

盾构隧道下穿施工对既有高架桥影响数值分析

杨俊达

(中铁十八局集团市政工程有限公司, 广西 南宁 530033)

摘要: 以某轨道交通工程中盾构隧道下穿绕城高速高架桥为背景, 研究地铁盾构隧道下穿高架桥的影响。该工程中, 盾构隧道与桥桩最小水平净距仅 3.1~3.2 m。采用 FLAC3D 有限差分软件建立三维数值模型, 考虑了盾构机土仓压力、地层损失率、注浆压力和盾构机推力等因素, 模拟盾构隧道掘进施工过程; 分析了盾构隧道施工对高架桥桩基的水平位移影响, 以及盾构施工对桥面竖向沉降的影响; 对比研究了有无超前注浆加固两种情况下盾构施工对高架桥的影响差异。研究结果可为类似的盾构隧道下穿高架桥工程提供重要的参考和指导。

关键词: 盾构隧道; 下穿施工; 高架桥; 数值模拟; 注浆加固

中图分类号: U455.43; U231.3

文献标识码: A

Numerical Analysis of the Influence of Shield Tunnel Construction on Existing Viaducts

YANG Junda

(China Railway 18th Bureau Group Municipal Engineering Co., Ltd., Nanning 530333, Guangxi, China)

Abstract: The influence of shield tunnel underpassing viaduct is studied based on the background of shield tunnel underpassing viaduct in a rail transit project. In this project, the minimum horizontal distance between shield tunnel and bridge pile is only 3.1~3.2 m. The three-dimensional numerical model is established by using FLAC3D finite difference software in this study. The construction process of shield tunnel is simulated by considering the factors such as soil pressure, formation loss rate, grouting pressure and thrust of shield machine. The influence of shield tunnel construction on the horizontal displacement of viaduct pile foundation and the influence of shield construction on the vertical settlement of bridge deck are analyzed. The influence of shield construction on viaduct is compared and studied in two cases with or without advanced grouting reinforcement. The research results can provide important reference and guidance for similar shield tunnel undercrossing viaduct projects.

Key words: shield tunnel; underpass construction; viaduct; numerical simulation; grouting reinforcement

在城市地下空间开发过程中, 地铁隧道下穿既有建筑物和地下结构的情况越来越普遍。其中, 地铁盾构隧道下穿高架桥是一种典型且复杂的工程情况, 对高架桥结构的安全性和使用性能可能产生显著影响。因此, 深入研究盾构隧道下穿施工对既有高架桥的影响机理、评估方法和防护措施具有重要的理论意义和工程应用价值。

在此背景下, 国内外学者对地铁隧道盾构下穿既有高架桥桩面临的困难和挑战开展了研究。

研究认为, 盾构施工过程的地层损失是导致邻近高架桥桩基变形的主要原因, 地层损失会引起周围土体变形而导致桥桩变形, 尤其是盾尾通过时的地层损失对桥桩变形影响最大^[1]。此外, 盾构施工引起的地面变形累积效应、开挖面附加推力、盾构摩擦力、注浆压力和应力释放等也是影响邻近桩基变形的因素, Cao 等^[2]在考虑这些因素条件下, 基于 Mindlin 解和 Pasternak 地基梁理论推导了盾构测穿施工引起既有桩变形的理论预

收稿日期: 2024-09-18

作者简介: 杨俊达, 助理工程师, 大专, 研究方向为城市轨道交通地铁施工

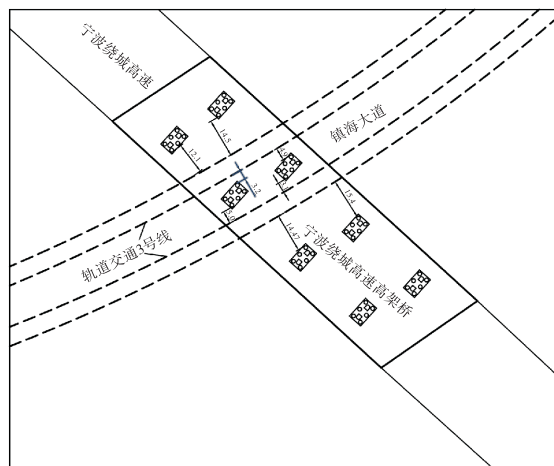
测方法,并通过现场监测、数值模拟验证了该方法可以合理预测盾构施工引起的桩体变形。盾构隧道施工对既有邻近桩基的影响具有空间差异性,盾构下穿施工引起邻近高架桥的桥体横断面差异沉降影响大于纵断面,当桩基位于隧道正上方时桥体沉降量最大^[3-4]。为了保障盾构下穿施工过程既有高架桥的安全及正常运营,姚虎成等^[5]在现有规范的基础上,认为下穿施工引起桥墩的累计沉降控制值应该在10~15 mm。可见,盾构下穿施工过程必须严格控制既有邻近桥桩的变形。因此,学者们提出了一系列既有高架桥的保护和变形控制技术方法,例如,李新星等^[6]针对盾构隧道近距离(1 m)下穿高架桩基的工程,证实了减小盾构推进过程中的地层损失率可以有效控制邻近桩体变形,利用高压旋喷注浆(MJS)加固高架桥桩基可以达到预期的保护效果;张庆等^[7-8]认为盾构参数对控制邻近桥桩变形及内力有一定的作用,但隔离桩对盾构施工引起邻近高铁桥桩基变形的控制效果更显著;卢洪强等^[9]认为软土地区采用桩板结构加固的办法可有效控制盾构施工上部既有高铁结构的变形;张桂彬^[10]分析得出气压辅助模式推进可以更好地控制桩基变形;刘夏临等^[11]研究得出袖阀管注浆结合隔离桩的预加固方案能很好地控制邻近桩基及桥墩的水平位移和沉降。

综上所述,盾构隧道下穿施工对既有高架桥的影响研究已取得了一定的进展,但针对双线盾构隧道斜穿高架桥桩基群的影响规律研究还不够全面,仍需要进一步揭示双盾构隧道先后斜穿施工对高架桥结构不同位置的影响规律;此外,利用盾构隧道施工过程超前注浆对既有桩基变形控制的方法还鲜有报道。因此,本文围绕以上需求进一步开展研究,旨在为此类盾构隧道近距离下穿高架桥工程的施工安全和变形控制添加丰富可靠的理论和技术支撑。

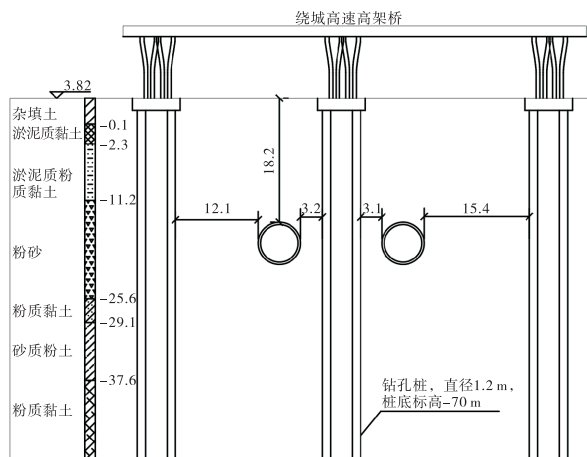
1 工程概况

本工程为某市轨道交通工程某区间段,地铁盾构隧道下穿绕城高速高架桥。绕城高速荷载等级为公路-I级,高架桥为双向六车道,设计速度为120 km/h;单向车道的桥面宽度为15.6 m,桥柱高度为8.5 m。盾构隧道穿越段高架桥采用直径1.2 m的钻孔灌注桩基础,每个墩台下设置4根长约72 m的钻孔桩。区间盾构隧道顶部埋深约18.2 m,盾构隧道内径为5.9 m,外径6.6 m,管片厚0.35 m,每环管片宽1.2 m。双盾构隧道

从高速公路高架桥桩基斜穿而过,桥桩和盾构隧道相对位置如图1所示。既有桥墩桩基与盾构隧道左线水平净距仅3.1 m,与盾构隧道右线(图1右侧的盾构隧道)水平净距仅3.2 m。绕城高速高架桥桩与盾构隧道的水平最小净距均小于0.5倍隧道直径。



(a) 平面图



单位: m

(b) 断面图

图1 盾构隧道下穿高架桥

穿越段地基土层自上而下为:杂填土、淤泥质黏土、淤泥质粉质黏土、粉砂、粉质黏土、砂质粉土、粉质黏土。盾构区间下穿绕城高速高架桥段主要穿越地层为粉砂、粉质黏土。为了减小盾构隧道穿越施工对邻近高架桥桩基及桥体的影响,下穿段盾构隧道掘进采用超前注浆管对前方及盾身外轮廓2.5 m范围内土体进行超前预加固,如图2(a)所示。

考虑到盾构施工的挤压作用和盾尾的空隙常常会引起地面的隆起与沉陷,盾构侧穿绕城高速高架桥时存在以下主要施工风险:盾构侧穿绕城

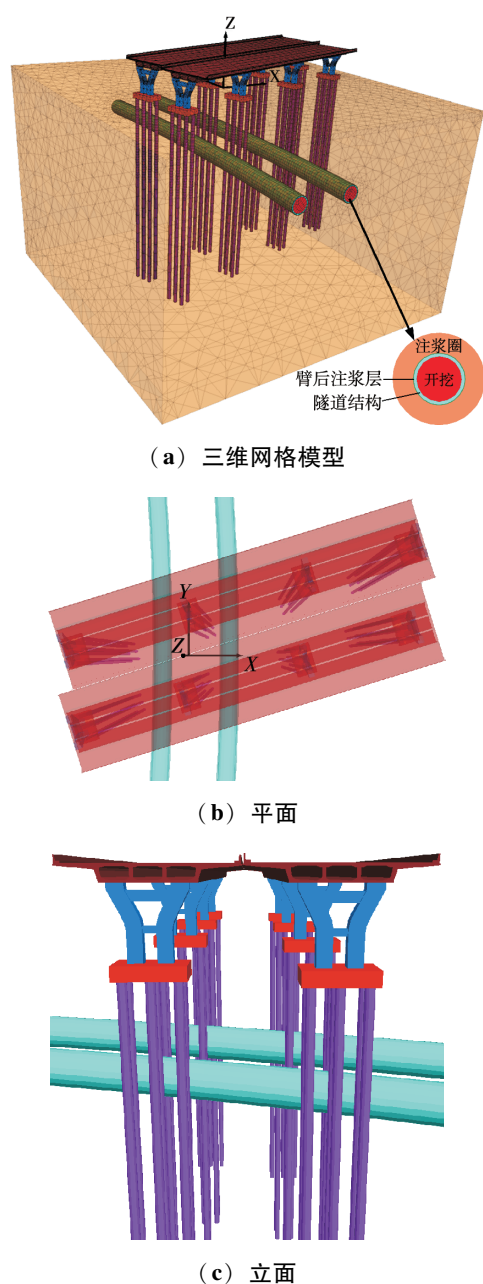


图 2 有限差分数值模型

高速高架桥段地层复杂，土体相对软弱，隧道采用盾构法施工，盾构设备距离桥桩水平距离较近，对桩端持力层地层产生一定扰动，造成上部桥梁结构失稳风险。模拟推进阶段取得的盾构推进参数对正式穿越施工起一定的指导作用。

2 盾构隧道下穿高架数值模型

2.1 有限差分三维数值模型

采用有限元差分软件 FLAC3D 进行数值模拟分析，盾构穿越高速高架桥的三维有限差分数值模型如图 2 所示，其中 X 轴为近似垂直隧道轴线水平方向、Y 轴为盾构隧道轴线水平方向、Z 为竖直向上。

模型尺寸根据隧道盾构施工对周围土体和建筑物的影响情况、数值模拟计算效率、网格精度确定。模型尺寸越大，边界条件对计算结果的影响越小；若模型尺寸太小，则边界效应越明显，边界条件对计算结果影响较大。模型越精细化，越接近实际情况，则模型网格和节点数越多，计算效率越低。根据有限元差分软件 FLAC3D 7.0 计算能力，隧道盾构施工影响范围及桩基或周围建筑分布情况合理选取模型尺寸。已有研究及工程实践证明，隧道盾构施工影响范围在其 3 ~ 5 倍洞径以内，该范围以外区域受盾构隧道施工的影响可以忽略。同时，为了减小边界对桩基变形的影响，模型深度取桩基底部以下约 15 ~ 20 m。综合考虑，本次数值模拟的三维数值模型尺寸为 130 m(长) × 130 m(宽) × 85 m(高)。三维数值模型网格类型为六面体和四面体实体单元结合，模型节点和单元数量分别为 18 万和 72 万。

盾构隧道及高架桥各结构尺寸与现场设计一致，图 2 中左侧隧道对应实际工程的左线隧道（见图 1）。盾构穿越高架下方施工过程中对盾构外轮廓 2.5 m 超前注浆加固，如图 2（a）隧道周围的注浆圈；盾构隧道壁后注浆层厚度为 8.5 cm，采用实体单元进行模拟。

为了分析盾构隧道开挖引起高架桥结构变形，主要监测数值模型中的桥墩桩基水平位移及桥面沉降。监测点如图 3 所示在距离盾构隧道最近的 4 根测桩布置深层水平位移监测点，在桥面对应桥墩支撑位置分别布置 6 个沉降监测点。

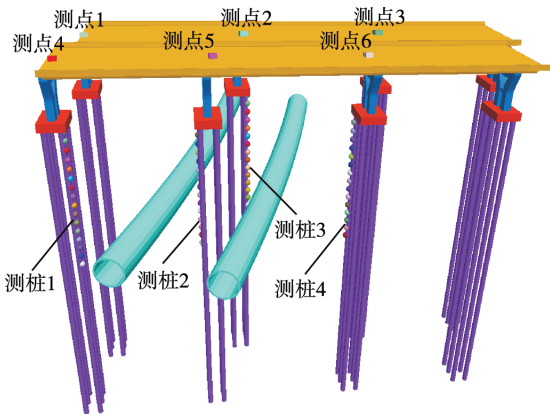


图 3 位移和沉降监测点

2.2 边界条件及计算参数

模型边界条件为：三维模型前后左右四个侧面采用滑动支座边界条件，约束其法向位移；模型底部边界为固定支座边界，约束 X、Y、Z 三个方向的位移，模型顶部为自由边界。数值模型中

土体的本构模型采用摩尔 - 库伦模型, 根据勘察报告中土工试验结果以及相关工程经验, 各土层及超前注浆加固体的数值模拟参数如表 1 所示。土体弹性模量采用回弹模量, 当没有回弹模量参考值时, 土的弹性模量取 3 倍压缩模量^[12]。盾构隧道管片、桩基及桥体的钢筋混凝土结构采用线弹性模型进行模拟, 各结构的具体参数见表 2。

表 1 土层及加固体物理力学参数取表

土层名称	弹性模量/MPa	泊松比	重度/(kN/m ³)	内摩擦角/°	黏聚力/kPa
杂填土	12	0.33	20.0	13	10.8
淤泥质黏土	11	0.35	16.8	5	7.6
淤泥质粉质黏土	9	0.35	18.1	6	6.4
粉砂	30	0.35	19.5	25	3
粉质黏土	14	0.35	18.2	8	10.2
砂质粉土	18	0.33	19.4	15	4
粉质黏土	16	0.35	18.6	10	14
注浆加固	12 000	0.25	2 000	30	80

表 2 结构材料物理力学参数表

名称	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN/m ³)
桥墩、桥体、桩	32	0.2	25
隧道	34.5	0.2	25

2.3 盾构施工过程模拟

本次数值计算主要模拟宁波轨道交通 3 号线下穿宁波绕城高速高架桥桥桩基的盾构施工过程, 分析盾构隧道施工对既有桩基及高架桥的影响, 数值模拟过程如下: ①初始地应力平衡, 设置边界条件及土体参数, 在自重条件下计算至平衡, 位移和速度清零; ②设置桩基和桥墩参数, 于桥面施加 20 kPa 面荷载, 模拟桥面等效汽车荷载, 计算至平衡, 位移和速度清零; ③根据盾构隧道施工方案, 先模拟左线盾构隧道开挖, 再模拟右线盾构隧道开挖。根据盾构掘进参数表, 盾构机土仓压力取 0.20 MPa, 通过面力施加在开挖面土体表面; 通过调整盾构开挖后管片按照时机实现地层体积损失模拟, 考虑不利情况及经验值, 地层损失率取值为 1%^[13]; 注浆压力取 0.3 MPa, 通过体力均匀施加在已安装的管片外侧的壁后注浆层, 指向圆形管片外法线方向; 盾构机推力取 8 000 kN, 换算成压力后均布施加在管片环端的截面上。为了提高计算效率, 主要考虑桩基边界 20 m 范围内盾构隧道施工对其影响, 该范围施工模拟采用按环开挖及施工; 桩基边界 20 m 范围外采用一次开挖施工。

3 盾构隧道施工对高架桥的影响分析

3.1 水平位移分析

盾构隧道周围无超前注浆加固情况下, 对盾

构隧道开挖引起高架桥的水平位移分析如下:

左线隧道开挖完毕后, 盾构隧道开挖引起的两侧桩基及桥体结构水平位移云图如图 4 所示, 盾构隧道开挖主要引起桩基水平位移, 桥墩及桥体的水平位移很小; 盾构隧道开挖引起两侧桩基向隧道水平位移, 桥墩桩基最大水平位移发生在盾构隧道洞身的深度范围, 距离隧道最近的桩体水平位移最大, 其最大水平位移 4 mm。此外, 离盾构隧道较远的桥墩桩基及桥体结构水平位移很小, 即受盾构隧道施工影响很小, 可忽略不计。

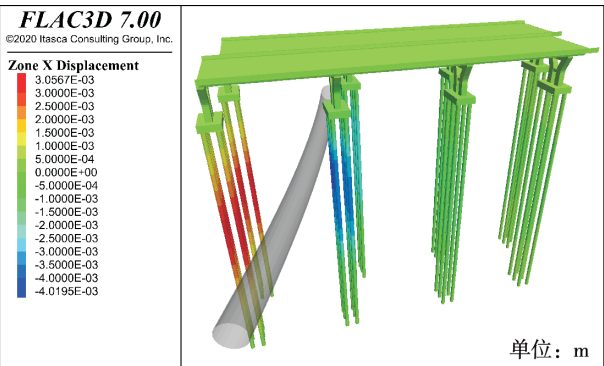


图 4 左线开挖后水平位移云图

右线盾构隧道开挖后, 高架桥桩基及桥体结构水平位移云图如图 5 所示, 右侧盾构隧道开挖同样引起两侧桩基向隧道水平位移, 隧道洞身附近桩体的水平位移比桥台及上部结构大, 桥台及其以上桥体结构水平位移甚微。两隧道间的桩基因两侧盾构隧道近似对称的开挖卸荷叠加作用的影响, 位移相互抵消导致其最终水平位移量很小。此情况下, 两隧道两侧的桩基水平位移较大, 最大水平位移发生在靠近右线盾构隧道最近的右侧桩基的隧道洞身附近, 最大水平位移为 4.7 mm。

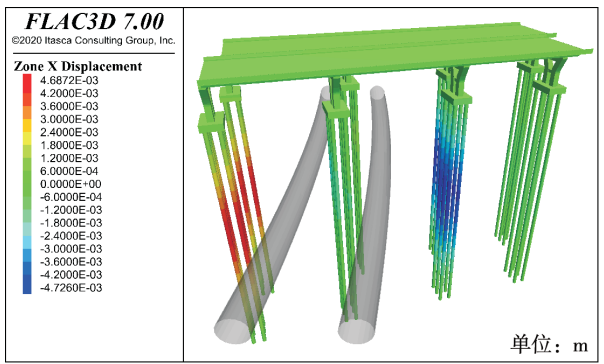


图 5 右线开挖后水平位移云图

3.2 沉降分析

左线隧道开挖后高架桥竖向位移云图如图 6 所示, 左侧盾构隧道施工主要引起其两侧桩基、桥台及两侧桩基间的桥面沉降, 其中桥面沉降最

大，桥面往下沉降逐渐减小，远侧的桩基及桥体结构竖向位移受影响甚微，可忽略不计。距离隧道最近的桩基沉降量最大，从而导致其对应的上部桥台及桥面沉降比其他区域大。桥体结构最大沉降发生在距离盾构隧道最近的桩基支撑的桥面，最大沉降量 2.7 mm。

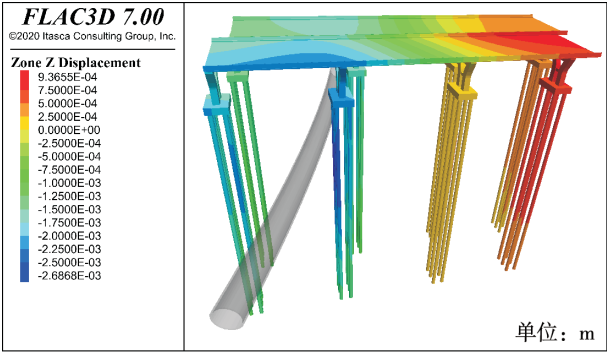


图6 左线开挖后竖向位移云图

右线隧道开挖后高架桥的竖向位移云图如图7所示。两盾构开挖主要引起两隧道中间及两侧的桩基沉降，导致桩基以上的桥台及桥面发生沉降。桥体结构沉降沿两隧道中间的断面呈近似对称分布，两盾构隧道中间的桩基因距离隧道最近以及同时受左、右线盾构隧道开挖的影响，所以两隧道中间的桩基及其上部桥体结构沉降最大。最大沉降发生在距离盾构隧道最近的桩基连接的上部桥面，最大沉降量 5.5 mm。

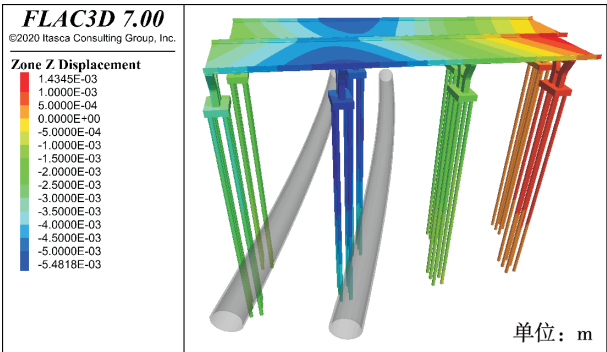


图7 右线开挖后竖向位移云图

由此可见，盾构隧道开挖引起其洞身附近的桩基水平位移最大，引起桥面的沉降最大。由于两隧道开挖卸荷叠加作用，两隧道之间的桩基隧道水平位移反而比两隧道两侧的桩基小；而两隧道之间的桩基支撑的上方桥面沉降最大。因此，隧道开挖应该重点关注距离隧道最近的桩基及其上方桥体结构的位移，双隧道开挖后应该重点关注两隧道两侧的桩基水平位移以及两隧道之间桩基上方前面的沉降。

3.3 超前注浆变形控制效果分析

为了讨论盾构隧道穿越高架桥桩基段进行超前注浆加固对既有高架桥变形的控制效果，图8给出了有无超前注浆加固情况下，两盾构隧道开挖后隧道之间及两侧的4根桩（见图3）的深层水平位移。

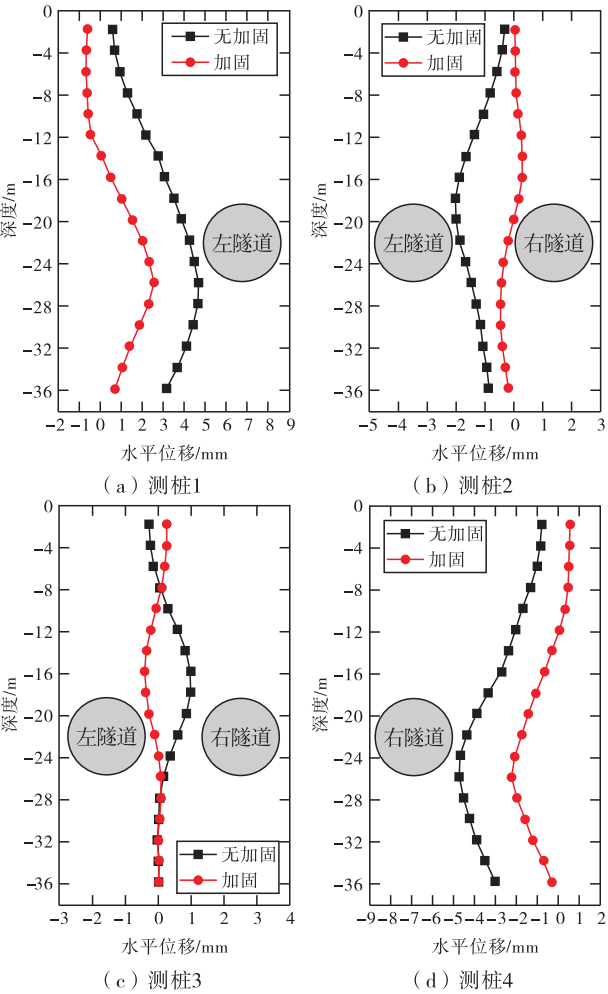


图8 桩基深层水平位移

图8 桩体深层水平位移曲线显示，由于测桩2和3受两隧道开挖共同影响，测桩1和4主要受单隧道施工的影响，两隧道两侧的测桩1和2的水平位移明显比两隧道之间的测桩3和4大。桩体沿其轴线向盾构隧道弯曲，桩基最大水平位移发生在隧道洞身附加；不同的是，两隧道两侧的测桩1和2的水平位移最大值发生在盾构隧道拱底深度处，两隧道之间的测桩3和4的水平位移最大值发生在盾构隧道拱顶深度处。这是因为距离隧道较近的桩基受盾构隧道开挖的土体体积损失引起的隧道上方土体沉降以及两侧土体向隧道平移的共同影响，距离隧道较远的桩基主要受隧道开挖卸荷引起的土体向隧道位移的影响。

超前注浆加固对盾构隧道开挖引起的桩基水平位移控制效果明显,超前注浆加固使测桩1的最大水平位移减小47% (由4.7 mm减小至2.5 mm);使测桩4的最大水平位移减小53% (由4.7 mm减小至2.2 mm)。

表3为有无超前注浆加固两种情况下,两盾构隧道开挖后桥台上方的桥面6个测点(见图3)最终沉降。表中数据显示,因两盾构隧道开挖影响叠加作用,两隧道间桩基连接的桥面的测点2和5沉降量最大;超前注浆加固情况下,盾构隧道开挖引起的测点2的沉降比无注浆加固情况减小37%;超前注浆加固情况下,盾构隧道开挖引起的测点5的沉降比无注浆加固情况减小36%。

表3 桥面测点最终沉降

加固情况	测点沉降/mm					
	1	2	3	4	5	6
加固	1.3	2.9	0.9	2.0	3.0	0.9
不加固	2.1	4.6	2.0	3.0	4.7	1.9

根据《公路桥涵地基与基础设计规范》(JTG 3363—2019)规定,相邻墩台间不均匀沉降差值(不包括施工中的沉降),不应使桥面形成大于2‰的附加纵坡;该规范没有明确高架桥的变形控制标准,相关研究认为高架桥的累计变形控制值应该在10~15 mm^[5]。表3中的桥面沉降及上文分析的桩体水平位移均未超过10 mm的控制值。绕城高速高架桥相邻墩台之间距离约30 m,由同一侧桥面测点在桥面纵向上的沉降差异计算出最大附加纵坡。无超前注浆加固情况下,相邻墩台间不均匀沉降差使桥面形成的最大附加纵坡为0.07‰;有超前注浆加固情况下,相邻墩台间不均匀沉降差使桥面形成的最大附加纵坡为0.09‰,均未超出规范值。由此可知,超前注浆加固对控制盾构隧道开挖引起的邻近高架桥变形有明显的控制效果,对桩基是水平位移控制效果比桥面的沉降好。

4 结论

本文通过建立三维有限差分模型,利用数值模拟结果分析了盾构隧道下穿高速公路高架桥的施工影响,得出以下主要结论:①盾构隧道开挖主要引起其洞身附近桩基的水平位移,最大位移发生在隧道洞身深度范围。桥面沉降最大,沉降量从桥面向下逐渐减小。双线隧道施工后,两隧道之间的桩基因位移相互抵消,水平位移较小。两隧道之间桩基上方的桥面沉降最大,原因是受

到两侧隧道开挖的叠加影响。②单隧道开挖时,应重点关注距离隧道最近的桩基及其上方桥体结构的位移;双隧道开挖后,应重点关注两隧道两侧的桩基水平位移以及两隧道之间桩基上方桥面的沉降。③超前注浆加固显著减小了盾构施工引起的高架桥变形,桩基最大水平位移减小47%~53%,桥面最大沉降减小36%~37%。④不采取超前注浆加固时,盾构施工引起的相邻墩台间不均匀沉降差使桥面形成的最大附加纵坡为0.07‰;采取超前注浆加固后,最大附加纵坡为0.09‰,两种情况均未超出规范规定的2‰限值。但考虑到超前注浆加固的显著效果,建议在类似工程中采用此措施以进一步保证工程安全。

参考文献:

- [1]袁海平,王斌,朱大勇,等.盾构近距离侧穿高架桥桩的施工力学行为研究[J].岩石力学与工程学报,2014,33(7):1457-1464.
- [2]CAO K, CHEN M, ZHANG M, et al. Calculation method for the response changes of existing bridge piles caused by side penetration of shield tunnels considering construction factors and cumulative impact of excavation[J]. Computers and geotechnics, 2024, 172: 106472.
- [3]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.
- [4]殷建.盾构隧道下穿高速公路桥梁安全风险研究[J].土工基础, 2021, 35(6): 737-740.
- [5]姚虎成,郭振坤,刘观仕.地下通道施工邻近高架桥桥墩变形控制标准探讨[J].土工基础, 2015, 29(1): 70-73.
- [6]李新星,杨志豪.盾构近距离穿越高架桩基的施工影响与保护措施[J].岩土力学, 2015, 36(S1): 537-541.
- [7]张庆,甄文战,封坤.大直径盾构隧道下穿既有高速公路桥涵影响分析[J].现代隧道技术, 2024, 61(1): 137-145.
- [8]刘喆,何平,张安琪,等.盾构隧道施工过程及支护方式对高速铁路高架桥群桩基础影响分析[J].工程力学, 2016, 33(S1): 219-226.
- [9]卢洪强,陈典华,牟晶,等.软土区盾构隧道下穿施工对在建高铁的影响研究[J].广东交通职业技术学院学报, 2024, 23(2): 52-58.
- [10]张桂彬.复合地层盾构下穿高架桩基施工安全控制研究[J].建筑安全, 2021, 36(4): 26-29.
- [11]刘夏临,张军,陈必光,等.盾构隧道下穿城市高架桥桩基预加固方案研究[J].现代隧道技术, 2021, 58(6): 218-224.
- [12]杨敏,赵锡宏.分层土中的单桩分析法[J].同济大学学报, 1992, 20(4): 421-428.
- [13]魏纲.盾构隧道施工引起的土体损失率取值及分布研究[J].岩土工程学报, 2010, 32(9): 1354-1361.