

# 双模盾构土压模式下下穿珠江断裂带 开挖面稳定性研究

佟彬<sup>1</sup>, 张斌<sup>1</sup>, 朱汉标<sup>2</sup>, 王树英<sup>2,3,4</sup>

(1. 中铁一局集团有限公司, 陕西 西安 710054; 2. 中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075; 3. 中南大学 隧地工程研究中心, 湖南 长沙 410075; 4. 中南大学 轨道交通工程结构防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410075)

**摘要:**针对盾构下穿珠江断裂带开挖面的稳定性, 该文依托广州地铁7号线二期工程洪圣沙站一裕丰围站区间项目, 通过盾构下穿珠江断裂带全域及其局部高风险区域的数值模拟, 探明盾构穿越过程施工风险, 并分析不同支护应力及注浆压力对开挖面稳定性及地层变形的影响, 最后通过掘进参数分析评价数值模拟的合理性。研究表明: ① 隧道开挖面为上软下硬地层分布时, 盾构施工容易出现较大的地层沉降, 当上硬下软地层分布时则易产生较大隆起; ② 盾构穿越复合地层时, 局部软弱地层易出现开挖面稳定性问题, 当软弱地层受到的静止土压力大于支护应力时, 软弱地层土体将朝隧道内变形, 且变形量随支护应力比的减小而增大; ③ 注浆压力对开挖面稳定性无影响, 但与地层沉降成反比, 注浆压力越大, 地层沉降越小。盾构的顺利掘进验证了数值模拟的正确性。

**关键词:** 双模盾构; 断裂带; 开挖面稳定性; 数值模拟; 支护应力; 注浆压力

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

## Stability of Excavation Face of Double-Mode Shield in Earth Pressure Mode Crossing Fault Zone of Pearl River

TONG Bin<sup>1</sup>, ZHANG Bin<sup>1</sup>, ZHU Hanbiao<sup>2</sup>, WANG Shuying<sup>2,3,4</sup>

(1. China Railway First Group Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 3. Tunnel and Underground Engineering Research Center, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China; 4. Hunan Provincial Key Laboratory for Disaster Prevention and Mitigation of Rail Transit Engineering Structures, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

**Abstract:** In view of the stability of the excavation face of the double-mode shield crossing the fault zone of the Pearl River, the project of the section from Hongshengsha Station to Yufengwei Station of the second phase of Guangzhou Metro Line Seven was studied. Through numerical simulations conducted to analyze the whole area and the local high-risk area of the shield crossing the fault zone of the Pearl River, this paper explored the construction risk of the shield crossing process. Besides, this paper analyzed the influence of different support stresses and grouting pressures on the stability of the excavation face and ground deformation, and finally, the tunneling parameters analysis was used to evaluate the rationality of numerical simulation. The results show that ① when the tunnel excavation surface is distributed with soft soil above and hard soil below, large ground settlement is prone to occur during the shield tunneling process. When it is distributed with hard soil above and soft soil below, large ground uplift is prone to occur; ② The excavation face is likely to become unstable in the weak local stratum when the shield passes through the composite stratum. The soil mass in the weak stratum deforms towards the inside of the tunnel when the support stress is less than the static earth pressure in the weak stratum, and the deformation increases with the reduction of the support stress ratio; ③ The grouting pressure

收稿日期: 2023-01-06

基金项目: 2022年度中南大学研究生自主探索创新项目(编号: 2022ZZTS0689)

作者简介: 佟彬, 男, 工程师. E-mail: 414313155@qq.com

does not affect the stability of the excavation face but is inversely proportional to the ground settlement. Greater grouting pressure indicates lighter ground settlement, and the shield tunneling verifies the correctness of the numerical simulation results.

**Keywords:** dual-mode shield; fault zone; excavation face stability; numerical simulation; support stress; grouting pressure

## 0 引言

在盾构隧道施工中,新建隧道穿越断层破碎带具有较高的施工风险性<sup>[1]</sup>,且施工技术难度大,因此穿越断层破碎带是隧道施工的关键节点。

数值模拟和现场监测是研究隧道穿越断层破碎带的常用手段。李鑫<sup>[2]</sup>依托零山隧道工程,通过数值模拟和现场监测等方式,研究了断层破碎带施工过程中隧道结构的变形和受力特征,总结了断层破碎带的施工控制措施;赵颖等<sup>[3]</sup>和张佳<sup>[4]</sup>通过数值模拟对比了穿越断层破碎带的不同隧道开挖方法,并探究了隧道施工过程中支护结构的受力特征和变形特征;王焰<sup>[5]</sup>基于佛莞城际铁路狮子洋隧道工程研究了大盾构穿越断层破碎带的施工风险并提出相应的对策;刘秉峰等<sup>[6]</sup>采用数值模拟方法研究了盾构穿越断层破碎带时围岩位移向量趋势线的变形响应,通过位移向量角的变化趋势预测预报开挖面前方岩土体强度。然而,目前仍较少开展泥水土压双模盾构长距离穿越水下断裂带的研究,长距离穿越水下断裂带会遭遇各种复杂的地质情况,盾构更容易遭遇不同的施工风险,因此对断裂带盾构施工风险的整体把控,有利于提高盾构施工效率和安全性。

盾构开挖面稳定性是穿越断裂带施工中需要重点关注的环节,由于断裂带地质的多变性,盾构开挖面支护力需要及时调整才能避免各种灾害的发生。盾构施工开挖面稳定性分析包括理论分析<sup>[7-9]</sup>、模型试验<sup>[10-11]</sup>和数值分析<sup>[12-14]</sup>三方面。例如,Janseen<sup>[15]</sup>对开挖面稳定性进行了理论建模研究,首次提出了筒仓理论;汲红旗等<sup>[16]</sup>指出因地层损失、盾构摩擦力和盾构推力的影响,盾构穿越阶段引起的地表纵向位移最大;Chambon等<sup>[17]</sup>进行了离心试验,研究了不同支护力和埋深情况下盾构穿越均质砂层时开挖面的变形特征;李少庭<sup>[18]</sup>研究了隧道纵坡对掌子面稳定性的影响,表明上坡方向上的临界加载系数小于平坡条件下的,且临界加载系数随着土体内摩擦角的

增加而增大;李龙喜等<sup>[19]</sup>指出循环进尺长度对稳定系数及破坏形态影响显著:临界加载系数随着循环进尺长度与隧道高度比值的增加基本呈线性减小趋势;付亚雄等<sup>[20]</sup>研究了黏土盾构隧道开挖面的被动失稳,提出黏土盾构隧道施工中应将被动极限支护应力控制在1.0~1.9倍的静止土压力值;秦建设<sup>[21]</sup>采用FLAC<sup>3D</sup>软件模拟计算了盾构隧道开挖面的极限支护应力,指出地层强度较高时,即使是敞开开挖模式也能满足正常掘进需求,盾构开挖面极限支护力随埋深的增加而增大,并且与洞径呈简单线性关系。可见,对于盾构开挖面稳定性研究已被充分重视,然而,当盾构长距离穿越断裂带时,开挖面稳定性问题变得更加突出,地质的多变性也使得开挖面稳定性研究变得复杂,且目前对于泥水土压双模盾构长距离穿越水下断裂带的开挖面稳定性研究较少,因此有必要展开长距离穿越珠江断裂带的开挖面稳定性研究。

本文结合广州地铁7号线二期工程洪圣沙站—裕丰围站区间项目,采用Midas GTS NS有限元软件进行盾构下穿珠江断裂带全域及其高风险区域的数值模拟,探明盾构穿越断裂带时的施工风险,分析了不同注浆压力及开挖面支护应力下的掌子面稳定性和地层变形情况,并通过掘进参数分析评价数值模拟的合理性。

## 1 工程概况与水文地质

### 1.1 工程概况

广州地铁7号线二期工程洪圣沙站—裕丰围站区间隧道长1 676 m,覆土深度为7.4~27.3 m。隧道采用气垫直排式泥水土压双模盾构(图1)进行施工,能实现泥水平衡和土压平衡两种模式的快速切换。盾构刀盘为复合式刀盘,开口率为40%,开挖直径6.3 m,盾构渣土改良主要采用泡沫剂和水,采用半自动控制模式进行改良剂的施加。

### 1.2 工程地质与水文地质

洪裕区间盾构段隧道埋深为18.68~27.10 m,主

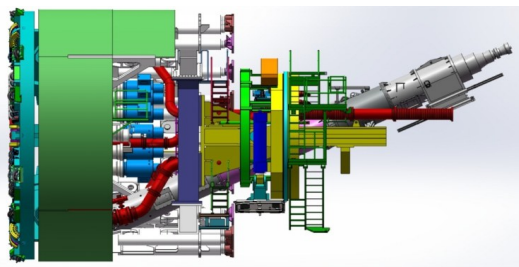


图1 盾构机示意图

Figure 1 Shield machine

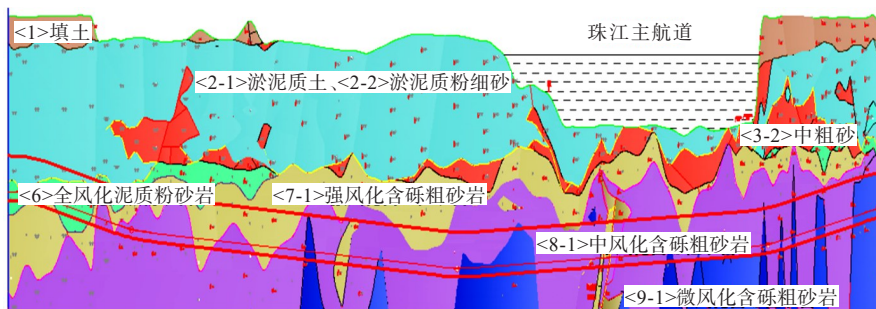


图2 地质纵断面示意图

Figure 2 Geological profile

松散岩类孔隙水和基岩裂隙水,地下水埋深为0.20~3.26 m,主要靠大气降水和地表水径流进行补给。

## 2 数值建模

盾构穿越断裂带过程中,遭遇的地层复杂多变,使得盾构在不同区间具有不同的施工风险,因此采用Midas GTS NX软件探究盾构下穿珠江断裂带全段的施工风险,再针对局部高风险区段地质及开挖面稳定性展开研究。

### 2.1 盾构穿越断裂带数值模拟

#### 2.1.1 模型建立

根据圣维南原理可知,隧道开挖只对洞室周边(3~5) $D$ ( $D$ 为隧道开挖直径)范围内围岩产生较大扰动<sup>[22]</sup>,该范围以外围岩所受扰动较小,可以忽略不计。区间隧道为双线隧道,两线间距约15 m,其中左线要超前右线约210环,即315 m,可以认为右线穿越时,左线已完全穿越断裂带且左线的继续推进对右线穿越断裂带的影响可以忽略。左线的提前穿越对断裂带造成了扰动,在一定程度上增大了右线穿越风险,因此,本文主要探究右线隧道穿越珠江断裂带时开挖面的稳定性。

隧道穿越断裂带长度约120 m,穿越时位于珠江底下,隧道距江面约29.4 m,珠江水深为7.80~12.72 m。盾构隧道开挖直径为6.3 m,管片外径为6 m,管

要穿越地层为<6>全风化泥质粉砂岩、<7-1>强风化含砾粗砂岩、<8-1>中风化含砾粗砂岩和<9-1>微风化含砾粗砂岩等,如图2所示。其中洪裕区间左线710~790环(右线695~775环)穿越水下断裂带,断裂带位于珠江水底,宽度约120 m,与区间隧道近垂直相交。

盾构段主要地表水体为珠江水,盾构下穿珠江宽度约为860 m,珠江水深7~13 m。地下水主要为

片宽度为1.5 m。取左线隧道左方19.35 m,右线隧道右方19.35 m,下方13 m范围作为开挖影响范围。地表设定为自由边界、模型四周设置法向位移约束、底部设定为固定边界。盾构上部邻接地层及穿越地层以弱透水地层为主,且施工过程中较少发现地下水的入渗。因此,不考虑渗流的影响,将珠江水位转化为水压力作用于河床表面。所建立的计算模型如图3所示,整体模型尺寸为195 m×60 m×42 m,共含24.5万个计算单元。

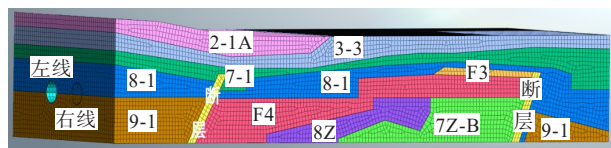


图3 计算模型图

Figure 3 Calculation model

土体本构模型选用Midas内置的摩尔-库仑模型,根据地质勘测报告,数值模型中的地层划分及材料力学参数取值见表1。

数值模拟流程如下:①施加水压力和自重,并计算初始地应力平衡;②一次性开挖左线,设置支护结构,并将位移清零;③逐步开挖右线隧道直至完全穿越断裂带,相应施工包括开挖地层、施加掘进压力(0.25 MPa)、盾壳、管片、注浆压力(0.5 MPa)等。

表1 土体及结构参数  
Table 1 Parameters of soil mass and structure

岩土体及材料	弹性模量/ MPa	泊松比	干重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	饱和重度/ (kN·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角/ (°)	黏聚力/ kPa	侧压力 系数K <sub>0</sub>	渗透系数/ (cm·s <sup>-1</sup> )
2-1A 淤泥	2	0.43	15.9	16.03	2.7	6.5	0.760	1.16×10 <sup>-5</sup>
3-3 砾砂	28	0.27	20.0	25.00	35.0	0.0	0.300	0.023 1
F3 强风化花岗质碎裂岩	8 680	0.30	24.0	25.00	30.0	33.0	0.360	0.011 5
7Z-B 强风化混合花岗岩(碎块状)	45	0.36	23.0	25.00	31.0	36.0	0.360	2.31×10 <sup>-3</sup>
8Z 中风化强蚀变花岗岩	9 130	0.26	26.1	27.00	34.0	200.0	0.330	8.10×10 <sup>-4</sup>
F4 岩块状碎裂岩	14 000	0.26	24.7	25.00	32.0	160.0	0.330	5.79×10 <sup>-3</sup>
7-1 强风化含砾粗砂岩	40	0.24	20.0	25.00	30.0	35.0	0.500	2.31×10 <sup>-3</sup>
8-1 中风化含砾粗砂岩	20 000	0.25	23.0	25.00	35.0	300.0	0.426	9.26×10 <sup>-4</sup>
9-1 微风化含砾粗砂岩	28 000	0.25	27.2	28.00	38.0	360.0	0.384	5.79×10 <sup>-4</sup>
断层	150	0.30	20.0	20.00	20.0	200.0	0.658	0.023 1
盾壳	200 000	0.26	80.0	—	—	—	—	—
管片	27 600	0.20	26.0	—	—	—	—	—
注浆层	50	0.26	20.0	—	—	—	—	—

2.1.2 数值计算结果

地层竖向位移在一定程度上反映盾构开挖面失稳的风险大小,盾构穿越珠江断裂带的地层竖向位移如图4所示。可见,盾构穿越断裂带时,地层最大沉降位于上覆地层为7-1强风化含砾粗砂岩情况(穿越第一个断层后以及完全穿越断裂带时),最大沉降值为8 mm,地层最大隆起位于下覆地层为7Z-B强风化混合花岗岩(碎块状)区段,最大隆起值为7.64 mm,其余区段地质状况较好。相对其他地层,7-1地层和7Z-B地层为软弱地层,盾构穿越时产生“上软下硬”或“下软上硬”现象,容易导致地层出现较大沉降或隆起,此时应注意控制盾构姿态,采取增大注浆等适当措施减小地层变形。

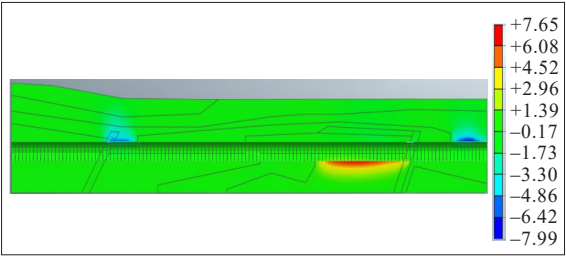


图4 盾构穿越珠江断裂带地层竖向变形图(单位:mm)  
Figure 4 Vertical deformation of shield crossing fault zone of Pearl River (unit:mm)

地层纵向位移大小反映了开挖面稳定性,盾构穿越断裂带数值模拟的纵向位移结果如图5所示。

最大位移出现在7-1和7Z-B软弱地层地段,为2 mm,表明盾构穿越时具有较小的开挖面失稳风险,可通过调整盾构掘进推力和土压力的方式减小地层纵向位移。综上所述,盾构穿越珠江断裂带时,风险地段位于7-1和7Z-B地层,地层沉降和开挖面纵向位移较大的7-1地层比7Z-B地层具有更大的开挖面风险,因此进一步针对7-1地层风险地段展开开挖面稳定性研究。

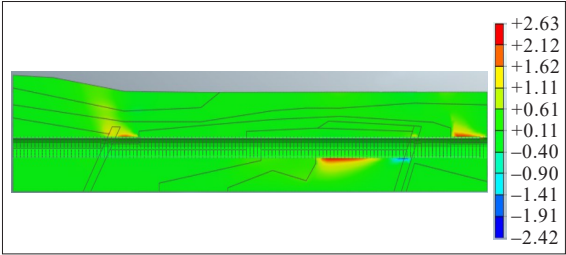


图5 盾构穿越珠江断裂带地层纵向变形图(单位:mm)  
Figure 5 Longitudinal deformation of shield crossing fault zone of Pearl River (unit:mm)

2.2 开挖面稳定性研究

2.2.1 模型建立

为了进一步优化隧道网格质量,提升计算精度及稳定性,对危险区间进行重新建模。区段隧道距江面约25.9 m,珠江水深为5.8 m。隧道情况、开挖影响范围、计算流程、材料属性以及边界约束与前文相同。所建立的计算模型如图6所示,整体模型尺寸为30 m×60 m×42 m,共含7.96万个计算单元。

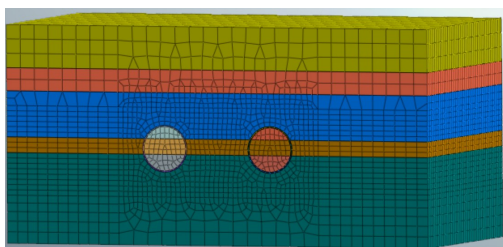


图6 计算模型图

Figure 6 Calculation model

盾构向前推进时,掘进压力一般大于地层支护压力,使盾构刀具能更好地切入地层,因此参考盾构掘进参数进行工况设计,并考虑设置不同的掘进压力和注浆压力,相应的模拟工况如表2所示。其中,支护应力比为开挖面中心点处支护应力与静止土压力的比值。通过全域的数值模拟结果可知,右线开挖前隧道中心线上的静止土压力约为150 kPa,支护应力比为开挖面掘进压力与该静止土压力的比值。

表2 数值模拟工况

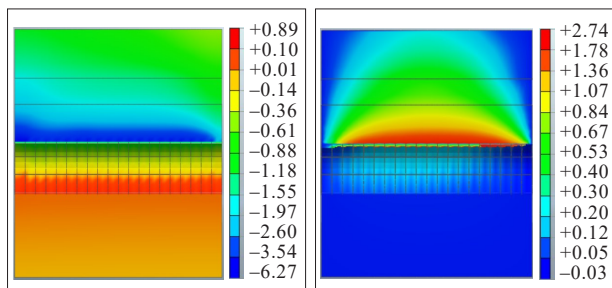
Table 2 Working conditions of numerical simulation

掘进压力/kPa	相应的支护应力比	注浆压力/kPa	掘进压力/kPa	相应的支护应力比	注浆压力/kPa
0.00	0.00	500.00	833.00	5.55	500.00
41.60	0.28	500.00	250.00	1.67	0.00
83.20	0.55	500.00	250.00	1.67	250.00
125.00	0.83	500.00	250.00	1.67	500.00
250.00	1.67	500.00	250.00	1.67	750.00
416.70	2.78	500.00	250.00	1.67	1 000.00
625.00	4.17	500.00			

## 2.2.2 数值计算结果

### 2.2.2.1 常规施工数值模拟结果

采用250 kPa掘进压力和500 kPa注浆压力进行施工时,盾构穿越后和穿越中的数值模拟结果如图7、8所示。

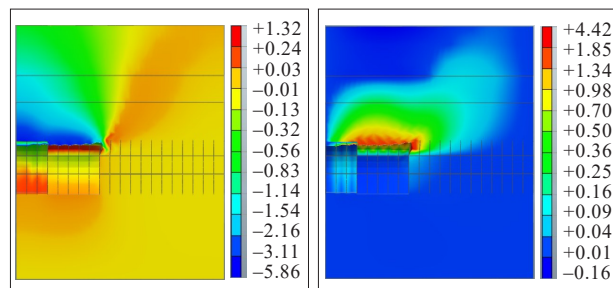


(a) 地层竖向位移

(b) 地层纵向位移

图7 盾构穿越后地层竖向/纵向位移图(单位:mm)

Figure 7 Vertical/longitudinal displacement of stratum after shield crossing (unit:mm)



(a) 地层竖向位移

(b) 地层纵向位移

图8 盾构穿越过程中地层竖向/纵向位移图(单位:mm)

Figure 8 Vertical/longitudinal displacement of stratum during shield crossing (unit:mm)

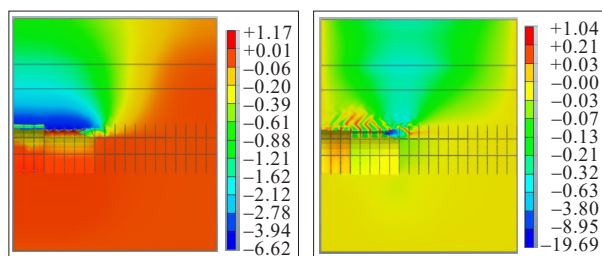
从图7可以看出:隧道完全贯通时,最大地层沉降为6.265 mm,最大地表沉降为1.060 mm,沿隧道方向地层产生的最大纵向位移为2.740 mm。从图8可以看出:盾构穿越过程中,开挖面前方地层包括7-1强风化含砾粗砂岩(上层)、8-1中风化含砾粗砂岩(夹层)和F4岩块状碎裂岩(下层)。其中,7-1地层相对开挖面其他地层最为软弱,产生较大的纵向位移(4.39 mm);F4地层相对中间夹层8-1强度较低,为上硬下软地层,因此F4地层存在一定的隆起趋势。

可见,此区段盾构穿越地质较为复杂,常规施工时虽没有产生开挖面失稳的情况,但也需要严格控制盾构姿态和掘进参数,严防盾构抬头或下沉等事故的发生。

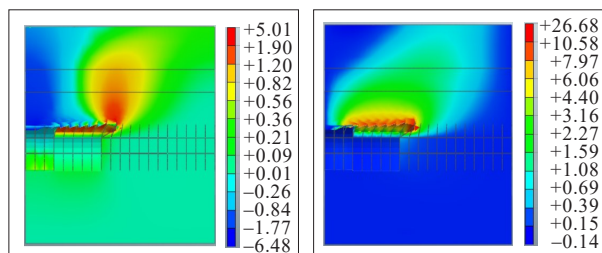
### 2.2.2.2 不同施工工况数值模拟结果

#### (1) 地层变形随支护应力比的变化

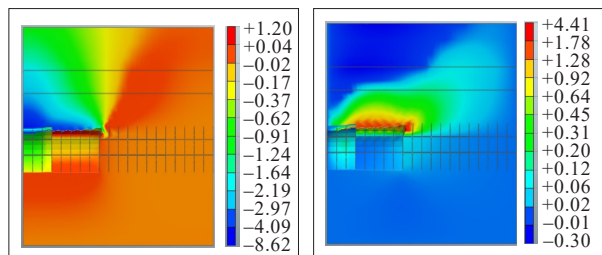
不同工况下数值模拟结果(部分)如图9所示,开挖面最大纵向位移以及最大地层沉降发生在较为软弱的7-1地层。地层变形随支护应力比的变化如图10所示。由图10可知:随着支护应力比的增加,开挖面最大纵向位移不断增大。开挖面最大纵向位移为0(此时随支护应力比变化的最大地层沉降最小)发生在支护应力比为0.79左右,因为此时支护应力与7-1地层的静止土压力相等。当支护应力比小于0.79时,开挖面最大纵向位移朝向隧道后方,如图9(a)所示,即盾构掘进过程中地层向隧道内变形,使开挖土体增多,地层沉降增大。特别地,当支护应力比为0时,开挖面最大纵向位移为-19.69 mm,最大地层沉降为7.08 mm,最大地表沉降为1.15 mm,并没有发生开挖面的失稳。当支护应力比大于0.79时,开挖面最大纵向位移朝向隧道前方,如图9(b)所示,地层



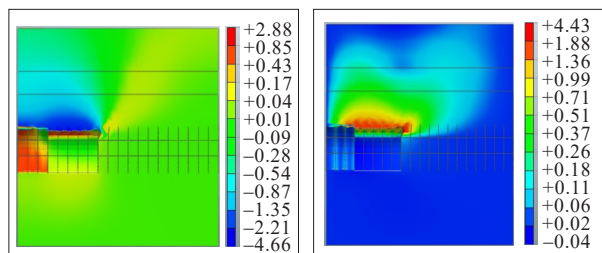
(a) 支护应力比为0,注浆压力250 kPa时地层竖向和纵向变形



(b) 支护应力比为5.55,注浆压力250 kPa时地层竖向和纵向变形



(c) 支护应力比为1.67,注浆压力0 kPa时地层竖向和纵向变形

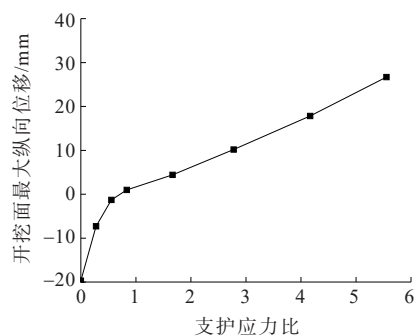


(d) 支护应力比为1.67,注浆压力1000 kPa时地层竖向和纵向变形

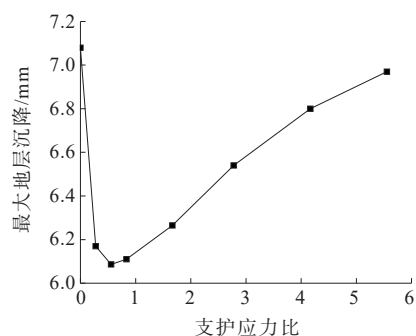
图9 部分工况下地层变形情况(单位:mm)

Figure 9 Ground deformation under partial working conditions(unit:mm)

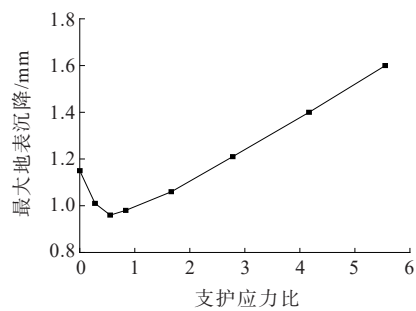
被挤压,而由于开挖面上软下硬的地层分布,使得上方7-1地层压缩较多,且压缩面朝向右下方,即掘进过程中盾构有一定的下沉趋势,导致地层沉降随支护应力比的增加而增大。因此,如图10(b)、(c)所示,最大地层沉降先减小后增加,但是最大地层沉降随支护应力比的变化不大,为6.09~7.08 mm。地表沉降处于0.96~1.60 mm,其变化规律与地层最大沉降相似。因此可知:穿越地层具有较好的开挖面稳定性,虽地层沉降受支护应力比的影响较小,但需要注意软弱地层的过大变形导致盾构姿态的变化。



(a) 开挖面最大纵向位移



(b) 最大地层沉降



(c) 最大地表沉降

图10 注浆压力为500 kPa时,地层变形随支护应力比的变化

Figure 10 Change in ground deformation with support stress ratio at grouting pressure of 500 kPa

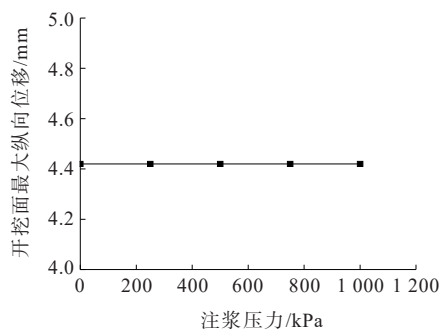
## (2) 地层变形随注浆压力的变化

地层变形随注浆压力的变化如图11所示。

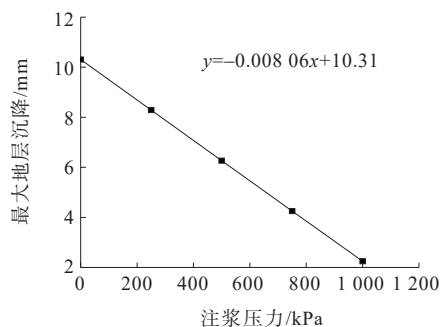
由图11可知:随着注浆压力的增大,开挖面最大纵向位移没有变化,而最大地层沉降(或最大地表沉降)与盾构注浆压力成反比关系。当注浆压力为0时,最大地层沉降为10.31 mm,最大地表沉降为2.16 mm。当注浆压力大于250 kPa时,地表沉降小于2 mm,满足一般要求。

结合实际情况,穿越该危险区间时,开挖面稳定性较好,可采用83.2~300.0 kPa掘进压力和不少于250 kPa注浆压力进行施工,以保证开挖面最大纵向位移小于6.70 mm,最大地层变形小于8.29 mm,最

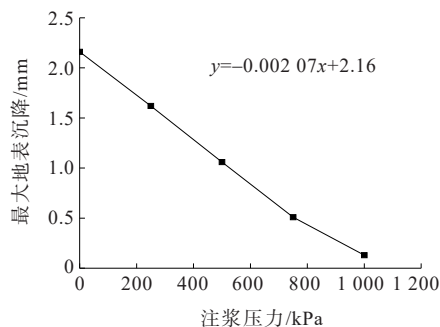
大地表沉降小于 1.62 mm。



(a) 开挖面最大纵向位移(盾构穿越中)



(b) 最大地层沉降(盾构穿越后)



(c) 最大地表沉降(盾构穿越后)

图 11 掘进压力为 200 kPa 时,地层变形随注浆压力的变化

Figure 11 Change in ground deformation with grouting pressure at tunneling pressure of 200 kPa

### 3 掘进参数分析

盾构下穿断裂带掘进参数如图 12 所示。由图 12 可知:盾构穿越过程中,注浆压力为 0.48~1.00 MPa, 大于 250 kPa, 偶尔产生注浆压力达 1.2 MPa 的异常情况;土压力位于 0.200~0.283 MPa, 为 2.4 MPa 左右, 由于盾构机土压力传感器布置在土仓内隔板上, 因此盾构机主控室监测的土压力值与隧道掌子面真实的土压力值存在一定差异, 需要对其进行换算, 换算公式如下:

$$\sigma_{\text{仓}} = k \cdot \alpha \cdot \sigma_v \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{\text{仓}}$  为土仓压力监测值;  $\sigma_v$  为开挖面的侧向土压力;  $\alpha$  为修正系数;  $k$  为传递系数。

根据以往研究, 压力传递系数受刀盘开口率、渣土改良、刀盘转动位置影响, 肖超等<sup>[23]</sup>指出渣土改良能增加盾构掘进过程中土仓压力传递系数, 且当盾构机刀盘面板转至监测点水平线上时, 土仓压力传递系数为 0.70~0.97, 取传递系数为 0.80。但盾构掘进是一个动态过程, 因此需对计算值进行修正, 修正值  $k$  取 1.2<sup>[24]</sup>。当土仓压力为 0.24 MPa 时, 盾构掘进压力为 0.25 MPa, 因此盾构掘进压力和注浆压力均位于数值分析建议范围内。

如图 12 所示, 盾构掘进速度平均值基本位于 25~37 mm/min, 刀盘扭矩位于 1 600~2 800 kN·m, 总推力平均值位于 13 000~15 000 kN。相比正常地层, 盾构依然具有较好的掘进效率和状态, 且没有发现显著的地层或地表变形, 表明盾构掘进控制能较好地适应断裂带的地层情况, 同时也验证了数值模拟结果的正确性。

### 4 结论与讨论

依托广州地铁 7 号线二期工程洪裕区间, 通过盾构下穿珠江断裂带全域及其高风险区域的数值模拟, 分析了盾构穿越断裂带可能产生的各种风险, 探究了不同支护应力及注浆压力对开挖面稳定性及地层变形的影响, 最后通过盾构掘进参数验证了数值模拟的合理性。主要结论如下:

(1) 当盾构穿越地层中上覆地层为 7-1 软弱地层时, 容易出现较大的地层和地表沉降, 最大地层沉降值为 8 mm。当盾构穿越下部地层为 7Z-B 软弱地层时, 由于下软上硬的地层分布, 容易导致地层隆起, 最大隆起值为 7.64 mm。

(2) 盾构穿越断裂带高风险区间时, 开挖面最大纵向位移受支护应力比的影响显著, 当支护应力比为 0.79 时, 开挖面最大纵向位移约为 0, 支护应力比小于 0.79 时, 开挖面中软弱地层 7-1 朝向隧道内变形, 支护应力比大于 0.79 时, 开挖面中软弱地层 7-1 朝向隧道前方变形, 且盾构有一定下沉趋势。不同的支护应力比对沉降的影响不大, 最大地层沉降在 6.09~7.08 mm 之间, 地表沉降在 0.96~1.60 mm 之间, 盾构开挖面稳定性较好, 没有发生开挖面失稳情况。

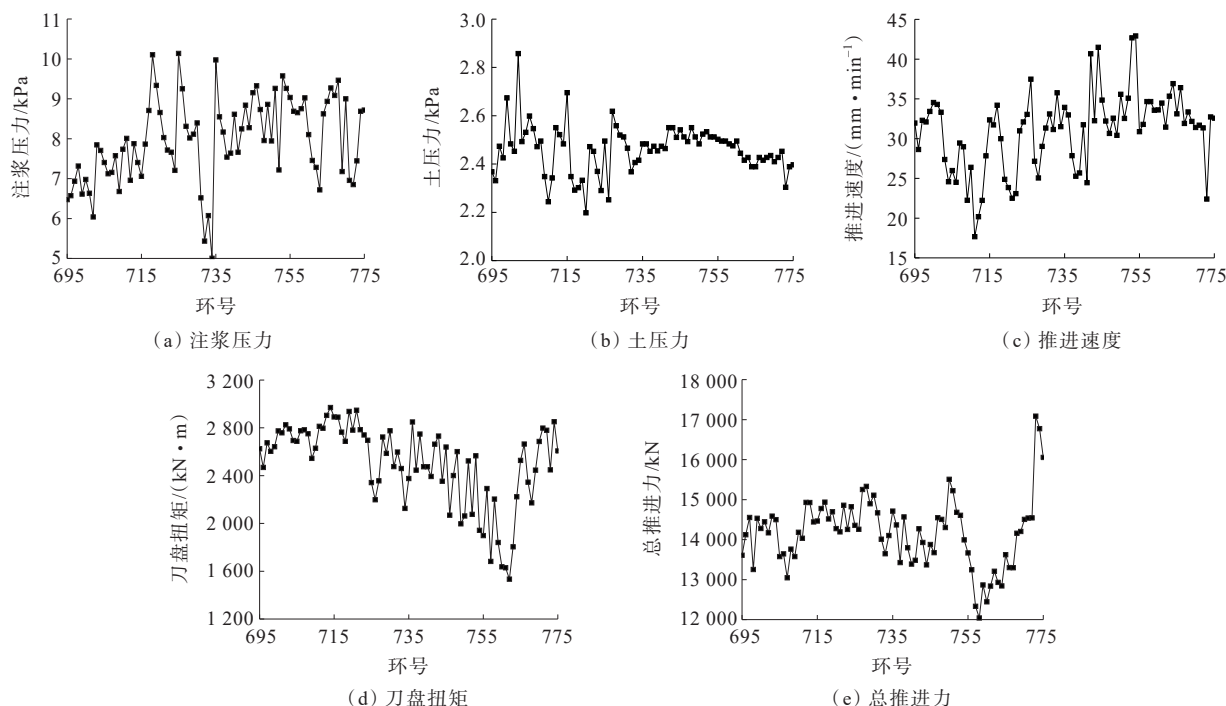


图12 盾构穿越断裂带掘进参数

Figure 12 Tunneling parameters of shield crossing fault zone

(3) 注浆压力对开挖面稳定性无影响,但与地层沉降成反比,注浆压力越大,地层沉降越小。当注浆压力大于 250 kPa 时,地表沉降小于 2 mm,满足一般要求。当掘进压力位于 83.2~300.0 kPa、支护应力比为 0.55~2.00 时,开挖面最大纵向位移为 -1.3~6.7 mm,没有发生开挖面失稳情况。因此综合考虑施工实际情况,穿越该危险区间时可选择采用掘进压力 83.2~300.0 kPa、支护应力比 0.55~2.00 和不少于 250 kPa 注浆压力进行施工。且数值模拟方案与实际掘进参数较为匹配,盾构施工的顺利掘进也验证了数值模拟方案的正确性。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] WANG S Y, FU J Y, ZHANG C, et al. Shield tunnel engineering: From theory to practice[M]. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2021.
- [2] 李鑫. 零山隧道断层破碎带稳定性分析及治理方法[D]. 济南: 山东大学, 2015.  
LI Xin. Stability analysis and treatment method of fault fracture zone in Lushan tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [3] 赵颖, 郭恩栋, 刘智, 等. 走滑断层位错作用下城市地铁隧道损伤分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 467-473.  
ZHAO Ying, GUO Endong, LIU Zhi, et al. Damage analysis of urban metro tunnel under strike-slip fault[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(sup 2): 467-473.
- [4] 张佳. 瑶寨隧道断层破碎带结构受力与变形特性分析[D]. 西安: 长安大学, 2013.  
ZHANG Jia. Analysis of stress and deformation characteristics of fault fracture zone structure in Yaozhai tunnel[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [5] 王焰. 城际铁路大直径泥水盾构施工风险及对策: 以佛莞城际铁路狮子洋隧道工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 983-988.  
WANG YAN. Construction risks and countermeasures for large-diameter slurry shield used in ShiZiYang Tunnel on Foshan-Dongguan Intercity Railway[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 983-988.
- [6] 刘秉峰, 张军伟, 李雪, 等. 盾构隧道穿越特殊地质岩位移动向量趋势线变形响应特征[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(2): 240-245.  
LIU Bingfeng, ZHANG Junwei, LI Xue, et al. Deformation response characteristics of displacement vector trend line of shield tunnel crossing special geology[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 240-245.
- [7] JAVADI A A, PM SNEE C. The effect of air flow on the shear strength of soil in compressed-air tunneling[J].

- Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(6): 1187-1200.
- [8] 刘文洁, 王同华, 肖建勋. 各向异性地基中盾构隧道开挖面稳定性分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(7): 14-19.
- LIU Wenjie, WANG Tonghua, XIAO Jianxun. Analysis of shield tunnel excavation surface stability in anisotropic foundations[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(7): 14-19.
- [9] ZINGG S, ANAGNOSTOU G. An investigation into efficient drainage layouts for the stabilization of tunnel faces in homogeneous ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 58: 49-73.
- [10] DING W T, LIU K Q, SHI P H, et al. Face stability analysis of shallow circular tunnels driven by a pressurized shield in purely cohesive soils under undrained conditions[J]. Computers and Geotechnics, 2019, 107: 110-127.
- [11] WENG X L, SUN Y F, YAN B H, et al. Centrifuge testing and numerical modeling of tunnel face stability considering longitudinal slope angle and steady state seepage in soft clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 101: 103406.
- [12] ZOU J F, QIAN Z H, XIANG X H, et al. Face stability of a tunnel excavated in saturated nonhomogeneous soils[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 83: 1-17.
- [13] 傅金阳, 谢佳伟, 房雅楠, 等. EPB 盾构开挖面稳定性的 PFC-FLAC 耦合分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 116-121.
- FU Jinyang, XIE Jiawei, FANG Yanan, et al. PFC-FLAC coupling analysis of face stability for EPB shield tunneling [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(5): 116-121.
- [14] CHENG X S, ZHANG S L, ZHOU X H, et al. Parameter analysis of excavation face stability of shield tunnel under high water pressure seepage[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2022, 128: 103218.
- [15] JANSSEN H A. Versuche über getreidedruck in silozellen [J]. Z. ver. deut. Ing., 1895, 39(35): 1045-1049.
- [16] 汲红旗, 宋中华, 刘维正, 等. 泥质砂岩地层盾构掘进施工扰动效应与地表纵向变形预测方法[J]. 中外公路, 2022, 42(1): 28-33.
- JI Hongqi, SONG Zhonghua, LIU Weizheng, et al. Disturbance effect of shield tunneling in argillaceous sandstone stratum and prediction method of surface longitudinal deformation[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(1): 28-33.
- [17] CHAMBON P, CORTÉ J F. Shallow tunnels in cohesionless soil: Stability of tunnel face[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(7): 1148-1165.
- [18] 李少庭. 考虑纵坡的隧道掌子面稳定性上限有限元分析[J]. 中外公路, 2019, 39(5): 188-193.
- LI Shaoting. Finite element analysis for stability limit of tunnel face considering longitudinal slope[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2019, 39(5): 188-193.
- [19] 李龙喜, 蒋建荣, 王树英, 等. 考虑循环进尺的隧道掌子面稳定性上限分析[J]. 中外公路, 2020, 40(6): 223-227.
- LI Longxi, JIANG Jianrong, WANG Shuying, et al. Upper bound analysis of tunnel heading stability considering cyclic footage[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2020, 40(6): 223-227.
- [20] 付亚雄, 贺雷, 马险峰, 等. 软黏土地层盾构隧道开挖面稳定性离心试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 387-393.
- FU Yaxiong, HE Lei, MA Xianfeng, et al. Centrifuge model tests on face stability of shield tunneling in soft clay[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 387-393.
- [21] 秦建设. 盾构施工开挖面变形与破坏机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- QIN Jianshe. Study on deformation and failure mechanism of excavation face in shield construction[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [22] 肖鹏飞, 冯光福, 贾少东, 等. 近距离下穿车站富水圆砾地层盾构隧道开挖面稳定性研究[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2021, 3(1): 75-81, 91.
- XIAO Pengfei, FENG Guangfu, JIA Shaocong, et al. Research on stability of excavation face of shield tunnel undercrossing station in water-rich gravel stratum[J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2021, 3(1): 75-81, 91.
- [23] 肖超, 谭立新, 陈仁朋, 等. 考虑渣土特征的盾构施工力学动态耦合仿真研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 1108-1115.
- XIAO Chao, TAN Lixin, CHEN Renpeng, et al. Dynamic coupling simulation of shield construction mechanics considering characteristics of soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 1108-1115.
- [24] 亢晨钢. 盾构机密封舱压力分布数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- KANG Chengang. Numerical simulation of pressure distribution in sealed cabin of shield machine[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2010.