

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2024.04.006

埋地管线破损-漏土诱发地面塌陷过程的 流固耦合离散元模拟

姬建^{1,2}, 闫亚东¹, 王涛¹, 袁雪阳¹

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室(河海大学), 江苏 南京 210098)

摘要: 为了探究埋地管线破损-漏土诱发地面塌陷的规律, 采用 DEM-CFD 方法, 综合考虑管线埋深、水压和破损口半径等因素, 对单一砂土层和上覆黏土层两种工况的地面塌陷过程进行了数值模拟分析。结果表明: 颗粒损失率和地面沉降值呈正相关关系; 根据颗粒损失速率, 塌陷过程可划分为颗粒运移、快速损失和沉降槽缓慢扩展 3 个阶段; 水压是影响颗粒损失速率的主要因素; 对于单一砂土层, 随着水压、破损口半径的增大和管线埋深的减小, 颗粒损失率逐渐增大; 对于上覆黏土层, 由于颗粒的黏结作用, 颗粒运移阶段持续时间与上覆黏土层厚度呈正相关关系, 与水压、破损口半径呈负相关关系。

关键词: 地面塌陷; 管线破损; 颗粒损失; 离散元; 流固耦合

中图分类号: P642.26; TU990.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2024)04-0035-12

Fluid-structure coupled discrete element simulation of ground collapse induced by underground pipeline damage and soil leakage

Ji Jian^{1,2}, Yan Yadong¹, Wang Tao¹, Yuan Xueyang¹

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering(Hohai University), Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to investigate the underlying mechanism of ground collapse resulting from pipeline damage and soil leakage, a comprehensive analysis was conducted using the DEM-CFD method. This study considered various factors of ground collapse, including the pipeline burial depth, water pressure, and radius of damage openings, while examining two distinct working conditions, a single layer of sand and an overlying layer of clay. The obtained results reveal a clear positive correlation between the particle loss rate and the magnitude of ground settlement. The collapse process can be delineated into three distinct stages based on the particle loss rate that are particle migration, rapid loss, and gradual expansion of the settlement trough. Among the considered factors, water pressure emerged as the primary influencer of the particle loss rate. In the case of a single sandy soil layer, the particle loss rate demonstrates an increasing trend with higher water pressure, larger damage radius, and shallower burial depth. For the overlying clay layer, the duration of the particle migration phase positively correlates with the thickness of the overlying clay layer, while displaying a negative correlation with water pressure and damage opening radius.

Key words: ground collapse; pipeline damage; particle loss; DEM; fluid-structure coupling

地面塌陷是一种由于地层土体流失引起地表逐渐或突发下沉的灾害现象^[1], 而地下管线破损渗漏是引发地面塌陷的主要原因之一^[2-4]。近年来, 管线破损诱发的地面塌陷事故屡见不鲜, 对社会公共安全和人民生命财产造成了巨大威胁。因此, 对埋地管线破损诱发地面塌陷进行机理研究具有重要的社会经济价值和科学意义。为解决这一问题, 国内外学者开展了相关研究, 其中室内模型试验是研究地面沉降问题的主要方法之一^[3,5]。刘成禹等^[6]基于富水砂层试验系统, 发现管线破损是否会诱发塌陷主要由骨架粒径、破损口直

基金项目: 国家自然科学基金项目(U22A20594, 52079045)

作者简介: 姬建(1983—), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土力学数值计算与岩土工程可靠度分析研究。E-mail: jk0003an@e.ntu.edu.sg

引用本文: 姬建, 闫亚东, 王涛, 等. 埋地管线破损-漏土诱发地面塌陷过程的流固耦合离散元模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(4): 35-46.

Ji Jian, Yan Yadong, Wang Tao, et al. Fluid-structure coupled discrete element simulation of ground collapse induced by underground pipeline damage and soil leakage[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2024, 52(4): 35-46.

径和厚跨比决定,通过分析不同流速、级配和渗透比降的试验结果,得到了埋地管线破损诱发沉降的预测模型。Karoui 等^[7]通过一系列物理模型试验,探究了污水管线渗漏引起的地面塌陷机制,发现水力梯度和路面强度是决定地面塌陷是否发生的关键因素。

相比于室内模型试验方法,数值模拟方法可以更加灵活地模拟各种复杂工况^[4,8],揭示塌陷机理形成过程的一般性规律,其中离散元方法(discrete element method, DEM)可以很好地建立地层宏观力学行为和微观尺度的相互联系。Long 等^[9]使用 DEM-FDM 耦合数值模型研究了隧道渗漏诱发富水砂层渗流侵蚀的过程,获得了同模型试验相同的结论,即应力拱消散是隧道渗漏引起土壤应力变化的内在原因,并结合天然平衡拱理论推导出应力拱解析式。另一方面,地层水土流失过程中的流体与土颗粒耦合作用会诱发地层产生侵蚀空洞^[10]。对于此类离散元流固耦合问题,可结合计算流体动力学(CFD)中纳维-斯托克斯方程考虑流体作用。张小玲等^[11]对经典的 DEM-CFD 流固耦合方法进行改进,考虑流体高速渗流时流体压力梯度力对流固耦合过程的影响,发现流体压力梯度力与颗粒半径呈正相关关系,地表凹陷呈圆锥形。蔡剑韬等^[12]使用 DEM-CFD 流固耦合方法对上海地区浅埋管线渗漏诱发地面塌陷进行了细观模拟,发现粉砂土体的流失会导致黏土-粉砂交界处产生地层空洞,进而土体颗粒不断流失引发塌陷。

对于不可压缩多孔介质流体,可通过达西定律描述其运动规律。Cui 等^[13-14]基于达西渗流模型实现了 DEM-CFD 流固耦合模拟分析土体内部侵蚀过程,明确了各因素对侵蚀过程的影响机制。Tang 等^[15]基于多孔介质达西渗流理论开发了三维 DEM 耦合模型,发现管道破损口周围的土体会逐渐侵蚀并形成稳定的侵蚀腔。综上,达西渗流和 DEM 耦合是一种高效可行的分析方法。

针对地面塌陷问题的研究,大多数学者专注于塌陷的诱因、影响范围和严重程度等,对塌陷过程中地层本身的力学特征研究较少。为模拟埋地管线破损-漏土诱发的地面塌陷过程,本文采用离散元软件 PFC^{3D},通过内置的 CFD 模块实现与达西流体控制方程耦合,并根据颗粒试验验证了该方法的可行性;基于构建的地面塌陷三维耦合模型模拟了地层损失、地层空洞形成、地面塌陷等过程,揭示了各影响因素下地面塌陷规律,以期能为实际地面塌陷灾害预防提供参考。

1 流固耦合理论

1.1 计算原理

1.1.1 颗粒间相互作用

在 PFC^{3D}中,颗粒看作是由大量相互独立的 3D 刚性圆球组成,颗粒间的力通过接触点传递。基于牛顿第二定律,颗粒间的运动是由接触力和直接作用在颗粒上的力产生,具体计算公式为

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} = \frac{\boldsymbol{f}_c + \boldsymbol{f}_{\text{fluid}}}{m} + \boldsymbol{g} \tag{1}$$

$$I \frac{d\boldsymbol{w}}{dt} = \boldsymbol{M} \tag{2}$$

式中: $\boldsymbol{u}$ 为颗粒速度; $\boldsymbol{f}_c$ 为作用于颗粒上外力和接触力的合力; $\boldsymbol{f}_{\text{fluid}}$ 为流体对土颗粒的总作用力; m 为颗粒质量; $\boldsymbol{g}$ 为重力加速度; I 为惯性矩; $\boldsymbol{w}$ 为颗粒的角速度; $\boldsymbol{M}$ 为作用在颗粒上的力矩。

1.1.2 颗粒-流体耦合作用

渗流过程中流体作用在颗粒上的总力由流体压力梯度力、拖曳力、浮力、上举力和虚拟质量力等组成,本文为简化计算,仅考虑拖曳力、浮力和流体压力梯度力,其他不稳定力的大小忽略不计^[16]:

$$\boldsymbol{f}_{\text{fluid}} = \boldsymbol{f}_{\text{drag}} + \boldsymbol{f}_{\text{grad}} + \boldsymbol{f}_{\text{float}} \tag{3}$$

其中 $\boldsymbol{f}_{\text{drag}} = [C_d \rho_f \pi r^2 | \boldsymbol{u} - \boldsymbol{v} | (\boldsymbol{u} - \boldsymbol{v}) / 2] \boldsymbol{\varepsilon}^{-\chi}$ $\boldsymbol{f}_{\text{grad}} = - \pi d^3 \nabla \times \boldsymbol{p} / 6$ $\boldsymbol{f}_{\text{float}} = \pi d^3 \rho_f \boldsymbol{g} / 6$
 $C_d = 0.63 + 4.8 / \sqrt{Re}$ $\chi = 3.7 - 0.65 \exp[-(1.5 - \lg Re)^2 / 2]$ $Re = 2 \rho_f r | \boldsymbol{u} - \boldsymbol{v} | / \mu_f$

式中: $\boldsymbol{f}_{\text{drag}}$ 为流体对颗粒的拖曳力; $\boldsymbol{f}_{\text{grad}}$ 为流体压力梯度力; $\boldsymbol{f}_{\text{float}}$ 为颗粒在流体中的浮力; C_d 为拖曳力系数; Re 为雷诺数; r 为颗粒半径; $\boldsymbol{v}$ 为流体速度; $\boldsymbol{\varepsilon}$ 为颗粒所在流体单元的孔隙度; χ 为考虑局部孔隙度的经验系数; ρ_f 为流体密度; μ_f 为流体动力黏滞系数; d 为颗粒直径; $\boldsymbol{p}$ 为流体压力。

1.1.3 达西流体控制方程

根据达西定律,多孔介质不可压缩流体的控制方程为

$$\frac{dp}{dx} = -\frac{\mu_f}{K}v \quad (4)$$

式中 K 为渗透系数矩阵。

为了考虑流体受颗粒运动的影响,渗透系数由 DEM 模型孔隙率计算。使用 Kozeny-Carman 方程计算渗透系数^[17]。为了得到更贴合实际的渗透系数,孔隙率上限设置为 0.7。

1.2 流固耦合方法计算流程

基于 DEM-CFD 流固耦合方法模拟管线破损-漏土诱发地面塌陷,要点在于采用达西流体控制方程更新渗流场,并将 v 、 $\nabla \times p$ 等物理量输入 DEM 模型中,同时接受流体单元 ε 、 K 等参数信息,从而实现应力场-渗流场的耦合计算。具体计算流程如图 1 所示。

2 数值模拟验证

2.1 单个颗粒在静水中自由沉降

单个球形颗粒在静水中的自由沉降一直是验证 DEM-CFD 流固耦合方法准确性的重要方法之一^[8]。纳维-斯托克斯方程表明,静水中球形颗粒在重力作用下的沉降速度会稳定在某一固定值,此固定值可由式(5)求得。

$$4\pi r^3(\rho_p - \rho_f)g/3 = \pi r^2 \rho_f C_d u^2/2 \quad (5)$$

式中 ρ_p 为颗粒密度。

选择半径分别为 1.0、1.5、2.0 mm 的球形颗粒,记录在黏度系数为 $1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 的静水中受重力作用自由沉降的速度变化(图 2)。由图 2 可知,3 种半径球形颗粒沉降速度变化呈现相同的下降趋势,且均稳定在某一固定值,分别为 -0.245、-0.323、-0.389 m/s。已知颗粒密度和流体密度分别为 2650、1000 kg/m³,因此根据式(5)计算得到 3 种半径球形颗粒最终稳定速度分别为 -0.245、-0.324、-0.391 m/s。通过试验值与理论计算值比较,验证了本文研究方法能够有效且准确地实现单颗粒流固耦合计算。

2.2 单列颗粒向上渗流

本文采用的单列球形颗粒向上渗流模型^[18]如图 3(a)所示,100 个半径为 0.5 mm 的球形颗粒紧密地排列在宽度为 1 mm 的纵向空间内,首先得到球形颗粒在无渗流情况下的初始沉降量,然后在底部施加 0.005 m/s 的渗流速度,整个过程记录最上方颗粒的位移变化情况,并与理论计算值进行比较。初始沉降量计算公式为

$$\delta = \frac{N(N+1)}{2k_n} \frac{4\pi}{3} \left(\frac{d}{2}\right)^3 (\rho_p - \rho_f)g \quad (6)$$

式中: N 为颗粒数量; k_n 为颗粒的刚度。

由式(6)计算得到初始沉降量计算值为 -0.427 8 mm。施加 0.005 m/s 的渗流速度后,顶部球形颗粒的理论位移为

$$S_t = \frac{v^*}{C_v} \frac{H'^2}{2} \left[1 - \frac{32}{\pi^3} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{(-1)^j}{(2j+1)^3} e^{-T_v(2j+1)^2 \pi^2/4} \right] \quad (7)$$

其中 $C_v = k/m_v \rho_f g$ $T_v = C_v t/H'^2$

式中: v^* 为初始渗流速度; C_v 为固结系数; H' 为模型试样高度; T_v 为与时间相关的参数; j 为常数; k 为渗透系数; m_v 为体积压缩系数。

图 3(b)对比了顶部颗粒两阶段位移值的模拟值和理论计算值。底部开始渗流前,颗粒仅受到重力和浮力作用,通过两种方法得到的初始沉降值均为 -0.427 8 mm。开始渗流后,数值模拟得到的结果比理论值大

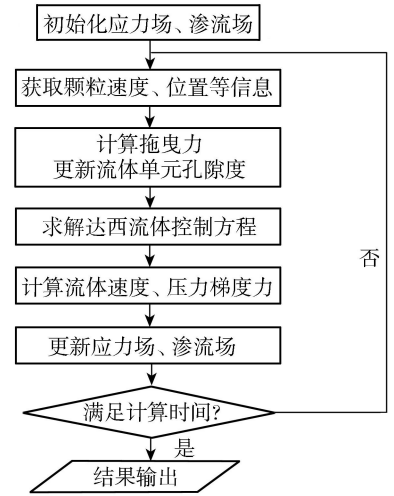


图 1 DEM-CFD 流固耦合方法计算流程

Fig.1 Flow chart of DEM-CFD fluid-structure coupling method

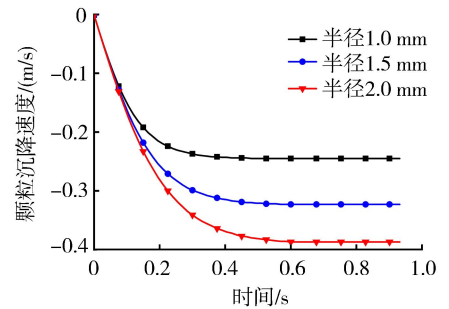


图 2 单个颗粒在静水中的自由沉降速度

Fig.2 Free settling speed of a single particle in still water

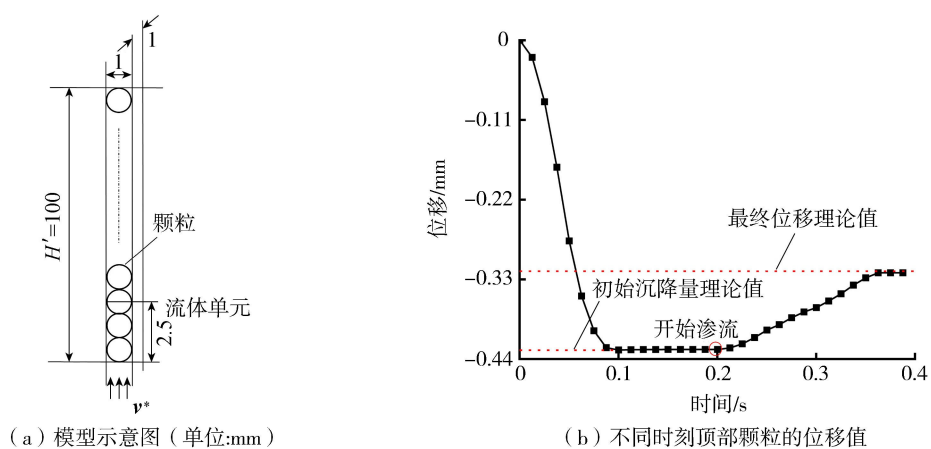


图3 单列球体向上渗流

Fig.3 Single row of spheres seeping upward

3.2%,这可能是三维数值模型考虑了复杂的空间特性导致的。由此可以验证本文方法模拟多颗粒的流固耦合作用是合理的。

3 埋地管线破损-漏土诱发地面塌陷模拟

3.1 耦合模型建立

在离散元分析中,若采用1:1足尺模拟,颗粒数目量级将达千万。为此,拟采用岩土界普遍接受的离心机试验原理进行缩尺模拟^[19-21],相关参数的相似关系见表1(Q 为相似比)。选用10g离心加速度,以此模拟10倍(即 $Q=10$)模型尺寸的实际工况。

当模型的尺寸与颗粒平均粒径之比大于30时,可以忽略模型中颗粒粒径的尺寸效应^[19]。因此,对本次模拟的颗粒粒径进行扩大处理,以保证准确性的同时减少计算的工作量。根据试算获得的地面塌陷影响范围确定模型尺寸,在此基础上选取最小颗粒半径为2.1 mm,最大颗粒半径为5.2 mm。本文涉及各参数取值在文献

[14]基础上调整,使微观参数能够准确反映土体的宏观特性。模型颗粒参数取值:颗粒密度为2650 kg/m³,法向刚度和切向刚度分别为15、10 MN,摩擦系数为0.5,阻尼系数为0.1,法向黏结强度和切向黏结强度均为12 kPa;模型流体参数:动力黏度为1.01×10⁻³ Pa·s,流体密度为1000 kg/m³,流体单元数量500个。

经过试算,管线破损诱发的地层损失主要发生于管线上方,管线下方土体相对稳定,因此在模型底部墙体上“挖洞”来模拟破损管线,该方法既减少了位于稳定区的颗粒,提高了计算效率,又便于观察地层损失和空洞形成、扩展发育过程。本文选取单一砂土层和上覆黏土层两种工况,所建立模型如图4所示,全模型尺寸为4 m×4 m×1.5 m,共生成了63 727个颗粒(本算例具有对称性,如需进一步提高计算效率,可采用对称半模型分析)。选取破损口半径为颗粒平均粒径的1.8倍,使用Rhino 7.0软件进行破损管线建模,将其作为墙体单元导入PFC模型中。假定模型侧向边界为不透水边界,模型顶部为流入边界,流入边界压力为5 kPa,破损口处为流出边界,水压固定为0 kPa。

3.2 单一砂土地面塌陷过程模拟

图5为管线破损-漏土诱发单一砂土层地面塌陷的过程。对地层模型沿 z 向分组,以便于观察颗粒损失现象,将地表处的颗粒划分为4部分,以更好地反映地面塌陷情况。由于破损口的存在,管线上方土体颗粒不断落入管线内部流失,在地面处形成不断扩展的沉降槽,颗粒的运动轨迹从初始位置向破损口近似形成一条直线。随着计算时间的增加,土体颗粒不断落入沉降槽流失,逐渐形成了切斜的滑移面, x 向和 y 向地层扰动范围不断扩大,沉降槽大致呈漏斗状。

表1 离心机模型相似关系

Table 1 Similarity relationship of centrifuge model

物理量	相似关系	物理量	相似关系
模型长度	1/ Q	孔隙比	1
位移	1/ Q	液体密度	1
加速度	Q	黏度系数	1
体力	Q^3	渗透系数	Q
颗粒密度	1	应力	1
颗粒尺寸	1/ Q	时间(固结)	1/ Q^2

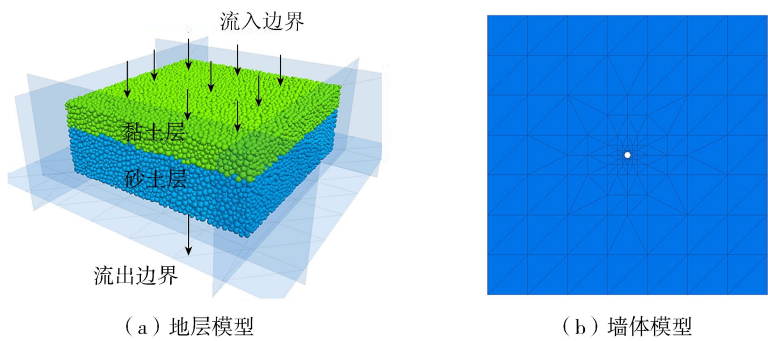


图 4 地层模型和墙体模型

Fig.4 Stratum model and wall model

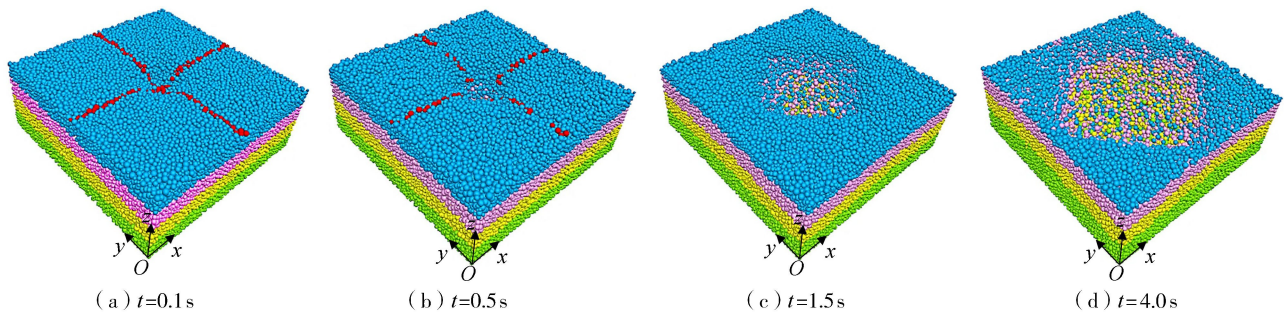


图 5 单一砂土层地面塌陷过程

Fig.5 Ground collapse process diagram of a single sand layer

图 6 为 0.5 s 渗流时间内 $y=2\text{ m}$ 平面上单一砂土层塌陷过程中孔隙率变化情况。在渗流开始阶段,颗粒在渗流力作用下向破损口方向移动,虽然此时细颗粒多聚集于破损口上方,但孔隙率主要由骨架颗粒的分布决定,破损口上方区域的骨架颗粒较稀疏,因此孔隙率较初始状态有所增大。随着计算的进行,颗粒不断流失,在破损口正上方的地面处最先形成了沉降槽并逐渐扩大,孔隙率也接近 1,这与图 5 观察到的地面塌陷

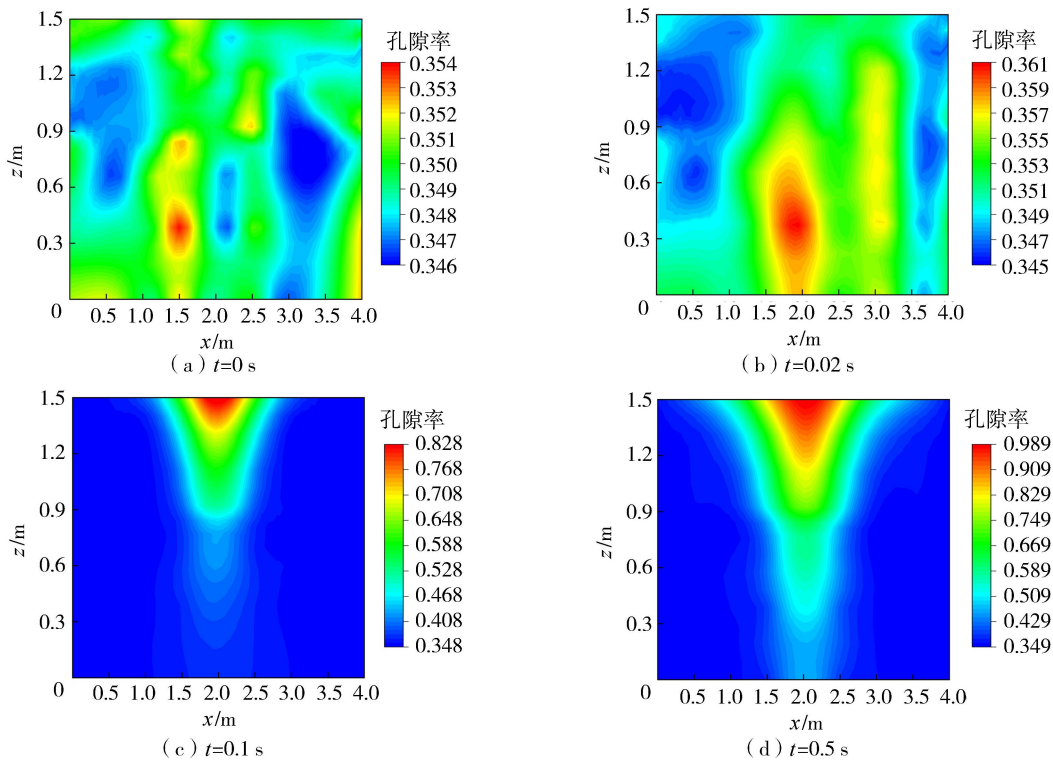


图 6 单一砂土层地面塌陷过程孔隙率云图 ($y=2\text{ m}$)

Fig.6 Nephogram of porosity during ground subsidence process of a single sand layer ($y=2\text{ m}$)

过程是一致的。

3.3 上覆黏土层地面塌陷过程模拟

由图 7 可知,最初阶段土体颗粒在重力和渗流力作用下从底部破损口处逐渐流失,但与单一砂土层工况不同的是,此时地面并没有受到扰动,一直保持稳定。随着颗粒损失的增大,地面出现轻微沉降(图 7(b)),随后地面突然发生塌陷,在地表出现圆柱形的空洞(图 7(c)),随着计算的进行,地表沉降槽宽度、深度均增大,塌陷空洞不断发育最终呈碗形。

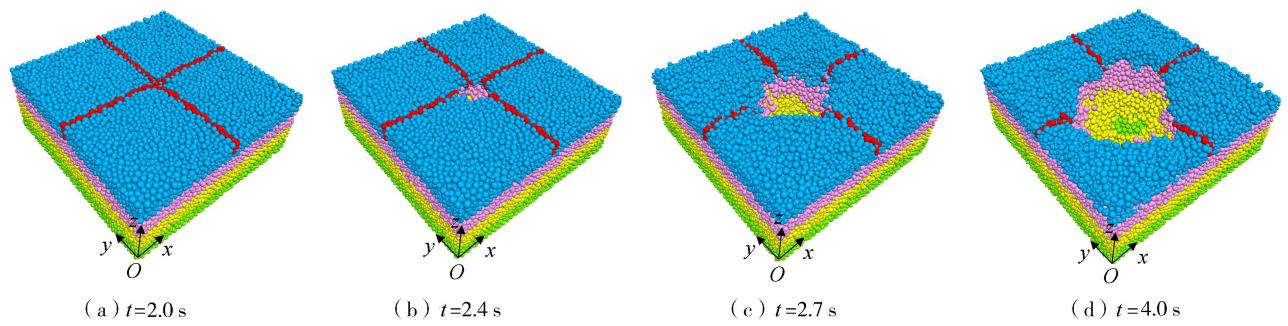


图 7 上覆黏土层地面塌陷过程

Fig.7 Ground collapse process diagram of overlying clay layer

上覆黏土层地面塌陷孔隙率的变化情况与单一砂土层不同之处在于地面塌陷之前最大孔隙率出现于破损口正上方的土层交界处(图 8(b)),这是由于砂土颗粒的流失不会直接导致具有黏结力的黏土层塌陷,而是在其交界处形成了空洞。图 8(c)(d)显示了空洞逐渐扩张到一定体积时才会发生地面塌陷,此时形成了贯通至地表的土体流失通路。

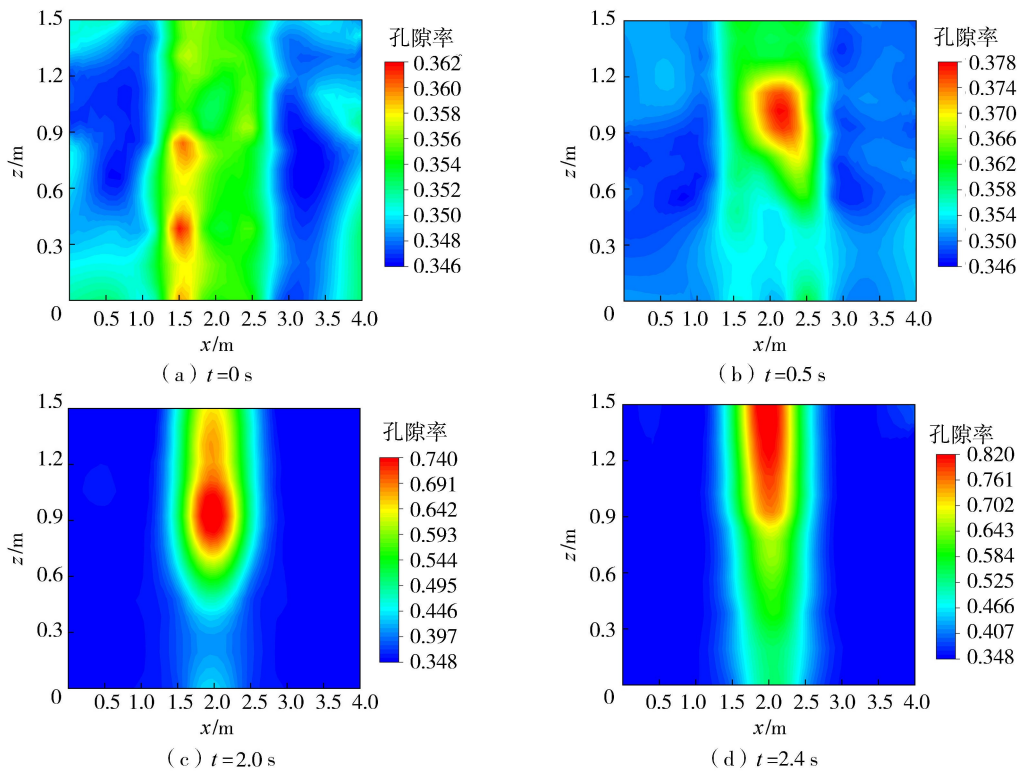


图 8 上覆黏土层地面塌陷过程孔隙率云图($y=2\text{ m}$)

Fig.8 Nephogram of porosity during ground subsidence process of overlying clay layer ($y=2\text{ m}$)

3.4 讨论与分析

由于管线破损-漏土诱发地面塌陷受到多种因素影响,本文主要考虑管线埋深(H)、破损口半径(R)和水压(i)的影响,具体参数取值见表 2。

3.4.1 单一砂土层地面塌陷

为了探究颗粒流失的发展规律,定义颗粒损失率(L)为模型颗粒损失数与模型初始颗粒数的比值。由图 9 可知,地面沉降从沉降槽中心至两侧逐渐减小。随着颗粒损失率的增大,各位置地面沉降值均增大,当颗粒损失率小于 3.79% 时,沉降槽发展以纵向为主,中心处最大沉降值迅速增大,达到了 0.97 m。之后最大沉降值增速变缓,同时水平影响范围不断扩大,当颗粒损失率达到 9.36% 时,最大沉降值已达到 1.2 m,水平影响范围也扩大到 3.4 m。

图 9(b) 显示了 $y=2\text{ m}$ 处不同颗粒损失率对应的上覆黏土层地面沉降情况。在颗粒损失率为 0.47% 左右时,仅有破损口附近的砂土颗粒流失,上覆黏土层几乎不受影响,沉降值可以忽略不计。颗粒损失率达到 1.78% 时,地面突然发生塌陷,沉降槽内的地面沉降发生突变。随后由于水-土流失通道的形成,各黏土颗粒在黏结作用下加速流失,沉降槽纵向扩展明显。颗粒损失率达到 5.05% 后,沉降槽以水平扩展为主,当颗粒损失率为 9.36% 时,最大沉降已达到 1.38 m,水平影响范围也扩大到 3.6 m。与图 9(a) 不同的是,上覆黏土层地面沉降的变化曲线并未呈现关于沉降槽中心的对称性,这是黏土颗粒自身在位移时会随机携带周围颗粒一起流失造成的。

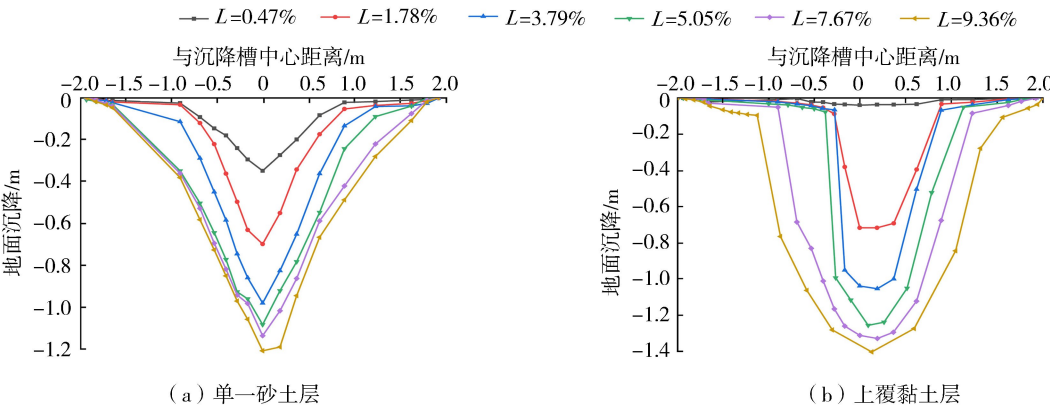


图 9 不同颗粒损失率的地面沉降 ($y=2\text{ m}$)

Fig. 9 Surface settlement values of different particle loss rates ($y=2\text{ m}$)

图 10 为不同埋深下不同水压和破损口半径引起的颗粒损失率随时间的变化情况。根据颗粒损失速率大小可将整个塌陷过程划分为 3 个阶段:颗粒运移阶段、快速损失阶段和沉降槽缓慢扩展阶段。在颗粒运移阶段,土体颗粒在突然施加渗流力后短时间内会产生渗流力方向上的位移,虽然渗流力的大小和颗粒半径呈正相关关系,但骨架颗粒由于半径较大,允许其运移的空间较小,仅产生轻微的位移或扰动。而细颗粒发生类似管涌现象时^[22],可以穿过颗粒的孔隙发生较大的位移,同时有少部分细颗粒会通过破损口流失。在快

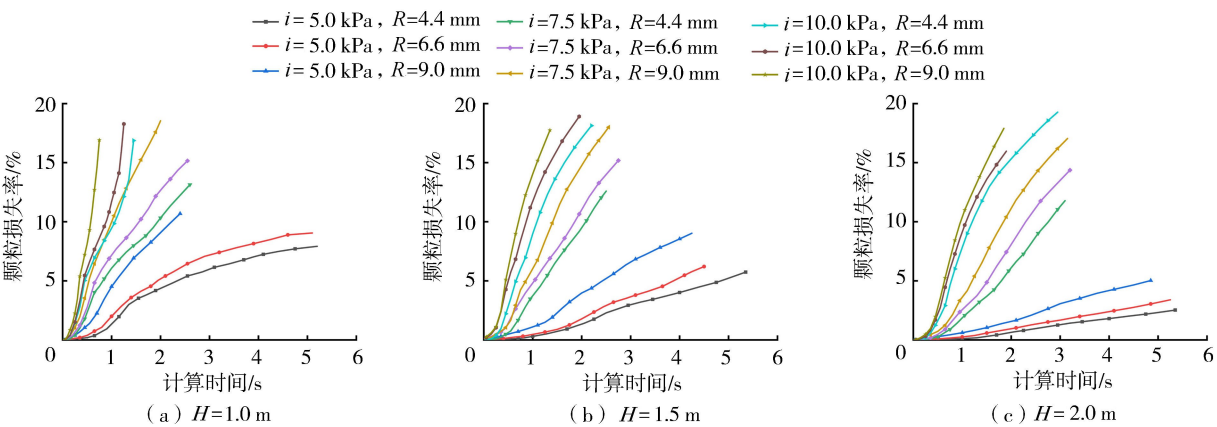


图 10 单一砂土层不同埋深下颗粒损失率变化

Fig. 10 Changes in particle loss rate of a single sand layer under different burial depths

速损失阶段,细颗粒在重力和渗流力耦合作用下穿过骨架颗粒间孔隙到达管线破损口处,破损口无法让所有处于侵蚀状态的颗粒立刻流失,其上覆土体会不断补充至破损口上方形成堵塞,导致地表出现沉降槽。细颗粒的迁移破坏了土体的原有内部结构最终形成了贯穿的水-土流失通道,进而加剧了细颗粒的流失。当管线上方土体逐渐流失后,两侧坡体颗粒开始流失,这部分颗粒到达破损口的路径更长、速度更慢,缓慢扩展阶段主要表现为沉降槽的水平扩展。由于细颗粒的大量流失且水-土流失通路已经形成,一些骨架颗粒会在渗流力作用下向破损口移动,这部分颗粒到达破损口处可能无法立即流出,使得颗粒流失速率下降。因此在第3阶段,颗粒迁移、流失和沉降槽扩展速度均呈下降趋势。

随着水压、破损口半径的增加和埋深的减小,颗粒损失速率逐渐增大。具体而言,颗粒损失率对于水压的变化最敏感,计算时间为2.0 s时,对于 $R=6.6\text{ mm}$ 、 $H=1.5\text{ m}$ 的工况, $i=7.5$ 、 10.0 kPa 比 $i=5.0\text{ kPa}$ 对应的颗粒损失率分别高了7.64%和16.81%。破损口半径也是影响颗粒流失速度的因素之一,计算时间为2.0 s时,对于 $i=5.0\text{ kPa}$ 、 $H=1.5\text{ m}$ 的工况, $R=6.6$ 、 9.0 mm 比 $R=4.4\text{ mm}$ 所对应的颗粒损失率分别高了0.42%和2.6%。随着埋深即上覆土层厚度的增大,地层受扰动发生应力重分布后形成自然平衡应力拱的地层空间越大,颗粒在应力拱的形成—破坏—形成循环过程中逐渐流失^[23],加之埋深越大颗粒运移距离越长,颗粒损失速率越小。计算时间为2.0 s时,对于 $i=7.5\text{ kPa}$ 、 $R=6.6\text{ mm}$ 的工况, $H=1.0$ 、 1.5 m 比 $H=2.0\text{ m}$ 对应的颗粒损失率分别高了4.64%和2.8%。

在 $i=5.0\text{ kPa}$ 、 $H=1.5\text{ m}$ 的工况下,为了研究不同破损口形状对颗粒损失的影响,选取了以圆形破损口直径为边长的正方形破损口和与圆形破损口等面积椭圆形破损口,颗粒损失率的变化情况如图11(a)所示。与破损口半径相比,形状的改变对颗粒损失速率的影响并不显著。在其他条件相同情况下,正方形破损口的边长和圆形直径相同,前者破损口面积较大,对应的颗粒损失速率较大。而椭圆形破损口虽然和圆形破损口面积相同,但椭圆形破损口一次性通过颗粒数量要明显少于圆形破损口,其相应的颗粒损失速率是最小的。图11(b)为在 $i=5.0\text{ kPa}$ 、 $H=1.0\text{ m}$ 的工况下,埋地管线右侧破损与正上方破损导致的两种不同渗流方向的颗粒损失情况。破损口位置对颗粒损失的影响同样不显著。埋地管线正上方破损的工况中,土体颗粒在重力和渗流力的合力下发生运移逐渐流失,而破损口在管线右侧条件下,土体颗粒仅在渗流力作用下流失,因此前者的颗粒损失速率略大于后者。

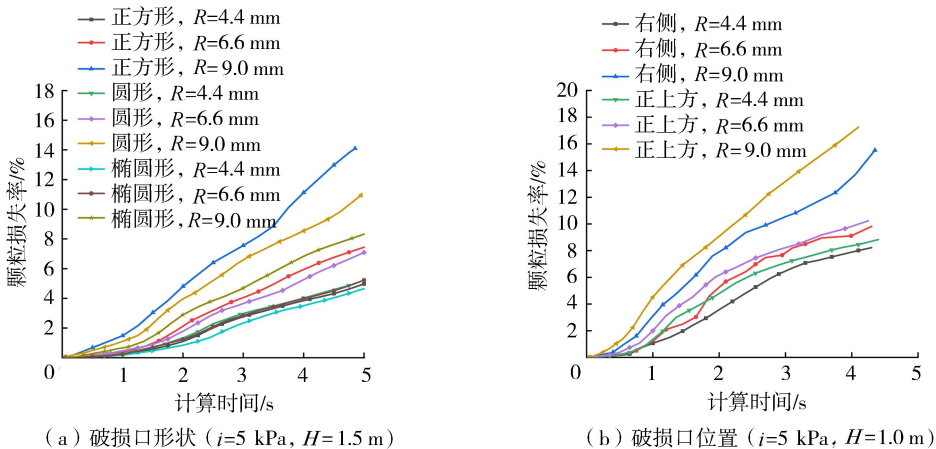


图 11 单一砂土层破损口形状和位置对颗粒损失率的影响

Fig. 11 Influence of damage opening shape and location on particle loss rate of a single sand layer

为了更好地反映颗粒在塌陷各个阶段的微观变化情况,图12~14给出了不同管线埋深、水压和破损口半径下颗粒配位数的演变过程。采用配位数的频率分布^[24]反映各个阶段颗粒损失特性。不同工况下的配位数呈现了相似分布规律。配位数不超过2的颗粒在颗粒运移阶段,质量分数迅速减小,这是因为配位数小的颗粒一部分被侵蚀,从破损口处流失,另一部分颗粒迁移后与其他颗粒接触,导致配位数增加。在快速损失阶段和沉降槽缓慢扩展阶段,由于破损口半径有限,处于侵蚀状态的颗粒无法及时排除,配位数不超过2的颗粒质量分数不断增大。配位数介于3~5的颗粒质量分数在整个塌陷过程并无明显变化,这可能是因为这些颗粒介于稳定和不稳定之间的临界状态,不断有其他配位数的颗粒补充。对于配位数不小于6的颗粒,在颗粒运移阶段先增加随后在快速损失阶段和沉降槽缓慢扩展阶段呈现下降趋势,这是因为在颗粒运移

阶段不断有侵蚀状态的颗粒与其接触导致配位数较大的颗粒数量增加,随着颗粒损失进行,侵蚀状态的颗粒不断被排除,导致配位数较大的颗粒质量分数减小。

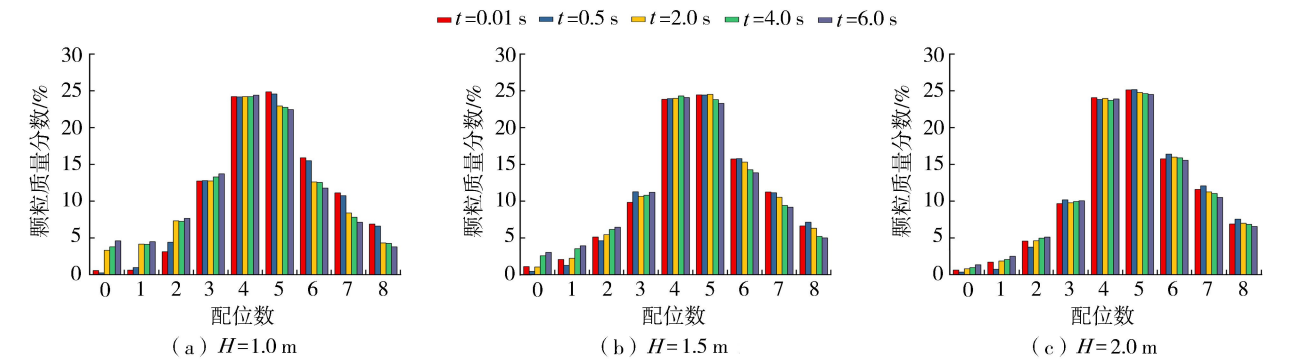


图 12 不同管线埋深下塌陷过程的配位数变化

Fig. 12 Variation of coordination number during collapse with different pipeline burial depth

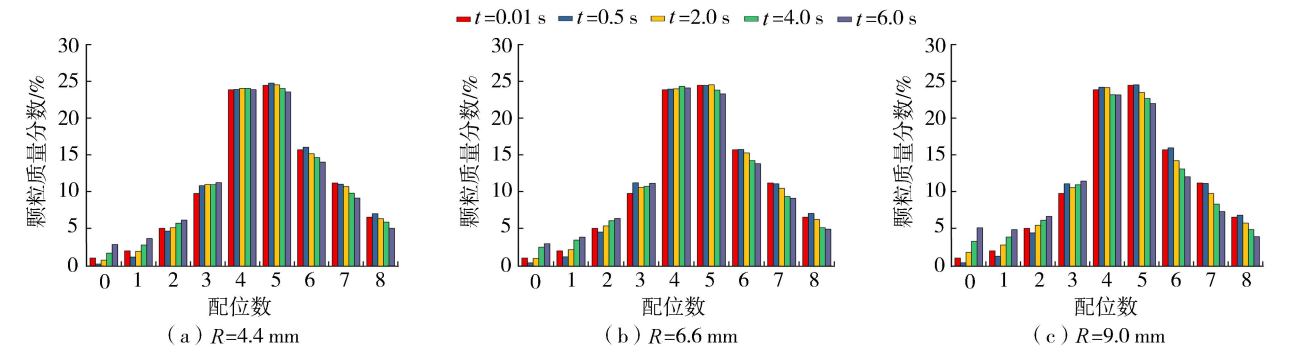


图 13 不同破损口半径下塌陷过程的配位数变化

Fig. 13 Variation of coordination number during collapse with different radius of the opening

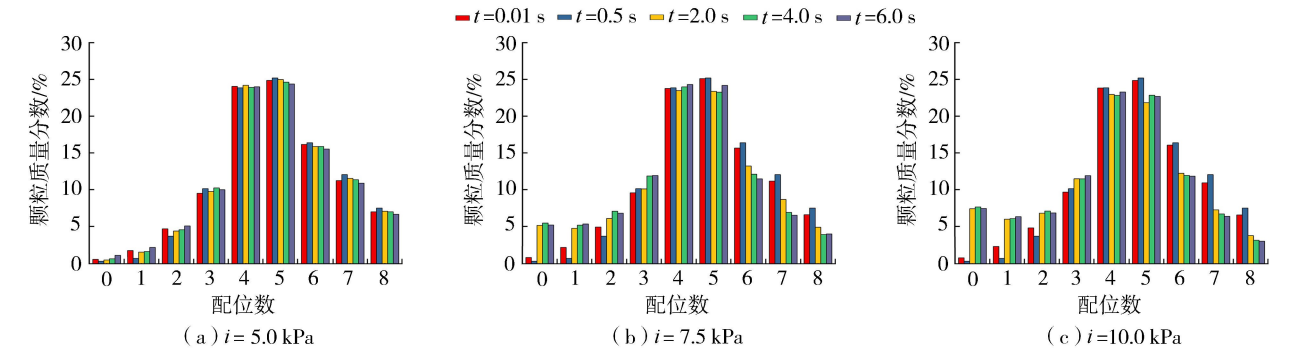


图 14 不同水压下塌陷过程的配位数变化

Fig. 14 Variation of coordination number during collapse with different water pressure

由于管线埋深增加意味着土体颗粒总数的增加,处于侵蚀状态配位数不超过 2 的颗粒在流体作用下不断与骨架颗粒接触使得质量分数有所减小,相应的配位数较大的颗粒质量分数有所增大(图 12)。由图 13 可知,对于破损口半径 $R=9.0\text{ mm}$ 的工况,其配位数较大的颗粒质量分数较大,配位数为 0 和 1 的颗粒质量分数较小,这是因为破损口半径已经达到最大颗粒半径的 1.7 倍,骨架颗粒损失概率高导致了其配位数较大的颗粒质量分数要小于其他两种工况。值得注意的是,大颗粒损失会滞缓细颗粒的流失,随着渗流的持续进行,越来越多细颗粒处于侵蚀状态而无法从破损口流出。在 $t=6.0\text{ s}$ 时, $R=9.0\text{ mm}$ 的工况处于侵蚀状态的低配位数颗粒质量分数明显大于 R 为 4.4、6.6 mm 工况。水压的增大会使得颗粒所受的渗流力增大,从而更容易使颗粒处于侵蚀状态,如图 14 所示,配位数较小的细颗粒在 2.0 s 后迅速增加,并且水压越大现象越明显。

3.4.2 上覆黏土层面地面塌陷

上覆黏土层是目前学者常研究的工况之一^[25]。由于空洞形成、发育均在地下完成,地面的存在使得该

过程具有隐蔽性,直到空洞贯通到地面才可视化。为了更好地观察空洞形成、发育过程,选取平面 $y=2\text{ m}$ 处颗粒投影(图 15)。破损口附近的砂土颗粒表现出和第 3.4.1 节相同的运移规律,而黏土层由于颗粒间的黏结作用,具有一定的自稳性,因此在土层交界处形成了地层空洞,如图 15(a) 所示,地表无明显沉降;图 15(b) 显示了砂土颗粒逐渐流失,地表黏土层在自身重力和渗流力耦合作用下失稳的情况,此时的黏土层有轻微扰动但没有形成大规模塌陷;图 15(c) 为空洞贯通阶段,随着地层空洞体积逐渐增大,黏结力不足以继续保持地层的稳定,在地表处表现为地面的突然塌陷,沉降槽呈圆柱形;之后沉降槽的水平影响范围不断扩大,如图 15(d) 所示。

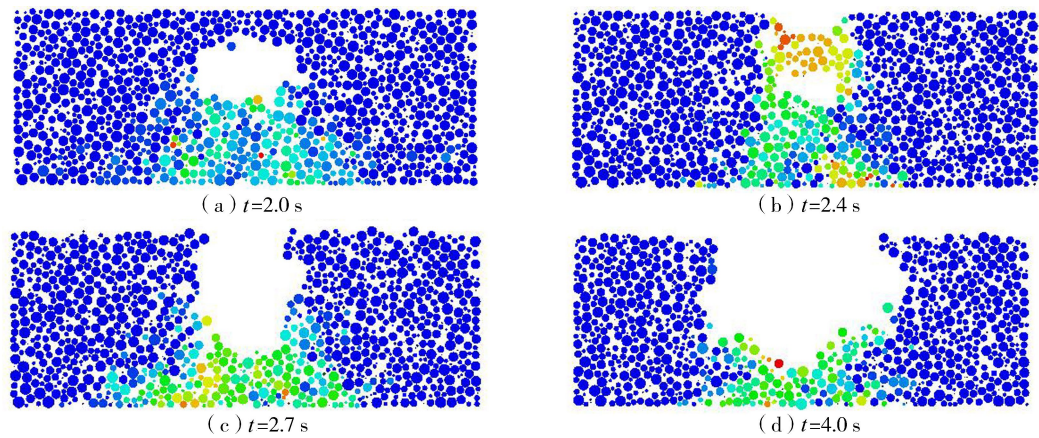


图 15 平面 $y=2\text{ m}$ 颗粒投影

Fig. 15 Particle projection diagram on the plane at $y=2\text{ m}$

图 16 给出了上覆黏土层厚度分别为 0.5、1.0、1.5 m,不同水压和破损口半径条件下的颗粒损失情况。与单一砂土层类似,根据颗粒损失速率大小同样可将整个塌陷过程划分为 3 个阶段:颗粒运移阶段、快速损失阶段和沉降槽缓慢扩展阶段。对于上覆黏土层工况,破损口半径是地层保持稳定的决定性因素。破损口半径为 4.4 mm 时,黏土颗粒在流失时会携带周围颗粒,过小的破损口尺寸使得黏土颗粒无法通过,阻碍了颗粒流失进而不会产生地面塌陷。破损口半径满足黏土颗粒通过时,水压是影响颗粒流失速度的重要因素。计算时间为 1.5 s 时,对于破损口半径为 6.6 mm、上覆黏土层厚度为 0.5 m 的工况,水压为 7.5、10.0 kPa 比 5.0 kPa 对应的颗粒损失率分别高了 9.42% 和 15.57%。

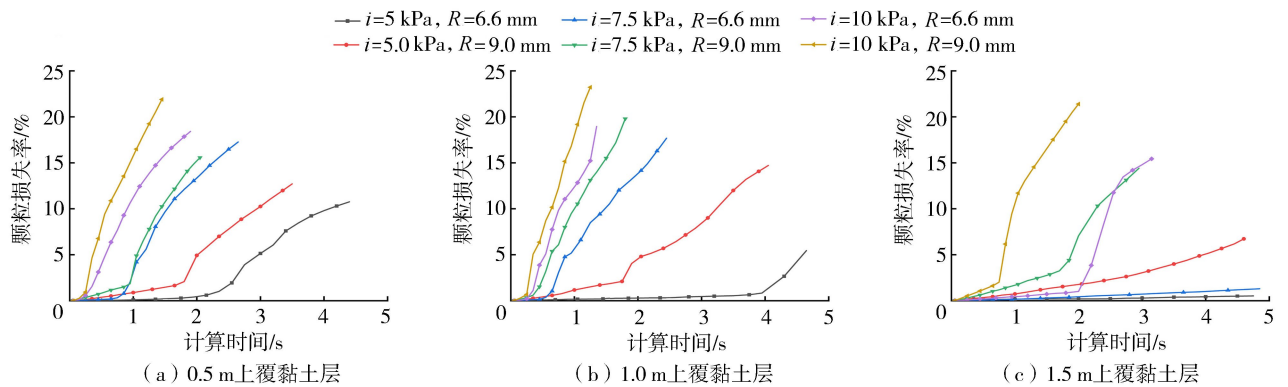


图 16 不同上覆黏土层厚度的颗粒损失率变化

Fig. 16 Changes in particle loss rate with different thicknesses of overlying clay layer

值得注意的是,上覆黏土层工况的颗粒运移阶段持续时间要远大于单一砂土层,这是因为黏土颗粒的黏结作用使得整个黏土层共同承担渗流力的作用,减少了单个颗粒位移,这种现象在水压较低时尤其明显。颗粒运移阶段持续时间与上覆黏土层厚度呈正相关关系,与水压、破损口半径呈负相关关系。

4 结 论

a. 管线破损-漏土诱发单一砂土层颗粒损失使得在地面处形成了沉降槽,颗粒在渗流力和重力作用下

逐渐通过破损口流失使得沉降槽不断扩展。而上覆黏土工况首先会在砂土-黏土交界处形成空洞,随后因空洞体积不断增加,上覆黏土层无法继续保持稳定导致塌陷。

b. 颗粒损失率和地面沉降值呈正相关关系,颗粒损失数越多,地面沉降值越大。砂土地层地面沉降曲线具有对称性,而上覆黏土层由于黏土颗粒产生位移时会随机带动周围颗粒一起落入破损管线内,沉降曲线并不是以沉降槽中心为对称轴。

c. 以无量纲化指标颗粒损失率的变化情况为依据,管线破损诱发单一砂土层地面塌陷过程分为3个阶段:颗粒运移阶段、快速损失阶段和沉降槽缓慢扩展阶段。配位数和孔隙率在每个阶段呈现了相应的变化。水压、管线埋深和破损口半径对地面沉降影响依次减弱,管线破损口形状和位置对管线破损诱发地面塌陷影响较小。计算时间为2.0 s时,在破损口半径为0.006 m、埋深为1.5 m的工况下,水压为7.5、10.0 kPa比5.0 kPa对应的颗粒损失率分别高了7.64%和16.81%。

d. 管线破损诱发上覆黏土层地面塌陷过程与单一砂土层类似,也可划分为颗粒运移阶段、快速损失阶段和沉降槽缓慢扩展阶段。不同的是,黏土层颗粒具有黏结作用,其颗粒运移阶段持续时间要远大于单一砂土层,且破损口半径是地层保持稳定的决定性因素。

参考文献:

- [1] LI Xiaojiao, CHEN Rui, LIU Leilei, et al. A non-Darcy flow CFD-DEM method for simulating ground collapse induced by leakage through underground pipeline defect[J]. Computers and Geotechnics, 2023, 162: 105695.
- [2] 张成平, 张顶立, 王梦恕, 等. 城市隧道施工诱发的地面塌陷灾变机制及其控制[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊1): 303-309. (ZHANG Chengping, ZHANG Dingli, WANG Mengshu, et al. Catastrophe mechanism and control technology of ground collapse induced by urban tunneling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup1): 303-309. (in Chinese))
- [3] ZHENG Gang, DAI Xuan, DIAO Yu, et al. Experimental and simplified model study of the development of ground settlement under hazards induced by loss of groundwater and sand[J]. Natural Hazards, 2016, 82: 1869-1893.
- [4] 姬建, 夏嘉诚, 张哲铭, 等. 污水管线渗漏诱发地面下陷数值分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 406-412. (JI Jian, XIA Jiacheng, ZHANG Zheming, et al. Numerical analysis of ground subsidence induced by leakage of sewage pipeline [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 406-412. (in Chinese))
- [5] GUO Shuai, JIANG Yuhao, TANG Yao, et al. Experimental study on the soil erosion through a defective pipe under the cyclic infiltration-exfiltration flow[J]. Transportation Geotechnics, 2023, 42: 101085.
- [6] 刘成禹, 陈博文, 林炜, 等. 地下管道破损诱发沉降的预测模型及试验验证[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 416-424. (LIU Chengyu, CHEN Bowen, LIN Wei, et al. Prediction model for settlement caused by damage of underground pipelines and its experimental verification[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(3): 416-424. (in Chinese))
- [7] KAROU T, JEONG S Y, JEONG Y H, et al. Experimental study of ground subsidence mechanism caused by sewer pipe cracks [J]. Applied Sciences, 2018, 8(5): 8050679.
- [8] ZHOU Haotong, LIU Changqing, WANG Guihe, et al. Study on drilling ground collapse induced by groundwater flow and prevention based on a coupled CFD-DEM method[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2022, 26(5): 2112-2125.
- [9] LONG Yingying, TAN Yong. Soil arching due to leaking of tunnel buried in water-rich sand[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 95: 103158.
- [10] 叶治, 付岸然, 刘华北. 盾构隧道拱顶渗流侵蚀对地表沉降及结构变形的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 279-287. (YE Zhi, FU Anran, LIU Huabei. Effect of seepage erosion of tunnel crown on ground settlement and structural deformation in shield tunnelling[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 279-287. (in Chinese))
- [11] 张小玲, 王晓丽, 杜修力, 等. 管线渗漏引发地面塌陷的 DEM-CFD 耦合数值模拟[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(2): 176-183. (ZHANG Xiaoling, WANG Xiaoli, DU Xiuli, et al. DEM-CFD coupled numerical simulation of ground subsidence caused by pipeline leakage[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(2): 176-183. (in Chinese))
- [12] 蔡剑韬, 付栋, 李婧铭, 等. 上海浅部砂层管道渗漏引发塌陷的数值模拟[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1980-1987. (CAI Jiantao, FU Dong, LI Jinming, et al. Numerical simulation of ground collapse induced by pipeline leakage in shallow sand layer of Shanghai Area [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1980-1987. (in Chinese))
- [13] CUI Yifei, NOURI A, CHAN D, et al. A new approach to DEM simulation of sand production[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2016, 147: 56-67.

[14] YIN Yanzhou, CUI Yifei, TANG Yao, et al. Solid-fluid sequentially coupled simulation of internal erosion of soils due to seepage [J]. Granular Matter, 2021, 23(2): 20. 1 ~ 20. 14.

[15] TANG Yao, CHAN D H, ZHU D Z. A coupled discrete element model for the simulation of soil and water flow through an orifice [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2017, 41(14): 1477-1493.

[16] 王越林, 陆烨. 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[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(2): 60-67. (WANG Yuelin, LU Ye. CFD-DEM simulation of disaster mechanism of pavement collapse caused by pipeline leakage in urban areas[J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2021, 43(2): 60-67. (in Chinese))

[17] 石崇, 张强, 王盛年. 颗粒流(PFC5.0)数值模拟技术及应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.

[18] SUZUKI K, BARDET J P, ODA M, et al. Simulation of upward seepage flow in a single column of spheres using discrete-element method with fluid-particle interaction[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(1): 104-109.

[19] 张刚. 管涌现象微观机理的模型试验与颗粒流数值模拟研究[D]. 上海: 同济大学, 2007.

[20] LI Yuqi, FANG Yu, YANG Zhaoyu. Two criteria for effective improvement depth of sand foundation under dynamic compaction using discrete element method[J]. Computational Particle Mechanics, 2023, 10(3): 397-404.

[21] 戴轩, 郑刚, 程雪松, 等. 基于 DEM-CFD 方法的基坑工程漏水漏砂引发地层运移规律的数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(2): 396-408. (DAI Xuan, ZHENG Gang, CHENG Xuesong, et al. Numerical simulation of ground movement induced by leakage of groundwater and sand in excavations based on the DEM-CFD method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(2): 396-408. (in Chinese))

[22] 陈亮, 滕耀宗, 蔡国栋, 等. 变水头下管涌细颗粒迁移试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(5): 82-88. (CHEN Liang, TENG Yaozong, CAI Guodong, et al. Experimental study on the migration of fine particles in piping under variable water head[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(5): 82-88. (in Chinese))

[23] JI Jian, WANG Tao, ZHANG Tong, et al. DEM analysis of dynamic evolutions of lateral soil arching in sandy soil[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2023, 149(6): 04023033.

[24] 徐靖, 叶华洋, 朱晟. 粗粒料颗粒破碎三维离散元模型及其在密度桶试验中的应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 127-134. (XU Jing, YE Huayang, ZHU Sheng. Three-dimensional discrete element model of coarse particle breakage and engineering application in density barrel test[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(4): 127-134. (in Chinese))

[25] 陈胜, 周旭辉, 吴勇信. 上覆黏土层条件下考虑空间变异的砂土地基地震液化可靠度研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 121-126. (CHEN Sheng, ZHOU Xuhui, WU Yongxin. Study on reliability of seismic liquefaction under the condition of overlying clay layer considering the spatial variability of sandy soil[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(3): 121-126. (in Chinese))

(收稿日期: 2023-10-25 编辑: 刘晓艳)