

TBM 掘进中围岩变形与卡机风险数值模拟研究

许史

新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司

DOI:10.12238/hwr.v9i3.6139

[摘要] 本文针对双护盾隧道掘进机(TBM)在复杂地质条件下的围岩变形和卡机风险进行了数值模拟分析。研究背景为某输水隧洞工程,该隧洞穿越软硬岩层及活动断裂带等不同类型围岩。使用FLAC3D软件建立了数值模型,模拟了TBM开挖过程,并分析了不同开挖工况下围岩变形和卡机风险。结果表明,增大扩挖尺寸能有效降低护盾与围岩的接触面积及摩擦力,从而减少卡机风险。此外,回填方案和应力释放率的不同设置对围岩变形及卡机风险亦有显著影响。研究结果可为TBM掘进方案的优化、施工效率和安全性的提高提供理论支持。

[关键词] 双护盾TBM; 围岩变形; 卡机风险; 数值模拟; FLAC3D

中图分类号: N032 **文献标识码:** A

Numerical simulation study of surrounding rock deformation and risk of stuck machine in TBM tunneling

Shi Xu

Xinjiang Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd.

[Abstract] In this paper, the surrounding rock deformation and jamming risk of double shield tunnel boring machine (TBM) under complex geological conditions are numerically simulated and analyzed. The research background is a water conveyance tunnel project, which passes through different types of surrounding rock such as soft and hard rock strata and active fault zones. A numerical model was established using FLAC3D software to simulate the TBM excavation process, and the deformation of surrounding rock and the risk of jamming under different excavation conditions were analyzed. The results show that increasing the excavation size can effectively reduce the contact area and friction between the shield and the surrounding rock, thereby reducing the risk of jamming. In addition, different backfill schemes and stress release rates also have a significant impact on the deformation of surrounding rock and the risk of jamming. The research results can provide theoretical support for the optimization of TBM tunneling scheme, the improvement of construction efficiency and safety.

[Key words] Double shield TBM; Surrounding rock deformation; Card machine risk; Numerical simulation; FLAC3D

引言

我国水资源时空分布不均,对农业和城市化建设构成挑战^[1-2]。为合理分配水资源,调水工程中的隧洞输水系统被广泛应用^[3-5]。隧道掘进机(TBM)因其高效、安全的特点,成为复杂地质条件下隧洞施工的主要工具,其中双护盾TBM尤其适用于软硬岩地层^[6]。然而,围岩变形和卡机风险是影响施工效率和安全的突出问题,可能导致衬砌破坏或施工中断^[7-9]。因此,研究围岩变形与卡机风险对提升施工效率与安全性至关重要。

目前,围岩变形与卡机风险的研究多集中于理论分析和试验^[10-11],但因地质条件复杂和掘进参数多样,实际工程中难以全面预测围岩变形及卡机风险。通过建立模型模拟围岩与TBM的相

互作用,可更精确评估掘进参数的影响^[12-13]。鉴于此,本文基于FLAC3D数值模拟,研究扩挖尺寸、应力释放率和回填长度对围岩变形与卡机风险的影响,为工程实践提供参考。

1 工程概况

某输水隧洞进口位于TKS某拦河引水枢纽库区右岸,隧洞由进口埋涵和隧洞组成,进口底板高程1599.0m,出口高程1563.5m,全长69.404km。隧洞为深埋长隧洞,最大埋深1360m,此外隧洞穿越地层岩性主要为华力西期侵入花岗岩、二长花岗岩、正长花岗岩、钾长花岗岩、辉绿岩等硬岩。隧洞沿线共穿越1条区域活动断裂。隧洞围岩类别包含II、III、IV和V,其中II类围岩占7.8%, III类围岩占28.2%, IV类围岩占14.9%, V类围岩占49.1%,由于双护

盾TBM掘进洞段主要涉及IV和V类围岩,其主要物理力学参数如下表1所示。

表1 围岩物理力学参数

围岩类别	弹性模量 (GPa)	密度(kg/m ³)	泊松比	黏聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)
IV类	1~2	2300	0.33	0.33	27.47
V类	0.4~0.5	2100~2200	0.35~0.38	0.05~0.1	19.29~23.27

2 计算工况及分析内容

2.1 计算工况

刀盘和护盾在对称面上施加X方向水平位移约束,其余边界无应力或位移限制,以模拟其上下浮动的可能性(实际工程中TBM常出现上浮或下沉现象),并允许微小变形。双护盾TBM的几何尺寸及技术参数见表2。

刀盘与护盾材料为钢,预制衬砌管片为钢筋混凝土,灌浆材料采用不同弹性模量模拟软化和硬化阶段的强度特性。护盾简化为空心薄壁结构,内部部件重量通过等效重度表示;后续系统重量通过增加管片重度实现。

表2 双护盾TBM几何尺寸

开挖/刀盘直径	前盾/后盾外径	管片外径	成洞直径	刀盘长度	前/后盾长度	护盾厚度	管片宽度	管片厚度
9.15	9.04/9.01	8.85	7.93	0.7	5.1/6.6	0.03	1.8	0.48

表3 双护盾主要部件技术参数

部件		弹性模量(Gpa)	泊松比	黏聚力(Mpa)	密度 (g/cm3)
刀盘(钢)		200	0.3	/	7.6(5.3)
护盾(钢)		200	0.3	/	7.6(95)
管片(钢筋混凝土)		20	0.2	/	2.5(3.25)
超前灌浆		7	0.3	1	2.65
回填灌浆	软化阶段	0.5	0.3	/	2.4
	硬化阶段	1	0.3	/	2.4

为模拟双护盾TBM连续掘进过程,步骤如下:

(1)地应力平衡:采用Fish语言将回归地应力场导入数值模型并计算应力平衡状态。

(2)刀盘推进:沿隧道轴线每次推进1.8 m,施加1 MPa刀盘推力(推力总值与开挖面面积的比值),每次推进均加载推力。

(3)衬砌安装与回填:护盾完全进入岩体后,在护尾安装管片衬砌并回填,护盾后两环不填充豆砾石,后续回填材料设置为软化材料,其余为硬化阶段。

(4)循环推进:通过自编Fish语言实现连续自动控制,模拟TBM掘进至掌子面推进28.8m。

2.2 模拟分析

2.2.1 TBM快速通过

由于双护盾TBM为连续掘进,围岩应力未完全释放,处于不平衡状态。目前,TBM掘进速度与围岩应力释放率的关系尚无统一结论,且受人为干扰较大。为研究高地应力挤压变形洞段中TBM快速通过对护盾卡机风险的影响,建立6种应力释放率(100%、90%、80%、70%、60%、50%)的数值仿真模型,分析不同应力释放率下围岩卡机风险的变化规律。

2.2.2管片段快速回填

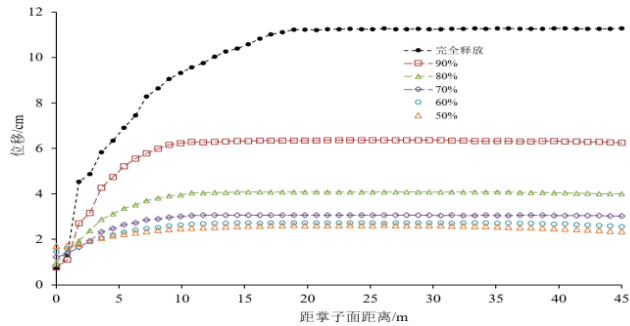
隧道TBM开挖尾盾段采用管片支护,管片与围岩间回填豆砾石混凝土以固定管片并支护围岩。根据简支梁理论,支点距离越大,梁变形越大,因此管片回填时间对限制护盾段围岩变形有重要影响。为分析回填速度对围岩变形、护盾接触面积及接触力的影响,进而评估其对降低卡机风险的作用,设计了4种回填方案:尾盾后5、10、15和20环回填豆砾石混凝土,并将其设置为软化材料以反映回填时间的影响。

3 结果与分析

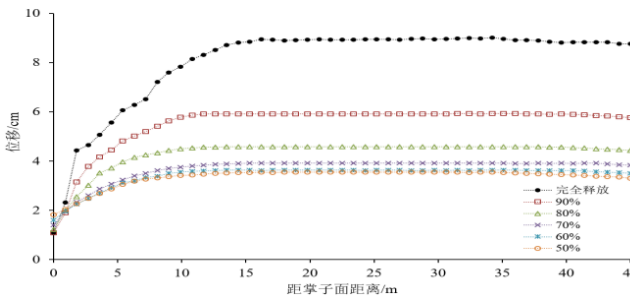
3.1 TBM快速通过

3.1.1顶部最大位移

图1显示了不同应力释放率下拱顶及拱腰围岩LDP曲线随掌子面距离的变化。不同应力释放率下拱顶及拱腰围岩LDP曲线变化趋势一致:距离掌子面一定范围内,收敛位移逐渐增加并趋于稳定。应力释放率对收敛变形影响显著,较大释放率下最终位移超10cm,而释放率降低10%时,位移从11cm降至6cm,降幅近50%。表明小幅降低应力释放率可有效减少围岩收敛变形,降低挤压护盾风险,从而减少卡机可能性。



(a) 顶部围岩LDP曲线



(b) 腰部围岩LDP曲线

图1 顶部及拱腰围岩LDP曲线随应力释放率变化情况

3.1.2围岩屈服范围

不同应力释放率下掌子面至第一环管片洞段范围内围岩塑性屈服区体积的变化。应力释放率降低使围岩塑性屈服区体积减小,尤其在释放率低于70%时下降趋缓。塑性区缩小减少了围岩卸荷损伤和收敛变形,降低了护盾挤压风险。但双护盾TBM快速通过时,围岩应力释放不完全,后续释放可能通过豆砾石回填层对管片施压,增加管片开裂风险。

3.2管片快速回填

3.2.1顶部最大位移

隧洞常规掘进与豆砾石混凝土回填时不同软化长度下围岩顶部最大位移与扩挖量的关系。豆砾石混凝土回填的软化长度对围岩收敛变形有显著影响:当护盾后3~7环管片为软化阶段参数时,围岩最大收敛变形较卡机洞段的11.7cm降低10.25%,表明豆砾石混凝土快速回填可有效减少掌子面至护盾段围岩变形,降低围岩与护盾的接触面积及挤压应力,从而减少卡机风险。

3.2.2围岩屈服范围

常规掘进与豆砾石混凝土回填时不同软化长度下围岩屈服区范围的变化。随着豆砾石混凝土回填速度增加,围岩塑性区体积有所减小:当仅尾盾后3~7环管片回填较软豆砾石混凝土(7环后硬化)时,塑性区体积较正常掘进(尾盾后3~22环为较软属性)降低5.56%。

4 结论

文章利用FLAC3D数值模拟研究了双护盾TBM掘进过程中围岩变形和卡机风险的影响因素,主要得出以下结论:

(1)双护盾TBM护盾与围岩开挖断面为非同心圆的设计时,扩挖尺寸与围岩护盾接触面积及接触摩擦力之间并不具有线性相关性,扩挖尺寸增加到一定范围内,虽可进一步降低卡机风险,但效果相应降低。

(2)应力释放率的降低有效减小了围岩的收敛变形和塑性屈服区体积,减少了围岩与护盾的接触面积和摩擦力,降低了卡机风险。然而,软弱岩体段较长时需谨慎使用快速掘进工法,防止支护不足。

(3)回填长度较短时,围岩屈服区体积减小,接触面积和摩擦力降低,减小了双护盾TBM掘进时所需克服的摩擦力,此外快速回填技术在提高隧道掘进效率的同时,有助于减小围岩与护盾的接触压力。

[参考文献]

- [1]郭宝云.山城河水库输水隧洞石方洞挖施工技术探究[J].全面腐蚀控制,2025,39(1):118-121.
- [2]高鹏.某输水隧洞工程开挖和支护施工措施分析[J].海河水利,2023,(2):112-114.
- [3]张武.新建高速公路隧道下穿既有供水隧洞的有限元分析[J].吉林水利,2015,(07):14-18.
- [4]吴健军.水利隧洞工程洞身开挖与衬砌施工工艺[J].科学技术创新,2025,(3):153-156.
- [5]康辉.水利隧洞工程洞身开挖与衬砌施工方法的应用[J].中国高科技,2023,(16):142-144.
- [6]张景程.双护盾TBM前盾/支撑盾相对位姿测量技术研究[D].天津科技大学,2020.
- [7]刘远程,邓荣贵,傅支黔,等.双护盾TBM掘进过程中隧道围岩强度及变形测试研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(10):2679-2687.
- [8]韩书臣,谭忠盛,肖海晖,等.断层破碎带TBM施工卡机处置技术研究[J].人民长江,2024,55(S2):185-190+207.
- [9]韩超,张柯.双护盾隧道掘进机穿越地铁区间断层破碎带卡机机理及防卡机技术[J].城市轨道交通研究,2022,25(6):153-158.
- [10]张羽军,丁浩江.成贵高铁高坡隧道软岩大变形机理分析及病害整治[J].科学技术与工程,2020,20(1):327-334.
- [11]柳彦军,刘家奇,徐继保,等.高地应力富水软岩铁路隧道变形机理及施工控制措施[J].科学技术与工程,2022,22(21):9364-9371.
- [12]曾力,杨景辉,李明宇,等.土岩组合地层基坑开挖对下卧隧道变形影响模拟分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(5):879-887.
- [13]向海辉,冯红耀,赵文强,等.软弱围岩隧道不同施工方法数值分析研究[J].公路,2020,65(5):334-340.

作者简介:

许史(1985—),男,汉族,青海省乐都县人,硕士研究生,现就职于:新疆水利水电勘测设计研究院有限责任公司,高级工程师,研究方向:水利水电工程。