

基于离散元-连续介质法耦合的盾构刀具 切削钢筋混凝土力学机理仿真分析

李焱¹, 刘波^{2,3}, 胡伟¹, 孙鹏², 黄小城¹

(1. 湖南科技大学土木工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083;

3. 中国矿业大学(北京)隧道工程灾变防控与智能建养全国重点实验室, 北京 100083)

摘要:盾构隧道在始发接收、正穿建筑物桩基过程中,盾构刀具需切削非均质复合材料钢筋混凝土,易造成刀具崩刃、磨损、钢筋堵塞螺旋机等技术问题,进而影响隧道掘进施工效率。为探明切削过程中内部钢筋对混凝土结构破坏和刀具切削力的影响规律,采用离散元颗粒程序与连续介质力学的耦合方法,对盾构刀具切削钢筋混凝土的动态破坏过程进行研究。标定钢筋和混凝土材料接触参数;建立盾构刀具切削钢筋混凝土的耦合仿真分析模型;分别研究C型单面刃和F型双面刃两种刀具,在不同切削深度、刀间距下,切削混凝土和钢筋混凝土切削力的变化规律。结果表明:F型刀具切削混凝土时,切深与切削力关系可采用反正切函数拟合,切削力受刀间距影响较小;切削钢筋混凝土时,切削力均值较素混凝土增加约5~7倍,F型刀具对钢筋的拉拽作用更强,但C型刀具切削力均值比F型刀具增加约21%~39%。

关键词:盾构刀具;钢筋混凝土;离散元;耦合分析;切削力

中图分类号:TU94; U455.43 **文献标志码:**A

引用格式:李焱,刘波,胡伟,等. 基于离散元-连续介质法耦合的盾构刀具切削钢筋混凝土力学机理仿真分析[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2026,8(1):32-42. LI Ting, LIU Bo, HU Wei, et al. Simulation analysis of the mechanical mechanism of shield cutter cutting reinforced concrete based on the coupling of discrete element and continuum method [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2026, 8(1):32-42.

Simulation analysis of the mechanical mechanism of shield cutter cutting reinforced concrete based on the coupling of discrete element and continuum method

LI Ting¹, LIU Bo^{2,3}, HU Wei¹, SUN Peng², HUANG Xiaocheng¹

(1. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

3. National Key Laboratory of Disaster Prevention and Control and Intelligent Construction and Maintenance of Tunnel Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: During the launching and receiving phases of shield tunneling, as well as during the traversal of building pile foundations, the shield cutter is required to cut through heterogeneous composite materials like reinforced concrete. This process often leads to technical challenges including cutterhead chipping, accelerated wear, and steel bar-induced clogging of the screw conveyor, which ultimately compromises tunneling efficiency. To explore the influence of internal steel bars on the dynamic failure process of concrete structures and the cutting force of the cutterhead during the cutting process, a coupling method combining the discrete element-based particle flow program and continuum mechanics was

adopted to study the dynamic failure process of the cutterhead cutting reinforced concrete. Firstly, the contact parameters for the simulated steel bars and concrete materials were calibrated, and a coupling simulation analysis model of the cutterhead cutting reinforced concrete was established. The variation laws of the cutting force of the C-type (single-sided blade) and the F-type (double-sided blade) were studied under different cutting depths and cutter spacings when cutting concrete and reinforced concrete respectively. The results showed that when the F-type tool cuts concrete, the relationship between the cutting depth and the cutting force could be fitted using the arctangent function, and the cutting force was less affected by the tool spacing; when cutting reinforced concrete, the average cutting force was approximately 5 to 7 times higher than that for plain concrete. The F-type tool exhibited a stronger pulling effect on the reinforcing bars, but the average cutting force of the C-type tool was approximately 21% to 39% higher than that of the F-type tool.

Keywords: shield cutter; reinforced concrete; discrete element; coupled analysis; cutting force

Received: 2025-12-05; **Revised:** 2026-01-14; **Accepted:** 2026-01-27; **Published:** 2026-03-20

0 引言

近年来,国内一线大城市浅层与次浅层地下空间大规模开发利用^[1],大量既有结构物如建(构)筑物桩基^[2-4]、地下场室和管廊^[5-6]、地下通道^[7]、隧道^[8-10]等密集分布,导致盾构隧道施工环境日趋复杂。在城市中心区域修建盾构地铁隧道,即使是在设计规划考虑周全的情况下,也难免会出现地铁隧道需要临近穿越或直接穿越建构筑物的情形,尤其是广泛存在的各类桩基础^[11]。

由于常规盾构机基本不具备直接切削桩基能力,国外采用盾构法施工的地铁隧道,多数选择地面拆除或人工洞内拆除的方法。但地面拆除对周边环境影响大,还存在社会资源浪费过大、施工耗时较长、成本过高等问题。近年来直接切桩技术不断成熟,相关研究也逐渐丰富起来。在盾构刀盘及刀具的改造方面,滕丽^[12]采用 $\Phi 400$ mm 盾构模型试验平台进行切削障碍物试验,提出增加先行刀和贝壳刀增强切削能力的方案。王飞等^[13-14]、袁大军等^[15]在苏州 2 号线盾构始发洞门前布置 2 根试验桩开展试验,采用数值模拟和现场试验系统性地研究盾构施工工法、刀盘刀具改造、桩基加固工法,并提出“慢推速、中转速、保土压、注惰浆、控姿态”为核心的盾构掘削大直径桩基施工控制技术。杜闯东等^[16]、李宏波^[17]借助 TBM 掘进模态综合实验台,对不同刀具(滚刀、切刀)切削圆桩和方桩的切削效果、刀盘振动特性、钢筋破坏形式及受力情况、刀具损坏情况、盾构掘进参数等进行研究,确定盾构机切桩的最佳掘进参数区间。

诸多学者从理论和数值仿真方面对切桩机理与盾构切削力变化规律进行大量研究。王哲等^[18]基于杭州地铁 2 号线切桩工程,结合 AdvantEdge-

FEM 有限元软件对贝壳刀的角度进行设计,并对刀具布置方式给出建议。李兴高等^[19]通过 PFC^{3D} 建立刀盘切桩数值模型,探究盾构切削桩基刀盘荷载变化特征,并与实测数据进行了对比验证。沈翔等^[20]采用有限元软件对盾构单根辐条刀具切削桩基的过程进行数值模拟,分析切桩过程中滚刀的受力情况以及土体和桩身的动态响应。陈海丰等^[21]、杜欣等^[22]建立刀盘切桩的平面二维数学模型,通过面积法估算刀盘旋转一周切桩刀具数目,由此推导盾构刀盘作用在桩基上的推力和扭矩。Liu 等^[23]建立单刀切削混凝土的分析模型,通过复变函数方法获得单刀的贯入力,结合群刀切削数学模型,最终可用于预测盾构切桩时的推力变化情况。

目前,盾构刀具与钢筋混凝土相互作用的破坏机制尚未明确,包括刀具的切削力、磨损规律,钢筋与混凝土联合破断的机理。本研究基于离散元的颗粒程序与连续介质力学耦合方法,对盾构刀具切削钢筋混凝土动态破坏过程中,刀具切削力变化及切削引起的钢筋内部拉应力进行研究。

1 工程简介

北京地铁 12 号线某区间穿越在役桥梁施工过程中,需要采用 6.7 m 直径的土压平衡式盾构机直接切削共 18 根桩基,桩基结构混凝土等级为 C30,直径 0.8~1.2 m,盾构中心距离地表 17.8 m,隧道与桥梁桩基结构位置关系立面图如图 1 所示。隧道右线切削一根桩基,左线需同时切削两根桩基,间距为 3.6 m。盾构切桩前采用桩基托换技术与地层注浆加固措施确保上部结构安全,切桩过程中实时监控盾构机扭矩与推力、桩顶位移。

数值模型钢筋试件的直径为 20 mm,长径比 $l_0/d_0=5$,试件在 PFC^{3D}中的模型如图 3 所示。固定两端颗粒的速度,监测钢筋的应力-应变曲线变化,从图 3 中可知钢筋的屈服强度为 423.9 MPa,应变流幅约为 1.7%。一般的 HRB400 钢材在常温下的屈服点应力约为 400 MPa,应变流幅为 1.5%~2.5%。因此,此细观参数下的颗粒流模型可以用来模拟钢筋在一般情况下的力学特性。

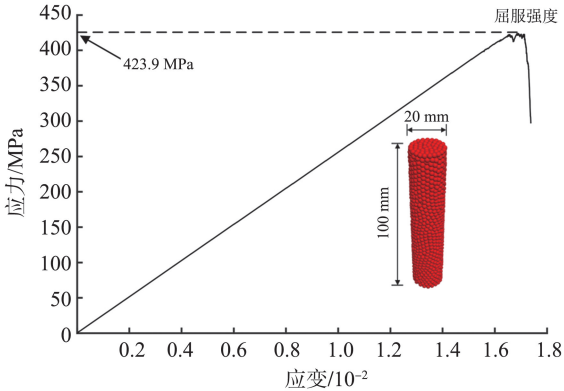


图 3 钢筋单轴拉伸试验应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curve of the uniaxial tensile test of reinforcing bars

2.3 模拟工况

为研究盾构刀具在切桩过程中钢筋对切削力的影响规律,分别进行刀具切削混凝土和钢筋混凝土仿真模拟。采用单一变量法进行研究,综合考虑计算效率和精度要求,切削的线速度设为 8.0 m/s;控制变量为刀具切深、刀间距以及刀具类型,模拟工况如表 3 所示。工况 A-1~A-3 以切削混凝土为基础和参照,切深和刀间距分别设置 4 种工况。B-1~B-3 中切深和刀间距分别选取 3 种关键工况,进一步验证切削钢筋混凝土的差异。

表 3 模拟工况表
Table 3 Simulated condition

工况编号	材料类型	刀具类型	切深/mm	刀间距/mm
A-1	混凝土	F	4/6/10/15	100
A-2	混凝土	F	10	80/120/160/200
A-3	混凝土	C	4/6/10/15	100
B-1	钢筋混凝土	F	6/10/15	100
B-2	钢筋混凝土	F	10	80/120/160
B-3	钢筋混凝土	C	6/10/15	100

3 盾构刀具切削混凝土

采用 PFC^{3D}颗粒流模拟全尺寸刀具切削混凝土

土,模型的颗粒数将会大大增加,降低计算效率。基于 FLAC^{3D}在计算中的高效性,建立离散元-有限差分的耦合分析模型将会提高计算效率和准确性。结合北京某盾构隧道切桩工程案例,刀具选取较为典型的两种刃型刀具即 C 型单面刃和 F 型双面刃刀具,如图 4 所示,在 PFC^{3D}程序中采用 Clumps 进行刀具体建模。

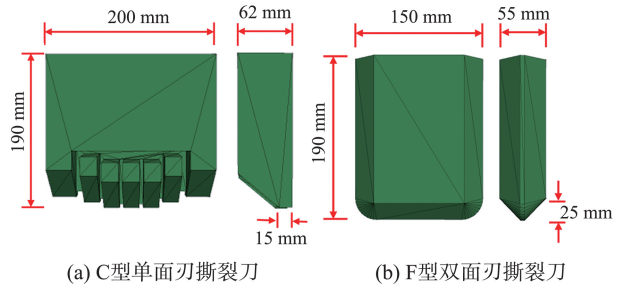


图 4 两种典型的盾构刀具示意图
Fig.4 Schematic diagram of two typical shield cutting tools

盾构下穿西坝河桥桩中,考虑到边墩的直径为 1.2 m,盾构机在切削过程中与边墩的接触面积最大,建立的混凝土模型如图 5 所示。最终生成的模型有 5 000 多个网格单元和约 12 万个颗粒。将两个刀具分别编号,下侧为 1#刀具,上侧为 2#刀具。网格单元的边界条件设定为非切削面限制网格节点的位移,离散颗粒与有限差分耦合界面的黏结强度设置为无穷大,以保证力和位移在耦合界面能够被连续传递。

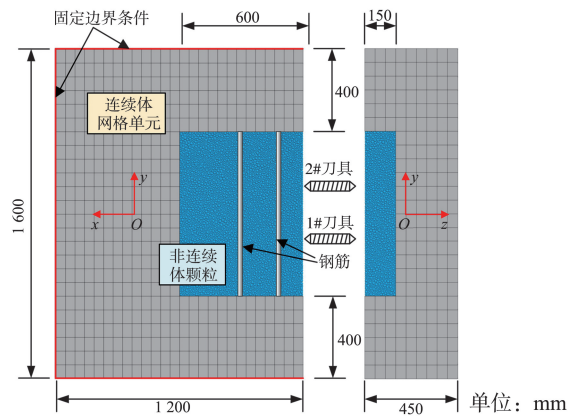


图 5 刀具切削混凝土的 PFC^{3D}-FLAC^{3D}耦合计算模型
Fig.5 PFC^{3D}-FLAC^{3D} coupling model of tools cutting concrete

3.1 刀具切深对切削力的影响

刀间距为 100 mm 时,F 型双面刃刀具在不同切削深度条件下对混凝土的破坏情况如图 6 所示。在刀间距一定情况下,随着贯入深度的增加,刀具两侧的混凝土沿自由表面发展破碎的范围增加。测量混凝土截面破坏宽度,在切深为 4、6、10、15 mm 时,破坏宽度分别为 370、405、465、492 mm。

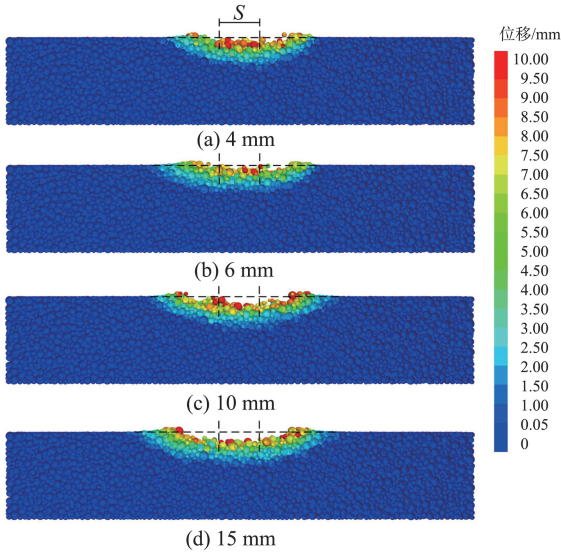


图6 不同切深下, $x=0.2\text{ m}$ 截面处混凝土破坏情况
 Fig.6 The damage of concrete at the section of $x=0.2\text{ m}$ under different cutting depths

刀具的切削力如图7所示,可以看到1#刀具和2#刀具切削力相差不大,当切深为4、6、10、15 mm时,1#刀具的切削力平均值分别为7.6、9.2、10.2、13.5 kN;2#刀具的切削力平均值分别为7.9、9.4、11.7、13.0 kN。采用反正切函数对刀具的切削进行拟合,确定系数 R^2 达0.979,实际切削力均落在95%置信区间内,且切削力的残差最大值不超过1.5 kN,误差小于13%。

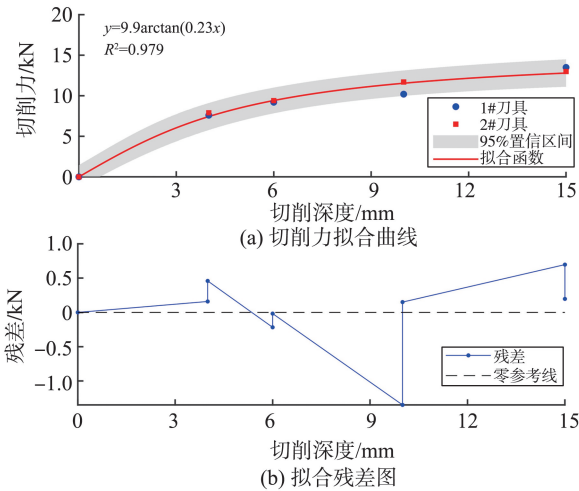


图7 不同切深下F型刀具的切削力
 Fig.7 The cutting force of F-type tool under different cutting depths

3.2 刀间距对切削力的影响

F型双面刃刀具在切深保持10 mm的情况下,不同刀间距对混凝土破坏情况影响如图8所示。刀间距为80~120 mm时,可以看到两条切削轨迹之间的混凝土能够被有效地破碎。当刀间距增加到160 mm,开始分化为两条清晰的轨迹线。

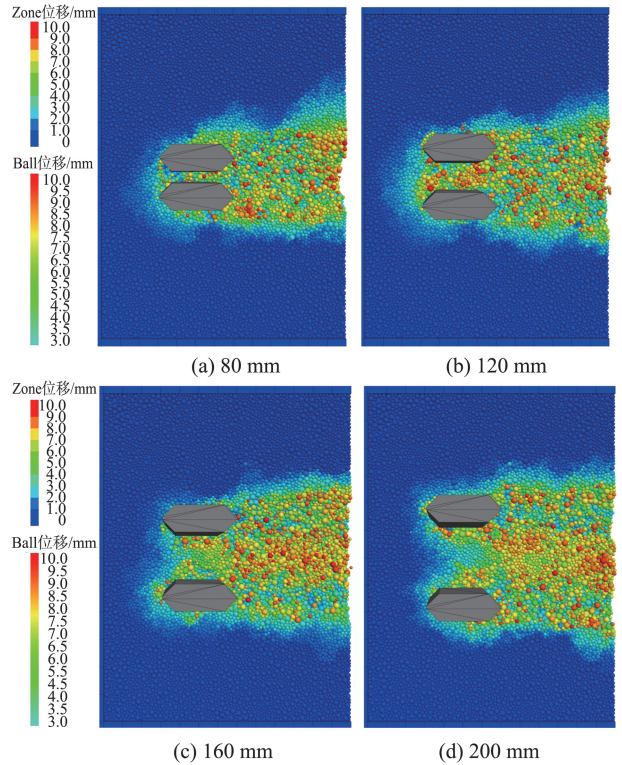


图8 不同刀间距下混凝土的破坏情况
 Fig.8 The damage of concrete under different cutter spaces

当刀间距继续增加到200 mm时,两条轨迹之间的混凝土并无法被有效地破碎,形成残留的混凝土脊,如图9(d)所示。从图9可知刀间距为80、120、160、200 mm时,混凝土的破碎区分别约为135、178、76~93 mm(混凝土脊使破坏区分为两个区域宽度)、78~77 mm。

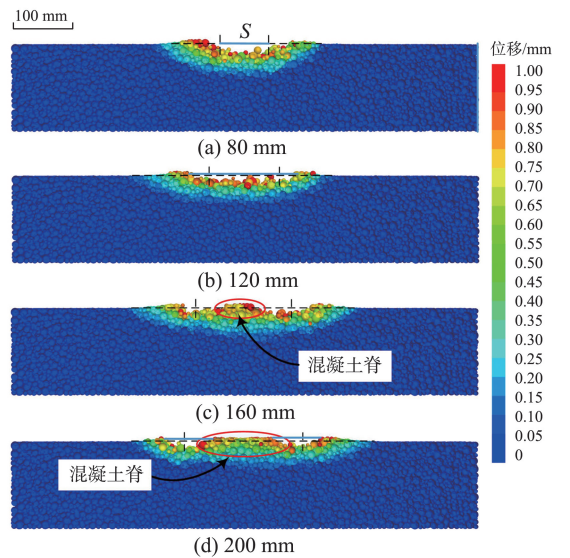


图9 不同刀间距条件下, $x=0.2\text{ m}$ 截面处混凝土破坏情况
 Fig.9 The damaged of concrete at the section of $x=0.2\text{ m}$ under different cutter spaces

刀具的切削深度为10 mm时,不同刀间距下1#和2#刀具的切削力如图10所示。由于混凝土脆性

破坏原因,可以看到 1#刀具和 2#刀具切削力峰值呈现明显的间歇性,且主要出现在 0~0.08 m、0.12~0.22 m、0.40~0.45 m 3 个阶段。刀间距为 80、120、160、200 mm 时,1#刀具的切削力平均值分别为 11.7、11.2、11.0、11.8 kN;2#刀具的切削力平均值分别为 9.9、10.0、12.1、11.5 kN。可以发现刀间距的变化对切削力均值的影响并不大,平均值变化范围在 10~12 kN 之间波动。

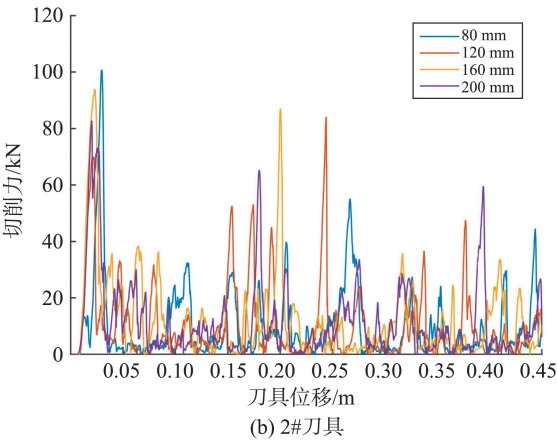
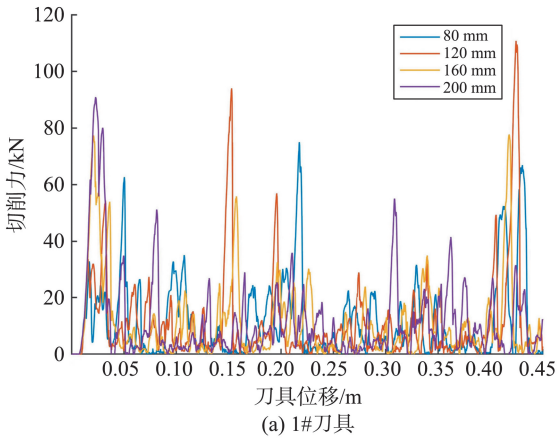


图 10 不同刀间距下 F 型刀具的切削力
Fig.10 The cutting force of F-type tool under different cutter spaces

3.3 刀具刃型对切削力的影响

当刀具的切深为 10 mm,刀间距为 160 mm 时,C 型单面刃对混凝土的破坏情况如图 11 所示。由于 C 型刀具的刀齿呈弧形分布且刀刃为单面,可以看到 C 型刀具沿切削前进方向的混凝土破坏宽度较 F 型刀具小。而在 $x=0.2$ m 处截面,两种刀具对混凝土的破坏均已形成混凝土脊。

不同切削深度下,两种刀具的切削力变化如图 12 所示。在 4~15 mm 的切削深度范围内,C 型与 F 型刀具的切削力均随切深增加呈单调上升趋势。而在相同切削深度下,C 型刀具的切削力始终高于同编号的 F 型刀具,表明 F 型刀具切削混凝土具有更低的切削能耗,双面刃型刀具更适用于切削混凝土。

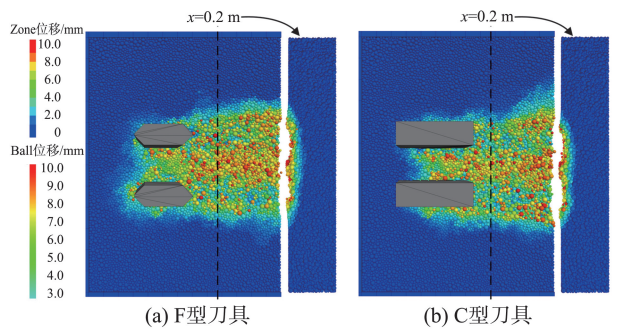


图 11 不同刀具刃型切削混凝土的破坏情况
Fig.11 The model of cut reinforced concrete

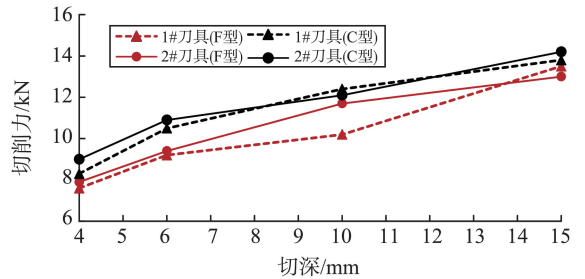


图 12 不同切削深度下,两种刀具的切削力变化
Fig.12 Cutting forces of two tools under different cutting depths

4 盾构刀具切削钢筋混凝土

在原有切削混凝土耦合模型上增加两根埋深不同的钢筋,分别采用 F 型双面刃和 C 型单面刃刀具完成切削试验。靠近刀具一侧的钢筋编号为 S_1 ,远离刀具的钢筋编号为 S_2 ,钢筋直径均为 20 mm,如图 13 所示。 S_1 钢筋距离右侧边界 0.1 m,埋深为 10 mm; S_2 钢筋距离右侧边界 0.3 m,埋深为 15 mm。模型生成的颗粒数量一共超过 16 万,其中组成钢筋的颗粒约 4.7 万。

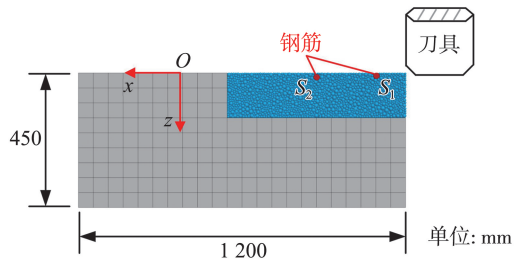


图 13 刀具切削钢筋混凝土模型
Fig.13 The model of cut reinforced concrete

4.1 刀具切深对切削力的影响

刀间距为 120 mm 时,不同切深下 F 型双面刃刀具切削钢筋混凝土的破坏情况如图 14 所示。刀具切深的增加对混凝土的破坏范围逐渐增大,对钢筋的破坏也逐渐增强。对比图 8 刀具切削素混凝土的情况,切削钢筋时的牵扯使得混凝土的扰动范围增加。当切削深度为 6 mm 时,钢筋并无明显的损

伤痕迹,当切削深度增加到 10 mm 时,右侧埋深较浅的钢筋出现明显损伤及破坏,如图 14(b) 所示。增大刀具切深能够显著扩大钢筋混凝土的破坏范围,并加剧其破坏程度。当切深增加到 15 mm 时,刀具一次性将右侧埋深较浅的 S_1 钢筋切断。

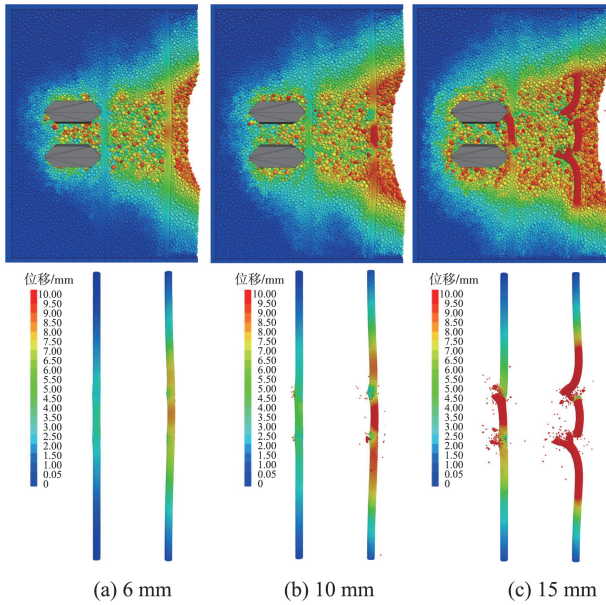
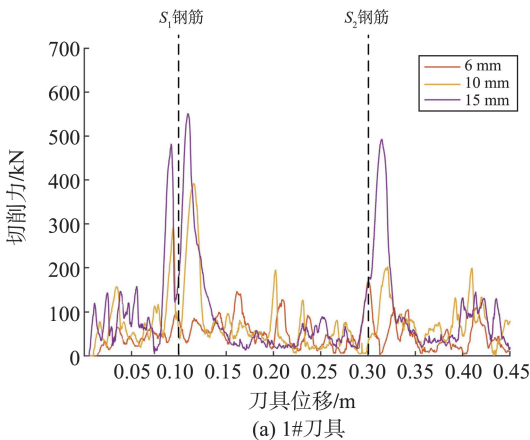
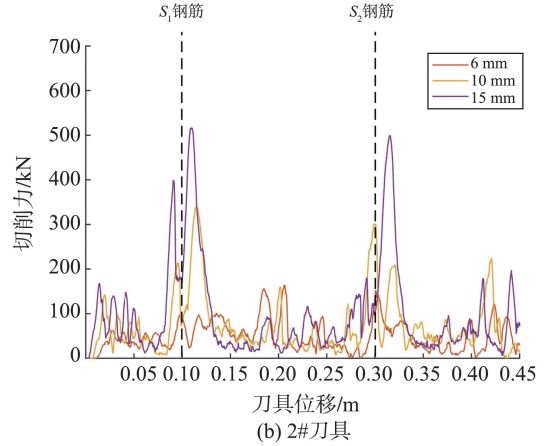


图 14 不同切深下钢筋混凝土的破坏情况
Fig.14 The damage of reinforced concrete under different cutting depths

不同切深下,1#和 2#刀具的切削力如图 15 所示。从图 15 中可见切削力随切削深度增加快速增加。当切削深度达到 10 mm 和 15 mm 时,1#刀具和 2#刀具的最大峰值均是在切削钢筋的时候达到。切削深度为 15 mm 时,1#刀具和 2#刀具的峰值均达到了 500 kN。切深为 6、10、15 mm 时,1#刀具的切削力平均值分别为 47.1、72.9、96.7 kN;2#刀具的切削力平均值分别为 48.2、71.7、93.5 kN。由此可见,钢筋的存在极大增加了切削难度,切削钢筋过程中切削力会急剧增加,相同切深下对比切削素混凝土增加了 5~7 倍。



(a) 1#刀具

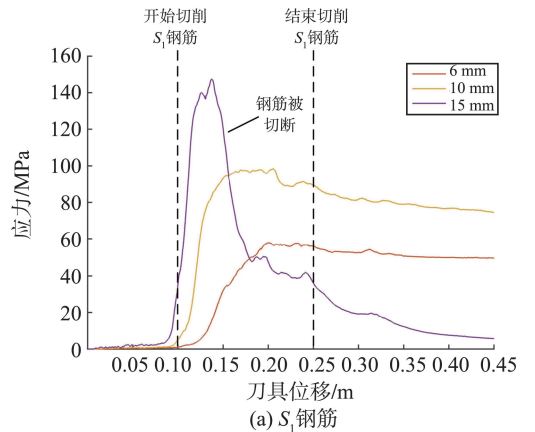


(b) 2#刀具

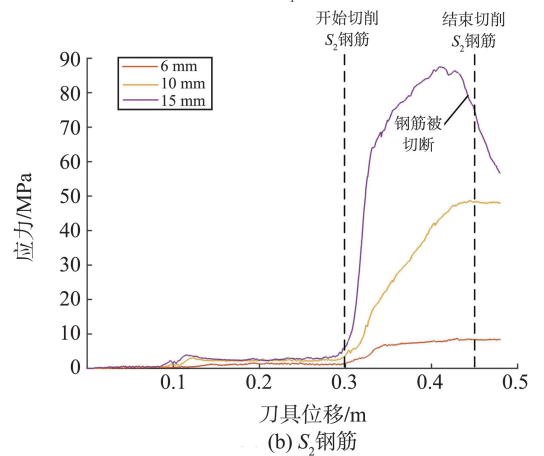
图 15 不同切深下 F 型刀具的切削力

Fig.15 The cutting force of F-type tool under different cutting depths

为监测切削过程中钢筋的应力变化,在两根钢筋两端设置球形应力监测区,并以两端应力均值进行分析。不同切削深度下, S_1 和 S_2 钢筋末端的应力变化情况如图 16 所示。



(a) S_1 钢筋



(b) S_2 钢筋

图 16 不同切削深度下,F 型刀具切削钢筋混凝土时钢筋末端应力变化

Fig.16 Stress change at the end of rebars when cutting with F-type tools at different cutting depths

结果表明,刀具开始切削钢筋时,引起钢筋内部的应力急剧增加,并且应力的峰值与刀具的切深成

正相关。当切深为 6 mm 和 10 mm 时,钢筋应力达到峰值后持续处于高位, S_1 钢筋分别维持在约 51 MPa和 73 MPa。 S_2 钢筋由于埋深较 S_1 钢筋大 5 mm,因此刀具实际切削 S_1 钢筋的深度分别为 1、5 以及 10 mm。切深增至 15 mm 时, S_1 与 S_2 钢筋应力在峰值后迅速下降,说明钢筋已被切断或严重损伤,内部应力得以释放。从图 14 中可以看出,在切深为 15 mm 时, S_1 钢筋已经被切断,而 S_2 钢筋也几乎被切断。

4.2 刀间距对切削力的影响

在切深一定情况下,不同刀间距 F 型双面刃刀具切削钢筋混凝土的破坏情况如图 17 所示。随着刀间距的增加,破坏范围也有所增加,当刀间距增加到 160 mm 时,切削钢筋混凝土并不会产生混凝土脊。与直接切削混凝土不同,钢筋会产生位移,在黏结力的作用下使附近混凝土发生松动或破损。刀间距为 80、120、160 mm 时,混凝土的破碎区分别约为 170、202、249 mm。从数值仿真结果来看,切削钢筋混凝土时适当提高刀间距,并不会产生混凝土脊而影响切削效率。

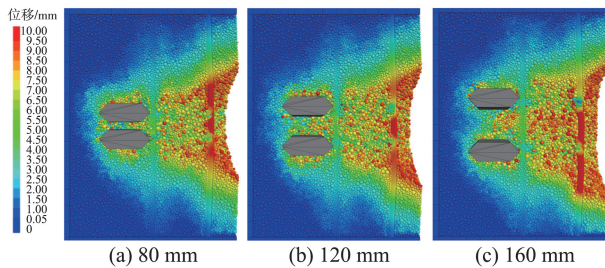


图 17 不同刀间距下,F 型刀具对钢筋混凝土的破坏情况
Fig.17 The damage of F-type tool to reinforced concrete under different cutter spaces

不同刀间距时的切削力如图 18 所示,切削力的峰值同样出现在 S_1 和 S_2 钢筋位置处。80、120、160 mm 刀间距下,1#刀具的切削力均值分别为 69.1、72.9、74.2 kN;2#刀具的切削力均值分别为 67.8、71.7、73.8 kN。刀间距的变化对切削力的峰值几乎没有影响,切削力的均值随刀间距增加而小幅度增加。

不同刀间距下,F 型刀具切削钢筋混凝土时钢筋末端的应力变化如图 19 所示。由图 19(a)可知,刀间距的增加使得 S_1 钢筋末端的应力峰值应力略微有所提高,但随着切削结束,应力值均降低至稳定水平。而 S_2 钢筋末端的应力则随着刀间距的增加,有较明显的增加趋势,刀间距 160 mm 时的应力峰值约为 74 MPa,刀间距 80 mm 时的应力峰值约为 41 MPa。

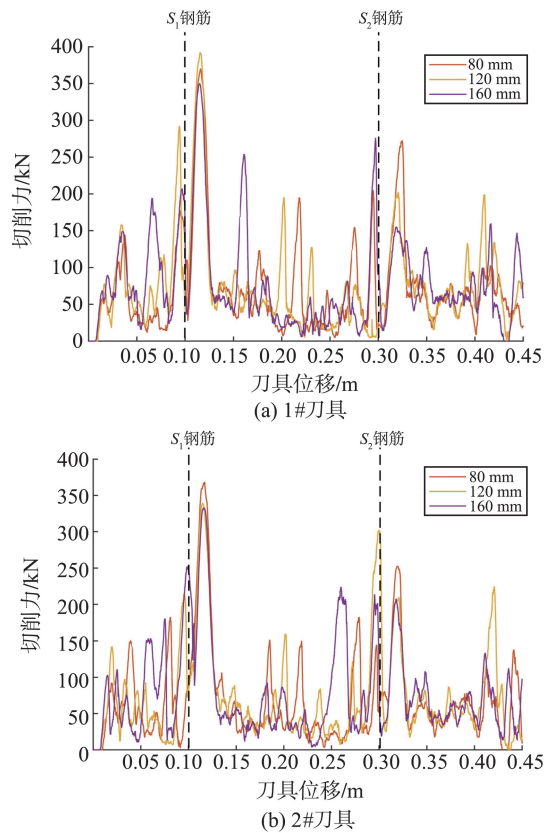


图 18 不同刀间距下 F 型刀具的切削力
Fig.18 The cutting force of F-type tool under different cutter spaces

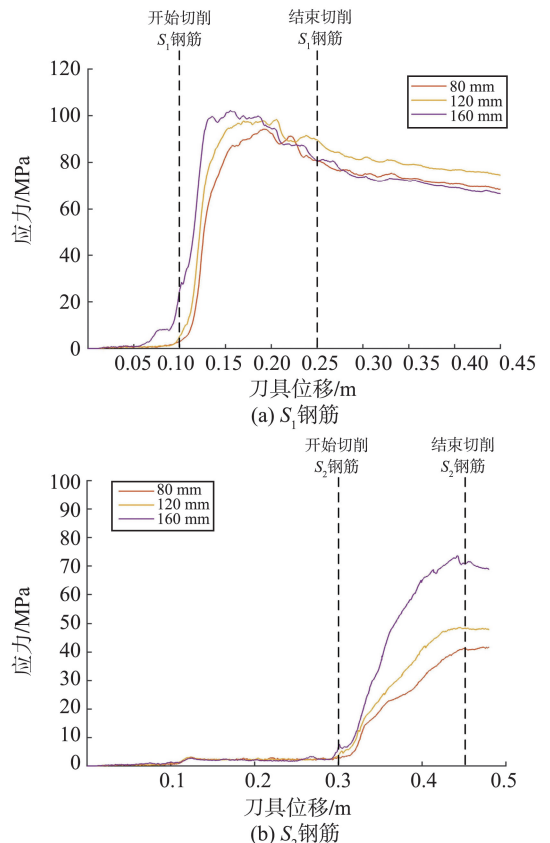


图 19 不同刀间距下,F 型刀具切削钢筋混凝土时钢筋末端应力变化
Fig.19 End stress variation of steel bars in reinforced concrete during cutting with F-type tool under different cutter spaces

4.3 刀具刃型对切削力的影响

在不同切削深度条件下,C型单面刃刀具切削钢筋混凝土的情况如图20所示。与F型刀具对比发现,二者对混凝土的破坏区域差异不显著。进一步选取刀间距120 mm、切深15 mm的工况,分析两种刀具对钢筋的破坏特征如图21所示。可见,F型双面刃虽能将钢筋完全切断,但断口处位移较大,表明切削过程中存在明显的钢筋拉拽效应。该现象在应力响应上也有所体现:F型刀具作用下 S_1 与 S_2 钢筋末端的拉应力峰值普遍高于C型刀具。

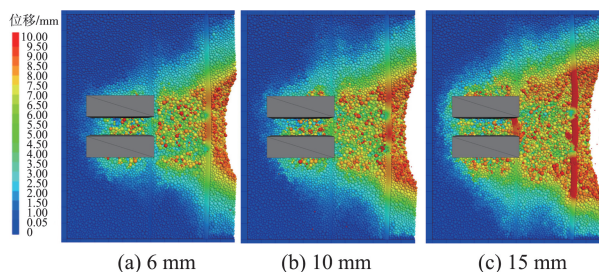


图20 不同切削深度下,C型刀具对钢筋混凝土的破坏情况
Fig.20 The damage of C-type tool to reinforced concrete under different cutting depths

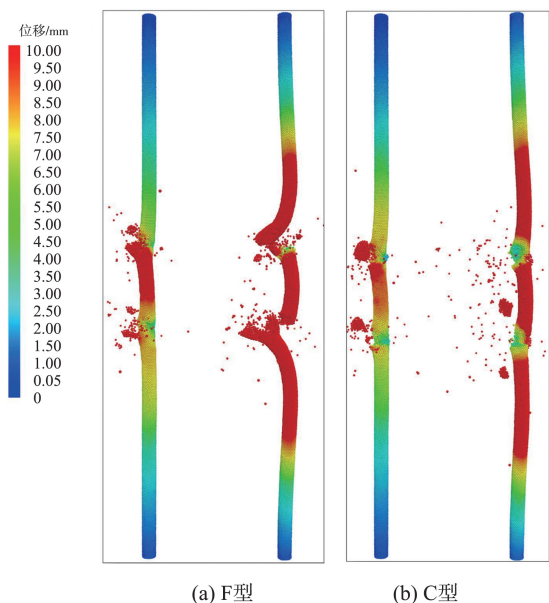


图21 刀间距为120 mm,切深为15 mm时,两种刀具对钢筋的破坏程度

Fig.21 Damage to steel bars by two tool types at 120 mm cutter spaces and 15 mm cutting depth

不同切深下F型刀具和C型刀具切削力对比如图22(a)所示,1#刀具(C型)的切削力均值分别为61.0、87.0、133.6 kN;2#刀具(C型)的切削力均值分别为62.5、88.6、130.7 kN,较F型刀具的切削力均值增加约29%、21%、39%。两种刀具切削钢筋混凝土时钢筋末端应力峰值对比如图22(b)所示,钢筋内部的应力峰值与切削深度呈现线性增加的趋势,

F型和C型刀具的增长速率分别约为9.3、7.4 MPa/mm。由此可见随着切削深度的增加,F型刀具对钢筋的拉拽作用较C型刀具更强。

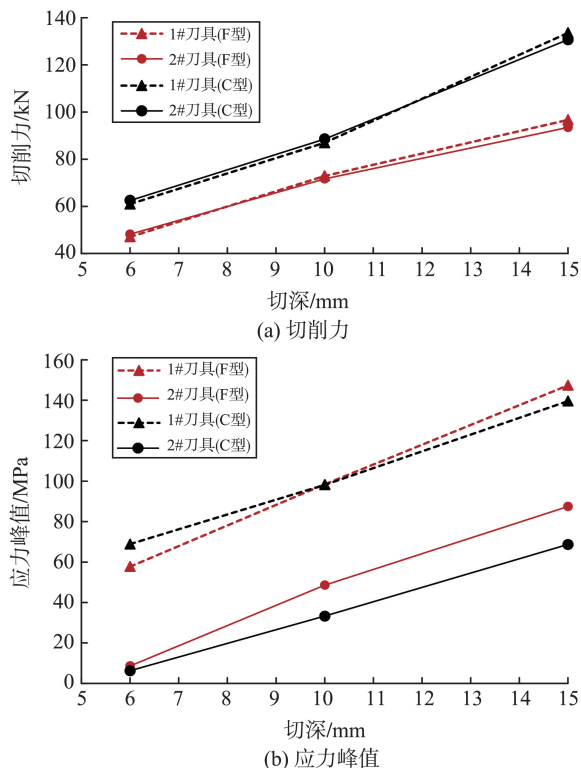


图22 不同切削深度下,两种刀具的切削力峰值与钢筋内部末端应力峰值

Fig.22 Cutting forces and internal peak stress at reinforcing bar ends of two tools under different cutting depths

通过上述研究发现,混凝土中的钢筋是盾构刀具切削力陡然增加的主要原因。钢筋的存在也使得刀具切削时对混凝土的扰动范围增加,完全破碎的范围相比切削素混凝土则有所减小。钢筋在未被完全切断前,内部依旧会存在残余拉应力,峰值拉应力会有所减小。这部分的拉应力传递给桩体,因此对桩基的沉降会存在影响。

5 结论

本研究基于离散元耦合连续介质力学方法,采用PFC^{3D}颗粒流程序和FLAC^{3D}程序研究了盾构刀具切削混凝土和钢筋混凝土的力学机理,并对切削过程中的切削力、钢筋内部应力状态进行了分析。实际上刀具磨损的长期效应同样对切削力有影响,这需要进一步深入探讨。本研究得到以下结论。

(1)刀间距是影响混凝土切削过程中碎屑形态与切削力的关键因素。在适宜刀间距条件下,可形成体积最大的混凝土碎屑块,该现象与峰值切削力密切相关。研究表明,当刀具切深为10 mm时,对

于F型双面刃刀具,建议刀间距取120 mm,以实现较优的碎屑控制与切削效率。

(2)混凝土内部的钢筋是造成切削力骤然增加的主要因素,切削力均值较切削素混凝土增加5~7倍。通过研究刀具类型对切削力的影响发现,C型刀具切削钢筋混凝土时的切削力均值比F型刀具增加约21%~39%。

(3)钢筋两端的应力峰值主要受切深控制,受刀间距影响较小。在相同刀间距、较小切深条件下,C型单面刃与F型双面刃对钢筋混凝土的宏观破坏形态差异不明显,但F型刀具对钢筋的拉拽作用更为显著,反映其在应力传递机制上的不同特点。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 城市地下穿越工程的新理论与新技术[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(11): 7, 20.
QIAN Qihu. New theory and technology of urban underground crossing engineering [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(11): 7, 20.
- [2] 徐长节, 陈其志, 任凌云. 软土地区地铁盾构穿越对城市立交桥的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(3): 769-775.
XU Changjie, CHEN Qizhi, REN Lingyun. Influence of shield crossing tunnels in soft soil area on city overpass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(3): 769-775.
- [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] LI T, LIU B, HAN Y H, et al. Structural analysis of shield machine cutting monopile using p-y curve based finite element method [J]. Computers and Geotechnics, 2023, 161: 105605.
- [5] 崔允亮, 李志远, 魏纲, 等. 上跨拟建隧道的地下综合管廊预保护效果[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(2): 330-337.
CUI Yunliang, LI Zhiyuan, WEI Gang, et al. Pre-protection effect of underground comprehensive pipe gallery over proposed tunnel [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(2): 330-337.
- [6] 刘平, 王洪涛, 刘泉声, 等. 基于Hoek-Brown强度参数的地铁隧道下穿既有管廊塌落上限分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(5): 1205-1218.
LIU Ping, WANG Hongtao, LIU Quansheng, et al. Upper limit analysis of tunnel collapse under existing pipe gallery based on Hoek-Brown strength parameter [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(5): 1205-1218.
- [7] 杨俊龙. 盾构隧道下穿人防通道数值分析及现场测试研究[J]. 中国市政工程, 2019(2): 93-96.
YANG Junlong. Numerical analysis & field test research of shield tunnel underpass civil defense passageway [J]. China Municipal Engineering, 2019(2): 93-96.
- [8] LIANG R Z, XIA T D, HONG Y, et al. Effects of above-crossing tunnelling on the existing shield tunnels [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 159-176.
- [9] LIN X T, ZENG H, WANG X T, et al. Super-large-diameter shield tunnel undercrossing an intercity railway with oblique angle: centrifuge test and numerical analysis [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2025, 17(5): 2741-2757.
- [10] 檀俊坤, 殷爱国, 乔世范, 等. 曲线段双护盾TBM隧道上穿既有隧道变形规律分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2026, 23(1): 208-222.
TAN Junkun, YIN Aiguo, QIAO Shifan, et al. Deformation law of double shield TBM tunnel on curved sections passing through existing tunnels [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2026, 23(1): 208-222.
- [11] 刘波, 李焱, 韩彦辉. 城市地下空间盾构隧道穿越工程研究综述[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(17): 35-46.
LIU Bo, LI Ting, HAN Yanhui. Review of research on shield tunnel crossing engineering in urban underground spaces [J]. Construction Technology, 2024, 53(17): 35-46.
- [12] 滕丽. 盾构穿越地下障碍物的试验研究[J]. 建筑机械化, 2011, 32(10): 89-91.
TENG Li. Experimental studies on shield through underground obstacles [J]. Construction Mechanization, 2011, 32(10): 89-91.
- [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.
WANG Fei, YUAN Dajun, DONG Chaowen, 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.
- [14] 王飞, 袁大军, 董朝文, 等. 盾构直接切削大直径群桩的刀具配置研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(12): 127-135.

- WANG Fei, YUAN Dajun, DONG Chaowen, et al. Study on cutter configuration for directly shield cutting of large-diameter piles [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(12): 127-135.
- [15] 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 Dajun, WANG Fei, DONG Chaowen, 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.
- [16] 杜闯东, 张杰, 唐纵雄. 盾构直接切削桩基施工关键技术[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(10): 1666-1677.
- DU Chuangdong, ZHANG Jie, TANG Zongxiong. Key technologies of shield direct cutting pile foundation [J]. Tunnel Construction, 2019, 39(10): 1666-1677.
- [17] 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 Hongbo. 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.
- [18] 王哲, 吴淑伟, 姚王晶, 等. 盾构穿越既有桥梁桩基磨桩技术的研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(1): 117-125.
- WANG Zhe, WU Shuwei, YAO Wangjing, et al. Grinding pile technology of shield tunnels crossing pile foundation of existing bridges [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(1): 117-125.
- [19] 李兴高, 崔伦萌, 方应冉, 等. 盾构切桩过程中刀盘荷载变化特征[J]. 土木工程学报, 2024, 57(增刊1): 59-64.
- LI Xinggao, CUI Lunmeng, FANG Yingran, et al. Research on cutterhead load variation characteristics during shield cutting pile process [J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(Suppl.1): 59-64.
- [20] 沈翔, 张海彬, 段锴, 等. 多滚刀切削混凝土桩基相互作用特性及扰动影响研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2025, 7(2): 21-30.
- SHEN Xiang, ZHANG Haibin, DUAN Kai, et al. Study on interaction mechanism and disturbance effect of multi disc cutter cutting concrete pile foundation [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2025, 7(2): 21-30.
- [21] 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.
- CHEN Haifeng, YUAN Dajun, WANG Fei, et al. Study on shield cutting parameters when cutting big diameter piles [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 103-109.
- [22] 杜欣, 黄雪梅, 郝岩, 等. 盾构切削混凝土桥桩刀盘荷载分析[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1742-1750.
- DU Xin, HUANG Xuemei, HAO Yan, et al. Analysis on cutterhead load in shield cutting concrete bridge pile [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1742-1750.
- [23] LIU B, LI T, HAN Y H, et al. The problem of wedge indenter with flat-rounded bottom indenting half-plane elastic body [J]. International Journal of Applied Mechanics, 2022, 14(3): 2250010.
- [24] 牟政, 李福林. 基于 FEM-DEM 耦合的盾构掘进参数对滚刀切削钢筋混凝土效果的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(1): 147-156.
- MU Zheng, LI Fulin. Study on the effect of shield tunnelling parameters on cutting performance of reinforced concrete based on FEM-DEM coupling method [J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62(1): 147-156.
- [25] HENTZ S, DAUDEVILLE L, DONZÉ F V. Discrete element modeling of a reinforced concrete structure [J]. Journal of the Mechanical Behavior of Materials, 2009, 19(4): 249-258.

(编辑: 宋艳)