

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2021.041>



盾构超近距离侧穿铁路桥桩保护方案探讨

任磊^{1,2}, 朱颖¹, 崔天麟¹

1. 郑州地铁集团有限公司, 河南郑州 450000
2. 河南工业大学土木建筑学院, 河南郑州 450001

摘要: 郑州地铁某盾构区间超近距离侧穿铁路桥梁桩基, 受地面空间及隧道与桥桩间净距限制, 无法采用隔离桩等常规保护措施。结合工程实际情况提出“盾构通过范围内土体注浆加固”、“桥梁承台加固”以及“注浆+承台加固”三种措施, 利用数值模拟手段, 对盾构侧穿施工期间, 不同保护方案下桥桩的变形规律进行了分析研究。研究表明, 采用“盾构通过范围内土体注浆加固+承台加固”措施, 可使桥面最大沉降值减少约45%, 且可减少桥面横桥向不均匀沉降及桥桩水平位移, 在很大程度上减少盾构隧道施工对铁路桥梁的不利影响。

关键词: 注浆加固; 地铁; 数值计算; 铁路桥桩; 工程地质。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2021)06-2278-09

收稿日期: 2021-01-02

Study on Protection Scheme of Shield Tunnel Passing through Railway Bridge Pile at a Short Distance

Ren Lei^{1,2}, Zhu Ying¹, Cui Tianlin¹

1. Zhengzhou Metro Group Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China
2. School of Civil Engineering and Architecture, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China

Abstract: A shield tunnel of Zhengzhou Metro passes through the existing pile foundations of railway bridge at ultra close distance. Due to the limitation of ground space and clear distance between tunnel and bridge pile, conventional protection measures such as isolation pile cannot be adopted. In this paper, three protection measures are put forward, which are “soil grouting reinforcement within the scope of shield passing”, “bridge cap reinforcement” and “grouting + bridge cap reinforcement”. By means of numerical simulation, the deformation law of bridge piles under different protection measures was analyzed. The results show that the maximum settlement of the bridge deck can be reduced by about 45% by adopting the measures of “grouting + bridge cap reinforcement”, besides, the uneven settlement of bridge deck in transverse direction and horizontal displacement of bridge pile can be significantly reduced.

Key words: grouting reinforcement; subway; numerical calculation; railway bridge pile; engineering geology.

0 引言

近年来, 随着我国城市轨道交通的迅速发展, 地铁区间在建设过程中盾构侧穿各类桥梁桩基尤其是

铁路桥梁桩基的案例不断增多(沈建文和刘力, 2015; 张海彦等, 2016)。盾构掘进施工中不可避免会对周围地层产生扰动, 引起地层隆起或不均匀沉降(张海波等, 2005; 王晓睿等, 2019), 从而引起邻近

基金项目: 河南省交通运输厅项目(No.2020J5)。

作者简介: 任磊(1980—), 男, 高级工程师, 从事轨道交通建造及运营技术研究。ORCID: 0000-0003-3538-5580. E-mail: 616144259@qq.com

引用格式: 任磊, 朱颖, 崔天麟, 2021. 盾构超近距离侧穿铁路桥桩保护方案探讨. 地球科学, 46(6): 2278-2286.

铁路桥梁桩基的结构变形,当变形量过大时将危及到铁路桥梁结构及运营安全.因此,需在盾构穿越桥梁桩基前,对桥梁桩基结构变形进行合理的预测,并采取有效保护措施,从而减小盾构施工对桥梁结构带来的不利影响.

国内外学者针对盾构施工对邻近桥梁桩基的影响进行了许多研究(付文生等,2009;李松等,2012;郭一斌等,2014;邓敦毅等,2019;乔世杰等,2020),如乔世杰等(2020)运用三维有限元软件对北京地铁19号线某盾构区间下穿京开高速立交桥桩进行分析,模拟分析了在未采取加固措施时桥桩最大累计沉降量达4.63 mm,采取“袖阀管地面注浆”与“洞内径向注浆”相结合的加固技术可使桥桩沉降量控制在2.68 mm,得出采取地层注浆加固措施可有效控制桥桩和地面沉降.邓敦毅等(2019)运用三维数值模拟的方法对比分析在盾构隧道穿越过程中不同加固方案对于限制隧道和桥梁变形的效果,得出仅加固隧道周围土体对于限制拱顶和地表沉降以及桥桩应力的效果相比于对其他区域土体加固更为理想.李松等(2012)运用有限元分析软件,模拟了盾构隧道动态施工对近接高架桥桩基的影响,认为采用袖阀管注浆加固桩基周边土体将引起桩基产生附加沉

降,对桩基水平位移控制无明显效果.

上述各案例中依据不同工程条件,介绍的桥梁保护措施及针对保护措施的效果得出的研究结论均不尽相同.本文依托郑州地铁7号线一期工程具体案例,采用三维数值计算模拟分析盾构侧穿铁路桥梁桩基施工引起的桥梁结构的变形规律、变形值,在受地面空间及隧道与桥桩间净距限制,无法采用隔离桩等常规保护措施的前提下,提出“盾构通过范围内土体注浆加固”、“桥梁承台加固”以及“注浆+承台加固”三种保护措施,并分析不同措施对桥梁结构的影响,提出合理的施工措施及建议.分析过程及研究结论以期供类似工程参考借鉴.

1 工程概况

1.1 郑州市轨道交通7号线一期工程概况

7号线一期工程线路主要沿文化路、优胜南路、金水路和大学路走行.线路全长约26.81 km,均为地下线.本线采用A型车6辆编组,设计速度目标值为100 km/h.其中大石桥站—郑大一附院站区间侧穿陇海铁路下行线铁路桥梁桩基,区间采用盾构法施工,管片外径6.2 m,内径5.5 m,厚度0.35 m,环宽1.5 m.

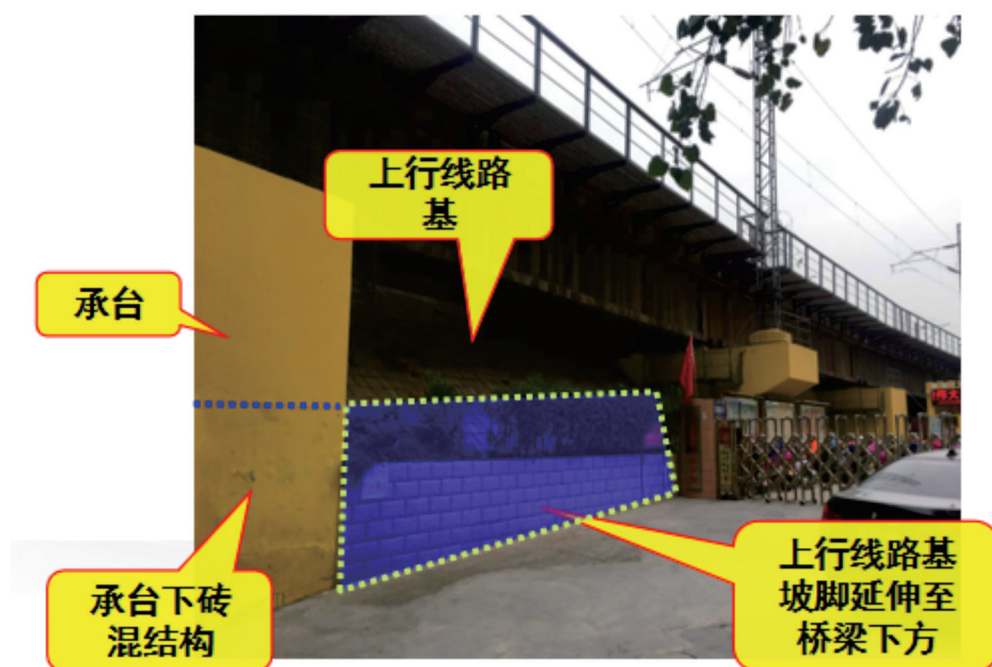


图1 陇海铁路现状

Fig.1 Longhai railway status

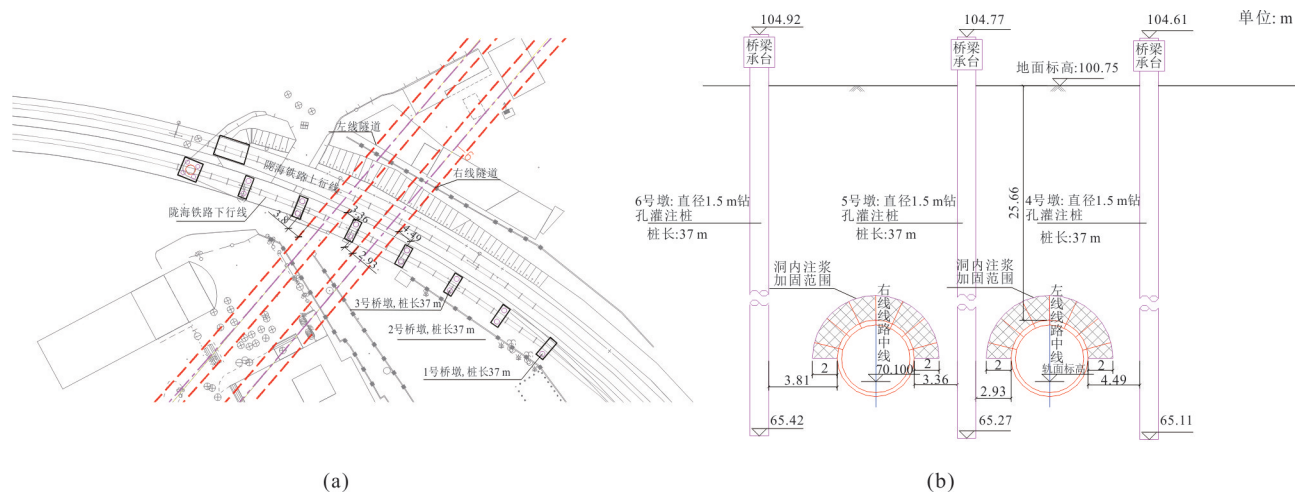


图 2 区间隧道与陇海铁路位置关系平面图(a)和剖面图(b)
Fig.2 Plan (a) and section (b) of the positional relationship between the section tunnel and the Longhai railway

1.2 陇海铁路概况

盾构穿越处陇海铁路为两股道普速铁路,碎石道床、混凝土轨枕,行车时速 160 km/h.其中陇海铁路上行线为路基段,下行线为桥梁段,桥梁形式为简支梁,桩基采用直径 1.5 m 钻孔灌注桩,桩长 37 m.区间左线从陇海下行线 4#、5#桥墩中间穿过,区间右线从陇海下行线 5#、6#桥墩中间穿过,盾构隧道结构边缘与桩基水平净距 2.93~4.49 m,该处隧道覆土厚度约 25.6 m.陇海铁路现状以及区间与桥梁相互关系见图 1 和图 2.需指出的是,该处陇海铁路上行线路基坡脚已延伸至下行线桥梁下方.下行线桥梁底面距地面高度仅约 3.5 m,且下行线桥桩承台高出地面 1.36~2.12 m.

1.3 工程地质概况

区间穿越铁路桥梁处地层自上而下依次为素填土层(1-1)、黏质粉土层(2-33)、黏质粉土层(3-31)、粉砂层(3-41)、黏质粉土层(3-32)、粉质黏土层(3-22)、细砂层(3-51)、粉质黏土层(3-23).其中区间隧道所处地层为粉质黏土层(3-23).地下水位埋深 10.3~12.5 m,位于隧道顶部以上.

2 桥梁变形控制标准

根据《普速铁路线路维修规则》、《铁路桥涵设计规范》等要求,并结合国内地铁穿越铁路桥梁的成功案例经验,本次研究选取采用的桥梁变形控制标准如下:

(1)桥面沉降值不超过 6 mm;

(2)相邻两桥墩差异沉降不超过 6 mm;

(3)桥梁桩基桩体水平位移不超过 6 mm;

(4)ZK 活载、横向摇摆力、离心力、风力和温度的作用下,墩顶横向水平位移引起的桥面处梁端水平折角应不大于 1.5‰ 弧度;

(5)墩台顶帽面顺桥方向的弹性水平位移应满足 $\Delta \leq 5\sqrt{16.5} = 20.3 \text{ mm}$.

3 穿越铁路桥桩保护方案

陇海下行线桥梁底面距地面高度仅约为 3.5 m,且上行线路基坡脚已延伸至下行线桥梁下方,另外该处盾构隧道与桥桩间最小水平净距仅 2.93 m,受上述条件制约,较难采用在盾构隧道与桥桩间设置隔离桩等常规保护措施.结合现场环境条件,提出如下 3 种保护方案.

3.1 盾构通过范围内土体注浆加固

盾构隧道通过陇海铁路下行线桥梁前,采取地面袖阀管注浆措施,对盾构掘进范围内的土体进行注浆加固,以改善土体力学状态,减小地层沉降.注浆范围结合隧道与桥桩水平距离确定为盾构结构轮廓线左右各 2 m,上下各 3 m,沿区间线路纵向方向为 15 m.加固后土体 28 d 无侧限抗压强度 $\geq 0.8 \text{ MPa}$,本方案加固范围见图 3.

3.2 承台加固

本方案思路为在盾构穿越处相邻桩基承台之间施做连梁,使各承台连接成整体,提高桥桩整体刚度及稳定性.由于承台北侧为上行线路基,承台之间为上行线路基延伸坡脚,若承台范围内全部施

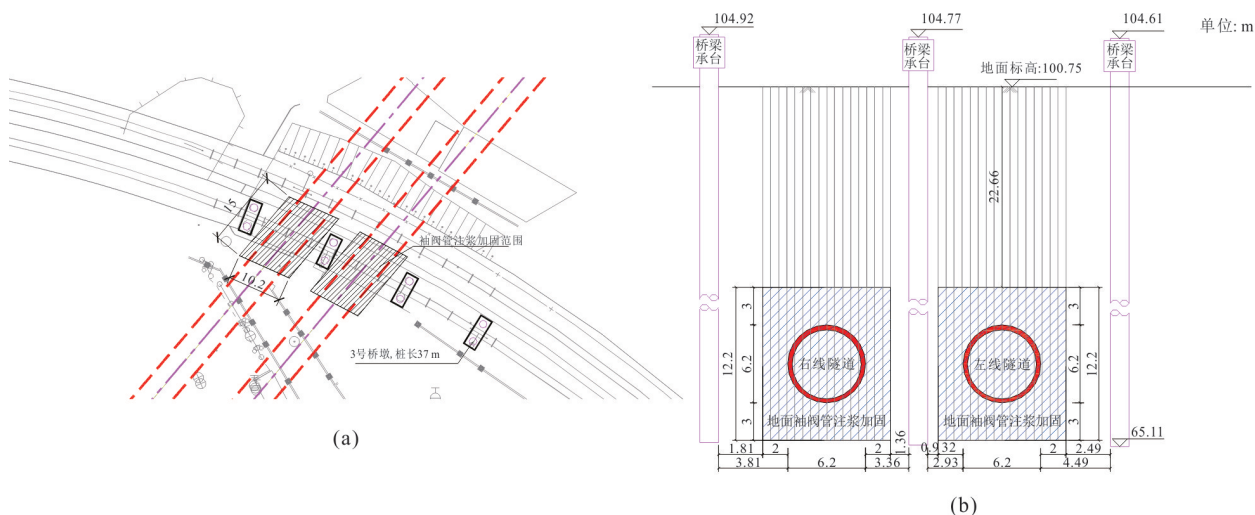


图3 袖阀管注浆加固平面图(a)和剖面图(b)

Fig.3 Plan (a) and section (b) of grouting reinforcement for sleeve valve pipe

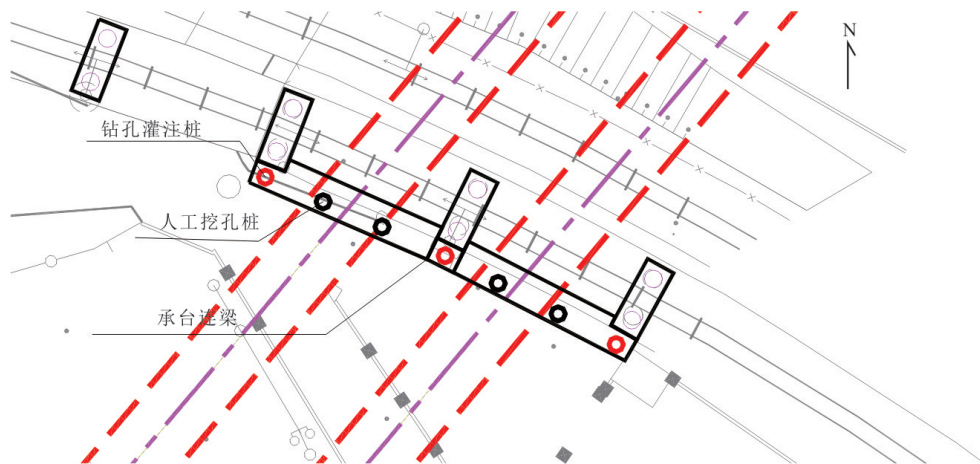


图4 承台南侧施做连梁平面示意

Fig.4 Schematic diagram of the connecting beam construction on the south side of the cap

做连梁需破除上行线路基,破坏边坡稳定性从而导致上行线产生变形,故考虑仅在承台南侧施做型钢混凝土连梁,连梁宽2 m,高2.5 m,长约15 m,连梁与承台连接部位处新增桩径1.5 m,长50 m的钻孔灌注桩进行支撑.由于承台高出地面,承台间连梁采用人工挖孔桩支撑.本方案示意图4和图5.

3.3 注浆加固+承台加固

本方案结合以上2种方案,采用地面袖阀管注浆加固+承台南侧施做连梁措施.方案示意如图6所示.

4 数值模拟分析

采用FLAC3D软件进行三维数值模拟分析,计算分为4个工况.工况一,不采用任何措施下,盾构

直接侧穿桥桩;工况二,在盾构穿越桥桩前,对桥桩周围土体进行地面袖阀管注浆加固后再进行盾构隧道施工;工况三,在盾构穿越桥桩前,在桥梁承台一侧施做连梁,使承台形成一个整体后再进行盾构隧道施工;工况四,结合“工况二”及“工况三”,在盾构穿越前对桥桩周围土体进行地面袖阀管注浆加固的同时在桥梁承台一侧施做连梁,措施完成后,盾构隧道再进行施工.

4.1 模型建立

模型范围为以隧道的中心为中心,长 $\times$ 宽 $\times$ 高为100 m $\times$ 50 m $\times$ 50 m,隧道直径为6.2 m,共有约203 000个模型单元和127 000个单元节点.模型中地层、桥梁、桩基、连梁等均采用实体单元 zone 模拟;管片选用 shell 单元模拟;注浆模拟采用 cable 结

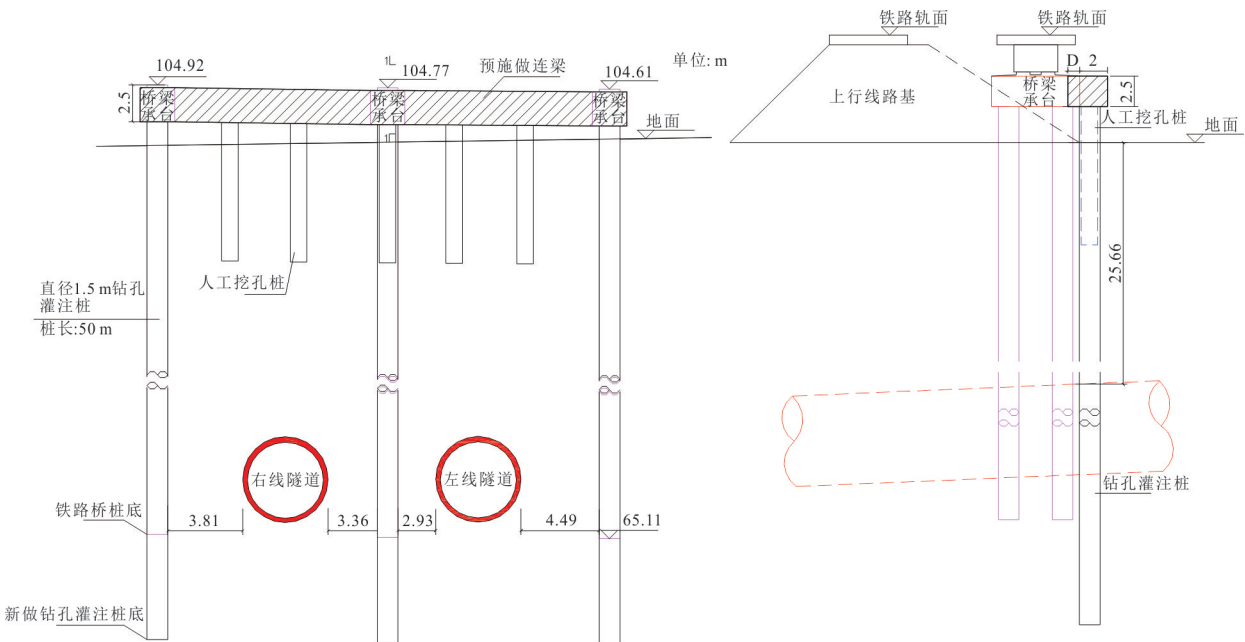


图5 承台南侧施做连梁剖面示意图

Fig.5 Diagram of connecting beam section on the south side of the cap

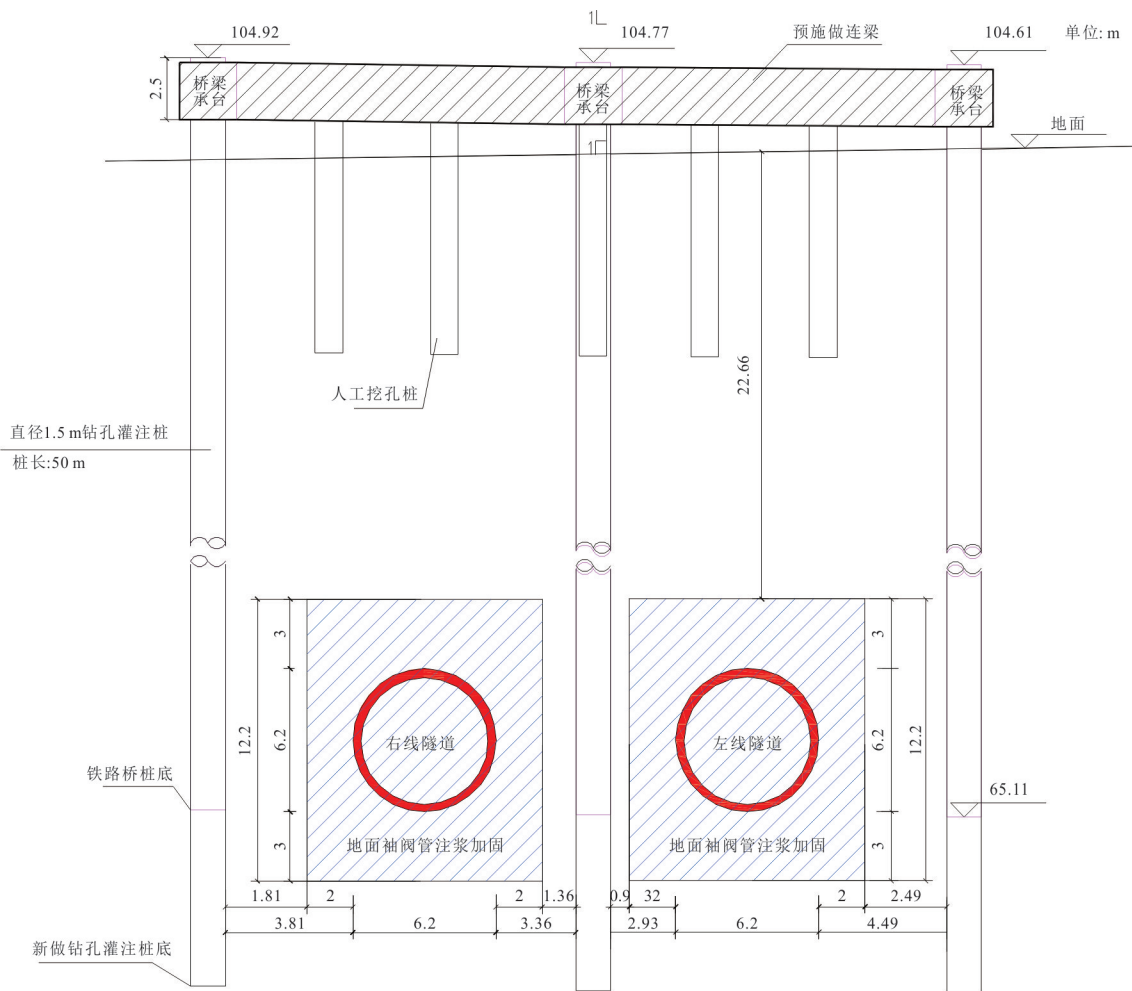


图6 注浆加固+承台南侧施做连梁示意

Fig.6 Schematic diagram of grouting reinforcement + connecting beam on the south side of the cap

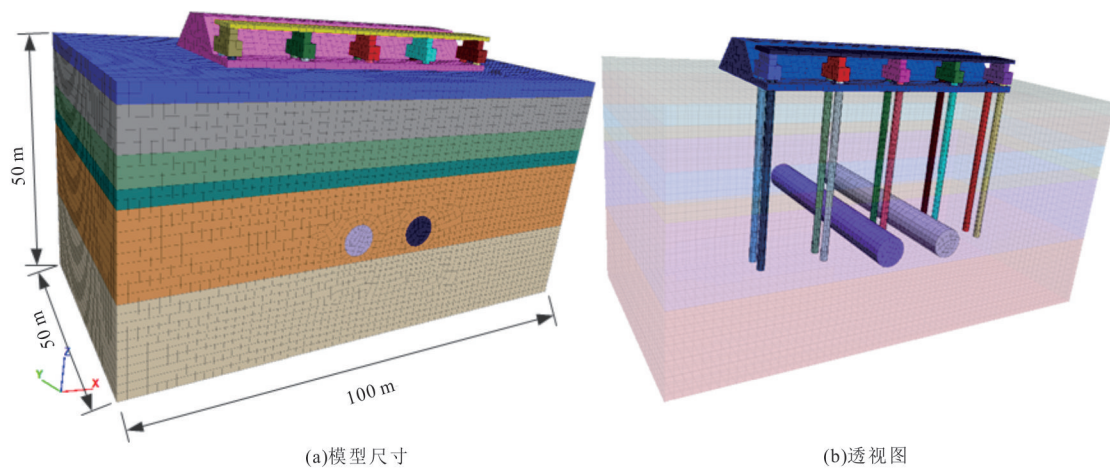


图 7 计算模型示意

Fig.7 Schematic diagram of calculation model

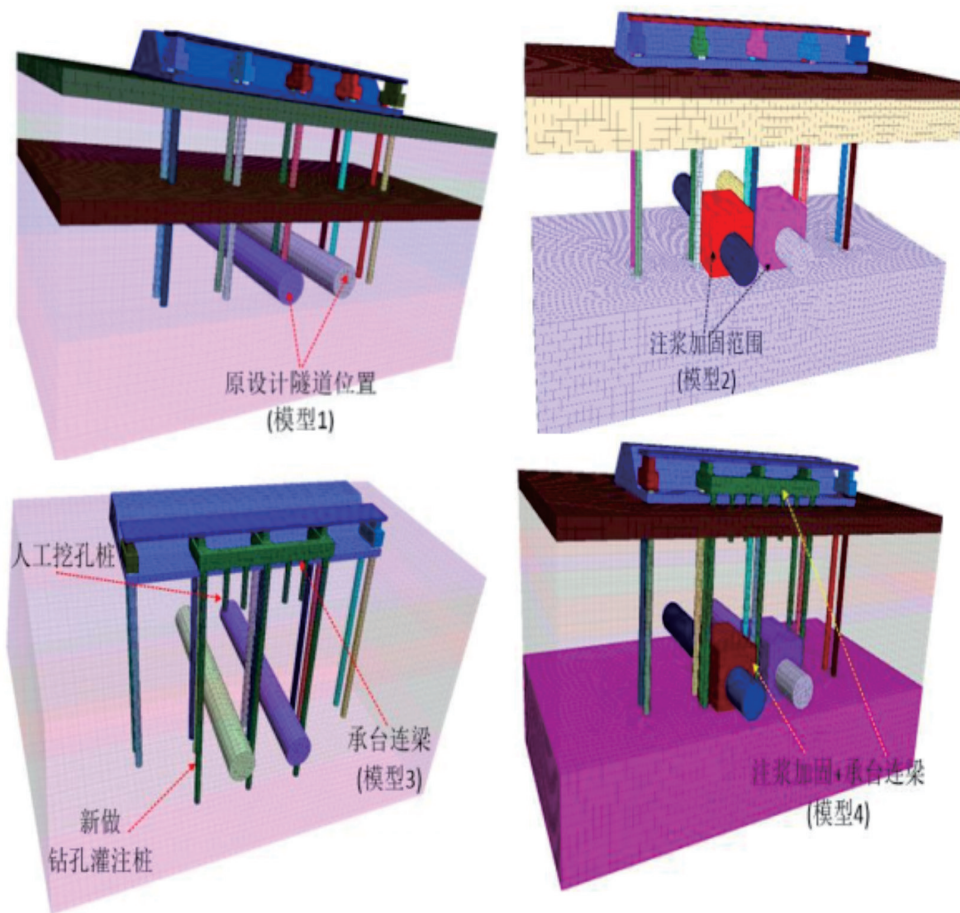


图 8 计算模型图

Fig.8 Calculation model diagram

构单元.计算模型见图 7.

4.2 计算参数

地层模型选择摩尔—库伦(Mohr-Coulomb)准则,桥体及桩基采用弹性模型,隧道开挖采用 model

null 命令,具体土层参数根据地勘报告选取,此外,通过适当提高注浆范围内土体的力学参数模拟土体注浆效果,计算参数具体如表 1 和表 2 所示.

表 1 土层计算参数
Table 1 Calculation parameters of soil

地层岩性	容重(kN/m³)	压缩模量(MPa)	泊松比	摩擦角(°)	粘聚力(kPa)
1-1 杂填土	18	3	0.3	5	5
2-33 黏质粉土	17.6	9	0.32	22	13.5
3-31 黏质粉土	18.8	14.5	0.33	24	14
3-41 粉砂	20	16.5	0.4	28	3
3-32 黏质粉土	19.4	14.5	0.35	24.5	15
3-22 粉质黏土	19.3	9.9	0.25	17	28
3-51 细砂	20	22	0.4	32	—
3-23 粉质黏土	19.1	10.6	0.28	17.5	29
3-21 粉质黏土	19.1	6.2	0.25	16	26
3-24 粉质黏土	19.1	11	0.30	18	33
注浆加固体	21	11	0.28	26	58

表 2 材料计算参数
Table 2 Calculation parameters of structure materials

地层岩性	容重(kN/m³)	弹性模量(MPa)	泊松比	摩擦角(°)	粘聚力(kPa)
盾构管片	25	35 500	0.2	—	—
桥梁桩基	25	34 500	0.2	—	—
承台与桥墩	25	32 000	0.2	—	—
铁轨	72	206 000	0.3	—	—

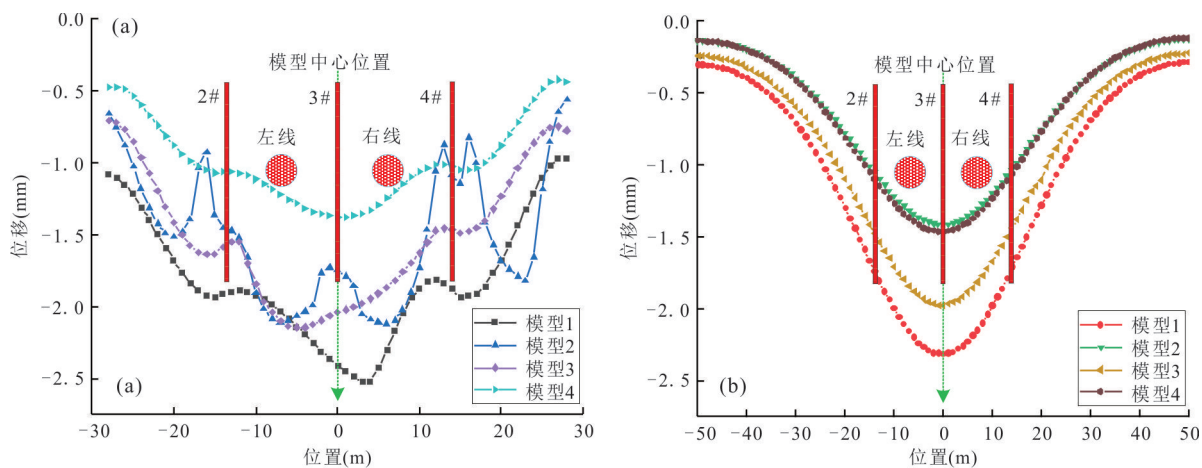


图 9 桥面沉降位移曲线(a)和地面沉降位移曲线(b)
Fig.9 Bridge deck settlement displacement curve (a) and ground settlement displacement curve (b)

4.3 计算结果及分析

4.3.1 计算模型 本次计算分为 4 个计算模型,分别为:不加固方案(模型 1);注浆加固方案(模型 2);承台间施作连梁方案(模型 3);注浆加固+承台间施作连梁方案(模型 4),各计算模型见图 8.

4.3.2 不同方案下桥面及地面沉降对比 将各模型隧道双线贯通后桥面及地面沉降曲线分别绘制在同一图中,如图 9a、图 9b 所示.由图 9a 可看出,不加固方案(模型 1)桥面最大沉降量约为 2.53 mm;注

浆加固方案(模型 2)桥面最大沉降量约为 2.10 mm;承台间施作连梁方案(模型 3)桥面最大沉降量约为 2.14 mm,注浆加固+承台间施作连梁方案(模型 4)桥面最大沉降量约为 1.38 mm.可看出注浆加固+承台间施作连梁方案(模型 4)桥面沉降量最小,相比于不加固方案,可减少桥面沉降量达 45%,且该方案下,相邻桥墩不均匀沉降值最小,约 0.3 mm.

此外,从图 9b 可以看出,注浆加固方案(模型 2)及注浆加固+承台间施作连梁方案(模型 4)地面沉

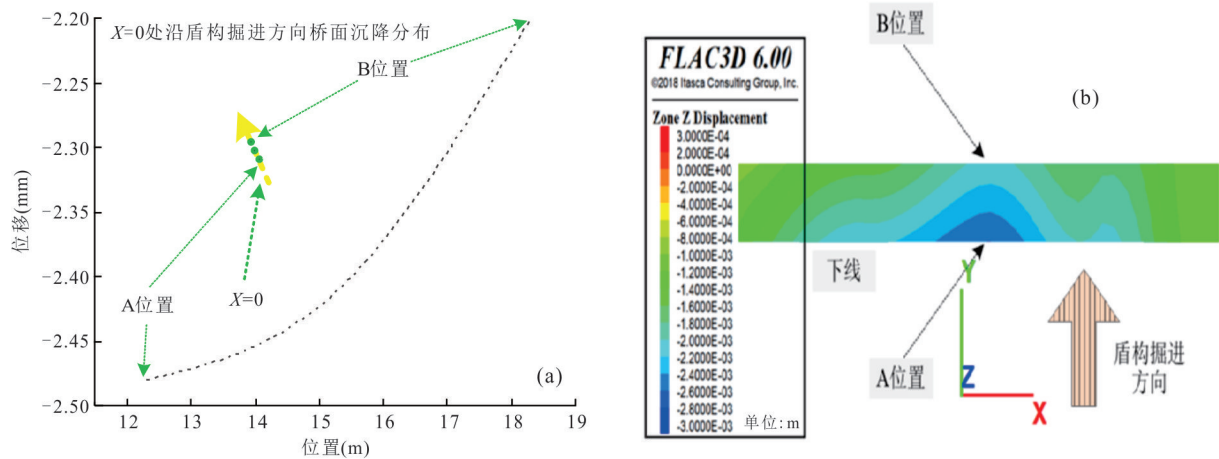


图 10 桥面横桥向沉降位移曲线(a)及沉降位移云图(b)

Fig.10 Transverse bridge settlement displacement curve (a) and settlement displacement cloud map (b) of bridge deck

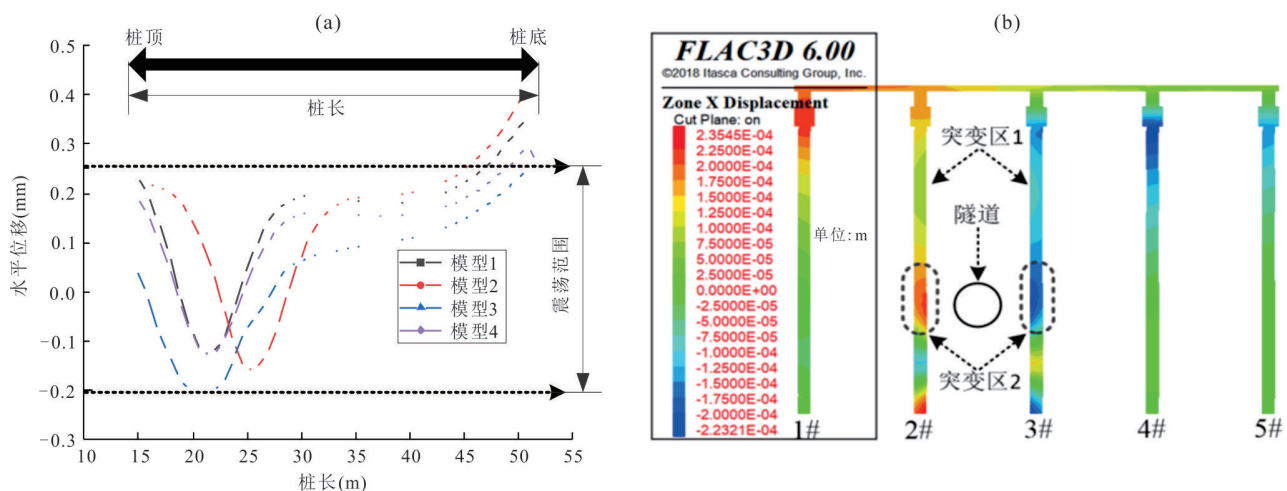


图 11 桩体水平位移曲线(a)和水平位移云图(b)

Fig.11 Horizontal displacement curve of pile (a) and horizontal displacement cloud map (b)

降值远小于其余 2 个方案,反映出对盾构周边土体提前进行注浆加固,可有效改善土层力学状态,减少地层沉降。

4.3.3 桥面横桥向及顺桥向位移分析 以模型 1 为例分析盾构隧道双线贯通后,桥面横桥向(沿盾构掘进方向)位移情况,计算结果见图 10,可看出桥面横桥向存在不均匀沉降现象,但同时可看出在该处测线上 A 位置沉降量最大约为 2.48 mm, B 位置沉降量最大约为 2.20 mm,两者仅相差 0.28 mm。此外,经数值计算得出,桥面横桥向水平位移最大约 0.43 mm,由此引起的梁端水平折角为 0.026‰ 弧度,顺桥向最大位移 0.24 mm,均小于变形控制值,且其他模型桥面横桥向及顺桥向位移分布与模型 1 类似,综合分析,桥面横桥向及顺桥向位移不是桥梁变形主控因素,后文不再赘述。

4.3.4 桩体水平位移 由图 11 可看出,隧道开挖完成后,对邻近的桩体水平变形有一定影响,桩体水平位移曲线存在较为明显的突变区 1 和突变区 2,其中突变区 2 形成原因在于隧道开挖后,周围土体有向隧道洞内运动的趋势,所以 2# 桩体洞周位置有向右位移趋势(为正),3# 桩体洞周位置有向左位移趋势(为负);突变区 1 位于移桩体上部,其突变可能原因是为了与上部结构保持一定的协调变形。隧道开挖使靠近其的 2# 和 3# 桩体水平位移有正有负,但远离隧道的 1#、4# 和 5# 桩体其水平位移呈现较好的单向性。

经数值分析,注浆加固+承台间施作连梁方案(模型 4)引起的桩体水平位移最小,约 0.2 mm,注浆加固方案(模型 2)引起的桩体水平位移约 0.25 mm,承台间连梁方案(模型 3)引起的桩体水平位移约

0.3 mm, 各方案下桩体水平位移均小于变形控制值。

5 结论

(1) 在盾构隧道超近距离侧穿铁路桥桩且无法施做隔离桩时, 可结合工程实际情况, 采用盾构通过范围内土体注浆加固、桥梁加固等不同保护措施, 以进一步提高盾构穿越施工的安全系数。

(2) 经综合对比分析, 本文提出的各保护措施的有益效果可按以下排序: 注浆加固+承台间施作连梁>注浆加固>承台间施作连梁>不加固方案。

(3) 采用地面“注浆加固+承台间施做连梁”保护措施, 能很大程度地减小桥面最大沉降值、桥面横向不均匀沉降及桥桩水平位移, 有效控制桥梁结构变形。

References

- Deng, D.Y., Hou, J.L., Li, P., et al., 2019. Comparative Analysis of Influence of Shield Tunnel Crossing Bridge Pile Reinforcement Schemes. *Shanxi Architecture*, 45(6):155—157(in Chinese with English abstract).
- Fu, W.S., Xia, B., Luo, D.M., 2009. Comparison Research on the Effect of Shield Tunnel Traversing Adjacently under the Existing Pile Foundations. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 5(1): 133—138 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Y.B., Zhang, L.M., Zheng, G., et al., 2014. Influence of Shield Tunneling on Working Performance of Large Interchange's Super-Long Piles. *Rock and Soil Mechanics*, 35(10): 2941—2948, 2957(in Chinese with English abstract).
- Li, S., Yang, X.P., Liu, T.J., 2012. Analysis of Influence of Shield Tunneling in Guangzhou Metro on Pile Foundation of Adjacent Viaduct. *Railway Engineering*, 52(7): 74—78(in Chinese with English abstract).
- Qiao, S.J., Li, H.A., Xia, B.R., et al., 2020. Analysis and Control Measures of Settlement and Deformation of Underpass Bridge Piles in Double-Track Tunnel. *Highway*, 65(1):281—286(in Chinese with English abstract).
- Shen, J.W., Liu, L., 2015. Numerical Analysis and Field Monitoring for Studying Effects of Shield Tunnelling on nearby Piles. *Rock and Soil Mechanics*, 36(Suppl.2):709—714 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X.R., Jiang, H.J., Zhu, K., et al., 2019. Research on Ground Settlement Laws of Urban Subway Tunnel Construction Process Based on Earth Pressure Shield. *Earth Science*, 44(12):4293—4298(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.B., Yin, Z.Z., Zhu, J.G., 2005. 3D Finite Element Simulation on Deformation of Soil Mass during Shield Tunneling. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(5): 755—760(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H.Y., He, P., Yan, G.X., et al., 2016. Effects of Existing Pile Foundation on Parameters of Shield Tunneling. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 38(9): 1615—1624(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 邓敦毅, 侯建林, 李鹏, 等, 2019. 盾构隧道穿越桥桩加固方案影响性对比分析. *山西建筑*, 45(6):155—157
- 付文生, 夏斌, 罗冬梅, 2009. 盾构隧道超近距离穿越对桩基影响的对比研究. *地下空间与工程学报*, 5(1):133—138
- 郭一斌, 张立明, 郑刚, 等, 2014. 盾构施工对大型立交桥超桩工作性状的影响. *岩土力学*, 35(10):2941—2948, 2957.
- 李松, 杨小平, 刘庭金, 2012. 广州地铁盾构下穿对近接高架桥桩基的影响分析. *铁道建筑*, 52(7):74—78.
- 乔世杰, 李宏安, 夏柏如, 等, 2020. 双线隧道下穿桥桩沉降变形分析及控制措施. *公路*, 65(1):281—286.
- 沈建文, 刘力, 2015. 盾构隧道施工对临近桥桩影响数值及现场监测研究. *岩土力学*, 36(增刊2):709—714.
- 王晓睿, 姜洪建, 朱坤, 等, 2019. 基于土压盾构的城市地铁隧道构筑过程地表沉降规律. *地球科学*, 44(12):4293—4298.
- 张海波, 殷宗泽, 朱俊高, 2005. 地铁隧道盾构法施工过程中地层变位的三维有限元模拟. *岩石力学与工程学报*, 24(5):755—760.
- 张海彦, 何平, 闫国新, 等, 2016. 既有桩基对盾构施工参数的影响研究. *岩土工程学报*, 38(9):1615—1624.