

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.003



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 盾构切削钢筋混凝土桩基的动力响应

陈裕康<sup>1</sup>, 李兴高<sup>2</sup>, 梅君<sup>1</sup>, 张胜<sup>1</sup>, 张长顺<sup>1</sup>, 闵凡路<sup>3</sup>

(1. 上海隧道工程有限公司, 上海 200232; 2. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044;  
3. 河海大学土木与交通工程学院, 南京 210098)

**摘要:**为分析盾构切桩过程中的动力响应特征,以南京地铁 10 号线盾构穿越群桩工程为背景,结合数值模拟和理论分析,求解盾构切桩冲击荷载诱发的动力响应。在刀盘上安装振动传感器,对盾构切桩刀盘动力响应进行监测。结果表明:当盾构以 5 mm/min 左右的推进速度低速切削钢筋混凝土桩基时,推力和扭矩变化较小,且由于桩基为圆柱形,切削断面缓慢增大,推力和扭矩表现出明显的滞后性,整个切桩过程中,推力和扭矩峰值约为初始值的 1.3 倍和 1.25 倍;数值模拟结果表明,在刀具多次切削作用下,钢筋切口表现为挤压-拉伸断裂,在冲击荷载作用下,刀盘轴承位置出现多个动力响应波峰,峰值接近 0.6g;实测数据表明,在冲击荷载作用下,刀盘轴承位置振动加速度出现连续多次峰值,时间间隔约 0.1 s,幅值接近 0.5g,实测冲击响应波形与理论解高度相似,二者之间相互验证,该波形可作为多把刀具连续切削钢筋的典型特征;在整个切桩过程中,加速度响应有效值、峰值显著升高,最大强度约为切削黏土地层时的 2 倍,且在切桩完成后迅速掉落。

**关键词:**盾构切桩;钢筋混凝土桩;动力响应;时频特征;实时监测;数值分析

**中图分类号:**TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2026)02-0130-10

## Dynamic response of shield cutting reinforced concrete pile foundation

CHEN Yukang<sup>1</sup>, LI Xinggao<sup>2</sup>, MEI Jun<sup>1</sup>, ZHANG Sheng<sup>1</sup>, ZHANG Changshun<sup>1</sup>,  
MIN Fanlu<sup>3</sup>

(1. Shanghai Tunnel Engineering Company, Shanghai 200232, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, P. R. China)

**Abstract:** The present study investigates the dynamic response characteristics during the shield cutting pile process. The dynamic response induced by shield cutting pile impact load was solved by combining numerical simulation and theoretical analysis with the background of the shield crossing group pile project of Nanjing Metro Line 10. Concurrently, vibration sensors were installed on the cutterhead to monitor the dynamic response of the shield cutting pile. The results of the study indicate that: (1) When the shield cuts the reinforced

**收稿日期:**2019-10-20

**基金项目:**国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB057802)

**作者简介:**陈裕康(1975-),男,高级工程师,主要从事轨道交通工程建设管理研究,E-mail:13218376@qq.com。

李兴高(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:lxg\_njtu@163.com。

**Received:** 2019-10-20

**Foundation item:** National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2015CB057802)

**Author brief:** CHEN Yukang (1975-), senior engineer, main research interest: construction management of rail transit projects, E-mail: 13218376@qq.com.

LI Xinggao (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: lxg\_njtu@163.com.

concrete pile foundation at a low speed of approximately 5 mm/s, the thrust and torque changes are small, and the thrust and torque show obvious hysteresis because the pile foundation is cylindrical and the cutting section increases slowly. The peak thrust and torque are about 1.3 times and 1.25 times the initial value. (2) As demonstrated by the simulation results, the rebar incision presents a compression-tension fracture under the action of multiple cuts by the cutter. Under the impact loading, multiple dynamic response waveforms appear at the cutterhead bearing position with peaks close to 0.6g. (3) The measured data show that under the impact load, the time domain curve of cutterhead vibration acceleration shows several consecutive peaks with an interval of about 0.1 s and an amplitude of 0.5g. The measured impact response waveform is highly consistent with the theoretical solution and they verify each other. The waveform can be used as a typical characteristic of continuous cutting of steel bars by multiple cutters. (4) During the whole pile cutting process, the acceleration response and peak value are significantly higher, and the maximum intensity is about twice as high as when cutting clay ground. After this, the response will undergo a rapid decline.

**Keywords:** shield cutting pile; reinforced concrete pile; dynamic response; time-frequency characteristic; real-time monitoring; numerical analysis

近年来,随着地下空间的不断开发利用,盾构法被广泛用于地下隧道修建中<sup>[1-3]</sup>。中国地下工程的发展速度较快,各种地下结构之间相互交错,在盾构隧道施工过程中往往会遇到穿越既有桥梁桩基等构筑物的工况。传统方法往往采用开挖竖井凿除桩基、改线避让等方式,不仅成本极高,且严重影响工期。随着盾构施工技术的不断发展,采用盾构直接切削钢筋混凝土桩基已经被证明完全可行。

在盾构刀具切削桩基试验方面,王飞等<sup>[4]</sup>依托苏州地铁2号线工程,开展了盾构切削直径1200 mm桩基的现场试验,分析了掘进参数特征以及切桩效果。李宏波<sup>[5]</sup>依托TBM模态掘进试验平台,开展了滚刀和撕裂刀切削桩基室内试验,对钢筋断裂形态、掘进参数、刀具损坏及刀盘振动进行分析。吴志峰等<sup>[6]</sup>认为,盾构切除桩基时宜将推进速度控制在3~5 mm/min,刀盘转速控制在1.0~1.2 r/min,以一种“低推进速度,高转速”的模式切桩。许华国等<sup>[7]</sup>通过室内试验揭示了滚刀和撕裂刀切削钢筋混凝土桩基的原理,提出了滚刀和撕裂刀安装高度组合配置方案。许宇等<sup>[8]</sup>开展了盾构切刀切削混凝土的室内试验,探究了刀具形状、切深和试件强度等因素对切削效果的影响。在数值仿真方面,袁大军等<sup>[9]</sup>基于LS-DYNA软件对贝壳形撕裂刀切削钢筋混凝土进行了仿真,明确了刀具与钢筋混凝土相互作用机理以及切削过程温度场特征。庄欠伟等<sup>[10]</sup>采用SPH-FEM耦合方法进行磨料水射流切割钢筋混凝土桩基的研究,明确了磨料水射流切削钢筋和素混凝土的效果和切割机理。刘军等<sup>[11]</sup>基于PFC3D软件建立了盾构切削GFRP筋混凝土围护桩的离散元模型,指出应控制好盾构推力,避免GFRP筋

混凝土围护桩整体倒塌。在盾构切桩对周围环境的影响方面,周济民<sup>[12]</sup>以北京地铁16号线盾构下穿万泉河高架桥桩基群为背景,分析了盾构切桩造成的差异沉降。唐仁等<sup>[13]</sup>以某盾构下穿住宅楼直接切桩工程为背景,分析了盾构下穿住宅楼直接切桩通过后剩余桩基的沉降以及承载力。白东锋等<sup>[14]</sup>建立了考虑桩长减短、桥桩竖向刚度变化以及施工扰动等因素的残余桩基承载力和所受竖向荷载计算公式,并与工程实测数据进行对比验证。依托郑州地铁5号线,付魁<sup>[15]</sup>对盾构切削群桩全过程中的房屋沉降数据和施工参数进行分析,并给出相应的变形控制措施。

目前针对盾构切削钢筋混凝土桩基的研究主要集中在掘进参数变化、切削机理、刀具配置以及对周围环境的影响等方面,对于刀具与钢筋混凝土桩基相互作用诱发的盾构动力响应研究较少,且尚无对实际工程中切桩全过程刀盘动力响应的相关研究。而盾构掘进动力响应对刀具与桩基之间的相互作用极其敏感,可以很好地识别切桩进程以及刀具与桩基的相互作用特征。笔者以南京地铁10号线盾构穿越青年河群桩工程为背景,结合数值模拟和理论分析,求解盾构切桩冲击荷载诱发的动力响应,并对盾构穿越群桩全过程刀盘动力响应进行实测。

## 1 工程概况

### 1.1 工程地质

南京地铁10号线二期工程西起安德门站,东至石杨东路站,是南京市轨道交通线网中东西走向的一条大运量城区干线。左线隧道和右线隧道分别

于 1 095 环、1 120 环、1 083 环、1 107 环 4 个位置下穿青年河桥桩基。穿越段盾构位于③-1b1-2 粉质黏土、④-3b1-2 硬塑粉质黏土,采用 2 台中建隧道装备制造有限公司生产的  $\phi 6 480$  mm 复合式土压平衡盾构机施工。盾构穿越群桩位置关系如图 1 所示。

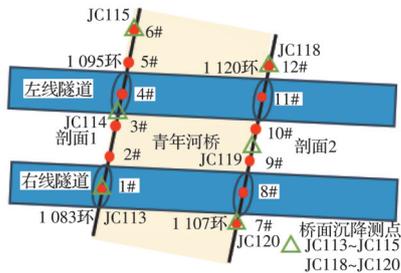


图 1 盾构穿越群桩平面图

Fig. 1 Plan view of shield through group piles

青年河桥桩基采用  $\phi 120$  cm 钢筋混凝土钻孔灌注桩,南北桥梁各设置 2 排桩基,每排 6 根桩基。桩基持力层为中风化泥岩。孔灌注桩为 C25 钢筋混凝土结构,主筋直径为 25 mm 螺纹钢,共 20 根,桩基配筋如图 2 所示。

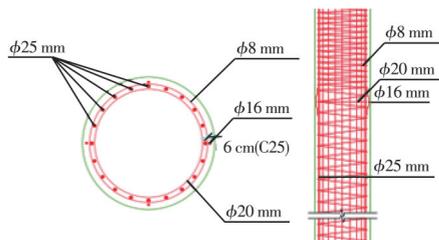


图 2 桩基配筋示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pile foundation reinforcement

## 1.2 刀具设置

刀盘及刀具的布置和选材适应工程地质条件和工程特点,针对本工程盾构在软土地层中切削青年河桥时钢筋混凝土桩基的工况,刀盘采用复合型刀盘,脱困扭矩为  $8 320 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,开口率为 40%,中心开口率为 50%,并增加刀盘强度及其耐磨性。刀具采用超硬的硬质合金材料制作,切桩专用弧形撕裂刀有以下特点:

1) 刀头两端大合金采用大圆角,以避免合金因碰撞而导致的尖角破损。

2) 合金间母材开槽镶嵌硬质合金,使刀具顶部全部由合金覆盖,充分保证刀具的耐磨性。

3) 较窄的刃部便于切入并划开桩基,起到先行撕裂破碎的作用。

弧形撕裂刀几何尺寸如图 3 所示。

## 1.3 盾构切桩全过程掘进参数分析

在盾构穿越桩基过程中,需做到掘进效率与刀

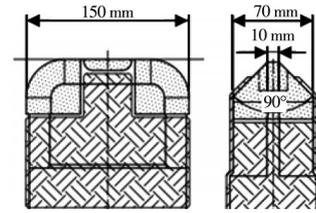


图 3 弧形撕裂刀几何尺寸

Fig. 3 Geometric dimensions of curved rip cutters

具切桩性能相统一。为保证切削效率,在到达桩基里程前将推进速度控制在  $30 \text{ mm}/\text{min}$  左右,到达桩基设计里程位置时降低推进速度至  $5 \text{ mm}/\text{min}$  左右,同时控制刀盘转速在  $1.3 \text{ r}/\text{min}$  左右。

图 4 为盾构切削在 1 108 环穿越 8# 桩时的详细掘进参数,当盾构以  $5 \text{ mm}/\text{s}$  左右的推进速度低速切削钢筋混凝土桩基时,初始推力约  $10 867 \text{ kN}$ ,初始扭矩约  $2 400 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,切桩过程中推力和扭矩变化较小,且由于桩基为圆柱形,切削断面缓慢增大,推力和扭矩的变化表现出明显滞后性,峰值为  $14 221$ 、 $3 000 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ,推力和扭矩峰值约为初始值的 1.3 倍和 1.25 倍。由于掘进速度较慢,切桩过程中推力和扭矩均远低于正常掘进下的推力和扭矩,意味着采用的切桩参数可行,不会出现由于推力或扭矩过高导致的刀盘卡死问题。但刀具切削钢筋混凝土桩基时可能会产生较高温度,导致刀盘电机因过热而断电。磨桩过程中应充分注入泡沫,减少刀具与钢筋的摩擦,降低刀盘温度,防止刀盘电机因过热断电。

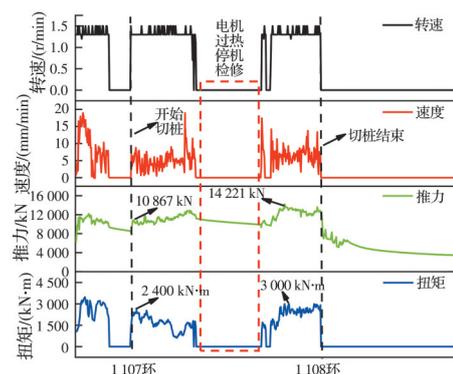


图 4 穿越 8# 桩基全过程详细掘进参数

Fig. 4 Detailed tunneling parameters during the whole process of crossing No. 8 pile foundation

尽管通过推力和扭矩的变化能够判断盾构是否切桩,但在刀具与桩基作用初期,推力扭矩变化并不明显,且刀具切桩完成后刀盘内钢筋的缠绕也会进一步导致推力扭矩升高,无法实时准确分析盾构切桩进程。工程实践表明,很难通过推力和扭矩判断刀具是否接触到桩基,且具有较大的滞后性。

## 2 盾构切桩过程动力响应理论解

### 2.1 单刀切削冲击荷载求解

#### 2.1.1 模型建立

为明确弧形撕裂刀切削钢筋混凝土耦合体动态响应过程,探明刀具切削钢筋混凝土时的冲击荷载响应规律,建立弧形撕裂刀切削钢筋混凝土耦合体三维模型。综合考虑计算效率和精度,仅对弧形撕裂刀的刀刃合金部分进行建模,同时对钢筋混凝土中心切削区域进行网格加密。仿真模型尺寸为 50 mm×45 mm×125 mm,其中钢筋直径为 25 mm,混凝土保护层厚度为 6 mm,模型底面和两端面被设定为固定无反射边界,其余面为自由边界。弧形撕裂刀切削钢筋混凝土耦合体仿真模型如图 5 所示。

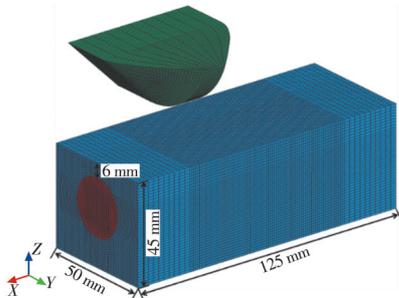


图 5 弧形撕裂刀切削钢筋混凝土耦合体模型

Fig. 5 Model of reinforced concrete composite cut by curved ripping cutter

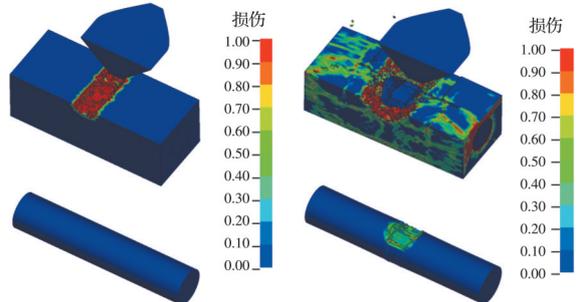
#### 2.1.2 动态损伤本构选取

混凝土和钢筋均采用动力学本构建模,其中混凝土采用 RHT 本构,钢筋采用 J-C 本构,确保计算所得冲击荷载的准确性。RHT 本构模型动态响应及损伤理论极其复杂,参数众多,RHT 本构损伤理论及仿真中的详细参数,可参考文献[16-19]。对钢筋 J-C 本构模型,取 45 号钢本构参数,J-C 本构的详细原理和参数取值见文献[9]。结合已有工程实际,取贯入度 3~4 mm、刀盘转速 1.2~1.4 r/min 作为切桩掘进参数。盾构机刀盘半径为 3.24 m,当设定刀盘转速为 1.3 r/min 时,刀盘最外侧刀具切削速度达 0.44 mm/s。因此,仿真中设置单次切削深度为 3 mm,切削速度为 0.3 m/s,基于重启动技术进行多次切削仿真。

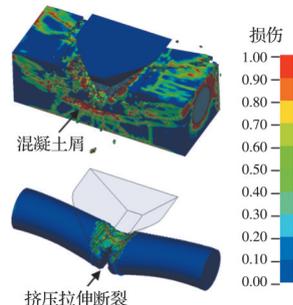
#### 2.1.3 切削全过程钢筋混凝土动态响应

钢筋混凝土耦合体动态损伤全过程如图 6 所示。由图 6(a)可知,第 2 次切削混凝土(即切入混凝土 6 mm)完成后,撕裂刀未与钢筋接触,在混凝土保护层上留下明显的破碎区。由图 6(b)可知,第 2 次切削钢筋(即切入钢筋 6 mm)后,混凝土已发生严重损伤,混凝土对钢筋已失去约束固定作用,钢

筋受到撕裂刀的切削作用产生向下弯曲,钢筋表面形成 V 形切口。由图 6(c)可知,在切削深度达到 18 mm 时,钢筋严重弯曲,V 形切口下部发生拉伸断裂,钢筋切口呈挤压-拉伸断裂失效模式。



(a) 累计切削 6 mm (b) 累计切削 12 mm



(c) 累计切削 18 mm

图 6 钢筋混凝土耦合体损伤断裂全过程

Fig. 6 Damage and fracture process of reinforced concrete composite

图 7 为切削全过程刀具受力曲线,单次切削时间为 250 ms,0~500 ms 内为撕裂刀仅切削混凝土,刀具受力极小。500 ms 以后撕裂刀同时切削混凝土和钢筋,随着切削深度的增加,切削力呈先增大后减小的趋势。在切削深度为 12 mm 时,切削力达到峰值,峰值冲击力持续时间极短,在 250 ms 以内。因此,将此冲击荷载作为单把刀具与钢筋接触时的典型冲击荷载。

### 2.2 冲击荷载作用下盾构动力响应理论解

刀盘的冲击动力响应为多把刀具连续切削钢

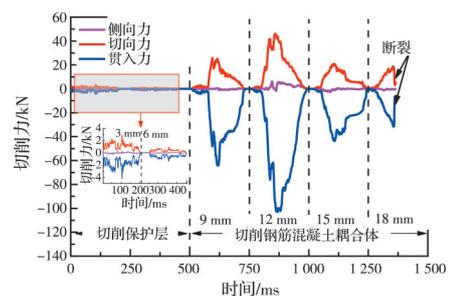


图 7 切削钢筋混凝土耦合体受力曲线

Fig. 7 Force curves of cutting reinforced concrete composite

筋诱发,可通过几何分析确定刀盘上一段时间内切削钢筋的刀具数量,最终作用在刀盘上的冲击荷载取多把刀具荷载的累加值。图 8 为盾构刀具切削钢筋笼第 1 根主筋时的几何关系,该工况来源于盾构切削 8# 桩工程实际。桩基偏移刀盘中心 360 mm,根据刀盘上刀具布置和刀具与第 1 根钢筋的位置关系,当刀盘转速为 1.3 r/min 时,同一时刻只有一把刀具切削第 1 根钢筋,刀盘上相邻刀具切削钢筋的间隔为 83 ms,因此,取冲击荷载的作用时间间隔为 83 ms。图 9 为 1 s 内作用在刀盘上的冲击荷载,该荷载为 1 s 内单把刀具冲击荷载的累加结果。

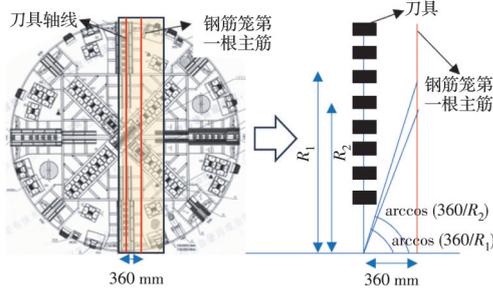


图 8 刀具与钢筋笼第 1 根主筋相对位置

Fig. 8 Relative position of the cutter and the first main bar of the reinforcement cage

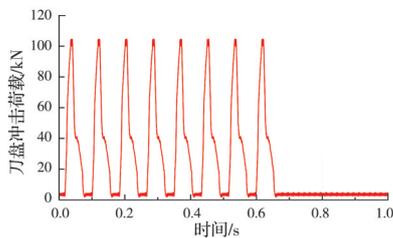


图 9 1 s 内作用在刀盘上的冲击荷载

Fig. 9 Impact load acting on the cutterhead within 1 s

图 10 为盾构掘进方向动力学响应的简化理论模型。利用集中质量法,将刀盘、轴承和盾体各个部分等效为集中的质量点,建立刀盘-轴承-盾体系统在掘进方向的等效动力学模型。结合盾构机实际情况,参考文献[20-22]中的研究成果,取弹性系数  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别为  $1.44 \times 10^{10}$ 、 $3.6 \times 10^{12}$ 、 $1.0 \times 10^{12}$  N/m, 阻尼系数  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  分别为  $1.15 \times 10^6$ 、 $7.0 \times 10^5$ 、 $1.0 \times 10^8$  N·s/m。刀盘质量  $m_c$ 、刀盘轴承质量  $m_r$ 、盾体质量  $m_d$  分别为 60 000、70 000、255 000 kg。

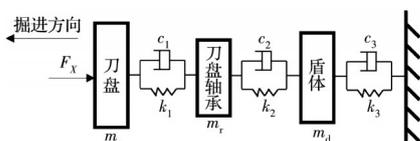


图 10 盾构掘进方向动力学响应理论模型

Fig. 10 Theoretical model of dynamic response in shield tunneling direction

以刀盘上的冲击荷载作为输入荷载,通过 Newmark 法求解盾构掘进方向动力学响应理论模型。图 11 为 Newmark 法求解过程,时间间隔  $\Delta t$  与仿真中的数据保持间隔相同,取 0.000 332 s,计算得到冲击荷载作用下刀盘轴承位置的加速度响应理论解,如图 12 所示。由图 12 可知,在多把刀具连续切削作用下,刀盘轴承位置将出现多个冲击波峰,冲击荷载诱发的刀盘动力响应接近 0.6g。

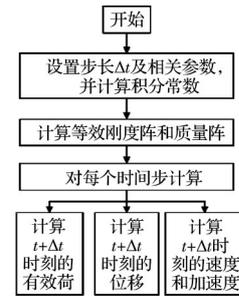


图 11 Newmark 法求解过程

Fig. 11 Solution process of the Newmark method

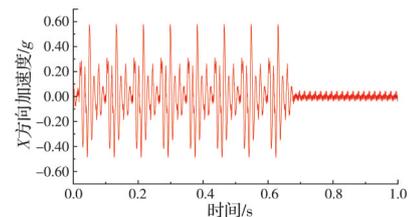


图 12 刀盘轴承位置加速度响应理论解

Fig. 12 Theoretical solution of acceleration response at the cutterhead bearing position

### 3 盾构切桩冲击荷载作用下动力响应实测

#### 3.1 动力响应监测方案

为明确弧形撕裂刀切削桩基诱发盾构动力响应的机理,分别对盾构空转状态下的动力响应、切削黏土状态下的动力响应和穿越 8# 桩基全过程的动力响应进行监测。在盾构机上设置 2 个测点,测点 1 位于刀盘主轴承上方,测点 2 位于盾尾千斤顶位置。测点上安装 iVS101 振动加速度传感器,该传感器可同时监测 X、Y、Z 三个方向的振动加速度,信号实时采集系统用于收集数据,采样时间间隔被设定为 1 min,每次采集时长为 1 s,1 s 内记录的样本数量为 2 000 个,现场测点布设如图 13 所示。

#### 3.2 刀具切削黏土地层动力响应

在黏土地层推进过程中对刀盘振动进行监测。图 14 为 1 号测点切削黏土地层时的时域特征,由图 14 可知,加速度幅值基本在  $2 \text{ m/s}^2$  以内。刀盘的加速度响应主要来源于盾构机械振动和刀具切削黏土地层的荷载。同时,由于刀盘与土体之间的黏附



图 13 现场振动传感器安装

Fig. 13 Vibration sensor installation on site

挤压作用,极易在刀盘位置形成泥饼,刀盘上的泥饼与地层之间相互黏结产生的阻尼效应一定程度上降低了刀盘的加速度响应。短时傅里叶变换通过时频局部化窗口函数的方法实现将长时间的时域信号转变为时频信号,进而分析一段时间内响应频率的变化特征。考虑到X方向加速度响应最强烈,采用短时傅里叶变换对X方向加速度响应进行时频分析,结果如图15所示。由图15可知,在黏土地层中,X方向加速度响应频率分布较广泛,在200、400、600、800、1 000 Hz附近存在5个明显的响应频带。

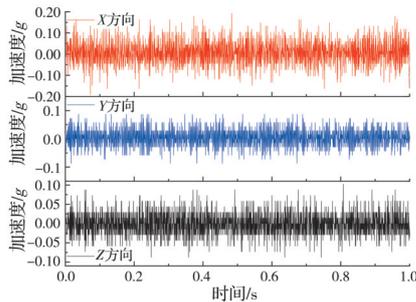


图 14 刀盘切削黏土阶段时域特征

Fig. 14 Time domain characteristics during cutterhead cutting clay

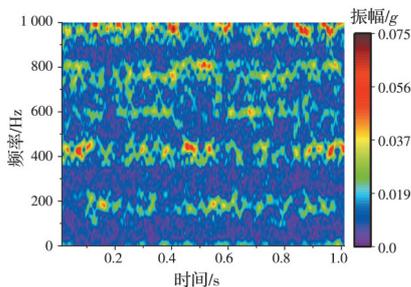


图 15 刀盘切削黏土阶段 X 方向时频特征

Fig. 15 X-direction time-frequency characteristics during cutterhead cutting clay

### 3.3 刀具接触钢筋初始阶段动力响应

刀盘切削到桩基后,撕裂刀破碎混凝土的荷载以及切削钢筋的冲击荷载将诱发刀盘剧烈振动,刀盘加速度响应可作为识别切桩状态的重要依据。

如图16所示,在对应设计里程为撕裂刀切入桩基10 cm时,测点2监测到一次时域曲线的异常振

动峰值。在0.95 s之前,X方向加速度响应处于较低水平,幅值基本维持在 $1 \text{ m/s}^2$ 以内。在0.95 s附近,X方向加速度响应出现了一个明显的加速度峰值,达 $2.19 \text{ m/s}^2$ ,该峰值在持续极短时间后迅速掉落。分析其原因,桩基混凝土保护层厚度为6 cm,此时设计里程为撕裂刀切入桩基4 cm,判断此时刀具与钢筋初次接触,此加速度峰值由撕裂刀与桩基内的钢筋相互作用产生。X方向的振动强度远高于Y、Z方向,尽管Y、Z方向在0.95 s附近也出现了轻微响应峰值,但并不明显,这意味着弧形刀具与钢筋的法向接触力最大,切向作用力则相对要小。

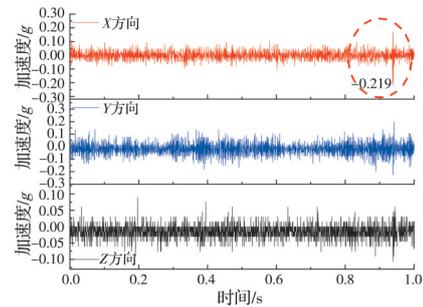


图 16 撕裂刀切削钢筋初始阶段时域特征

Fig. 16 Time-domain characteristics during initial stage of ripping cutter cutting steel bar

为分析X方向刀具与钢筋作用瞬间的响应时频特征,对X方向加速度响应进行短时傅里叶变换,如图17所示。由图17可知,在1 s监测周期内,600 Hz附近响应最为剧烈,在0.95 s附近,刀具与钢筋接触,在冲击荷载作用下,300~600 Hz内出现了明显的响应频带,该响应频带可作为判定单把刀具与钢筋接触的重要依据。

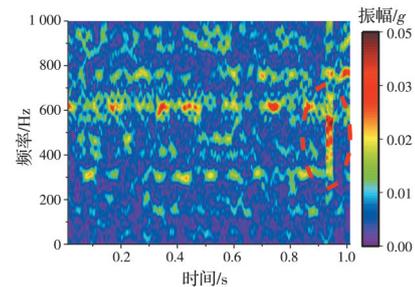


图 17 单把撕裂刀切削钢筋时频特征

Fig. 17 Time-frequency characteristics of a single ripping cutter cutting steel bars

### 3.4 刀具连续切削钢筋动力响应

随着盾构的推进,刀盘与桩基的接触面积变大,弧形撕裂刀切削钢筋的深度也逐渐增加。当推进至对应设计里程为撕裂刀切桩20 cm时,弧形刀具正在切削钢筋笼的箍筋和第1根主筋。图18为该时刻测点2的时域曲线。由图18可知,在刀具与钢筋冲击荷载激励下,3个方向盾构振动加速度出

现连续多次峰值响应,每次峰值持续时间约 0.01 s,响应峰值之间间隔约 0.1 s, X 方向加速度最大峰值接近  $5 \text{ m/s}^2$ 。这种连续多次出现加速度响应峰值的现象是刀盘上多把撕裂刀连续切削钢筋导致,可作为判断多把刀具连续切削钢筋的典型特征。图 19 为该监测周期内 X 方向的加速度响应时频图,与单把刀具切削钢筋相比,连续出现多个 100~600 Hz 的响应频带,在 0.7 s 后,刀盘上一个辐条上的刀具切削钢筋结束,冲击荷载消失,100~600 Hz 的响应频带也随之消失。

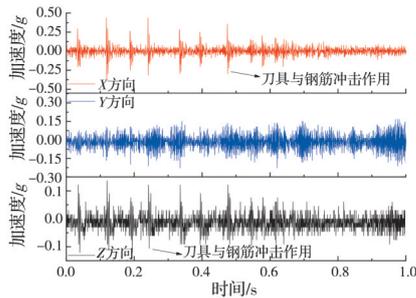


图 18 撕裂刀切入桩基 20 cm 时域特征

Fig. 18 Time-domain characteristics of the ripping cutter cutting 20 cm into the pile foundation

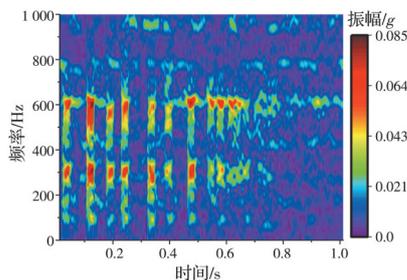


图 19 撕裂刀切入桩基 20 cm 时频特征

Fig. 19 Time-frequency characteristics of the ripping cutter cutting 20 cm into the pile foundation

现场实测 X 方向加速度响应峰值接近  $0.5 \text{ g}$ ,理论计算得到 X 方向加速度峰值接近  $0.6 \text{ g}$ ,且实测冲击响应的响应波形与理论解高度相似,两者之间相互验证。

盾构进一步推进,刀具与钢筋混凝土桩基接触面积进一步增大。图 20、图 21 为撕裂刀切入桩基 45 cm 时对应的时频特征曲线,此时撕裂刀切削的钢筋数量和混凝土面积都大量增加。如图 20 所示,多把刀具连续切削钢筋时导致的加速度响应峰值进一步增大,3 个方向都出现了明显的冲击响应,在 X 方向接近  $1 \text{ g}$ 。图 21 为该时刻 X 方向的时频图,可以发现,在刀具与钢筋接触瞬间,响应频带范围扩大到 0~600 Hz。

### 3.5 刀具切桩全过程加速度响应特征值

在切桩过程中,刀盘整体振动强度显著提升,

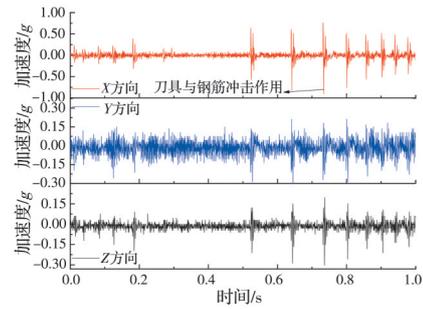


图 20 撕裂刀切入桩基 45 cm 时域特征

Fig. 20 Time-domain characteristics of the ripping cutter cutting 45 cm into the pile foundation

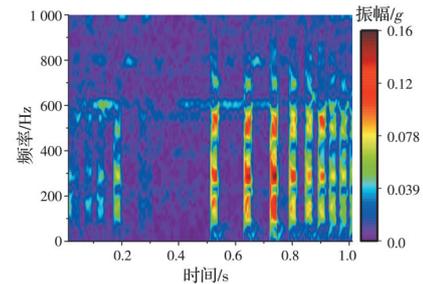


图 21 撕裂刀切入桩基 45 cm 时频特征

Fig. 21 Time-frequency characteristics of the ripping cutter cutting 45 cm into the pile foundation

可通过整体强度的变化趋势实时判断切桩进程。盾构穿越桩基过程中振动特性变化较大,可采用有效值  $X_{\text{rms}}$  和峰值  $X_{\text{p}}$  对其变化趋势进行描述。其中有效值用于描述振动能量的大小,计算式为

$$X_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x^2(n)} \quad (1)$$

式中:  $x(n)$  为时域序列,  $n=1, 2, \dots, N$ ;  $N$  为样本点数,本文取 2 000 峰值为 1 个时域曲线周期内的响应最大值,为尽可能排除数据的偶然误差,取峰值  $X_{\text{p}}$  为

$$X_{\text{p}} = \frac{X_{m1} + X_{m2} + X_{m3} + X_{m4} - (X_{n1} + X_{n2} + X_{n3} + X_{n4})}{8} \quad (2)$$

式中:  $X_{m1}$ 、 $X_{m2}$ 、 $X_{m3}$ 、 $X_{m4}$  为 1 个监测周期内 2 000 个加速度响应的 4 个最大值(正值),  $X_{n1}$ 、 $X_{n2}$ 、 $X_{n3}$ 、 $X_{n4}$  为 1 个监测周期内 2 000 个加速度响应的 4 个最小值(负值)。

分析可知, X 方向加速度响应对切桩最敏感,在此以 X 方向为例对切桩全过程有效值  $X_{\text{rms}}$  和峰值  $X_{\text{p}}$  进行分析,盾构穿越 8# 桩基全过程加速度响应有效值  $X_{\text{rms}}$  和峰值  $X_{\text{p}}$  如图 22 所示。

由图 22 可知,有效值  $X_{\text{rms}}$  和峰值  $X_{\text{p}}$  的变化趋势呈现出一致性,刀盘切削黏土地层时加速度响应特征值较小,响应峰值  $X_{\text{p}}$  维持在  $1.7 \text{ m/s}^2$  左右,有效值  $X_{\text{rms}}$  维持在  $0.6 \text{ m/s}^2$  左右。在刀具到达设计里程开始切桩后, X 方向加速度响应峰值  $X_{\text{p}}$ 、有效值  $X_{\text{rms}}$

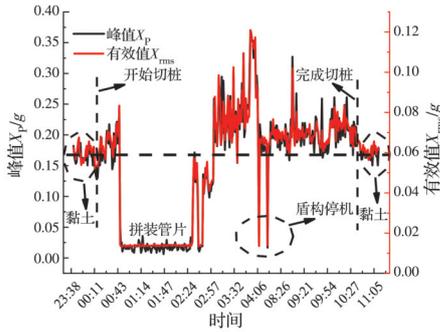


图 22 切桩全过程加速度响应特征值变化趋势

Fig. 22 Trend of acceleration response characteristic values during the whole pile cutting process

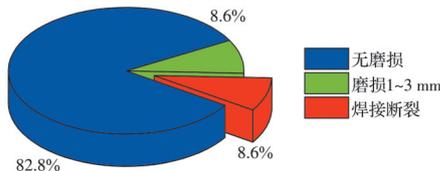
显著升高,峰值最高达  $3.8 \text{ m/s}^2$ ,为切削黏土时的 2.2 倍,有效值最高达  $1.2 \text{ m/s}^2$ ,约为切削黏土时的 2 倍,且在切桩完成后两个参数迅速掉落。由此可见,动力响应特征参数对切桩状态十分敏感,在实际工程中,可依据这两个特征参数实时判断切桩进程。

### 3.6 刀具损伤与桥梁沉降

由于工程穿越地层为黏土地层,开挖面易失稳,盾构切削完桩基后,不具备开仓检修刀具的条件。在整个区间掘进完成后对盾构左线撕裂刀磨损进行实测。考虑到盾构穿越的地层为黏土地层,磨蚀性较低,可认为刀具的损伤均来源于刀具与桩基的相互作用。70 把撕裂刀的磨损统计如图 23 所示。



(a) 弧形刀具切桩后的典型形态



(b) 损伤统计

图 23 刀具损伤统计分析

Fig. 23 Statistical analysis of cutter damage

由图 23 可知,58 把撕裂刀基本无磨损,占比 82.8%,6 把撕裂刀磨损 1~3 mm,6 把撕裂刀在冲击荷载作用下诱发合金刀刃与刀体焊接位置出现断裂,合金刀刃整体脱落。所用合金刀刃与刀体焊

接强度为不低于 208 MPa,因此,在未来的切桩工程中,焊接强度需进一步提高,防止冲击荷载诱发刀具断裂。

双线隧道穿越桥梁后典型测点的沉降如图 24 所示。由图 24 可知,右线隧道穿越桩基后桥面最大沉降接近 3 mm,左线隧道穿越桩基后沉降进一步增大,桥面最大沉降接近 7 mm。总体而言,切桩诱发的桥梁沉降被控制在 10 mm 以内。

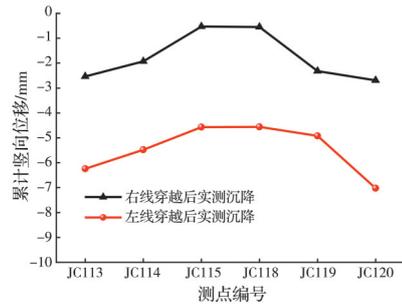


图 24 桥梁测点累计沉降

Fig. 24 Cumulative settlement of bridge measurement points

## 4 结论

在盾构切桩过程中,由于推进速度较低,推力和扭矩的变化并不显著,难以准确实时判定盾构切桩进程。刀盘动力响应对刀盘荷载十分敏感,可用于判别刀具与钢筋混凝土桩基的相互作用状态。为探究盾构切桩过程中动力响应变化规律,基于数值模型和理论分析得到盾构切削钢筋混凝土桩基动力响应理论解,对盾构切桩全过程动力响应进行监测分析,得到以下主要结论:

1) 当盾构以  $5 \text{ mm/s}$  左右的推进速度低速切削钢筋混凝土桩基时,推力和扭矩变化较小,且表现出明显的滞后性,在整个切桩过程中,推力和扭矩峰值约为初始值的 1.3 倍和 1.25 倍。

2) 仿真结果表明,在刀具多次切削作用下,钢筋切口表现为挤压-拉伸断裂。在多把刀具连续切削作用下,刀盘轴承位置出现多个冲击波峰,冲击荷载诱发的刀盘动力响应接近  $0.6g$ 。

3) 实测数据表明,在多把刀具连续切削钢筋的冲击荷载作用下,刀盘轴承位置加速度出现连续多次峰值,间隔约  $0.1 \text{ s}$ ,幅值接近  $0.5g$ ,实测冲击响应波形与理论解高度相似,两者之间相互验证,该波形可作为多把刀具连续切削钢筋的典型特征。

4) 在整个切桩过程中,加速度响应有效值  $X_{rms}$ 、峰值  $X_p$  显著升高,最大强度约切削黏土地层时的 2 倍。在切桩完成后, $X_{rms}$ 、 $X_p$  迅速掉落,掉落至正常水平后,可认为盾构切桩完成。

## 参考文献

- [1] 王立新, 王强, 苗苗, 等. 盾构隧道下穿高铁路基变形影响规律及加固优化研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(2):126-134, 142.  
WANG L X, WANG Q, MIAO M, et al. Research on the deformation law and reinforcement optimization of shield tunnel when it goes down through the high-speed railway foundation [J]. Railway Standard Design, 2024, 68(2):126-134, 142. (in Chinese)
- [2] 孟繁增. 地铁双洞单线盾构隧道下穿引起既有铁路沉降实测研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(12): 150-155.  
MENG F Z. Field measurement of existing railway settlement induced by subway double-tube single-track shield tunnel under-passing [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(12): 150-155. (in Chinese)
- [3] LIU B, LI T, HAN Y H, et al. DEM-continuum mechanics coupling simulation of cutting reinforced concrete pile by shield machine [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 152: 105036.
- [4] 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.  
WANG F, YUAN D J, DONG C W, et al. Test study of shield cutting large-diameter reinforced concrete piles directly [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2566-2574. (in Chinese)
- [5] 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.  
LI H B. Feasibility Study on Direct Cutting of Reinforced Concrete Pile Foundation with  $\phi 25$  mm Main Reinforced Bar by Shield [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(12): 1808-1816. (in Chinese)
- [6] 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(增刊 2): 280-288.  
WU Z F, LIU Y S, ZHANG J, et al. Experiment and engineering practice of directly removing large-diameter pile foundations by shield [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(Sup 2): 280-288. (in Chinese)
- [7] 许华国, 陈馈, 孙振川. 盾构刀盘切削钢筋混凝土桩基室内试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(1): 35-42.  
XU H G, CHEN K, SUN Z C. Laboratory test of reinforced concrete pile foundation cutting by shield cutterhead [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(1): 35-42. (in Chinese)
- [8] 许宇, 李兴高, 杨益, 等. 盾构切刀切削混凝土过程中的动态响应试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(5): 182-189.  
XU Y, LI X G, YANG Y, et al. Dynamic response mechanism of shield cutter in concrete cutting [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(5): 182-189. (in Chinese)
- [9] 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.  
YUAN D J, WANG F, DONG C W, et al. Study on new-style cutter for shield cutting large-diameter reinforced concrete pile [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(3): 89-97. (in Chinese)
- [10] 庄欠伟, 袁一翔, 徐天明, 等. 射流联合盾构切削钢筋混凝土仿真与试验[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(10): 1817-1824.  
ZHUANG Q W, YUAN Y X, XU T M, et al. Simulation and experiment on cutting reinforced concrete with jet combined shield method [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(10): 1817-1824. (in Chinese)
- [11] 刘军, 韩旭, 金鑫. 基于颗粒流原理的盾构切割 GFRP 钢筋混凝土围护桩机制[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(增刊 1): 32-37.  
LIU J, HAN X, JIN X. Mechanism of shield cutting concrete retaining piles with GFRP bars based on particle flow principle [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(Sup 1): 32-37. (in Chinese)
- [12] 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.  
ZHOU J M. Construction technology and environmental impact prediction for a shield tunnel under a viaduct pile foundation group [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 165-172. (in Chinese)
- [13] 唐仁, 林本海, 梁鹏. 盾构下穿住宅楼直接切桩的安全性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊 2): 878-883.  
TANG R, LIN B H, LIANG P. Study on safety of direct pile cutting by shield tunneling under residential buildings [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(Sup 2): 878-883. (in Chinese)
- [14] 白东锋, 荆玉明, 薛普恒. 盾构切桩后桩基对管片作用力确定及控制措施[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(增刊 2): 122-127.  
BAI D F, JING Y M, XUE P H. Determination of pile foundation force on shield tunnel segments after pile cutting and control measures [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(Sup 2): 122-127. (in Chinese)
- [15] 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.  
FU K. Influence of shield tunnel undercutting composite foundation on settlement of existing buildings [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 734-

739. (in Chinese)
- [16] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in situ stresses [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 66: 19-33.
- [17] ABDEL-KADER M. Modified settings of concrete parameters in RHT model for predicting the response of concrete panels to impact [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 132: 103312.
- [18] WANG Z L, HUANG Y P, LI S Y, et al. SPH-FEM coupling simulation of rock blast damage based on the determination and optimization of the RHT model parameters [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, 570(4): 042035.
- [19] WANG Z L, WANG H C, WANG J G, et al. Finite element analyses of constitutive models performance in the simulation of blast-induced rock cracks [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 135: 104172.
- [20] HUO J Z, ZHANG Z G, MENG Z C, et al. Dynamic analysis and experimental study of a Tunnel boring Machine testbed under multiple conditions [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 127: 105557.
- [21] HUO J Z, ZHANG H D, XU Z H, et al. Coupling dynamic characteristics of tunnel boring machine cutterhead system with multi-source uncertainties [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 137: 106180.
- [22] LIAO J F, ZHU X C, YAO B. Dynamic modeling of gripper type hard rock tunnel boring machine [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 71: 166-179.

(编辑 王秀玲)