

软流塑地层盾构切削大直径钢筋 混凝土悬臂排桩工程实践

宋跃均¹, 杨昊², 廖秋林², 梁博阳³, 甄浩天²

(1. 绍兴市轨道交通集团有限公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 北京城建轨道交通建设工程有限公司, 北京 100176;
3. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为研究刀具及施工参数对盾构切削大直径钢筋混凝土悬臂排桩的影响, 以绍兴某区间工程为依托, 开展地表及结构变形、钢筋破坏形态、刀具磨损研究。结果表明: 采用“慢推速, 中转速, 小扭矩, 严控浆, 早补强, 勤量测”的策略, 圆满完成切桩任务; 钢筋破坏分为剪拉、弯拉、纯剪 3 种破坏形态, 推进速度对破坏形态影响较大; 刀具磨损为 2.1~2.4 mm, 随轨迹半径增加而增大, 左线明显高于右线; 软流塑地层盾构切削钢筋混凝土悬臂排桩掘进参数为推进速度 2~5 mm/min, 刀盘转速 0.85 r/min, 推力 8 500~9 500 kN, 刀盘扭矩 1 000~1 500 kN·m。研究成果可为相似工程提供借鉴。

关键词: 软流塑地层; 切钢筋; 悬臂排桩; 钢筋破坏形式; 刀具磨损

中图分类号: U45 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)11-0253-08

近年来国内轨道交通迅速发展。在城市中心区域建筑物密集地带修建地铁隧道时, 常遭遇既有建(构)筑物桩基与既有线路冲突情况^[1], 通常采用线路调整^[2]、桩基换托^[2-3]、冲桩技术^[4]、拔桩技术^[5-6]等方法在盾构施工之前解决冲突问题。随着盾构机性能、安全性逐渐增强, 盾构直接切削破除桩体^[7-8]方案逐渐提出, 并应用于工程实践中。这种方法不改变原有建筑和地表环境, 作业成本低、工期短, 已成为盾构切桩工程的重要突破点^[9]。

李发勇^[9]依托宁波地铁 3 号线盾构工程, 实现了盾构直接切削灌注桩桩基群, 连续切削穿越 26 根直径 377 mm 桩基; 李宏波^[10]通过室内切桩试验, 证明了盾构直接切削大直径钢筋混凝土桩基的可行性, 并成功应用于深圳地铁切桩工程; 袁大军^[11]开展了苏州富水软弱细砂地层下的全断面切桩工程, 连续切削穿越 14 根直径 1 000~1 200 mm 桩基; 陈海丰等^[12]以苏州地铁项目为依托, 实现了 14 根 1 200 mm 桩基的连续切削作业, 提出了切削参数的变化特征和控制措施; 王飞等^[13]基于苏州地铁 2 号线切桩工程, 左右线各切削通过 7 根 1 200 mm

桥桩, 提出了切桩刀盘配置方法及撕裂刀的切桩可行性; 吴志峰等^[14]通过切削大直径桩基的模型试验研究了滚刀和切刀的切桩性能并建立了相关的评价体系; 廖秋林等^[15]以绍兴地铁切桩工程为依托研究了软流塑地层盾构撕裂刀切削群桩的切削效果及受力特征; 岳振欣和王志伟^[16]以郑州地铁 6 号线为工程背景研究了盾构穿越既有车站围护桩的磨桩方案并提出了相对应的关键控制技术; 李鸿^[17]研究了砂土互层盾构小半径磨桩的控制措施, 并提出了相关施工技术的优化方案; 万宝林^[18]针对盾构穿越既有车站围护桩出现的变形问题, 分析了盾构掘进参数、地面加固措施等施工参数并提出相对的控制措施; 付魁^[19]分析了盾构切群桩复合地基本过程中的房屋沉降数据和施工参数, 并给出了相应变形控制建议; 王立新等^[20]以西安地铁 1 号线下穿高铁线实际工程为依托, 研究了盾构隧道下穿高铁路基的沉降变形相应规律。

现有盾构切桩工程实例中, 均是逐根、全断面切桩, 排桩、悬臂入侵隧道的案例鲜有报道。实际工程中, 盾构直接切削局部入侵隧道的排桩受力形

收稿日期: 2024-01-25

基金项目: 中国科学院重点部署项目(ZDRW-ZS-2021-3-1)

作者简介: 宋跃均(1982—), 男, 重庆人, 高级工程师, 研究方向为工程建设管理; 通信作者杨昊(1988—), 男, 辽宁营口人, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为城市轨道交通、冻结技术研究与管理; 廖秋林(1977—), 男, 江西吉安人, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为地铁、隧道与基坑工程; 梁博阳(1998—), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向为地铁隧道; 甄浩天(1995—), 男, 河北保定人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为城市地下空间工程。

式、控制要求以及钢筋破断形式均与已往全断面入侵的单独桩基有较大的差异。

本文以绍兴某区间隧道工程为依托,从盾构机选型、刀盘刀具配置、盾构施工控制、地表沉降、钢筋混凝土渣样、刀具磨损等方面展开研究,制定刀具配置准则,明确盾构施工控制要求,实现了盾构4次切削穿越直径0.8 m的钢筋混凝土悬臂排桩(共计29根),以期为相似工程提供借鉴。

1 工程概况

绍兴地铁某区间隧道线路与既有3座地下通道桩基础发生冲突,排桩悬臂入侵区间隧道。地下通道为单跨矩形闭合框架结构,净空4.25 m,覆土3.32 m,通道长93 m,与隧道净距11 m。侵入隧道的围护桩共计29根,桩径800 mm,桩间距1.1 m,桩长22.5 m,左线侵入15根,右线侵入14根。区间线路的最大坡度为26‰,最小曲线半径 $R=410$ m。

冲突区域地层为软/流塑地层,以4③层粉质黏土夹粉土、5②粉质黏土为主,土层物理参数见表1。该地层土质较软,盾构切削桩基时提供的支撑作用力较小,桩体易产生整体水平侧移,引起地表沉降或塌陷。

表1 作业土层物理力学参数

参数	4③粉质黏土夹粉土	5②粉质黏土
天然含水率/%	37.6	45.5
天然密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.97	1.89
土粒比重	2.74	2.75
液限/%	43.5	38.9
塑限/%	25.8	28.3
塑性指数	17.7	20.1
液性指数	0.92(软塑)	1.62(流塑)
初始孔隙比	1.06	1.25
黏聚力/kPa	37.0	34.0
内摩擦角/(°)	30.7	16.1
渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	6.93×10^{-7}	7.95×10^{-7}

围护桩配筋加密区长13 m,配筋为18Φ25,非加密区长9 m,配筋为9Φ25,如图1所示。地下通道围护结构两侧桩体悬臂侵入隧道3.8~4 m,如图2所示。

2 盾构选型及刀具配置

经前期调研,结合实际工况,盾构机采用土压平衡盾构机^[14],刀盘选用6辐条+小面板,盾构机详细参数见文献^[15],选定撕裂刀作为主要切桩刀具,镶齿滚刀作为边缘保径刀具,见表2,刀盘布置如图3所示。

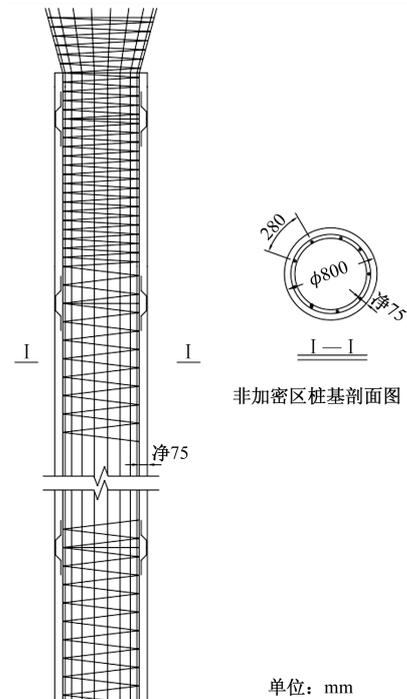


图1 桩基配筋剖面图

表2 刀具配置

刀具类型	数量/把	刀高/mm	轨迹半径/mm	刀间距/mm	
撕裂刀	中心双联	12	160	70~1 058	70~92
	单刃可换	24	160	1 145~985	80
	单刃焊接	18	140	2 585~3 490	27~80
边缘滚刀	12	160	3 064~3 490	13~69	
边缘刮刀	24	115	3 020~3 485	—	
切刀	32	115	1 200~2 880	170~220	

3 地基加固与盾构掘进控制

3.1 地基加固

软流塑地层自稳能力差,介质胶结强度低。为控制地表变形和桩体位移,盾构切桩前采用全方位高压喷射工法(metro jet system, MJS)进行地基加固。对桩体入侵隧道顶部及底部3 m范围和桩周3 m内采用MJS工法加固桩基后背土,围护桩位于第Q4、Q5加固区,如图2所示,加固方法详见文献^[15]。

3.2 盾构掘进控制

盾构施工前,明确切桩控制准则:“慢推速,中转速,小扭矩,严控浆,早补强,勤量测”。

如图4~图6所示,通过配置减速泵控制推进速度小于5 mm/min,远小于正常段掘进速度。以图4为例,右线第3断面、第6断面桩基位于1环管片(桩基直径0.8 m,管片宽度1.2 m),切桩过程连续进行,左线第3断面、第6断面桩基跨两环管片,

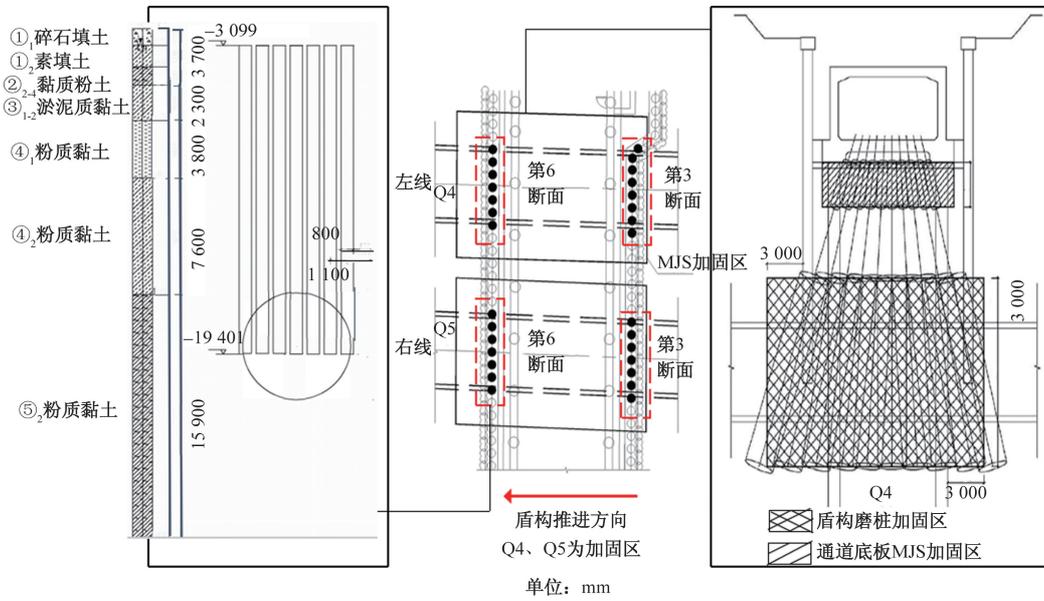


图2 围护桩侵入隧道示意图



(a) 左线刀盘



(b) 右线刀盘

图3 刀盘刀具布置

施工过程中,需进行一环管片的拼装(速度为0)。为分析推进速度对切桩效果的影响,左线第3断面、第6断面管片拼装前推进速度控制在5~10 mm/min。

由图4~图6可知,右线推速介于2~6 mm/

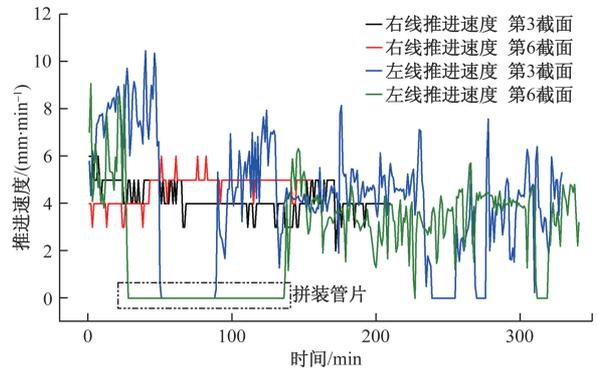


图4 切桩推进速度

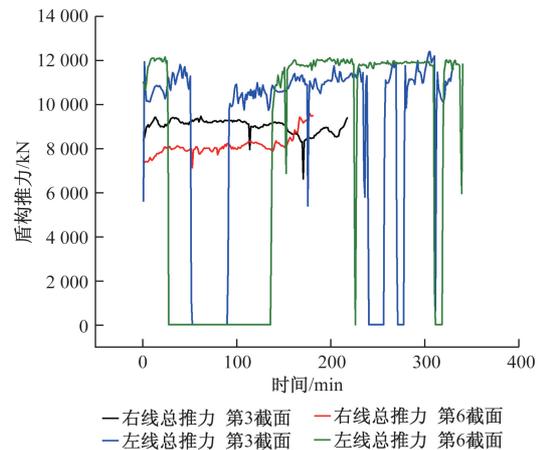


图5 切桩推力

min,最大推力9 569 kN,刀盘平均转速0.86 r/min,刀盘扭矩介于1 028~1 719 kN·m;左线推进速度试验阶段为5~10 mm/min,正常掘进速度3~5 mm/min,推力10 000~12 000 kN,刀盘转速

0.8~0.95 r/min, 扭矩 1 450~3 644 kN·m。左右线上土压维持在 200 kPa 左右, 出土量控制在 50 m³。

如图 4 所示, 右线推速控制基本稳定, 平均值为 4.5 mm/min; 左线管片拼装前, 推进速度随时间呈

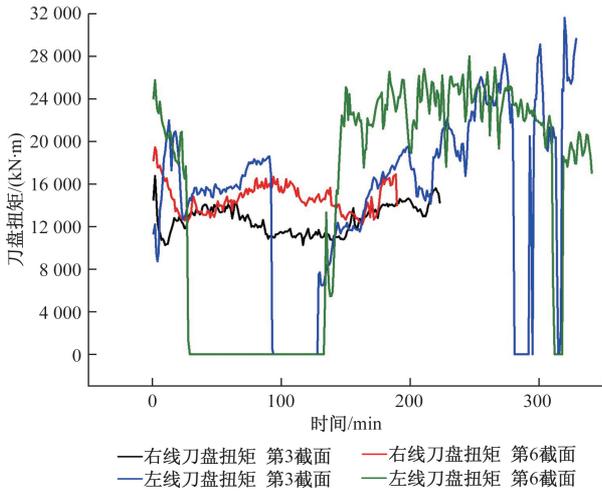
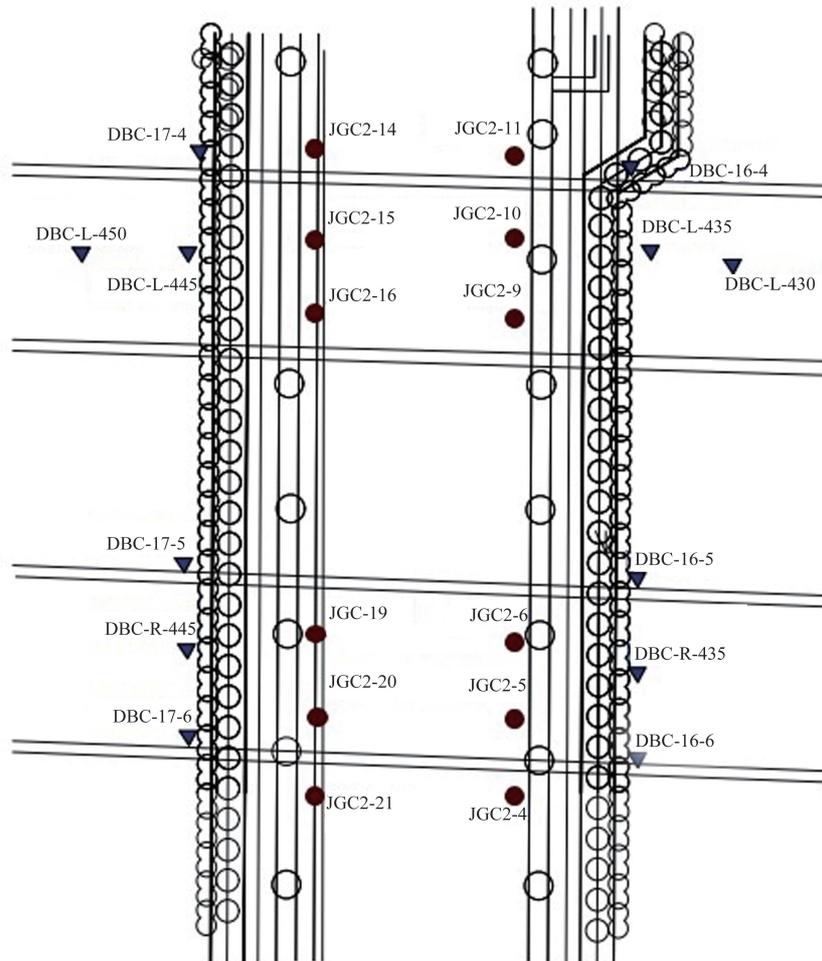


图 6 切桩扭矩



JGC 为结构点位; DBC 为地表点位

图 7 监测点位置示意图

增大趋势, 第 3 断面管片拼装结束后, 推速变化趋于稳定, 整体围绕 4.6 mm/min 波动。

4 结果分析

4.1 地表及结构沉降分析

地下通道结构及地表监测点布置如图 7 所示。

如图 8 所示, 地下通道结构位移围绕 ±1.5 mm 波动, 切桩过程中, 右线第 3 断面结构最大上浮量 1.5 mm, 随后出现下沉趋势, 第 6 断面结构上浮 1 mm, 位移平稳; 左线结构位移整体平稳, 切桩后期第 3 断面呈上浮趋势, 第 6 断面呈下沉趋势, 平均沉降 0.93 mm, 最大沉降 1.5 mm。

如图 9 所示, 左、右线地表沉降地表隆起小于 3 mm, 沉降小于 2 mm。切桩过程中, 右线第 3 断面、第 6 断面地表沉降在 1.5 mm 波动; 左线地表第 3 断、第 6 断面地表沉降在 -1.5~2 mm。地表与结构变化规律相似。

综合分析结构及地表沉降变化规律, 左右线差异不明显。

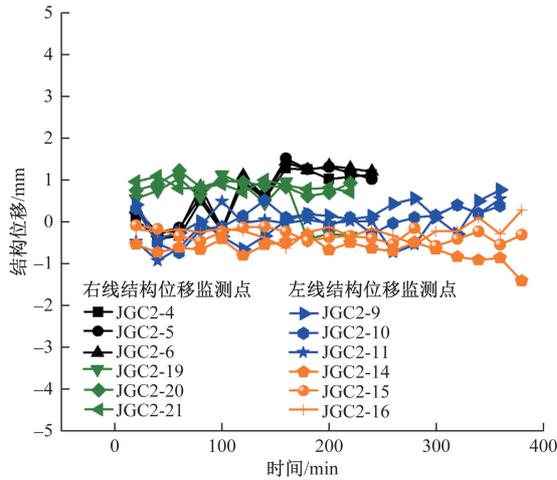


图8 结构变形规律

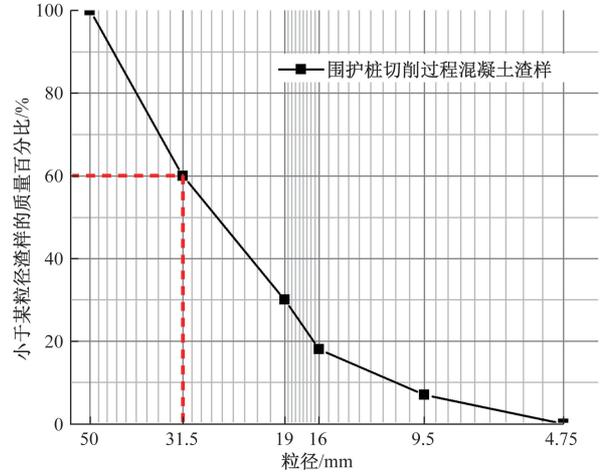


图10 粒径级配累积曲线

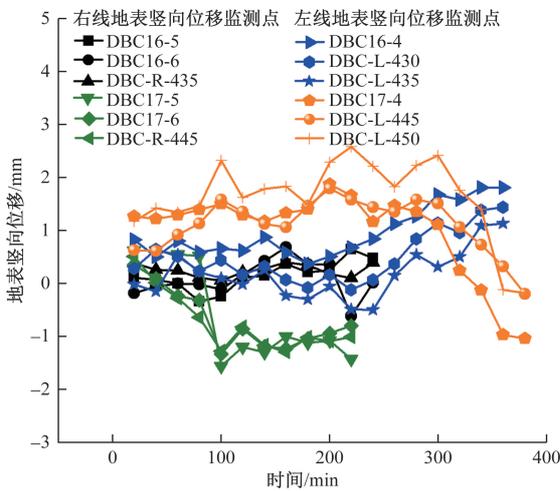


图9 地表变形规律

表3 钢筋长度统计

分类	钢筋数量/根			
	$L < 60$ cm	$60 \text{ cm} \leq L < 90$ cm	$90 \leq L < 120$ cm	$L \geq 120$ cm
左线	15	16	13	19
右线	10	9	11	10

4.2 混凝土切削效果分析

混凝土渣样经清洗和分类后,得到混凝土粒径级配累计曲线,如图10所示。渣样粒径均小于50 mm,粒径小于31.5 mm占比达到60%,而粒径小于9.5 mm仅占7%。实现了刀具对混凝土桩的有效切割,且破碎体能有效通过螺旋输送机排出。

4.3 钢筋切削效果分析

盾构切削悬臂排桩后,对螺旋机输排出的钢筋进行收集与测量统计,排出的钢筋分为长度 $L \leq 60$ cm、 $60 \text{ cm} < L \leq 90$ cm、 $90 \text{ cm} < L \leq 120$ cm、 $L > 120$ cm 4组,见表3。左右线共收集到103根钢筋,最长钢筋167 cm,最短28 cm。

如图11~图13所示,钢筋切口及断口形态可划分为3类:剪切-拉伸破坏(剪拉破坏)、弯曲-拉伸破坏(弯拉破坏)、纯剪切破坏(纯剪破坏)。各类破坏形态统计结果如下。



图11 剪拉破坏钢筋

(1)剪拉破坏是最主要的破坏形式,占比约47%。剪拉破坏是由于钢筋受到剪切应力和拉应力共同作用,钢筋在撕裂刀剪切力作用下,会沿着切削方向发生位移,可通过剪切断面中钢筋纤维方向判断筋体位移方向。剪切口的出现使钢筋承载力下降,出现应力集中区,同时伴随着撕裂缝隙的出现,最终发生钢筋断裂。形态特点为:断面既有光滑的、单向错动的剪切断裂面,又有粗糙的、有颗粒感的拉伸断裂面,如图11所示。该类破坏形态对桩体及上部结构影响较小,属可接受的破坏形态。

(2)弯拉破坏占比28%。该类破坏的钢筋断面有明显的弯曲变形,断面较粗糙,钢筋纤维拉裂特征明显,并且钢筋纤维没有明显走向。出现弯拉破

坏的钢筋主要是受到刀盘刀具的扭拉作用产生的变形拉断,该类型的破坏需要较大的拉应力,因此,桩体主筋受力大,对桩体及上部结构影响较大,属非理想作业状态,如图 12 所示。

(3)纯剪破坏占比 25%。这类钢筋断面光滑平整,且只存在单一断面,撕裂刀切削痕迹明显,钢筋纤维及其剪切方向清晰可见,钢筋主要由撕裂刀切削产生断裂,此类破坏对桩体及上部结构影响最小,是施工中最为理想的作业状态,如图 13 所示。

基于上述 3 种破坏形式,对左右线排出钢筋进行统计,最终得到左、右线钢筋不同破坏形式占比,见表 4。右线以剪拉破坏和纯剪破坏为主,占比达 75%,左线为剪拉和纯剪破坏,占比约 50%。

右线盾构机切桩时平均贯入度为 4.65 mm/r,根据钢筋断面剪切深度,可计算钢筋断裂前经历的切削次数。对所有切口进行量测、统计得到:刀具仅

切削 1 次,钢筋发生断裂的占比约 15%,比重最小,此类钢筋长度介于 106~148 cm;切削 2 次后断裂的钢筋占比最大,为 56%,长度介于 43~76 cm;切削 3 次断裂的钢筋占 26%,长度介于 55~93 cm。由此可见,随着切削次数的增加,钢筋断裂长度逐渐减小,因此,减小推进速度及贯入度有利于产生短节钢筋。

结合图 4~图 6 数据分析认为:试验段推进速度 5~10 mm/min 是左、右线钢筋的破坏形态及断筋长度出现较大差异的主要原因。

综合分析钢筋的断面形态、长度、螺旋输送机排渣效果,右线优于左线。

4.4 刀具磨损分析

如图 14 所示,盾构刀具的损伤可为两类:一类是刀具表面堆焊层的磨损变薄,为正常的磨耗;另一类是刀具合金块的崩裂,对刀具产生较大的损害,属于非正常的损耗,此类破坏对切桩效果影响较大。

(1)刀具磨耗。以刀具剩余堆焊层厚度作为评估刀具磨耗情况。刀具进场时,右线刀具堆焊层厚度为 3 mm,左线刀具堆焊层厚度为 4 mm。如图 15 所示,右线刀具堆焊层平均磨耗为 2.15 mm,左线刀具堆焊层平均磨耗为 2.40 mm,略大于右线。右线各刀具的磨耗相对集中,属于整体磨耗,左线各刀具磨耗相对分散,个别刀具出现未磨损和全部磨损的情况,不利于盾构切桩。

(2)刀具损伤。以刀具在高度方向的减少定义刀具的损伤。如图 16 所示,刀具损伤均随轨迹半径增大而增加,且这种变化规律左线明显优于右线。半径小于 1 500 mm 时,左右线损伤差异较小,均为 5 mm 左右。轨迹半径超过 1 500 mm 后,左线刀具刀尖合金缺口深度远大于右线,最大为 60.16 mm,

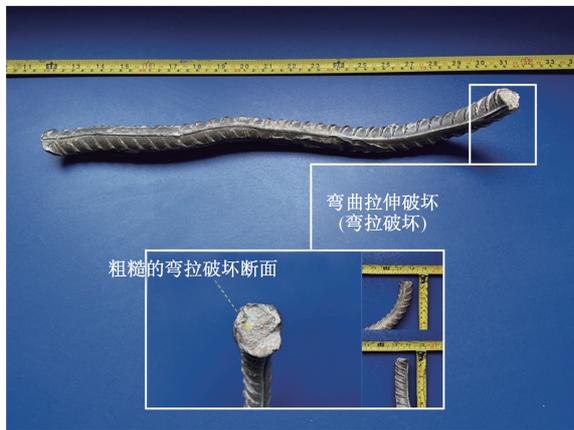


图 12 弯拉破坏钢筋



图 13 纯剪破坏钢筋

表 4 钢筋破坏形式统计

类别	占比/%		
	剪拉破坏	弯拉破坏	纯剪破坏
左线	30	53	17
右线	47	25	28



图 14 刀具损伤类型

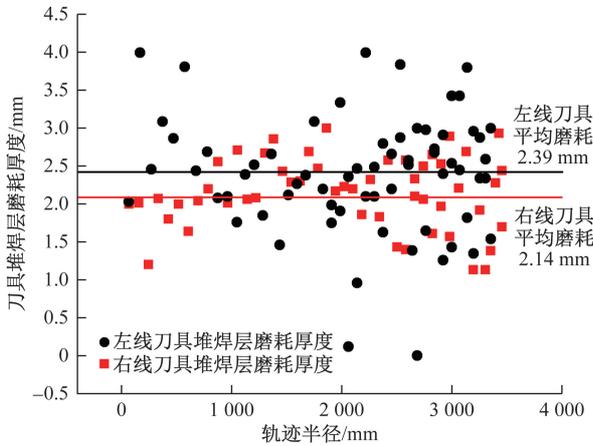


图 15 刀具堆焊磨耗

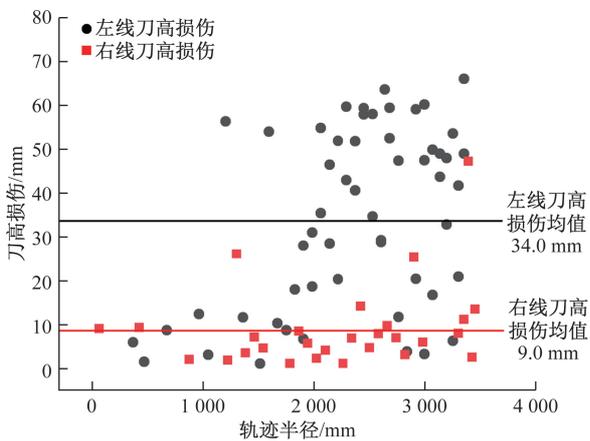


图 16 刀具损伤

平均缺口深度达到 34.0 mm,而右线刀高损伤均值仅为 9.0 mm,这种差异也间接地显现左线切桩过程刀具承担了更多的冲击荷载。

综合分析刀具的磨耗和损伤情况,右线刀具磨耗情况均优于左线。

5 结论

(1)“慢推速,中转速,小扭矩,严控浆,早补强,勤量测”盾构施工控制原则圆满完成软流塑地层盾构切削悬臂排桩施工任务,地表及结构位移满足预期要求。

(2)桩基钢筋破坏出现剪拉、弯拉、纯剪 3 种破坏形态;掘进速度对破坏形态影响较大,推进速度小于 5 mm/min 时,剪拉、纯剪破坏为主,占比约 75%;推进速度介于 5~10 mm/min 时弯拉破坏占比高达 53%。

(3)左右双线刀具磨耗为 2.1~2.4 mm;刀具损伤随轨迹半径增加而增大,左线明显高于右线,受推进速度和刀盘扭矩影响较大。

(4)软流塑地层盾构切削钢筋混凝土排桩推进参数宜为:推进速度 2~5 mm/min,刀盘转速 0.85 r/min,推力 8 500~9 500 kN,刀盘扭矩 1 000~1 500 kN·m。

参考文献

- [1] 袁大军,王飞,董朝文,等.盾构切削大直径钢筋混凝土桩基新型刀具研究[J].中国公路学报,2016,29(3):89-97.
- [2] 陈举飞,刘侯起,攸巧仙.盾构直接切削及托换后切削建筑物桩基施工技术[J].现代隧道技术,2017,54(4):201-206.
- [3] 徐前卫,朱合华,马险峰,等.地铁盾构隧道穿越桥梁下方群桩基础的托换与除桩技术研究[J].岩土工程学报,2012,34(7):1217-1226.
- [4] 刘建卫.盾构穿越城市建(构)筑物桩基的施工技术研究[J].铁道标准设计,2010,54(2):113-118.
- [5] 周传璐.全回旋套管钻机在盾构穿越桥梁拆复建施工中的应用[J].四川水泥,2021(5):266-267.
- [6] 姚先力.南京地铁二号线拔桩施工中套管钻进拔桩法的应用[J].隧道建设,2010,30(1):48-52.
- [7] 张雨,原忠权,吴俊.复合岩层盾构连续掘进磨削穿越排桩施工技术研究[J].施工技术,2016,45(S2):139-143.
- [8] 彭杨迪.盾构直接切削桩基施工技术[J].低碳世界,2020,10(3):159-160.
- [9] 李发勇.盾构掘进切削灌注桩桩基群施工关键技术:以宁波地铁3号线钱仇区间为例[J].隧道建设(中英文),2020,40(4):569-574.
- [10] 李宏波.盾构直接切削 $\phi 25$ mm主筋钢筋混凝土桩基可行性研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(12):1808-1816.
- [11] 袁大军.盾构切削大直径钢筋混凝土群桩关键技术[D].北京:北京交通大学,2011.
- [12] 陈海丰,袁大军,王飞,等.盾构直接切削大直径桩基的掘削参数研究[J].土木工程学报,2016,49(10):103-109.
- [13] 王飞,袁大军,董朝文,等.盾构直接切削大直径钢筋混凝土桩基试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,32(12):2566-2574.
- [14] 吴志峰,刘永胜,张杰,等.盾构直接切除大直径桩基的试验与工程实践[J].隧道建设(中英文),2020,40(S2):280-288.
- [15] 廖秋林,宋跃均,方建华,等.软流塑地层盾构切削钢筋混凝土桩基工程实践[J].都市轨道交通,2023,36(5):100-109.
- [16] 岳振欣,王志伟.盾构穿越既有线磨桩关键技术研究[J].建筑机械化,2023,44(8):15-17.
- [17] 李鸿.砂土互层盾构小半径磨削田头河改迁围护桩关键施工技术[J].价值工程,2023,42(4):45-47.
- [18] 万宝林.盾构穿越既有运营车站围护桩关键施工技术[J].建筑机械化,2023,44(3):24-27.
- [19] 付魁.盾构切削复合地基对既有房屋的影响[J].科学技

术与工程, 2022, 22(2): 734-739.
[20] 王立新, 窦磊明, 于归, 等. 西安地铁盾构下穿高速铁路

基沉降及变形分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22
(13): 5425-5436.

Engineering Practice of Shield Cutting Cantilevered Large-diameter Reinforced Concrete Pile in Soft Fluid-plastic Stratum

SONG Yuejun¹, YANG Hao², LIAO Qiulin², LIANG Boyang³, ZHEN Haotian²

(1. Shaoxing Railway Transit Co., Ltd., Shaoxing 312000, Zhejiang, China;

2. Beijing Urban Rail Transit Construction Engineering Co., Ltd., Beijing 100176, China;

3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To study the effects of tooling and construction parameters on the cutting of large-diameter reinforced concrete cantilever piles by shield tunneling, with a focus on a specific section of the project in Shaoxing, research on surface and structural deformations, modes of rebar failure, and tool wear was conducted. The results show that the strategy of 'slow thrusting speed, medium rotary speed, low torque, strict control of slurry, early reinforcement, and frequent measurement' successfully completed the pile cutting task. Rebar failure can be categorized into shear-pull, flexural-pull, and pure shear modes, with thrusting speed having a significant impact on the failure mode. Tool wear is approximately 2.1 to 2.4 millimeters, increasing with the radius of the trajectory, with the left side significantly higher than the right. For shield tunneling of reinforced concrete cantilever piles in soft-flow plastic strata, recommended excavation parameters are: 2-5 mm/min of thrusting speed, a disc rotation speed of 0.85 r/min, a thrust of 8 500~9 500 kN, and a disc torque of 1000~1500 kN·m. The research findings can serve as a reference for similar projects.

Keywords: soft fluid-plastic stratum; rebar cutting; cantilever pile; rebar destruction forms; cutter abrasion