

盾构下穿高速公路对既有平行通道桥的影响规律

邓方园¹, 王山平¹, 马 迪², 卢春雨², 陈保国²

(1. 中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610081; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:为探讨盾构下穿高速公路对既有平行通道桥的影响规律,以韩江榕江练江水系连通后续优化工程盾构隧道穿越G78汕昆高速公路路堤为背景,建立三维有限元模型,分析盾构施工对地表沉降、高速公路路基、既有平行通道桥桩基的影响规律。结果表明:1)盾构隧道开挖对地层的影响范围大致为隧道直径的4倍;2)隧道轴线正上方地表沉降值最大,达到5.6 mm,路基最大沉降值发生在隧道轴线正上方,约为5 mm;3)通道桥桩基竖向位移均表现为沉降,靠近盾构侧桩基沉降大于远侧,其中桩基Z1沉降值最大,达到2.4 mm;4)隧道埋深顶面处对应的桩基水平位移较大,受盾构掘进叠加影响,桩基Z1水平位移最大,约为0.37 mm;5)弯矩的最大值出现在隧道埋深位置附近,轴力的最大值出现在桩身中点位置,桩基Z1弯矩和轴力最大。

关键词:盾构隧道; 下穿公路; 桩基; 有限元模型; 地表沉降; 路基沉降; 桩基位移

中图分类号:U455.43

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)01-0067-06

doi:10.13402/j.gcejs.2025.01.011

Influence of shield underpass expressway on existing parallel channel bridges

DENG Fangyuan¹, WANG Shanping¹, MA Di², LU Chunyu², CHEN Baoguo²

(1. Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu 610081, Sichuan, China;

2. Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: In order to explore the influence of shield underpass expressway on the existing parallel channel bridges, a three-dimensional finite element model is established to analyze the influence law of shield construction on the surface settlement, highway subgrade and existing parallel channel bridge pile foundation under the background of the shield tunnel crossing the embankment of the G78 Shankun expressway in the follow-up optimization project of the Hanjiang-Rongjiang-Lianjiang river system. The results show that: 1) The influence range of shield tunnel excavation on the stratum is roughly 4 times of the tunnel diameter; 2) The maximum surface settlement value directly above the tunnel axis reaches 5.6 mm, and the maximum settlement value of the roadbed occurs directly above the tunnel axis, which is about 5 mm; 3) The vertical displacement of the pile foundation of the channel bridge is all subsided, and the settlement of the pile foundation near the shield side is greater than that of the far side, and the settlement value of the pile foundation Z1 is the largest, reaching 2.4 mm; 4) The horizontal displacement of the pile foundation corresponding to the top surface of the tunnel buried depth is large, and the horizontal displacement of the pile foundation Z1 is the largest, about 0.37 mm, which is affected by the superposition of shield; 5) The maximum value of bending moment appears near the buried depth position of the tunnel, the maximum value of axial force appears at the midpoint position of the pile body, and the bending moment and axial force of the pile

收稿日期: 2024-06-03

基金项目: 中国水利水电第七工程局有限公司科技攻关项目(GSSC-科研-2023-001)

作者简介: 邓方园(1981—),男,高级工程师,从事盾构隧道科研与工程技术管理工作。

通信作者: 马 迪(1999—),男,硕士研究生,从事岩土工程领域相关研究。

后左右 4 个面施加法向位移约束, 在模型底部施加固定约束。考虑到模型局部细化网格和计算精度, 模型网格划分选用六面体 + 四面体单元, 为一种混合网格, 盾构隧道、桥桩、高速公路路基重点关注的部位网格划分时细化。有限元模型如图 2 所示。

2.2 材料本构和参数

土层、路基填土采用摩尔 - 库仑本构模型, 按 3D 实体单元建模, 有关土体物理力学材料参数如表 1 所示。盾壳材料为钢材, 按板单元建模; 管片的材料为 C55 混凝土, 采用板单元建模; 注浆层厚度为 14 cm, 按 3D 实体单元建模, 建模过程中未考虑浆液硬化产生的体积变化。管片、盾壳、浆液均按线弹性本构模型考虑。桥墩为 C30 混凝土, 承台、桩基为 C25 混凝土; 桥墩、承台均按 3D 实体单元建模, 桩基按梁单元建模, 同时建立桩 - 土界面单元。桥墩、承台、桩基按线弹性本构模型。相关材料参数如表 2 所示。

根据现有研究资料^[12], 掘进压力按刀盘下部 2/3 直径处的静止土压力考虑; 注浆压力取静止土压力的 1.15 倍; 高速公路路面施加 20 kPa 均布荷载; 将桥面板的自重荷载折算后加在桥墩上, 施加在桥墩上的荷载为 134 kPa。

表 1 土性参数

土层名称	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	弹性模量/MPa
人工填土	19.0	10	12	15.0
淤泥质土	15.6	7	10	5.6
强风化泥质粉砂岩	25.5	15	30	700.0
路基填土	19.0	40	23	50.0

表 2 结构材料参数

名称	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/MPa	泊松比
管片	25	35 500	0.20
注浆层	20	1	0.25
盾壳	78	210 000	0.20
桥墩	25	30 000	0.20
承台	25	28 000	0.20
桩基	25	28 000	0.20

2.3 盾构开挖模拟

(1) 初始地应力阶段: 激活所有土层、开挖区域、注浆层、承台、桥墩、路基网格组, 进行位移清零, 施加自重荷载, 约束边界。

(2) 路基施工: 激活路基属性, 施加路面荷载。

(3) 位移初始化: 进行位移清零。

(4) 通道桥模拟: 激活桥墩、承台及其对应的属性, 激活桩基、桩界面、桩端单元, 施加通道桥荷载。

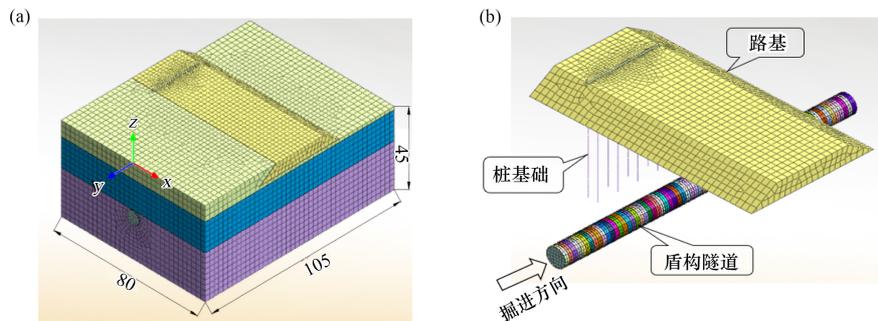
(5) 位移清零: 进行位移清零。

(6) 盾构开挖施工: 钝化开挖区域、注浆层、施加盾壳、施加下一步开挖区的掌子面支护力。

(7) 管片拼装: 钝化盾壳, 激活管片, 开挖下一步时进行上一步的管片拼装。

(8) 同步注浆: 激活注浆、同时激活边界组土 - 浆液以模拟浆液属性、激活注浆压力、同时考虑注浆压力对地层和管片的影响。

(9) 重复以上步骤, 共进行 72 个施工阶段 (S1 ~ S72), 直至隧道开挖贯通, 所有部件均组装模拟完毕。



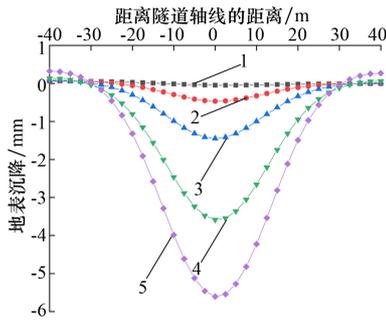
(a) 有限元模型网格; (b) 盾构隧道下穿模型

图 2 有限元模型

3 计算结果分析

3.1 地表沉降

隧道开挖各阶段 $Y=0$ 对应地表竖向位移如图 3 所示。由图 3 可知：隧道施工过程中，隧道轴线正上方地表沉降值最大，隧道开挖完成时沉降值达到 5.6 mm。当与隧道轴线的距离增大时，地表沉降逐渐减小，总体上形成一个类似于正态分布的沉降槽；当距离隧道轴线的距离达到 30 m 时，地表沉降接近于 0。盾构隧道开挖对地层沉降的影响范围大致为隧道直径的 4 倍，当与隧道轴线的距离超过这个范围，隧道开挖施工对地层基本没有影响。



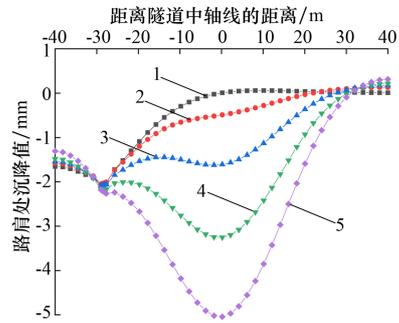
1—S1；2—S15；3—S30；4—S45；5—S72。

图 3 隧道开挖各阶段地表沉降

3.2 路基沉降

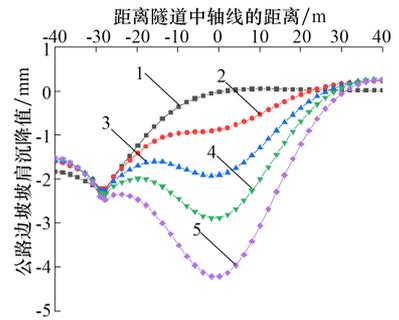
3.2.1 路基路肩沉降

盾构下穿过程中路基路肩 ($Y = -39.5 \text{ m}$) 沉降如图 4 所示。由图 4 可知：盾构隧道下穿高速公路过程中，路肩位置 ($Y = -39.5 \text{ m}$) 最大沉降值发生在盾构隧道中轴线的正上方，路肩位置处最大沉降值为 5 mm。往两侧距离隧道中轴线的距离逐渐增大的过程中，路肩处沉降值逐渐减小。但由于距离隧道轴线 25.5 m 的位置处有一通道桥桩基础，盾构隧道下穿施工对通道桥桩基础具有一定的影响，该处路肩沉降较大，约为 2.2 mm。



1—S1；2—S15；3—S30；4—S45；5—S72。

图 4 路基路肩沉降



1—S1；2—S15；3—S30；4—S45；5—S72。

图 5 路基边坡坡角沉降

沉降值逐渐减小。隧道掘进施工过程中，通道桥位置处沉降值约为 2.4 mm。

3.3 桩基竖向位移

为便于分析盾构掘进施工对通道桥桩基础的影响，对桩基进行编号，如图 6 所示。Z1 ~ Z8 为目标桩基，其中 Z1 ~ Z4 为靠近盾构隧道一侧的内排桩基，Z5 ~ Z8 为远离盾构隧道一侧的外排桩基。

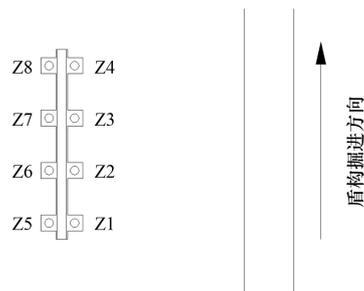


图 6 桩基编号

3.2.2 路基边坡坡角沉降

盾构掘进过程中路基边坡坡角沉降如图 5 所示。由图 5 可知：随着盾构隧道下穿施工的推进，高速公路路基边坡坡角 ($Y = -65.5 \text{ m}$) 沉降值逐渐增大，最大沉降值发生在盾构隧道中轴线的正上方，隧道贯通后最大沉降值为 4.2 mm。往两侧距离隧道中轴线的距离逐渐增大的过程中，坡角处

以有限元模型网格中 Z 轴正向为竖向位移正向， X 轴正向为水平位移正向。盾构隧道下穿施工完成后，桩基竖向位移如图 7 所示。由图 7 可知：桩基竖向位移的变化趋势基本相同，竖向位移值均为负值，均表现为沉降，受盾构掘进地层缺失影响，近侧桩基沉降均大于远侧桩基沉降，其中桩基 Z1 沉降值最大，达到 2.4 mm。此外，

桩端沉降略大于桩顶沉降, 主要由于盾构开挖过程中引起地层缺失, 桩身侧摩阻力降低, 桩端产生刺入变形, 端阻力增大; 而侧摩阻力的降低使得桩身相对于开挖前有伸长的趋势。

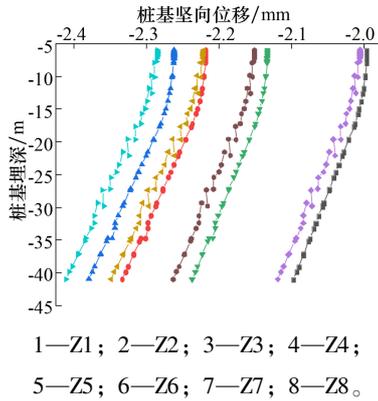


图 7 桩基竖向位移分布规律

3.4 桩基水平位移

盾构掘进对桩基水平位移影响规律如图 8 所示。由图 8 可知: 由于通道桥距离盾构较远(3.8 倍洞径), 盾构开挖施工对桩基水平位移的影响较小。盾构隧道埋深对应平面位置附近, 桩基水平位移值最大, 隧道埋深以下位置, 水平位移值逐渐减小。盾构掘进施工对内排桩水平位移的影响大于对外排桩的影响, 这是因为一方面内排桩距离盾构隧道更近, 另一方面内排桩对外侧土体位移的约束作用, 减小了盾构开挖对外排桩水平位移的影响。桩基 Z1 水平位移值最大, 为 0.37 mm; 外排桩桩基水平位移均表现为正值, 外排桩基中 Z5 水平位移最大, 为 0.27 mm。

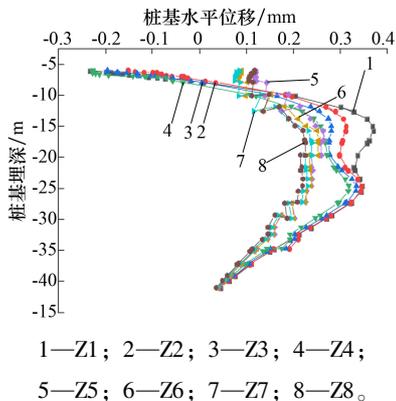


图 8 桩基水平位移

3.5 桩基弯矩增量分布规律

盾构掘进过程中桩基弯矩分布规律如图 9 所示。由图 9 可知: 内排桩与外排桩的弯矩大致呈

对称分布, 方向相反。盾构施工对内排桩的弯矩影响值大于外排桩, 内排桩弯矩的最大值大致出现在盾构隧道埋深平面位置附近。桩基 Z1 弯矩值最大, 达到 213.77 kN·m; 外排桩弯矩的最大值出现在桩基埋深为 12 m 对应位置, 桩基 Z8 弯矩值最大, 达到 175 kN·m。

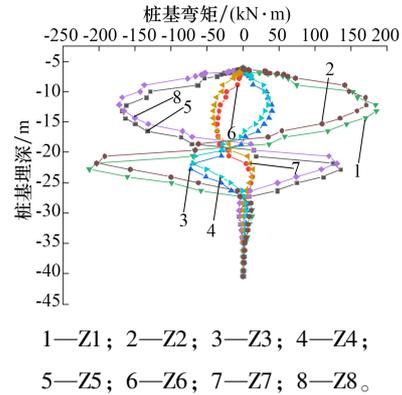


图 9 桩基弯矩

3.6 桩基轴力增量分布规律

图 10 为桩基轴力增量分布规律。由图 10 可知: 盾构掘进过程中各桩基轴力增量分布规律相似, 随着桩基与隧道距离的减小, 轴力增量逐渐增加。随着桩基埋深的增加, 轴力增量先增大后减小, 轴力的最大值分布在桩基埋深为 17 m 对应位置, 即盾构隧道埋深平面位置附近, 这与上述分析中桩端沉降大于桩顶沉降的规律一致; 同样, 研究发现, 桩基 Z1 轴力增量最大。

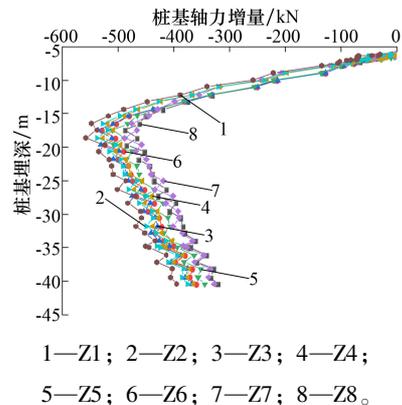


图 10 桩基轴力增量分布规律

4 结论

(1) 盾构下穿施工过程中, 隧道轴线正上方地表沉降值最大, 开挖完成时沉降值达到 5.6 mm。地表沉降总体上形成一个类似于正态分布的沉降

槽, 盾构开挖对地表沉降的影响范围大致为隧道直径的 4 倍。

(2) 路基最大沉降值发生在盾构隧道中轴线的正上方, 路肩位置处最大沉降值为 5 mm, 盾构下穿施工对通道桥桩基础沉降的影响程度约为 2.4 mm。

(3) 盾构开挖过程中引起地层缺失, 桩身侧摩阻力降低, 桩端产生刺入变形, 端阻力增大, 桩端竖向位移大于桩顶。隧道埋深位置附近, 桩基水平位移值最大, 埋深以下位置, 水平位移逐渐减小。

(4) 通道桥桩基内排桩与外排桩的弯矩大致呈对称分布, 方向相反, 弯矩的最大值出现在隧道埋深位置; 受盾构开挖影响, 通道桥桩基轴力增量的最大值分布在盾构隧道埋深平面位置附近。随着桩基与隧道距离的减小, 弯矩及轴力增大。

参考文献:

- [1] 王金华, 徐长节, 王玉林, 等. 盾构近距离侧穿桥梁及下穿公路变形规律与控制技术研究[J]. 公路, 2023, 68(1): 400 - 406.
- [2] 杨牧昀. 地铁盾构下穿高速公路路基段影响分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- [3] 梁禹, 范晓锋, 尹义豪, 等. 大直径盾构隧道超近距离侧穿桥桩变形分析及控制措施[J]. 铁道建筑, 2023, 63(9): 91 - 96.
- [4] 王乃勇. 双线盾构隧道斜交下穿对高速公路的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(32): 13919 - 13925.
- [5] 王治宇, 杨松松, 禹鹏飞, 等. 盾构隧道近接侧穿引起桥梁桩体的变形规律[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(9): 21 - 26; 32.
- [6] LU J, YU J H, ZHENG X, et al. Analysis of subgrade settlement in large-diameter-section curved shield tunnel undercrossing construction[C]//International Conference on Smart Transportation and City Engineering. Chongqing: SPIE, 2022.
- [7] 赵岩, 张海佳. 地铁盾构穿越高速公路桥台及路基案例研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(增刊 2): 90 - 95.
- [8] 谭贝. 双线盾构隧道下穿高速公路路基沉降影响研究[J]. 交通科技, 2021(2): 130 - 133.
- [9] 徐硕, 朱永全, 徐强, 等. 近距离侧穿高铁桥桩盾构施工影响规律及加固措施[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13545 - 13551.
- [10] 王丽, 郑刚. 盾构法开挖隧道对桩基础影响的有限元分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 704 - 712.
- [11] 王闯, 彭祖昭, 苟超, 等. 盾构近接下穿群桩基础施工影响分区研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(增刊 2): 174 - 181.
- [12] SONG S L, WU D X, WANG X R. Deformation analysis and risk control of pile foundation of subway shield tunnel crossing roads and bridges[C]// 2022 8th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering: Deep Space Intelligent Development and Utilization Forum. Piscataway: IEEE, 2022.