

城市地铁盾构隧道与前方断层破碎带 临界安全距离研究

熊逸凡

(中铁第四勘察设计院集团有限公司, 武汉 430063)

摘要:立足于城市地铁盾构施工掘进过程,旨在预防地下岩溶发育并存在断层破碎带的城市中地铁盾构施工面临的突水涌泥灾害风险。针对城市地铁建设过程中盾构隧道前方断层破碎带临界安全距离问题,研究不同类型与直径的盾构机刀盘、不同厚度与水压的前方断层破碎带对临界安全距离的影响规律与响应敏感程度。利用 COMSOL Multiphysics 软件流固耦合方法模拟盾构推进过程与突水发生时刻。综合三维有限元数值模拟结果,利用 SPSS Statistics 软件中的多元回归功能得到盾构隧道前方断层破碎带临界安全距离公式。研究结果对于断层破碎带发育及地下水丰富的城市地铁盾构开挖工程具有一定的施工指导意义。

关键词:断层破碎带;盾构隧道;临界安全距离;突水涌泥灾害

中图分类号:U458 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)06-0239-10

在城市轨道交通建设过程中,盾构法因其各种显著优势,成为城市轨道交通修建工程的首选工法^[1-4]。在盾构隧道穿越城市浅地表地层时,难免遭遇各类不良地质体例如断层破碎带等,易造成突水突泥等灾害和各种工程事故^[5-7]。在预防盾构隧道建设中的地质灾害研究方面,研究人员认为施工过程中在灾害源前及时预留一定安全厚度作为合理保障是十分有效的手段,纷纷通过数值模拟、现场试验以及理论推导等手段,对不同工况下的灾害源施行分类计算^[8]。

在数值模拟方面,陈国庆等^[9]采用多场耦合有限元软件 COMSOL 实现了明月山隧道突水流动的全过程模拟,发现当隧道与断层大角度相交时,断层加剧了水流的流速,提高了隧道突水的风险性。耿萍等^[10-11]通过振动台模型试验分析并结合 ANSYS/LS-DYNA 软件进行三维时程计算,系统研究了穿越断层破碎带时隧道在地震作用下沿纵向的动力响应特性,得到结论:当断层与隧道轴线夹角为 $35^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 时,穿越断层破碎带隧道合理抗震设防长度为隧道跨度的 3.5 倍。李廷春等^[12]以有限差分软件 FLAC3D 的动力分析模块为平台,探讨了隧道与断层不同距离对隧道结构的震害影响,发

现当隧道位于断层上盘,距离因素对震害影响显著,且距离约 10 m 时最严重。

在工程现场分析方面,李鹏飞等^[13]依据祁连山隧道实际工程的安全厚度,分析断层破碎带最小安全厚度的影响因素,认为隧道半径、水头高度、断层和走向角等都将影响安全厚度。姚海波等^[14]以龙泉山隧道工程为依托,对隧道施工时围岩内瓦斯应力场变化进行研究,从瓦斯应力场及围岩力学变化入手,确定掌子面前方的安全厚度。

在理论推导方面,师海等^[15]在分析隧道围岩稳定性判据和岩层失稳机理的基础上,提出将岩层能量和安全系数突变作为隧道安全距离判据。于琳茗等^[16]基于摩尔-库仑准则和极限平衡法,推导出隧道碎屑流安全距离的计算公式,并分析了各参数的影响。孟凡树等^[17]基于筒仓理论和极限平衡方法,建立隧道轴线与掌子面正交和平行时的断层破碎带突水力学模型,并推导防突安全厚度的计算公式。张骞等^[18]运用结构力学方法建立模型,主要研究层状岩体隧道开挖过程中,掌子面的破碎带对应力分布的影响,计算得出岩板最小安全厚度。

综上所述,目前开展的相关研究多集中关注山岭隧道建设,但对城市地铁盾构隧道建设过程中含

收稿日期:2022-10-24

作者简介:熊逸凡(1993—),男,江西南昌人,中铁第四勘察设计院集团有限公司,助理工程师,硕士,研究方向为水下隧道工程。

水含泥断层破碎带作为突水灾害源在掌子面前的临界安全距离问题研究较少,而其对于盾构隧道及盾构机械危害甚为严重,必须引起研究人员的更多关注。

1 数值计算方法

Comsol 求解多物理场耦合的优势在于可以根据不同的研究领域的计算模型及其计算原理直接对多物理场耦合问题计算分析。对于所有基于求解偏微分方程的多物理场耦合作用过程,可以通过直接在软件中编写其偏微分控制方程来实现对各种多物理场耦合问题的求解^[19]。因此,本文数值模拟主要使用 COMSOL Multiphysics 软件中的 Darcy 定律模块和 Solid Mechanics 模块,以此进行流固耦合数值分析。

以往进行数值模拟研究突水问题多以充水构造与开挖掌子面附近两部分塑性变形区贯通作为围岩失稳突水发生的标志判据。但实际上对于含水构造,除考虑掌子面与构造间围岩稳定性外,岩体内部水压力变化理应更为受到重视,隧道前方断层破碎带发生突水一般滞后于隔水岩体的塑性区贯通失稳破坏,但断层破碎带突水必然导致岩体内部渗压变化,故此以开挖隧洞拱顶渗压发生突变作为数值模拟的突水发生判据应更加合理。此外为更加准确判断突水发生时的开挖推进步,在渗压监测的基础上辅之以更为直观的达西渗流速度监测^[20-21],作为判断依据相互印证。

1.1 数值计算原理

1.1.1 Darcy 定律方程

Darcy 定律描述了流体由水力梯度驱动在多孔介质中进行流动的过程,其速度场是由压力梯度、流体黏度和多孔介质黏度决定的。基于 Darcy 定律及水流连续性方程的一般渗流偏微分方程^[22]为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \nabla \cdot \left[-\frac{k}{\mu} (\nabla p + \rho g \nabla D) \right] = Q_m \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; k 为渗透率; μ 为流体黏度; p 为压力; D 为位置水头; Q_m 为质量源项; ϵ 为孔隙率。

1.1.2 Solid Mechanics 模块

Solid Mechanics 模块以求解运动方程和本构模型为基础,可以根据不同需求调节所使用的平面应力或平面应变假设,以计算位移、应力和应变等结果。其基本控制方程^[22]为

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot c + F_v \quad (2)$$

式中: ρ 为材料密度; u 为固体介质位移; c 为扩散

系数项; F_v 为与速度有关的源项。

通过设置相应的边界条件和初始值可以在 COMSOL Multiphysics 中实现饱和和多孔介质物理场和固体力学介质物理场的直接耦合,进而对含水含泥断层破碎带在盾构隧道掌子面前的安全距离进行研究分析。

1.2 数值计算假设

数值模拟岩土工程问题时需将其在有限的区域进行离散化,而计算范围的确定对数值计算结果产生一定影响,所以为使计算区域离散后不产生较大的误差,需选取合理的计算范围。通常在有限元计算中,可把孔洞附近孔径 3~5 倍的部分范围作为计算区域^[23],在此区域内划分单元进行计算,设定本次计算范围为信息感知区域时可以满足需求,具体为直径 20 m,长度 60 m 的圆柱体区域,如图 1 所示。

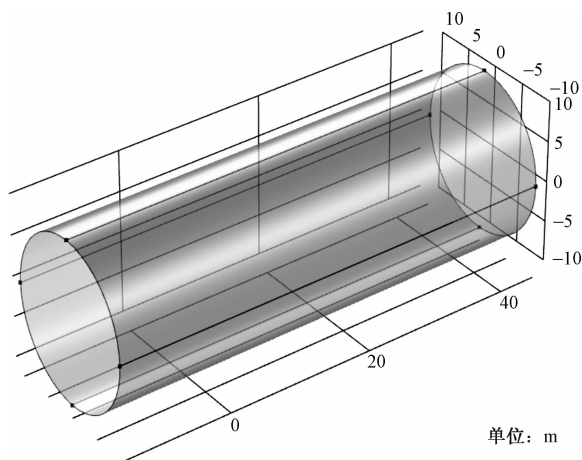


图 1 数值计算范围

1.3 边界及初始条件

计算区域必须设置一定的边界和初始条件,才能对控制方程进行求解。本次数值模拟当中,计算区域两端截面限制其水平位移,设为辊支承边界;计算区域下半底部限制其竖向和水平位移,设置为固定边界;上半顶部设为自由边界,模拟自由土体。模型初始条件由自重应力场、静水压力场构成。

1.4 基本工况的选择

在数值计算中,刀盘直径的选取主要参考目前全国地铁盾构隧道修建所使用普遍的盾构机类型,盾构机直径选取参考情况见表 1。参考全国盾构隧道施工实际情况,设定本次计算中的单次推进深度为 1.2 m,推进方向沿 X 轴正向。

因此,基于现场情况与普遍工程应用,分别设置3组不同断层破碎带厚度(T)、3组不同开挖刀盘直径(D)、3组不同断层破碎带水压(P),具体见表2。

表 1 盾构机刀盘直径选取参考

刀盘直径 D/mm	生产单位	工程应用
6 140	中铁装备工程集团	北京地铁 4 号线
6 280	沈阳重工集团	沈阳地铁
6 650	济南重工集团	济南地铁

表 2 模拟工况参数

刀盘直径 D/mm	断层厚度 T/m	断层破碎带水压 P/MPa
6 140	1	1
6 280	2	1.5
6 650	3	2

本文对突水灾害风险源——断层破碎带进行数值计算分析,主要研究置于盾构隧道正前方,覆盖面积超过整个盾构隧道截面,且倾角为最危险 45° 角的断层破碎带。

为控制断层破碎带与盾构隧道的相对位置关系不变,特将不同厚度的断层破碎带中心都设置于同一固定点($X=-2,Y=0,Z=0$),而其长度与宽度都设置为8 m,保证其在 45° 倾角的情况下仍能覆盖盾构隧道开挖面。将不同直径的盾构隧道开挖中心都设置于同一固定点($X=-15,Y=0,Z=0$)。设定监测平面在盾构隧道下方,坐标为 $Z=-4$,设定监测线于隧道和断层下方,坐标为($Y=0,Z=-4$),如图2所示。

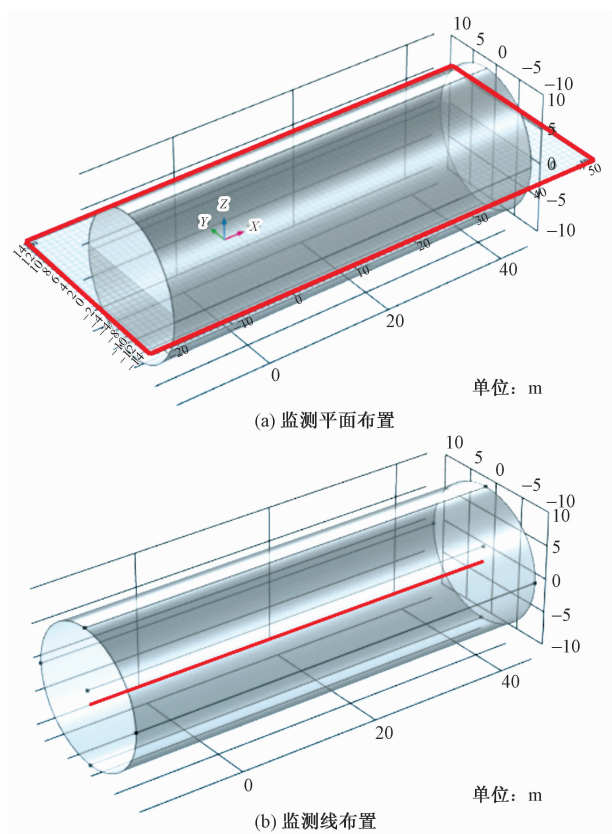


图 2 监测布置图

1.5 基本计算参数的选择

在本次计算中,地下水渗流发生时服从 Darcy 定律,而隧道与围岩采用 Mohr-Coulomb 准则作为屈服准则,基于城市地铁建设地质条件选取计算参数,见表3。

表 3 基本计算参数

杨氏模量/ Pa	泊松比	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	孔隙率	渗透率/ m^2	内聚力/ Pa	内摩擦角/ rad	动力黏度/ $(\text{Pa}\cdot\text{s})$
3.85×10^9	0.27	2 500	0.004	2×10^{-11}	2.5×10^5	0.52	0.001

2 数值计算结果分析

本次计算共设计 27 组工况,每组工况对应一个模拟工况示意图、一个压力监测平面图、以及一个拱顶达西渗流速度监测线图。

2.1 盾构隧道数值模拟计算

以下展示部分计算结果,所列图像都是盾构隧道推进开挖至即将突水时的监测数据计算云图。

1)刀盘直径 $D=6\,140\,\text{mm}$,断层厚度 $T=1\,\text{m}$,盾构隧道突水时计算组图如图3~图6所示。

2)刀盘直径 $D=6\,140\,\text{mm}$,断层厚度 $T=2\,\text{m}$,盾构隧道突水时计算组图如图7~图10所示。

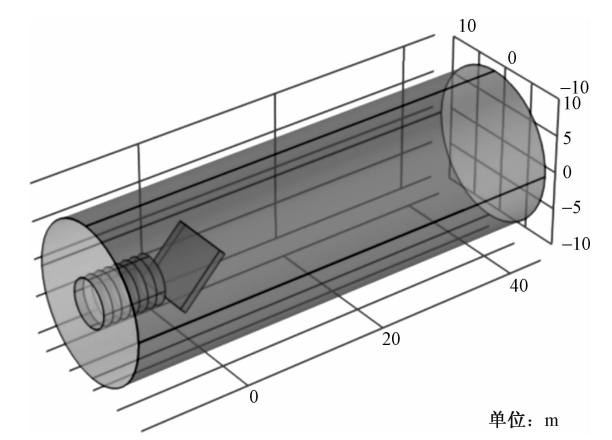


图 3 工况模拟图($D=6\,140\,\text{mm},T=1\,\text{m}$)

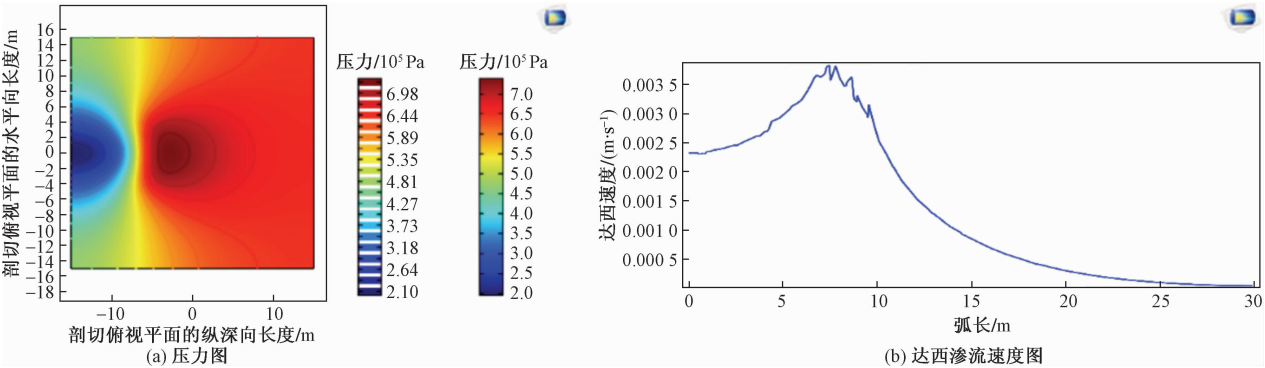


图 4 破碎带水压 $P=1$ MPa 监测图 ($D=6\ 140$ mm, $T=1$ m)

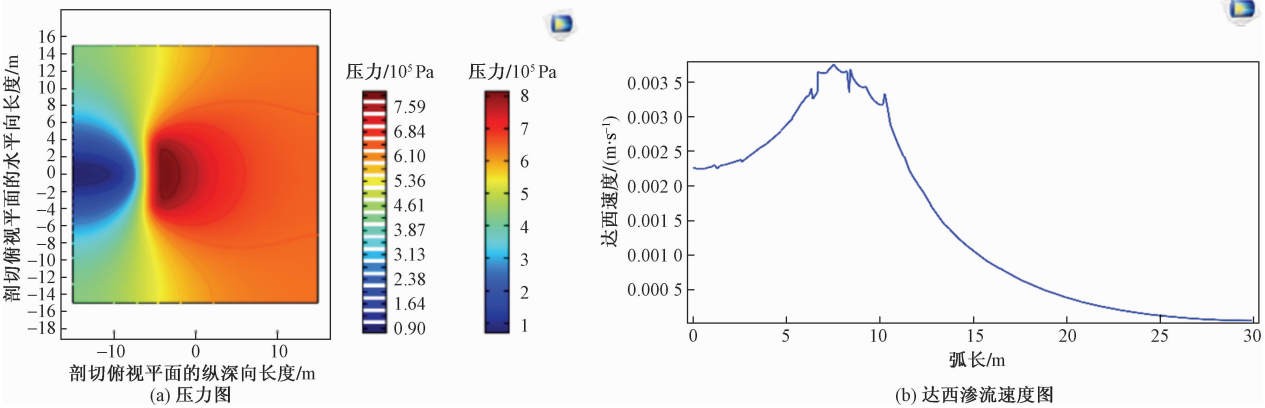


图 5 破碎带水压 $P=1.5$ MPa 监测图 ($D=6\ 140$ mm, $T=1$ m)

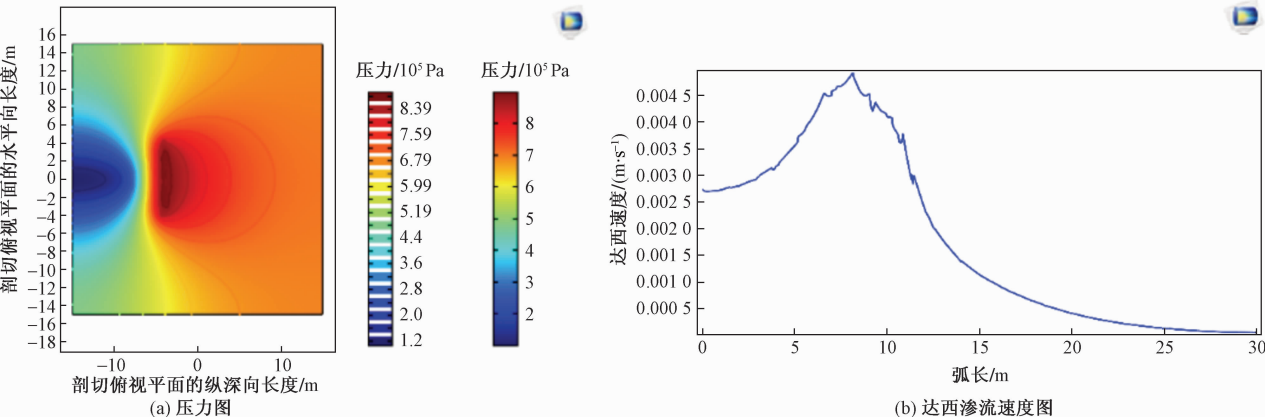


图 6 破碎带水压 $P=2$ MPa 监测图 ($D=6\ 140$ mm, $T=1$ m)

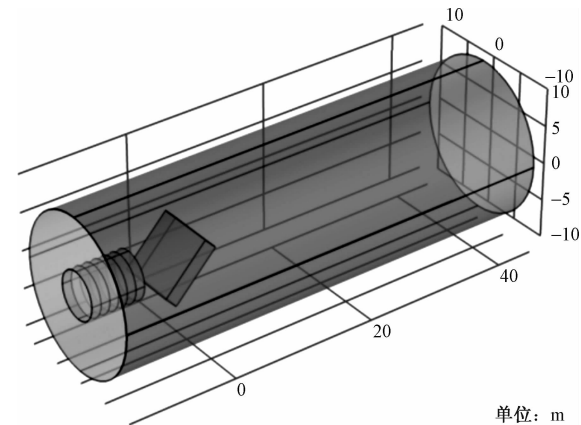


图 7 工况模拟图 ($D=6\ 140$ mm, $T=2$ m)

3) 刀盘直径 $D=6\ 140$ mm, 断层厚度 $T=3$ m, 盾构隧道突水时计算组图如图 11~图 14 所示。

如图 3~图 14 所示, 当突水即将发生时, 压力监测平面图上压力等值线趋于密集, 说明此刻水压陡然变化, 而达西渗流速度作为更形象的突水发生依据, 在盾构隧道即将突水时, 会在断层破碎带前端和隧道开挖面出现渗流速度的峰值, 可以作为突水发生的标志图例。

图 3~图 14 所展示的计算云图是以刀盘直径 $D=6\ 140$ mm 为固定变量, 改变断层破碎带厚度与

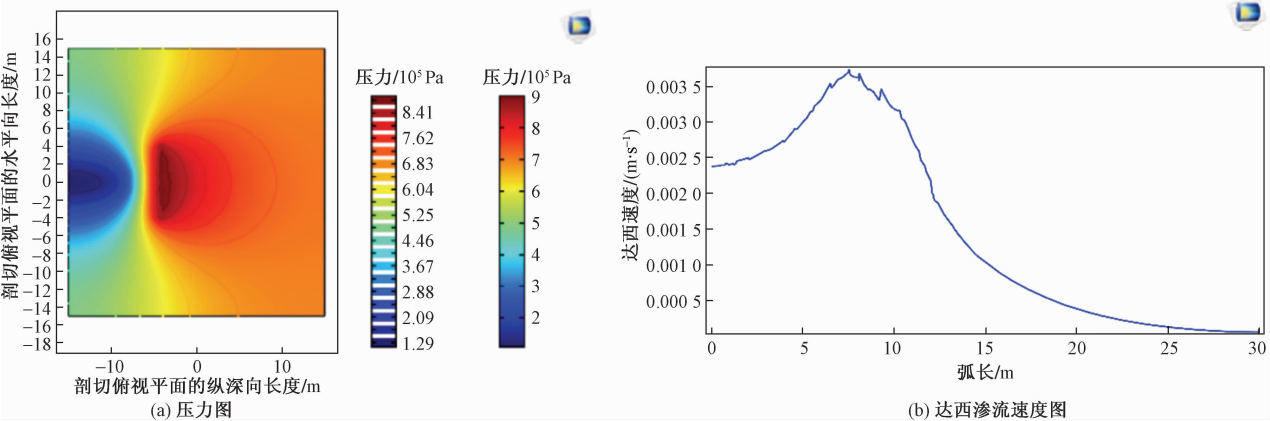


图 8 破碎带水压 $P=1\text{ MPa}$ 监测图 ($D=6\ 140\text{ mm}$, $T=2\text{ m}$)

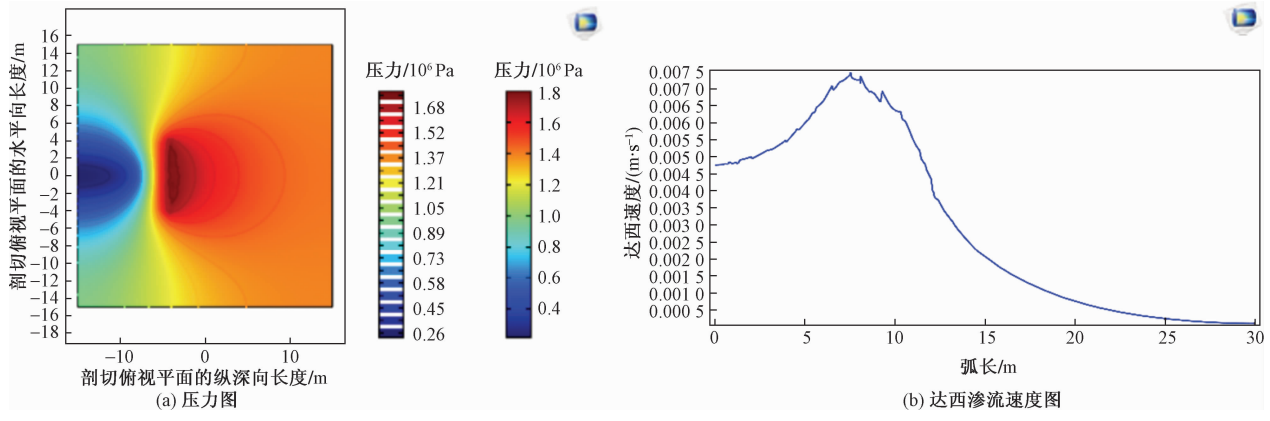


图 9 破碎带水压 $P=1.5\text{ MPa}$ 监测图 ($D=6\ 140\text{ mm}$, $T=2\text{ m}$)

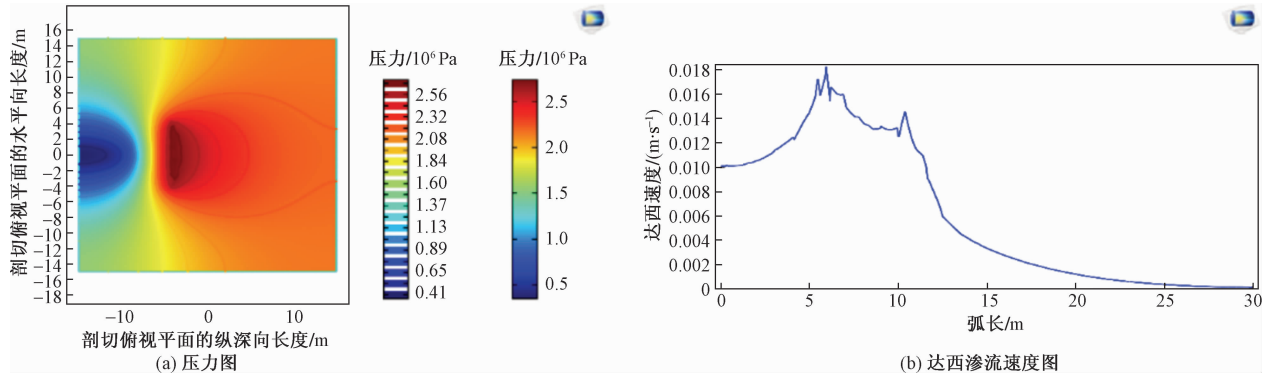


图 10 破碎带水压 $P=2\text{ MPa}$ 监测图 ($D=6\ 140\text{ mm}$, $T=2\text{ m}$)

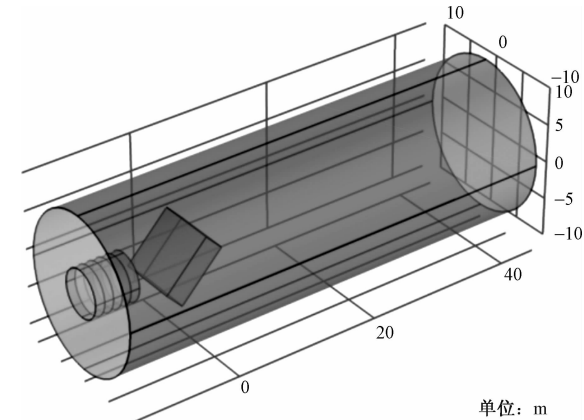


图 11 工况模拟图 ($D=6\ 140\text{ mm}$, $T=3\text{ m}$)

水压后计算所得,若以刀盘直径 $D=6\ 280\text{ mm}$ 、 $D=6\ 650\text{ mm}$ 分别为固定变量,计算所得云图大致与之相仿,故在此不再赘述,仅列表以展示结果。

表 4 所列是盾构开挖至发生突水的推进步数,而盾构开挖至此前一步时即应停止前进。这是由于盾构工法当中是按管片环宽进行推进的,盾构机正常工作时只应在能够至少完成一环管片拼装的距离下向前作业。因此,以下所描述的掘进临界安全距离是针对该工况下的盾构工法而言,并非传统意义上的极限安全距离,但是充分考虑盾构隧道的施工特点。

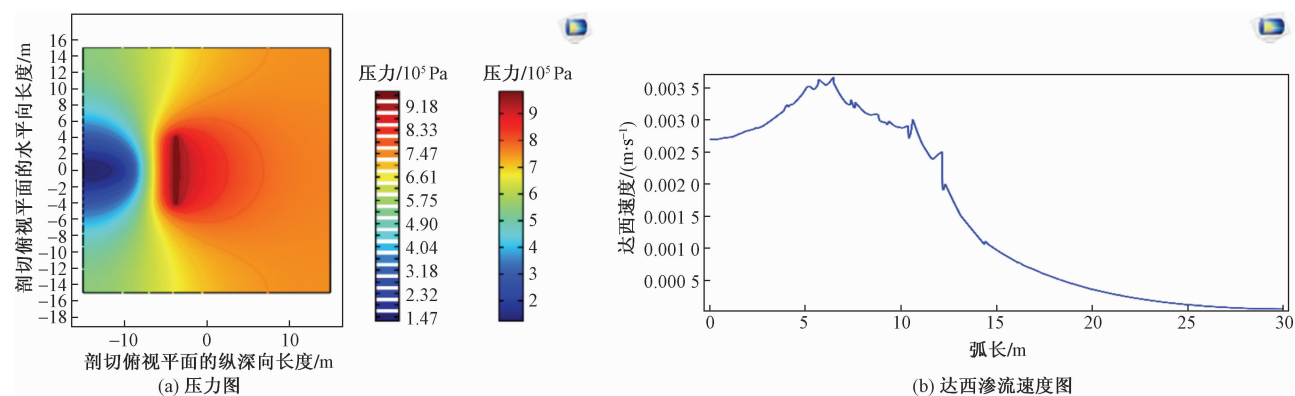


图 12 破碎带水压 $P=1\text{ MPa}$ 监测图 ($D=6\ 140\text{ mm}$, $T=3\text{ m}$)

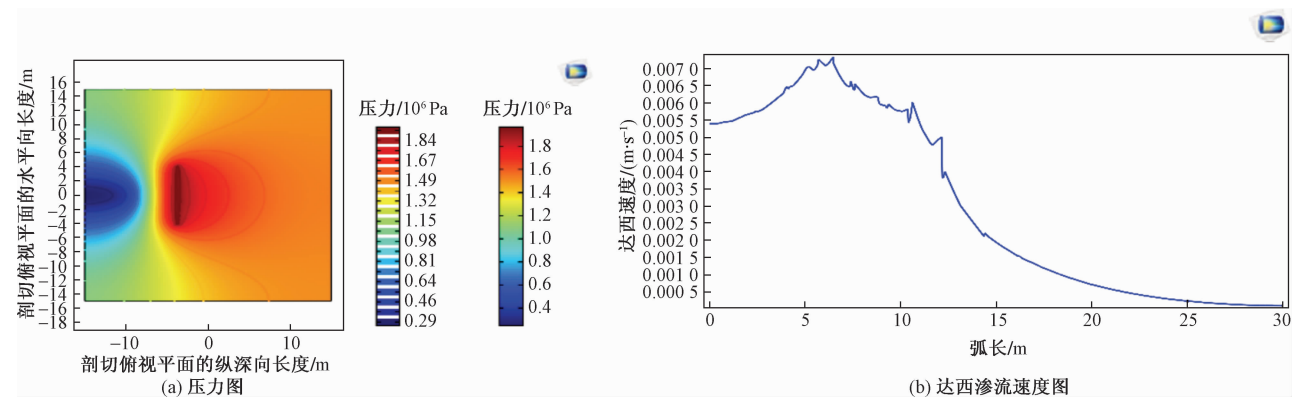


图 13 破碎带水压 $P=1.5\text{ MPa}$ 监测图 ($D=6\ 140\text{ mm}$, $T=3\text{ m}$)

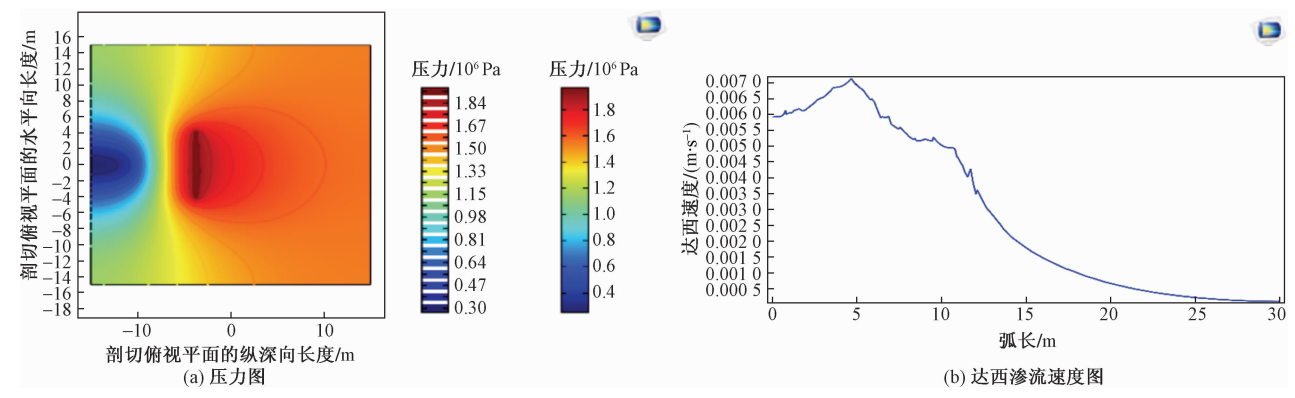


图 14 破碎带水压 $P=2\text{ MPa}$ 监测图 ($D=6\ 140\text{ mm}$, $T=3\text{ m}$)

表 4 发生突水时的盾构掘进步数 单位:步

刀盘直径/mm		6 140			6 280			6 650		
断层厚度/m		1	2	3	1	2	3	1	2	3
断层水压/MPa	1	7	6	5	7	6	5	6	5	4
	1.5	7	6	5	6	5	4	5	4	3
	2	6	5	4	6	5	4	5	4	3

由于此处的断层角度为 45° , 临界安全距离可取盾构掘进面与断层最近角点在盾构掘进方向上的投影距离, 计算得出的未发生突水临界安全距离见表 5。基于表 5 数据, 分析刀盘直径、断层水压、断层厚度对临界安全距离的影响。

表 5 未发生突水时的盾构掘进临界安全距离

单位: m

刀盘直径/mm		6 140			6 280			6 650		
断层厚度/m		1	2	3	1	2	3	1	2	3
断层水压/MPa	1	2. 618	3. 465	4. 311	2. 618	3. 465	4. 311	3. 818	4. 665	5. 511
	1. 5	2. 618	3. 465	4. 311	3. 818	4. 665	5. 511	5. 018	5. 865	6. 711
	2	3. 818	4. 665	5. 511	3. 818	4. 665	5. 511	5. 018	5. 865	6. 711

2.2 不同刀盘直径 D 的预留安全距离计算分析

如图 15~图 17 所示,在前方断层破碎带水压与厚度都确定的情况下,推进作业的盾构机刀盘直径增大,则突水风险增大,相应的临界安全距离也需增大,二者基本呈正相关态势。同时可见,在断层破碎带水压较大的情况下,开挖刀盘直径越大的工况突水预兆响应越强烈,其预留安全厚度也更亟需提升。

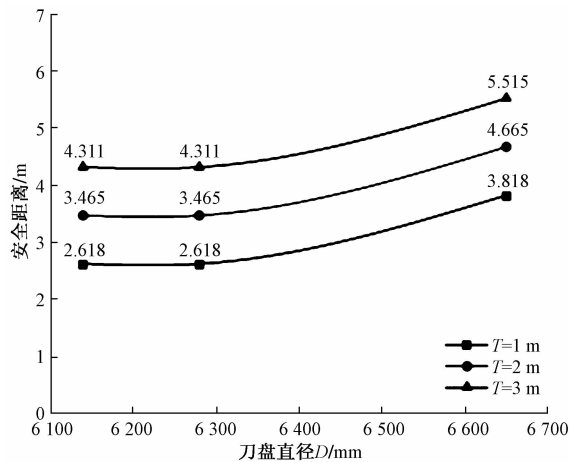


图 15 $P=1$ MPa,不同 D 、 T 下的安全距离

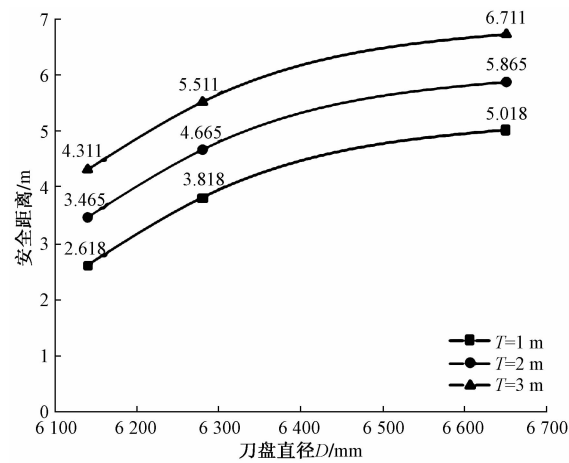


图 16 $P=1.5$ MPa,不同 D 、 T 下的安全距离

2.3 不同断层破碎带水压的预留安全距离计算分析

如图 18~图 20 所示,在前方断层破碎带厚度与推进开挖刀盘直径都确定的情况下,断层破碎带内水压增大,则突水风险增大,相应的临界安全距离也需增大,二者基本呈正相关态势。同时可见,断层水压对不同开挖直径的刀盘而言,其响应的敏感程度不同。

2.4 不同断层破碎带厚度的预留安全距离计算分析

如图 21~图 23 所示,在前方断层破碎带水压

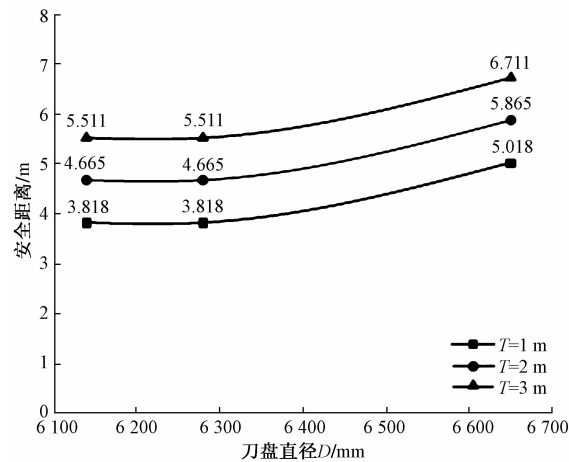


图 17 $P=2$ MPa,不同 D 、 T 下的安全距离

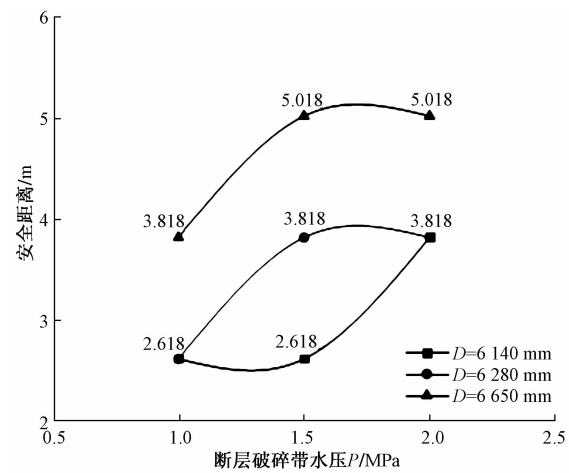


图 18 $T=1$ m,不同 P 、 D 下的安全距离

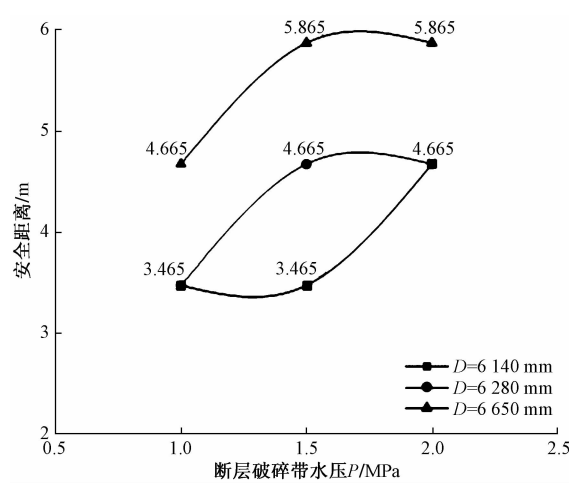


图 19 $T=2$ m,不同 P 、 D 下的安全距离

与推进开挖刀盘直径都一定的情况下,断层破碎带厚度增大,则突水风险增大,相应的临界安全距离也需增大,二者呈线性正相关态势。

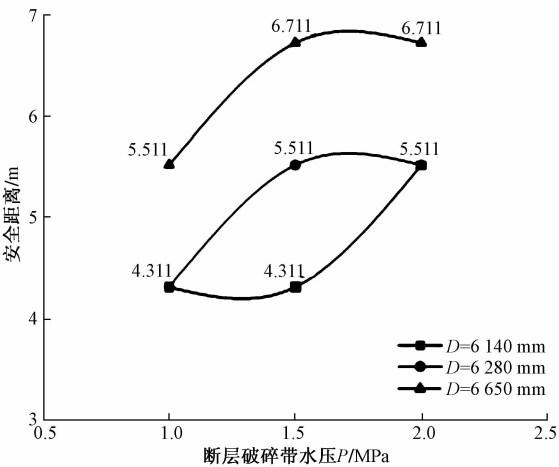


图 20 $T=3\text{ m}$,不同 P 、 D 下的安全距离

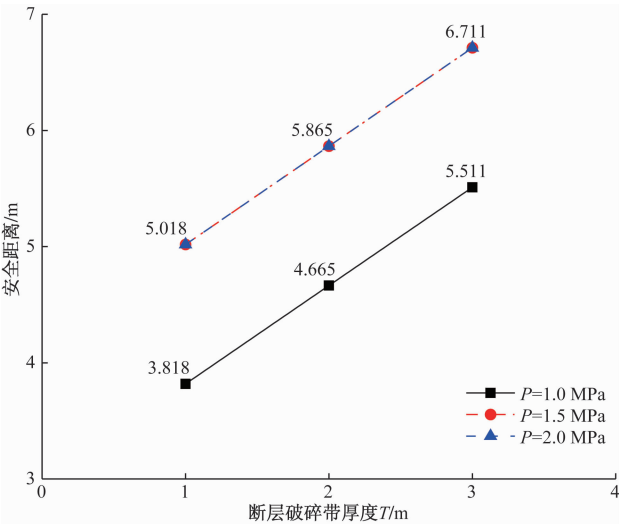


图 23 $D=6\ 650\text{ mm}$,不同 T 、 P 下的安全距离

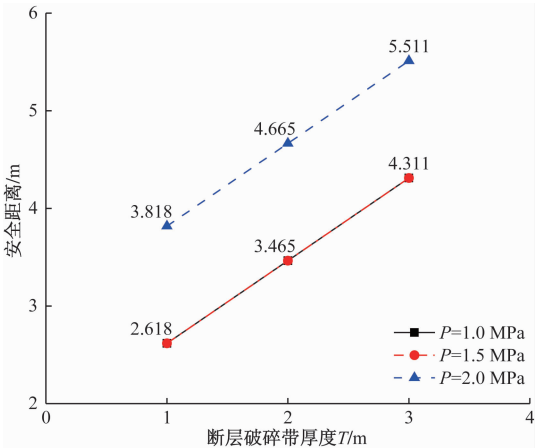


图 21 $D=6\ 140\text{ mm}$,不同 T 、 P 下的安全距离

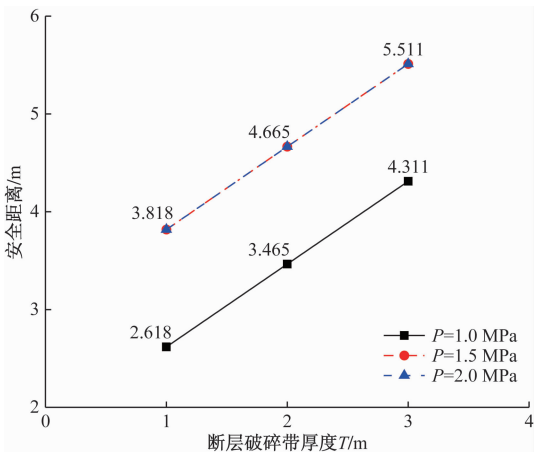


图 22 $D=6\ 280\text{ mm}$,不同 T 、 P 下的安全距离

结合图 15~图 23 与表 5 中数据,利用系统分析法中的敏感性分析法^[24-25],对 3 个影响因素的敏感性进行对比分析。各影响因素经无量纲处理后,参照式(3)计算敏感度。

$$S_k = \frac{\left| \frac{\Delta M}{M} \right|}{\left| \frac{\Delta x_k}{x_k} \right|} = \left| \frac{\Delta M}{\Delta x_k} \right| \left| \frac{x_k}{M} \right| \quad (3)$$

式中: S_k 为因素 x_k 的敏感度, $k=1,2,\cdots,n$; $\left| \frac{\Delta M}{M} \right|$ 为系统特性的相对变化率,在本文中为临界安全距离的相对变化率; $\left| \frac{\Delta x_k}{x_k} \right|$ 为某一因素的相对变化率。每次只变动其中一个因素,而保持其他因素不变,每个因素选取的基准值及变化范围见表 6。

得到每一组因素影响下的临界安全距离变化值,按照式(3)定义,计算各因素的敏感度,结果见表 7。

由表 7 可以看出, $S_D > S_P > S_T$, 则对于本文中地铁盾构隧道模型中的 3 个影响因素,刀盘直径 D 对临界安全距离的计算最为敏感,其次是断层破碎带水压 P ,最不敏感是断层破碎带厚度 T 。

表 6 各因素基准值及变化范围

影响因素	D/mm	P/MPa	T/m
基准值	6 395	1.5	2
变化范围	6 140~6 650	1~2	2~3

表 7 各影响因素对临界安全距离的敏感度

影响因素	D/mm	P/MPa	T/m
敏感度 S_k	11.327 1	1.355 0	0.903 3

3 多元回归拟合分析

利用 SPSS Statistics 软件中的多元回归分析功能,将以上 3 个影响因素设置成自变量,将临界安全距离设置为因变量,建立二者之间的关系式,进行

回归分析。

3.1 一元回归分析

首先进行一元回归分析试算,分别采用断层破碎带充填水压 P 、盾构隧道刀盘直径 D 、断层破碎带厚度 T 作为自变量,临界安全距离 H_s 作为因变量。选择合适的回归方程(线性函数、指数函数、对数函数、幂函数)分别进行相关性分析,并取相关系数最大者所对应函数作为其回归方程,得到如下结果:

$$H_s(P) = 1.747\ln P + 3.892 \tag{4}$$

$$H_s(D) = 0.050\,031e^{0.000\,704D} \tag{5}$$

$$H_s(T) = 0.846\,5T + 2.838 \tag{6}$$

3.2 多元回归分析

基于一元回归分析所确定的回归方程,可建立最小安全距离与各因素之间的多元回归方程:

$$H_s(D,T,P) = c_0 + c_1T + c_2\ln P + c_3e^{c_4D} \tag{7}$$

式中: $H_s(D,T,P)$ 为临界安全距离; $c_0、c_1、c_2、c_3、c_4$ 为回归方程中的系数。通过数值模拟数据,拟合解出 $c_0、c_1、c_2、c_3、c_4$ 各系数为 $c_0 = -4.073、c_1 = 0.846\,5、c_2 = 1.747、c_3 = 0.272\,6、c_4 = 0.000\,492$,由此可建立临界安全距离与各因素之间的多元非线性回归公式。

3.3 盾构隧道前方断层破碎带临界安全距离公式

经计算整理,由刀盘直径(D)、断层破碎带水压(P)以及断层破碎带厚度(T)共同拟合得出临界安全距离的计算公式:

$$H_s(D,T,P) = -4.073 + 0.846\,5T + 1.747\ln P + 0.272\,6e^{0.000\,492D} \tag{8}$$

由式(8)中的函数形式可以验证上文中的各影响因素的敏感程度分析结果的正确性。对该多元非线性回归方程进行方差分析,结果见表 8。

表 8 回归方程的方差分析

变量	平方和	自由度	均方
回归分析	586.432	5	117.286
残差	1.977	22	0.090
残差修正前总计	588.409	27	
残差修正后总计	34.018	26	

拟合优度 $R^2 = 1 - (\text{残差平方和})/(\text{修正平方和}) = 0.942$ 。

由于在非线性回归中,残差均值的平方不再是误差方差的无偏估计,不能用 F 统计量及其 P 值进行回归方程的检验,因此仅检验拟合优度。表 8 中得到拟合优度为 0.942,达到拟合精度要求。此外,为直观显示其拟合精度,采用四维点云模式作图,

以 $x、y、z$ 三轴分别代表 $D、T、P$,以颜色变化代表其安全距离变化。公式拟合数据分布点云图如图 24 所示。

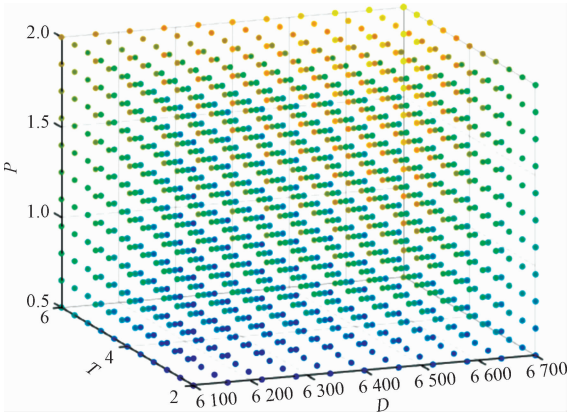


图 24 拟合数据分布点云图

由图 24 可见,该拟合公式基本符合数值计算所得数据,且云图变化相对平缓,未出现两极化分布,符合拟合要求。

4 结论

需要指出的是,式(8)是由数值计算和回归分析拟合得出的,其模拟参数基于给定的城市盾构隧道地质条件,如果研究其他具体盾构隧道线路案例,则必须调整模拟参数以满足所研究案例的地质条件,其公式也会发生变化。故此,虽然其影响因素、敏感程度排序和拟合方法等工作核心是不变的,但不能直接应用该公式对所有盾构隧道工程进行计算。综合上文的工作,得出以下结论:

1)盾构隧道前方存在断层破碎带时,则断层破碎带水压、盾构刀盘直径、断层破碎带厚度等因素都与盾构隧道施工掘进时的临界安全距离有关,且都呈正相关。

2)对于断层破碎带厚度、盾构刀盘直径和断层破碎带水压这 3 个影响因素而言,经无量纲化与敏感度计算之后可知,其对突水风险与临界安全距离的影响敏感程度为刀盘直径 $D >$ 断层破碎带水压 $P >$ 断层破碎带厚度 T ,三者影响依次降低。

3)得到了盾构隧道前方断层破碎带临界安全距离公式,可为断层破碎带发育、地下水丰富的城市地铁盾构开挖工程提供参考。

参考文献

[1] 周双禧,李志华,陈飞龙,等.城市轨道交通盾构法隧道施工新技术及应用[J].施工技术,2020,49(19):87-92.
[2] 王梦恕.中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及

- 发展思路[J]. 隧道建设, 2014, 34(3): 179-187.
- [3] 宋曙光. 渗流作用下复合地层盾构隧道施工开挖面稳定性及控制研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [4] KUN M, ONARGAN T. Influence of the fault zone in shallow tunneling; a case study of Izmir Metro Tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 33(1): 34-45.
- [5] WANG D M, ZHANG Q S, ZHANG X. Model experiment on inrush of water and mud and catastrophic evolution in a fault fracture zone tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37: 2851-2860.
- [6] BAYATI M, HAMIDI J K. A case study on TBM tunneling in fault zones and lessons learned from ground improvement[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63: 162-170.
- [7] 谭英华. 隧道富水断层破碎带突泥灾变演化机理及工程应用[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- [8] XUEY G, WANG D, LI S C. A risk prediction method for water or mud inrush from water-bearing faults in subsea tunnel based on cusp catastrophe model[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21: 2607-2614.
- [9] 陈国庆, 李天斌, 范占锋, 等. 基于不同渗流方程的岩溶隧道涌突水过程模拟[J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(4): 8-13.
- [10] GENG P, HE Y, HE C. Research on reasonable aseismic fortified length for tunnel through fault fracture zone [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33: 358-365.
- [11] 耿萍, 吴川, 唐金良, 等. 穿越断层破碎带隧道动力响应特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(7): 1406-1413.
- [12] 李廷春, 吕连勋, 刘建章, 等. 基于隧道与断层破碎带距离因素的震害规律分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 52-61.
- [13] 李鹏飞, 刘宏翔, 赵勇, 等. 隧道穿越断层破碎带防突水最小安全厚度及其影响因素[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2020, 2(3): 77-84.
- [14] 姚海波, 杜宇, 张文选, 等. 油气田瓦斯隧道开挖掌子面围岩安全厚度研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(1): 168-174.
- [15] 师海, 白明洲, 许兆义, 等. 基于突变理论的岩溶隧道与隐伏溶洞安全距离分析[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(4): 61-69.
- [16] 于琳茗, 郭永春, 张志强. 隧道掘进掌子面与前方碎屑流区域安全距离的计算[J]. 铁道建筑, 2016(4): 47-50.
- [17] 孟凡树, 王迎超, 焦庆磊. 断层破碎带突水最小安全厚度的筒仓理论分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(2): 89-95.
- [18] 张骞, 白松松, 高昱. 穿越破碎带隧道掌子面力学模型及最小安全厚度研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(10): 141-219.
- [19] 周国栋. 考虑流固动力耦合的饱和土体内隧道结构地震反应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [20] YANG W M, FANG Z D, YANG X, et al. Experimental study of influence of Karst aquifer on the law of water inrush in tunnels[J]. Water, 2018, 10: 1211.
- [21] LI L P, CHEN D Y, LI S C. Numerical analysis and fluid-solid coupling model test of filling-type fracture water inrush and mud gush[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 13: 1011-1025.
- [22] 徐轶, 徐青. 基于 COMSOL Multiphysics 的渗流有限元分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2014, 47(2): 165-170.
- [23] 潘俊群. 基于 COMSOL Multiphysics 的隧洞开挖数值模拟[J]. 中国水运(下半月), 2015, 15(7): 94-96.
- [24] 张志华, 周传波, 夏志强, 等. 地铁隧道土体参数敏感性分析与正交反演[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(6): 2488-2493.
- [25] 章光, 朱维申. 参数敏感性分析与试验方案优化[J]. 岩土力学, 1993(1): 51-58.

Study on the Critical Safety Distance between Urban Subway Shield Tunnel and the Front Fault Fracture Zone

XIONG Yifan

(China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., LTD., Wuhan 430063, China)

Abstract: Based on the tunneling process of urban subway shield construction, the aim is to prevent the risk of water and mud inrush faced by subway shield construction in cities where underground Karst has developed and there is a fault fracture zone. Aiming at the critical safety distance of the fault fracture belt in front of the shield tunnel during the construction of the urban subway, the influence law and response sensitivity of different types and diameters of shield machine cutter heads, and different thicknesses and water pressures of the fault fracture belt on the critical safety distance are studied. The COMSOL Multiphysics software fluid-structure interaction method is used to simulate the shield propulsion process and the moment of water inrush. Based on the 3D finite element numerical simulation results, the critical safety distance formula of the fault fracture zone in front of the shield tunnel is obtained by using the multiple regression function in SPSS Statistics software. The results of this paper have certain construction guidance significance for the development of fault fracture zones and the excavation of urban subway shield tunnels with abundant groundwater.

Keywords: fault fracture belts; shield tunnels; critical safety distance; water and mud inrush disaster