

正交下穿截污管盾构开挖面被动失稳 颗粒流模拟研究

叶友林¹,商诗健¹,牛奔²,路志旺³,徐春一¹

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中国建筑第六工程局有限公司,
天津 300451;3. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 对砂土地层土压平衡式盾构下穿截污管施工工况进行研究,以解决由于支护压力过大导致的开挖面被动失稳问题。方法 以沈阳地铁三号线下穿截污管区段为背景,利用颗粒流程序建立数值模型,研究截污管存在下的开挖面被动失稳模式、支护压力变化以及地层应力分布。同时分析了管隧垂直净距与细观摩擦系数对极限支护压力的影响。结果 开挖面失稳模式和极限支护压力均受盾构开挖位置的影响,当开挖面位于管道前方 $1.0D$ 时,管道对失稳模式的影响最大;盾构穿越管道前,管道下部土层出现应力增大现象;极限支护压力随着管隧垂直净距、颗粒摩擦系数的增大而增大。结论 在盾构接近且未穿越截污管时,管道对开挖面被动失稳机理产生了显著影响。

关键词 盾构开挖面;离散元;正交下穿;稳定性;破坏模式

中图分类号 TU279.7⁺6;U455.43

文献标志码 A

引用格式:叶友林,商诗健,牛奔,等.正交下穿截污管盾构开挖面被动失稳颗粒流模拟研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(1):70-77.(YE Youlin,SHANG Shijian,NIU Ben,et al. Study on passive instability particle flow simulation of tunnel face in the shield tunnel perpendicular undercrossing the sewage interception pipe [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(1):70-77.)

Study on Passive Instability Particle Flow Simulation of Tunnel Face in the Shield Tunnel Perpendicular Undercrossing the Sewage Interception Pipe

YE Youlin¹,SHANG Shijian¹,NIU Ben²,LU Zhiwang³,XU Chunyi¹

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Construction Sixth Engineering Bureau Co.Ltd., Tianjin, China, 300451; 3. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The construction conditions of earth pressure balanced shield perpendicular undercrossing the existing sewage interception pipe in sandy soil stratum are studied, so as to solve the problem of passive instability of tunnel face caused by excessive support pressure. Taking the section of Shenyang Metro

收稿日期:2023-05-10

基金项目:国家自然科学基金项目(52008269);辽宁省教育厅科技计划项目(LJKZ0600)

作者简介:叶友林(1985—),男,高级工程师,博士,主要从事盾构隧道结构变形及控制等方面研究。

Line 3 undercrossing the existing sewage interception pipe section as the background, a numerical model is established using the particle flow code to study the passive failure modes of the tunnel face, the change of the support pressure and the distribution of the ground stress under the presence of the existing sewage interception pipe. Additionally, the study examines the impact of the vertical clearance between the pipe and the tunnel, as well as the friction coefficient, on the limit support pressure. The failure mode and limit support pressure of the tunnel face are affected by the shield excavation location, and the pipe has the greatest influence on the failure mode when the tunnel face is located 1.0D in front of the pipe. Before the shield crosses the pipeline, there is an increase in stress in the soil layer below the pipeline. The limit support pressure increases with the increase of the vertical clearance between the pipe and the tunnel and the friction coefficient of the particles. When the shield is close to, but does not cross the sewage interception pipe, the pipeline has a significant effect on the passive instability mechanism of the tunnel face.

Key words: shield tunnel face; discrete elements; perpendicular undercrossing; stability; failure mode

近年来,为了充分利用城市地下空间,浅地层盾构开挖已日趋普遍^[1],新建城市地铁难免会在与邻近设施相接的区域进行隧道掘进。与常规的单隧道开挖不同,近接施工中的盾构开挖面稳定性要受到既有结构的影响^[2]。针对盾构隧道开挖面稳定性问题,国内外学者借助理论分析、模型试验和数值模拟等多种方法进行了大量研究。在理论分析方面,陈仁朋^[3]、D. Li 等^[4]分别采用极限平衡与极限分析方法对开挖面极限支护压力的求解方法进行了改进。在模型试验方面,国内外学者通过离心模型试验、小尺寸模型试验等方法探索了开挖面的破坏模式,A. Kirsch 等^[5]发现主动破坏形式类似于烟囱,而 K. S. Wong 等^[6]观察到被动破坏形式类似于漏斗。在数值模拟方面,P. Li 等^[7]对盾构隧道开挖面被动失稳模式和极限支护压力进行了分析。缪林昌等^[8]采用颗粒流数值模拟方法,揭示了砂土地层盾构隧道开挖面的失稳机理。Z. Y. Yin 等^[9]采用三维离散元与有限差分耦合法,研究了土体颗粒形状对隧道开挖面被动破坏模式和支护压力变化趋势的影响。

目前,越来越多的学者开始对盾构隧道穿越邻近结构的开挖面稳定性进行研究。刘英男等^[2]基于 FLAC^{3D}数值模拟指出,盾构

开挖面与既有隧道之间的相对距离会对开挖面的破坏模式产生影响。代仲海等^[10]通过有限元对盾构穿越既有隧道开挖面失稳进行分析,发现既有隧道的存在导致土体破坏区沿盾构开挖方向的两滑动面不对称。张孟喜等^[11]建立了盾构隧道正交下穿数值模型,分析了开挖面塌陷失稳破坏模式。F. Xue 等^[12]基于二维颗粒流数值模型,分析了由于盾构隧道推进引起的开挖面前方以及既有隧道周围土压力变化趋势。

综上所述,虽然已有研究成果涉及盾构隧道穿越邻近结构的开挖面稳定性问题,但研究主要关注主动失稳问题。从广州地铁一号线^[13]隧道施工引发的地表隆起事故可知,开挖面前方的被动破坏问题同样存在风险。此外,由于现有地下管道的存在,盾构开挖面失稳所引起的地层变形机理也会有所变化,因此,研究既有管道对开挖面被动失稳机理的影响十分重要。基于此,笔者针对新建盾构隧道正交下穿截污管施工工况,建立二维颗粒流数值模型,旨在从细观角度探究盾构隧道下穿管道施工中因支护压力过大引起的开挖面被动失稳问题。

1 工程概况

沈阳地铁三号线一期工程南塔站-文富

路站区间西起南塔站,沿文化路向东走行,经文化东路天桥转至文化东路,到文富路站截至。其中下穿东部截留污水管区间隧道外径6.2 m,内径5.5 m,在里程右DK32+477.0~右DK32+489.0、左DK32+493.5~DK32+504.0范围正穿截留污水管,其位置关系如图1所示。污水管为内径3.5 m、壁厚0.25 m的钢筋混凝土管片结构。

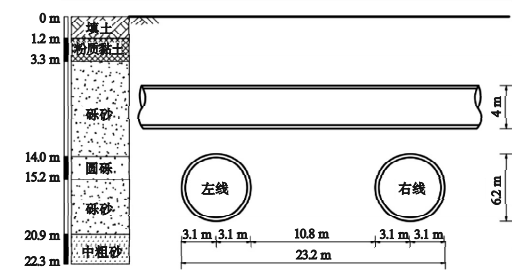


图1 区间隧道正穿截留污水管横剖面位置关系图

Fig.1 Interval tunnel is through the interception of sewage pipe cross section position relationship diagram

由于盾构隧道与既有管道之间的垂直净距较小,在盾构掘进过程中一旦发生开挖面失稳现象,将会对土体造成强烈的干扰。此外,截污管的存在也会对开挖面稳定性产生一定的影响。因此,笔者以左线下穿截污管工况为背景,研究盾构隧道穿越截污管时开

挖面的稳定性。

2 颗粒流数值模拟

2.1 细观参数标定

在颗粒流分析中,宏观力学特性是通过颗粒间的接触属性来体现的,无法直接对各项材料参数进行赋值,因此需要通过试验确定砂土细观参数。笔者采用双轴压缩试验,并将数值模拟结果与文献[14]中的试验结果进行比对,进而确定砂土的细观参数。图2为试验所用砂土颗粒级配曲线,其物理力学参数见表1。

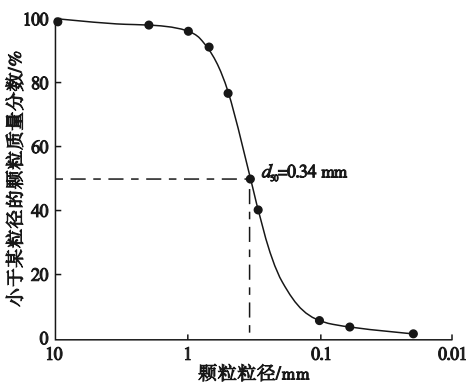


图2 颗粒级配

Fig.2 Grain gradation

表1 砂土力学参数

Table 1 Parameters of sandy soils				
含水率/%	体积质量/(g·cm ⁻³)	最小干密度/(g·cm ⁻³)	最大干密度/(g·cm ⁻³)	平均粒径/mm
11.1	2.66	1.37	1.65	0.34

标定后的砂土细观参数见表2。双轴试验的数值模型示意图如图3所示,模型的宽×高为24 mm×48 mm,由四面墙体组成,其中两侧的墙体为伺服墙,确保围压的稳定。顶部和底部墙为加载墙,当试样的轴向应变达到8%时结束加载。将围压设置为

100 kPa、200 kPa、300 kPa 进行多次试验,将数值模拟结果与室内试验得到的应力-应变曲线进行比对,结果如图4所示。从图中可以看出,模拟曲线和试验曲线吻合良好,可以用该组参数模拟密砂地层。

表2 颗粒流细观参数

Table 2 Micro-parameter of particle flow				
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	颗粒间法向刚度/10 ⁸ (N·m ⁻¹)	颗粒间切向刚度/10 ⁸ (N·m ⁻¹)	颗粒间摩擦系数	初始孔隙比
2 660	4.0	2.0	1.74	0.15

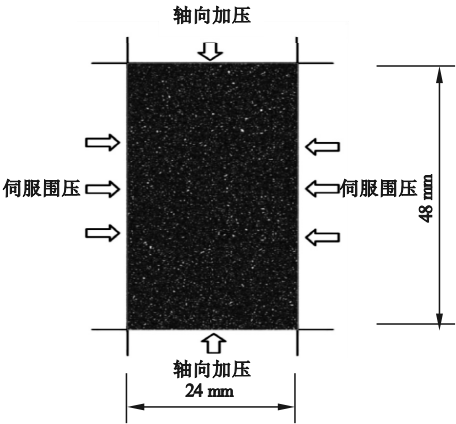


图 3 双轴试验试样

Fig. 3 Biaxial test specimens

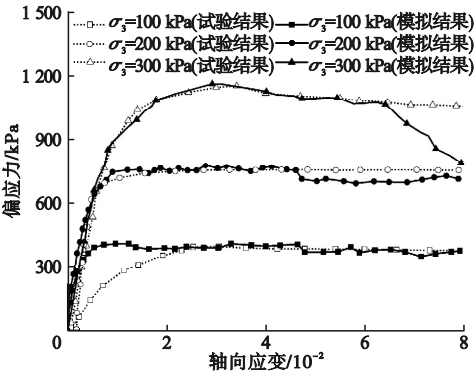


图 4 应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves

2.2 数值模型建立

初始颗粒流模型如图 5 所示,在对模型边界效应以及计算效率进行综合考虑后,设置模型边界长×宽为 62 m×31 m,上边界为自由边界,其余边界采用墙体单元实现接触约束。盾构隧道直径 D 为 6.2 m,截污管外径为 4 m,管道与盾构隧道之间的垂直净距 H 为 2 m,盾构埋深 $C=1.3 D$ 。图 5 中 Z 表示开挖面与既有管道之间的水平净距,当开挖面位于管道左侧时, Z 为正,反之为负。

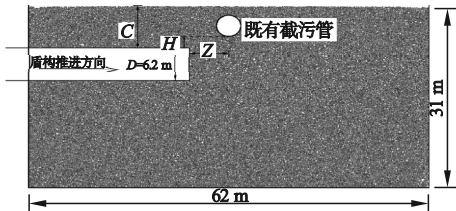


图 5 初始颗粒流模型

Fig. 5 Initial particle flow model

初始颗粒流模型的建立包括三个步骤:

第一步:生成初始地层。根据颗粒流细观参数和颗粒级配曲线,在模型内部以 0.15 的孔隙比随机生成颗粒。为了降低颗粒数量、提高计算效率,笔者基于文献[15],在保证隧道直径 D 与颗粒粒径 d_{50} 的比值不小于 10 的前提下,将数值模拟砂土粒径基于平均粒径 d_{50} 放大 800 倍,并在自重作用下固结。

第二步:建立截污管道模型。由于本次模拟以正交下穿工况下开挖面的被动失稳模式为主,不考虑管道的自身变形,在此用单一的大圆盘颗粒来模拟管道,这种方法已在文献[16]中被证实是可行的。该大颗粒的直径与截污管外径相同,其法向刚度为 1.0×10^{11} N/m,切向刚度为 1.0×10^{11} N/m,管道密度则根据质量等效原理进行计算:

$$\rho_{D_0} = \frac{1}{D_0^2} \sum_{i=1}^n \rho_i d_i^2. \quad (1)$$

式中: ρ_{D_0} 为管道密度; D_0 为管道的直径; n 为管道范围内砂土颗粒的数量; ρ_i 为砂土颗粒的密度; d_i 为管道区域内第 i 个砂土颗粒的直径。通过计算得到管道密度 ρ_{D_0} 为 $2\,060\text{ kg/m}^3$ 。

第三步:建立盾构模型。删除开挖区域内的砂土颗粒,添加墙体单元来模拟盾构模型。重新对地层模型进行固结,清除地表多余颗粒,同时将模型内颗粒的位移场与速度场清零以完成盾构初始状态的构建。

为研究新建隧道穿越既有管道时开挖面被动失稳模式的普适性,在实际模拟期间,将整个穿越过程切割成无数个单一的开挖阶段,并选取 4 个具有代表性的开挖位置,即开挖面距离管道中轴线的水平净距分别为 $1.5 D$ 、 $1.0 D$ 、 $0 D$ 、 $-1.0 D$ 进行模拟分析。在保证准静态加载的前提下,赋予盾构墙体 0.01 m/s 的前进速度来反映开挖面支护压力增大过程,进而研究不同开挖位置下的开挖面失稳模式、开挖面支护压力变化以及地层应力变化情况。

3 结果分析

3.1 失稳模式

在开挖面稳定性问题的研究中,分析开

挖面前方土体失稳模式是十分重要的。图6为盾构开挖面处于不同开挖位置时的开挖面渐进破坏位移云图,其中标准开挖面位移定义为 S_x/D , S_x 为盾构开挖面中心点位移。

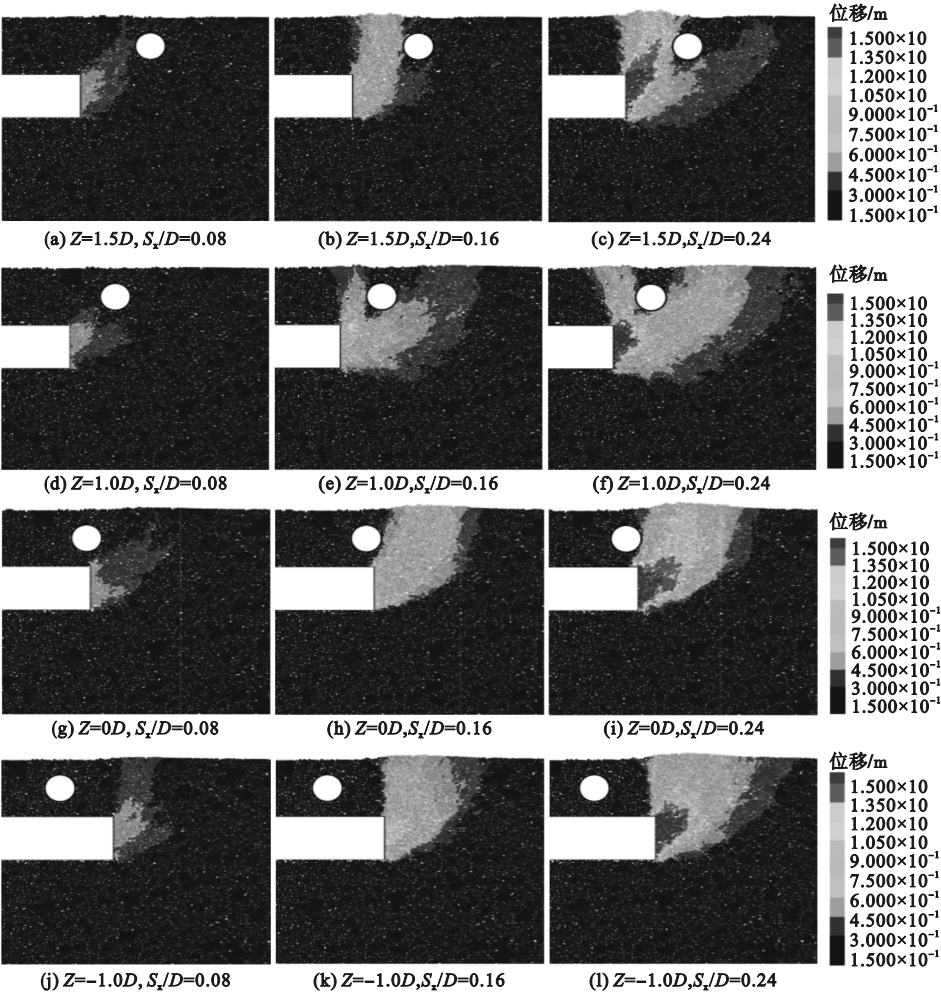


图6 位移云图

Fig. 6 Displacement contour plots

从图6可以看出,随着开挖面推进距离的增大(S_x/D 逐渐增加),土体失稳区范围开始扩大并逐渐向地表延伸,最终导致地表土体出现一定的隆起现象。通过对比不同开挖面位置的位移场渐进破坏过程可知,当盾构开挖面逐渐靠近既有管道($Z=1.5D$ 、 $Z=1.0D$)时,管道的存在对失稳区的发展产生了很大影响。当开挖面处于 $Z=1.5D$ 位置时,土体变形主要集中在既有管道的左侧,土体同时受到开挖面的推进与管道的挤压作

用,土体的变形发展更为迅速。当开挖面处于 $Z=1.0D$ 位置时,开挖面前方土体在既有管道的影响下,相较于 $Z=1.5D$ 的位置,土体的变形破坏更加不容易发展到地表,而是先向远端发展,绕过既有管道向地面发展。当盾构开挖面处于 $Z=0$ 和 $Z=-1.0D$ 位置时,既有管道的存在对开挖面前方土体失稳模式几乎不产生影响,与文献[17]中对单隧道开挖面变形研究的情况一致,近似为斜漏斗形。

3.2 开挖面极限支护压力的确定

由于模型中采用支护墙体来模拟盾构开挖面,因此笔者提取支护墙体上的压力作为开挖面的支护压力,并记录其随开挖面位移的变化。为了更加准确地反映盾构施工期间支护压力的变化趋势,将支护压力进行归一化处理,计算如下:

$$\lambda = \frac{P}{\gamma D}.$$

(2)

式中: λ 为归一化支护压力; P 为当前状态下支护压力,kPa; γ 为土体重力密度,kN/m³。

不同开挖位置处的归一化支护压力 λ 与标准开挖面位移 S_x/D 之间的关系曲线见图 7。由图可知,随着 S_x/D 的增大,支护压力的变化大致可以划分为两个阶段,即“增长期”与“平稳期”。在“平稳期”,支护压力的大小在 S_x/D 的影响下波动较小,相对稳定,认为该阶段达到了盾构开挖面失稳的极限状态,开挖面的支护压力即为被动极限支护压力 λ_m 。从图中还可以观察到,在盾构开

挖面的位置从 $Z=1.5D$ 到 $Z=-1.0D$ 变化期间,极限支护压力值呈现出先增大后减小的趋势,在 $Z=1.0D$ 处 λ_m 达到最大值。

由此可知,在开挖面穿越管道之前的极限支护压力明显大于穿越之后的极限支护压力。这主要是在开挖面穿越管道之前,管道的存在对周围土体产生一定的加固效果,导致需要更大的破坏应力才能产生被动失稳现象。在 $Z=1.0D$ 时极限压力值最大,原因在于开挖面和既有管道之间距离较近,土体的失稳变形要先向开挖面远端发展再向地表延伸,从而导致极限支护压力的进一步加大。

3.3 主应力场

为了更加直观地展现盾构隧道穿越既有截污管过程中地层应力的分布特征,在开挖面前方以及既有管道周围设置了一系列测量圆,并对测量圆内土颗粒的应力参数进行追踪记录。颗粒主应力场的重分布云图如图 8 所示,其中十字线代表应力张量,十字线的长短代表应力的相对大小,十字线的方向代表主应力的方向。从图中可以看出,随着盾构推进距离的增加,地层主应力的方向和大小均发生了变化。主要体现在开挖面前方区域内,大小主应力相对于初始地层都会增大,且水平向应力更大。在开挖面的下侧区域,明显见到大主应力方向朝开挖面偏转。在开挖面上侧区域,当开挖位置在 $Z=1.0D$ 时,管道左侧主应力向左偏转,管道右侧主应力向右偏转;当开挖面位置在 $Z=-1.0D$ 时,主应力主要向右侧偏转。

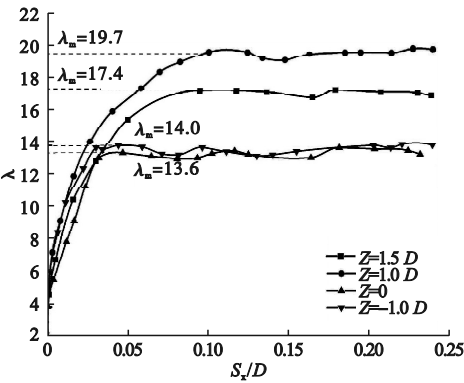


图 7 支护压力变化曲线

Fig. 7 Support pressure variation curves

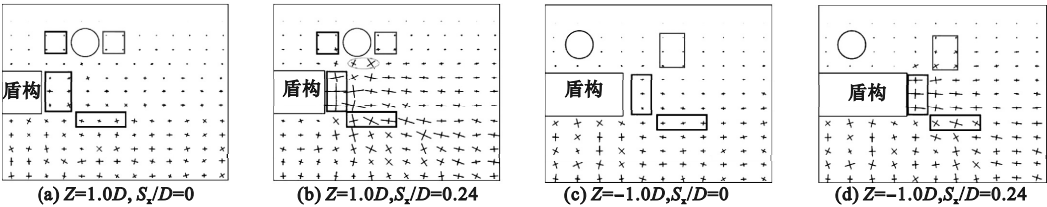


图 8 不同开挖位置处地层应力场分布

Fig. 8 Distribution of ground stress fields at different excavation locations

另外,当盾构开挖面位置在 $Z = 1.0 D$ 时,随着盾构推进距离的增加,可以观察到既有管道下部土体应力出现增大的现象,这可能会对管道造成一定的压力影响。而当开挖面位置处于 $Z = -1.0 D$ 时,既有管道周围并没有出现明显的应力变化。这也说明当盾构穿越管道后,既有管道与盾构之间的相互影响很小。因此,在盾构隧道穿越截污管的过程中,需要对地层应力的变化进行监测和分析,以确保管道和周围土体的稳定。

3.4 参数敏感性分析

在盾构施工期间,隧道埋深以及地层参数的不同都会对开挖面稳定性产生一定影响,因此本节分析管道与盾构隧道之间的垂直净距 H 以及颗粒细观摩擦系数 μ 对开挖面极限支护压力的影响情况。

3.4.1 管隧垂直净距

颗粒摩擦系数为 1.74、管隧垂直净距为 2~6 m 时,不同开挖位置下管隧垂直净距与归一化极限支护压力 λ_m 之间的关系曲线见图 9。由图可以看出,极限支护压力随着管隧垂直净距的增大而增大,两者基本呈线性关系。在管隧垂直净距相同的情况下,始终是开挖位置为 $Z = 1.0 D$ 时的极限支护压力最大。

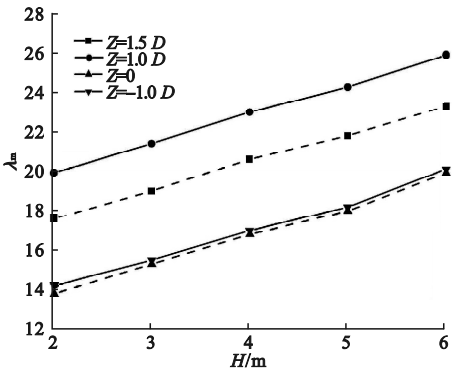


图 9 管隧垂直净距对 λ_m 的影响

Fig. 9 The influence of vertical clearance between pipeline and tunnel on λ_m

3.4.2 颗粒摩擦系数

管隧垂直净距为 2 m、颗粒摩擦系数为 0.2、0.5、0.8、1.2、1.74 五种工况下,不同开挖位置的颗粒摩擦系数与归一化极限支护压

力 λ_m 之间的关系曲线如图 10 所示。

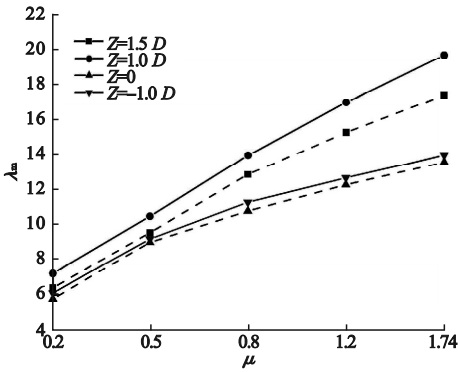


图 10 颗粒摩擦系数对 λ_m 的影响

Fig. 10 The effect of particle friction coefficient on λ_m

从图 10 可以看出,当颗粒摩擦系数变大时,极限支护压力也会增长。但是当摩擦系数小于 0.5 时,不同开挖位置下的极限支护压力差值不大;当摩擦系数从 0.5 逐渐增大时,处于穿越前的开挖位置与穿越后的开挖位置之间的极限支护压力差值开始增大。

4 结 论

(1) 当盾构未穿越既有管道时 ($Z = 1.5 D$ 和 $Z = 1.0 D$),管道的存在会对失稳区的发展产生很大影响;当穿越管道后,土体失稳模式基本不受既有管道的影响,与单隧道施工情况一致。

(2) 开挖面的被动极限支护压力会受到既有管道的影响。当盾构开挖面处于 $Z = 1.0 D$ 位置时,管道的存在使得土体的失稳变形要先向开挖面远端发展再向地表延伸,导致不容易达到被动破坏所需要的破坏应力。

(3) 地层应力的大小和方向会随着盾构推进发生变化。开挖面前方土体应力逐渐增大;在开挖面下侧区域,大主应力方向出现朝开挖面偏转的趋势;在开挖面上侧区域,应力十字线偏转方向与土体颗粒运动方向有关。当开挖面未穿越管道时,截污管道下部的土体应力明显增大,这可能会对管道产生一定的压力影响。

(4)在砂土地层中,当颗粒摩擦系数相同时,随着管隧垂直净距的增大,开挖面被动极限支护压力将呈线性增长;颗粒摩擦系数的增大会引起被动极限支护压力的增大,因此在分析盾构开挖面稳定性问题时,要考虑隧道埋深以及地层条件的差异对失稳机理的影响。

参考文献

- [1] 叶友林,路志旺,孙雅珍,等.浅埋盾构掘进诱发土体剪胀对地表变形的影响分析[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2022,38(5):871-878.
(YE Youlin, LU Zhiwang, SUN Yazhen, et al. Effect analysis of soil dilatation induced by shallow buried shield excavation on surface deformation [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2022, 38(5): 871-878.)
- [2] 刘英男,雷华阳,马长远,等.近接既有隧道盾构开挖面三维稳定性分析[J].岩土工程学报,2023,45(7):1374-1383.
(LIU Yingnan, LEI Huayang, MA Changyuan, et al. Three-dimensional stability analysis of shield tunnel face adjacent to existing tunnel [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2023, 45(7): 1374-1383.)
- [3] 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(增刊1):2877-2882.
(CHEN Renpeng, QI Lizhi, TANG Lüjun, 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(S1): 2877-2882.)
- [4] LI D, ZHAO L, CHENG X, et al. Upper-bound limit analysis of passive failure of a 3D shallow tunnel face under the bidirectional inclined ground surfaces [J]. Computers and geotechnics, 2020, 118: 103310.
- [5] KIRSCH A. Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand [J]. Acta geotechnica, 2010, 5(1): 43-62.
- [6] WONG K S, NG C W W, CHEN Y M, et al. Centrifuge and numerical investigation of passive failure of tunnel face in sand [J]. Tunnelling and underground space technology, 2012, 28: 297-303.
- [7] LI P, CHEN K, WANG F, et al. An upper-bound analytical model of blow-out for a shallow tunnel in sand considering the partial failure within the face [J]. Tunnelling and underground space technology, 2019, 91: 102989.
- [8] 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.
(MIAO Linchang, WANG Zhengxing, SHI Wenbo. Theoretical and numerical simulations of face stability around shield tunnels in sand [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2015, 37(1): 98-104.)
- [9] YIN Z Y, WANG P, ZHANG F. Effect of particle shape on the progressive failure of shield tunnel face in granular soils by coupled FDM-DEM method [J]. Tunnelling and underground space technology, 2020, 100: 103394.
- [10] 代仲海,胡再强.穿越紧邻隧道时盾构开挖面稳定性分析[J].中国公路学报,2020,33(1):145-152.
(DAI Zhonghai, HU Zaiqiang. Stability analysis of excavation face during shield passing through adjacent tunnels [J]. China journal of highway and transport, 2020, 33(1): 145-152.)
- [11] 张孟喜,张梓升,王维,等.正交下穿盾构开挖面失稳的离散元分析[J].上海交通大学学报,2018,52(12):1594-1602.
(ZHANG Mengxi, ZHANG Zisheng, WANG Wei, et al. Discrete element analysis for instability of undercrossing shield tunnel face [J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2018, 52(12): 1594-1602.)
- [12] XUE F, ZHANG M. Excavation face stability of shield tunneling closely under existing tunnels: particle flow simulation [J]. Iranian journal of science and technology, transactions of civil engineering, 2020, 44(S1): 497-506.
- [13] 竺维彬,鞠世建.地铁盾构施工风险源及典型事故的研究[M].广州:暨南大学出版社,2009.
(ZHU Weibin, JU Shijian. Research on risk sources and typical accidents in tunneling construction [M]. Guangzhou: Ji'nan University Press, 2009.)
- [14] 陈晨,赵文,刘博,等.基于扰动理论的沈阳中粗砂本构模型[J].东北大学学报(自然科学版),2017,38(3):418-423.
(CHEN Chen, ZHAO Wen, LIU Bo, et al. Constitutive model of Shenyang medium-coarse sand based on disturbance theory [J]. Journal of northeastern university (natural science), 2017, 38(3): 418-423.)
- [15] CHEN R P, TANG L J, LING D S, et al. Face stability analysis of shallow shield tunnels in dry sandy ground using the discrete element method [J]. Computers and geotechnics, 2011, 38(2): 187-195.
- [16] DILUKSHI S, WIJEWICKREME D. Study of trench backfill particle size effects on lateral soil restraints on buried pipelines using discrete element modeling [J]. Journal of pipeline systems engineering and practice, 2020, 11(1): 04019047.
- [17] 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 Dalong, LI Xinggao. Experimental study on relationship between support pressure and surface deformation of shield tunnel in sandy soil [J]. Modern tunnelling technology, 2015, 52(2): 44-51.)

(责任编辑:杨永生 英文审校:刘永军)