

大直径微型钢管桩桩基托换技术在地铁施工中的应用

谢永盛

(广州市地下铁道总公司建设事业总部, 广州 510380)

摘要: 广州地铁二、八号线延长线洛溪站—南洲站盾构区间从彩虹花园密集桩群中通过, 大量桩基侵入盾构掘进区域, 需对彩虹花园进行加固处理, 但加固施工空间狭小。为了解决彩虹花园加固处理难题, 采用 $\phi 350$ mm 大直径微型钢管桩进行桩基托换, 盾构到达原桩位置时采取停机截桩方案进行加固处理。加固过程中建筑物沉降稳定, 未出现任何裂缝, 结构完好, 达到预期加固效果, 可供相似工程进行参考。

关键词: 地铁; 盾构隧道; 大直径微型钢管桩; 桩基托换; 加固

DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2012.04.019

中图分类号: U 455.4

文献标志码: B

文章编号: 1672-741X(2012)04-0537-07

Application of Large-diameter Micro Steel Pipe Pile Underpinning Technology in Construction of Metro Works

XIE Yongsheng

(Construction Division of Guangzhou Metro Corporation, Guangzhou 510380, China)

Abstract: Luoxi station-Nanzhou station shield tunneling section on the extended section of No. 2 and No. 8 line of Guangzhou Metro passes through the pile group of Caihong Garden. Many piles intrude into the clearance of the shield-bored tunnel, therefore Caihong Garden should be reinforced. Furthermore, the operation space for the reinforcement is small. Micro steel pipe piles with 350 mm diameter are adopted to underpin the pile foundation. When the shield arrives at the position of the existing piles, the piles are cut and reinforcement is made. During the reinforcement, the settlement of the buildings is stable and expected reinforcement effect is achieved.

Key words: Metro; shield-bored tunnel; large-diameter micro steel pipe pile; underpinning; reinforcement

0 引言

随着城市飞速发展, 地面交通越来越拥挤, 修建地铁, 将大部分客流引向地下是缓解地面交通拥挤情况的最有效办法。而地铁隧道在繁华的城市地下穿越, 时常会遇到一些主要建筑物桩基侵入地铁隧道, 需要对侵入隧道的桩基进行托换加固处理。桩基托换根据截桩前的预顶情况分为主动托换和被动托换。常用的托换桩类型有人工挖孔桩、钻孔桩、静压桩、树根桩、微型钢管桩等。文献 [1-5] 主要介绍了桩基托换及微型钢管桩的理论研究; 文献 [6] 介绍了在动荷载作用下进行桩基托换的施工方法; 文献 [7] 介绍了钻孔钢管桩在既有建筑进行改造中的应用; 文献 [8-11] 介绍了微型钢管桩应用于桩基托换或加固中的工程实例。目前国内对微型钢管桩的研究及应用逐渐增多, 但多数是采用 $\phi 200$, $\phi 250$ mm

的微型钢管桩, $\phi 300$ mm 以上的微型钢管桩应用还不多, 主要原因是使用的成孔设备难匹配。本文以广州地铁二、八号线延长线洛溪站—南洲站盾构区间为例, 通过对地质钻机的改造, 分二次成孔, 采用 $\phi 350$ mm 大直径微型钢管桩, 顺利完成了彩虹花园群桩桩基托换工程, 达到预期效果, 可供类似工程进行参考。

1 工程概况

1.1 项目概述

广州地铁二、八号线延长线洛溪站—南洲站区间全长 4 463 单线延米, 区间隧道于里程 YDK7 + 835.0 (ZDK7 + 830.0) ~ + 910.0 (ZDK7 + 890.0) 下穿彩虹花园 3[#], 8[#], 9[#] 楼。其中 3[#] 楼为 7 层框架结构, 8[#], 9[#] 楼为 8 层框架结构, 桩基为预制钢筋混凝土管桩, 桩径为 $\phi 300$, $\phi 400$ mm, 共有 75 根桩侵入盾构掘进区域, 15

收稿日期: 2012-05-29; 修回日期: 2012-06-10

作者简介: 谢永盛(1971—), 男, 广东揭阳人, 1994年毕业于华东交通大学工业与民用建筑专业, 本科, 工程师, 现从事地铁工程技术管理工作。

根处于隧道外 1 m 范围内,即有 90 根原桩需进行托换或加固处理。

3[#],8[#],9[#]楼 $\phi 300$ 桩基设计单桩承载力 650 kN, $\phi 400$ 桩基设计单桩承载力 1 300 kN,桩身混凝土强度等级 C70,桩端地层主要为强风化岩层。该 3 栋建筑物位于洛溪新城彩虹花园小区范围内,地面较为平坦,建筑物一层为停车场,东侧为洛溪大桥,南侧临北环路钢筋混凝土行车道,西侧及北侧均为密集的民房。

1.2 工程地质情况

本工程地质情况由上至下依次为:〈1〉人工填土层、〈2-1B〉淤泥土层、〈2-2〉淤泥质砂层、〈3-2〉中粗砂层、〈4-1〉冲-洪积黏性土层、〈5-2〉硬塑-坚硬状风化残积粉质黏土层、〈6〉岩石全风化带、〈7〉岩石强风化带、〈8〉岩石中风化带和〈9〉岩石微风化带。

盾构隧道过该段主要穿越地层为〈6〉、〈7〉、〈8〉和〈9〉层,拱顶地层为〈6〉和〈7〉层。

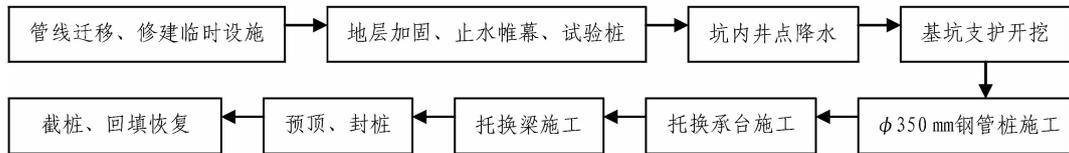


图 1 桩基托换施工流程图

Fig. 1 Technological process of pile foundation underpinning

2.1 前期准备及辅助措施

做好建筑物桩基的复测工作,明确桩基位置;清理施工场地并做好二楼通往地面一层的楼梯改移工作;探明施工场地范围内的管线(化粪池)等分布情况,进行管线(化粪池)改移;拆除地面一层范围内非承载结构。

2.2 地层加固、止水帷幕及试验桩施工

基坑开挖前,先对盾构隧道拱顶上下各 3 m、左右两侧各 3 m 范围内采用袖阀管注浆加固处理(为盾构开仓截桩做地层加固处理),水平间距 1.2 m × 1.2 m;基槽止水帷幕采用 2 排 $\phi 550@400$ mm 单管旋喷桩止水,深度以进入不透水层 ≥ 1.5 m 为控制标准。

由于以往多采用 $\phi 200$, $\phi 250$ mm 的钢管桩,现在广州地铁首次采用 $\phi 350$ mm 大直径微型钢管桩的托换,因此有必要验证 $\phi 350$ mm 大直径微型钢管桩的设计承载力是否满足设计要求,基坑开挖前需先在现场施作 1 根试验桩进行抗压静载试验。

本工程 $\phi 350$ mm 大直径微型钢管桩的设计单桩承载力为 500 kN,试验桩经中国轻工业广州工程院进行抗压静载试验,试验结果为单桩承载力均 $\geq 1 000$ kN,达到设计单桩承载力的 2 倍以上,满足设计要求(试验桩加载至 1 000 kN 后,本想继续加载至试验桩破坏,以便试验出 $\phi 350$ mm 微型钢管桩的极限荷载,可惜试验桩距小区居民进出便桥太近,出于安全考

1.3 施工场地条件

彩虹花园桩基托换是在住户不搬迁的情况下进行施工,施工空间狭小,基坑处于 3[#],8[#],9[#]楼车库下,车库高度仅有 2.2 m,基坑开挖最深 5.55 m,在住户不搬迁的情况下,施工最大操作空间仅有 7.75 m。为满足钢管桩现场施工需要,钻机设备需重新改造。

2 大直径微型钢管桩桩基托换技术

彩虹花园桩基托换采用微型钢管桩桩基托换技术,采用新桩换原桩的托换形式(托换梁直接托住既有桩基承台,将建筑物的荷载通过托换梁传递至托换承台,再由托换承台传递至托换桩)。原桩在盾构到达后,在盾构内进行开仓截桩,新桩采用 $\phi 350$ mm 大直径微型钢管桩,工程技术和施工工法相对新颖,目前在国内还比较少用,在广州地铁众多桩基托换工程项目中大量桩群使用 $\phi 350$ mm 大直径微型钢管桩托换尚属首次。其主要施工工艺见图 1。

虑,实际堆载至 1 200 kN 后被迫停止,只能对设计单桩复核,未完成极限承载力试验)。

2.3 坑内井点降水

基坑止水帷幕施工完成后,在基坑内侧设置降水井点,将地下水位降低到基坑最大开挖深度以下 0.5 m。

2.4 施工基槽开挖、支护

桩基托换施工主基槽最大开挖深度 5.55 m,采用复合土钉墙支护,超前桩为 $\phi 108@500$ mm 微型钢管桩,钢管桩长 6~12 m,桩底 3 m 范围内开注浆孔,孔径 15 mm,间距 500 mm,桩顶设置 300 mm × 400 mm 的冠梁,土钉为 $\phi 48 \times 3.5$ (局部 4.0) mm 花管注浆,花管管壁设置出浆孔,孔径 8 mm,间距 200 mm,靠近花管外端头 2 m 范围内不设置出浆孔,花管注 1:1 水泥砂浆,土钉长度根据不同支护形式分 15, 12, 10, 8 m 等,土钉倾角 15°(局部 20°);施工基槽面层采用 100~200 mm 厚 C20 网喷混凝土,钢筋网为 $\phi 6.5@200$ mm × 200 mm;基槽放坡坡度 1:1。

2.5 大直径微型钢管桩的成桩方法和工作机制

微型钢管桩成桩设备不是普通钻机,而是采用普通地质钻机进行改造而成(因施工空间最大高度为 7.75 m,最小为 7.0 m,地质钻机高度改造后为 6.5 m)。本项目托换桩采用孔径 350 mm,内插 $\phi 219$ mm × 6.5 mm 的钢管,钢管内外灌注 M25 水泥砂浆。

由于地质钻机成 $\phi 350$ mm 孔径的钻杆扭距不够,需为分2次成孔,第1次用 $\phi 150$ mm 钻头,先形成 $\phi 150$ mm 桩孔;第2次再换 $\phi 350$ mm 钻头扩钻至 $\phi 350$ mm 桩孔。内插 $\phi 219 \times 6.5$ mm 的钢管作为微型钢管桩钢筋笼,钢管内 M25 水泥砂浆作为桩芯混凝土,钢管外 M25 水泥砂浆作为钢筋笼护壁,由 $\phi 219 \times 6.5$ mm 的钢管及钢管内 M25 水泥砂浆共同承载受力。

2.6 微型钢管桩施工工艺

微型钢管桩工艺流程为:测量放线—钻机定位及成孔—吊放钢管及注浆管—注浆及二次注浆—养护。

钢管桩施工时先用钻机分2次成孔,孔径350 mm;然后放置 $\phi 219 \times 6.5$ mm 的钢管,钢管每隔0.5 m 均匀开3个30 mm 直径的小孔,放置一次注浆管及二次桩底注浆管,同时焊接防砂筋;用清水清孔直到孔口流出清水;再用 M25 砂浆进行孔内灌浆操作并在桩顶插入4根直径18 mm HRB335 钢筋,插入深度1000 mm,同时应满足钢筋锚入承台35倍钢筋直径的要求。

一次注浆管及二次桩底注浆管随钢管下放。二次注浆管采用 $\phi 32$ mm 无缝钢管,接头处应采用内缩节,使管外壁光滑,注浆管管底口用胶布封住;二次注浆管端部应做成花管形式,在管底口以上3 m 范围内开孔,开孔直径8 mm,间距250 mm,孔眼用胶布封住。钢管桩所用机械如图2—5所示。钢管桩施工大样如图6所示。



图2 施工钢管桩的钻机

Fig. 2 Drilling machine for construction of steel pipe pile

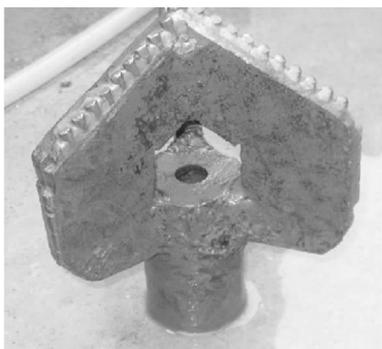


图3 $\phi 350$ mm 钻头

Fig. 3 Drilling bit with 350 mm diameter



图4 现场加工后的钢管

Fig. 4 Steel pipes

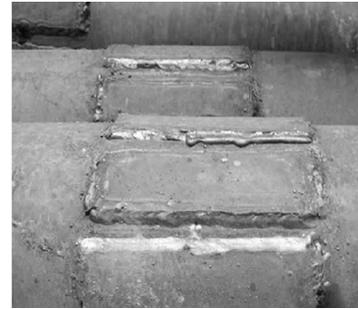


图5 钢管的连接式样

Fig. 5 Connection of steel pipes

2.7 托换承台及托换梁施工

钢管桩施工完成后,进行托换承台施工,承台顶面预埋20 mm 厚钢板。

托换承台施工完成后,进行托换梁施工,对托换承台和原承台新老混凝土接触面进行凿毛,深度为10~20 mm。托换梁端部底面也预埋20 mm 厚钢板。预埋钢板上焊接3排 $\phi 20$ 锚筋,锚筋焊缝采用穿孔塞焊,焊缝高度不小于15 mm。预埋件大样详见图7。

2.8 预顶、封桩施工

预顶施工工艺流程为:预顶—加型钢垫块—打入钢楔并焊实—拆卸千斤顶—浇注 C30 微膨胀混凝土。

为了消除托换钢管桩的变形,并检验托换梁承载能力及节点连接性能(见图8),在托换承台上设置千斤顶及安全装置^[5],预顶完成后对托换桩进行稳压封桩处理。

2.8.1 预顶施工

预顶的主要目的是提前消除大部分托换梁的挠度变形和微型钢管桩的沉降变形,有效控制建筑物的不均匀沉降,确保桩基托换过程中建筑物的安全^[6],预顶示意图见图9。预顶过程中应加强既有承台、托换承台、托换梁和托换管桩的变形监测(见图10)。当托换承台的混凝土强度达到设计强度的90%,并且托换梁的强度达到设计强度的85%后,可以对托换梁进行预顶作业。本项目采用的千斤顶为实用动力公司生产的 RSC-1002 薄型液压缸,行程为57 mm,承载能力90 kN,配备的液压泵为该公司生产的 PUJ-1400E 双作用液压泵。

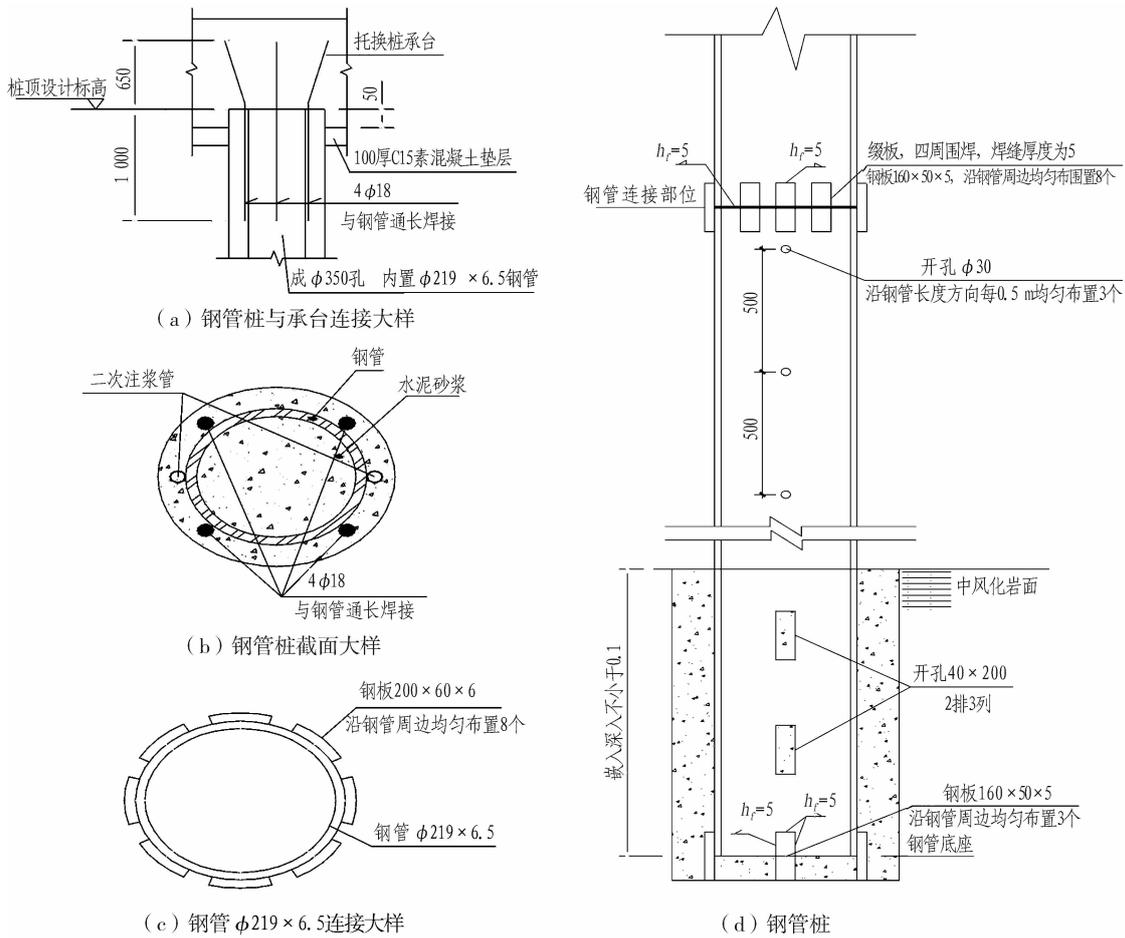


图 6 微型钢管桩施工大样图(单位: mm)

Fig. 6 Details of construction of micro steel pipe pile(mm)

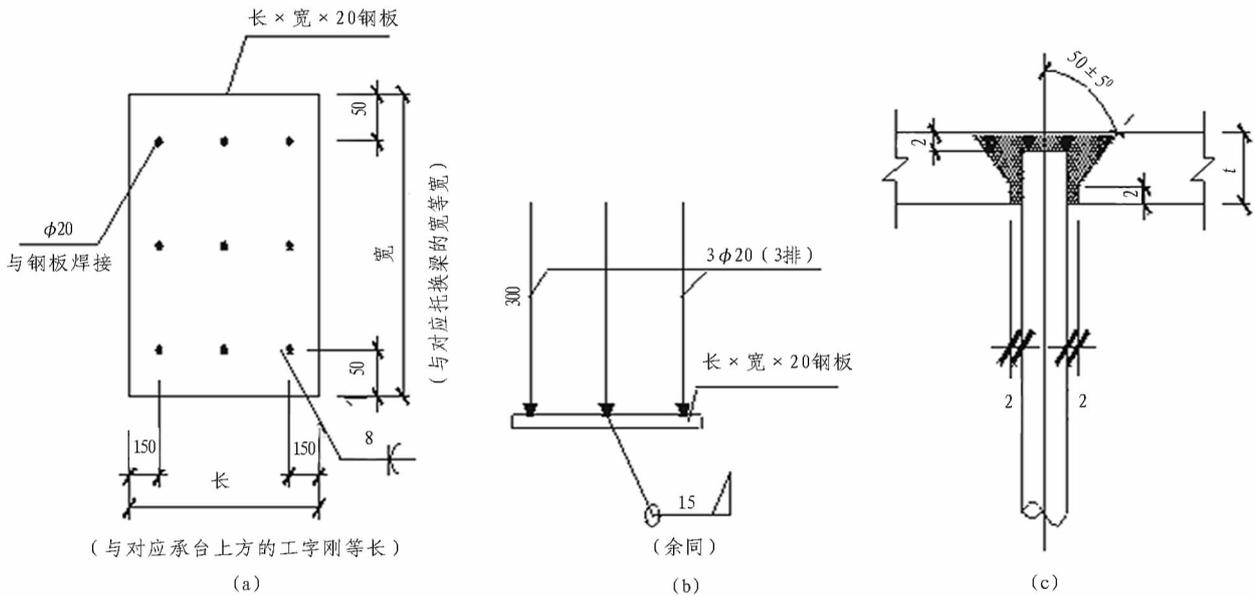


图 7 预埋件大样图(单位: mm)

Fig. 7 Details of embedded parts(mm)

2. 8. 2 加型钢垫块、打入钢楔并焊实及拆卸千斤顶

工字钢加入后,与下部钢垫板焊为一体,焊缝高度不小于 6 mm。钢楔必须用铁锤打紧,当钢楔高度不够时,可在托换梁和托换承台的预埋钢板上加焊钢板充

实剩余空间。钢楔尺寸、坡度可按施工情况适当调缓,但必须不能小于图中尺寸(见图 11)。钢楔打紧后在接缝外焊实并与钢垫板焊实,以保证卸去千斤顶后工字钢支撑稳定。

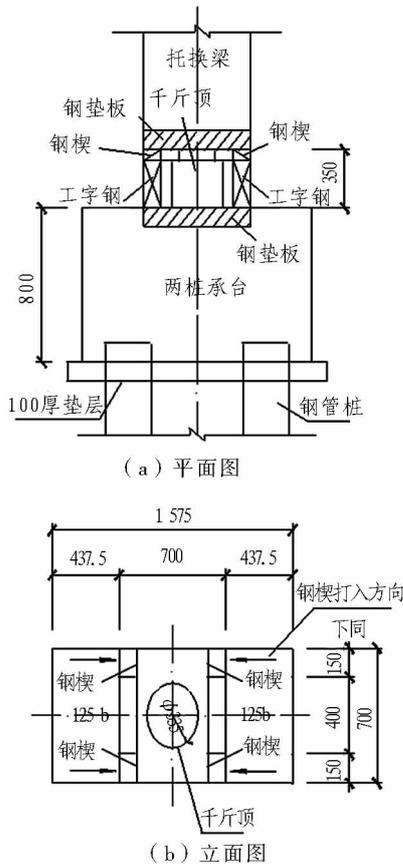


图8 两桩承台托换节点平立面示意图(单位: mm)

Fig. 8 Plan and profile of cap underpinning of two piles(mm)



图9 预顶

Fig. 9 Pre-jacking

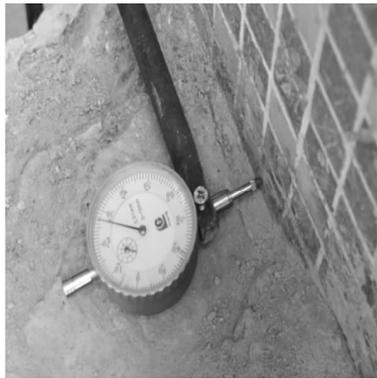


图10 预顶监测

Fig. 10 Monitoring of pre-jacking

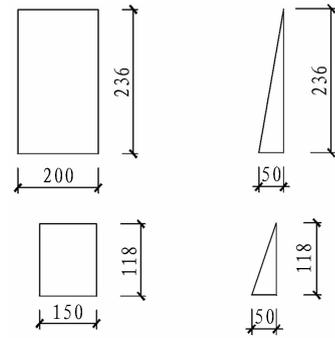


图11 钢楔大样示意图(单位: mm)

Fig. 11 Details of steel wedge (mm)

2.8.3 封桩

拆卸千斤顶之后,托换梁与托换承台之间用 C30 微膨胀混凝土充填密实,如图 12 所示。顺利将托换梁的荷载传递至托换承台上,再由托换承台传递至新施作的微型钢管桩,实现桩基托换过程中的受力体系转换。



图12 膨胀混凝土封桩

Fig. 12 Plugging by swelling concrete

3 盾构开仓截桩

3.1 盾构过彩虹花园前的准备工作

1) 提前对盾构隧道拱顶上下各 3 m、左右两侧各 3 m 范围内采用袖阀管注浆进行地层加固处理,确保盾构开仓截桩的安全。

2) 提前对侵入隧道的原桩坐标进行人工复测,以便与盾构 VMT 显示屏上自动测量系统测得的坐标进行比对,确保原桩定位准确。

3) 选择合适的地方开仓检查刀具情况,同时检查机械设备的运转情况,对盾构进行一次全面的维护保养,使各种机械设备保持最佳状态,防止下穿彩虹花园时出现机械设备异常而造成停机。

4) 提前对盾构刀盘进行一次全面的刀具更换,确保刀具完好。即每台盾构更换 4 把中心滚刀,31 把单刃滚刀,64 把齿刀,16 把边刮刀,1 把超挖刀。

3.2 盾构姿态控制

盾构掘进过程中其轴线不可能始终与隧道设计轴线平行,盾构姿态会随着盾构的推进而变化,特别是在曲线段这种变化尤其大。盾构姿态包括水平姿态变化

及竖直姿态变化,其变化将在盾构四周产生空洞区和扰动挤压区,对周围土体产生影响。盾构在曲线掘进、纠偏、上坡或下坡推进时,实际开挖断面不是圆形而是椭圆形,因此必然引起地层损失。盾构轴线与隧道设计轴线偏角越大,则对土体扰动和超挖程度及其引起的地层损失也越大;盾构掘进的纠偏量越小,则对土体的扰动越小。

发现盾构偏差时应逐渐调整,严禁纠正过急。在实际控制时,可根据VMT显示屏上自动测量系统测得值与DTA的差值来调整,即调整图标头部与尾部尽可能靠近坐标原点。

3.3 盾构掘进模式及掘进参数控制

为了方便判断刀盘是否碰到原桩及减小对原桩的推力影响,防止原桩在较软的〈7〉、〈8〉地层中产生纵向位移,盾构从第1根原桩的理论位置前1 m开始至通过最后1根原桩为止,掘进模式采用敞开式,掘进参数如下。

1)盾构距离原桩即定里程1 m之前,开始降低及严控各项掘进参数。推力为6 000~8 000 kN;推进速度为10~15 mm/min;刀盘转速为1.0~1.2 r/min。

2)盾构通过桩时,继续降低及严控各项掘进参数。推力为5 000~7 000 kN;推进速度为5~10 mm/min;刀盘转速为0.8~1.0 r/min。

3.4 洞内同步注浆及二次注浆管理

加强洞内注浆管理,每环同步注浆量应不小于 6 m^3 ,确保足够的注浆量。截桩施工期间,盾构掘进的同时,在脱出盾尾4~5环的管片上,及时通过手孔在1,11点位对每环管片进行二次补注双液浆回填,每环注浆量为 $1\sim 1.3\text{ m}^3$,注浆压力控制在0.4 MPa以内,保证建筑空隙的填充密实,防止地面建筑物产生过大的沉降。

3.5 开仓截桩施工

1)盾构刀盘碰到原桩时立即停机开仓,同时通风降温,清除易燃易爆有毒等有害气体。

2)检查掌子面稳定情况,判定稳定后,施工人员进仓清理岩面、刀盘及土仓内部渣土,确定原桩侵入隧道的确切位置和长度。

3)搭建作业平台,采用手持式液压破碎锤破除桩基周围岩层,再破除原桩混凝土;原桩的钢筋露出后,采用液压钳对钢筋进行分段切除。每段钢筋长度不宜超过1 m,以便钢筋运出土仓。

注意钢筋和钢桩靴应确保清理干净后,方可继续向前掘进寻找下一根侵入隧道的原桩。如此反复循环,直至所有侵入隧道的原桩截除完毕。

4 大直径微型钢管桩桩基托换效果

本工程 $\phi 350\text{ mm}$ 大直径微型钢管桩的设计单桩承载力为500 kN,共243根。钢管桩完工后,再次随机抽取3根钢管桩进行抗压静载试验,试验结果为单桩承载力均 $\geq 1\ 000\text{ kN}$,达到设计单桩承载力的2倍以上,完全满足设计要求。

施工监测显示,当桩基托换完毕,房屋沉降最大值为6 mm。盾构通过时,由于托换钢管桩的沉降,房屋最大沉降值为17 mm。累计沉降值满足 $\pm 30\text{ mm}$ 沉降控制要求。桩基托换工程于2008年7月18日完工,2008年11月25日验收。沉降已稳定,房屋未出现任何裂缝,结构完好无损,桩基托换效果完全达到对建筑物的加固保护作用。

5 结论与讨论

大直径微型钢管桩桩基托换技术是一种较新的桩基托换技术,具有单桩承载力较高、所需施工空间较小、所用机械设备简单等优点,特别适合在施工空间狭小的困难条件中使用。通过广州地铁二、八号线彩虹花园桩基托换工程的成功使用,微型钢管桩桩基托换技术在今后的地铁隧道施工中必将得到推广和应用。然而,现阶段仍存在制约其推广和应用因素。

1)成孔设备难匹配。本工程使用的地质钻机需进行设备改造,而 $\phi 350\text{ mm}$ 钻头则需通过特殊加工才能满足施工需要。

2)各项技术参数尚未稳定。由于目前 $\phi 300\text{ mm}$ 以上的大直径微型钢管桩在国内还比较少用,可供参考的工程实例及技术参数不多,对于各类桩径的大直径微型钢管桩在不同桩长、不同地层中的极限承载力及设计承载力尚未明确,有待进一步研究和完善。

一旦突破上述2大难题,便可合理利用大直径微型钢管桩的极限承载力,提高其设计单桩承载力,进而减少大直径微型钢管桩数量,同时还能节约设备改造、二次成孔及钻头特殊加工的时间和费用。由于能够大量降低工程造价和缩短工期,大直径微型钢管必将得到推广和应用。建议有条件的工程企业和研究机构做进一步试验和研究,希望 $\phi 350\text{ mm}$ 大直径微型钢管桩桩基托换技术在广州地铁二、八号线彩虹花园桩基托换工程中的成功使用实例,能为类似工程或研究提供参考作用。

参考文献(References):

- [1] 吕剑英. 我国地铁工程建筑基础托换技术综述[J]. 施工技术,2010,39(9): 8-12. (LV Jianying. Overview of foundation underpinning technology in subway project of Chi-

- na[J]. Construction Technology, 2010, 39(9): 8 - 12. (in Chinese))
- [2] 魏玉省. 微型钢管桩桩基托换在广州地铁工程中的应用[J]. 隧道建设, 2011, 31(5): 583 - 587. (WEI Yusheng. Application of micro steel pipe piles in underpinning in Guangzhou Metro project [J]. Tunnel Construction, 2011, 31(5): 583 - 587. (in Chinese))
- [3] 薛焯. 洞内桩梁式托换在广州地铁工程中的应用[J]. 隧道建设, 2006, 26(6): 34 - 36, 81. (XUE Huanng. Application of pile + beam underpinning in Guangzhou Metro project [J]. Tunnel Construction, 2006, 26(6): 34 - 36, 81. (in Chinese))
- [4] 王德华. 微型钢管桩托换在浅层掏土纠偏中的应用研究[D]. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 2007(5): 1 - 56. (WANG Dehua. A Study on application of micro-steel pipe pile underpinning in correcting buildings with drawing out superficial soil [D]. School of City Construction and Environment Engineering, Chongqing University, 2007(5): 1 - 56. (in Chinese))
- [5] 邬毛志. 利用钢管桩实施基础托换的关键技术研究[D]. 华中科技大学土木工程与力学学院, 2011(11): 1 - 110. (WU Maozhi. Study of key techniques of foundation underpinning using steel pipe pile [D]. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, 2011(11): 1 - 110. (in Chinese))
- [6] 裴宝伦. 铁路桥梁桩基托换施工技术[J]. 山西建筑, 2006, 32(8): 127 - 128. (PEI Baolun. Underpinning construction techniques of pile foundation of railway bridge [J]. Shanxi Architecture, 2006, 32(8): 127 - 128. (in Chinese))
- [7] 黄民水, 邬毛志, 刘佳, 等. 钢管桩在既有建筑基础托换中的应用[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2009, 26(4): 36 - 39. (HUANG Minshui, WU Maozhi, LIU Jia, et al. Application of steel-pipe pile in foundation underpinning for existing buildings [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2009, 26(4): 36 - 39. (in Chinese))
- [8] 方家强. 微型钢管桩在桩基础加固中的应用[J]. 福建建设科技, 2006(2): 10 - 11, 19. (FANG Jiaqiang. Application of micro steel tube-pile for pile foundation reinforcing [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2006(2): 10 - 11, 19. (in Chinese))
- [9] 桂林. 钻孔嵌岩微型钢管灌注桩在桩基托换工程中的应用[J]. 土工基础, 2005, 19(4): 13 - 14. (GUI Lin. Application of bored cast-in-place steel tubular mini-pile socketed in rock for pile foundation underpinning [J]. Soil Engineering and Foundation, 2005, 19(4): 13 - 14. (in Chinese))
- [10] 刘更宁. 微型钢管桩和钢筋锚固技术在厂房基础加固中的应用[J]. 中国煤田地质, 2002, 14(3): 53 - 55. (LIU Gengning. Application of micro steel tube pile and anchor technology of reinforcing bar in foundation reinforcement of factory building [J]. Coal Geology of China, 2002, 14(3): 53 - 55. (in Chinese))
- [11] 谷伟平, 李国雄, 蒋利民, 等. 微型钻孔嵌岩钢管灌注桩[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(3): 344 - 347. (GU Weiping, LI Guoxiong, JIANG Limin, et al. The small size bore steel tube cast in place pile embeded in rock [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(3): 344 - 347. (in Chinese))

(上接第522页)

- [7] 陈绍华. 关角隧道风险评估[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(6): 17 - 27. (CHEN Shaohua. Discussion on the application of risk assessment in Guanjiao tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46(6): 17 - 27. (in Chinese))
- [8] 陈龙, 黄宏伟. 岩石隧道工程风险浅析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 110 - 115. (CHEN Long, HUANG Hongwei. Risk analysis of rock tunnel engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 110 - 115. (in Chinese))
- [9] 李昌有, 傅鹤林, 李亮. 某水下隧道施工突涌水与塌方的风险评价[J]. 铁道科学与工程学报, 2009, 6(6): 22 - 26. (LI Changyou, FU Helin, LI Liang. Assesment of collapse disaster during tunnel construction in a underground-water tunnel [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2009, 6(6): 22 - 26. (in Chinese))
- [10] 路美丽, 刘维宁, 罗富荣, 等. 隧道与地下工程风险评估方法研究进展[J]. 工程地质学报, 2006, 14(4): 462 - 469. (LU Meili, LIU Weining, LUO Furong, et al. Review on risk assessment methods for tunnelling and underground projects [J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 14(4): 462 - 469. (in Chinese))
- [11] 张喜刚. 公路桥梁和隧道工程设计安全风险评估指南[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.