

海底盾构隧道穿越破碎带施工稳定性分析

周耀升^{1,3} 孙宏远² 孟绥宝¹ 冯慧君³ 詹森¹

俞然刚⁴ 骆超锋¹ 王澜涛¹ 石宝星¹

(1. 中铁一局集团城市轨道交通工程有限公司, 214104, 无锡; 2. 中国重型汽车集团有限公司, 250101, 济南;

3. 中铁发展投资有限公司, 266034, 青岛; 4. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院,

266580, 青岛//第一作者, 工程师)

摘要 以青岛地铁8号线海域段泥水平衡式盾构机施工为背景,通过FLAC3D有限差分软件模拟计算盾构隧道在穿越F4破碎带时的力学响应,分析了盾构隧道施工时围岩的稳定性,根据现场监测数据验证了仿真模拟的可靠性,对盾构机在破碎带中的掘进参数进行了讨论。结果表明:盾构机穿越时,隧道竖向位移主要集中在拱顶和拱底,在穿越破碎带时位移明显增大;隧道应力最大值主要集中在拱腰附近,且在破碎带中出现拉应力,拉应力极不利于破碎带围岩的稳定性。为保证施工质量及安全,预防围岩失稳事故发生,应采取预加固措施,同时控制与调整掘进参数。

关键词 海底隧道;盾构隧道;破碎带;施工稳定性

中图分类号 U451+.2

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.10.024

Construction Stability Analysis of Subsea Shield Tunnel Crossing Fracture Zone

ZHOU Yaosheng, SUN Hongyuan, MENG Suibao, FENG Huijun, ZHAN Sen, YU Ran'gang, LUO Chaofeng, WANG Lantao, SHI Baoxing

Abstract Taking the sea section slurry balance TBM (tunnel boring machine) construction of Qingdao metro Line 8 as the background, the mechanical response of the shield tunnel when crossing the F4 fracture zone is simulated and calculated by using the finite difference software FLAC3D, and the stability of surrounding rock during shield tunnel construction is analyzed. According to on-site monitoring data, the reliability of the simulation is verified, and the construction parameters of the TBM in the fracture zone are discussed. Results show that when the TBM is crossing, the tunnel vertical displacement is mainly concentrating on the top and bottom of the arch, and the displacement increases significantly when TBM passes through the fracture zone; the maximum tunnel stress is mainly concentrated near the arch waist, and the tensile stress appears in the fracture zone, which is extremely unfavorable to the stability of

the surrounding rock in the fracture zone. To ensure the construction quality and safety, and to prevent surrounding rock instability accidents, reinforcement measures should be taken in advance and the tunneling parameters should be controlled and adjusted at the same time.

Key words subsea tunnel; shield tunnel; fracture zone; construction stability

First-author's address Urban Rail Transit Engineering Co., Ltd. of China Railway First Group Co., Ltd., 214104, Wuxi, China

随着城市经济的飞速发展,地铁盾构技术逐渐成熟,但仍面临很多难题,尤其是在盾构跨越江、海,同时穿越破碎带、复合地层等复杂地层情况时,可能会发生围岩失稳、冒顶、渗水、开挖面失稳等问题,甚至会造成严重的工程事故。

国内外很多学者对地铁隧道开挖过程中的稳定性问题进行了研究。文献[1]通过相似模型试验和数值模拟,分析了断层破碎带对隧道围岩稳定性的影响。结果表明,拱顶上方断层对拱顶沉降的影响最大;随着断层与隧道距离的接近,隧道变形和塑性区范围不断增大,而注浆工法能够显著增加隧道围岩的稳定性。文献[2]研究了富水破碎带不同的厚度、倾角对隧道周围岩体的稳定性影响。结果表明,在开挖面离破碎带9 m时,隧道周围岩体的纵向位移急剧增大;在开挖面离破碎带小于6 m时,会出现倒水裂隙通道,导致突水、突泥灾害;拱顶位移分别与破碎带倾角、地下水位呈指数和线性关系。文献[3]考虑孔隙水压力及渗流的影响,推导了基于CPPM(最近点投影法)的计算公式,并通过开发程序对隧道的稳定性进行了分析。隧道施工过程中的地下水会引起围岩的应力重分布,地下水的渗流对围岩的影响显著。文献[4]采用Abaqus

有限元分析软件模拟了不同的施工方法,对浅埋破碎带的隧道进行了围岩稳定性分析,通过对比不同施工方法下围岩的应力-应变状态、塑性区等,指出中隔墙法对破碎岩体的稳定性较好。文献[5]采用 Midas GTS/NX 软件对不同倾角的断层进行了数值模拟,指出拱顶沉降、拱底隆起及周围岩体的收敛位移均出现先增大后减小的趋势。

1 工程概况

青岛地铁 8 号线(以下简为“8 号线”)工程大洋站—青岛北站区间东侧海域段(以下简称“海域段”)施工采用泥水平衡式盾构机(以下简称“盾构机”)掘进。掘进过程中的一大难题是穿越破碎带(海域段地质概况见图 1)。本文以 F4 破碎带为例进行分析。该破碎带位于海域段中部,即右线线路里程 CK42+830—CK43+440 范围内,大致呈东北-西南走向,宽度约 610 m,走向约为 25°,与隧道交角近 90°。F4 破碎带基岩面埋深为 29.5~32.5 m,上覆厚层砂土,基岩破碎带主要为块状碎裂凝灰岩、中等风化凝灰岩。

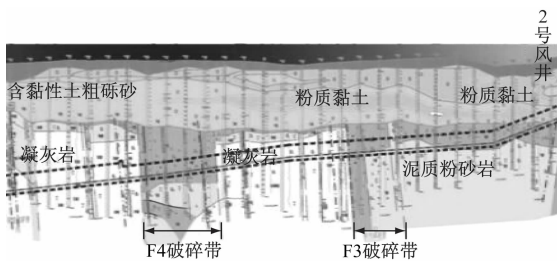


图 1 8 号线海域段地质概况

Fig. 1 Geological overview of the sea section of Line 8

2 F4 破碎带对围岩稳定性影响分析

2.1 岩土体结构

隧道周围岩土体结构具体表现为各种结构的分布特征及其相互组合关系。它对隧道周围岩土体稳定性的控制作用表现为,结构面对岩土体的破坏模式及破坏面的控制作用。当岩土体包含两种以上的结构面切割岩土体,尤其是含有块状、破碎状和断层时,会有很大的概率导致隧道周围的岩土体发生失稳。岩土体本身的性质是影响隧道周围岩土体稳定性的基本因素,亦直接决定了岩土体的力学特征和性质。该破碎带为凝灰岩,呈紫灰色,矿物中等风化,节理裂隙发育,岩芯破碎,破碎

面见较多高岭土等次生矿物,岩芯以块状-短柱为主,表面较粗糙,锤击可碎。揭露段岩体属较破碎的软岩,岩体基本质量等级为Ⅳ级。

2.2 岩土体的力学性质

岩土体的力学性质主要表现为岩石的强度和变形。岩土体强度是控制隧道周围岩土体稳定性的关键因素,尤其对于破碎带中碎块状岩石。该破碎带以块状致密凝灰岩为代表,脆性强。岩石主要呈现为弹性变形,破坏时以拉断为主,断层降低了岩体的强度及稳定性。破碎带力学强度低、压缩性大,抗剪强度远低于岩体其他部位的抗剪强度,容易发生较大沉降。

2.3 地下水

地下水对隧道周围岩土体的稳定性有直接的影响,主要体现在强度和应力状态两个方面。地下水位以下,随着岩土体静水压力的增加,岩土体有效应力减小,应力状态变差,进而导致岩土体失稳。地铁穿过隔水层时,水压增大。破碎带岩体裂隙水较发育、透水性强,孔隙水压力的作用降低了围岩的稳定性,在盾构掘进过程中可能会出现围岩渗漏水、掌子面涌水、坍塌等事故。该工程断裂带块状碎裂岩中主要为构造裂隙水,裂隙稀疏,但张开性好、延伸远、导水能力好。这类岩石大多构成含水(或透水)层,其富水性与断裂带的性质、规模和补给条件有关,无统一水面,具有一定的承压性。整体上本区间断层及节理、裂隙均较发育,构造裂隙水局部发育。与孔隙水相比较,它分布不均匀,往往无统一的水力联系。

2.4 应力场

应力场一般可以分为自重应力场(地应力场)和构造应力场两大类。地应力场对岩土体稳定性影响较大。地应力的大小和方向可以决定岩石和土体的应力状态。破碎带可减少应力场的应力集中,但应力场会随破碎岩石的性质、空间分布而改变,从而增加了对岩体稳定性判断的难度。

2.5 掘进参数

隧道周围岩体的稳定性与盾构机的掘进参数有着紧密的联系。在盾构机掘进的过程中,要及时调整掘进参数,尤其在不同地层中掘进时,施工参数有着非常大的不同,可通过及时调整盾构机推力、刀盘转速和掘进速度等参数来确保隧道穿越破碎带时周围岩土体的稳定性。

3 海底盾构隧道模型的建立

本文使用 FLAC3D 有限差分软件对海底盾构穿越破碎带的施工过程进行数值模拟。

3.1 模型的建立

选取 8 号线海域段建立了海底盾构隧道三维模型。盾构机开挖直径为 7 m。根据右线地质纵断面图,岩土层从上到下分别为中粗砂、粉质黏土、微风化凝灰岩及碎裂的中风化凝灰岩,且认为岩石和土体为无限体。为了避免边界效应,以及考虑到盾构开挖后的地应力重分布范围,模型尺寸为 60 m×60 m×60 m,隧道埋深为 26.5 m,纵向长度取 60 m。盾构隧道周围对网格进行了加密。

本工程衬砌单元采用宽 1.5 m 的混凝土管片,模型取 3 m 为 1 个进尺,采用壳单元实现。海底盾构隧道模型如图 2 所示。

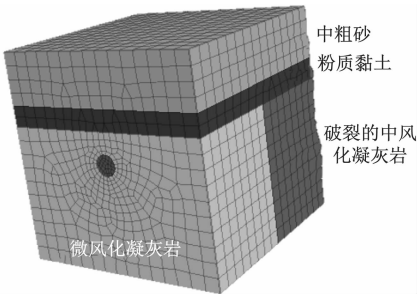


图 2 海底盾构隧道模型
Fig. 2 Subsea shield tunnel model

3.2 参数取值

根据《青岛市地铁 8 号线详细勘察阶段大洋站至青岛北站站区间勘察报告》,确定海底盾构隧道三维模型中对的地层参数,见表 1。

表 1 海底盾构隧道模型材料物理力学参数选取
Tab. 1 Physical and mechanical parameters selection of subsea shield tunnel model materials

地层岩性	重度/ (kN/m ³)	弹性模 量/MPa	黏聚力/ kPa	泊松比	内摩擦 角/(°)
中粗砂	19.6	52.0	35	0.30	20.9
粉质黏土	19.7	43.5	44	0.33	15.9
微风化凝灰岩	23.4	9.0×10 ³		0.20	65.0
中风化凝灰岩 (破碎)	23.0	2.0×10 ³		0.22	55.0
衬砌管片	25.0	35.5×10 ³		0.25	

3.3 本构模型选取及边界条件设置

由于 F4 破碎带岩石和土体的非线性较明显,

因此进行弹塑性分析时,采用莫尔-库仑塑性模型。

海底盾构隧道模型采用不透水边界,其底面及前、后、左、右 4 个面均固定。考虑到地下水的影响,水面设置在模型顶面,以模拟实际工程中的孔隙水压力分布;并根据地质剖面图,将模型之外的 5 m 海水等效为上部荷载并施加在模型顶面。根据地质勘察报告,将各个岩土层的参数赋予模型。通过初始地应力平衡,得到初始应力场,并以初始地应力为基础进行后续开挖计算。

4 盾构隧道穿越破碎带施工稳定性分析

4.1 隧道变形规律分析

根据实际工程地质条件,在进入 F4 破碎带之前,盾构机是在围岩整体性较好的微风化凝灰岩中掘进,然后进入中风化凝灰岩破碎带。盾构机掘进施工中模型的位移云图,见图 3—图 4。

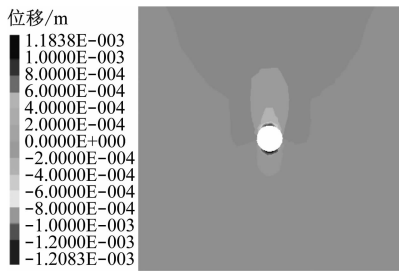


图 3 盾构机掘进至 24 m 时隧道的位移云图

Fig. 3 Tunnel displacement nephogram of TBM excavating to 24 m

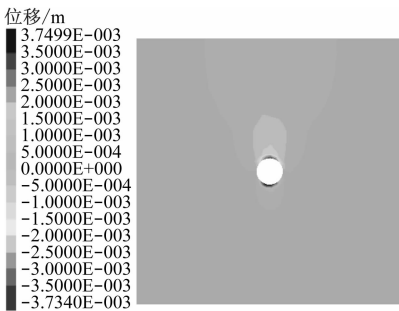


图 4 盾构机掘进至 54 m 时隧道的位移云图

Fig. 4 Tunnel displacement nephogram of TBM excavating to 54 m

由图 3—图 4 可见,在微风化凝灰岩中隧道拱顶沉降为 1.18 mm,拱底位移为 1.21 mm;在碎裂的中风化凝灰岩破碎带中拱顶位移为 3.73 mm,拱底位移为 3.75 mm。两种地质条件下,盾构机掘进对上部岩层沉降影响范围及沉降值不同。盾构机在

破碎带中掘进时,其对上部岩层沉降影响范围相对较小,但沉降值较大,达到 1 mm;而盾构机在非破碎带掘进时,其对上部岩层沉降影响范围相对较大,而沉降值较小,为 0.2 mm。在相同进尺条件下,隧道在破碎带周围的竖向位移要明显大于微风化凝灰岩(见图 5)。

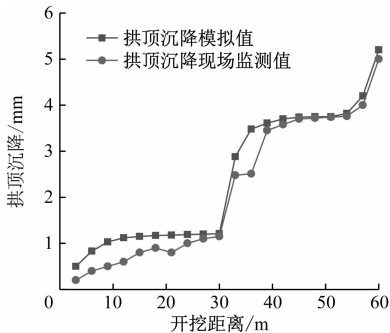


图 5 隧道拱顶沉降曲线

Fig. 5 Settlement curve of tunnel arch top

盾构机施工中,隧道拱顶沉降的现场监测数据与模拟数据对比见图 5。由图 5 可见,隧道拱顶沉降的监测结果与模拟结果基本一致。

盾构机由微风化岩层掘进到 F4 破碎带时,隧道拱顶沉降由于围岩整体性突然变差,导致沉降值从 1.15 mm 增加到 2.91 mm;且随着开挖进尺的增加,沉降值亦逐步增加,最终拱顶的沉降值可以达到 5.00 mm 左右。

通过对比微风化凝灰岩与 F4 破碎带拱顶沉降曲线,可以预见盾构机穿越破碎带时会有较大的拱顶沉降,这可能会导致掌子面失稳、上部碎裂岩体引起海水入侵等问题。

4.2 围岩应力分布规律分析

相同进尺下,图 6 和图 7 分别表示盾构机掘进至 24 m(微风化凝灰岩)和 54 m(中风化凝灰岩破碎带)时,隧道的应力分布云图。由图 6—图 7 可见,两幅隧道应力云图均大致呈“漏斗”形分布。盾构机开挖导致隧道周围岩石应力重分布,该应力主要集中在拱顶、拱底及拱腰附近,且应力最大值集中在拱腰附近。

在微风化凝灰岩中继续开挖,岩体应力进一步释放,拱底和拱顶的竖向应力相对较小。而盾构机在破碎带中掘进时,拱顶和拱底均出现拉应力。破碎带中大多为碎裂的中风化凝灰岩,整体性较差,抗拉性能较弱。在这种应力状态下很容易出现围岩失稳,引起沉降过大。

图 8 为微风化凝灰岩和碎裂的中风化凝灰岩破碎带交界处(以下简称“交界处”)围岩最大主应力分布云图。

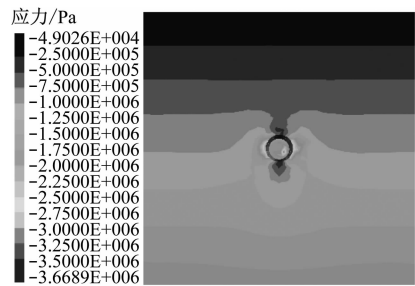


图 6 盾构机掘进至 24 m 时隧道的应力云图

Fig. 6 Tunnel stress nephogram of TBM excavating to 24 m

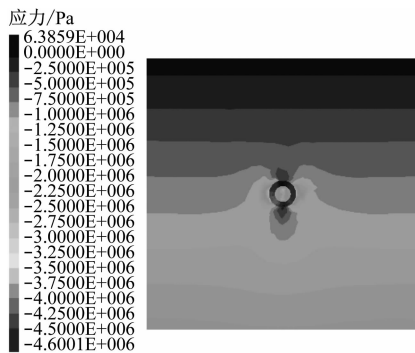
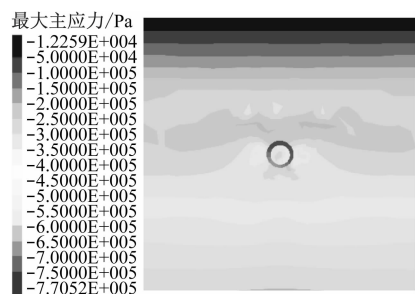
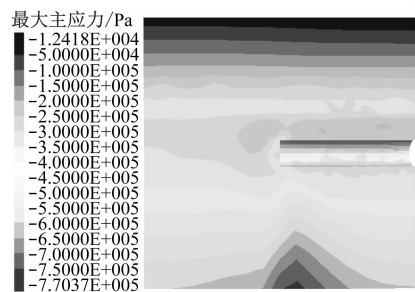


图 7 盾构机掘进至 54 m 时隧道的竖向应力云图

Fig. 7 Tunnel vertical stress nephogram of TBM excavating to 54 m



a) 正面图



b) 剖面图

图 8 围岩交界处最大主应力分布云图

Fig. 8 Distribution nephogram of the maximum principal stress at the junction of surrounding rocks

由图 8 a) 可见,围岩最大主应力均为压应力,在开挖时拱顶上方围岩应力释放明显,且其最大主应力集中在拱腰,并沿对称轴对称分布;拱底的最大应力分布与拱顶类似,拱底最大主应力比其周围围岩的应力要低。

由图 8 b) 可见,在微风化凝灰岩和碎裂的中风化凝灰岩破碎带交界处,会呈现“凸起”状,围岩最大主应力集中在其交界处,且盾构机所在的岩层应力分布不再均匀,会波及隧道附近的岩体。

4.3 盾构机掘进参数控制

将 8 号线计算模型纵向的 60 m 分为微风化凝灰岩段(长 0 ~ 30 m)与破碎的中风化凝灰岩段(0 ~ 30 m)。将盾构机在这两种性质不同围岩中的掘进参数进行对比,见图 9—图 11。

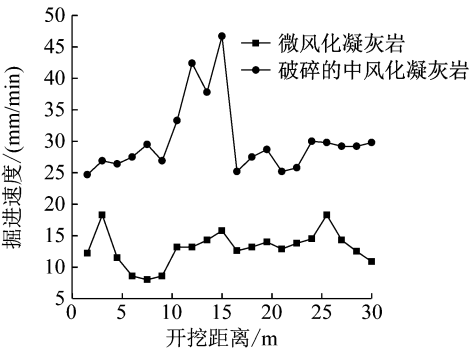


图 9 不同地层中盾构机掘进速度随开挖距离变化曲线
Fig.9 Curve of TBM excavation speed changing with excavation distance in different strata

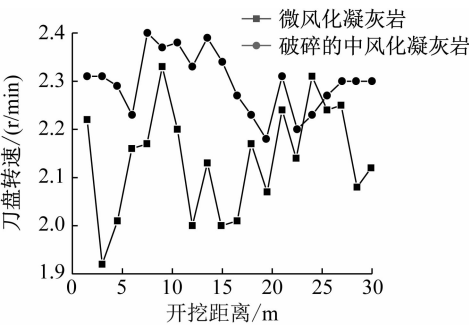


图 10 不同地层中盾构机转速随开挖距离变化曲线
Fig. 10 Curve of TBM rotational speed changing with excavation distance in different strata

从图 9—图 11 中可见,由于微风化凝灰岩的岩性完整且整体性较好,因此盾构机的掘进速度和刀盘的转速应较慢,盾构机所施加的推力较大。盾构机在穿越破碎带时,其推力相对较稳定且变化幅度较小,但掘进速度相对较快。盾构机在穿越破碎带

时掘进参数建议值见表 2。

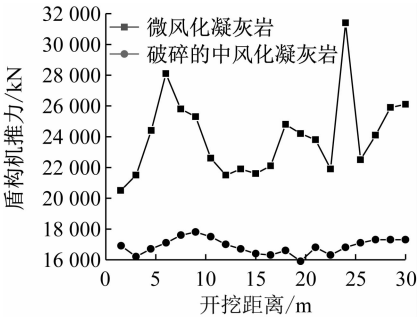


图 11 不同地层中盾构机推力随开挖距离变化曲线
Fig. 11 Curve of TBM thrust changing with excavation distance in different strata

表 2 泥水盾构机掘进参数建议取值
Tab.2 Recommended values of slurry TBM excavation parameters

参数	建议取值
进浆流量/(m ³ /h)	950 ~ 970
排浆流量/(m ³ /h)	970 ~ 1 000
总推力/t	2 000 ~ 3 000
刀盘转速/(r/min)	1.3 ~ 1.5
刀盘扭矩/(kN · m)	3 000
掘进速度/(mm/min)	10 ~ 20
注浆量/m ³	7.76 ~ 9.31
泥浆体积质量/(g/cm ³)	1.2 ~ 1.3
泥浆黏度/(Pa · s)	22 ~ 28

注:适用于强、中风化岩层(含破碎带)。

5 结语

1) 盾构机从微风化凝灰岩进入破碎带时,拱顶位移明显增大,拱底因岩体应力释放向上隆起且其位移值大于拱顶的沉降值。岩性完整的岩层沉降影响范围大,但沉降值较小;而破碎带岩层影响范围较小而沉降值较大,在盾构机即将进入破碎带时,可适当采取预加固措施。

2) 竖向应力主要集中在岩体开挖附近,其最大值沿对称轴对称分布在拱腰两侧。盾构机在破碎带中掘进时,可能会在拱顶和拱底出现拉应力区,这对岩层稳定性非常不利,易引发围岩失稳破坏。在微风化凝灰岩和破碎带的交界处,拱顶有明显的应力释放现象,其最大主应力在拱腰处集中。该应力释放现象会对开挖面附近的岩体产生影响,使得开挖面附近及隧道周围岩体的最大主应力大于附近岩体的应力。因此,必要时可对开挖面附近岩体

进行超前注浆或及时支护。

3) 破碎带岩体碎裂、完整性差,力学强度低、抗剪性能差、易发生失稳。因此,盾构机在破碎带中掘进时,需及时调整掘进参数,推力、刀盘转速不宜过大,且要求平稳,从而避免引发围岩失稳、渗水等事故。

参考文献

- [1] JEON S, KIM J, SEO Y, et al. Effect of a fault and weak plane on the stability of a tunnel in rock—a scaled model test and numerical analysis[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(3):658.
- [2] 杨青莹. 富水断层破碎带对隧道围岩稳定性的影响[J]. 煤矿安全, 2019(8):148.
- YANG Qingying. Influence of water-rich fault fracture zone on stability of tunnel surrounding rock[J]. Safety in Coal Mines, 2019(8):148.
- [3] SONG Z P, YANG T T, JIANG A N. Elastic-plastic numerical analysis of tunnel stability based on the closest point projection method considering the effect of water pressure[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2016(1):1.
- [4] 卢光兆,周博,徐锋,等. 浅埋偏压隧道进洞施工围岩稳定分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2021(4):61.
- LU Guangzhao, ZHOU Bo, XU Feng, et al. Stability analysis and construction mechanics of shallow buried bias tunnel openings[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021(4):61.
- [5] 张智健,梁斌,徐红玉,等. 富水软弱围岩隧道穿越断层破碎带的稳定性分析及施工技术[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2020(3):356.
- ZHANG Zhijian, LIANG Bin, XU Hongyu, et al. Stability analy-

sis and construction technology of surrounding rock of fault fracture zone in water-rich soft surrounding rock tunnel[J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2020(3):356.

- [6] 王林,韩凯航,郭彩霞,等. 盾构隧道穿越断层破碎带开挖面稳定性研究[J]. 土木工程学报, 2020(增刊1):93.
- WANG Lin, HAN Kaihang, GUO Caixia, et al. The face stability of shield tunnel traversing the fault fracture zone[J]. China Civil Engineering Journal, 2020(S1):93.
- [7] 姜克寒,刘邦,秦坤元,等. 断层破碎带中泥水盾构掘进参数优化研究[J]. 交通科学与工程, 2020(3):43.
- JIANG Kehan, LIU Bang, QIN Kunyuan, et al. Study on the optimization for mud-water shield driving parameters in fault fracture zone[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020(3):43.
- [8] 黄锋,董广法,李天勇,等. 断层破碎带隧道围岩稳定性的离散元模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2020(18):7429.
- HUANG Feng, DONG Guangfa, LI Tianyong, et al. Study on discrete element simulation of tunnel surrounding rock stability with fault fracture zone[J]. Science Technology and Engineering, 2020(18):7429.
- [9] 王建. 穿越破碎带的隧道围岩数值模拟及稳定性评价[J]. 土工基础, 2019(4):495.
- WANG Jian. Numerical simulation and stability evaluation of a tunnel through fracturing rock mass zone[J]. Soil Engineering and Foundation, 2019(4):495.
- [10] 沈翔,袁大军,吴俊,等. 复杂地层条件下盾构掘进参数分析及预测[J]. 现代隧道技术, 2020(5):160.
- SHEN Xiang, YUAN Dajun, WU Jun, et al. Analysis and prediction of driving parameters of shield tunnelling in complex strata[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020(5):160.

(收稿日期:2021-11-04)

多条市域铁路获批开工 六大都市圈建设全面铺开

以市域铁路建设为引导,都市圈同城化建设全面铺开。近日,国务院批复通过市域(郊)铁路成都至德阳线工程项目用地预审。该工程被列入国家发展和改革委员会 2022 年中央加大建设用保障力度的国家重大项目清单。用地预审的通过,为其年内开工创造了条件。自 2021 年以来,已经有 6 个国家级都市圈先后获得批复。规划批复之后,以形成“一小时通勤圈”为目标的交通基础设施建设排在优先地位,随着都市圈建设的推进,多条市域铁路开工或者获批。

自去年以来,先后有南京、福州、成都、长株潭、西安和重庆等 6 个国家级都市圈获得批复。在这些都市圈发展规划中,将建设一批市域(郊)铁路。有的都市圈还将专门编制市域(郊)铁路规划。2020 年 12 月,国家发展和改革委员会、交通运输部、国家铁路局、中国国家铁路集团有限公司联合印发了《关于推动都市圈市域(郊)铁路加快发展的意见》。文件提出,发展市域(郊)铁路,对优化城市功能布局、促进大中小城市和小城镇协调发展、扩大有效投资等具有一举多得之效,有利于发挥中心城市辐射带动作用,有利于扩大公共交通服务供给、有效缓解城市交通拥堵、推进新型城镇化发展。

(摘编自 2022 年 9 月 13 日《第一财经》)