

# 大直径盾构隧道近距离穿越桩基的方案比选

宋玉芹,林永亮\*

(上海大学 土木工程系,上海市 200072)

**摘要:**以上海长江西路越江隧道近距离穿越逸仙路高架桩基工程为背景,采用数值计算方法,针对大直径盾构近距离往返穿越高架桥桩基,探讨了不同MJS加固方案对桩基与地表沉降的影响。计算结果表明:在数值分析工况中,沿群桩外侧全长施做桩径1.2 m的MJS桩对地表最大沉降的控制效果优于门式加固;沿群桩外侧全长施做MJS桩加固方式中,当加固桩直径 $b \leq 1.5$  m时,地表最大沉降随着加固桩直径的增大而减小,当加固桩直径 $b \geq 1.8$  m时,增大加固桩直径对地表最大沉降的控制效果相差不大;沿群桩外侧全长施做MJS桩的加固方式中,桩顶水平位移随着加固桩直径 $b$ 的增大而减小,桩基轴力增量随着加固桩直径 $b$ 的增大而增大;MJS加固桩直径对桩身弯矩增量的影响规律沿着桩身的变化而不同;比选得出沿群桩外侧全长施做直径1.2 m的MJS加固桩对逸仙路高架桩基的保护可行性较高。

**关键词:** 盾构隧道; MJS加固桩比选; 数值分析; 高架桩基; 近距离穿越施工

## 1 前言

在城市地铁和道路隧道建设中,特别在高灵敏度软土土层中,由于盾构法施工具有机械化程度高、掘进速度快、对周围设施影响小、能适用于多种地层等特点,目前已经成为地铁隧道最常用的施工方式。地铁隧道往往修建在人口比较密集的地区,其沿线不可避

免地近距离穿越大量的地上敏感建筑物和城市地下生命线工程,必然扰动建筑物周围土体,进而影响邻近建筑物的变形和受力,降低建筑构件承载力。因此有必要在盾构掘进施工时对邻近建筑物采取有效的保护措施,以控制建筑物的变形及受力状态,确保安全。

目前国内外许多学者针对盾构推进施工对桩基影响进行了一定的研究。文献[3-5]运用有限元数值模拟方法研究了盾构掘进施工引起邻近桩基础的内力及

大大降低了水文地质对软弱围岩的弱化作用。

(3) 大法郎隧道依据独特的水文地质条件和施工工艺,制定了适应于该种环境的初支换拱施工方案,并结合安全施工方法,有效地解决了初支侵限问题,使得二衬施工厚度符合相关标准规范要求。

## 参考文献:

[1] 韩鑫,叶飞,徐长鑫,等. 钢筋混凝土套拱加固病害隧道安全评价研究[J]. 中外公路,2019(3).

[2] 李贤,蔡林真. 某软岩隧道变形规律和二衬最佳支护时机选择研究[J]. 中外公路,2019(3).

[3] 王鹏,杜文涛,汤明,等. 复杂岩溶区特大断面小净距隧道洞口塌方处治技术[J]. 中外公路,2019(2).

[4] 李军. 软岩偏压隧道中夹岩施工扰动效应及控制技术研究[J]. 中外公路,2020(2).

[5] 林海山,张彦龙. 公路隧道病害快速检测技术发展和应用现状[J]. 中外公路,2020(1).

[6] 刘艳明. 石牛岭隧道地表坍塌原因分析及处理方案探讨[J]. 中外公路,2018(3).

[7] 黄俊平. 不同地质条件下的隧道初支换拱施工技术及应用[J]. 福建交通科技,2019(2).

[8] 胡尚. 盐田隧道初期支护结构侵限的处理[J]. 中国新技术新产品,2010(19).

[9] 王书涛,李光辉. 桦皮岭隧道初支侵限段换拱施工技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2016(1).

[10] 王嵩,左双季,季永新. 隧道围岩动态损伤劣化的累进性破坏数值模拟[J]. 中外公路,2019(6).

[11] 陈敬松,李永盛. 浅埋连拱隧道围岩参数反演及施工数值模拟[J]. 地下空间与工程学报,2007(6).

[12] 覃维. 隧道支护侵限机理分析及换拱方案优化研究[D]. 长安大学硕士学位论文,2013.

收稿日期:2020-07-20(修改稿)

作者简介:宋玉芹,女,硕士研究生. E-mail:13120966996@163.com

\* 通信作者:林永亮,男,博士(后),副教授. E-mail:Lin-yiliang@163.com

变形规律。Loganathan 等、Meguid 等通过模型试验法,全面系统地分析了盾构掘进施工引起的地层位移及邻近桩基承载力的变化规律;李永盛和黄海鹰运用理论公式分析了盾构隧道施工引起邻近桩基内力状态及变形的变化规律;文献[9-11]研究了盾构邻近桩基推进时隔离桩对桩基的影响;刘秋常等分析了隔离桩、注浆以及横撑加固方式对高架桩基的影响。由国内外研究现状可知:关于盾构隧道掘进对桩基的影响大多针对盾构侧穿施工的原始状态进行研究,但在大直径盾构近距离往返穿越桩基及对桩基加固方案的比选方面研究较少。因此,非常有必要进行这方面的研究,既能确保盾构顺利穿越,又能保证盾构推进不会破坏桩基并且确保上部高架桥和地铁正常运营。

该文依托上海长江西路越江隧道近距离穿越逸仙路高架桩基的实际工程,采用数值计算方法,针对大直径盾构近距离往返穿越高架桥桩基,探讨不同的 MJS 加固方案对桩基变位与地表沉降的影响,根据变形控制标准,提出相应的建议措施。

## 2 工程概况

上海长江西路越江隧道采用直径为  $\phi 15.43$  m 超大泥水盾构往返两次近距离穿越逸仙路高架桩基施工。隧道外直径为 15 m,内直径为 13.7 m,管片厚度 0.65 m,管片宽度 2 m。逸仙路高架承台尺寸为 6 m  $\times$  5 m  $\times$  2 m,采用混凝土强度为 C25,承受荷载为 20 MN,每个承台由 14 根方桩支撑。桩基为预制摩擦桩,截面尺寸为 450 mm  $\times$  450 mm,桩长约 31 m,桩身混凝土等级为 C40。隧道与桩基的最小净距为 1.045 m。隧道顶覆土厚度 16.3 m。图 1 为隧道与高架桩基相对位置平面示意图,图 2 为隧道与高架桩基剖面图,其中 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 为靠近隧道侧的桩基。

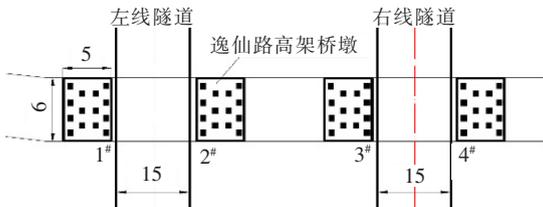


图 1 隧道与高架桩基平面图(单位:m)

## 3 MJS 加固及盾构推进数值模拟

### 3.1 施工工况模拟

数值分析时,不考虑地面荷载和逸仙路高架桩基

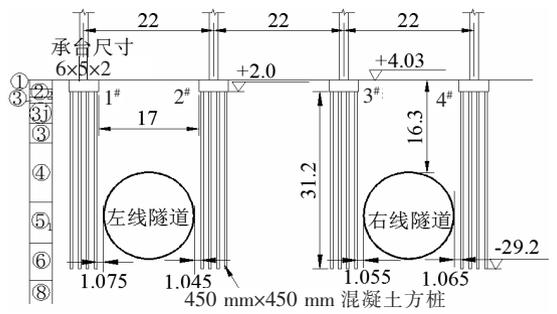


图 2 隧道与高架桩基剖面图(单位:m)

自重等因素导致的先期位移,仅考虑由于盾构推进而引起的附加变形。根据现场实际施工进度,主要分为 5 个阶段:① 初始地应力计算,位移清零;② 逸仙路桩基础施工,并施加桥墩荷载,位移清零;③ MJS 加固桩基施工,位移清零;④ 左线盾构穿越桩基;⑤ 右线盾构穿越桩基。其中在隧道裸穿工况中没有③加固桩基施工。

MJS 施工工艺是在传统高压旋喷桩施工的基础上改进的一种新型加固方法。为了最大程度减小 MJS 施工对逸仙路高架桩基的影响,施工现场采用 MJS 背向桩基的方法进行喷射加固,该文进行数值分析时忽略 MJS 加固桩施工对逸仙路高架桩基的影响。

计算共分 7 种工况进行数值模拟,分别为:① 隧道裸穿;② 门式加固;③ MJS 加固桩径 0.6 m;④ MJS 加固桩径 1.2 m;⑤ MJS 加固桩径 1.5 m;⑥ MJS 加固桩径 1.8 m;⑦ MJS 加固桩径 2.4 m。MJS 预加固示意图如图 3 所示,其中  $b$  为加固桩的直径。

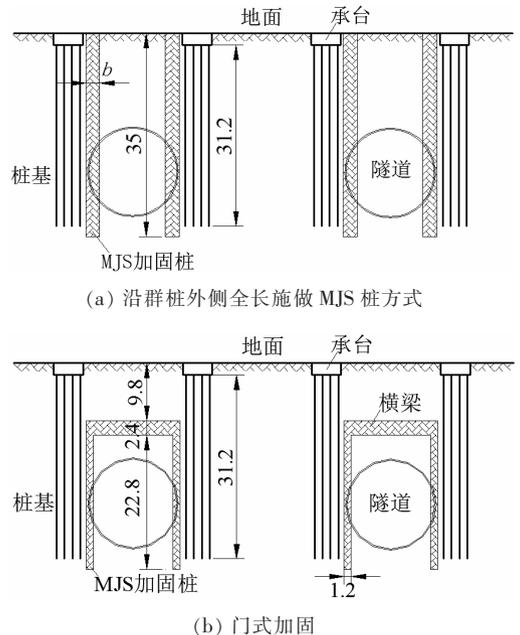


图 3 MJS 加固方案示意图(单位:m)

### 3.2 数值计算模型与参数

由于隧道属于狭长的构筑物,横向相对纵向尺寸较小,隧道计算模型可采用平面应变问题来处理。利用有限元软件 Madis/GTS 模拟盾构穿越逸仙路高架的情况,模型的计算区域宽度×深度为 191 m×80 m,满足半无限空间的要求。整个计算区域左右边界限制其水平变位,底部边界限制其水平和竖向变位,上部边界无约束。

数值计算中,土体、MJS 加固桩、承台均采用四边形单元模拟,土体和 MJS 加固桩采用德鲁克-普拉格

弹塑性(D-P)本构模型;隧道衬砌和桩基础采用二维梁单元模拟,其本构关系为线弹性模型;盾构掘进时隧道衬砌与周边土层的相互作用利用 0.22 m 厚的注浆薄弱层模拟,注浆层的本构关系为弹性模型。土体的分层和参数见表 1。MJS 加固桩、承台、衬砌、桩基和注浆层的材料参数见表 2,其中桩基的弹性模量按照面积等效原则进行换算,MJS 桩参数取值参照文献[4]中 MJS 加固土层。数值计算模型见图 4,其中桩基承台上的荷载根据等代换算得到。

表 1 土层物理力学参数

层号	土层名称	层厚/ m	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	泊松比
①1	人工填土	1.60	18.0	9.00	1	30.0	0.40
②2	粉质黏土	1.40	18.4	11.64	21	14.5	0.43
③	灰色淤泥质粉质黏土	1.00	17.6	13.50	13	14.0	0.44
③j	灰色粉质黏土	3.60	18.6	68.22	7	27.5	0.41
③	灰色淤泥质粉质黏土	3.40	17.6	14.04	13	14.0	0.44
④	灰色淤泥质黏土	10.40	16.9	19.86	14	9.5	0.44
⑤1	灰色黏土	8.80	17.7	56.16	16	13.5	0.43
⑥	暗绿-草黄色粉质黏土	6.60	19.5	90.60	46	15.0	0.39
⑧	灰色粉质黏土	22.0	17.8	81.60	23	16.0	0.44
⑨1	灰色粉细砂	21.20	18.6	274.74	2	32.5	0.45

表 2 加固土层、注浆层及衬砌等的物理力学参数

介质	弹性模量/ MPa	泊松比	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	黏聚力/ MPa	模型类型
MJS 桩	400.00	0.35	18	23	1.0	DP
衬砌	21 000.00	0.20	20	—	—	弹性
注浆层	1.75	0.30	21	—	—	弹性
桩	13 000.00	0.20	25	—	—	弹性
承台	30 000.00	0.20	25	—	—	弹性

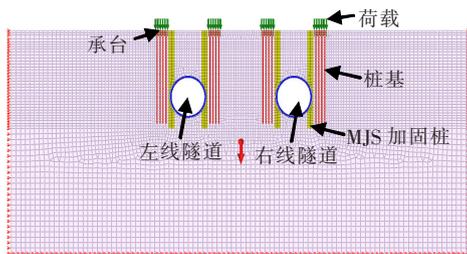


图 4 数值计算模型

## 4 数值计算结果分析

### 4.1 地表及承台沉降分析

根据上海市市政工程管理处和专家评审对逸仙路

高架保护提出的控制标准:地面累计沉降控制为 10 mm,立柱的累计沉降控制为 10 mm。由于立柱是作用在承台的上部,并在承台中间,两者是刚性连接,故立柱的沉降按照承台角点的最大沉降进行控制。

图 5 为各工况对应的地表及承台的沉降曲线。由图 5 可见:

(1) 隧道裸穿时地表最大沉降为 14.08 mm,不能满足相关沉降控制标准,因此必须对高架桥桩基础进行加固保护。采用 MJS 加固时,门式加固和加固直径  $b=0.6$  m 对应的地表最大沉降分别为 11.6 和 11.4 mm,均不能满足地表位移控制要求;沿群桩外侧全长施做 MJS 桩方式中,当加固桩的直径  $b \geq 1.2$  m 时,地

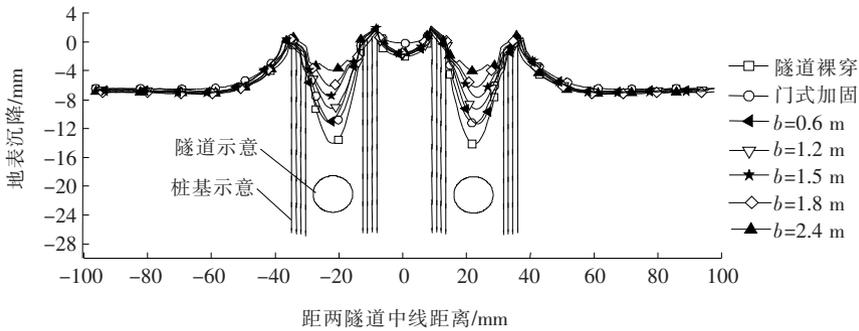


图5 地表及承台沉降曲线

表最大竖向位移均小于 10 mm, 满足变形控制要求。

(2) 沿群桩外侧全长施做 MJS 桩方式中, 当加固桩直径  $b \leq 1.5$  m 时, 地表最大沉降随着加固桩直径的增大而减小, 且地表最大沉降均发生在隧道正上方; 当加固桩直径  $b \geq 1.8$  m 时, 增大加固桩直径对地表最大沉降影响不明显。沿群桩外侧全长施做桩径 1.2 m 的 MJS 桩对地表最大沉降的控制效果优于同直径的门式加固方式。

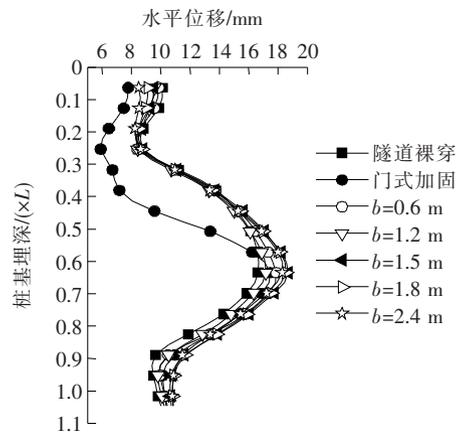
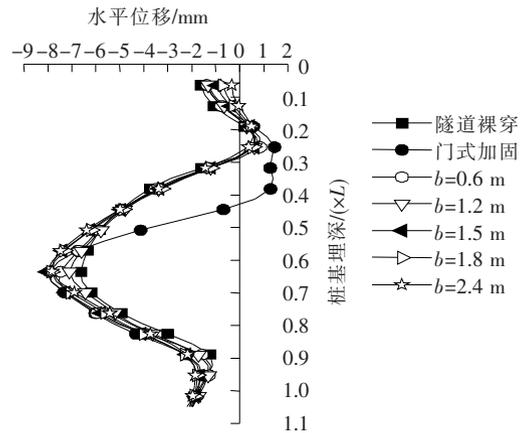
(3) 当隧道裸穿时, 承台的最大沉降为 2.27 mm, 对高架桩基进行 MJS 加固保护, 能够进一步降低承台的最大沉降值, 因此各个工况的承台均满足沉降控制标准。

#### 4.2 桩基的水平变位分析

由于该计算模型为对称结构, 因此只分析 1<sup>#</sup> 桩和 2<sup>#</sup> 桩的水平变位。

不同 MJS 加固方式对应的 1<sup>#</sup> 桩和 2<sup>#</sup> 桩的水平变形如图 6 所示,  $L$  为桥桩桩长,  $z$  为埋深。沿桩基埋深方向, 1<sup>#</sup> 桩和 2<sup>#</sup> 桩的水平变位形态相同, 从桩顶到埋深为  $0.25L$  段, MJS 加固桩能有效控制桩顶的水平变位; 从  $0.25L$  到  $0.5L$ , 加固桩对桥桩的水平变位影响不大; 从  $0.5L$  处到桩底区段, 隧道裸穿时桩基础的水平位移明显小于 MJS 加固后桩基础的水平位移, 这是由于隧道开挖, 隧道下方土体卸荷隆起, 土体对水平方向的挤压力减小, 桩体水平变位慢慢恢复, 但是加固桩的阻拦效应使桥桩的水平变位恢复得更加缓慢, 故在隧道中下方, MJS 加固后的桩身水平位移大于隧道裸穿时桩身的水平位移。由于 2<sup>#</sup> 桩右侧有 3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 桩和加固桩的支撑, 相同埋深处 2<sup>#</sup> 桩的水平变位均小于 1<sup>#</sup> 桩, 因此该文主要分析 1<sup>#</sup> 桩的水平变位。

JTG 94—2008《建筑桩基技术规范》5.7.3 条规定桩顶的水平位移允许值为 10 mm。隧道裸穿时, 1<sup>#</sup> 桩桩顶的水平位移为 10.13 mm, 不满足变形控制要求, 对桥桩进行 MJS 加固保护后的桩顶水平位移均满足变形标准控制要求。不考虑桩顶水平变位的差别, 加

(a) 1<sup>#</sup> 桩(b) 2<sup>#</sup> 桩图6 1<sup>#</sup>和2<sup>#</sup>桩的水平变位

固桩直径  $b$  为 1.8、1.5 和 2.4 m 的工况对控制桩身的水平变位效果相同。由此可知: 沿群桩外侧全长施做 MJS 桩的加固方式中, 桩顶水平位移随着加固桩直径  $b$  的增大而减小; 当加固桩直径  $b \leq 1.2$  m 时增大加固桩直径能够减小桩身最大水平位移, 但当  $b \geq 1.5$  m 时, 增加加固桩直径对桩身的水平位移影响不大。

该文中的门式加固方案能够有效控制桩顶水平位移, 但门式加固桩的横梁位置对地表沉降和桩基变位有显著影响, 下文仅对横梁固定深度的门式加固进行

比选分析,并对门式加固中的横梁位置进行系统分析。

### 4.3 桩基的轴力增量分析

图7为不同直径的MJS加固桩对应的1#桩和2#桩的轴力增量(轴力增量为隧道施工后的桩基轴力减去隧道施工前的桩基轴力)。

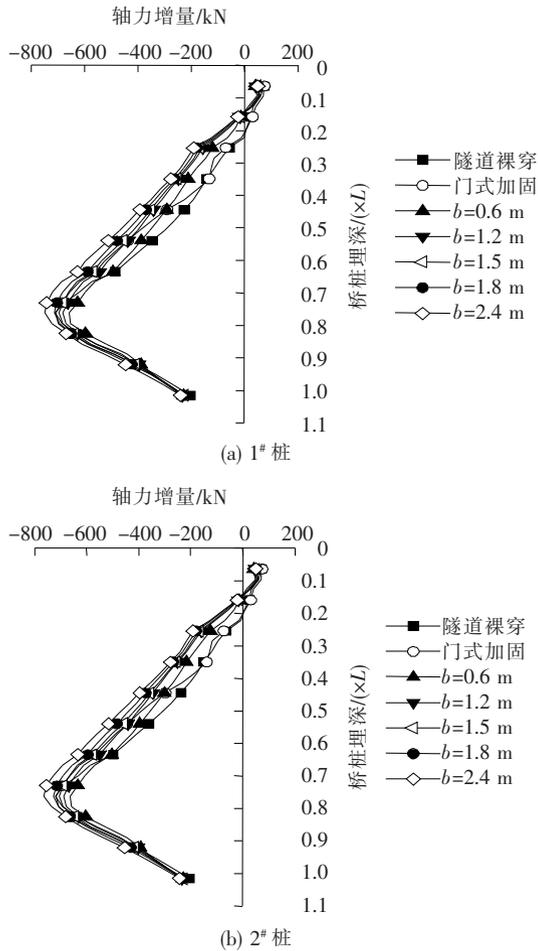


图7 1#和2#桩的轴力增量

由图7可知:MJS加固后桩基的轴力增量姿态同隧道裸穿时的姿态一致。在桩顶和桩底处,各工况的桩基轴力基本相同,而在桩身处,MJS加固后桩体的轴力增量大于隧道裸穿时桩基的轴力增量;在同一埋深处桩基轴力增量随着加固桩直径的增加而增大;在隧道水平轴线以上,桩身轴力增量随着埋深增大而加大,在隧道水平轴线以下,桩身轴力增量随着埋深增大而减小。这是由于盾构施工时,隧道上方土体沉降,土体与桩基发生相对位移,给桩基一个向下的摩擦力,同时土体给桩基一个挤压力,由于加固桩的存在,增大了挤压力,从而增加了土体对桩基的摩擦力,使桩承受的轴力增大;而在隧道下方,土体卸荷隆起,土体对桩基一个向上的摩擦力,减小了桩基的轴向压力。门

式加固的桩基轴力增量在无加固桩的区段同隧道裸穿时桩基轴力增量一致,在有加固桩的区段,桩基轴力增量同桩径1.2 m MJS加固桩时的桩基轴力增量一致。

### 4.4 桩基的弯矩增量分析

不同直径的MJS加固桩对1#桩和2#桩弯矩增量(隧道施工后桩基的弯矩减去隧道施工前桩基的弯矩)的影响如图8所示。

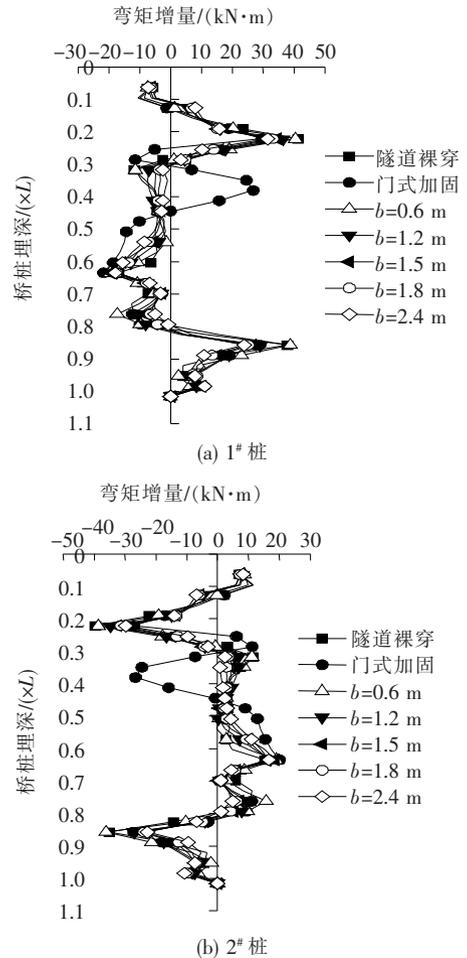


图8 1#、2#桩的弯矩增量

从图8可见:各工况桩基弯矩增量变化姿态基本一致。桩基弯矩主要与土的自重应力、黏聚力和内摩擦角等有关,该工程中土层复杂多样,桩基弯矩呈多变态,在不同土层交界处弯矩发生突变,但弯矩沿桩的变化与文献[17]中桩基弯矩变化趋势基本一致。

各工况在 $0.3L$ 以上部分的桩身弯矩增量基本相同,而在 $0.3L$ 至桩底,MJS加固桩能够有效降低桩身最大弯矩,使桩身弯矩增量变化更加缓和。这是由于在埋深 $0.3L$ 以上,土层以沉降为主,水平位移较小,对桩体产生的挤压力小;而在埋深 $0.3L$ 至隧道水平轴线以上,土层沉降减小,水平位移逐渐增大,土层

对桩体的挤压力增大,同时由于 MJS 加固桩对土体的遮拦作用,减小了土体对桩基的水平挤压,从而降低了桩基承受的剪力,继而使桩基承受的正负弯矩比隧道裸穿时有所减小;在隧道水平轴线以下至桩底处,由于隧道开挖,土体卸荷隆起,周围土体向隧道一侧移动,使桩体面向隧道一侧受拉,背向隧道一侧受压,此时 MJS 加固桩有效地减缓了土体的水平位移,从而减缓了土体对桩体的侧向挤压力,进而减小了桩基弯矩的变化幅度。由此可见,MJS 加固桩直径对桩身弯矩增量的影响规律沿着桩身埋深的变化而不同。

## 5 结 论

以上海长江西路越江隧道近距离往返两次穿越逸仙路高架桩基为工程背景,采用数值计算方法,分析了不同 MJS 加固方式对地表沉降以及桩基变位和内力的影响,得到如下主要结论:

(1) 在数值计算工况中,沿群桩外侧全长施做桩径 1.2 m 的 MJS 桩对地表最大沉降的控制效果优于门式加固;沿群桩外侧全长施做 MJS 桩的加固方式中,当加固桩直径  $b \leq 1.5$  m 时,地表最大沉降随着加固桩直径的增大而减小,且地表最大沉降均发生在隧道正上方;当加固桩直径  $b \geq 1.8$  m 时,增大加固桩直径对地表最大沉降影响不大。

(2) 在数值计算工况中,门式加固对桩顶水平位移的控制效果优于沿群桩外侧全长施做桩径为 1.2 m 的 MJS 桩;沿群桩外侧全长施做 MJS 桩的加固方式中,桩顶水平位移随着加固桩直径  $b$  的增大而减小;当加固桩直径  $b \leq 1.2$  m 时,桩身最大水平位移随着加固桩直径的增大而减小,但当  $b \geq 1.5$  m 时,增加加固桩直径对桩身的水平位移控制效果相差不大。

(3) 桩基轴力增量随着加固桩直径  $b$  的增大而增大;不同直径的 MJS 加固桩对桩身弯矩增量的影响规律随着桩基埋深的增加而呈不同的变化趋势。

(4) 对比分析不同工况得出,沿群桩外侧全长施做直径为 1.2 m 的 MJS 加固桩时地表、承台变位均满足上海市市政工程管理处和专家评审对逸仙路高架保护提出的控制标准和相关规范要求,且所需的人工、材料、时间等均较少,故建议选用直径为 1.2 m 的 MJS

加固桩对逸仙路高架桩基进行保护。

## 参考文献:

- [1] 刘建航,侯学渊. 盾构法隧道 [M]. 北京:中国铁道出版社,1991.
- [2] 蒋华春,傅鹤林,梁新权,等. 盾构隧道下穿地道桥施工扰动效应及控制对策研究 [J]. 中外公路,2017(2).
- [3] 朱逢斌,杨平,ONG C W. 盾构隧道开挖对邻近桩基影响数值分析[J]. 岩土工程学报,2008(2).
- [4] 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(S1).
- [5] 卿伟宸,廖红建,周冬峰. 隧道开挖对桩基影响的有限元分析[J]. 土工基础,2006(5).
- [6] LOGANATHAN N, POULOS H G, STEWART D P. Centrifuge Model Testing of Tunneling-Induced Ground and Pile Deformations[J]. Geotechnique, 2000, 50 (3): 283-294.
- [7] MEGUID M A, MATTRA J. Investigation of Tunnel-Soil-Pile Interaction in Cohesive Soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2009,135(7): 973-979.
- [8] 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(3).
- [9] 陈发东. 盾构隧道施工对临近桥梁桩基及周围土体影响的模拟研究[J]. 中外公路,2018(6).
- [10] 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(S1).
- [11] 李雪,周顺华,王培鑫,等. 隔离桩及盾构近接施工对高铁桩基的影响分析[J]. 岩土力学,2015(S1).
- [12] 刘秋常,马百顺,陈守开. 盾构施工不同加固措施对临近高架桥桩基影响研究[J]. 中外公路,2018(1).
- [13] 赵香山,李春涛,王建华. 软土中 MJS 工法桩施工环境效应的数值分析[J]. 地下空间与工程学报,2016(5).
- [14] 张登雨,张子新,吴昌将. 盾构侧穿邻近古建筑地表长期沉降预测与分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011(10).
- [15] 黄茂松,李早,杨超. 隧道开挖条件下被动群桩遮拦效应分析[J]. 土木工程学报,2007(6).
- [16] JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S].
- [17] 王炳军,李宁,柳厚祥,等. 地铁隧道盾构法施工对桩基变形与内力的影响[J]. 铁道科学与工程学报,2006(3).