加并扩大位移范围。74#桥墩水平位移在穿越隔离桩时增速降低,至桥面中心线时达

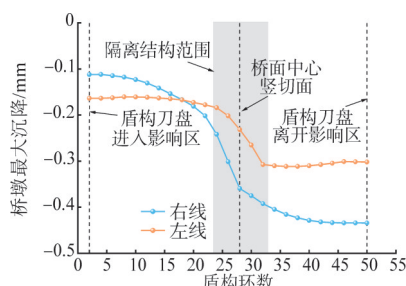
到峰值(左线0.21 mm、右线0.19 mm),穿越后衰减加快。

桥墩竖向位移在盾构进入桥面中心线时沉降增速加大,穿越隔离桩后增速放缓并趋于稳定,右线、左线最大沉降量分别为0.43 mm、0.32 mm。74#桥墩在盾构施工期间的最大水平位移为0.21 mm,

最大沉降量为0.43 mm,均明显低于规范中桥墩位移2 mm的限值要求及相关控制标准1.2 mm的限制<sup>[6]</sup>。综上,隔离桩有效发挥了侧向约束作用,桥面中心线为位移控制的关键位置,且右线施工对沉降的影响更为显著,需针对性地优化掘进参数。



(a) 水平



(b) 竖向

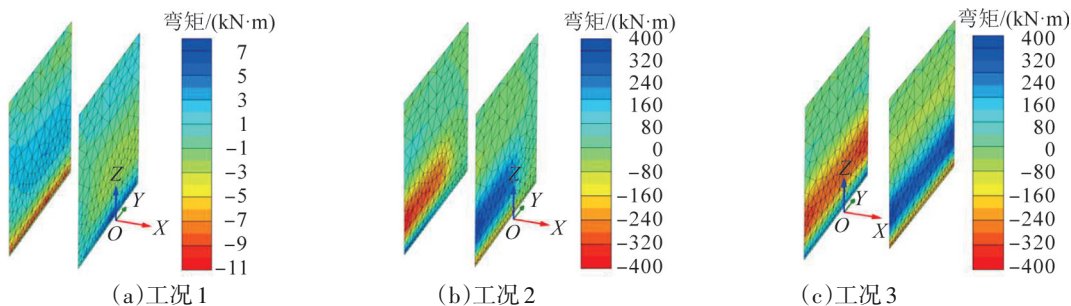
图11 74#桥墩盾构掘进水平及竖向位移最大值曲线

Fig.11 curve of maximum horizontal and vertical displacement during shield tunneling of 74# bridge piers

### 3.3 隔离结构变形及受力分析

左线隔离桩在工况1、工况2和工况3的弯矩云图见图12(面向隧道方向为正值、背离方向为负值)。3种工况下,隔离结构的变形具有阶段性特征。工况1下,隔离桩开始出现较小的弯矩,左右对称分布;工况2下,左侧隔离桩最大弯矩为400 kN·m,右侧弯矩为340 kN·m,且与隧道分布区的应力集中

现象明显重合。右侧隔离结构的弯矩约为左侧的85%,应重点关注该阶段左侧隔离结构的受力状态与桩体的结构安全性;工况3下,隔离桩弯矩呈持续衰减趋势,盾构机推进完成后的隧道周围隔离结构弯矩均稳定在300 kN·m左右,与盾构进入影响区时相差约13%,土体挤压应力及管片注浆体膨胀等因素仍在影响桩体受力状态。



(a) 工况1

(b) 工况2

(c) 工况3

图12 隔离桩各工况弯矩云图

Fig.12 cloud diagram of bending moment under various working conditions of isolation pile

### 3.4 模型验证与分析

右线隧道地表沉降模拟值和实测值的对比见图13。

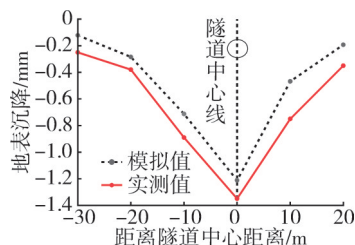


图13 右线隧道地表沉降模拟实测对比

Fig.13 comparison of surface settlement simulation measurement of right line tunnel

地表竖向位移呈现以隧道中心线为对称轴的“V”形分布,沉降在中心线处最显著,向两侧逐渐减小。在隧道中心线(0 m)处,模拟值为-1.21 mm,实测值约为-1.35 mm,误差为11.6%,模拟与实测地表竖向沉降曲线吻合度较好。

74#桥墩X向(横向垂直于掘进方向)、Y向(掘进方向)及竖向位移的模拟值与实测值随施工环数的对比见图14,图中QD74-1~QD74-4为桥墩上布设的4个监测点。从盾构刀盘进入桥面至盾尾脱离阶段,X向位移的模拟与实测变化趋势高度同步,准确反映了盾构施工的横向扰动规律;Y向位移的模拟曲线拟合优异,其峰值及整体变化态势

一致。桥墩水平位移模拟值为 0.21 mm, 与实测值 0.22 mm 的误差为 4.76%; 竖向位移模拟最大值为 0.43 mm, 与实测最大值 0.46 mm 的误差为 7.61%。模拟值与实测值之间的误差主要源于以下两方面: 一是模型简化假设中忽略了地下水弱水力联系、轨道不平顺等因素; 二是参数取值存在偏差, 土层参

数依据勘察报告及相关文献类比确定, 存在一定地域差异, 导致局部力学响应模拟与实际略有不同。文献[21]指出, 软土地层数值模拟与实测误差在 15% 以内即为可接受范围。本文模拟值与实测值基本吻合, 表明所采用的数值模拟方法合理, 可用于后续隔离桩参数敏感性分析。

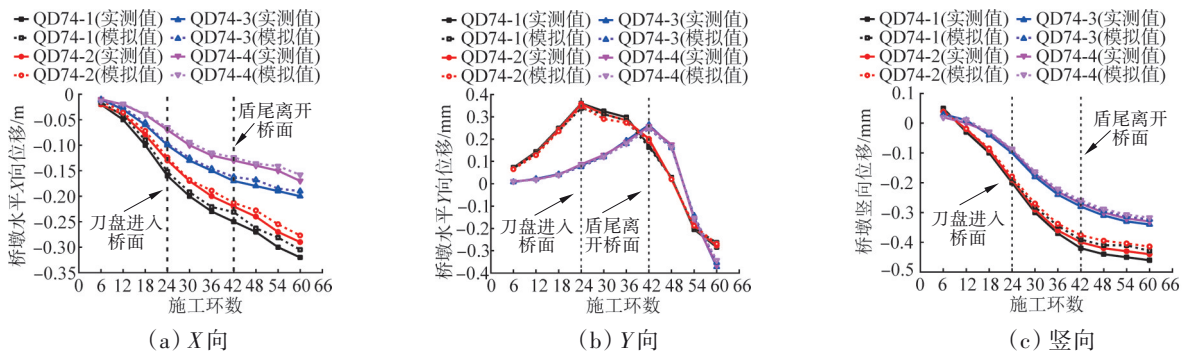


图 14 74#桥墩各向位移模拟与实测对比

Fig.14 comparison between simulation and measurement of all-direction displacement of 74# bridge pier

#### 4 隔离桩参数对桥墩变形敏感性分析

为探究隔离结构对土体扰动传递的阻隔机制及在调控桥墩水平位移与沉降变形中的作用规律, 选取以下关键参数开展敏感性分析: 隔离桩进入隧道底深度  $h_0$ 、隔离桩厚度 (桩径)  $d_0$ 、隔离桩与盾构距离  $l_0$  以及连系梁布置间距  $s_0$ 。

##### 4.1 隔离桩进入隧道底深度的影响

工程所使用的隔离桩深度  $h_0$  为 22.2 m, 其中进入隧道底板以下的深度为 3.0 m。在保持其他参数与基准工况一致的条件下, 仅改变隔离桩进入隧道底板的深度进行敏感性分析。盾构侧穿高铁桥梁群桩时, 隔离桩进入隧道底板的最优深度一般建议为  $0.2L \sim 0.4L$  ( $L$  为隧道直径) [22-23]。本次分析中, 该深度分别取 1 m、2 m、3 m、4 m、5 m。隔离桩进入隧道底板深度与桩基  $X$  方向水平位移的关系见图 15。

高铁 74#桥墩桩基在不同进入深度下的最大水平位移对比见图 16。可知, 隔离桩进入隧道底板的深度对桩基水平位移具有显著影响。总体上, 随着深度的增加, 桩基水平位移逐渐减小, 扰动效应有效削弱。当深度为 1 m 和 2 m 时, 桩顶最大侧移分别为 0.43 mm 和 0.41 mm, 较实际工况分别增大了 13% 和 8%; 深度增至 4 m 和 5 m 时, 最大侧移较实际工况分别减少了 3% 和 5%, 降幅较小, 表明继续加深对位移控制的效果提升有限。当深度为 3 m 时, 控制效果较优; 超过 4 m 后, 控制效应提升不明显, 且施工难度与成本显著增加。

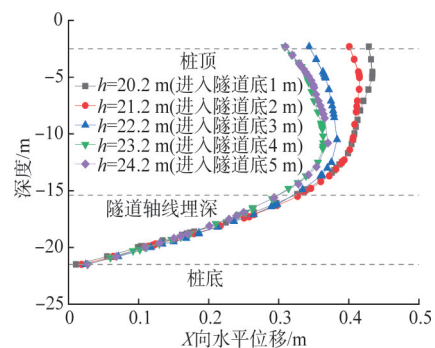


图 15 隔离桩进入隧道底深度对应的桩基  $X$  向位移

Fig.15  $X$  direction displacement of the pile foundation corresponding to the depth of the isolation pile entering the tunnel bottom

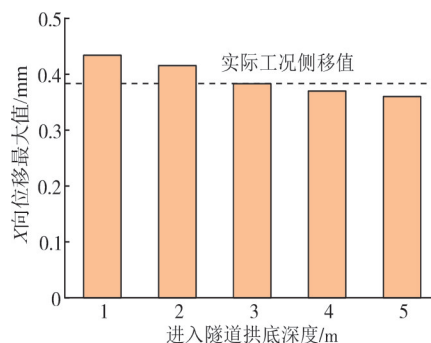


图 16 隔离桩进入隧道底深度对应的桩基  $X$  向最大位移

Fig.16  $X$  direction maximum displacement of the pile foundation corresponding to the depth of the isolation pile entering the tunnel bottom

##### 4.2 隔离桩厚度的影响

在保持其他参数不变的前提下, 对隔离桩厚度进行敏感性分析, 模型中设置的厚度分别为 0.8 m、

1.0 m、1.4 m、1.6 m。隔离桩厚度与桩基水平位移的关系见图17。高铁74#桥墩桩基在不同厚度下的最大水平位移对比见图18。可知,隔离桩厚度对桩基水平位移的抑制效果存在明显临界值。厚度低于1.2 m时,桩基对盾构扰动响应较为敏感,控制效果随厚度增加而提升;当厚度增至1.4 m和1.6 m时,桩基X向最大位移与1.2 m时相比变化不大。综上,1.2 m的隔离桩厚度,为控制水平位移效果的临界值,该结果与工程采用的1.2 m厚度设计相吻合。

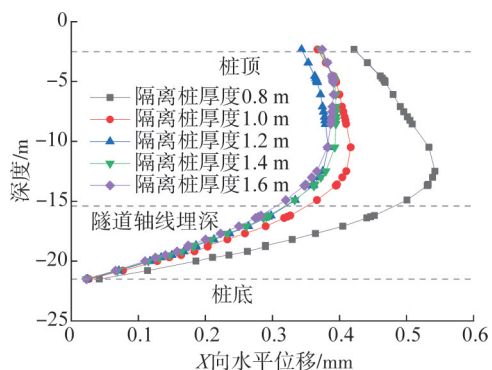


图17 隔离桩厚度对应的桩基X向位移

Fig.17 X direction displacement of pile foundation corresponding to the thickness of isolation pile

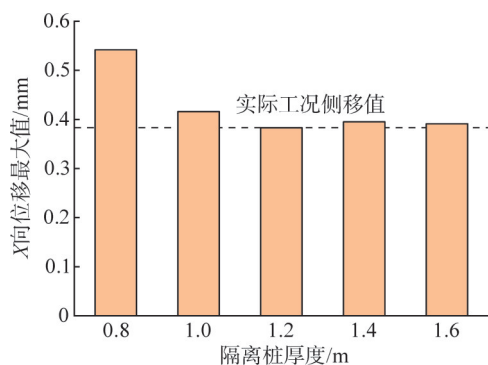


图18 不同隔离桩厚度桩基最大X向位移对比

Fig.18 comparison of maximum X direction displacement of pile foundation with different isolation pile thickness

#### 4.3 隔离桩与盾构距离的影响

在保持其他参数不变的条件下,仅改变隔离桩与盾构的距离进行敏感性分析。隔离桩分别布置于盾构机两侧0.75 m、1.25 m和1.50 m处,桩深保持22.20 m,厚度为1.20 m,桩基与连系梁参数不变。隔离桩与盾构不同距离时,桩基水平位移沿深度的变化见图19。高铁74#桥墩桩基在不同距离下的最大水平位移对比见图20。当隔离桩距离盾构1.5 m时,桩基最大水平位移较实际工况增大了66%。距离过大会导致扰动传递增强而约束作

用减弱,桩基水平位移显著增加。距离为0.75 m和1.25 m时,桩基最大位移较实际工况分别增大4%和7%,说明即使隔离桩受到直接扰动,近距离布置仍可有效约束桩基位移。综上,隔离桩与盾构距离为1.00 m时效果最佳,该距离既能有效阻隔施工扰动,又可避免因距离过大而削弱约束作用,从而实现对桩基水平位移的最优控制。

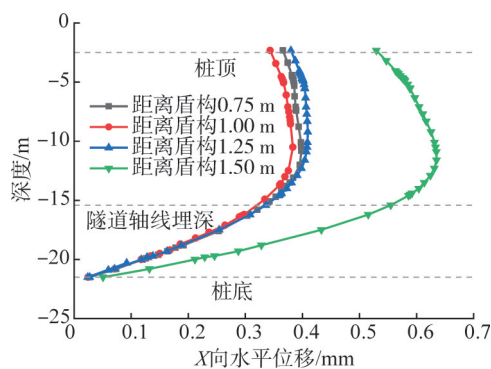


图19 隔离桩与盾构不同距离时桩基X向位移

Fig.19 X direction displacement of pile foundation when the distance between the isolation pile and the shield is different

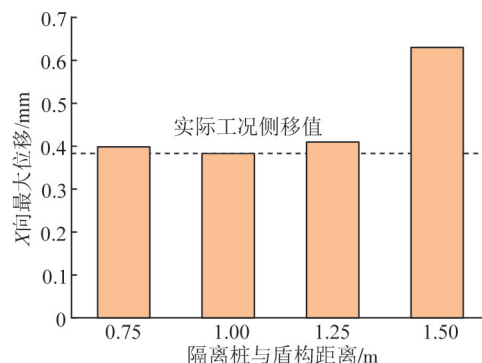


图20 不同隔离桩与盾构距离下的桩基X向位移最大值

Fig.20 maximum X direction displacement of pile foundation under different isolation pile and shield distance

#### 4.4 连系梁的影响

在保持隔离桩其他参数不变的条件下,分别对连系梁间距3 m、6 m以及取消连系梁三种情况进行对比分析。不同连系梁间距下桩基水平位移沿深度的变化曲线见图21,桩基最大水平位移的对比结果见图22。不同工况下桩基的水平位移曲线整体差异不大。无连系梁时,桩基X向最大水平位移为0.41 mm,略高于实际工况(0.38 mm);连系梁间距为3 m时,最大位移约为0.375 mm,略低于6 m间距的实际工况。从工程安全角度看,连系梁的设置虽对控制桩基位移量效果有限,但能增强桩基群的协同工作性能,降低高铁长期动荷载作用下单桩失效的风险。从施工经济性分析,3 m

间距方案虽可使桩基侧移减少约 1.3%，但连系梁工程量增加近一倍，施工成本显著上升。综合而言，在实际工程中选择 6 m 间距布置连系梁，既能保障桩基结构安全，又可控制工程成本，为较优方案。

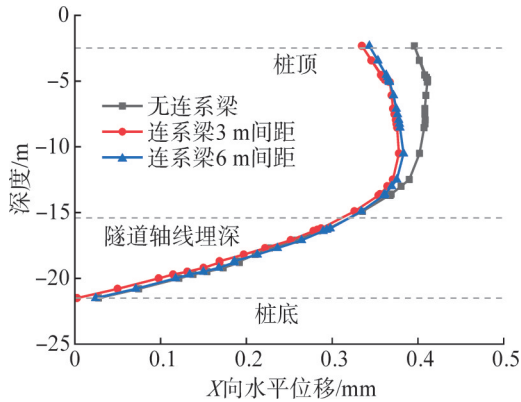


图 21 连系梁间距对应的桩基水平侧移

Fig.21 horizontal lateral displacement of pile foundation corresponding to the spacing of connecting beams

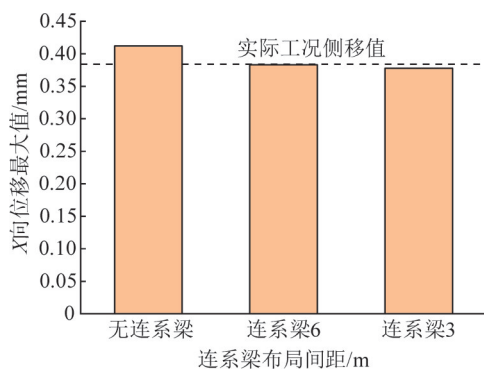


图 22 不同连系梁间距桩基的最大水平位移

Fig.22 comparison of maximum horizontal displacement of pile foundation with different spacing between connecting beams

## 5 结论

依托南京地铁 6 号线盾构侧穿沪宁城际高铁桥墩工程，构建考虑高铁列车动载荷的三维数值模型，系统研究软土地层中门式隔离结构对地表沉降、高铁桥墩位移的控制效果，并分析了隔离结构自身的变形与受力特性。通过实测数据验证模型可靠性后开展隔离桩关键参数敏感性分析，得出以下结论。

(1) 提出了由钻孔灌注桩与钢筋混凝土连系梁组成的门式隔离结构，明确了其设置范围与空间布置方式；以高速铁路桥梁结构、盾构隧道和隔离结构为研究对象，建立了考虑高速列车动荷

载的盾构侧穿高铁桥墩数值模型，通过模拟分析并与实测结果对比，验证了模型的准确性。

(2) 数值模拟结果表明，盾构施工至桥面正下方时地层沉降达到峰值 12 mm，地表沉降呈 Peck 理论所述的“V”形分布，隔离区地表最大沉降较非隔离区降低 71%；桥墩位移随盾构推进呈动态变化，穿越隔离桩时变形增速放缓，桥面中线为位移峰值点，最大水平位移为 0.21 mm、最大沉降为 0.43 mm，均远低于设计规定的变形控制标准。工程实践表明，该隔离结构方案在变形控制方面具有良好效果与可行性。

(3) 随着隔离桩进入隧道底板深度的增加，桩基水平位移的控制效果逐渐下降，且降幅趋于减小；桩基水平位移随隔离桩厚度的增加而减小。参数分析表明，隔离桩进入隧道底深度、厚度及与隧道间距均存在显著的峰值效应。

(4) 综合考虑施工对地表沉降、桥墩变形的影响及经济性要求，实际工程采用连系梁间距 6 m、隔离桩深度 22.2 m、厚度 1.2 m、与盾构净距 1.0 m 的门式隔离结构，各项指标均满足规范限值要求。该门式隔离结构适用于长三角地区类似软土地层、土压平衡盾构浅埋施工工况下的盾构侧穿高铁桥墩工程，可为同类工程的隔离结构设计提供参考。

## 参考文献(References):

- [1] 唐泽人, 陈辰, 朱元昌, 等. 门式隔离桩对大直径盾构隧道施工引发地表沉降的影响[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(25): 10902-10909.  
TANG Zeren, CHEN Chen, ZHU Yuanchang, et al. Impact of portal isolation piles on ground settlement caused by construction of large-diameter shield tunnels[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(25): 10902-10909.
- [2] 浦逸辉, 彭华, 肖骁骐, 等. 盾构下穿高速铁路隧道沉降变形控制标准研究[J]. 北京交通大学学报, 2024, 48(1): 32-43.  
PU Yihui, PENG Hua, XIAO Xiaoqi, et al. Study on settlements control standards for shield tunneling beneath high-speed railway tunnels[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2024, 48(1): 32-43.
- [3] SOOMRO M A, NG C W W, MEMON N A, et al. Lateral behaviour of a pile group due to side-by-side twin tunnelling in dry sand: 3D centrifuge tests and numerical modelling[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 101: 48-64.
- [4] SUN Y, WANG F X, MENG Z L, et al. Analysis of lateral displacement of pile foundation caused by large-diameter shield tunneling[J]. Applied Sciences, 2024, 14(1): 272.
- [5] 戴正彬, 卢云龙. 盾构超近距离下穿对既有隧道变形的影响[J]. 岩土工程学报, 2025, 47(10): 2154-2162.  
DAI Zhengbin, LU Yunlong. Influence of ultra-close undercrossing

- shield on deformation of existing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(10): 2154-2162.
- [6] SU J, PAN Y Q, NIU X K, et al. Effect of shield tunneling on adjacent pile foundations in water-rich strata[J]. Transportation Geotechnics, 2025, 52: 101557.
- [7] 周志良, 仇欢, 黄晓东, 等. 钻孔灌注桩施工对邻近运营隧道变形影响研究[J]. 岩土工程技术, 2021, 35(1): 1-6, 11.
- ZHOU Zhiliang, QIU Huan, HUANG Xiaodong, et al. Impact of bored pile construction on deformation of adjacent operating tunnel [J]. Geotechnical Engineering Technique, 2021, 35(1): 1-6, 11.
- [8] 黄建华, 袁晓玉, 张建昆. 顶管穿越与并行对既有地铁盾构隧道的影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(3): 29-34.
- HUANG Jianhua, YUAN Xiaoyu, ZHANG Jiankun. Impact analysis of pipe jacking crossing and parallel construction on existing metro shield tunnels[J]. Urban Mass Transit, 2025, 28(3): 29-34.
- [9] YE X W, LIU Z X, CHEN Y B, et al. Deformation of existing underpasses due to pile cutting and shield tunneling: observations from field monitoring and explanations by analytical model[J]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 21: e03836.
- [10] 刘吉光, 王栋, 马国海, 等. TBM隧道下穿运营高铁隧道变形影响研究[J]. 铁道勘察, 2024, 50(6): 122-128.
- LIU Jiguang, WANG Dong, MA Guohai, et al. Study on the deformation influence of TBM tunnel undercrossing high-speed rail tunnel[J]. Railway Investigation and Surveying, 2024, 50(6): 122-128.
- [11] 纪颖波, 张继严, 毕俊伟, 等. 高铁荷载下软土地基振动与塑性变形特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(12): 4615-4627.
- JI Yingbo, ZHANG Jiyang, BI Junwei, et al. Vibrations and plastic deformations of soft ground induced by high-speed trains[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(12): 4615-4627.
- [12] 房建, 雷晓燕, 练松良. 线路不平顺对桥上CRTSII型板轨道振动的影响[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(3): 13-18, 90.
- FANG Jian, LEI Xiaoyan, LIAN Songliang. Research on the impact of track irregularities on the CRTS II slab track structure vibration characteristics[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019, 36(3): 13-18, 90.
- [13] 王启云, 张家生, 孟飞, 等. 高速铁路路基模型列车振动荷载模拟[J]. 振动与冲击, 2013, 32(6): 43-46, 72.
- WANG Qiyun, ZHANG Jiasheng, MENG Fei, et al. Simulation of train vibration load on the subgrade testing model of high-speed railway[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(6): 43-46, 72.
- [14] 杨平, 于游, 朱俊, 等. 上软下硬富水地层临近既有有线叠线隧道盾构始发变形数值模拟研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2025, 47(4): 53-63.
- YANG Ping, YU You, ZHU Jun, et al. Numerical simulation study on the initiation deformation of stacked shield in upper soft and lower hard formations[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences), 2025, 47(4): 53-63.
- [15] 顾晓强, 吴瑞拓, 梁发云, 等. 上海土体小应变硬化模型整套参数取值方法及工程验证[J]. 岩土力学, 2021, 42(3): 833-845.
- GU Xiaoqiang, WU Ruituo, LIANG Fayun, et al. On HSS model parameters for Shanghai soils with engineering verification[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(3): 833-845.
- [16] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017: 16-59.
- [17] 岳志坤. 地铁盾构侧穿高铁桥梁桩基变形分析及关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2018: 1-95.
- [18] KONG F C, LU D C, LIN Q T, et al. Explicit Peck formula applied to ground displacement based on an elastic analytical solution for a shallow tunnel[J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2024, 18(11): 1637-1648.
- [19] O'REILLY M P, NEW B M. Settlements above tunnels in the United Kingdom-their magnitude and prediction[C]//Proc Tunnelling 82. Institution of Mining and Metallurgy, London, 1982: 173-181.
- [20] 李方明, 陈国兴. 南京江漫滩区间隧道盾构施工地表沉降变形特性研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 155-160.
- LI Fangming, CHEN Guoxing. Study on deformation characteristics of ground surface settlement during shield tunnel construction of river floodplain in Nanjing[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(7): 155-160.
- [21] LI Y S, NG C W W, HUANG H W, et al. Geotechnical aspects of underground construction in soft ground[C]//Taylor & Francis Group. Proceedings of the 6th International Symposium, London: CRC Press, 2009: 13.
- [22] 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.
- ZHAO Xiaoyong. Influence analysis of setting separation piles for metro shield tunnel side-crossing high-speed railway bridge pile groups[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(5): 116-120, 126.
- [23] 童立元, 孟长江, 张德富, 等. 地铁隧道建设中隔离桩设置对临近高铁桥梁桩基的保护效果分析[J]. 工程地质学报, 2016, 24(增刊1): 415-421.
- TONG Liyuan, MENG Changjiang, ZHANG Defu, et al. Analysis of protective effects of isolated piles when subway tunnel construction crossing the existing high-speed railway bridge foundations[J]. Journal of Engineering Geology, 2026, 24(Suppl. 1): 415-421.