

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2020.02.015

泥水盾构带压开舱时压力舱内不同泥浆液位下 开挖面稳定性分析*

俞超杰^{1,2}, 陈健^{3,4}, 陈胜⁵, 闵凡路^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098; 3. 中国海洋大学环境科学与工程学院, 山东青岛 266100; 4. 中铁十四局集团有限公司, 山东济南 250014; 5. 江苏省岩土工程公司, 江苏南京 210009)

摘要: 泥水盾构在水下复杂地层带压开舱作业时, 一般会根据实际情况将压力舱内泥浆降低至一定的液位。依托武汉地铁8号线越江隧道工程带压开舱作业实例, 采用FLAC^{3D}软件, 对不同泥浆液位下盾构隧道开挖面主被动极限支护力及失稳破坏模式进行研究。结果表明: 对于本工程上土下岩的复合地层带压开舱工况而言, 不同泥浆液位下开挖面主动破坏均属于整体失稳破坏, 且随着泥浆液位的降低, 主动极限支护力先增后减, 开挖面敏感区域逐渐下移并扩大, 液位下降至隧道中心处时主动极限支护力最小; 不同泥浆液位下开挖面的被动破坏均属于局部失稳破坏, 被动极限支护力呈逐渐降低的趋势, 最敏感区域均位于开挖面上半部; 当泥浆液位降低至隧道中心以下时, 隧道拱顶处支护力显著大于地层土水压力, 此时开挖面面临较严峻的被动失稳风险, 因此实际施工时不建议液位下降至隧道中心以下。

关键词: 泥水盾构; 带压开舱; 泥浆液位; 开挖面稳定性; 极限支护力

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2020)02-0251-09

Stability Analysis on Excavation Face at Different Slurry Levels When Chamber opens under Pressure in Slurry Shield

YU Chaojie^{1,2}, CHEN Jian^{3,4}, CHEN Sheng⁵, MIN Fanlu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Ministry of Education, Nanjing 210098, China; 2. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 4. China Railway 14th Construction Bureau Co., Ltd., Jinan 250014, China; 5. Geotechnical Engineering Company of Jiangsu Province, Nanjing 210009, China)

Abstract: When the chamber of slurry shield is opened under pressure in complex strata below water, the slurry level in the pressure chamber generally reduces to a certain level according to the practical situation. Focusing on the stability of excavation face at different slurry levels, relying on the example of opening operation under pressure of Wuhan Metro Line 8 cross-river tunnel project, the Flac3D software was used to study the active and passive ultimate support force and failure mode of the excavation face at different slurry levels. The results show that, as in the case of the opening operation under pressure in soil-rock composite strata, the active failure of the excavation face at different slurry

* 收稿日期:2019-03-11;修回日期:2019-04-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51778213);中央高校基本科研业务费专项资金(B200202073)资助

作者简介:俞超杰(1995-),男,硕士研究生。主要从事盾构隧道设计方面的研究。Email: hhucj@126.com

levels belongs to overall instability failure. With the decrease of the slurry level, the limit active support force first increases and then decreases and the sensitive area on the excavation face gradually moves down and expands. The limit active support force reaches the minimum as the level drops to the center of the tunnel. Passive failure of the excavation face at different slurry levels belongs to local instability failure. The passive limit support force gradually decreases. Most sensitive area is located on the up half part of the excavation face. When the slurry level descends to below the center of the tunnel, the support force at the tunnel crest is significantly greater than the water and earth pressure. At this time, the excavation face encounters a severe risk of passive instability. Therefore, a slurry level below the center of the tunnel is not recommended during practical construction

Keywords: slurry shield; open the chamber under pressure; slurry level; excavation face stability; limit support force

引 言

在泥水盾构技术发展过程中,开挖面稳定性问题一直是业内最为关注的重点之一^[1-3]。开挖面的稳定需要设置合理的支护压力,支护应力过小或过大均会导致开挖面的失稳及土层变形过大,从而引发安全事故^[4-5]。泥水盾构在带压开舱施工时需根据待修复或更换刀具的位置而下降不同的泥浆液位^[6-7],其支护压力的设定更为复杂,这一工况下开挖面的稳定性目前尚不明确。

目前,采用数值模拟方法研究泥水盾构开挖面稳定性的成果较多。Y. Li等^[8]、徐明等^[9]、李昀等^[10]针对泥浆重度对开挖面稳定性的影响问题,采用FLAC^{3D}软件进行研究,Y. Li等^[8]通过饱和软土工况计算发现由泥浆重度的存在显著改变了开挖面的破坏模式;徐明等^[9]的模拟结果表明泥浆容重使得主动支护应力要比不考虑泥水时大一倍多;李昀等^[10]则提出泥浆重度值对大直径泥水盾构开挖面稳定性影响大于小直径泥水盾构;基于ABAQUS,陈仁朋等^[11]以埋深比及砂土内摩擦角为变量,得到各工况下泥水盾构开挖面被动破坏极限支护力规律;孙潇昊等^[12]采用PFC对不同埋深及地层密度条件下开挖面支护应力变化进行研究,其模拟结果与模型箱试验结果较接近。由以上研究可以看出,目前数值模拟中泥水盾构开挖面稳定性研究主要在单一的软土或者砂性土中开展,且开挖面上支护应力形式主要以考虑泥浆重度的梯形分布与气压式矩形分布为主,并未考虑带压开舱时压力舱内上气下浆的组合支护形式。

武汉地铁8号线越江隧道工程在江中上土下岩复合地层推进过程中,盾构刀具多次发生严重磨损

的情况而不得不停机进行开舱换刀,且由于磨损刀具位置的不同,开舱时需下降不同的泥浆液位,各泥浆液位工况下支护力设定较为复杂。本文以该大直径泥水盾构带压开舱施工为背景,研究带压开舱时不同泥浆液位条件下开挖面极限支护力及失稳破坏模式,为类似工程提供参考。

1 数值模型

1.1 依托工程

武汉地铁8号线越江段隧道位于长江二桥上游约450 m处,连接武汉市江岸区与武昌区,是武汉市第四条越江轨道交通线。隧道全长约3 186 m,采用一台直径为12.51 m的泥水平衡盾构自江南始发并向江北接收井单向掘进,隧道外径12.1 m,是目前国内直径最大的单管双线地铁盾构隧道。隧道沿线穿越地层较为复杂,在长江两岸主要穿越上部软土-下部粉细砂的地层,而在江中地段主要穿越上部为粉细砂层,下部为强风化砾岩及胶结砾岩等的复合地层。

1.2 模型建立

1.2.1 计算断面及参数选取

采用FLAC^{3D}有限差分软件对盾构停机开舱过程进行模拟,计算断面选为隧道第497环处,即江中第一次带压开舱换刀位置,隧道断面穿越约6.05 m粉细砂层和6.05 m强风化砾岩层,该断面具体地层分布如图1所示,各土层物理力学参数见表1。

计算模型选用弹塑性本构,采用Mohr-Coulomb强度准则及相关联的流动法则,用实体单元模拟土体,用shell壳结构单元模拟盾构隧道管片。模型尺寸取为25 m(x 向) \times 50 m(y 向) \times 50 m(z 向),

表1 土层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the soil layers

土层名称	厚度/m	饱和密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	黏聚力/ MPa	渗透系数/ ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
粉细砂	20	1 940	19	0.37	34	0	5.0×10^{-3}
强风化砾岩	10	2 390	172	0.37	45	0	1.0×10^{-6}
弱胶结砾岩	2	2 430	184	0.32	50	8	1.0×10^{-5}
中等胶结砾岩	18	2 600	200	0.26	65	15	1.0×10^{-5}

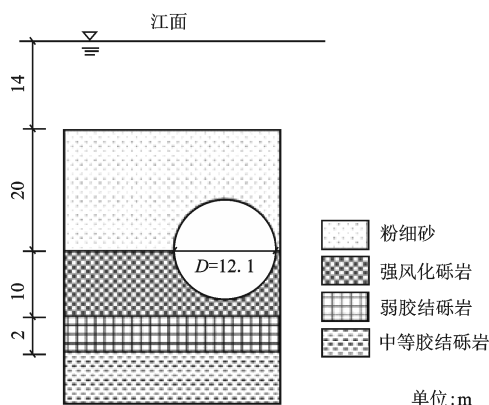


图1 计算断面地层分布

Fig.1 Stratigraphic distribution of the cross section

考虑到盾构隧道开挖土工环境的对称性,取隧道及周围地层的一半进行建模。模型侧面设为位移边界,限制水平位移;底部设为固定边界,限制水平和垂直位移;模型上表面设为自由边界。计算模型如图2所示。

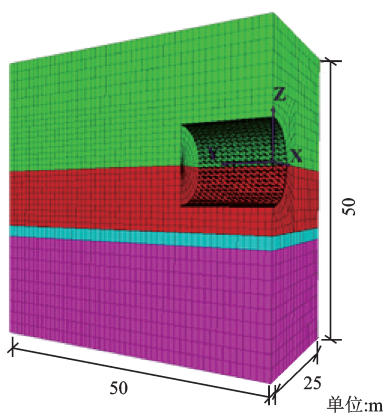


图2 计算模型

Fig.2 Calculation model

1.2.2 支护形式选取

考虑到盾构机 12.1 m 的直径,并结合其他工程开舱实例,本模拟中泥浆液位下降高度以 2 m 为梯度,共设置 7 组支护形式,即各液位下降高度分别为

0、2、4、6.05(隧道中心)、8、10 及 12.1 m(隧道底部)。其中,气压支护形式为矩形,其支护应力大小等于液位下降高度处地层的土水压力;泥浆压力支护形式为梯形,泥浆的密度为 $1.2 \text{ g}/\text{cm}^3$ 。各泥浆液位下的具体支护形式如图 3 所示。

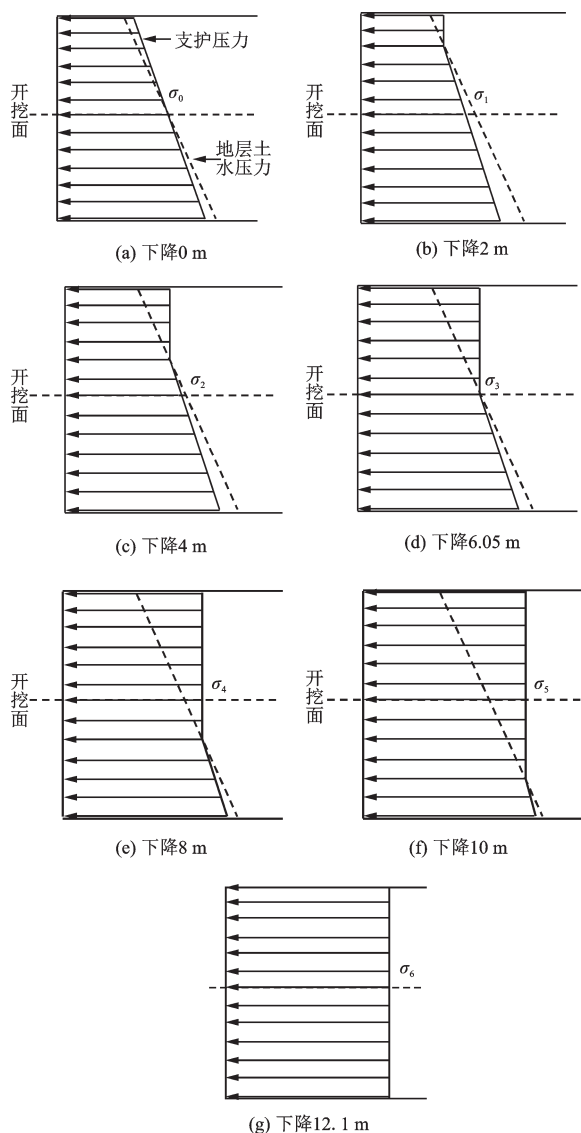


图3 不同泥浆液位下开挖面支护形式

Fig.3 Support forms of excavation face at different slurry levels

1.2.3 破坏准则

选取“支护应力变化很小而某点位移发生急剧变化”这一失稳破坏判断准则,即“双切线法”^[9,12-13]。为方便比较支护应力与前方地层土水应力的关系,引入支护应力比 γ 和位移直径比 δ :

$$\gamma = \frac{\sigma_i}{\sigma_s} \quad (1)$$

$$\delta = \frac{S_y}{D} \quad (2)$$

式中, σ_s 为隧道中心点处的水土压力; σ_i 为各支护形式下隧道中心点处的支护应力($i=0\sim 6$); S_y 为隧道中心点的轴向位移; D 为隧道直径。

1.2.4 模型计算假设

- (1) 一次性掘进 14 m, 即盾构机壳体长度, 忽略多步施工及时间效应引起的土体累计变形;
- (2) 支护压力以面力的形式作用于开挖面上;
- (3) 开挖面并未设置泥膜, 且开挖面闭气性能优良, 未产生气体支护压力的消散。

2 不同液位下主动破坏研究

2.1 主动破坏极限支护力

根据数值计算结果, 将支护应力减小过程中隧道开挖面中心点处的位移提取出来, 分别做各泥浆液位条件下支护应力比与中心点位移直径比的荷载一位移曲线, 以下降 0 m 为例, 如图 4 所示。

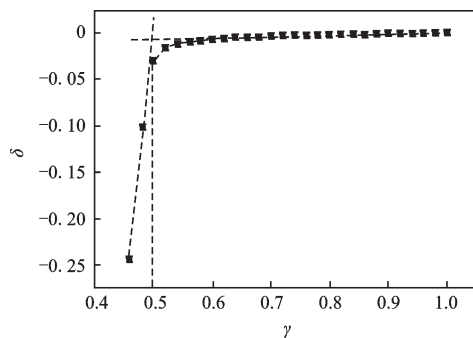


图 4 液位下降 0 m 时主动破坏荷载一位移曲线

Fig.4 Load-displacement curve of active failure at a 0 m declination of the slurry level

由荷载一位移曲线可知, 泥浆液位下降情况下开挖面的主动破坏过程大致分为三个阶段: 第一阶段, 随着支护应力的逐渐减小, 隧道开挖面中心点处的位移缓慢增加, 表明这一阶段开挖面中心点的位移对支护应力变化不敏感, 为“稳定阶段”; 第二

阶段, 此阶段开挖面中心点的位移对支护应力变化较为敏感, 为“屈服阶段”; 第三阶段, 随着支护应力的减小(增大), 隧道开挖面中心点处的位移线性急剧增加, 表明该阶段开挖面已经发生了失稳破坏, 为“破坏阶段”。

将各泥浆液位高度下开挖面主动极限支护比及对应极限支护压力整理见表 2。

表 2 各液位下开挖面主动极限支护比和支护压力

Table 2 Active limit support ratio and support pressure of excavation face at each slurry level

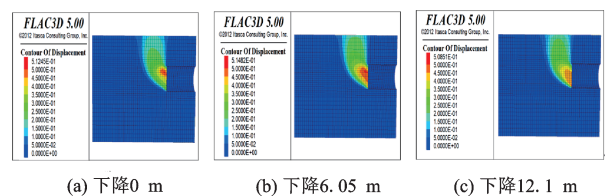
液位下降高度/m	极限支护比	极限支护应力/kPa
0	0.50	261.30
2	0.52	257.30
4	0.50	253.05
6.05	0.47	245.62
8	0.45	248.00
10	0.45	259.20
12.1	0.43	261.65

随着泥浆液位的降低, 各工况下的极限支护比逐渐降低, 对应的极限支护应力呈先减小后增大的趋势, 最小极限支护压力为 245.62 kPa, 约为隧道中心地层水土压力的 0.47 倍, 最大极限支护应力差为 16.5 kPa, 约为 6%, 差异并不大。最小主动极限支护应力发生在隧道中心处, 即液位下降 6.05 m 处, 此处为粉细砂及强风化砾岩层交界处, 说明在闭气压力较小的条件下, 在上土下岩地层分界处进行带压开舱较为安全。

2.2 主动破坏失稳模式

为探求各泥浆液位条件下开挖面的主动破坏失稳模式, 选取下降 0、6.05 及 12.1 m 三种工况下开挖面发生主动破坏时的整体位移云图, 如图 5 所示。

从隧道总体位移云图来看, 发生主动破坏时,



(a) 下降 0 m (b) 下降 6.05 m (c) 下降 12.1 m

图 5 各主动破坏极限支护比下隧道总体位移云图

Fig.5 The overall displacement distribution of the tunnel under each active failure limit support ratio

滑裂面从隧道底部贯通至地表,整个位移云图分布区域均呈“烟囱状”,属于整体失稳破坏。但不同支护应力形式会影响开挖面失稳破坏模式,表现为开挖面上位移最大区域会随开挖面支护形式的不同而发生变化:当液位下降0 m时,开挖面上位移最大的区域集中在隧道上半部,随着液位的下降,位移最大的区域逐渐下移,且范围逐渐扩大,当液位下降12.1 m时,位移最大区域位于隧道中下部。为更直观了解各液位条件下主动破坏过程中开挖面上各点的位移变化,计算中在开挖面轴线上等距布置监测点,各监测点位置及位移变化图如图6所示。

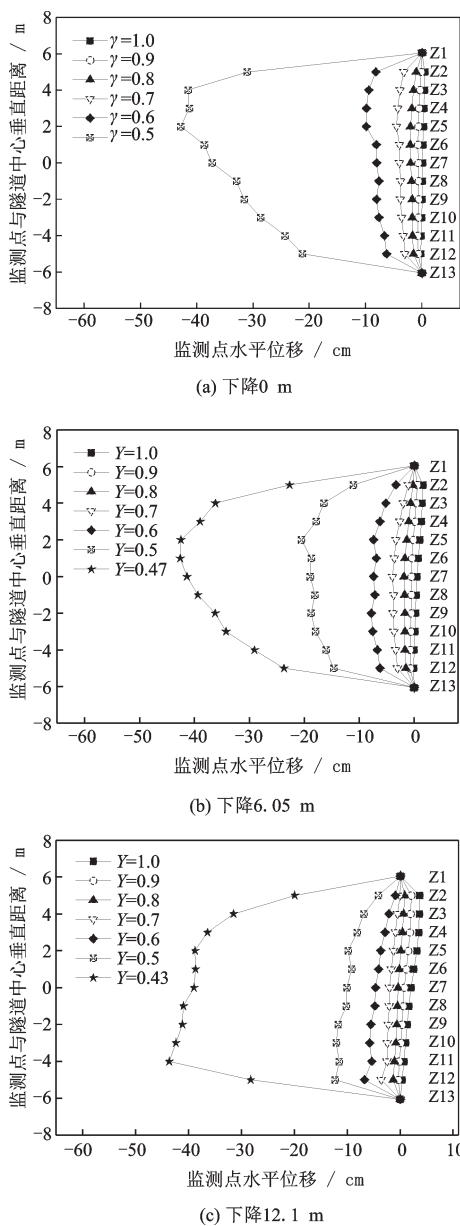


图6 主动破坏过程中开挖面轴线各点位移变化

Fig.6 Displacement change at each point on the axis of the excavation face during the process of active failure

从图6可以看出,在支护应力减小至极限应力的过程中,各工况下开挖面对支护应力减小最敏感的区域不同:当液位下降0 m时,最敏感区域集中于2~4 m处;随着泥浆液位的降低,最敏感区域逐渐下移,且范围逐渐增大,当液位下降至中心处时,最敏感区域处于-1~2 m范围内;而液位下降12.1 m时,最敏感区域则处于-5~2 m。产生这种差异的原因应与各支护形式下应力差(即开挖面所施加的支护应力与地层土水压力之差,下同)最大部分的分布有关:对图3(a)工况,在支护应力比减小过程中,应力差最大部分集中于隧道上部;对(d)工况,应力差最大部分位于隧道中心左右;而对(g)工况而言,应力差最大部分则分布于隧道中下部,且范围增大。同时,在较高的支护比下,随着液位的降低,开挖面各点位移呈降低趋势,这在一定程度上反映了超压对于主动破坏有一定的抑制作用。对于(f,g)两种工况,在小支护应力比下,其位移敏感区域几乎分布于整个隧道断面,施工时应尽量避免该种工况。

2.3 前方地表沉降规律

盾构带压开舱时,前方地层的沉降问题也是值得关注的,有必要了解带压开舱对前方地层的影响范围。为此,数值计算过程在隧道前方地表沿轴线方向等距布置相应监测点,各液位下主动破坏时的计算结果如图7所示。

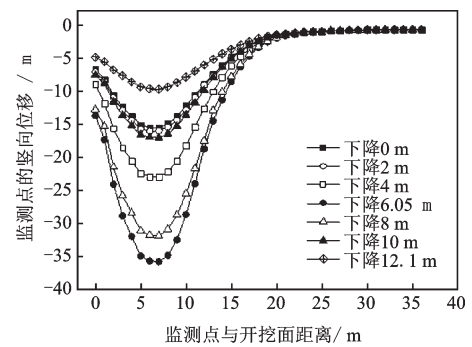


图7 各工况下发生主动破坏时前方地表位移

Fig.7 Displacement of the ahead ground during active failure under each working condition

各泥浆液位条件下发生主动破坏时,开挖面前方地表沉降值均随与开挖面距离的增加而先增大后减小,在开挖面前大致0.5D处达到最大值,2D之外区域几乎无沉降影响,表明当开挖面及前方土体发生主动失稳破坏时,开挖面前方地表影响区域在

2D 范围内。随着泥浆液位的降低,开挖面前方地表沉降呈先增大后减小的趋势,当液位下降至隧道中心点处,即上软下硬地层分界处时,相比其他液位高度,该工况下开挖面前方地层沉降最大,达到约 37 cm。

3 不同液位下被动破坏研究

3.1 被动破坏极限支护力

采用相同方法,求得各泥浆液位下被动破坏极限支护力,以下降 0 m 为例,如图 8 所示。将求得各泥浆液位高度下开挖面被动极限支护比及对应极限支护压力整理见表 3。

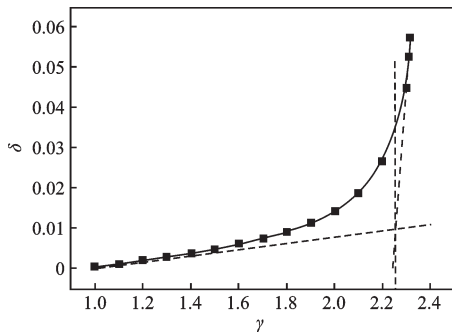


图 8 液位下降 0 m 时被动破坏荷载-位移曲线

Fig.8 Passive failure load-displacement curve at a 0 m declination of the slurry level

表 3 各液位下开挖面被动极限支护比和支护压力

Table 3 Passive limit support ratio and support pressure of excavation face at each slurry level

液位下降高度/m	极限支护比	极限支护应力/kPa
0	2.25	1 175.85
2	2.44	1 207.31
4	2.32	1 174.15
6.05	2.20	1 149.72
8	2.06	1 135.27
10	1.96	1 128.96
12.1	1.85	1 125.73

随着泥浆液位的降低,开挖面总支护应力(应力×面积)逐渐增大,被动破坏极限支护比及对应极限支护应力总体呈降低趋势,最小极限支护压力为 1 125.73 kPa,发生在液位下降 12.1 m 处,最大被动极限支护应力差约为 82 kPa,相差约 7%,说明在大支护应力作用下,小幅度地降低泥浆液位进行开

舱作业较为安全。

3.2 被动破坏失稳模式

同样选取 3 种工况下开挖面发生被动破坏时的整体位移云图,如图 9 所示。

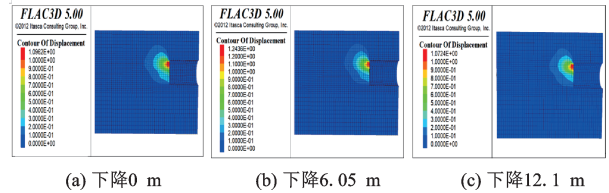


图 9 各被动破坏极限支护比下隧道总体位移云图

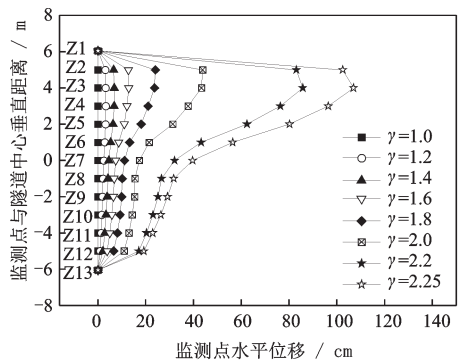
Fig.9 The overall displacement distribution of the tunnel under each passive failure limit support ratio

与主动破坏不同,当开挖面发生被动破坏时,滑裂面并未延伸至地表,应属于局部失稳破坏。同时可以看出,各泥浆液位工况下发生被动破坏时,开挖面位移最大区域主要集中于隧道上半部。为进一步了解被动失稳时开挖面各点的位移变化,对开挖面各点进行监测,如图 10 所示。

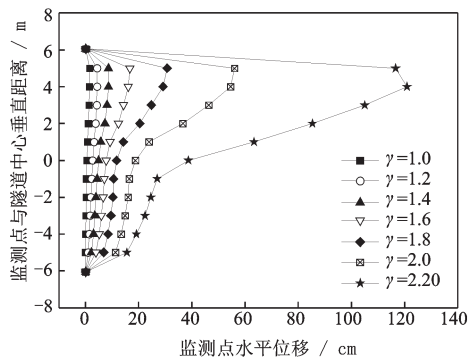
在支护应力比增大过程中,各泥浆液位工况下开挖面对支护应力增大最敏感的区域均位于隧道上半部,最大位移超过 1 m,且均发生在隧道中心以上 4 m 处。在同一支护应力比下,随着泥浆液位的降低,开挖面各点的位移也随之增大,说明超压不利于被动破坏。当液位下降至 12.1 m 时,即图 3 中的(g)工况,隧道下半部地层位移才有所增大,但位移增幅度与上半部相比很小,造成这一现象的主要原因可能有两方面:①对(a~g)各工况而言,开挖面下半部初始状态均处于欠压状态,在支护应力增大的过程中,开挖面下半部压力差其实并不是很大,因此下半部地层位移并不大;②就地层性质而言,开挖面上半部为较软的粉细砂层,在高支护应力下位移较大,而下半部为强风化砾岩,其体积模量及剪切模量均较大,因此对压力增大并不敏感。

3.3 前方地表隆起规律

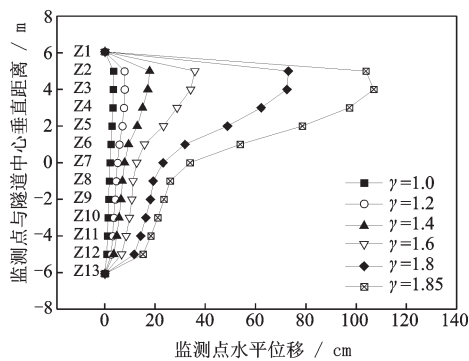
各泥浆液位条件下发生被动破坏时,开挖面前方地表隆起值均随与开挖面距离的增加而先增大后减小(图 11),最大隆起值位于 0.7D~0.9D, 2.5D 之外区域影响效果不显著,表明当开挖面及前方土体发生被动破坏时,开挖面前方地表影响主要区域在 2.5D 范围内。由于被动极限状态为局部失稳破



(a) 下降0 m



(b) 下降6.05 m



(c) 下降12.1 m

图10 被动破坏过程中开挖面轴线各点位移变化

Fig.10 Displacement change at each point on the axis of the excavation face during the process of passive failure

坏,因此地表最大隆起值并不大,处于1~5 cm,与主动破坏不同,被动破坏地表隆起值随液位降低总体呈降低趋势。

4 讨论

(1)相比于小直径盾构,大直径泥水盾构带压开舱时压力舱内气体及泥浆支护压力很难与地层土水压力保持一致,这对支护应力形式的设置提出了更高要求。在实际带压开舱施工时,气体支护应力的选取通常有两种方案:泥浆液位下降处对应的

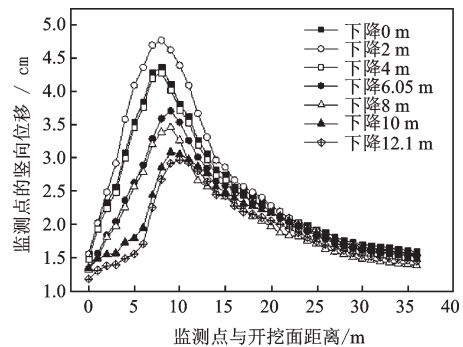


图11 各工况下发生被动破坏时前方地表位移

Fig.11 Displacement of the ahead ground during passive failure under each working condition

地层土水压力或者泥浆压力推算值(即图3(a)工况中梯形分布形式上对应的支护应力值),本模拟中气体支护压力值的选取则基于前者。图12以液位下降4 m及10 m为例,讨论两种方案的差异性。

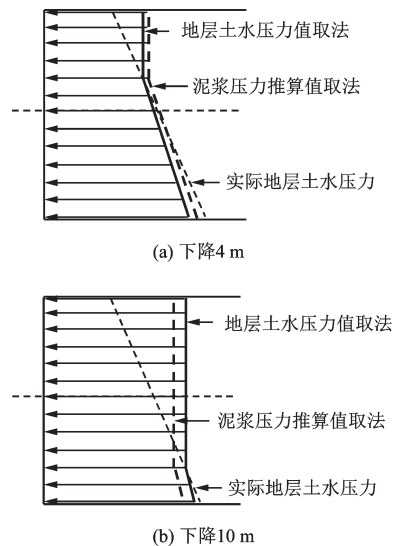


图12 两种支护选取方案比较

Fig.12 Comparison of two pressure support options

从图12可以看出,当泥浆液位处于隧道中心以上时,两种方案下整体支护应力分布形式与地层土水压力相比均较为均衡。就隧道顶部压力差而言,两者分别为79及94 kPa,压力差并不大,处于安全范围内,此时气体支护应力按地层水土压力选取应更为合理;而当液位处于隧道中心以下时,开挖面几乎处于超压状态,此时按泥浆压力推算值得到的开挖面总支护应力较小,选取该方案似乎更为安全。但实际上两种方案的顶部压力差均很大,分别为175和168 kPa,约占顶部地层实际水土压力的43%,面临较大的被动破坏风险。尤其考虑到本工

程隧道上半部为对压力增大很敏感的粉细砂层,根据第三节的计算结果,当发生被动破坏时开挖面最大横向位移超过1 m。因此实际开舱时不建议液位下降至隧道中心以下,若需如此,须特别关注顶部地层气压大小的设置及地层位移情况。同时,本文仅根据地层水土压力值确定气压支护压力,并未计算另一种方案,更为合理的支护压力设置方案有待进一步研究。

(2)虽然液位降低时隧道上部存在较大的被动失稳风险,但对实际泥水盾构带压开舱施工而言,开挖面前方形成的泥膜质量也是不容忽视的^[14]。工程中也曾出现因泥膜质量不良而导致开挖面失稳的险情,如本文依托的武汉地铁8号线工程在江底第一次尝试开舱时就曾发生过泥膜闭气压力过小而导致支护气压击穿泥膜,气体劈裂地层的现象;南京纬三路过江隧道工程在江底进行带压开舱检修时,也曾因前方泥膜质量不佳(图13)而出现气体冲破开挖面导致江底形成巨型坑的险情^[15]。因此,为避免出现气压击穿泥膜而导致开挖面失稳的险情,气体支护压力的设置需综合考虑被动破坏压力及泥膜的闭气性能。



图13 南京纬三路过江隧道开挖面不良泥膜^[15]

Fig.13 Poor quality slurry film on the excavation face in river-crossing tunnel of Weisan Road in Nanjing

5 结 论

(1)根据FLAC^{3D}模拟结果,本工程在江中上土下岩地层进行带压开舱时,各泥浆液位下开挖面的主动破坏极限状态均属于整体失稳破坏,且失稳模式与液位下降高度有关。随着液位下降,失稳最敏感区域逐渐下移,且范围增大,液位下降至隧道中心处时主动极限支护压力最小;各泥浆液位下开挖

面的被动破坏极限状态均属于局部失稳破坏,最敏感区域均位于隧道上半部,被动极限支护力随着泥浆液位的下降而呈降低趋势,最大被动极限支护压力差约为7%。

(2)各泥浆液位下发生主动破坏时,距开挖面0.5D处地表沉降值达到最大,2D之外区域几乎无沉降影响;发生被动破坏时,地表最大隆起值位于0.7D~0.9D,2.5D之外区域隆起影响效果不显著。

(3)泥水盾构进行带压开舱时,隧道上部地层面临险峻的被动失稳风险,尤其对于液位下降至隧道中心以下的工况,上部地层压力差很大,施工风险较高,实际施工时不建议液位下降至中心以下。

(4)为避免出现气压击穿泥膜而导致开挖面失稳的险情,气体支护压力的设置需综合考虑被动破坏压力及泥膜的闭气性能。

参考文献:

- [1] 袁大军,沈翔,刘学彦,等.泥水盾构开挖面稳定性研究[J].中国公路学报,2017,30(8):24-37.
Yuan D J, Shen X, Liu X Y, et al. Research on excavation face stability of slurry tunneling[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(8): 24-37. (in Chinese)
- [2] 金大龙,李兴高.砂土地层盾构隧道开挖面支护压力与地表变形关系模型试验研究[J].现代隧道技术,2015,52(2):44-51.
Jin D L, Li X G. Model test of the relationship between the face support pressure and ground surface deformation of a shield-driven tunnel in sand stratum[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(2): 44-51. (in Chinese)
- [3] Min F L, Zhu W, Lin C, et al. Opening the excavation chamber of the large-diameter size slurry shield: a case study in Nanjing Yangtze River Tunnel in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 46:18.
- [4] 王志良,申林方,谢建斌,等.三维盾构隧道开挖面极限支护压力的上限解[J].防灾减灾工程学报,2015,35(3):348-353.
Wang Zh L, Shen L F, Xie J B, et al. Three-dimensional upper bound solution of limit support pressure during shield tunnelling[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2015, 35(3): 348-353. (in Chinese)
- [5] 张治国,赵其华,白乔木,等.饱和土中考虑衬砌界面排

- 水的浅埋盾构隧道开挖影响分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(9): 1595-1605.
- Zhang Zh G, Zhao Q H, Bai Q M, et al. Excavation influences induced by shallow shield tunnel in saturated soil considering drainage at ground-liner interface [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(9): 1595-1605. (in Chinese)
- [6] 朱伟, 闵凡路, 姚占虎, 等. 盾构隧道开舱技术现状及实例[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(1): 9-18.
- Zhu W, Min F L, Yao Zh H, et al. Status and examples of shield tunneling chamber opening technology [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(1): 9-18. (in Chinese)
- [7] 张宁, 朱伟, 闵凡路, 等. 泥水盾构带压开舱时泥膜的微观孔隙及渗透性研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(3): 495-500.
- Zhang N, Zhu W, Min F L, et al. Microscopic pores of filter membranes and permeability during chamber opening under high pressure in slurry shield [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(3): 495-500. (in Chinese)
- [8] Li Y, Emeriault F, Kastner R, et al. Stability analysis of large slurry shield-driven tunnel in soft clay [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 472.
- [9] 徐明, 邹文浩, 刘瑶. 超大直径泥水盾构在砂土中的开挖面稳定性分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 174-181.
- Xu M, Zou W H, Liu Y. Face stability of large slurry shield-driven tunnel in sands [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 174-181. (in Chinese)
- [10] 李昀, 张子新, 张冠军, 等. 泥水平衡盾构开挖面稳定模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 29(7): 1074-1079.
- Li Y, Zhang Z X, Zhang G J, et al. Laboratory study on face stability mechanism of slurry shields [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 29(7): 1074-1079. (in Chinese)
- [11] 陈仁朋, 齐立志, 汤旅军, 等. 砂土地层盾构隧道开挖面被动破坏极限支护力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增1): 2877-2882.
- Chen R P, Qi L Zh, Tang L J, et al. Study of limit supporting force of excavation face's passive failure of shield tunnels in sand strata [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(Sup1): 2877-2882. (in Chinese)
- [12] 孙潇昊, 繆林昌, 林海山, 等. 不同埋深盾构隧道开挖面稳定问题数值模拟[J]. 东南大学学报, 2017, 47(1): 164-169.
- Sun X H, Liao L Ch, Lin H Sh, et al. Numerical simulation research on excavation face stability of different depths of shield tunnel [J]. Journal of Southeast University (Nature Science Edition), 2017, 41(1): 164-169. (in Chinese)
- [13] Lee C J, Wu B R, Chen H T, et al. Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21: 119-132.
- [14] 刘成, 陆杨, 吕伟华, 等. 砂性地层中盾构泥浆粗粒材料对成膜效果的影响[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 104-111.
- Liu Ch, Lu Y, Lyu W H, et al. Effects of coarse-particle materials in slurry on filter-cake formation effectiveness in sand strata [J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 104-111. (in Chinese)
- [15] 姜腾, 夏鹏举, 闵凡路. 泥浆性质对泥水盾构泥膜闭气性影响试验研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(2): 134-140.
- Jiang T, Xia P J, Min F L. Experimental study on the influence of slurry properties on the airtightness of the filter cakes of slurry shields [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(2): 134-140. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)