

文章编号:1673-9469(2025)04-0001-08

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2025.04.001

盾构切削钢筋混凝土连墙的破坏模式及机理研究

朱宏宇¹, 刘维^{1*}, 史培新¹, 聂宏伟¹, 梁家馨²

(1. 苏州大学 轨道交通学院, 江苏 苏州 215000; 2. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 随着城市隧道建设中盾构直接切削钢筋混凝土连墙的案例日益增多, 深入研究切削过程中地连墙的破坏模式及刀盘荷载变化规律, 对于优化刀具配置并提升施工效率至关重要。以滚刀切削钢筋混凝土连墙室内试验为背景, 采用有限元软件 ABAQUS 建立盾构刀盘切削钢筋混凝土连墙的三维动态数值模型。仿真结果表明, 混凝土主要表现为脆性破坏, 钢筋的破坏模式主要取决于周围混凝土的约束效应。通过建立量化的判别准则, 即断裂应力比, 统计分析发现钢筋的破坏模式主要表现为部分切断, 且完全拉断的比例随直径增大而降低。仿真数据能基本反映试验中刀盘荷载变化趋势的平均水平, 推力和扭矩的相对误差分别为 7.36% 和 9.21%。高贯入度会导致荷载振荡明显, 低贯入度下更能发挥滚刀的磨削作用。

关键词: 盾构切削; 地连墙; 钢筋破坏模式; 刀盘荷载; 贯入度

中图分类号: U25

文献标识码: A

Analysis of Damage Modes and Mechanisms of Shield Cutting Reinforced Concrete Diaphragm Walls

ZHU Hongyu¹, LIU Wei^{1*}, SHI Peixin¹, NIE Hongwei¹, LIANG Jiabin²

(1. School of Rail Transportation, Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215000, China;

2. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: Given the increasing number of cases where shield machines directly cut through reinforced concrete internal walls during urban tunnel construction, in-depth research on the failure mode of the internal wall during the cutting process and the load variation pattern of the cutter head is crucial for optimizing the tool configuration and improving construction efficiency. Based on the indoor test of roller cutting through reinforced concrete internal walls, a three-dimensional dynamic numerical model of the shield cutter head cutting through the reinforced concrete internal wall was established using ABAQUS. The simulation results show that the concrete mainly exhibits brittle failure, and the failure mode of the steel bars is greatly influenced by the surrounding concrete constraints. By establishing a quantitative criterion for fracture stress ratio, statistical analysis reveals that the steel bars are partial cut-off, and the proportion of complete breakage decreases with the increase in diameter. The simulation data can basically reflect the average trend of the cutter head load change in the test, with the relative errors of thrust and torque being 7.36% and 9.21% respectively. High penetration depth will cause significant load oscillation, while low penetration depth can better exert the grinding effect of the roller.

Key words: shield cutting; diaphragm wall; steel damage mode; cutterhead load; penetration

收稿日期: 2024-05-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978430)

第一作者: 朱宏宇(1997—), 男, 江苏淮安人, 硕士研究生, 从事隧道与地下空间方面的研究。

* 通信作者: 刘维(1985—), 男, 湖北荆州人, 博士, 教授, 从事土力学和地下工程方面的教学和科研工作。

随着轨道交通高速发展,地铁网络逐步形成^[1]。新建线路隧道下穿既有车站^[2-3]的情况在轨道交通建设中时有发生。我国地铁车站修建时,常以地连墙作为围护结构,区间盾构隧道近距离下穿施工时,通常需要破除车站两侧的地连墙^[4]。若既有车站的地连墙预置了玻璃纤维筋,盾构穿越难度较低。然而,由于我国地铁建设规模快速扩张且线网规划动态调整频繁,区间隧道经常需穿越未设置预留措施的钢筋混凝土连墙。目前常用的方案是对车站下部土体加固后人工凿除,但耗时长且造价高。针对这一问题,有学者提出改造加强盾构后直穿普通钢筋混凝土连墙的方案。盾构直接穿越的风险在于:在盾构刀具的切割、弯折等联合作用下,混凝土中的钢筋容易发生拉断或扭断,缠绕刀盘,阻碍盾构掘进^[5];如果加大推力或扭矩强行脱困,可能使得刀具磨损过大或破坏,由此带来的高切削荷载会对既有结构产生严重影响。因此,准确理解盾构刀盘切削作用下地连墙的破坏模式及机理,对盾构刀具的合理配置和工程风险控制至关重要。

目前相关的研究主要依托盾构切削钢筋混凝土桩基础工程^[6-8],采用理论分析、模型试验、数值模拟^[9]等方法研究钢筋混凝土的破坏模式及切削荷载。理论分析方面,如王飞^[10]基于二维细观模型,研究了刀刃切削钢筋和混凝土的微观机理;杜欣等^[11]基于等效面积和叠加原理建立了撕裂刀切削桩基刀盘荷载计算模型。模型试验方面,许宇等^[12]通过室内试验,发现混凝土在切刀的作用下以压碎为主,伴随不同粒径的碎屑产生。李宏波等^[13-15]依托TBM模态掘进试验台开展全滚刀和全撕裂刀切削桩基的试验研究,基于断裂钢筋的断口形式对破坏模式定性分类,指出滚刀切削钢筋的破坏形式主要是碾压-剪切破坏;要保证刀具对钢筋的有效切割,必须保证混凝土对钢筋的包裹约束作用。袁大军等^[16]对贝壳刀切削桩基开展现场试验,研究发现:新型贝壳刀对钢筋混凝土的破坏表现为剪切和挤压的双重模式,钢筋的断口特征主要表现为切断和拉裂两种。数值模拟方面,王哲等^[6]依托杭州地铁2号线切桥桩工程,采用有限元软件研究不同角度贝壳刀的切削效果,优化了刀具布置方式;Liu等^[17]基于PFC-FLAC耦合建模,实现了盾构切削桥桩的仿真分析;Xu等^[18]基于工程需求,采用有限元软件ABAQUS模拟了刀盘切削素混凝土桩基的过程,发现混凝土的破坏

形式为脆性破坏;石晓阳等^[19]通过建立全断面刀盘掘土的数值模型,研究复合地层中掘进参数的变化规律,但未考虑滚刀的自转。目前可供参考的盾构直接切削钢筋混凝土连墙的工程案例较少,对于钢筋的破坏研究多为定性分类,缺乏机理分析及量化的判别准则。近期,仅发现Yu等^[20]开展的盾构刀盘切削钢筋混凝土连墙室内试验研究,该试验仅验证了盾构直接切削地连墙的可行性,对切削荷载下材料的破坏模式及其失效机理缺乏系统阐释。

本文以滚刀切削钢筋混凝土连墙室内掘进试验为背景,采用ABAQUS有限元软件建立三维动态数值模型,研究了盾构刀盘切削钢筋混凝土连墙的作用机理、破坏模式和刀盘荷载特征。研究成果可为今后类似工程提供参考,对提高施工效率具有重要意义。

1 盾构切削墙体破坏机理分析

1.1 试验概况

Yu等^[20]基于盾构与掘进国家重点实验室TBM掘进模态综合试验台,开展了盾构切削钢筋混凝土连墙室内掘进试验,试验设施如图1(a)所示。刀盘直径为2280 mm,共配置11把直径为432 mm的滚刀,整个刀盘结构可视为14个滚刀刀刃,按安装半径顺序将刀刃编号为1#—14#。其中,1#和2#、3#和5#、4#和6#为中心双刃滚刀,刀间距为84 mm;7#—14#为单刃滚刀,刀间距为100 mm。

岩箱内浇筑两层钢筋混凝土试样,每层钢筋网采用纵向和横向交错排布,布置方式如图1(b)所示。横向钢筋采用12根直径16 mm的螺纹钢,间距为200 mm;纵向钢筋采用16根直径25 mm的螺纹钢,间距为150 mm;钢筋强度均为HRB335。混凝土强度为C45,岩棉板用于模拟墙后填土状态。

两层试样根据切削对象的不同,采用不同的掘进参数,共分为4个工况,如表1所示。

1.2 数值模型建立

1.2.1 几何模型及网格划分

一般来说,地连墙中的纵筋布置对刚度起主导作用^[21]。本研究采用数值仿真软件ABAQUS,对试验中切削25 mm直径纵筋的工况2建模分析。如图2(a)所示,刀盘尺寸与试验一致,刀盘上预留滚刀的位置。为保证力的有效传递,建模时保留刀轴,刀轴与滚刀之间共有3个接触面。由于整个

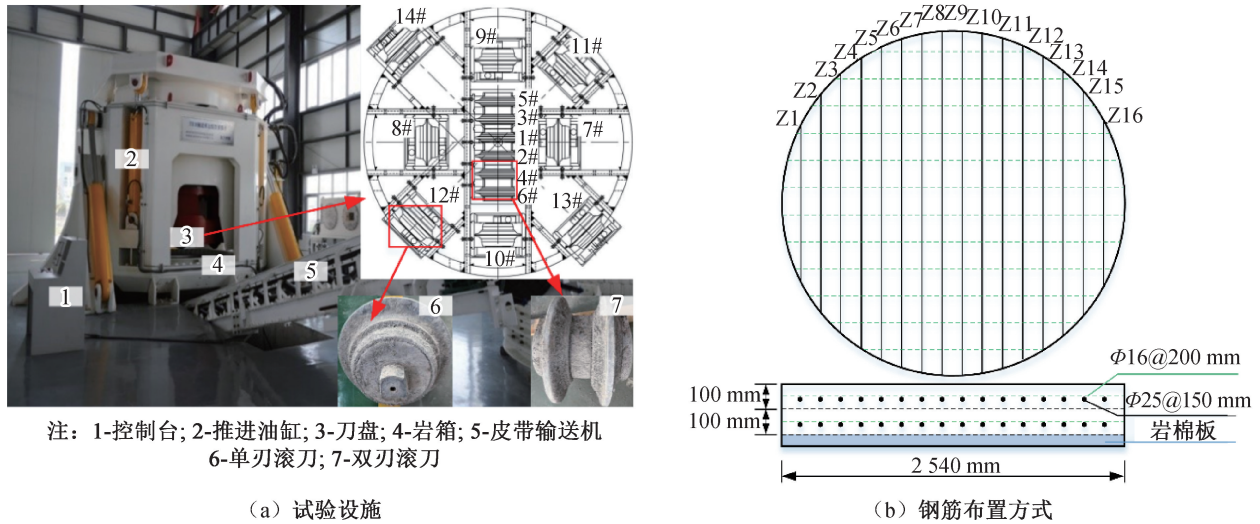


图 1 试验平台

Fig. 1 Test platform

表 1 不同工况下掘进参数

Tab. 1 Parameters of excavation

工况	切削对象	转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	推进速度/ ($\text{mm} \cdot \min^{-1}$)	贯入度/ ($\text{mm} \cdot r^{-1}$)
1	Φ16 钢筋	2	30	15
2	Φ25 钢筋	2	40	20
3	Φ16 钢筋	2	40	20
4	Φ25 钢筋	2	20	10

刀盘结构具有较大的刚度,将刀盘与中心参考点 RP1 耦合为刚体,方便后续在该点施加整体的运动条件;通过运动耦合约束将滚刀连接至中心参考点 RP2。滚刀自身未被施加旋转约束,因此仅随刀盘转动而被驱动,并可绕自身轴线自由转动,以模拟其实际工作状态(其余滚刀采用相同方法处理)。刀盘和滚刀采用四面体网格划分。在刀盘正前方建立钢筋混凝土地连墙模型,其尺寸为 3 000 mm×3 000 mm×200 mm,大于刀盘直径。钢

筋直径为 25 mm,间距为 150 mm,编号为 Z1—Z16,均采用六面体网格划分。将刀盘、滚刀和地连墙装配,形成刀盘切削的整体有限元分析模型,如图 2(c) 所示。模型的节点总数为 621 776 个,单元总数为 432 063 个。

1. 2. 2 材料参数

刀盘和滚刀默认不发生变形和疲劳,采用刚体模拟,材料参数的取值如下:密度为 14.5 g/cm³、弹性模量为 652 GPa、泊松比为 0.3。

混凝土采用扩展的 Drucker-Prager 模型,该模型能够准确描述混凝土弹塑性特征^[22],具体参数如表 2 所示。

针对钢筋的数值模型,本文选择在数值模拟中广泛应用的 Johnson-Cook 动态本构,物理参数取值参照 45 号钢^[23],材料参数如表 3 所示。以模型自带的剪切失效准则作为切屑分离准则^[24],该准则是将单元积分点处的等效塑性应变与此处的等

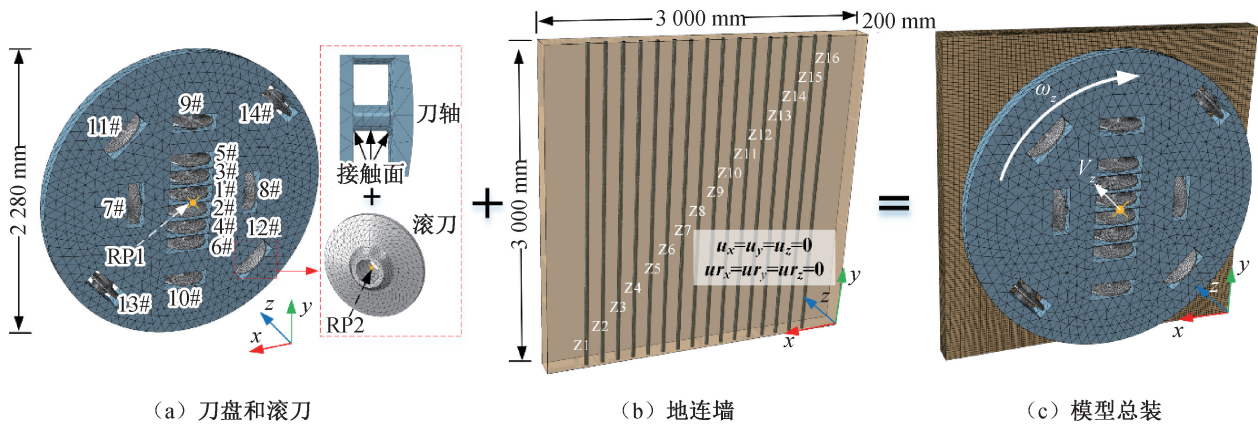


图 2 刀盘切削钢筋混凝土地连墙数值模型

Fig. 2 Model of cutting reinforced concrete diaphragm walls

表2 混凝土材料参数取值

Tab. 2 Parameters of concrete

参数名称	数值	参数名称	数值
密度/(g·cm ⁻³)	2.46	摩擦角/(°)	50
弹性模量/GPa	48	流应力比	1
泊松比	0.22	剪胀角/(°)	10

表3 钢筋材料参数取值

Tab. 3 Parameters of steel

参数名称	数值	参数名称	数值
屈服应力/MPa	506	损伤常数 d_1	0.100
应变硬化常数	320	损伤常数 d_2	0.760
应变硬化系数	0.28	损伤常数 d_3	1.570
应变速率强化系数	0.064	损伤常数 d_4	0.005
热软化系数	1.06	损伤常数 d_5	-0.840

效失效应变进行比较,假定破坏参数 D 大于 1 时材料失效,软件会自动识别并删除失效单元。破坏参数 D 为

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} \right) \quad (1)$$

式中: $\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}$ 是等效塑性应变增量; $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ 是失效应变。

1.2.3 相互作用及边界条件

一个完整的接触模拟必须包含接触面定义和相互作用属性定义两部分。切削过程总体存在两

种接触:滚刀与钢筋混凝土、滚刀与刀轴的接触。

两者均采用基于罚函数算法的通用接触对来定义。如图3所示,法向行为由“硬”接触关系描述,对两个接触表面之间能够传递的接触压力的大小 p 没有任何限制;切向行为由库仑摩擦模型描述,当摩擦力大于临界值 τ 时,会发生相对滑动。临界值 τ 的数值由式(2)确定。

$$\tau = \mu p \quad (2)$$

式中: μ 是摩擦因数; p 是接触压力,MPa。

盾构刀盘旋转带动滚刀自转切削钢筋混凝土,并在推进油缸的顶进作用下缓慢前移。鉴于本文为模拟初步切削过程,综合考虑试验工况和计算效率等,施加的边界条件如下:(1)仅保持待切削面自由,其余5个面约束所有方向的位移 u 和转角 ur ,即 $u=0, ur=0$;(2)刀盘旋转速度 $\omega_z=2$ r/min,推进速度 $V_z=40$ mm/min;(3)仿真总时间 $T=75$ s。

2 数值模拟结果及分析

2.1 混凝土破坏特征

如图4(a)所示,在切削初始阶段,滚刀首先碾压素混凝土层,正下方的混凝土应力增大,达到强度极限后发生脆性破坏,在数值模型中表现为失效的单元被删除。随着切削的进行,混凝土表

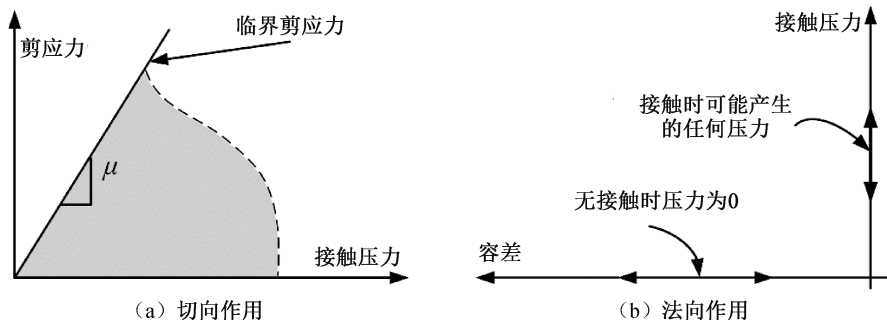
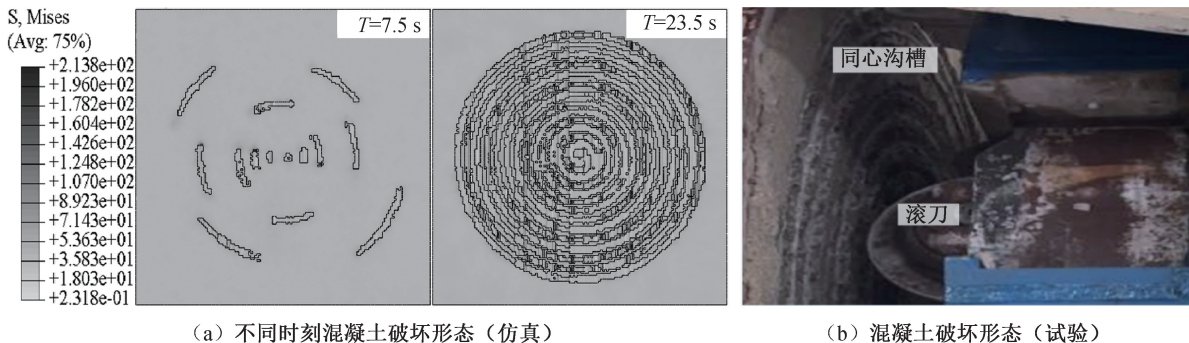


图3 相互作用描述

Fig. 3 Interaction description



(a) 不同时刻混凝土破坏形态(仿真)

(b) 混凝土破坏形态(试验)

图4 混凝土破坏模式

Fig. 4 Concrete failure modes

面形成一系列的同心圆沟槽,其形状与滚刀截面相贴合,宽度略大于刀刃本身。相邻沟槽之间的间距等同滚刀的轨迹布置间距。

2.2 钢筋破坏特征及机理

随着切削的进行,滚刀逐渐开始接触钢筋。在刀盘推力作用下,滚刀将钢筋推至混凝土中固定,在法向和切向力的双重作用下进行碾压-磨削,使钢筋出现豁口,如图 5(a)所示。随着贯入深度的增加,滚刀反复压磨以达到切削钢筋的效果,最终钢筋在豁口处断裂。

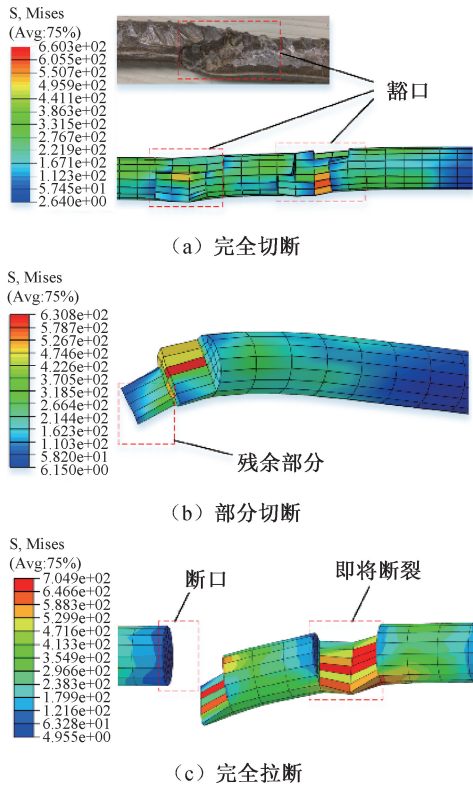


图 5 钢筋破坏模式

Fig. 5 Steel failure modes

观察钢筋断口发现,断口特征主要呈现切断和拉断两种。整个断口截面可分为三种类型:当 $0 < \delta < 0.5$ 时,钢筋发生完全切断破坏(类型 I);当 $0.5 \leq \delta \leq 1$ 时,钢筋发生部分切断破坏(类型 II);当 $\delta > 1$ 时,钢筋发生完全拉断破坏(类型 III)。为准确评估钢筋的破坏模式,本文采用钢筋断口处的断裂应力比 δ 建立判别准则,定义为

$$\delta = \sigma_f / \sigma_t \quad (3)$$

式中, σ_f 为钢筋断裂时应力, MPa; σ_t 为钢筋屈服应力, MPa。

下面对钢筋破坏的机理进行分析。在理想状态下,钢筋被周边混凝土完全包裹固定,滚刀在确

定点位对钢筋反复碾压切割,钢筋被完全切断。该破坏类型的钢筋大多位于刀盘中心的位置,原因是越靠近中心区域,与钢筋接触的滚刀数量越多,有更多的切削次数;同时中心区域的滚刀安装半径小,旋转一周的行程短,与覆盖区域内的钢筋接触更频繁,起到固定的作用。

但仿真和试验结果均表明,钢筋表层的混凝土被压碎后,仅有背后少数混凝土对其约束。随着刀盘的振动,钢筋背后的混凝土也逐渐与其剥离,此时仅剩远端混凝土对其固定。在钢筋失去局部约束的情况下,滚刀单次碾压只会将钢筋推向混凝土剥离后形成的空隙,然后钢筋回弹至原位。多次回弹可能使两端出现远大于钢筋屈服应力的拉应力将其拉断。因此,钢筋周围约束状态是影响其破坏形态的最主要因素。除此之外,钢筋的断裂长度与即将断裂时钢筋内部的应力状态密切相关。

图 6 为滚刀的切削轨迹与每根钢筋的断裂位置。钢筋发生断裂的比例为 62.5%,断口位置均出现在切削点位附近。

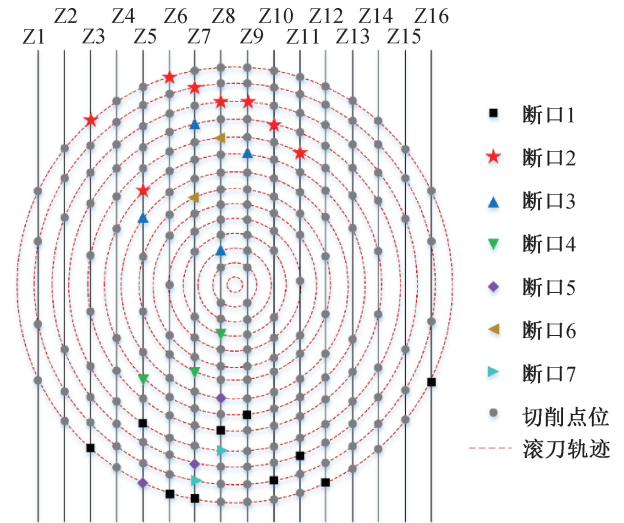


图 6 滚刀轨迹及钢筋断口位置

Fig. 6 Trajectory and position of steel fracture

图 7(a)展示了仿真中钢筋的三种断口类型所占的比例,可见钢筋的破坏模式主要表现为部分切断,完全切断和完全拉断的占少数,且钢筋切断的比例要高于拉断的比例。图 7(b)为根据判别准则统计的钢筋断裂应力比的分布情况。与前述机理分析一致,远离刀盘中心的钢筋由于较少被滚刀切削,不易发生断裂,即使存在断裂,也是完全拉断,如 Z3 和 Z12;靠近中心位置的钢筋发生断裂的比例高,并且为部分切断,如 Z8 和 Z9。

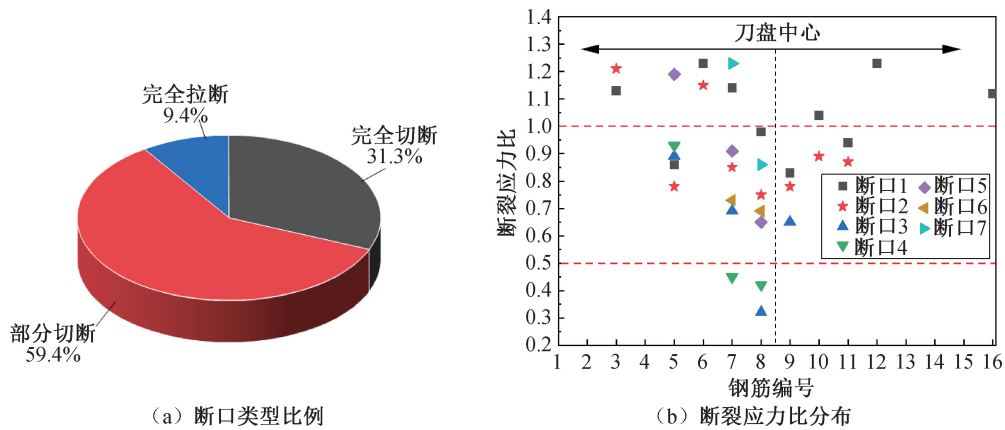


图7 钢筋断裂情况统计

Fig. 7 Statistics on damaged steels

将相同工况下切断钢筋长度统计于表4中,发现仿真与试验结果相近且中等长度(60~80 cm)的钢筋占比最大。同时发现,由于混凝土更容易脱落,仿真中的钢筋约束条件比试验更差,出现长钢筋的概率大。

表4 断裂钢筋长度统计

Tab. 4 Statistics of broken steel lengths

钢筋长度/cm	所占比例/%	
	仿真	试验
<30	10.52	19.23
30~60	23.68	25.00
60~80	31.58	30.77
80~100	7.90	9.62
>100	26.32	15.38

2.3 刀盘荷载

刀盘荷载(推力、扭矩)是影响盾构施工性能的重要设计参数。将仿真与试验中相同工况下得到的刀盘荷载作对比,结果如图8所示。

仿真荷载总体呈现阶跃变化的特征。在切削初始阶段,荷载逐步增大;随着切削的进行,掘进

参数达到固定值,滚刀与混凝土逐渐形成良好的接触,荷载趋于稳定,但比试验的数据波动更为强烈。这是因为仿真受到尺度和效率的影响,数值模型中的单元尺寸无法设置得足够的小;而试验中,大部分混凝土被破碎成相对较小的碎片,使得测得的荷载变化较为平缓。刀盘扭矩与推力具有较强的相关性,变化趋势相同。

仿真和试验得到的推力、扭矩平均值分别为1472.5 kN、112.3 kN·m和1589.3 kN、118.4 kN·m,二者的平均值非常接近。推力和扭矩的相对误差分别为7.36%和9.21%,这说明仿真结果能够相对准确地反映试验中刀盘荷载的平均水平和趋势。

3 参数敏感分析

3.1 钢筋直径对破坏模式的影响

地连墙的纵向主筋一般大于16 mm,实际施工中可能会配置更大直径的钢筋,研究不同直径钢筋在刀盘切削作用下的破坏模式,对预测盾构切墙效果有重要意义。如上节分析,钢筋的最终破坏模式既有拉断也有切断,为取得良好切削效果,

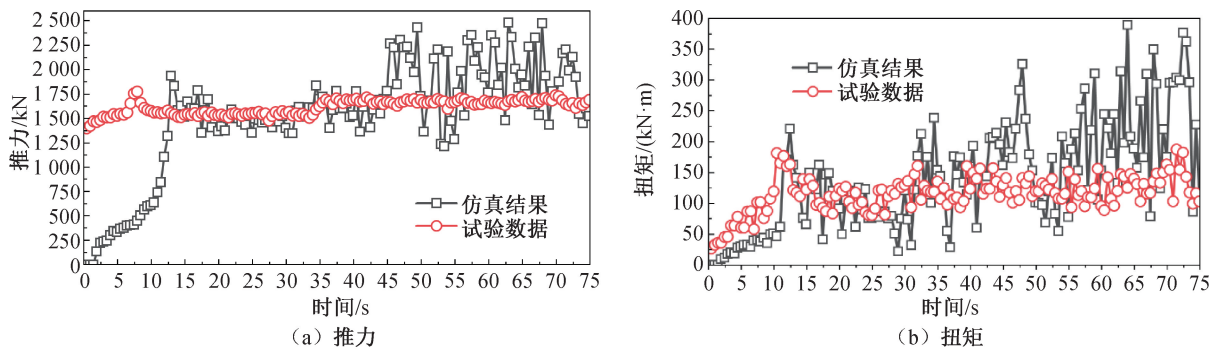


图8 时间-荷载曲线

Fig. 8 Curve of time-load

应降低钢筋发生完全拉断的概率。建立刀盘切削 16、20、24、28、32 mm 钢筋直径的数值模型,统计破坏类型 I、II、III 在每个模型中出现的比例,结果如图 9 所示。

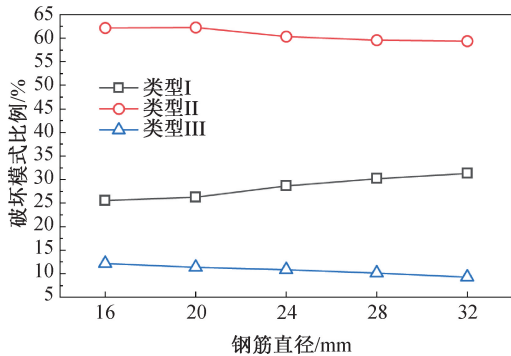


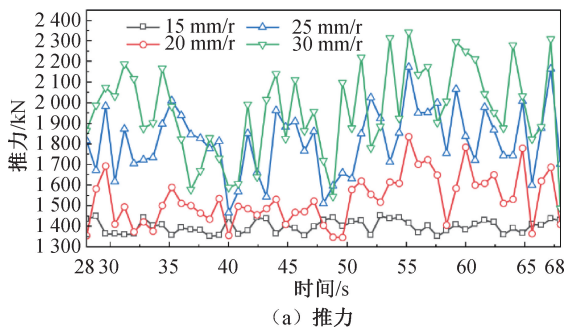
图 9 不同钢筋直径的破坏模式比例

Fig. 9 Failure mode proportions of different steel diameters

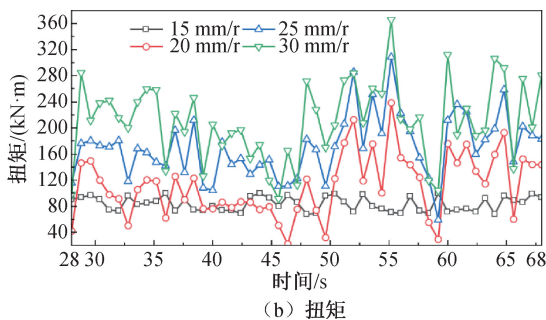
钢筋直径越大,完全拉断的比例越小,这是因为直径较大的钢筋与周围混凝土的接触面积大,约束作用更强;而直径较小的钢筋容易脱离原来位置,无法被有效切削,在极端情况下,甚至可能被滚刀带动而整根甩出。

3.2 贯入度对刀盘荷载的影响

贯入度是指刀盘旋转一周时的切削深度,是决定施工掘进效率的关键操作参数。根据试验工况,本文选取 15、20、25、30 mm/r 四种贯入度进行仿真,仅选择切削进入稳定阶段的数据分析,结果如图 10 所示。结果表明,贯入度对荷载的影响主要体现



(a) 推力



(b) 扭矩

图 10 不同贯入度下刀盘荷载变化

Fig. 10 Loads at different penetrations

在两方面:稳定程度和大小变化。在高贯入度下,荷载出现振荡不稳定,扭矩的波动幅度尤为明显;而在较低的贯入度下,刀盘荷载表现平稳,此时更能发挥滚刀磨削钢筋的作用。

如图 11 所示,通过对数据进行线性拟合发现,随着贯入度增大,推力和扭矩的大小也随之增加。经过分析,其原因在于贯入度的增加使得滚刀与钢筋混凝土的接触面积增大。

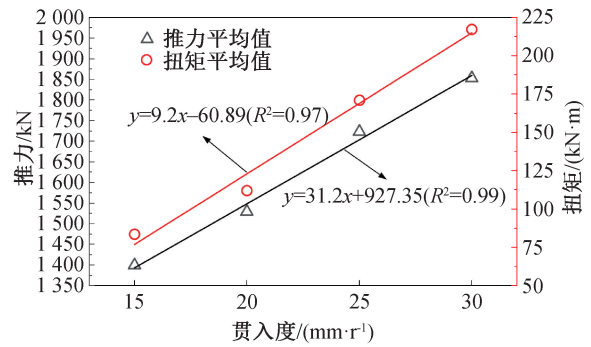


图 11 拟合曲线

Fig. 11 Fit curve

4 结论

1) 混凝土在滚刀切削下极易被压碎,表现为脆性破坏;钢筋的破坏模式主要取决于周围混凝土的约束效应以及钢筋在断裂时内部的应力状态,基于断裂应力比判别准则的统计分析结果表明,钢筋破坏模式中部分切断占比最高、完全拉断次之,完全切断占比最低。

2) 直径较大的钢筋由于其更强的抗弯性能和良好的约束条件,发生完全拉断的概率低。

3) 与室内试验实测数据对比,验证了数值计算结果的合理性,推力与扭矩平均值误差分别为 7.36% 和 9.21%。

4) 刀盘荷载随着贯入度的增大而增加,高贯入度 (≥ 25 mm/r) 下,刀盘荷载(尤其是扭矩)振荡明显,在低贯入度情况下更能发挥滚刀的磨削作用。

参考文献:

[1] 中国公路学报编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40. Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering research;2022[J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(4): 1-40.

[2] YIN M, JIANG H, JIANG Y, et al. Effect of the excava-

- tion clearance of an under-crossing shield tunnel on existing shield tunnels [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 78: 245-258.
- [3] ZHANG X, ZHANG C P, WANG J C. Effect of closely spaced twin tunnel construction beneath an existing subway station: a case study [J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2018, 46(4): 1559-1573.
- [4] LIU W, SHI P, LI H, et al. Observed performance of three adjacent 48 m depth concrete diaphragm wall panels in silty soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2019, 56(11): 1736-1742.
- [5] WU T, JIANG N, ZHOU C, et al. Analysis model for deformation mechanism of strip foundation of building: considering shear effect of down-crossing tunnel under excavation [J]. *Journal of Central South University*, 2021, 28(8): 2556-2573.
- [6] 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 Z, WU S W, YAO W J, 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.
- [7] 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+128.
CHEN H F, YUAN D J, WANG F, et al. Study on shield cutting parameters when cutting big diameter piles [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(10): 103-109+128.
- [8] 薄春莲. 土压平衡式盾构机切削穿越建筑物桩群施工技术 [J]. *铁道建筑技术*, 2011(4): 43-47.
BO C L. EPB shield machine cutting through building pile group construction technique [J]. *Railway Construction Technology*, 2011(4): 43-47.
- [9] 薛靖, 穆坤, 张建新, 等. 地铁盾构不同角度侧穿既有铁路桥梁桩基变形分析 [J]. *河北工程大学学报(自然科学版)*, 2024, 41(5): 56-63.
XUE J, MU K, ZHANG J X, et al. Deformation analysis of bridge pile foundation of metro shield tunnel side passing existing railway bridge at different angles [J]. *Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition)*, 2024, 41(5): 56-63.
- [10] 王飞. 盾构直接掘削大直径钢筋混凝土群桩研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
WANG F. Study on shield cutting large diameter reinforced concrete piles directly [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [11] 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 X, HUANG X M, HAO Y, 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.
- [12] 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.
- [13] 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 (Chinese and English)*, 2020, 40(12): 1808-1816.
- [14] 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 (Chinese and English)*, 2020, 40(1): 35-42.
- [15] WANG Y, WANG X, XIONG Y, et al. Full-scale laboratory test of cutting large-diameter piles directly by shield cutterhead [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2022(1): 8780927.
- [16] 袁大军, 王飞. 盾构切削大直径钢筋混凝土群桩的理论和实践 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
YUAN D J, WANG F. Theory and practice of shield cutting large-diameter reinforced concrete pile groups [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [17] LIU B, LI T, HAN Y, et al. DEM-continuum mechanics coupling simulation of cutting reinforced concrete pile by shield machine [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 152: 105036.
- [18] XU P, ZUO S X. Study on the JH-2 model parameters for metro shield cutting reinforced concrete pile [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2021, 39(7): 1-12.

- ZOU Y F. Numerical simulation and experimental research on welding residual stress of thick plate for steel bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [14] 周佳惠, 张雪彪. T型焊接结构多道焊的数值模拟研究[J]. 热加工工艺, 2022, 51(19): 109-113.
- ZHOU J H, ZHANG X B. Numerical simulation study on multi-pass welding of T-type welding structure[J]. Hot Working Technology, 2022, 51(19): 109-113.
- [15] 强斌, 李亚东, 顾颖, 等. 钢桥对接焊缝残余应力及变形场数值分析与试验验证[J]. 铁道学报, 2017, 39(9): 134-139.
- QIANG B, LI Y D, GU Y, et al. Numerical analysis and experimental verification on welding residual stress and deformation of butt weld plate for steel bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(9): 134-139.
- [16] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15(2): 299.
- [17] 刘未钦. 桥梁耐候钢T接十字交叉焊缝残余应力分布及其对疲劳性能的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- LIU W Q. Residual stress distribution of T-joint cross weld of bridge weathering steel and its effect on fatigue performance[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.
- [18] 巨航瑞. 钢桥不等厚钢板对接焊缝焊接残余应力研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2022.
- JU H R. Research on welding residual stresses in butt welds of steel plates with different thicknesses for steel bridges[D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2022.
- [19] 李自林, 詹阳, 谢新. 大跨径钢结构箱梁桥铺管法热力融雪研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2013, 30(3): 17-20.
- LI Z L, ZHAN Y, XIE X. Research of hydronic sowing on pipe laying of long-span steel box girder bridge[J]. Journal of Hebei University of Engineering (Natural Science Edition), 2013, 30(3): 17-20.
- (责任编辑 周雪梅)
-
- (上接第8页)
- [19] 石晓阳, 郭子琦, 夏明, 等. 复合地层土压平衡盾构刀盘掘进参数[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(9): 3956-3965.
- SHI X Y, GUO Z Q, XIA M, et al. Tunnelling parameters of cutter head of earth pressure balance shield machine in composite strata[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(9): 3956-3965.
- [20] YU H, CHEN L, PENG K. Adaptability of a reinforced concrete diaphragm wall cut by disc cutter[J]. Sustainability, 2022, 14(23): 16154.
- [21] 包扬. 超深地下连续墙工程施工技术及管理措施研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- BAO Y. Study on construction technology and management measures of super deep underground continuous wall project[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [22] 苏翠侠. 盾构刀盘掘进载荷的三维有限元仿真分析[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- SU C X. 3-D FEM simulation analysis of excavation load on cutterhead in shield tunneling machine[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [23] 陈刚, 陈忠富, 陶俊林, 等. 45钢动态塑性本构参量与验证[J]. 爆炸与冲击, 2005(5): 69-74.
- CHEN G, CHEN Z F, TAO J L, et al. Investigation and validation on plastic constitutive parameters of 45 steel[J]. Explosion and Shock Waves, 2005(5): 69-74.
- [24] HAN M, CAI Z, QU C, et al. Dynamic numerical simulation of cutterhead loads in TBM tunnelling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 70: 286-298.
- (责任编辑 周雪梅)