

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20221009002

# 上覆富水砂层地铁隧道掌子面变形特征数值 试验研究\*

张红军<sup>1,2</sup>, 张太平<sup>1</sup>, 王奎峰<sup>1</sup>, 许艳<sup>1</sup>, 王薇<sup>1</sup>, 王强<sup>1</sup>, 张龚<sup>1</sup>

(1. 山东省地质科学研究所, 山东 济南, 250013; 2. 自然资源部金矿成矿过程与资源利用重点实验室, 山东 济南, 250013)

**摘要:** 为研究地铁隧道在上覆富水砂层下的变形特征, 以典型上覆富水砂层隧道—青岛地铁2号线啤—苗区间为工程研究背景, 采用FLAC 3D数值模拟软件对不同富水砂层厚度与隔水层厚度工况下隧道掌子面位移、塑性区变化特征进行了研究分析。研究表明: 隔水层厚度是影响掌子面是否发生涌水涌砂的主控因素, 在开挖过程中应时刻注意富水砂层距离隧道顶板的安全距离, 临界隔水层的厚度为3 m。同时, 当隔水层厚度越大、富水砂层厚度越小时, 掌子面变形就会越小。以临界工况为研究对象, 通过分析开挖过程中隧道拱顶—拱腰—掌子面应力和位移变形规律, 引入了位移释放系数和应力释放率两参数来揭示围岩与掌子面在隧道开挖过程中的影响关系。通过进一步拟合掌子面失稳破坏预测方程, 得到了掌子面变形释放率拐点先于同一断面围岩径向变形且发生在开挖到目标断面之前的重要结论, 因此在实际隧道开挖过程中应将掌子面的变形作为首选敏感监测指标。研究结果可为该不良地质条件下隧道掌子面稳定性和预加固时机选择提供一定的理论指导。

**关键词:** 富水砂层; 数值试验; 隧道掌子面; 变形特征

**中图分类号:** TU443 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)06-1454-09

## Numerical Experimental Study on Deformation Characteristics of Metro Tunnel Excavation Surface with Overlying Water-rich Sand Layer

ZHANG Hongjun<sup>1,2</sup>, ZHANG Taiping<sup>1</sup>, WANG Kuifeng<sup>1</sup>, XU Yan<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>,  
WANG Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Gong<sup>1</sup>

(1. Shandong Institute of Geological Sciences, Ji'nan 250013, China; 2. Key laboratory of Gold mineralization Processes and Resources Utilization Subordinated to the Ministry of Land and Resources, Ji'nan 250013, China)

**Abstract:** In order to study the deformation characteristics of subway tunnel under the unfavorable geological conditions of overlying water-rich sand layer, a typical tunnel, in dynamic water-rich and weakened sand stratum of Qingdao metro No.2 line (the Pi-Miao section), was taken as a research model, FLAC3D numerical simulation software is used to study the displacement of tunnel excavation surface and the variation characteristics of plastic zone under different thickness of water-rich sand layer and water-repellent layer. The results show that the larger the thickness of the water-repellent layer and

\* 收稿日期:2022-10-09;修回日期:2023-04-12

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2019BEE021)资助

作者简介:张红军(1987—),男,高级工程师,博士(后)。主要从事重大地质灾害治理方面的研究。

E-mail: sduhongjun@163.com

通讯作者:王强(1980—),男,正高级工程师,硕士。主要从事水文地质方面的研究。E-mail: wqsddky@126.com

the smaller the thickness of flowing sand layer, the smaller the deformation of the excavation surface will be. The thickness of waterproof layer is the main control factor affecting whether water and sand inrush occurs on the excavation face. In the process of excavation, maintain a safe distance between the sand layer and the tunnel. Once it is less than 3 m, tunneling should be stopped immediately and corresponding advance reinforcement measures should be taken. Taking the critical condition as the research object, the stress and displacement deformation law of tunnel's arch, waist, and face during excavation were analyzed, and the displacement release coefficient and stress release rate were introduced to reveal the relationship between surrounding rock and the excavation face during tunnel excavation. By further fitting the prediction equation for the instability and failure of the excavation face, an important conclusion was drawn: that the inflection point of deformation release rate of excavation face is prior to the radial deformation of the surrounding rock in the same section and occurs before the excavation reaches the target section. Therefore, the deformation of the excavation face should be regarded as the primary sensitive monitoring index during the actual tunnel excavation. The research results can provide some theoretical guidance for the stability of the tunnel excavation face and the selection of pre-reinforcement timing under the unfavorable geological conditions.

**Keywords:** quicksand stratum; numerical experiment; tunnel excavation surface; deformation characteristics

## 0 引言

在我国滨海城市第四系软土层中修建地铁经常会遇到富水软弱砂层,由于其具有其比较松散、黏聚力小、孔隙率大、渗透系数大、含承压水等特点,隧道开挖扰动下极容易导致掌子面发生失稳破坏,诱发涌水涌砂等工程灾害,造成掌子面坍塌、地面塌陷事故<sup>[1-2]</sup>。近年来,国内城市如北京、深圳、上海、广州、厦门及青岛地铁隧道建设中,均发生了多起与富水砂层有关的重大安全事故<sup>[3-8]</sup>。因此,富水砂层隧道掌子面稳定性研究是目前工程不良地质灾害控制的热门课题之一。

隧道掌子面稳定性的研究方法大体可分为地质模型试验、滑移线法、数值计算分析以及极限分析法等<sup>[9-12]</sup>,其中数值计算分析法已经成为国内外学者研究隧道围岩变形及稳定性方面的重要研究手段<sup>[13-14]</sup>。例如,国外学者G.Swobocia等<sup>[15]</sup>通过数值分析模拟了泥水盾构掘进过程中土体行为;Baumann等<sup>[16]</sup>模拟了泥水盾构掘进过程中的主体特性;P.Buhan等<sup>[17]</sup>建立了土压平衡盾构隧道掌子面的三维有限元计算模型;S.Konishiti<sup>[18]</sup>采用刚塑性有限元方法对不考虑渗流作用下掌子面稳定性问题进行了求解;J.Manuelti等<sup>[19]</sup>采用颗粒流软件(PFC)对马德里地铁隧道进行三维建模等。国内学者在前

人的理论上,基于不断发展的计算技术进一步优化研究结果,取得了丰富的成果。如,赵永众<sup>[20]</sup>建立ANSYS三维数值计算模型,分析了隧道开挖前后掌子面的应力与变形情况;缪林昌等<sup>[21]</sup>基于颗粒流计算软件,从细观角度解释了砂土体中盾构隧道掌子面失稳机理;高健等<sup>[22]</sup>通过FLAC 3D软件建立了三维流-固耦合计算模型;朱伟等<sup>[23]</sup>研究了砂土隧道掘进中掌子面支护应力控制与掌子面稳定之间关系;邓稀肥<sup>[24]</sup>也利用FLAC 3D软件,研究了富水流砂底层下穿立交桥隧道的开挖过程。

综上所述,在隧道掌子面稳定性分析数值计算方面,国内外学者提出了许多有意义与价值的计算模型。但已有的文献中对上覆富水软弱砂层这种不良地质条件下隧道掌子面的变形特征研究还相对较少。同时,在现有模型中也缺少对上覆富水砂层位置以及隔水层厚度对隧道掌子面稳定性的影响研究工作。鉴于此,本文采用FLAC 3D数值模拟软件对不同富水砂层厚度与隔水层厚度条件下隧道掌子面位移量、塑性区变化特征进行研究分析,并引入位移释放系数和应力释放率两参数来表征围岩与掌子面在隧道开挖过程中的影响关系,研究结果以期能为该不良地质条件下隧道安全施工提供一定的指导。

# 1 工程概况

青岛地铁 M2 号线是连接青岛与黄岛的一条骨干线路,全长 25.197 km 均为地下线,是一条典型的沿海线路,如图 1 所示。

啤酒城站—苗岭路站为左右分修的两条并行

单线单洞地下区间,左线隧道长度 720.20 m,右线隧道长度 745.54 m,线路间距 15.0~17.0 m。本区间结构底板埋深约 15.0~25.0 m,结构拱顶埋深约 8.90~18.90 m,轨顶标高为 -10.57~-18.69~-5.98 m(小里程~大里程)。其中,砂层地段地下水丰富,有着与其它地区不同的地方,开挖扰动后,极易发生涌水、涌砂、掌子面坍塌等工程事故。

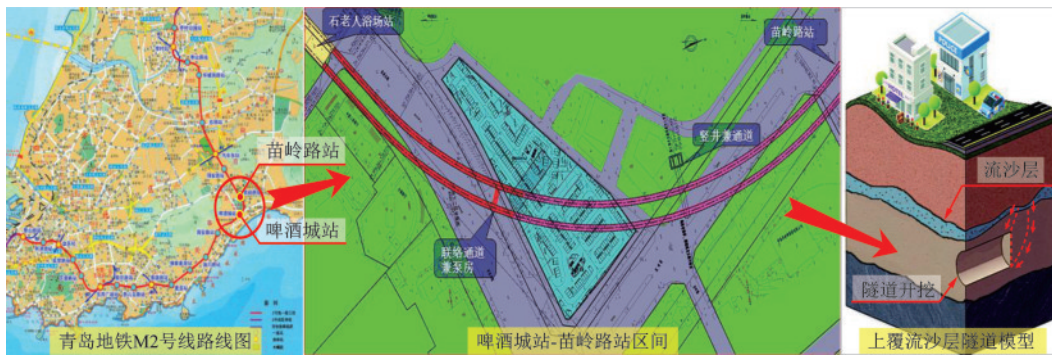


图 1 啤-苗区间位置及上覆富水砂层隧道示意

Fig.1 The diagram of Pi-Miao interval and overlying water-rich sand layer tunnel

# 2 富水砂层隧道掌子面变形特征

## 2.1 计算模型的选择与建立

因计算模型隧道为三心拱形,且左右对称,并考虑边界效应,数值计算采用的模型尺寸为 40 m×40 m×30 m(长×宽×厚)的长方体,根据计算结果的分析,选六面体为计算单元,隧道轴向方向单元尺寸取 1.0 m,隧道周边单元尺寸 0.25 m。

并作以下假设:

- (1)材料采用莫尔-库仑准则模型计算;
- (2)假定地表和各土层均成均质水平分布;
- (3)开挖步长为 2.0 m,共开挖 20 m,每步开挖后施加混凝土衬砌,弹模 30 GPa,厚度 0.3 m,泊松比 0.2;

(4)地层和材料的应力应变均在弹塑性范围内变化,地应力场由重力自动生成;

(5)不考虑地表建筑物荷载和地下水因素。

模型厚度 30 m,开挖 20 m,取开挖中间断面为监测断面,开挖进尺 2.0 m,隧道断面和开挖过程见图 2。

## 2.2 数值模型的建立

考虑不同水平因素对隧道掌子面变形破坏影响,计算模型以隔水层厚度  $H$ (富水砂层距隧道顶板

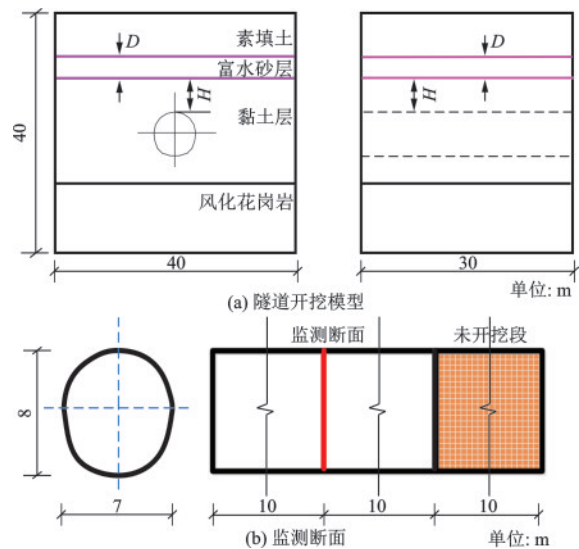


图 2 隧道模型及监测断面布置

Fig.2 Tunnel model and monitoring section layout

距离)和富水砂层厚度  $D$  为变量,设计了 4×4 共 16 组数值计算模型,见表 1。通过现场土层取样分析,该区间段上覆砂层下的粉质黏土层(即开挖层)常温常压下渗透性较小,透水性能较差,通过变水头渗透试验实测渗透系数  $1.48 \times 10^{-6}$ ,为极弱透水层,可视为隔水层,为突出问题核心,暂不考虑缓慢渗流作用。各岩土层结合实际参数(见表 2)与理论论证选取模拟试验参数,以工况 c2 为例建立的数值计算模型如图 3 所示。

表1 16种数值模拟工况参数

厚度距离	D=0.5 m	D=1.0 m	D=2.0 m	D=3.0 m
H=1.0 m	a1	a2	a3	a4
H=2.0 m	b1	b2	b3	b4
H=3.0 m	c1	c2	c3	c4
H=4.0 m	d1	d2	d3	d4

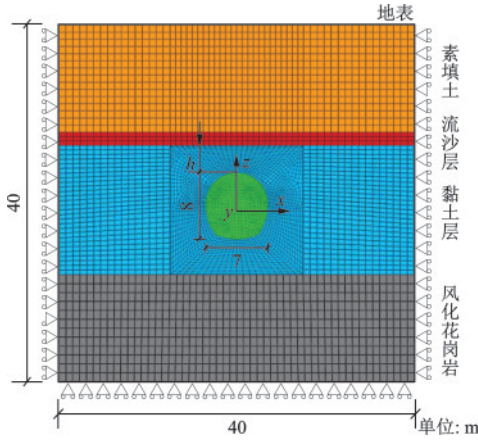


图3 c2工况数值模型及边界条件示意

Fig.3 Boundary conditions and model schematic drawing of c2 numerical model

表2 各岩土层物理力学参数

名称	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模 量/MPa	内摩擦 角/( $^\circ$ )	黏聚力/ MPa	抗拉强 度/kPa
素填土	1 320	47	21	1.6	1 120
富水砂层	1 100	6.4	15	0	0
黏土层	1 530	52	30	2.5	2 380
风化花岗岩	2 300	132	33	5.7	3 470

方案 a1-d4 数值试验结果统计如下(图 4~图 6),其中塑性区范围指通过塑性区体积换算得到的用半径表示的围岩产生塑性破坏的范围大小。图 4 为 16 种工况隧道掌子面位移计算结果统计曲线,由图 4 可知:

(1) 16 种工况隧道开挖过程中掌子面最大挤出变形量呈螺旋上升趋势,即隔水层厚度  $H$  越大和富水砂层厚度  $D$  越小,掌子面变形量越小,隧道施工越安全。

(2) 掌子面挤出变形量最大工况为 a4 ( $D=3.0\text{ m}, H=1.0\text{ m}$ ),最小变形工况为 d1 ( $D=0.5\text{ m}, H=3.0\text{ m}$ );

(3) 隔水层厚度  $H$  一定时,掌子面挤出变形量随着富水砂层厚度的增加而增大,曲线斜率增大,且当  $D=3.0\text{ m}$  时,变形出现收敛趋势;

(4) 富水砂层厚度  $D$  一定时,如图中蓝线指示,

掌子面挤出变形量随着富水砂层对隧道距离的增加呈现减小趋势;

由图 5 各工况塑性区计算结果可知:

(1) 从塑性区分布情况可以看出,工况 a4 ( $H=1.0\text{ m}, D=3.0\text{ m}$ ) 的塑性区面积最大, d1 ( $H=4.0\text{ m}, D=0.5\text{ m}$ ) 塑性区面积分布最小,工况 a4、a3、b4、a1 掌子面塑性区联通并贯穿富水砂层;

(2) 可以看出隔水层厚度  $H$  越小,同时富水砂层厚度  $D$  越大时塑性区面积越大,越容易造成塑性区发育同富水砂层联通。

(3) 通过与图 4 掌子面位移量统计图相对比,发现处于临界状态的工况掌子面挤出量均处 68~70 mm 之间,塑性区贯通流砂层工况掌子面挤出量均大于 70 mm,因此在实际开挖过程中一旦掌子面挤出量超过 70 mm,极有可能会发生涌水涌砂事故。

(4) 从 a1~a4 工况全为危险等级可知,富水砂层距离隧道的隔水层厚度  $H$  是影响掌子面是否发生涌水涌砂的最主要因素,因此在开挖过程中应时刻注意富水砂层距离隧道的安全距离,一旦小于 3.0 m 时,应立刻停止掘进,采用超前预注浆加固等工程技术措施。由于篇幅有限,仅列出了 a1、b2、c3、d4 等 4 种工况的隧道掌子面位移、应力云图及塑性区分布范围,如图 6 所示。

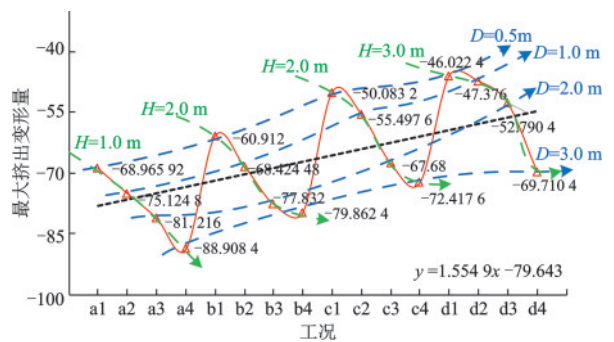


图4 隧道掌子面最大挤出变形量计算结果

Fig.4 Maximum extrusion deformation calculation results of tunnel excavation face

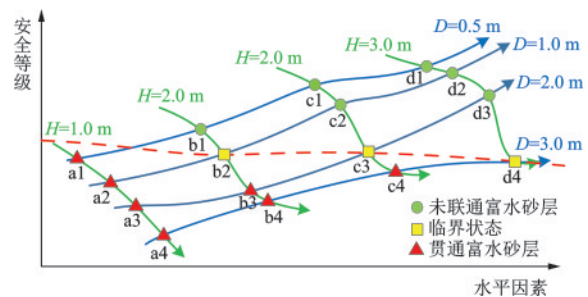


图5 根据塑性区与富水砂层关系划分的安全等级

Fig.5 Safety grade divided according to the relationship between plastic zone and water-rich sand layer

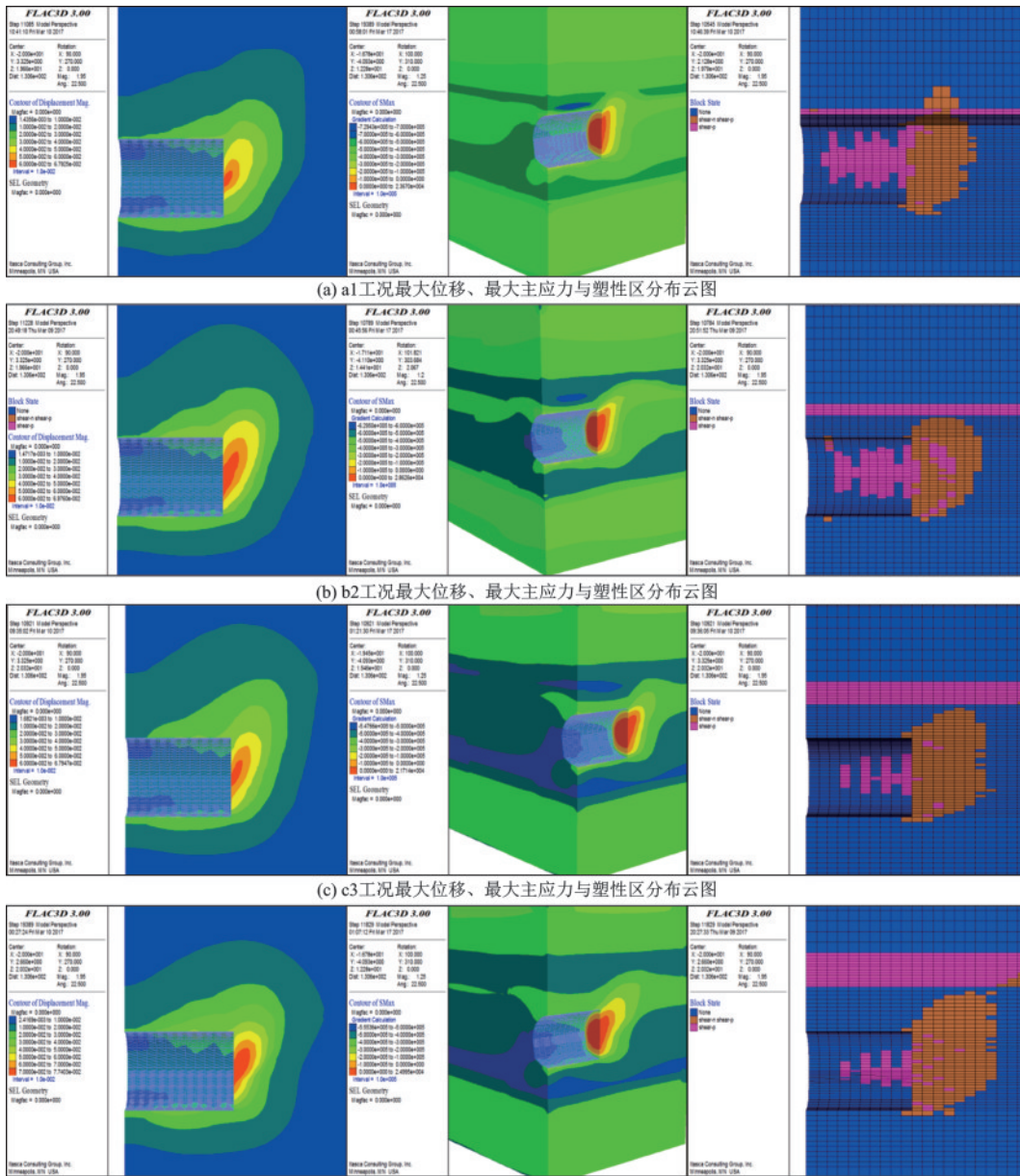


图6 部分工况数值试验计算结果云图

Fig.6 Numerical test results of computational cloud images about part engineering conditions

### 3 隧道掌子面空间变形特征分析

为进一步研究上覆富水砂层隧道掌子面变形失稳特征,探索围岩与掌子面空间变形规律,取临界工况 c3 为研究对象,通过对拱顶和掌子面分别沿开挖空间方向的应力和位移数据进行处理,开挖到监测断面空间位移、应力监测结果如图 7、图 8 所示。

由隧道掌子面的位移变化曲线可知,在开挖到目标掌子面前位移变化趋势由小到大,曲线斜率绝对值成幂函数形式递增,直到目标断面。这是由于掌

子面前方核心土体在开挖过程中的受力改变导致,如图 9,掌子面前方土体在暴露之前,在隧道开挖方向前后受到土体的压力是基本平衡的,即:

$$P1(y, z) \approx P0(y, z) \quad (1)$$

式中,  $P1$  略小于  $P0$ , 两者差值由围岩土体产生的剪切应力弥补, 开挖后隧道掌子面原来的前方的核心土体变成了临空面, 隧道掌子面周围的围岩失去了径向支撑力。当开挖完土体 A 到达目标断面时, 此时  $P1$  随之减小消失, 而右侧的土压力  $P0$  仍然存在, 因此掌子面变会发生剪切变形, 增大其自身的剪应力从而抵消右侧仍然存在的土压力  $P0$ 。

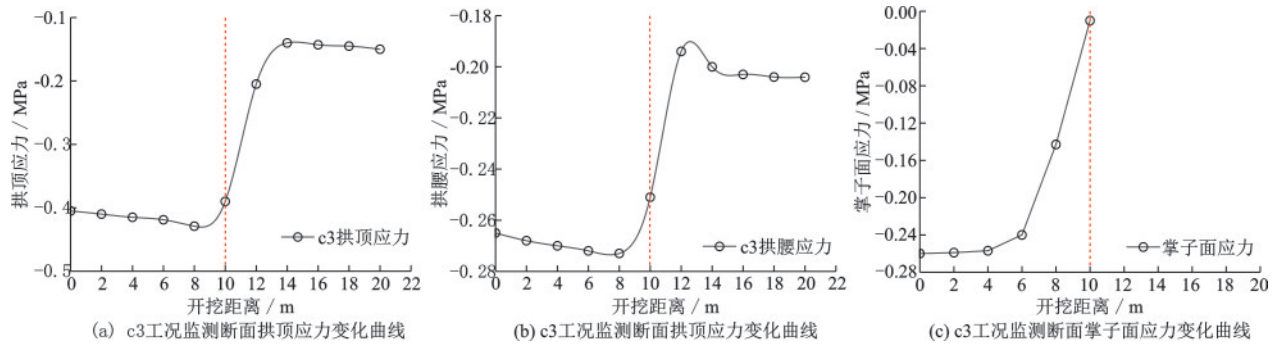


图7 c3工况监测断面不同部位应力变化曲线

Fig.7 Stress change curves at different parts of the monitored section under c3 condition

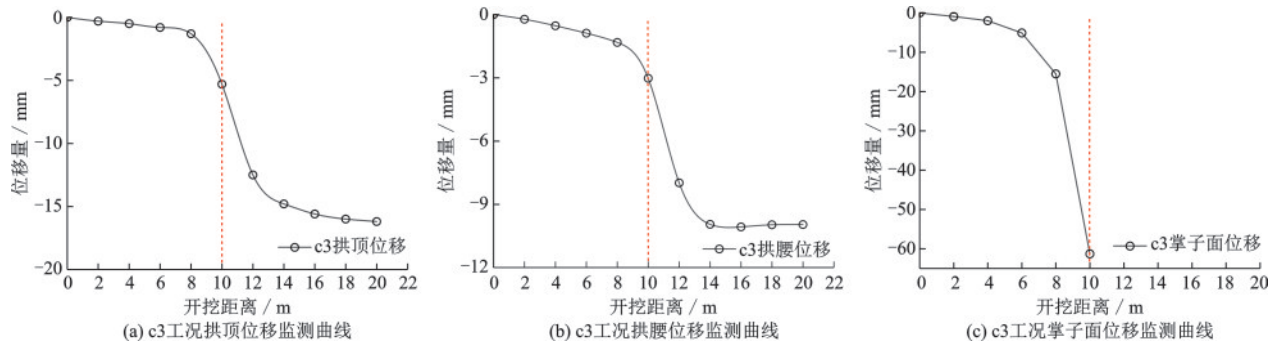


图8 c3工况监测断面不同部位位移变化曲线

Fig.8 Displacement curves of different parts of the monitored section under c3 condition

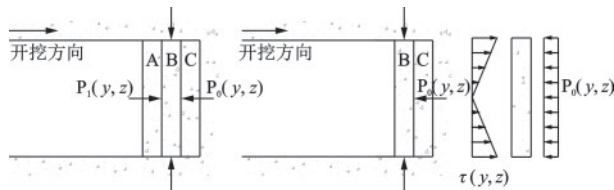


图9 开挖前后掌子面核心土受力状态分析

Fig.9 Stress state analysis of core soil before and after excavation

综上所述,由拱顶与拱腰位置的位移压力变化对比可知,拱顶部位下沉变形量大于拱腰部位水平变形量,这是由于隧道掌子面开挖后拱部土体在受到自重应力场的作用向洞内下沉,而两侧部位的土体受到剪切挤压的作用,迫使拱腰在开挖过程中发生向围岩深部的变形,因施加衬砌围压变形受到约束,围岩变形均小于掌子面挤出变形,因此隧道掌子面在施工时应采取一定的超前预加固措施,使掌子面处于受力平衡状态,保证掌子面的稳定。

为进一步研究和分析掌子面挤出变形与围岩变形的内在联系,引入应力释放率和位移释放系数,对上覆富水砂层条件下隧道开挖过程中空间变形特征和失稳变形机制进行深入分析。

应力释放率指围岩应力在开挖过程中某监测

点在某阶段的变化值与围岩应力开挖前初始值的比值,主要研究某一个测点的围岩应力演变过程,测点的围岩应力释放率 $\gamma$ 表达式为:

$$\gamma = \frac{\Delta\sigma_x}{\sigma_0} \quad (2)$$

式中, $\Delta\sigma_x$ 为测点开挖中某阶段应力增量; $\sigma_0$ 为测点收敛值。

位移释放系数指围岩内测点在开挖过程中某阶段的位移数值与该点在开挖达到稳定状态后位移的比值,主要研究某一个测点的围岩位移演变过程。测点的位移释放系数 $\delta$ 表达式为:

$$\delta = \frac{\mu_x}{\mu_0} \quad (3)$$

式中, $\mu_x$ 为测点开挖中某阶段位移值; $\mu_0$ 为测点稳定后收敛值。

对图10、图11为同一断面开挖过程中围岩应力释放率和位移释放系数的分析比较,可以发现隧道围岩和掌子面变形规律主要受到隧道开挖扰动的影响,拱顶和拱腰位置变形虽然在数值上有所差异但在变化率方面差别不大,而拱心位置挤出变形与围岩变形速率存在明显的差异;掌子面的应力和位移变形速率均提前且大于同断面拱顶和拱腰的变

形速率,并且随着掌子面的变形释放速率增大,拱腰拱顶的变形释放速率也随之增大;当掌子面开挖到目标断面之前,掌子面的应力释放率和位移释放系数不断加快增大,未出现速率减小趋势,而拱腰和拱顶处的变形速率则在开挖后逐渐趋向稳定。

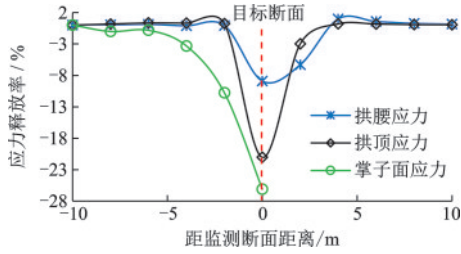


图10 开挖过程中拱顶-拱腰-掌子面应力释放系数对比曲线  
Fig.10 The vault-haunch-face stress release coefficient contrast curve in the process of the excavation

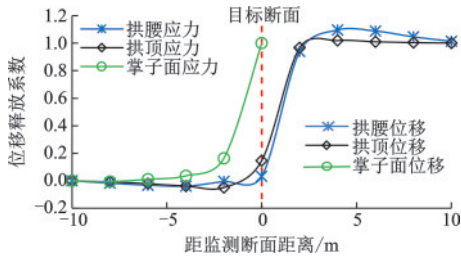


图11 开挖过程中拱顶-拱腰-掌子面位移释放率对比曲线  
Fig.11 The vault-haunch-face displacement release rate coefficient contrast curve in the process of the excavation

为进一步探究掌子面与围岩变形关系和规律,采用双曲正切函数对试验数据进行拟合。

$$C(n) = \frac{C_0}{2} [\tanh(an - b) + 1] \quad (4)$$

式中, $C$ 为释放率或释放系数; $n=L/D$ , $L$ 为到目标断面的开挖距离, $D$ 为隧道洞径; $C_0$ 、 $a$ 、 $b$ 为参数。公式满足三个条件:(1) $n \rightarrow -\infty$ 时, $C=0$ ;(2) $n \rightarrow +\infty$ 时, $C=C_0$ ;(3) $n=b/a$ 时, $C=C_0/2$ ,其中 $C_0$ 为隧道最终释放率或释放系数。

首先对拱顶-拱腰应力与位移释放曲线进行拟合,并对经验公式进行一次和二次求导可得:

$$C(n)' = \frac{aC_0}{2} \sec[h^2(an - b)] \quad (5)$$

$$C(n)'' = -a^2C_0 \sec[h^2(an - b)] \tan(an - b) \quad (6)$$

因式中 $\sec[h(\chi)]$ 为双曲正割函数,一次导数恒大于0,故函数 $C(n)$ 在定义域内单调递增,且当 $n=b/a$ 时, $C(n)''=0$ ,即此时的 $n$ 为函数 $C(n)$ 的拐点,表明该点处的应力位移变化量显著。

由图12、图13应力释放系数与位移释放率拟合曲线可知,曲线拐点均发生在目标断面开挖后,表明在开挖到目标断面时围岩的最显著变化还未发生。

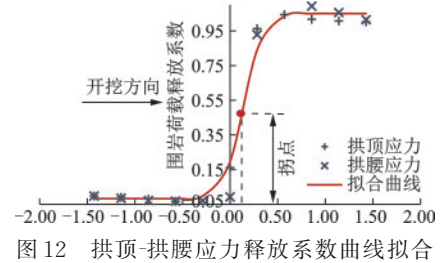


图12 拱顶-拱腰应力释放系数曲线拟合  
Fig.12 Curve fitting of stress releasing coefficient in vault-haunch region

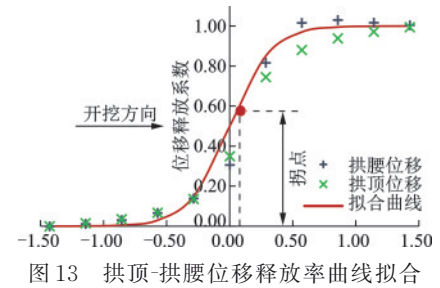


图13 拱顶-拱腰位移释放率曲线拟合  
Fig.13 Curve fitting of displacement release rate in vault-haunch region

因无法获得掌子面开挖到目标断面后数据,将经验公式中的 $C_0$ 设为未知数,得到掌子面变化拟合曲线如图14、图15所示。掌子面的应力释放率和位移释放系数的拐点均在目标断面之前,即表明在开挖到目标断面前,掌子面的最显著变化已经发生,且反推出的掌子面的应力释放率和位移释放系数约是围岩的1.4倍,进一步验证了掌子面的变形应作为监测的首选敏感指标。

经验公式全部为无量纲化参数,由表3可知,拟合相关系数均在0.95以上,拟合曲线能够较合理的反映试验数据。

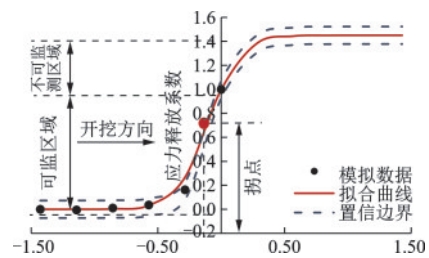


图14 掌子面应力释放系数曲线拟合  
Fig.14 Curve fitting of stress releasing coefficient in excavation face

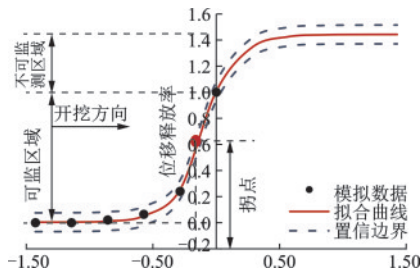


图15 掌子面位移释放率曲线拟合

Fig.15 Curve fitting of displacement release rate in excavation face

表3 各曲线数据拟合参数与相关系数

Table 3 The data curve fitting parameters and the correlation coefficient

曲线	$C_0$	$a$	$b$	相关系数
围岩-应力	1.0	4.9	0.69	0.97
围岩-位移	1.0	2.6	0.34	0.96
掌子面应力	1.425	1.8	-0.41	0.99
掌子面位移	1.412	2.2	-0.38	0.99

## 4 结 论

(1) 以典型上覆富水砂层隧道青岛地铁2号线啤一苗区间为工程背景,以富水砂层厚度与隔水层厚度为变量,采用FLAC 3D数值计算软件,建立了16种对比计算模型,对隧道掌子面位移量、塑性区变化特征进行了研究分析。结果表明:隔水层厚度越大、富水砂层厚度越小掌子面变形越小,隔水层厚度是影响掌子面是否发生涌水涌砂的主控因素;在实际开挖过程中一旦掌子面挤出量超过70 mm,极有可能会发生涌水涌砂事故。同时,在开挖过程中应时刻注意富水砂层距离隧道的安全距离,一旦小于3 m时,应立刻停止掘进,可利用超前注浆加固的方式,对隔水层土体和富水砂层进行注浆,以提高隔水层土体强度参数和增大富水砂层距离隧道的安全距离,增强掌子面稳定性,确保掌子面的安全开挖。

(2) 通过分析开挖过程中隧道拱顶—拱腰—掌子面应力和位移变形规律,发现在隧道开挖过程中掌子面挤出变形的变化速率均提前且大于同一断面拱顶、拱腰的变形速率,同时由经验公式拟合得到了围岩最大变形发生在开挖到目标断面之后,而掌子面则发生在开挖到目标断面之前的重要结论,因此掌子面的变形监测应作为施工时监测的首选敏感指标。

## 参考文献:

[1] 李术才,刘斌,孙怀凤,等.隧道施工超前地质预报研究

现状及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113.

Li S C, Liu B, Sun H F, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (6): 1090-1113. (in Chinese)

[2] 方江华,姜平伟,郭朋亮,等.富水砂层大断面暗挖隧道施工地层演化[J].科学技术与工程,2021,21(20):8621-8628.

Fang J H, Jiang P W, Guo P L, et al. Stratum evolution of large section underground tunnel construction in water-rich sand stratum [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21 (20): 8621-8628. (in Chinese)

[3] 吕玺琳,赵庚成,蔡剑韬.盾构隧道施工扰动诱发富水砂层地陷变形数值模拟[J].现代隧道技术,2020,57(5):104-109.

Lyu X L, Zhao Y C, Cai J T. Numerical simulation of ground subsidence induced by shield tunnel construction disturbance in water-rich sandy stratum [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57 (5): 104-109. (in Chinese)

[4] 李利平,成帅,张延欢,等.地下工程安全建设面临的机遇与挑战[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(4):1-13.

Li L P, Cheng S, Zhang Y H, et al. Opportunities and challenges of construction safety in underground engineering projects [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 39 (4): 1-13. (in Chinese)

[5] 刘鹏,赵程.咸水环境下泥水盾构泥浆配比试验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2021,40(3):50-57.

Liu P, Zhao C. Experimental study on slurry mixing proportion in salt water by slurry shield [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2021, 40 (3): 50-57. (in Chinese)

[6] 蒋加兵,陈子龙,徐涛.饱和砂层泥水平衡盾构隧道开挖面稳定研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2021,40(2):95-100.

Jiang J B, Chen Z L, Xu T. Excavation Face stability of slurry shield tunnel in saturated sand layer [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40 (2): 95-100. (in Chinese)

[7] 刘平,刘池,王洪涛,等.富水砂层影响下隧道围岩变形破坏机制的数值模拟研究[J].现代隧道技术,2020,57(4):74-81.

Liu P, Liu C, Wang H T, et al. Numerical simulation study on the deformation and failure mechanism of tunnel surrounding rock under the effect of water-rich sand layer [J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57 (4): 74-81. (in Chinese)

[8] 李清川,李术才,王汉鹏,等.上覆流沙层隧道开挖面稳定性分析与数值试验研究[J].岩土力学,2018,39(7):2681-2690.

- Li Q C, Li S C, Wang H P, et al. Stability analysis and numerical experiment study of excavation face for tunnels overlaid by quicksand stratum [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39 (7): 2681-2690. (in Chinese)
- [9] 蔡武强,梁文灏,朱合华. 深埋岩体隧道开挖面三维非线性挤出效应分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2021, 40 (9): 1868-1883.
- Cai W Q, Liang W H, Zhu H H. Three-dimensional and nonlinear face extrusion effects of deep-buried rock tunnels under excavation unloading[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40 (9): 1868-1883. (in Chinese)
- [10] 袁帅,冯德旺. 考虑渗透系数各向异性的盾构隧道开挖面稳定性数值极限分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2020, 48 (12): 1717-1725.
- Yuan S, Feng D W. Computational limit analysis of shield tunnel face with a consideration of permeability anisotropy [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2020, 48 (12): 1717-1725. (in Chinese)
- [11] 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.
- Xiao P F, Feng G F, Jia S D, 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. (in Chinese)
- [12] 郑永来,冯立坡,邓树新,等. 高压水条件下盾构隧道开挖面极限上限法研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41 (8): 1179-1184.
- Zheng Y L, Feng L P, Deng S X, et al. Study on upper-bound limit method of face stability of shield tunnel with high-water pressure [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41 (8): 1179-1184. (in Chinese)
- [13] 黄俊,党发宁,周磊,等. 利用变分法探索地震作用隧道掌子面破坏形式[J]. *岩土工程学报*, 2015, 37 (10): 1844-1855.
- Huang J, Dang F N, Zhou L, et al. Exploration of face failure curve under earthquakes using calculus of variations [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37(10): 1844-1855. (in Chinese)
- [14] 郑颖人,邱陈瑜,张红,等. 关于土体隧洞围岩稳定性分析方法的探索[J]. *岩石力学与工程学报*, 2008, 27 (10): 1968-1980.
- Zheng Y R, Qiu C Y, Zhang H, et al. Exploration of stability analysis methods for surrounding rocks of soil tunnel [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27 (10): 1968-1980. (in Chinese)
- [15] Swobocia G, Mansour M. Three dimension numerical modelling of slurry shield tunnelling [C]// In Wanger, H, Schuler, A. *Tunnel Boring Machines*. Rotterdam: Balkema, 1996: 27-41.
- [16] Baumann, Stemath, Schwarz, J. Face Stability of Tunnels in Soft Rock-Possibilities' for the Computational Analysis [C]// *Proceedings 14 International Conference Soil Mechanic and Foundation Edgineeing*, Hamburg, Rotterdam, Balkema, 1997, 3: 1389-1392.
- [17] de Buhan P, Cuvillier A, Dormieux L, et al. Face stability of shallow circular tunnel driven under the water table: A numerical analysis [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 1999, 23 (1): 79-95.
- [18] Konishi S. Evaluation of tunnel face stability by rigid plasticity finite element method [J]. *Railway Technology Advantage*, 2004, 5: 29-29
- [19] Manuel J. MelisMaynar, Luis E. Medina rodriguez discrete numerical model for analysis of earth pressure balance tunnel excavation [J]. *Journal of Geotechnical and Geocnvironmental Engineering*, 2005, 131(10): 1234-1242
- [20] 赵永众. 引洮 7# 隧洞 TBM 开挖与管片衬砌支护过程的三维数值分析 [J]. *河南城建学院学报*, 2015, 24(5): 30-35.
- Zhao Y Z. Yintao 7# tunnel TBM excavation and segment lining and supporting process three-dimensional numerical analysis [J]. *Journal of Pingdingshan Institute of Technology*, 2015, 24 (5): 30-35. (in Chinese)
- [21] 缪林昌,王正兴,石文博. 砂土盾构隧道掘进开挖面稳定理论与颗粒流模拟研究 [J]. *岩土工程学报*, 2015, 37 (1): 98-104.
- Miu L C, Wang Z X, Shi W B. Theoretical numerical simulations of face stability around shield tunnels in sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, 37 (1): 98-104. (in Chinese)
- [22] 高健,张义同,乔金丽. 渗透力对隧道开挖面稳定性影响分析 [J]. *岩土工程学报*, 2009, 31 (10): 1547-1553.
- Gao J, Zhang Y T, Qiao J L. Face stability analysis of tunnels with consideration of seepage force [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31 (10): 1547-1553. (in Chinese)
- [23] 朱伟,秦建设,卢廷浩. 砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究 [J]. *岩土工程学报*, 2005, 27 (8): 897-902.
- Zhu W, Qin J S, Lu T H. Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2005, 27(8): 897-902. (in Chinese)
- [24] 邓稀肥. 富水流砂地层下穿立交桥隧道围岩变形控制技术研究 [D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- Deng X F. A study on rock deformation control of a tunnel under passing flyover bridges in rich water and shifting sand strata [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011. (in Chinese)

(本文编辑:苏泽云)