

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

韩超¹ 张柯²

(1. 河南建筑职业技术学院土木工程系, 450064, 郑州; 2. 中国科学院武汉岩土所, 430071, 武汉//第一作者, 讲师)

摘要 为了解决双护盾 TBM(隧道掘进机)穿越断层破碎带卡机无法掘进的难题,以深圳地铁 8 号线梧桐山站—沙头角站隧道区间为背景,在对双护盾 TBM 卡机机理分析的基础上,采用数值分析、地质统计学方法对 TBM 穿越断层破碎带进行研究。确定了 TBM 穿越断层破碎带预处理加固范围及方案,得出了 TBM 穿越断层破碎带时的掘进参数变化规律及最佳加固范围,有效地规避了卡机事故,保障了双护盾 TBM 顺利穿越断层破碎带。

关键词 地铁; 区间; 断层破碎带; 双护盾隧道掘进机; 卡机机理; 防卡机技术

中图分类号 U455.43

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.06.029

Jamming Mechanism of Double Shield TBM Excavating in Metro Tunnel Interval Fault Fracture Zone and Antijamming Technology

HAN Chao, ZHANG Ke

Abstract In order to solve the problem that double shield TBM cannot excavate through fault fracture zone, taking the tunnel interval of Shenzhen Metro Line 8 Wutong Mountain Station to Sha Tau Kok Station as background, on the basis of analyzing double shield TBM jamming mechanism, TBM excavating through fault fracture zone is studied using numerical analysis and geological statistics. Pre-treatment reinforcement range and scheme of TBM excavating through fault fracture zone is defined. The variation law and optimal range of tunneling parameters when TBM excavating fault fracture zone are obtained. Jamming accidents can be effectively avoided, which ensures the smooth tunneling of double shield TBM through fault fracture zone.

Key words metro; interval; fault fracture zone; double shield TBM; jamming mechanism; antijamming technology

First-author's address Department of Civil Engineering, He'nan Technical College of Construction, 450064, Zhengzhou, China

在 TBM(隧道掘进机)各类机型中,双护盾 TBM 由于可同时满足系统推进和管片拼装的要求,掘进速度快、成洞质量高,在城市地铁建造中正在被积极地探索和尝试^[1-3]。

由于隧道及地下工程的复杂性,且城市轨道交通地处繁华密集城市建筑群,一旦选用的 TBM 卡机后,处理难度较大,常规的 TBM 卡机脱困处理方法并不适用于城市地铁^[4]。因此,在城市地铁施工中避免 TBM 卡机就显得尤为重要。本文针对深圳地铁 8 号线(以下简为“8 号线”)双护盾 TBM 穿越断层破碎带(以下简为“断层”)复杂地质工况,通过对双护盾 TBM 和围岩的相互作用机理进行分析,结合数值模拟方法确定了断层预处理措施及其加固范围。通过 TBM 掘进参数分析及地质统计学方法,得出了 TBM 穿越断层前及穿越断层过程中的掘进参数变化规律及最佳范围。实践证明,本文提出的防卡机技术能够有效地避免双护盾 TBM 在断层破碎带地层中掘进被卡,也可为其他类似工程提供参考。

1 工程概况

8 号线梧桐山南站—沙头角站区间(以下简为“梧沙区间”)线路呈东西走向,下穿梧桐山。根据地勘结果可知,梧沙区间下穿梧桐山隧道段的围岩为Ⅱ级,局部地段围岩破碎,为Ⅳ级围岩。该隧道段存在较大断层,其中 F1 断层位于左线 DK41+650—DK41+690 和右线 DK41+670—DK41+720 处。该断层走向近东西向,倾向南,倾角约为 80°。断层发育于侏罗系凝灰岩岩体中,与 8 号线线路呈 15°~20°左右的夹角通过,对该线路影响较大。钻探揭露的构造岩为强、中等风化破碎岩,具有明显的破碎结构,破碎岩附近钻孔岩芯较破碎,构造蚀变严重,属于压扭性断层。梧沙区间地质纵断面如

图 1 所示。

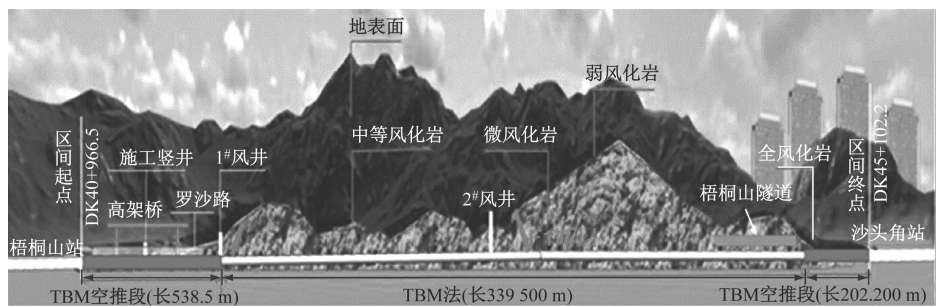


图 1 8 号线梧沙区间地质纵断面示意图

Fig. 1 Geological diagram of Line 8 Wusha interval longitudinal section

2 双护盾 TBM 卡机机理

2.1 双护盾 TBM 介绍

双护盾 TBM 也称伸缩护盾式 TBM, 由两节壳体组成, 可以保证隧道掘进、衬砌、出碴、运输等作业完全在护盾的保护下连续一次性完成。如图 2 所示, 双护盾 TBM 主要包括刀盘、前护盾、支撑护盾、主推进系统、附属推进系统及管片拼装机等结构。

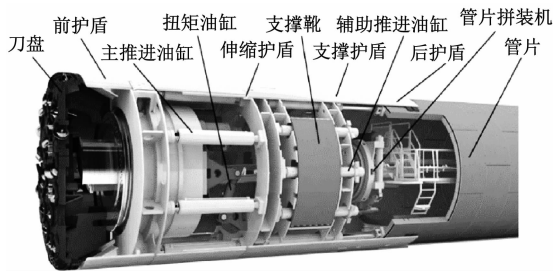


图 2 双护盾 TBM 结构图

Fig. 2 Structure diagram of double shield TBM

2.2 双护盾 TBM 卡机机理分析

双护盾 TBM 卡机可以理解为围岩与 TBM 装备相互作用的结果。围岩变形与支护力特性曲线如图 3 所示。隧洞开挖后围岩变化可分为弹性段 AB、塑性段 BC 和松动段 CD。在应力释放过程中, 当围岩收敛变形逐步增大时, 塑性段 BC 的围岩在自重作用下由塑性滑移变形发展到松动变形, 导致围岩发生塌落而出现失稳破坏^[5-6]。双护盾 TBM 在断层破碎带地层中掘进时, 由于围岩稳定性差, 以及围岩塑性滑移变形速率快, 极易导致掌子面坍塌卡死刀盘。此外, 由于双护盾 TBM 盾壳较长, 一般长度大于 12 m, 护盾直径设计值略小于开挖洞径 5~10 cm。当双护盾 TBM 在软弱断层破碎带掘进时, 围岩受到开挖扰动发生快速塑性变形, 较短时间内如果双护盾 TBM 不能通过梧沙区间, 且围岩

收敛变形一旦大于隧洞开挖轮廓与盾壳间距, 就会将盾壳抱死。

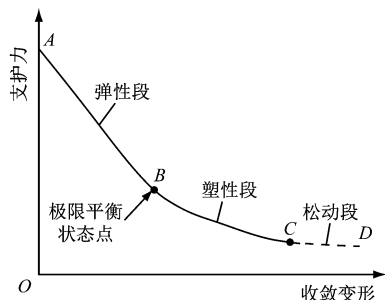


图 3 围岩变形与支护力特性曲线图

Fig. 3 Curve diagram of surrounding rock deformation and supporting force characteristics

3 双护盾 TBM 穿越断层数值模拟分析

3.1 断层区域隧道段超前注浆加固范围及加固措施

同山岭隧道相比, 城市轨道交通隧道位置更具特殊性。双护盾 TBM 施工一旦出现卡机事故, 卡机脱困措施少、处理难度大, 因此, 在工程实际中需要提前做好穿越断层区域预案, 避免卡机事故。为了保障双护盾 TBM 顺利通过梧沙区间 F1 断层破碎带, 在 TBM 穿越该区域前, 通过数值模拟分析法确定断层区域预先加固范围及方案。

3.1.1 断层区域超前注浆加固范围的确定

梧沙区间隧道段 F1 断层宽度约 32 m, 属压扭性断裂, 倾角为 80°, 隧道埋深为 180 m。采用 MIDAS 有限元计算软件对隧道断层区域进行建模。考虑隧道开挖的影响, 计算模型的宽度和高度均取 4~5 倍隧道开挖直径 D (D 为 6.5 m), 计算模型尺寸为 80 m × 70 m × 70 m (长度 × 宽度 × 高度)。梧沙区间断层区域数值模型见图 4。

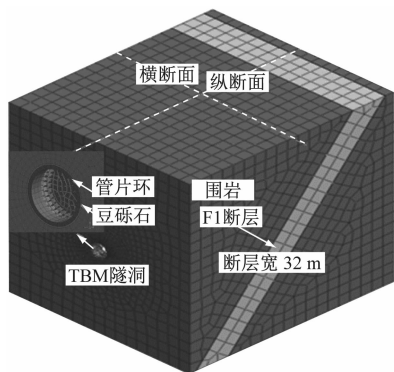


图4 双护盾 TBM 穿越断层数值模型

Fig. 4 Numerical model of double shield TBM excavating through fault area

提取隧道同一水平断面上围岩的竖向位移,见图5。

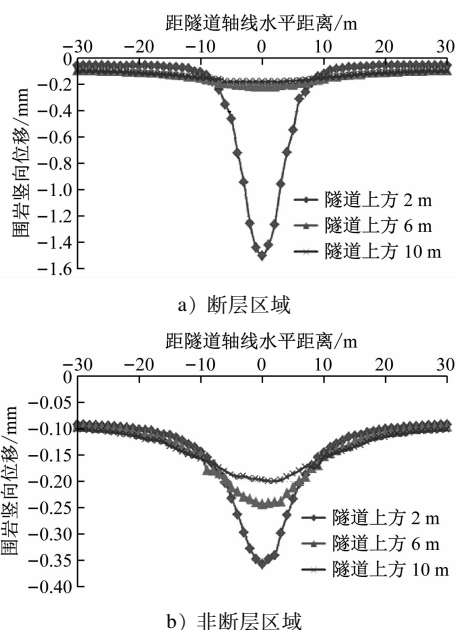


图5 断层区域和非断层区域隧道围岩的竖向位移

Fig. 5 Vertical displacement of surrounding rock in fault area and non-fault area

由图5可见,隧道围岩位移整体呈“漏斗”状;隧道轴线左、右两侧各8.5 m范围内围岩竖向位移变化较大,占总位移值的85.63%。隧道开挖洞径 D 为6.5 m,故可以认为TBM掘进对隧道围岩的影响范围为8.5 m,即 $1.3D$ 。因此,为了防止卡机事故发生,双护盾TBM穿越断层区域时最小处理范围建议为 $1.3D$ 。

3.1.2 隧洞超前注浆加固措施

双护盾TBM在设计中预留了超前注浆孔,可利用超前钻机对周边围岩进行加固,此外刀盘面上

预留的注浆孔能满足在富水的地层条件下进行全断面帷幕注浆。通过超前注浆将浆液压入破碎岩体,填充岩体空隙使松散岩体达到挤压密实状态,达到加固岩体的目的。隧洞超前注浆如图6所示。超前注浆采用前进式分段注浆,即在施工中采取“钻一段、注一段,再钻一段、再注一段”的交替式钻孔注浆施工方式。每次钻孔注浆的分段长度为10~15 m,采用孔口管法兰盘进行止浆,如图7所示。

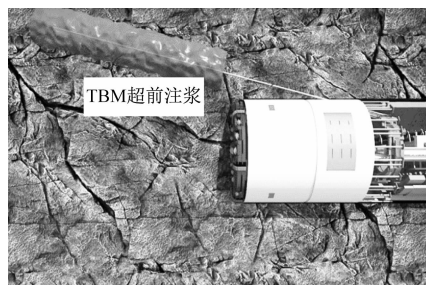


图6 隧洞超前注浆示意图

Fig. 6 Schematic diagram of advance grouting in tunnel hole

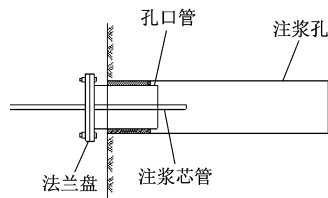


图7 孔口管灌浆示意图

Fig. 7 Schematic diagram of orifice pipe grouting

浆液采用水泥-水玻璃双液浆,配合比为1:1;水泥为P.O42.5R水泥,水玻璃浓度为35 Be'。浆液凝胶时间为38 s左右,必要时可掺加缓凝剂调整浆液凝胶时间。初选灌浆压力,当钻孔深度小于30 m时,灌浆压力选择0.8~2.0 MPa,实际施工中需进一步调整灌浆压力,以满足断层破碎带加固区域为 $1.3D$ 的范围。

3.2 TBM 穿越断层时的掘进参数分析

由双护盾TBM卡机机理分析可知,双护盾TBM卡机是岩机作用的结果,即刀盘对岩体扰动较大,围岩塑性滑移变形速率快,破碎围岩在掌子面汇集极易导致刀盘卡死;TBM关键参数控制匹配不合理,在较短时间内,如果断层破碎带区域的围岩收敛值一旦大于隧洞开挖轮廓与盾壳的间距,就会导致盾壳卡死。因此,双护盾TBM穿越断层破碎带区域时,选择合理的掘进参数,可以控制围岩扰动,有效避免卡机事故。

为了保证双护盾TBM顺利地通过断层区域,避

避免因掘进参数波动对围岩扰动引起卡机事故,对双护盾 TBM 进入 F1 断层区域前第 1 331 环—第 1 371 环共 40 环的关键掘进参数,以及 TBM 进入 F1 断层区域中第 1 372 环—第 1 397 环共 25 环的关键掘进参数进行分析,得出如图 8~11 所示的结果。

图 8 为断层区域和非断层区域刀盘扭矩统计图。由图 8 可知,断层区域刀盘的扭矩波动更大,且扭矩参数具有较大的离散性,说明断层区域因岩体破碎及围岩塑性滑移变形快对刀盘冲击较大,此时需要重点关注刀盘的扭矩,一旦刀盘的扭矩数较大极易引起塌落体卡死刀盘。

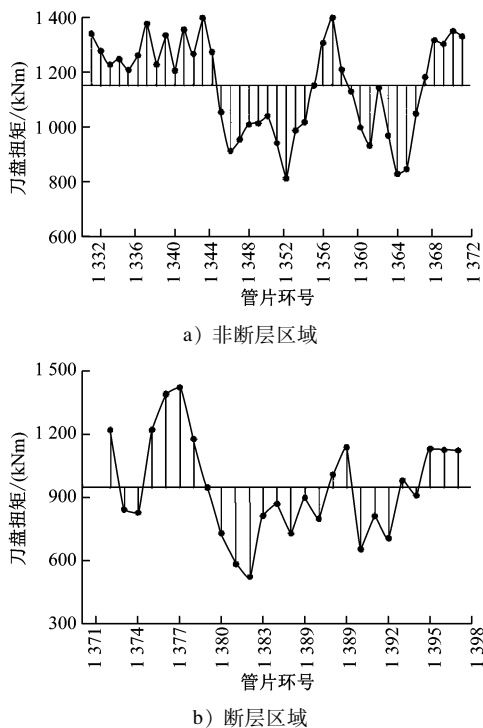


图 8 双护盾 TBM 穿越断层、非断层区域的刀盘扭矩
Fig. 8 Cutter head torque moment of double shield TBM excavating through fault area and non-fault area

通过地质分布统计特征图可见,双护盾 TBM 在到达断层区域前,刀盘扭矩的平均值为 1 152.9 kNm,在断层区域掘进时刀盘扭矩的平均值为 946.1 kNm;在非断层区域刀盘扭矩范围为 1 000~1 300 kNm,在断层区域刀盘扭矩范围为 900~1 000 kNm。该区间分别包括了断层区域和非断层区域 92% 和 87% 的扭矩实测统计数据。

图 9 为断层区域和非断层区域双护盾 TBM 系统推力统计图。由图 9 可知,断层区域相对于非断层区域岩体破碎、岩石强度低,掘进更加容易。通过地质分布统计特征图可见,双护盾 TBM 在非断

层区域系统推力范围为 6 500~7 500 kN,系统推力的平均值为 7 117.2 kN;在断层区域系统推力范围为 6 000~7 000 kN,系统推力的平均值为 6 437.2 kN。该区间包括了断层区域和非断层区域 85% 和 89% 的系统推力实测统计数据。

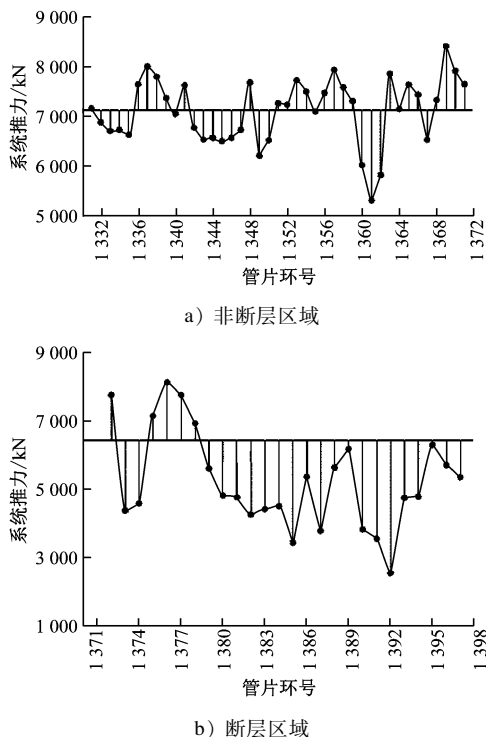


图 9 双护盾 TBM 穿越断层、非断层区域的系统推力
Fig. 9 Systematic pushing force of double shield TBM excavating through fault area and non-fault area

图 10 和图 11 分别为双护盾 TBM 通过断层破碎带区域和非断层破碎带区域主驱动系统推进速度和刀盘转速设置图。由图 10~11 可知,TBM 进入断层破碎带区域前,刀盘的转速平均值为 7.63 r/min

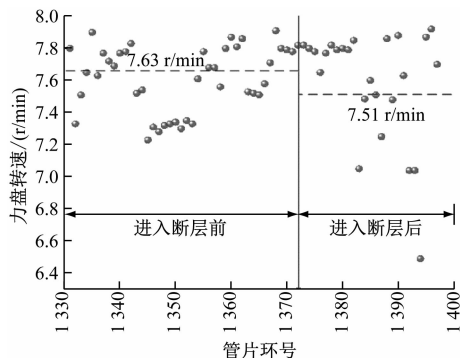


图 10 双护盾 TBM 穿越非断层区域的刀盘转速
Fig. 10 Cutter head rotation speed of double shield TBM excavating through non-fault area

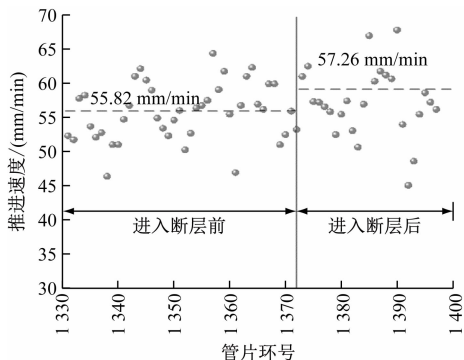


图 11 双护盾 TBM 穿越断层区域的推进速度

Fig. 11 Advancing speed of double shield TBM tunneling through fault area

min;TBM 进入断层破碎带区域后,刀盘的转速平均值为 7.51 r/min;TBM 进入断层破碎带区域前,刀盘推进速度的平均值为 55.82 r/min;TBM 进入断

表 1 双护盾 TBM 掘进参数推荐值

区域	系统推力/kN		刀盘扭矩/(kNm)		推进速度/(mm/min)	刀盘转速/(r/min)
	取值	平均值	取值	平均值		
断层区域	6 000 ~ 7 000	6 437.20	900 ~ 1 000	946.10	57.26	7.51
非断层区域	6 500 ~ 7 500	7 117.20	1 000 ~ 1 300	1 152.90	55.82	7.73

4.2 双护盾 TBM 穿越断层防卡机技术

双护盾 TBM 穿越断层区间时,规避卡机是工程需要重点关注的问题。合适的隧洞超前预处理措施及 TBM 掘进参数的设置能够避免卡机风险。

1) 在双护盾 TBM 选型阶段,确保装备对断层区域的适应性。可配备超前钻机,通过钻探探明断层规模及其具体情况。TBM 刀盘采用偏心设计,保证在断层区域拱部有一定的预留变形量,以防刀盘被卡。TBM 预留超前灌浆孔,利用超前钻机对围岩加固,刀盘面上预留的灌浆孔可满足富水地层条件下的全断面帷幕灌浆。

2) 在双护盾 TBM 施工阶段,可以利用超前地质预报技术,及时探明地质异常,探测掌子面前方异常地质的位置、规模,围岩的破碎程度,以及含水的可能性,提早发现风险及采取应对预案。

3) 在双护盾 TBM 穿越断层时,针对需要穿越的断层区域,如果断层区域规模较小,综合评估后可以采用直接快速通过的方式来应对围岩收敛变形导致的卡机风险。如果断层区域过大,可以预先通过数值模拟分析确定注浆加固范围及加固方案。在通过断层区域时,需要适当降低刀盘转速,加大推进速度,在此过程中还需要重点关注刀盘扭矩波动,间接判断掌子面是否有塌落体防止刀盘卡死。

层破碎带区域后,刀盘推进速度的平均值为 57.26 r/min。由此可见,双护盾 TBM 进入断层破碎带区域时,通过降低刀盘转速以减少对掌子面岩体的扰动;通过增加刀盘推进速度,在围岩收敛尚未达到隧洞开挖轮廓与盾壳间距时,快速通过断层破碎带区域。

4 双护盾 TBM 穿越断层防卡机技术

4.1 双护盾 TBM 掘进参数控制

通过对梧沙区间双护盾 TBM 在断层和非断层区域掘进参数的关联分析,以及对 TBM 穿越 F1 断层时选取的掘进参数对隧洞变形的控制效果分析,可以得出 TBM 穿越此类断层的掘进参数,如表 1 所示。

在围岩收敛值尚未达到隧洞开挖轮廓与盾壳的间距时,TBM 需迅速通过断层区域,防止盾壳卡死。

5 结论

1) 双护盾 TBM 卡机的原因在于 TBM 在断层区间掘进时,围岩开挖扰动大、稳定性差、滑移变形速率快、掘进参数的地质匹配性差,围岩收敛值大于隧洞开挖轮廓与盾壳的间距。

2) 双护盾 TBM 穿越断层区域时,需最大限度地降低对破碎围岩的扰动,预先对断层区域进行加固,TBM 穿越过程中适当降低刀盘转速,加大推进速度,同时还需重点关注刀盘扭矩波动,迅速通过断层区域,防止卡机事故。

3) 8 号线梧沙区间双护盾 TBM 顺利通过断层区域,充分说明了本文所述的方法能够有效规避卡机事故,可为其他类似工程提供参考。

参考文献

[1] 姬超,陈好,张少轩.引大济湟工程 TBM 掘进卡机机理研究及控制措施[J].四川理工学院学报(自然科学版),2019(4):62.

Ji Chao, CHEN Hao, ZHANG Shaoxuan. Study on the mechanism of TBM tunneling jamming and control measures difficulties around water diversion tunnel from Datong River into Huangshui River

- [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering (Natural Science Edition), 2019(4):62.
- [2] 刘鹤,刘泉声,唐旭海,等. TBM 护盾-围岩相互作用荷载识别方法[J]. 岩土力学,2019(12):4946.
LIU He, LIU Quansheng, TANG Xuhai, et al. Identification of the interaction loads between TBM shield and surrounding rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019(12):4946.
- [3] 徐鹏. 深部复合岩层流变力学行为及其对 TBM 卡机灾害影响机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.
XU Peng. Study on rheological behavior of deep buried composite rock and its influencing mechanism on TBM jamming disaster[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2018.
- [4] 林刚,史宣陶,陈军. 双护盾 TBM 在青岛城市轨道交通工程中的应用与实践[J]. 隧道建设(中英文),2019(12):2020.
LIN Gang, SHI Xuanta, CHEN Jun. Application and practice of double-shield TBM to Qingdao rail transit tunnel[J]. Tunnel Construction, 2019(12):2020.
- [5] 徐鹏,黄俊,周剑波,等. 护盾式 TBM 穿越断层破碎带岩机相互作用三维数值模拟研究[J]. 现代隧道技术,2020(6):63.
XU Peng, HUANG Jun, ZHOU Jianbo, et al. 3D numerical simulation of the interaction between rock mass and shield TBM passing through the fault fracture zone[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020(6):63.
- [6] 黄舰. 青岛地铁区间隧道双护盾 TBM 地质适应性分析[J]. 现代隧道技术,2016(3):42.
HUANG Jian. On the geological adaptability of the double-shield TBM for the Qingdao metro tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016(3):42.

(收稿日期:2021-01-22)

(上接第 152 页)

3 结论

1) 从上海南翔站一中冶祥腾城市商业广场项目出发,分析了该车站与商业综合体间的衔接空间模式及其适用性,认为“线状+岛式+平台”的空间组合有效应对了此类轨道交通城市综合体内部由于功能多样混合而可能产生的交通问题。

2) 采用了 AHP 与 FCE 法,构建了车站与商业综合体衔接空间绩效评价体系,对其空间衔接适用性计算评价为“优”。

3) 根据计算结果从便捷性、通畅性、安全性、导向性 4 个方面对衔接空间设计与设施优化等提出建议。

4) 本文研究成果可为城市轨道交通车站与商业综合体衔接空间的设计评价研究提供思路,但评价体系的科学性、指标系统的优化及评价结果的实际应用仍需更多实证研究与进一步的探索。

参考文献

- [1] 熊傲雪. 杭州市商业空间与轨道交通站点间的“媒介空间”设计研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
XIONG Aoxue. The research of the medium space design between the urban commercial space and the rail traffic space[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [2] 刘文,于瑞丽,李晓东,等. 轨道交通综合体衔接场域公共空间的分类与优化策略研究——以青岛万象城为例[J]. 建筑与文化,2020(5):165.
LIU Wen, YU Ruili, LI Xiaodong, et al. Research on the classification and optimization strategy of public space in connection field of rail transit complex——a case study of Vientiane City in Qingdao[J]. Architecture & Culture, 2020(5):165.
- [3] 付剑桥. 城市轨道交通综合枢纽与商业空间一体化设计策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
FU Jianqiao. The integrated design strategy of urban rail transportation hub and commercial space [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [4] 莫茜茜. 地下轨道交通节点与大型商业建筑的空间连接模式[D]. 湖南:湖南大学,2010.
MO Xiqi. Spatial connection mode of underground rail transit node and large-scale commercial construction [D]. Hu'nan: Hu'nan University, 2010.
- [5] 熊伟. 轨道交通商业综合体步行系统设计——上海地铁 11 号线两个站点综合开发项目设计比较研究[J]. 建筑学报,2011(12):96.
XIONG Wei. Pedestrian system design for commercial complex of rail transit: comparison study on integrated development project of two stations of Shanghai Metro Line 11 [J]. Architectural Journal, 2011(12):96.
- [6] 郝伟栋. 基于拓扑网络和空间句法的大型商业建筑内空间动线研究[D]. 杭州:浙江大学,2017.
HAO Weidong. Study on the inner traffic flow line planning of large-scale commercial buildings based on topology network and space syntax theory [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [7] 喻文杰. 城市对外公路交通换乘枢纽内部空间高效能设计初探[D]. 重庆:重庆大学,2012.
YU Wenjie. Study on design of high-performance of internal space in urban outbound highway passenger transport hub [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [8] National Research Council. Highway capacity manual [M]. Washington D. C.: Transportation Research Board, 2000.
- [9] 戴叶子. 被动集客原则下的商业综合体形态研究——以深圳、香港两地为例[J]. 新建筑,2013(1):106.
DAI Yezi. A study on the morphology of commercial complex based on the principle of passive customer collection: taking Shenzhen and Hong Kong as examples [J]. New Architecture, 2013(1):106.

(收稿日期:2021-06-29)