

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.054

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



城市地区管道渗漏引发地面塌陷成灾机理的 CFD-DEM 联合计算模拟分析

王越林, 陆烨

(上海大学 土木工程系, 上海 200444)

摘要:近年来,城市地区地面沉降和塌方事故频繁发生,管道渗漏是导致此类事故的主要因素之一。当管道破裂时,管道内流体为重力流,管道周围土体会被冲蚀进管道,最终导致沉降或地面塌陷。为探讨管道渗漏时土体在水流作用下的迁移过程,基于计算流体动力学(CFD)和离散元(DEM)理论,提出一种Fluent和PFC联合计算数值模拟方法。采用颗粒流程序(PFC3D)对地层进行建模,用ANASYS中的FLUENT模块计算地下水流场并导入PFC3D,进行联合计算。采用此流-固耦合方法,针对上海北部地区地层情况,即上部1.5 m厚黏性土层、下部2.5 m厚砂性土层进行数值建模,研究地下管道裂缝尺寸和地下管道裂缝位置对管道渗漏引发的地下空洞区发展及地面塌陷的影响。数值模拟结果表明:裂缝尺寸越大,土体流失量越大,砂性地层内土体扰动区域范围越广,由于上部黏性土层的存在,地表沉降值不大;土体扰动区域范围以裂缝位置为起点不断扩展,越往上部延伸,扰动区域范围越大,且扰动区域范围远远大于空洞区范围。

关键词:离散元;地面塌陷;地面沉降;管道渗漏;数值模拟

中图分类号: TU434 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2021)02-0060-08

CFD-DEM simulation of disaster mechanism of pavement collapse caused by pipeline leakage in urban areas

WANG Yuelin, LU Ye

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, P. R. China)

Abstract: In recent years, land subsidence and collapse accidents occur frequently in urban areas, and the leakage of pipelines is one of the main factors leading to such accidents. When the pipeline breaks and the fluid in the pipeline is of gravity flow, the soil around the pipeline will be eroded into the pipeline, which will eventually lead to settlement or ground collapse. To explore the migration process of soil under action of water flow during pipeline leakage, the authors propose a Fluent and PFC combined computational numerical simulation method based on computational fluid dynamics (CFD) and discrete element (DEM) theory. This method mainly uses particle flow program (PFC3D) to model the formation. The FLUENT module in the ANASYS is used to calculate the groundwater flow field, which will be imported into the

收稿日期: 2020-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(41672269)

作者简介: 王越林(1994-),男,主要从事土体微观力学研究, E-mail: wangyl61@163.com。

陆烨(通信作者),女,副教授,博士, E-mail: ye.lu@shu.edu.cn。

Received: 2020-01-08

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 41672269)

Author brief: WANG Yuelin (1994-), main research interest: soil microcosm, E-mail: wangyl61@163.com.

LU Ye (corresponding author), associate professor, PhD, E-mail: ye.lu@shu.edu.cn.

PFC3D to conduct the joint computation. Using this flow-solid coupling method, this paper conducts a numerical modeling of the stratigraphic situation in the northern part of Shanghai, and this domain is the upper 1.5 m thick clay layer and the lower 2.5 m thick sandy soil layer. Then the influences of the crack size and the crack position of underground pipeline on the development of underground cavity area caused by pipeline leakage and the ground collapse are explored. The numerical simulation results show that the larger the crack size is, the greater the soil loss is, the wider the soil disturbance area is in sandy strata, and the surface settlement will not demonstrate large value due to the existence of the upper clay soil layer. The soil disturbance area starts from the crack location and continues to expand. The higher it extends, the larger the disturbance area is, and the disturbance area is much larger than the cavity area.

Keywords: discrete element; ground collapse; land subsidence; pipe leakage; numerical simulation

近年来,有关城市地面塌陷的事故频繁发生,其中,一些事故造成了巨大的经济损失甚至人员伤亡。地面塌陷是由于地质条件(如岩溶形成)和人类活动(如采矿、建筑、管道渗漏)造成的^[1-2]。在这些影响因素中,管道渗漏引起的事故大约占到 55%。特别是城市地区,管道通常埋深较浅,每天承受各种荷载(如交通、施工、挖掘、打桩等),管道在各种荷载作用下会由于自然原因或强制磨损而开裂甚至断裂。某些城市地下水位较高,在水力梯度作用下,土体被侵蚀并冲入到无水流或重力流(供水或排水)管道。随着渗漏侵蚀的扩散,扰动区从管道附近向上发展,最终导致地表塌陷。

在实际应用中,往往很难检测到管道的渗漏,并且无法观察渗漏侵蚀的过程。针对这个问题,一些学者进行了相关研究。Guo 等^[3]开展了隧道渗流侵蚀的室内模型试验,研究重力流管道破裂引起土体侵蚀的形成过程。王帅超^[4]通过室内模型试验方法对管道破损渗漏导致的地面塌陷问题进行研究,发现地下管道裂缝不同形状与尺寸对地下空洞发展规律的影响。除室内模型试验外,部分学者还通过数值模拟进行渗漏侵蚀研究。渗漏侵蚀问题涉及到两种介质:土体(固体)和水(流体),两者在地表塌陷的形成过程中都发挥着重要作用。因此,在相关研究中,采用离散单元法(DEM)和计算流体动力学(CFD)分别对土体和水进行模拟并进行联合计算的数值模拟,得到越来越广泛的应用。Shamy 等^[5]首次将 CFD-DEM 流固耦合方法引入到岩土工程问题研究中,对土坡渗流和饱和土体震动液化问题进行了分析。Tao 等^[6]利用 CFD-DEM 方法研究了堤坝中管道冲蚀的详细过程。郑刚等^[7]利用 PFC-CFD 方法研究灾害演化过程中的土颗粒应力链和缝隙两侧结构受力的发展变化情况,认为漏水、漏砂过程是

一个应力拱不断建立、破坏的连续变化过程。周健等^[8]采用离散元模拟开展了土体渗流及液化问题的研究。蒋明镜等^[9]将描述流体体变-压力非线性关系的 Tait 状态方程(EOS)和计算流体动力学(CFD)相结合,建立模拟弱可压缩流体的 CFD-DEM 耦合计算模块。通过单颗粒水下自由沉降和一维固结试验算例来验证 CFD-DEM 耦合的可行性。虽然,以上研究实现了二维到三维 CFD-DEM 流固耦合模拟方法的转变,但仍无法用于模拟大型的、具有复杂边界条件的实际工程。

鉴于此,笔者基于上海地区地面塌陷的工程背景,提出一种 Fluent 和 PFC 联合计算方法,主要利用 ANSYS 中的 Fluent 模块与颗粒流程序(PFC)进行联合计算,并建立实际塌陷模型。在建模基础上,研究上海北部地区地层(上部黏性土层、下部砂性土层)中管道渗漏引起渗流侵蚀的过程,以及不同地下管道裂缝尺寸和不同地下管道破裂位置作用下砂性与黏性土中地层变形和地面塌陷规律。

1 CFD-DEM 联合计算理论

离散元(DEM)法将模拟对象划分为离散单元,并假设其为刚性圆盘或球体,单元间按实际情况选择合理的接触本构关系且满足运动方程,用时步迭代方法求解各单元运动方程,继而求得不连续体的整体运动形态。离散单元法的特点是允许单元间的相对运动,单元间无须满足连续介质力学的位移连续与变形协调条件,其运动方程的时步迭代通常采用显式的中心差分格式,无须建立大型刚度矩阵,计算速度快,所需储存空间小,尤其适用于求解岩土体大变形及非线性问题。

计算流体动力学(CFD)是在计算机上数值求解流体动力学基本方程的方法,通过数值计算和图像

显示进行流场分析、流场计算和流场预测,在比较短的时间内,能预测模拟对象性能,并通过改变各种参数,以更加深刻地理解问题产生的机理,为实验提供指导,节省实验所需的人力、物力和时间。

1.1 流体对土颗粒的作用力

在固-液两相饱和介质中,流体对颗粒的作用力从大类上可分为静水力和动水力。静水力即为颗粒静置于流体中的浮力作用,流体对颗粒的浮力大小与该颗粒周围的流体压力梯度有关,表达式为

$$f_b = -\nabla p \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (1)$$

动水力包括拖拽力、上举力和虚拟质量力,后两种力的大小和拖拽力相比可以忽略。拖拽力的表达式为

$$f_{\text{drag}} = \frac{1}{2}C_d\rho_f\pi r^2|\vec{u}-\vec{v}|(\vec{u}-\vec{v}) \quad (2)$$

式中: f_b 为单个颗粒受到的浮力; ∇p 为流体压力梯度; r 为颗粒半径; f_{drag} 为土颗粒受到的拖拽力; C_d 为拖拽力系数; ρ_f 流体密度; \vec{u} 粒子速度; \vec{v} 流体速度。

1.2 计算流程

为模拟水对土体的渗透流蚀作用,提出一种 Fluent 和 PFC 联合计算方法。采用 DEM 软件 PFC 求解固体颗粒运动方程,用 CFD 程序 Fluent 求解流体动力方程。将 Fluent 求得的三维流场导入到 PFC 程序中,将颗粒与流体相互作用力作为耦合纽带,实现相应的流固联合计算,计算流程如图 1

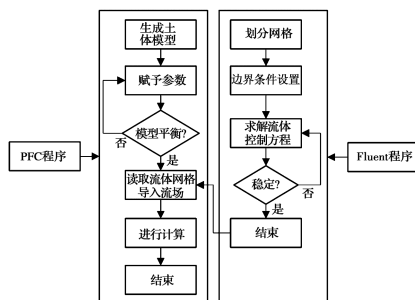


图 1 PFC-Fluent 联合计算流程

Fig. 1 PFC-Fluent joint computing flow

所示。网格划分采用 Fluent 中的前处理器 Gambit 实现,由于结构网格面对复杂几何外形时生成困难,以及耗费大量人工,自动化程度不高等缺点,因此,复杂模型可采用非结构化网格进行划分。同时,李晓蛟等^[10]对 PFC-Fluent 联合计算的有效性进行了验证。

2 土体与管道模型的建立

上海地区管道埋深通常在地面以下 3 m 以内,地下水位在 0.5~1.0 m,选用上海北部地区典型地层情况,即上部 1.5 m 厚黏性土层、下部 2.5 m 厚砂性土层进行数值建模,结合不同地下管道裂缝尺寸和不同地下管道破裂位置的影响,进行 CFD-DEM 联合计算,并探究砂性土与黏性土地层中地面塌陷的产生和发展规律。

模型中模型槽尺寸为 10 m×6 m×4 m(长×宽×高),在模型槽内自下而上按线性接触模型分别生成高度为 2.5 m 的砂性土层和 1.5 m 的黏性土层,其孔隙率均为 0.41,并对所有土颗粒施加重力,在重力作用下颗粒沉积、固结,并达到平衡状态。最后在黏性土层上部覆盖 0.3 m 厚的混凝土,代表低等级路面。在土颗粒的生成中,如果按照实际土颗粒尺寸在模型槽中生成,其数目将达到亿级,这对计算机来说是不现实的,因此,对 10 m×6 m×4 m 的模型进行初步研究,结果表明,管道顶部渗漏引起的颗粒位移场是轴对称的。在满足极限计算能力的前提下,将模型槽尺寸更改为 10 m×1 m×4 m,同时,对土颗粒尺寸进行扩大,在尽可能生成较多数目颗粒的前提下,生成颗粒的最大半径为 0.061 4 m,最小半径为 0.018 6 m,平均半径为 0.04 m,总数目约 6 万颗。砂性土和黏性土的参数取值皆参考已有文献^[11-12]的取值,具体宏观和细观参数见表 1、表 2。

表 1 土体模型宏观参数

Table 1 Macroscopic parameters of soil model

土体名称	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	含水率 $\omega/\%$	孔隙比 e	塑性指数 $I_P/\%$	黏聚力 C/kPa	内摩擦角 $\phi/(\text{°})$	不均匀系数 C_u	平均粒径 D_{50}/mm	颗粒比重 G_s	相对密度 D_r
砂性土层			0.600				2.8	0.18	2.63	0.63
黏性土层	18.6	35.7	0.984	12.7	11.4	14.7				

表 2 土体模型微观参数

Table 2 Meso parameters of soil model

土体名称	颗粒密度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	法向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	摩擦系数	阻尼系数	法向接触 模量/Pa	切向接触 模量/Pa	法向接触 强度/Pa	切向接触 强度/Pa
砂性土层	2 650	5×10^6	3×10^6	0.4	0.7				
黏性土层	2 650			0.3	0.7	1.2×10^7	1.2×10^7	2.5×10^4	2.5×10^4

主要针对城市地下排水管道内渗引发的地面塌陷问题进行研究。城市地下排水管道多为混凝土管道,内径大于 500 mm 时,采用钢筋混凝土管,且地面塌陷多发生在大孔径管道破裂处,因此,模拟的管道直径为 1 000 mm,位于地面以下 3 m 处。在 PFC 中无法对管道裂缝进行模拟,借助 Rhino5.0 进行管道模拟,并将其作为墙单元导入 PFC 中。其中,管道中心位置位于地面以下 3 m。管道上裂缝假设为圆孔型,共分为 5 种:管道顶部开孔,孔径分别为 3 倍、5 倍和 8 倍平均粒径;管道右侧腰部开孔,孔径为 5 倍平均粒径;管道底部开孔,孔径为 5 倍平均粒径,见图 2。

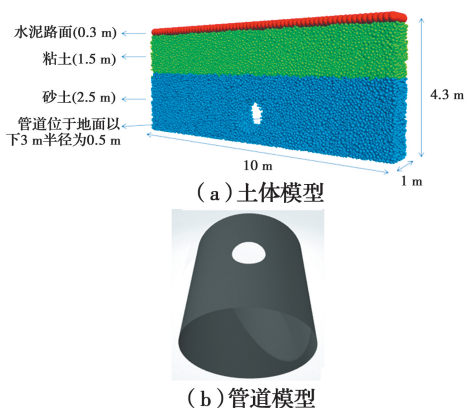


图 2 土体与管道模型

Fig. 2 Soil and pipeline model

流场采用 CFD 程序 Fluent 进行计算,对于地下水渗流这种多孔介质流,一般采用 Fluent 程序中的多孔介质模型进行模拟。Fluent 程序中的多孔介质模型是在标准流动方程中增加了一个动量源项,包括惯性损失项和黏性损失项。对于地下水渗流,由于流速较小,一般可忽略它的惯性损失项,只考虑黏性损失项。黏性损失项的大小表现为黏性阻力系数,土体的黏性阻力系数定义为

$$\alpha = \frac{D_p^2}{150} \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (3)$$

式中: D_p 为平均粒径; n 为孔隙率; $1/\alpha$ 为黏性阻力系数。

流场区域为地下水位以下,不包括管道内部,取

上海地区地面以下 0.5 m 水位为标准流场模型,地下水位表面为压力进口边界,进口压力为 0,管道裂缝为压力出口边界,出口压力为 0,其余边界均为不透水边界。将计算出的黏性阻力系数输入 Fluent 程序中,得出的流场见图 3。由图 3 可知,在水力梯度的影响下,地下水流入管道顶部裂缝,且上部黏性土层中流场流速较小,下部砂性土层中流场流速较大,均符合流体力学性质。

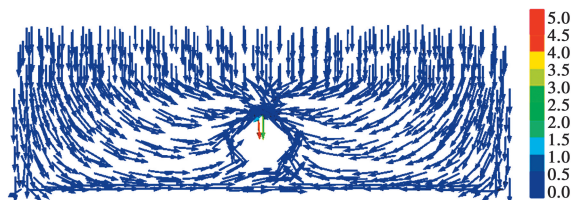


图 3 流场矢量图(单位:m/s)

Fig. 3 Flow field vector diagram(unit:m/s)

3 CFD-DEM 联合计算结果分析

将 Fluent 计算出的流场导入 PFC3D 土体模型后,进行 CFD-DEM 联合计算。管道顶部的渗漏模拟中,裂缝尺寸为 5 倍平均粒径,地下水位 0.5 m。图 4 为不同计算周期下的水土流失过程。在渗漏初期,土体扰动区位于渗漏附近。随着时间的推移(计算次数的增加),扰动区不断往横向、纵向拓展,最终延伸到地面,形成沉降土槽。在此阶段,如果混凝土路面受到荷载(一般为交通荷载)反复作用,则会导致路面塌陷,造成经济损失,甚至付出生命代价。

图 5(a)为沉降位移值达到 0.02 m 时采样下限的扰动区包围线图。结果表明,当计算步数为 20 万步时,扰动区跨径(扰动区到达地表时,引发的地面塌陷区域直径大小)被限制在约 1 m 宽(管径大小)范围内。随着水土流失的加剧,扰动区跨径扩大到管径的 5 倍左右。为了描述渗漏引起的地表沉降,绘制了不同计算步数下的地表沉降图,见图 5(b)。结果表明,随着计算步数的增加,地表沉降值也逐渐增大,其最大值发生在渗漏点(管道顶部)。当计算步达 20 万步时,地表沉降槽范围在 4 m 左右,最大地

表沉降值近 0.3 m, 这时已经形成较为明显的地面塌陷; 随着计算步数的增加, 其造成的地面破坏程度和经济损失也随之加大, 当计算步达到 80 万步时, 地表沉降槽范围已扩大到 6 m, 最大地表沉降值也增加至 1 m 左右。

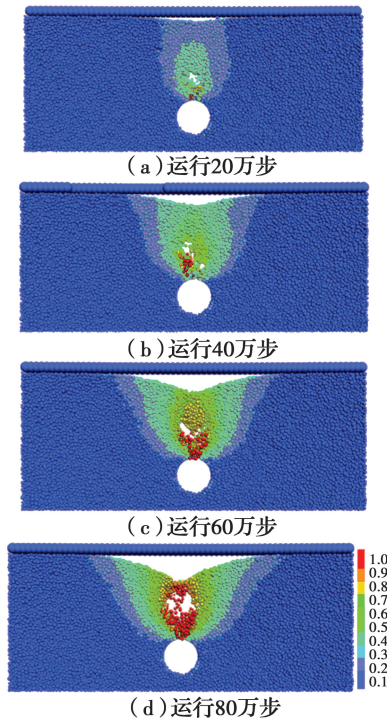


图 4 地层中不同管道裂缝尺寸土颗粒位移云图(单位:m)

Fig. 4 Cloud map of soil particle displacement in different pipeline crack sizes in strata

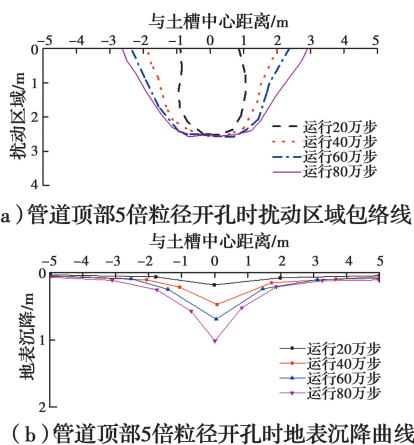


图 5 管道顶部 5 倍粒径开孔时扰动区域包络线与地表沉降曲线

Fig. 5 Enveloping line and surface subsidence curve of disturbance area when opening holes at the top of pipeline with 5 times particle size

3.1 不同管道裂缝尺寸的影响

通过将管道顶部圆形裂缝直径设置为 3 倍平均粒径、5 倍平均粒径和 8 倍平均粒径, 以研究裂缝开口尺寸的影响。图 6、图 7 显示了在计算步数为 80 万步时, 不同管道裂缝尺寸引起的土颗粒位移规律、扰动区情况和地表沉降情况, 得出结论如下:

1) 随着裂缝尺寸的增加, 土体内部土颗粒的流失越来越严重, 当 5 倍平均粒径与 8 倍平均粒径开孔的工况已经形成较大的空洞区时, 3 倍平均粒径开孔工况还未产生明显的空洞。

2) 随着裂缝尺寸的增加, 扰动区跨径增加速度加快, 当计算步数小于 20 万步时, 由于 3 倍平均粒径开孔工况未产生明显的扰动区, 所以, 其地表扰动区跨径接近于 0。同时, 其 8 倍平均粒径开孔造成的扰动区跨径增加速度明显大于 5 倍平均粒径开孔的。当计算步数大于 20 万步时, 扰动区跨径增加速度随着开孔增大而增大。

3) 随着裂缝尺寸的增加, 地表沉降值与地表沉降速度随之加大, 当计算步数为 80 万步时, 8 倍平均粒径、5 倍平均粒径开孔造成的地表沉降速度分别为 0.015、0.013 m/万步, 而 3 倍平均粒径开孔造成的地表沉降速度只有 0.006 m/万步。当 3 倍平均粒径开孔产生地表沉降最大值达 0.5 m 时, 8 倍平均粒径开孔产生地表沉降最大值接近 1.2 m。管道通常以渐进的方式破裂, 这意味着土体侵蚀不会在管道开裂早期造成严重的沉降问题, 但会随着管道渗漏的不断扩大而加速。如果在早期可以检测到管道破裂问题, 则可以避免地面塌陷和经济损失。

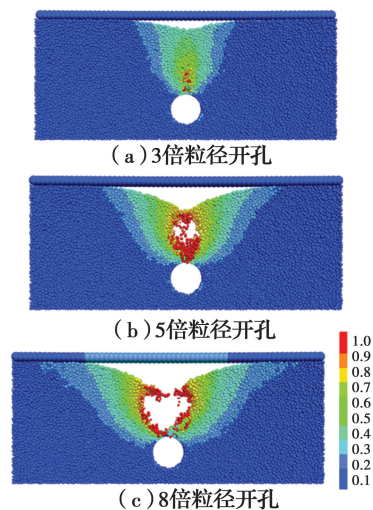
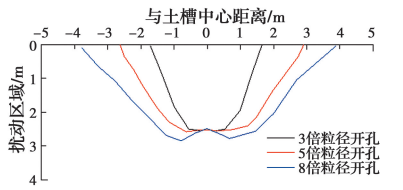
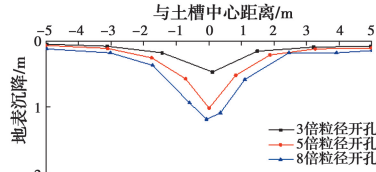


图 6 不同管道裂缝尺寸下土颗粒位移云图(单位:m)

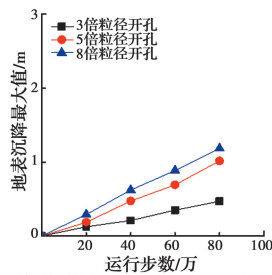
Fig. 6 Cloud map of soil particle displacement under different pipe crack size(unit:m)



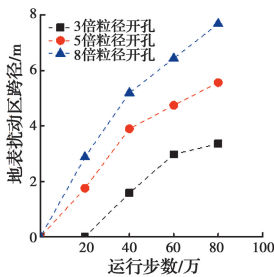
(a) 不同管道裂缝尺寸下扰动区域包络线



(b) 不同管道裂缝尺寸下地表沉降曲线



(c) 不同管道裂缝尺寸下地表沉降最大值变化图



(d) 不同管道裂缝尺寸下扰动区域跨径变化图
图 7 不同管道裂缝尺寸下扰动区域包络线
与地表沉降曲线

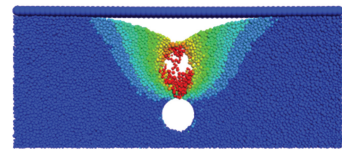
Fig. 7 Envelope and surface subsidence curve of disturbed area under different crack sizes of pipeline

3.2 不同管道裂缝位置的影响

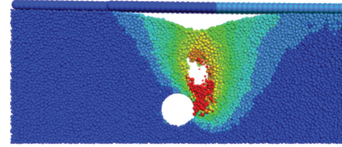
将尺寸为 5 倍平均粒径的裂缝分别设置在管道的顶部、右侧腰部和底部,可以得到不同裂缝位置下的影响。图 8、图 9 显示了在计算步数为 80 万步时,管道上不同位置发生渗漏时的土体位移和地面沉降情况,得出结论如下:

1)对于土颗粒流失量而言,当管道右侧腰部发生渗漏时,土体扰动区和地表沉降槽均向右移动,但扰动区范围和地面沉降槽宽度仍与顶部发生渗漏情况相似。当渗漏发生在管道底部时,由于土压力和水的重力作用,土颗粒流失较少,土体扰动主要发生在管道下面,并没有延伸到地面,所以,地表沉降几乎没有发生。

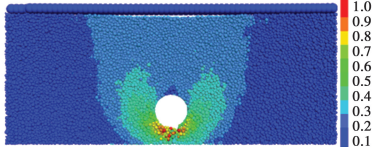
2)对于扰动区跨径增加速度而言,当计算步数小于 40 万步时,管道顶部开孔造成的扰动区跨径增



(a) 顶部开孔

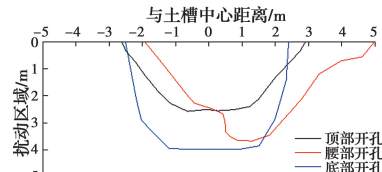


(b) 右侧腰部开孔

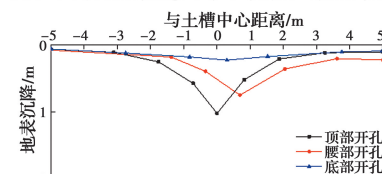


(c) 底部开孔

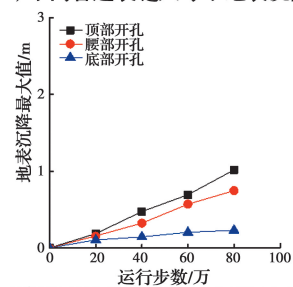
图 8 地层中不同管道裂缝位置下土颗粒位移云图(单位:m)
Fig. 8 Cloud map of soil particle displacement under different pipeline crack positions in strata(unit:m)



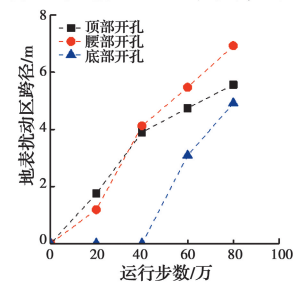
(a) 不同管道裂缝尺寸下扰动区域包络线



(b) 不同管道裂缝尺寸下地表沉降曲线



(c) 不同管道裂缝位置下地表沉降最大值变化图



(d) 不同管道裂缝位置下扰动区域跨径变化图

图 9 不同管道裂缝位置下扰动区域包络线与
地表沉降曲线

Fig. 9 Envelope and surface subsidence curve of disturbed area under different pipeline crack positions

加速度明显大于腰部开孔的,但当计算步数大于 40 万步时,腰部开孔造成的扰动区跨径增加速度是最大的。

3)对于地表沉降值与地表沉降速度而言,管道顶部开孔造成的地表沉降最大值大于腰部开孔,大于底部开孔,分别为 1.0、0.6、0.3 m,其地表沉降速度亦是如此。由此可见,管道底部产生的裂缝引发的扰动区域和地表沉降值较小,而顶部和腰部产生裂缝会导致更大的地表沉降和扰动区域跨度。

通过采用 Fluent 和 PFC 联合计算方法对复合地层进行了数值模拟,结合不同地下管道裂缝尺寸和不同地下管道破裂位置的影响,得出地层变形和地面塌陷的规律与王帅超^[4]和张成平等^[13]文章中的模型试验结果相似。

4 结论

基于计算流体动力学(CFD)和离散元(DEM)理论,提出一种 Fluent 和 PFC 联合计算数值模拟方法模拟上海地区混合地层中管道渗漏引起的工程问题。采用 PFC 程序对土层进行建模,用 FLUENT 程序对地下水流场进行计算,然后导入 PFC 中进行联合计算。在建立数值模型的基础上,研究了管道不同裂缝尺寸和不同裂缝位置对地面沉降的影响,得到以下结论:

1)采用的计算方法能够合理模拟地层中地下水问题,进一步证实了土体渗透侵蚀破坏过程。这种方法可以处理大型的、具有复杂边界和几何断面的工程情况。

2)当管道发生渗漏时,在水力梯度作用下,土颗粒被冲进管道,土层在裂缝周围首先产生扰动区,并逐渐向上延伸,最后形成路面塌陷。随着扰动区跨径的增大,路面塌陷程度也随之增大。

3)随着裂缝尺寸的增加,土体流失增加,扰动区跨径扩大速度、地表沉降值与地表沉降速度都增加,尤其是当裂缝尺寸为 8 倍平均粒径开孔时,其沉降槽范围是裂缝尺寸为 3 倍平均粒径时的 2.3 倍左右,地表沉降最大值约是裂缝尺寸为 3 倍平均粒径时的 2.5 倍。

4)管道顶部开裂造成的地表沉降最大值和地表沉降速度均大于腰部开孔和底部开孔的地表沉降最大值和地表沉降速度。在计算初期(小于 40 万步)3 种裂缝位置对扰动区跨径影响程度依次为:顶部开孔 > 腰部开孔 > 底部开孔;随计算时间增长(大于 40 万步),裂缝腰部开孔的扰动区影响范围将超过

顶部开孔造成的扰动区影响范围。而底部开孔的裂缝,土体扰动主要发生在管道下面,并没有延伸到地面,地表沉降几乎没有发生。因此,管道底部产生的裂缝引发的扰动区域和地表沉降值较小,而顶部和腰部产生裂缝会导致更大的地表沉降和扰动区域跨度。

参考文献:

- [1] 尚彦军, 庞文利, 王开洋, 等. 太古代片麻状花岗岩浅埋隧道变形破坏及地面塌陷分析: 以集宁隧道为例 [J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1574-1584.
SHANG Y J, PANG W L, WANG K Y, et al. Deformation damage of shallow tunnels and caveinduced ground collapse in Archeozoic gneissic granites: the Jining tunnel as case example [J]. Journal of Engineering Geology, 2018, 26 (6): 1574-1584. (in Chinese)
- [2] 宋许根, 刘秀敏, 陈从新, 等. 程潮铁矿西区采空区地表塌陷机制与变形规律初探 [J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(Sup2): 4262-4273.
SONG X G, LIU X M, CHEN C X, et al. Study on the mechanism of surface collapse and ground deformation in western mined area of Chengchao iron mine [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37 (Sup2): 4262-4273. (in Chinese)
- [3] GUO S, SHAO Y, ZHANG T Q, et al. Physical modeling on sand erosion around defective sewer pipes under the influence of groundwater [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(12): 1247-1257.
- [4] 王帅超. 城市地下管道渗漏引起的路面塌陷机理分析与研究 [D]. 郑州: 郑州大学, 2017.
WANG S C. Analysis and study on subsidence mechanisms of road caused by leakage of urban underground pipeline [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017. (in Chinese)
- [5] EL SHAMY U, ZEGHAL M. Coupled continuum-discrete model for saturated granular soils [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2005, 131(4): 413-426.
- [6] TAO H, TAO J L. Quantitative analysis of piping erosion micro-mechanisms with coupled CFD and DEM method [J]. Acta Geotechnica, 2017, 12 (3): 573-592.
- [7] 郑刚, 戴轩, 张晓双. 地下工程漏水漏砂灾害发展过程的试验研究及数值模拟 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(12): 2458-2471.
ZHENG G, DAI X, ZHANG X S. Experimental study

- and numerical simulation of leaking process of sand and water in underground engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2458-2471. (in Chinese)
- [8] 周健,周凯敏,姚志雄,等. 砂土管涌-滤层防治的离散元数值模拟[J]. 水利学报, 2010, 41(1): 17-24.
ZHOU J, ZHOU K M, YAO Z X, et al. Numerical simulation of piping-filter prevention in sandy soil by discrete element method [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(1): 17-24. (in Chinese)
- [9] 蒋明镜,张望城. 一种考虑流体状态方程的土体 CFD-DEM 耦合数值方法[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(5): 793-801.
JIANG M J, ZHANG W C. Coupled CFD-DEM method for soils incorporating equation of state for liquid [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(5): 793-801. (in Chinese)
- [10] 李晓蛟,陆焯,武亚军. 一种 CFD-DEM 流固耦合方法在渗流导致城市地面沉降问题中的应用[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2020, 26(5): 842-852.
LI X J, LU Y, WU Y J. The application of CFD-DEM coupling method in seepage-induced ground subsidence [J]. Journal of Shanghai University, 2020, 26(5): 842-852. (in Chinese)
- [11] 罗勇,龚晓南,吴瑞潜. 颗粒流模拟和流体与颗粒相互作用分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(11): 1932-1936.
LUO Y, GONG X N, WU R Q. Analysis and simulation of fluid-particles interaction with particle flow code [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2007, 41(11): 1932-1936. (in Chinese)
- [12] 陈建峰,李辉利,周健. 黏性土宏观参数相关性研究[J]. 力学季刊, 2010, 31(2): 304-309.
CHEN J F, LI H L, ZHOU J. Study on the relevance of macro-micro parameters for clays [J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010, 31(2): 304-309. (in Chinese)
- [13] 张成平,岳跃敬,蔡义. 管线渗漏水范围对浅埋隧道围岩变形和破坏的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(2): 392-400.
ZHANG C P, YUE Y J, CAI Y. Influence of pipeline leakage range on ground deformation and failure during shallow tunnelling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(2): 392-400. (in Chinese)
- [14] 张泰丽,周爱国,冯小铭,等. 南京市地面塌陷发育特征及防治对策[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(3): 3-8.
ZHANG T L, ZHOU A G, FENG X M, et al. Study on distribution characteristics of ground collapse in Nanjing City and its countermeasures [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(3): 3-8. (in Chinese)
- [15] 周健,姚志雄,张刚. 砂土渗流过程的细观数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 977-981.
ZHOU J, YAO Z X, ZHANG G. Mesomechanical simulation of seepage flow in sandy soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 977-981. (in Chinese)
- [16] CUNDALL P A. A computer model for simulating progressive large-scale movements in blocky rock systems [C]// ISRM Symposium, 1971: 129-136.
- [17] ZHANG D M, MA L X, ZHANG J, et al. Ground and tunnel responses induced by partial leakage in saturated clay with anisotropic permeability [J]. Engineering Geology, 2015, 189: 104-115.
- [18] MAIR R J. Tunnelling and geotechnics: new horizons [J]. Géotechnique, 2008, 58(9): 695-736.
- [19] RAVICHANDRAN N, MACHMER B, KRISHNAPILLAI H, et al. Micro-scale modeling of saturated sandy soil behavior subjected to cyclic loading [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(11): 1212-1225.
- [20] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies [J]. Géotechnique, 1979, 29(1): 47-65.
- [21] 周健,池永. 土的工程力学性质的颗粒流模拟[J]. 固体力学学报, 2004, 25(4): 377-382.
ZHOU J, CHI Y. Simulating soil properties by particle flow code [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2004, 25(4): 377-382. (in Chinese)
- [22] 倪小东,赵帅龙,王媛,等. 岩体水力劈裂的细观 PFC-CFD 联合分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(Sup2): 3862-3870.
NI X D, ZHAO S L, WANG Y, et al. Numerical analysis of hydraulic fracturing of rock mass on mesoscopic level by coupled PFC-CFD method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup2): 3862-3870. (in Chinese)
- [23] 罗勇. 土工问题的颗粒流数值模拟及应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
LUO Y. Simulation of soil mechanical behaviors using discrete element method based on particle flow code and its application [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)