

文章编号:1673-9469(2021)03-0055-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2021.03.008

双线盾构隧道侧穿既有桥桩影响分析及加固优化

丰土根¹,况梦祥¹,沈正伟¹,张箭^{1*},张彦红²

(1.河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室,江苏南京210098;

2.中铁(上海)投资集团有限公司,上海200126)

摘要:依托广州地铁八号线盾构隧道侧穿华南快速高架桥桩基工程,分别对有无隔离桩支护桥桩的情况建立了有限元数值模型,研究了加固前后地表沉降、桥桩附加轴力、附加弯矩和桩身位移的变化并开展了加固优化设计。结果表明:隔离桩可有效减小既有桥桩垂直于掘进方向的桩顶位移,由于隔离桩的牵引作用,对于桥桩中部位移基本无削减作用,甚至极小地加大其水平位移;隔离桩基本消除平行于掘进方向的桥桩水平位移,对既有桥桩存在一定的遮蔽作用;隔离桩大幅减小了桥桩的附加轴力,大幅减小桥桩垂直盾构方向附加弯矩,对平行盾构方向附加弯矩基本无影响;适当提高隔离桩桩径以及隔离桩与桥桩之间的距离可以有效减小地表沉降,建议将隔离桩设置在离隧道净距为6~8 m内,既能满足规范要求的安全净距,也能较大限度保护既有桥桩。

关键词:盾构隧道;侧穿桥桩;数值计算;隔离桩;加固优化

中图分类号:U455.43;U443.15

文献标识码:A

Analysis of Influence of Double-track Shield Tunnel Side-crossing Existing Bridge Piles and Optimization of Bridge Pile Reinforcement

FENG Tugen¹, KUANG Mengxiang¹, SHEN Zhengwei¹, ZHANG Jian^{1*}, ZHANG Yanhong²

(1. Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics and Dyke Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. China Railway (Shanghai) Investment Group Co., Ltd., Shanghai 200126, China)

Abstract: Relying on the Guangzhou Metro Line 8 shield tunnel side-crossing the Huanan Express Viaduct pile project, and considering the situation of bridge piles with and without isolation piles, the finite element numerical model was established to study the ground settlement before and after reinforcement, the changes in additional axial force and bending moment of bridge piles, and the pile displacement. Then reinforcement optimization design was carried out. The results show that the isolation piles can effectively reduce the pile top displacement of existing bridge piles perpendicular to the driving direction. Due to the traction effect of the isolation piles, there is basically no reduction in the displacement of the middle of the bridge piles, and even a very small increase in the horizontal displacement. The isolation piles, which have a certain shielding effect on existing bridge piles, basically eliminate the horizontal displacement of bridge piles parallel to the driving direction. The isolation piles greatly reduce the additional axial force of the bridge piles, greatly reduce the additional bending moment of the bridge piles in the vertical shield direction, and basically have no effect on the additional bending moment in the parallel shield direction. Properly increasing the diameter of the isolation pile and the distance between the isolation pile and the bridge pile can effectively reduce ground settlement. It is recommended to set the

收稿日期:2021-06-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51808193);中央高校基本科研业务费资助项目(2019B07914)

作者简介:丰土根(1975-),男,浙江金华人,博士,教授,主要从事土动力学与工程抗震、深海岩土工程、地下空间开发、软土地基处理、基坑工程、边坡工程方向研究。

* 通讯作者:张箭(1989-),男,安徽芜湖人,博士,副教授,主要从事隧道与地下工程、环境岩土工程、海洋岩土工程方向研究。

isolation piles within 6 to 8 m away from the tunnel, so as to meet the safety net distance required by the specification and to protect the existing bridge piles to a greater extent.

Key words: shield tunnel; side-crossing bridge piles; numerical calculation; isolation piles; reinforcement optimization

城市中的地铁隧道在施工过程中,不可避免地会从各个既有桥梁建筑物桥桩基础的侧面或者下部等位置穿越,并且隧道掘进施工过程中会对隧道周边的土体产生不同程度上的扰动。当土体的位移场作用于桥桩基础上时就会使邻近的桩基产生内力和附加变形,对桩和桥梁上部结构产生不利的影响,当沉降量过大或者桥梁产生不均匀沉降,将严重威胁到桥梁上部主体结构的寿命和它的正常使用。对高架桥桥桩及上部结构进行安全稳定性分析,并计算工程施工的变形值从而指导现场施工采取合理的安全措施,对盾构隧道建设的安全顺利推进和确保桥梁的后续健康使用是十分必要的。目前,国内外研究盾构隧道下穿桥桩的影响已经取得较多成果^[1-15]。比如,李永盛等^[1-4]研究了盾构隧道开挖给地层和桥桩产生的影响规律;李早等^[5-6]基于两阶段法,分析了盾构开挖施工过程中桥桩的变形和内力的变化并建立出了相应的公式;刘喆等^[8-10]利用有限元模拟,分析不同支护方式及施工方法对群桩的影响,并分析了单桩与群桩的受力影响的区别。但是研究成果主要涉及了隧道施工对近邻桩基和土体的内力与变形的影响规律,及其对隔离桩加固后桩基的受力和位移等方面的影响。对于隧道开挖前后通过有无隔离桩支护的原有桩体水平位移和轴力变化缺少更具体的研究。

本文结合广州地铁8号线延长线下穿华南快速路高架桥工程实际,采用三维有限元模型计算研究了盾构法隧道下穿该高架桥工程过程中产生的地表变形规律,分析了下穿过程中对有无隔离桩的邻近桥梁桩基的变形和内力影响,并对桥桩的隔离桩加固进行了优化设计,可以为今后类似工程提供参考经验。

1 工程概况

广州地铁八号线北延段岗站—白云湖站区间隧道垂直下穿华南快高架桥桩下穿段长度约68.0 m,桥梁跨度长约25 m,桥身距地面高约9.0 m,主线及右幅加宽部分承台尺寸为2.5 m × 2.5 m,高0.15 m,基础是直径为1 500 mm 钻孔桩桩基;左幅加宽部分承台尺寸为2.8 m × 2.8 m,高

0.2 m,基础为直径为1 800 mm 钻孔桩桩基,钻孔桩均入岩,入岩深度为0~3 m。为了控制盾构下穿对桥桩的影响,对靠近隧道的桩基增加加固措施,隔离桩至灰岩层。盾构隧道埋深约12 m,隧道管片外径6.0 m,管片宽度1.5 m,管片厚度300 mm,华南快速立交桥桥桩桩长约为18.5 m,隧道底部高出桩底约4.86 m。隧道与快速路在水平方向投影有小夹角,左线隧道与中心桥桩距离6.58~10.87 m,属侧穿情况。示意图如图1所示。

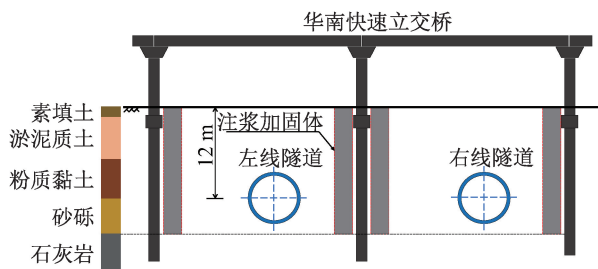


图1 盾构隧道下穿桥桩示意图

Fig. 1 Schematic diagram of shield tunnel underpass bridge pile

2 数值模拟

2.1 模型建立及参数选取

综合考虑精度和边界效应,模型范围沿盾构掘进方向取值36 m,横向尺寸取100 m,深度方向取值36 m,满足3~7倍隧道洞径范围要求。利用Abaqus有限元分析软件建立桩、土、盾构相互作用的三维模型,土体采用Mohr-Coulomb弹塑性本构模型进行计算,盾壳、衬砌、注浆层为理想线弹性模型,所有的部件均采用C3D8R实体单元。设定桥桩和隔离桩的桩端与岩土层绑定以防其脱离,桩侧与土体采用面接触,盾构与土体也采用绑定设置,默认两者不发生滑移。桥梁上部结构及荷载均采用等效荷载替代法来计算,每根桩的桩顶施加400 kPa的压力,土仓压力值为200 kPa,注浆压力0.22 MPa。

在土体的底部施加X、Y、Z三个方向的位移约束,垂直盾构隧道掘进方向为X方向,平行盾构隧道掘进方向为Y方向,竖直方向为Z方向。在平行掘进方向的土体边缘面施加Y方向的约束,在垂直掘进方向的土体侧边缘施加X方向的约束,顶部土体视为自由面。三维模型如图2所示。

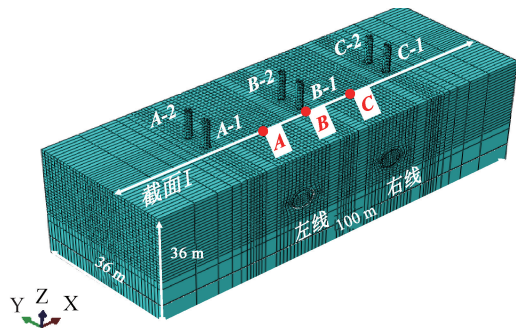


图 2 三维数值模型

Fig. 2 Three-dimensional numerical model

模型中桥桩自左向右编号为 A-1、A-2、B-1、B-2、C-1、C-2, 隧道左线与桥桩中线上方标号为 A 点, 隧道中间与桥桩中线上方标号为 B 点, 隧道右线与桥桩中线上方标号为 C 点。根据地勘报告的资料, 地层以及地下结构物参数详见表 1。

2.2 工况说明

根据实际施工步骤, 先行开挖左线隧道, 再开挖右线后行隧道。考虑桥梁结构建成时间已久, 将桥梁结构与土体一起做地应力平衡。局部模型示意图如图 3 所示, 左右隧道模型段分为六段开挖, 每一段开挖分为三个阶段: 开挖、拼装、硬化。在第一段开挖的第一阶段完成后进行拼装和下一段的开挖, 拼装结束后进行第一阶段的硬化、第二段的拼装和第三段开挖, 依次逐步推进。

主要计算步骤为:

- (1) 将开挖土体的模量软化 50%, 用以模拟应力释放;
- (2) 杀死土并激活盾构, 加上土仓力用来模拟刀盘对开挖面土体的支护力;
- (3) 在第二块开挖区实行步骤(1)、(2)后, 在第一个开挖区域杀死盾构及土仓力, 激活并赋予

泥浆层和衬砌的新的模量参数, 施加注浆压力;

- (4) 赋予泥浆层新的模量, 用于模拟泥浆层的硬化。

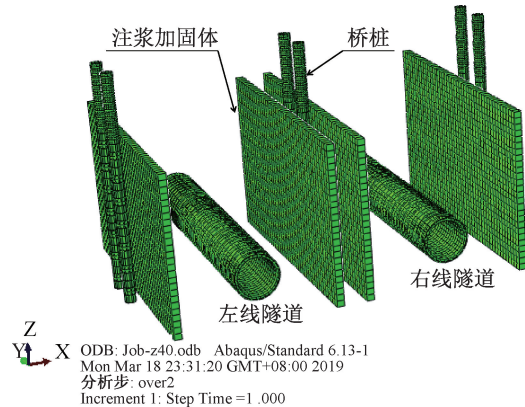


图 3 局部模型示意图 (有隔离桩)

Fig. 3 Schematic diagram of partial model (with isolation piles)

左线开挖完成后和右线开挖完成后的各项数据影响曲线, 分别取左右线盾构通过前、通过中、通过后、单线泥浆全部硬化完成后四步, 故两线共八步。

2.3 模拟方案验证

根据王国富等^[10]人的研究结论建立有限元模型并进行分析。关于地表沉降, 本文选取该文献中的无桥桩和工况 8 (隔离墙加固) 进行分析对比; 关于桩顶沉降和桩顶水平位移, 本文选取其工况 8 (隔离墙加固) 进行对比分析; 关于桥桩桩身水平位移, 本文选取其 1、2 号桩基的工况 8 进行对比分析, 分析比对结果如表 2。

验证结果与原文的结果基本趋向一致, 与原文的数值差值基本控制在 15% 以内, 考虑到计算误差以及工程经验可以认为, 采用本文编制的模型对盾构隧道施工侧穿有隔离桩保护的桥桩进行模拟分析是可行有效的。

表 1 地层及结构物参数

Tab. 1 Stratum and structure parameters

土层	天然重度/(kN·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	泊松比	弹性模量/MPa
素填土	18.4	—	—	0.30	20
淤泥质土	13.0	13.9	18.20	0.38	10.5
粉质黏土	18.0	15.7	26.40	0.31	19.1
砾砂	19.5	40.0	0.01	0.33	60
石灰岩	28.0	—	—	0.22	1×10 ⁴
衬砌	25.0	—	—	0.20	3.45×10 ⁴
泥浆层	20.0	—	—	0.20	5/100(硬化前/后)
盾壳	78.0	—	—	0.25	1.4×10 ⁷
桥桩	25.0	—	—	0.20	2.8×10 ⁴
隔离桩	22.0	—	—	0.20	2×10 ³

表2 模型结果对比分析结果

Tab. 2 Comparison of model results and analysis results

模型	地表沉降/mm		桩身水平位移/mm		桩顶沉降/mm	桩顶水平位移/mm
	无桥桩	工况 8	1号桩基	2号桩基		
原文	7.80	6.60	-1.24	-1.30	-6.75	-1.10
验证	7.35	7.60	-1.45	-1.39	-6.37	-0.85

3 计算结果分析

3.1 地表沉降

在有、无隔离桩支护条件下,左右线隧道施工结束后地表沉降如图4所示。当无隔离桩支护时,左线开挖完成后,截面I最大沉降值为5.0 mm;右线隧道开挖完成后,沉降槽曲线由“U”型转变为“W”型,两条隧道的沉降曲线叠加范围小,两条隧道对称轴处的地表沉降值为0.9 mm,且右线地表沉降达到4.6 mm,右线施工全过程基本处于“双峰”的形状。盾构施工对土体的影响范围在隧道中心线的18 m左右,盾构影响地表沉降范围约为3倍盾构直径,可以证明本文对桥桩数量的选取和建模的尺寸以及参数的选取是在合理范围内的。

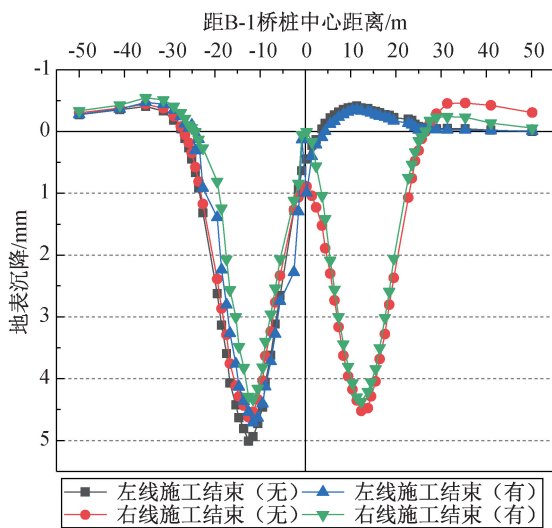


图4 有无隔离桩施工结束地表沉降图

Fig. 4 Surface settlement map after construction with or without isolation piles

有隔离桩支护时,沉降曲线基本与无隔离桩一致,说明隔离桩的存在并不能改变地层的沉降趋势。但是左线开挖完成后,截面I最大沉降值为4.7 mm,两条隧道对称轴处的地表沉降值为0.17 mm,且右线地表沉降为4.3 mm,说明隔离桩对土体的反作用力使得土体沉降的趋势一定幅度减小。有隔离桩存在时,外侧的土体沉降值由无

隔离桩时的0.8 mm减小到0.3 mm,削减比例达到60%左右,而沉降槽中心的最大沉降值也由5.0 mm减小到4.7 mm。

不论有无隔离桩,A点和B点在盾构开挖阶段的沉降曲线趋于一致,如图5。在盾构通过及离开时产生的沉降占总沉降量的70%以上。说明盾构时产生的沉降占总沉降量的70%以上。说明盾构开挖的过程中,盾构机所引起的沉降主要集中在盾构通过相应地层和盾尾脱离的阶段,最后是由于土体的固结所带来的沉降。有隔离桩存在时,B点处的位移趋于0,是因为隔离桩的弹模远大于土体,且隔离桩的桩端在岩石层上,土体向下位移时对桩产生的负摩阻力不足以让桩产生大变形。隔离桩的存在使得沉降曲线整体朝上移动,相应的减少了地表的沉降,对桥桩起到了一定程度上的保护作用。

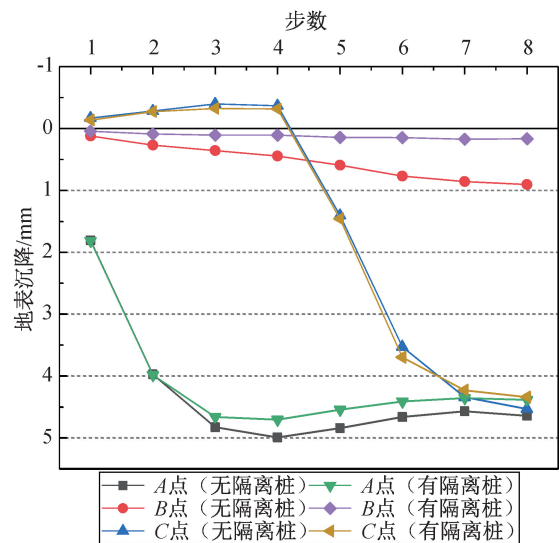


图5 截面I地表随掘进阶段沉降图

Fig. 5 Settlement map of section I surface along with excavation stage

3.2 桥桩影响分析

由于桥桩钻孔深入岩层之中,尤其还添加了作用在岩层上属于端承桩的隔离桩对桥桩进行保护,因此竖向的沉降量极小。考虑到该工程盾构施工下穿邻近桥桩时对桥桩产生的竖向沉降影响极小,故对桩顶沉降不作具体分析。

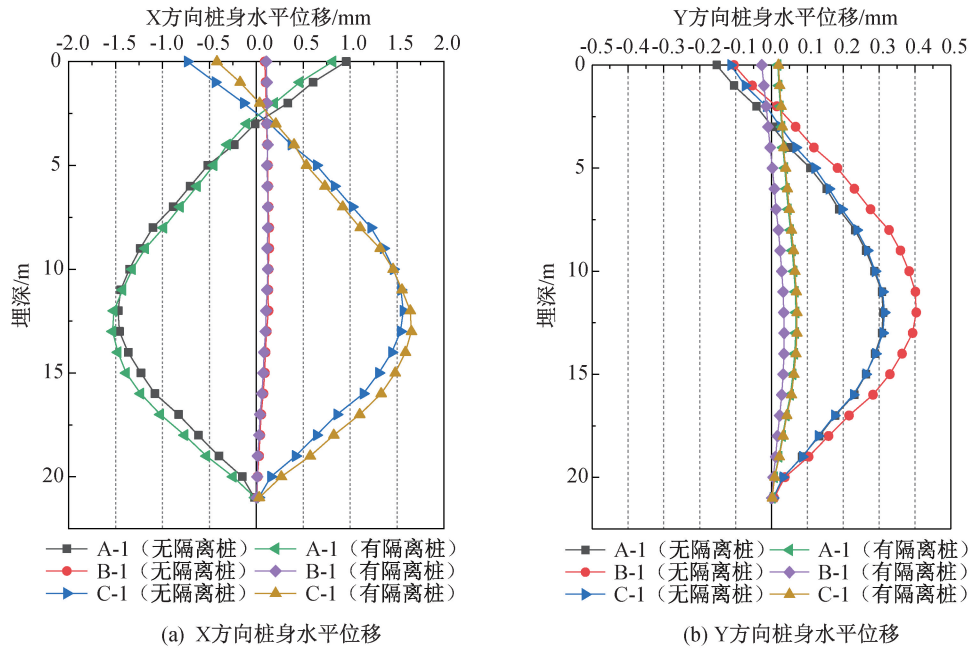


图 6 有无隔离桩时桩身水平位移

Fig. 6 Horizontal displacement of pile with or without isolation pile

3.2.1 桩身水平位移

左右线隧道掘进结束后桩身水平位移如图 6 所示。隧道掘进过程中,由于隧道掘进带来了地层损失,土体应力释放后土体向盾构中心位移,桩体也随之位移。桩端由于是嵌固在岩石层当中,模拟中将桩端与灰岩层绑定,隧道开挖带来的水平位移接近于 0。无论有无隔离桩时,桥桩发生最大位移都在 12 m 左右,即接近隧道开挖中心深度。

考虑有无隔离桩时桥桩 X 方向水平位移的比较,如图 6(a),无隔离桩时桥桩桩顶的最大水平位移分别为 0.95、-0.73 mm,有隔离桩时桥桩桩顶的最大水平位移分别为 0.81、-0.42 mm,隔离桩的施加使得桩顶的 X 方向水平方向的最大位移平均减少 17%;桥桩中部和桩端的水平位移基本不变,甚至有变大的趋势,这是由于隔离桩对土体的牵引作用。因为右线的开挖对地层的扰动部分抵消了左线扰动带来的对桥桩的影响。监测报告中的桩顶 X 方向水平位移值为 1.61 mm,模型的计算结果与广州地铁 8 号线最终监测报告中的水平位移相接近。

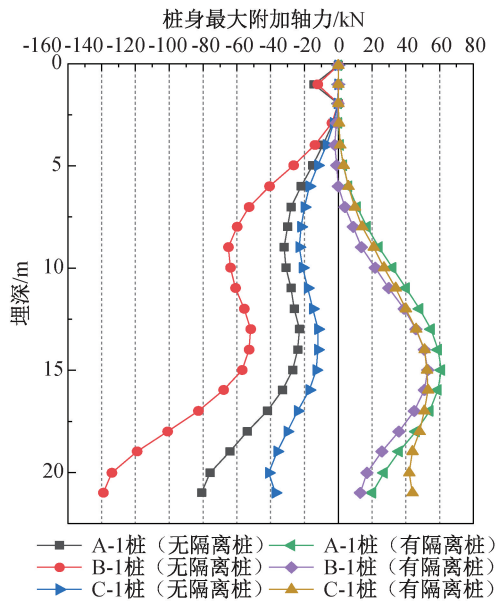
考虑有无隔离桩时桥桩 Y 方向水平位移的比较,如图 6(b),在盾构掘进的过程中,盾构刀盘对前方土体施加一个顶推力以及盾壳与周围土体的摩擦力的作用下,使得平行与盾构掘进方向的土体发生移动,移动的土体随之作用于桩身,使得桥桩发生相应的位移。在无隔离桩时,桩顶的最大

位移位于桥桩 A-1,位移值为 0.4 mm;在有隔离桩时,桩顶最大位移值位于桥桩 A-1,位移值小于 0.1 mm。这说明隔离桩的存在大大减弱了盾构掘进时引起的平行于掘进方向的桥桩横向位移。

3.2.2 桩身附加轴力

如图 7 所示,当无隔离桩支护时,桥桩附加轴力呈现“S”型变化,并随着掘进的进程趋势愈发明显。盾构开挖时的地层损失引起隧道上部地层发生向下的位移,土体与桩基发生相互作用,增大桥桩的负摩阻力,引起桥桩的附加轴力增大,桩身上部附加轴力最大增量出现在 A-1 埋深约 9 m 处,值为 70 kN。在隧道中心水平面上,因管片变形引起土体向隧道外侧位移并向上、下扩散,隧道中心线附近土体位移与地层损失引起的土体位移部分抵消从而引起桥桩正摩阻力增大,附加轴力减小,最大减小值为 20 kN,出现在 A-1 桥桩上埋深约 13 m 处。隧道中心线以下土体则是持续加大位移,桩身附加轴力持续增大,最大值可以达到 140 kN。

当有隔离桩支护时,桩身轴力出现反“C”型变化,隔离桩的存在基本消除了盾构开挖时地层损失对桩身附加轴力的影响,这一现象与因隔离桩的存在减小了桥桩一侧土体沉降相吻合。正由于管片变形引起土体向隧道中心线外侧挤压及其扩散作用,导致隧道中心线上侧桥桩的正摩阻力增大,中心线下侧桥桩的负摩阻力增大。隔离桩的存在可以减少桥桩附加轴力极值达 60%。



注:图中负值代表桩身附加轴力增加,正值代表桩身轴力减少。

图7 截面 I 各桩身最大附加轴力图

Fig. 7 Maximum additional axial force diagram of each pile in section I

3.2.3 桩身附加弯矩

桥桩与土体相接触,桥桩通过自身附加变形的形式吸收部分由盾构施工引起的底层损失而释放土体应力,从而导致桥桩自身的内力的相应变化。图8为有无隔离桩时各桩身在 X、Y 方向上的最大附加弯矩图。

由图8(a)可知,无隔离桩时,X方向桩身附加弯矩呈反“C”字型分布,这是由于桩端受到岩石层

的约束,而桩端模拟为自由端所导致的,X方向附加弯矩峰值出现在 B-1 桩的隧道中心线以及桩端,分别为 71、-115 kN·m。隔离桩的存在大大削减了垂直盾构方向桥桩附加弯矩的变化,由于 B-1 两侧都有隔离桩的存在,垂直盾构方向的弯矩值削减到 8、-14 kN·m,达到 85%。A-1 和 C-1 的 X 方向桩身最大附加弯矩减小幅度也达到了 75%左右。

由图8(b)可知,A-1 桩身 Y 方向附加弯矩呈反“C”字型分布,而 B-1, C-1 为“C”字型分布,这是因为 A-1 桩身挠度方向与其他两桩身相反。由图可以看出隔离桩的存在对于平行盾构方向的弯矩基本没有影响,符合实际情况。

4 加固优化设计

由前面的分析结果可知,盾构隧道下穿施工对周围土层会产生一定程度的扰动并影响桥桩桩身位移及内力变形,从而会给桥桩上部结构的正常使用带来不利影响。为降低不利影响,优化施工参数,本文以地表沉降及 X 方向桥桩水平位移作为影响控制指标,研究左线开挖过程不同隔离桩与桥桩间距 L、桩身直径 d 情况下盾构隧道开挖对土层及桥桩的影响。

4.1 不同隔离桩与桥桩间距

为了解隔离桩与桥桩之间的相对位置变化引起的不同影响,选取间距 L 为 0.75D、2D、3D 三种工况进行分析。D 为当前既有桩基的桩径,隔离桩

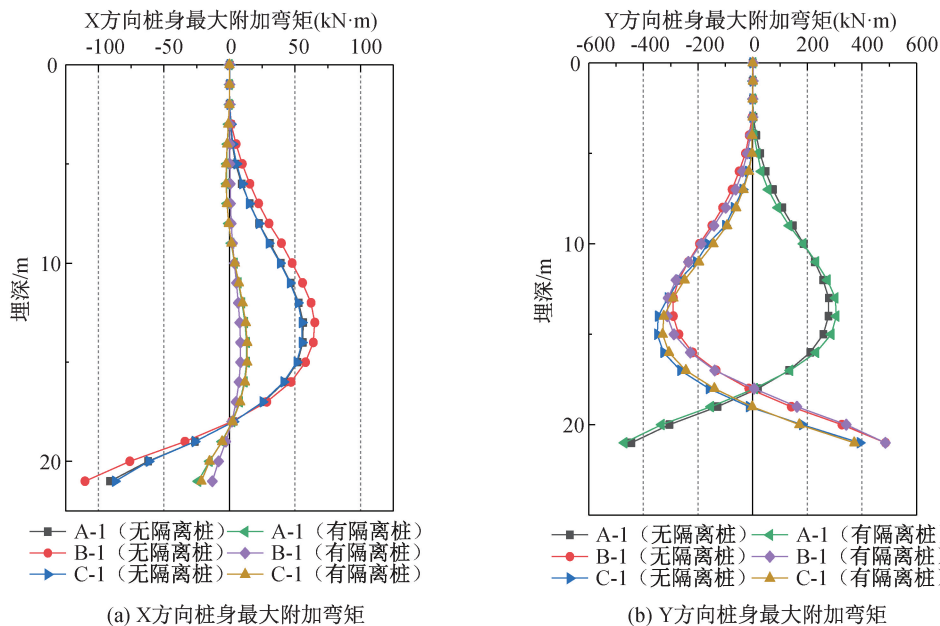


图8 截面 I 各桩身最大附加弯矩图 Fig. 8 Maximum additional bending moment diagram of each pile in section I

与隧道间距保证大于规范规定的安全间距 6 m, 即隧道直径。

由图 9 可知, 随着隔离桩与桥桩的间距增大, 地表最大沉降值逐步减小。当 L 为 $0.75D$ 时, 地表沉降峰值为 4.7 mm, 当 L 为 $2D$ 时, 地表沉降峰值为 4.4 mm, 当 L 为 $3D$ 时, 地表沉降峰值为 3.7 mm。对比 $L=0.75D$ 的工况, 当 $L=3D$ 时, 地表沉降削减幅度可以达到 20%。

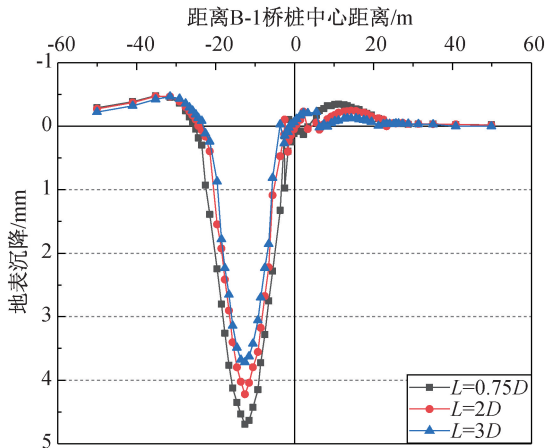


图 9 隔离桩与桥桩不同间距时地表沉降图

Fig. 9 Surface settlement diagram with different spacing between isolated piles and bridge piles

由图 10 可知, 随着间距 L 的增加, 既有桥桩桩身上部及桩身中部的水平位移有较明显减小。对比 $L=0.75D$ 的工况, 当 $L=3D$ 时, A-1 桩身上部水平位移削减 41%, 桩身中部水平位移削减 14%; B-1 桩身上部水平位移削减 73%, 桩身中部水平位移削减 13%。因此随着既有桥桩与隔离桩之间间距的增加, 可以大幅度地减少桩身上部的水平位移, 小幅度地减少桩身中部的水平位移。故适当增大隔离桩与桥桩间距, 控制隔离桩与隧道间距在 6~8 m 时, 对减小桩身水平位移有较大帮助。

4.2 不同隔离桩直径

为研究隔离桩在不同直径工况下的不同影响, 选取间距 d 为 1、1.5、2 m 三种工况进行分析。

由图 11 可知, 当 $d=1$ m 时, 地表沉降峰值为 4.7 mm, 当 $d=1.5$ m 时, 地表沉降峰值为 4.1 mm, 当 $d=2$ m 时, 地表沉降峰值为 3.6 mm。对比 $d=1$ m 的工况, 当 $d=2$ m 时, 地表沉降削减幅度达到 23%。随着隔离桩的自身桩径的增大, 有效地降低了地表沉降值。

隔离桩桩身直径 d 的变化对于桥桩桩身水平

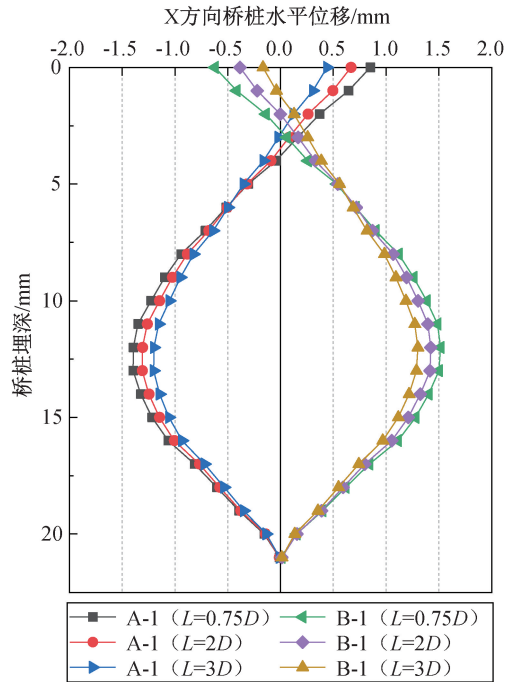


图 10 不同桩间距时 X 方向桥桩水平位移

Fig. 10 Horizontal displacement of bridge piles in X direction at different pile spacing

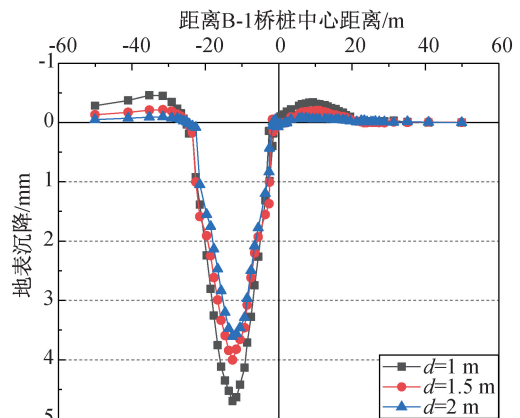


图 11 不同隔离桩直径工况下地表沉降图

Fig. 11 Surface settlement diagrams under different isolation pile diameters

位移的整体趋势仍然呈现“C”字型, 桩径的增大也意味着隔离桩刚度的增大。

由图 12 可知, 随着间距 d 的增加, 既有桥桩桩身上部及桩身中部的水平位移明显减小。对比 $d=1$ m 的工况, 当 $d=2$ m 时, A-1 桩身上部水平位移绝对值削减 90%, 桩身中部水平位移削减 70%; B-1 桩身上部水平位移绝对值削减 70%, 桩身中部水平位移削减 77%。随着隔离桩直径的增加, 可以大幅度地减少桩身上部及桩身中部的 X 方向水平位移。

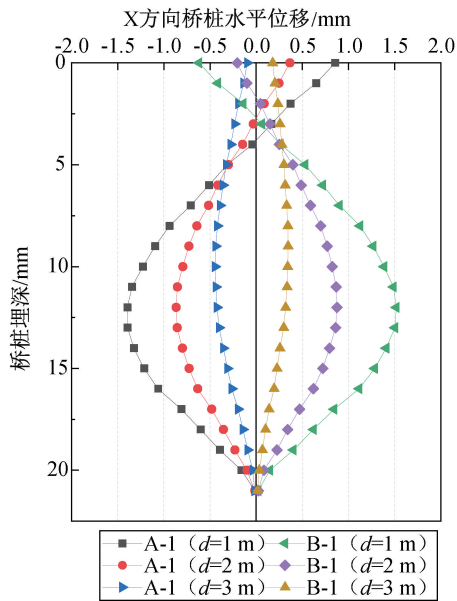


图 12 不同隔离桩直径时 X 方向桥桩水平位移图

Fig. 12 Diagram of horizontal displacement of bridge piles in X direction with different isolation pile diameters

5 结论

本文依托广州地铁八号线盾构隧道侧穿华南快速高架桥桩基工程,采用数值三维建模等方法研究了不同工况下盾构隧道开挖掘进下穿公路桥桩对既有桥桩桩基础的影响及加固方式优化设计。得出以下结论:

1) 隔离桩可有效减小既有桥桩垂直于掘进方向的桩顶位移,由于隔离桩的牵引作用,对于桥桩中部位移基本无削减作用,甚至极小地加大其水平位移。隔离桩基本消除平行于掘进方向的桥桩水平位移,对既有桥桩存在一定的遮蔽作用。

2) 隔离桩大幅地减小了桥桩的附加轴力,大幅减小桥桩垂直盾构方向附加弯矩,对平行盾构方向附加弯矩基本无影响。由于隔离桩的牵引作用,极小范围地增大平行盾构方向附加弯矩。

3) 建议将隔离桩设置在离地铁净距为 6~8 m 的范围内,这样既可以满足地铁规范的安全净距,也能够最大限度起到保护既有桥桩的功能。隔离桩桩径的增大有明显降低附加内力的作用,本工程中桩径为 1 m 时已满足规范要求,后续工程若不能满足规范要求,可增加隔离桩桩径以提高桥桩的安全性能。

参考文献:

- [1] 李永盛, 黄海鹰. 盾构推进对相邻桩体力学影响的实用计算方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1997(03): 274-280.
- [2] CHEN L T, POULOS H G, LOGANATHAN N. Pile Responses Caused by Tunneling[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 1999, 125(3): 207-215.
- [3] JACOBSZ S W, STANDING J R, MAIR R J, et al. Centrifuge Modelling of Tunnelling Near Driven Piles [J]. Journal of the Japanese Geotechnical Society, 2004, 44(1): 49-56.
- [4] LEE G, NG C. Effects of Advancing Open Face Tunneling on an Existing Loaded Pile[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(2): 193-201.
- [5] 李早, 黄茂松. 隧道开挖对群桩竖向位移和内力影响分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 398-402.
- [6] 黄茂松, 张宏博, 陆荣欣. 浅埋隧道施工对建筑物桩基的影响分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(8): 1299-1383.
- [7] POULOS H G, STEWART D P, LOGANATHAN N. Centrifuge Model Testing of Tunnelling-induced Ground and Pile Deformations [J]. Géotechnique, 2000, 50(3): 283-294.
- [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(b06): 219-226.
- [9] 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(01): 165-172.
- [10] 王国富, 孙捷城, 路林海, 等. 盾构隧道近距离下穿高架桥主动预支护研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 12(337): 195-202.
- [11] 阮雷, 蹇蕴奇, 鲁茜茜, 等. 盾构隧道埋深对临近铁路桥梁的影响分析[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(S1): 79-86.
- [12] 沈建文, 刘力. 盾构隧道施工对临近桥桩影响数值及现场监测研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(S2): 709-714.
- [13] 冯国辉, 周逊泉, 何庆亮, 等. 隔离桩对盾构掘进引起邻近高铁桩基水平位移的影响分析[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(04): 28-35.
- [14] 奎耀, 魏焕卫. 隔离桩对隧道引起建筑物沉降的影响及受力分析[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 828-834.
- [15] 史渊, 尹燕良, 吕鹏洲, 等. 隔离桩对双线盾构近距离侧穿高铁桥梁桩基的变形控制分析[J]. 公路, 2021(05): 322-327.

(责任编辑 王利君)