

【土木建筑工程 / Architecture and Civil Engineering】

管线渗漏源差异对砂土地面塌陷影响的量化分析

阮春喜¹, 朱苗苗², 王一兆³, 高燕⁴

1) 广州市交通运输局, 广东广州 510630; 2) 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210023; 3) 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东广州 510010; 4) 中山大学地球科学与工程学院, 广东珠海 510082

摘要: 地面塌陷事故不仅严重阻碍城市高质量发展, 更直接威胁人们的生命财产安全, 地下管线破损是诱发此类事故的主要原因. 针对中国广州市的砂土地层特征, 采用室内试验方法, 模拟了管线渗漏引发地下空洞及地面塌陷的全过程, 探究管线埋藏深度、破损尺寸和供水流速对土体侵蚀过程的影响. 试验结果表明: 地下管线破损后, 水体向外渗漏并侵蚀管周土体, 随着土体颗粒流失, 逐渐在地下形成拱形空洞并不断扩大, 直至土拱结构无法承受自身重量及上部荷载而发生坍塌, 最终形成沙漏形状的侵蚀坑; 增大管线埋深、减小破损口尺寸、降低管内供水流速, 均可有效缩减塌陷规模, 缩短地下空洞及侵蚀坑的形成时间, 降低地面塌陷的危险程度. 研究成果可为城市地面塌陷的预防、治理及相关工程实践提供理论参考与技术支撑.

关键词: 道路工程; 管线渗漏; 地面塌陷; 侵蚀过程; 塌陷规模; 模型试验; 砂土地层; 塌陷影响因素

中图分类号: X45

文献标志码: A

DOI: 10.3724/SP.J.1249.2026.03290

Quantitative analysis of pipeline leakage conditions on ground collapse in sandy soils

RUAN Chunxi¹, ZHU Miaomiao², WANG Yizhao³, and GAO Yan⁴

1) Guangzhou Transportation Bureau, Guangzhou 510630, Guangdong Province, P. R. China

2) School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu Province, P. R. China

3) Guangzhou Metro Design and Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510010, Guangdong Province, P. R. China

4) School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 510082, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: Ground collapse poses a significant challenge to urban infrastructure safety and sustainable development, often resulting in severe economic losses and threats to public safety. Damage to underground pipelines is recognized as one of the primary triggers of such failures. Focusing on sandy soil conditions in Guangzhou, a series of laboratory model tests were conducted to simulate the full evolution process of subsurface cavity formation and subsequent ground collapse induced by pipeline leakage. The effects of key factors, including pipeline burial depth, defect size and internal flow velocity, on the soil erosion process were systematically investigated. The results show that leakage from damaged pipelines induces outward seepage flow, leading to progressive erosion of surrounding soil and particle migration. This process results in the gradual formation of arch-shaped underground cavities, which continuously expand with ongoing soil loss. Collapse occurs when the soil arch can no longer sustain its self-weight and the

Received: 2025-05-30; **Revised:** 2026-03-20; **Accepted:** 2026-03-25; **Online (CNKI):** 2026-05-07

Foundation: Natural Science Foundation of Guangdong Province (2018A0303130154); Research Project of Guangzhou Metro Design & Research Institute Co. Ltd. (20231220-0002)

Corresponding author: Professor GAO Yan (gaoyan25@mail.sysu.edu.cn)

Citation: RUAN Chunxi, ZHU Miaomiao, WANG Yizhao, et al. Quantitative analysis of pipeline leakage conditions on ground collapse in sandy soils [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2026, 43(3): 290-298. (in Chinese)

Open access: This article is licensed under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

<http://journal.szu.edu.cn>



overlying load, ultimately forming characteristic hourglass-shaped erosion cavity. Parametric analysis shows that increasing burial depth, reducing defect size and lowering the flow velocity can effectively decrease the scale of ground collapse and shorten the evolution time of subsurface cavities, thereby mitigating collapse risk. The findings provide a quantitative basis for understanding the mechanisms of pipeline leakage-induced ground collapse and offer theoretical guidance and technical support for the prevention and mitigation of urban subsidence hazards.

Key words: road engineering; pipeline leakage; ground collapse; erosion process; collapse scale; model experiments; sand soil layers; influence factors of collapse

随着经济的快速增长,城市化进程加快,大量地下空间被开发利用,各种市政设施纵横交错。庞大的地下管网承担了城市信息交流、资源运送和防洪疏水等重要任务,是保障城市运行的重要基础设施。随之而来以地面塌陷为代表的各种城市安全隐患也日益突出,引起了广泛的社会关注^[1-2]。城市发生塌陷事故大多与管线的不合理规划以及老化渗漏相关^[3-4]。管线渗漏引起地面塌陷是一个多因素引发的复杂过程,研究其形成机制对预防和治理该种灾害事故具有重要意义。

国内外学者通过不同技术路径分析了引发地面塌陷的影响因素,如依托模型试验,明确了管线渗漏范围^[5]、管内流速、管道埋深、土体初始含水率、缺陷位置^[6]及地层土类型^[7]等对管线泄漏的影响,也有研究借助离散元-流体力学方法和ABAQUS等工具,探究了破损位置与埋深^[8-9]、颗粒形状^[10]、地下水位与地层条件^[11]等对地层变形、空洞演化及渗漏水体扩散的影响规律,以及管线破裂参数^[12]对塌陷的作用效应。另外,地下水流向、水力梯度和土体强度也对地面沉降起到主导作用^[13]。此外,学者们通过多场耦合数值模型、物理试验与模拟结合等方式,揭示了空洞的发育扩展机制、土体流失模式及颗粒流动规律^[14-17],通过阶段划分和特征量化等方式,厘清塌陷各阶段的演化规律^[18],指出管线渗漏初期具有量小、历时久、影响范围广的特点^[19],为灾害预判提供了参考。但目前对渗漏侵蚀与塌陷演化全过程研究的精细化程度不足,对渗漏塌陷演化机制和土体内部侵蚀动态过程的研究欠缺。因此,本研究采用模型试验方法,以广州市砂土地层为研究对象,模拟管线破损渗漏诱发地面塌陷的全过程,探究管线破损后供水流速、埋深和破损尺寸对地面塌陷形成的地下空洞形态的影响规律,分析管线渗漏诱发地面塌陷的规模与作用机制,为地面塌陷的预防治理及相关工程实践提供参考。

1 试验装置与材料

1.1 试验装置

管线渗漏致塌试验模型主要由试验模型箱、供水系统、量测系统及渗漏土体收集系统构成(图1)。试验过程中,通过加压水泵为试验管道提供循环供水,借助流量计对供水流速进行实时测量,同时采用高清摄像机全程记录管线破损渗漏后土体的运移过程。

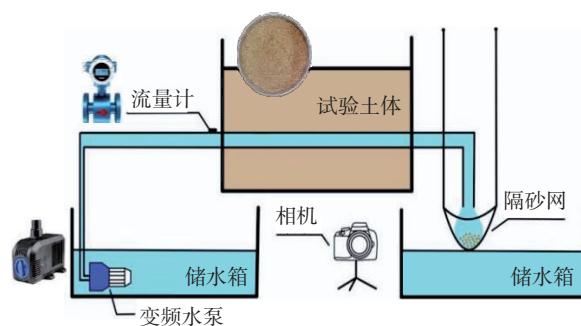


图1 试验模型设计图

Fig. 1 Experimental model design diagram.

试验模型箱采用厚度为10 mm的透明亚克力板制作,内部净尺寸为350 mm×350 mm×350 mm,使用透明材质可直观观测土体流失、地下空洞发育及塌陷形成的全过程。模型箱侧面距箱底150 mm高度处,开设两个直径为20 mm的预留孔,插入直径为20 mm的聚氯乙烯(polyvinyl chloride,PVC)管,用于模拟地下管道。供水系统选用变频水泵,可通过调节水泵档位,实现进水管内水流速与流量的精准调控。量测系统采用电磁流量计,用于测定管内供水的流量与流速,该类型流量计可有效排除管道破损后进入管内的土颗粒对测量结果的干扰,保障试验数据的准确性与有效性。管道末端设置收集网,用于收集经管道破损口流失的土体。

试验供水由变频水泵从蓄水池抽取,水流经管道破损口时,部分水体渗入土体并产生冲蚀作用,

其余水体则沿管道继续流动。被水流冲蚀的土体随水流排出管道,由管道末端的过滤网收集,过滤后的水体回流至蓄水池,实现循环利用。试验过程中,持续观测地下空洞与塌陷的发育演化过程,精准记录各阶段形态变化的关键时间节点。每次试验结束后,记录塌陷坑洞的形态特征与几何尺寸,分别测定土体表面坑洞在垂直于管线、平行于管线两个方向的最大尺寸。同时称量被冲蚀出土样的质量,结合砂土密度,计算侵蚀空洞的实际体积。

1.2 试验材料

试验所用砂土为广州市地层中典型的砂土,试验前经过筛除杂物、烘干等处理,砂土的粒径为 2 mm。试验开始前先封堵模型箱两侧的预留孔,防止在装填的过程中土颗粒从预留孔处渗漏。为保证土体压实程度一致,对填土进行分层压实,每次填土厚度约为 1 cm,并对每层填土表面进行刮毛处理,保证土层间均匀紧密结合。当土体高度达到预留孔孔位时,将预留孔解封,再将模型管道(直径为 20 mm 的 PVC 管)通过模型箱两侧的预留孔插入模型箱中。继续装填土样直至达到试验设计的土层高度。需要指出的是,本模型主要基于几何相似与过程相似原则,试验结果仅适用于分析各因素对塌陷过程的影响规律。实际工程中,建议结合现场应力条件与土层特性进行进一步校核,确定具体值。

2 地下管线埋深对地面塌陷的影响

实际工程建设中,给水供排水管道的埋藏深度与管道直径密切相关。例如,在城市给水系统中常见的供水管道直径为 100~1 200 mm,埋藏深度通常在 800~4 000 mm,而污水处理管道一般具有较大的直径,其埋藏深度的选择亦考虑管道的结构稳定性和防止环境污染等因素。综合考虑实际工程中地下管线埋藏深度与管线直径间的比例关系,以及模型试验箱尺寸、PVC 管道直径、土颗粒直径等多种因素,在探究地下管线埋深这一影响因素时,控制管道破损口尺寸为 1/4 管壁圆周、变频水泵的供水水力条件为 1 档(流速 0.33 m/s),选取了 3 组不同的埋藏深度(h),分别为 1.0 d 、1.5 d 和 2.0 d (d 为管线直径,分别对应模型试验中的管线埋深 20、30 和 40 mm),相应的试验组号分别为 1-1、1-2 和 1-3。

2.1 土体侵蚀过程分析

不同地下管线埋藏深度下,3 组试验中管线破

损引发的管周土体侵蚀演化过程均表现出相似特征,因此,本研究以埋藏深度为 1.5 d 的试验为例,阐述管线渗漏诱发的土体侵蚀发展过程,详情请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S1。

试验开始后,管线内部开始通水,当水流经过管道破损口处时往外渗漏,周围的砂土被渗出的水湿润,形成一定范围的湿润区域。44 s 时管周出现侵蚀空洞,55 s 时观察到侵蚀空洞近似呈拱形,这一过程中砂土表面发生微小的沉降。随着渗水的不断持续,浸润区域不断向两侧扩张,之后侵蚀孔洞大小几乎不发生变化。至 29 min 时,模型箱内土体完全饱和,埋藏管线上方形成水土堆积,隐伏空洞依旧稳定,但土体表面向上移动且有裂隙出现。在 29 min 30 s 时,隐伏空洞上方的土体因完全浸润饱和及水力冲蚀作用,发生突发性失稳破坏,水从破损口冲出,空洞区域向上及两侧突然扩张,砂土流失速度加快,停止供水。至 32 min 时,所形成塌陷坑不再变化,认为此时为最终稳定形态,从模型箱侧壁可明显观察到呈倒锥形的塌陷坑。随着时间的增加,管周土体侵蚀以及砂土表面位移变化如图 2 所示。其中, t 为通水时间; x 为平行管道方向侵蚀坑长度; y 为垂直管道方向侵蚀坑长度。管线 1.5 d 埋深条件下侵蚀坑的最终形态请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S2。由图 S2 可见,塌陷坑长轴约为 12.0 cm,短轴约为 4.5 cm。收集沿管道被冲蚀出的砂土,经烘干后测得其质量约为 71.8 g。

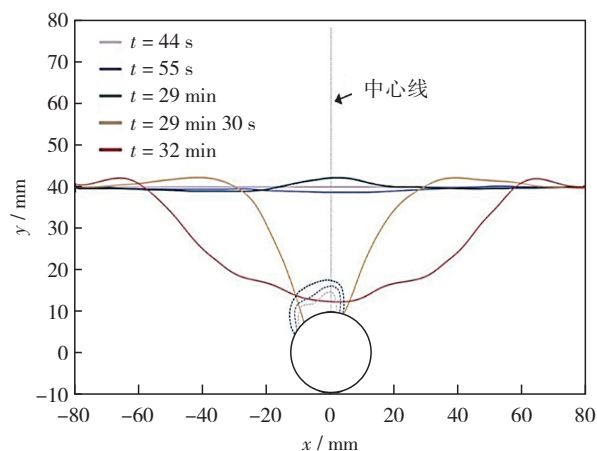


图2 1.5 d 埋深条件下砂土表面及内部流失区域发展过程(虚线代表地下发展,实线代表地表发展)

Fig. 2 Development of surface and internal erosion zones in sandy soils under 1.5 d burial depth conditions (dashed line for underground development, solid line for surface development).

2.2 不同管线埋深下地面塌陷规模与形态

不同埋藏深度条件下管线泄漏最终导致的地面塌陷范围、被水冲蚀流失的砂土质量和塌陷形成所需时间如表1所示. 其中, 水平方向侵蚀坑长轴为垂直于管线轴线方向, 短轴为沿管线轴向方向. 图3为侵蚀坑的最终形态对比图.

表1 砂土层中管线埋藏深度对管线泄漏致塌结果
Table 1 Test results of pipeline burial depth on pipeline leakage-collapse model in sandy soil layer

组号	埋藏深度/mm	垂直管道方向侵蚀坑长度/cm	平行管道方向侵蚀坑长度/cm	流失砂土质量/g	塌陷形成时间/s
1-1	1.0d	12.5	5.5	119.5	84
1-2	1.5d	12.0	4.5	71.8	1 920
1-3	2.0d	2.8	1.8	30.9	2 100

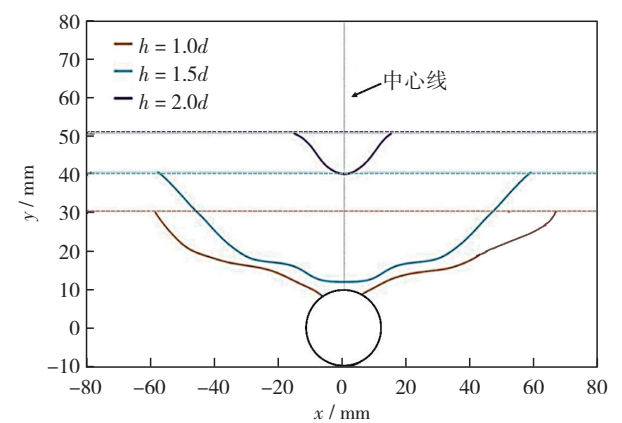


图3 不同埋深条件下侵蚀坑的最终形态对比
Fig. 3 Comparison of final morphology of erosion pits under different burial depth conditions.

从表1可以看出, 当管线埋深为1倍管线直径深度时, 管线泄漏致塌的影响范围约为6倍的管线直径; 在其他条件一致时, 地下管线埋藏越深, 最终形成的塌陷坑范围越小, 最终流失的砂土质量也越少; 侵蚀坑的形态均呈近似倒半圆锥状, 在靠近管线破损口处坡度较缓, 离砂土表面越近坡度越陡, 且随着埋藏深度的增加, 倾角越大, 侵蚀坑越陡; 当管线埋深增大1倍(1.0d→2.0d)时, 塌陷程度减小约76%. 这说明, 随着地下管线埋藏深度的增加, 管线上方的土体越稳定, 砂土位移程度越小, 最终形成塌陷坑的范围越小. 从表1还可以看出, 在其他条件一致时, 地下管线埋藏深度增大1倍, 最终形成塌陷坑所需时间延长24倍. 这说明, 随着地下管线埋藏深度的增加, 管线上方的土体越不易在外力的作用下发生扰动, 侵蚀发展越缓慢.

试验表明, 埋深增大能显著减小塌陷规模并延长形成时间, 主要是因为埋深增加提升了管周土体的原位有效应力, 增大了土颗粒启动侵蚀的水力梯度门槛, 同时更厚的上覆土层促进了稳定土拱的形成与发展, 使隐伏空洞能承载更大荷载且存在更久, 限制了其最终扩展范围. 可见, 渗流路径的延长减慢了土体饱和与强度软化的进程.

3 地下管线破损口尺寸对地面塌陷的影响

根据XU等^[20]的调查, 市政管线的破损类型主要可分为管线环向破裂、管线纵向破裂、承接口破裂和管线壁穿孔破裂. 针对市政管线的常见破损模式, 本研究探讨不同破损口尺寸和纵向破坏间距下, 塌陷形态尺寸与破损口尺寸的关系. 对试验所用的模拟地下管道(PVC管)进行如图4所示的破损口处理, 控制管道埋藏深度为1.0d, 变频水泵的供水水力条件为1档(流速0.33 m/s), 共设置了6种不同的破坏尺寸, 如表2所示.

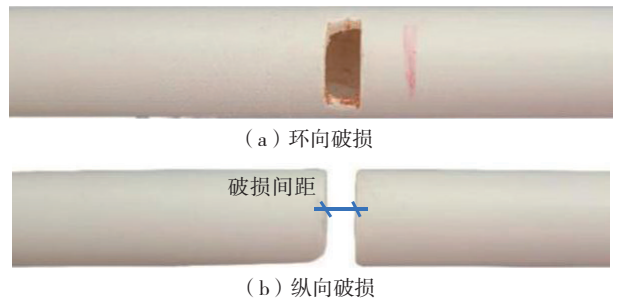


图4 管道破损口处理
Fig. 4 Pipe breakout treatment.

表2 不同管线破损尺寸下泄漏致塌试验方案
Table 2 Pipeline break size on pipeline leakage to collapse modeling test program

类型	组号	埋藏深度/mm	破损情况	水力条件
环向 破损	2-1	1.0d	1/4管壁圆周破损	1档
	2-2	1.0d	2/4管壁圆周破损	1档
	2-3	1.0d	3/4管壁圆周破损	1档
纵向 破损	2-4	1.0d	破损间距 s = 5 mm	1档
	2-5	1.0d	破损间距 s = 10 mm	1档
	2-6	1.0d	破损间距 s = 15 mm	1档

3.1 土体侵蚀过程分析

不同地下管线破损尺寸的6组试验呈现出相似的侵蚀发展过程,本研究以破损尺寸为2/4管壁圆周的环向破损为例进行分析.2/4管壁圆周环向破损条件下的侵蚀发展过程请扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图S3,砂土表面及内部流失区域发展过程见图5.由图S3可见,管道开始输水的瞬间,土体表面由于砂土的快速流失瞬间形成1个较小的锥形塌陷坑,管周土被破损口渗出的水浸润,以管道为中心向两侧扩张.通水后2 s时侵蚀空洞出现,7 s时观察到侵蚀空洞变大,呈半圆形,该过程中上方土体表面有向上的位移,之前形成的锥形坑逐渐恢复至平面.8 s时观察到空洞上方土体失稳破坏,水突然涌出,形成侵蚀坑,停止供水.约12 s时塌陷坑形状稳定,此时从侧壁可观察到呈倒锥形的塌陷坑.由图S3和图5可见,随着水的渗漏,地下管线周围空洞从小到大发展,地面也从小幅度塌陷到上隆,最后形成稳定塌陷坑.最终水平面上,垂直于管线轴向方向的塌陷尺寸约为8.3 cm,沿着管线轴向方向的塌陷尺寸约为2.7 cm,沿管道被冲蚀出的砂土质量约为22.6 g.

3.2 不同管线破损口尺寸下地面塌陷规模与形态

不同破损口尺寸条件下管线渗漏最终导致的塌陷范围、被水冲蚀流失的砂土质量和塌陷形成所需时间如表3所示.由表3可见,地下管线发生环向破损时,破损口尺寸增大2倍,最终形成的塌陷坑的尺寸减小约70%,流失砂土的质量也减少77%,形成最终塌陷坑所需时间缩短88%.其原因可能为大尺寸破损口使得水迅速流出,渗入到土层中,管线周围土的稳定性迅速被破坏,产生变形塌陷达到新的平衡与稳定;较小尺寸的破损口使得水需要较多的时间渗漏到离管线较远处,因此最终影响范围变大,产生的塌陷坑也变大.地下管线发生纵向破

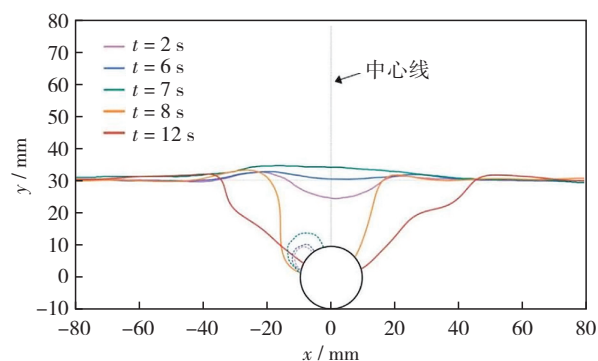


图5 管壁2/4圆周环向破损条件下砂土表面及内部流失区域发展过程(虚线代表地下发展,实线代表表面发展)

Fig. 5 Development of surface and internal loss regions of sand with 2/4 circumferential breakage of the pipe wall (dashed line for underground development, solid line for surface development).

损时,破损距离越大,最终形成的塌陷坑的尺寸、流失砂土的质量均先增加再减小,但其形成最终塌陷坑所需时间越短.将环向破损与纵向破损试验侵蚀坑最终形态进行对比(图6)可知,侵蚀坑的形态近似呈倒半圆锥状,在靠近管线破损口处坡度较缓,离砂土表面越近坡度越陡,且管线破损口越大,最终形成的侵蚀坑倾角越大,坡度越陡.纵向破损渗漏的影响范围明显小于环向破损渗漏.这说明,环向破损口尺寸增大反而导致塌陷范围减小、历时缩短.可能是由于大尺寸破损口作为集中渗流出口,产生了极高的局部水力梯度,引发了对管周土体的爆发性冲刷,致使侵蚀起始近乎瞬时.同时,宽大出口破坏了土拱形成所需的力学边界,使隐伏空洞无法稳定存在,导致破坏模式从渐进扩展转变为以竖向局部溃陷为主,水体侧向浸润范围有限,最终形成陡立而范围集中的塌陷坑,且全过程历时较短.

表3 砂土层中管线破损口尺寸对管线渗漏致塌结果统计

Table 3 Statistical table of test results of pipeline break opening size on pipeline leakage-collapse model in sandy soil layer

组号	破损类型	破损情况	垂直管线方向 侵蚀坑尺寸/cm	平行管线方向 侵蚀坑尺寸/cm	流失砂土 质量/g	塌陷形成 时间/s
2-1	环向破损	1/4管壁圆周破损	11.5	2.5	71.7	84
2-2		2/4管壁圆周破损	8.3	2.7	22.6	12
2-3		3/4管壁圆周破损	3.4	1.7	15.9	10
2-4	纵向破损	破损间距 $s = 5$ mm	3.8	1.9	17.4	9
2-5		破损间距 $s = 10$ mm	4.8	2.3	24.2	7
2-6		破损间距 $s = 15$ mm	3.2	1.8	16.6	3

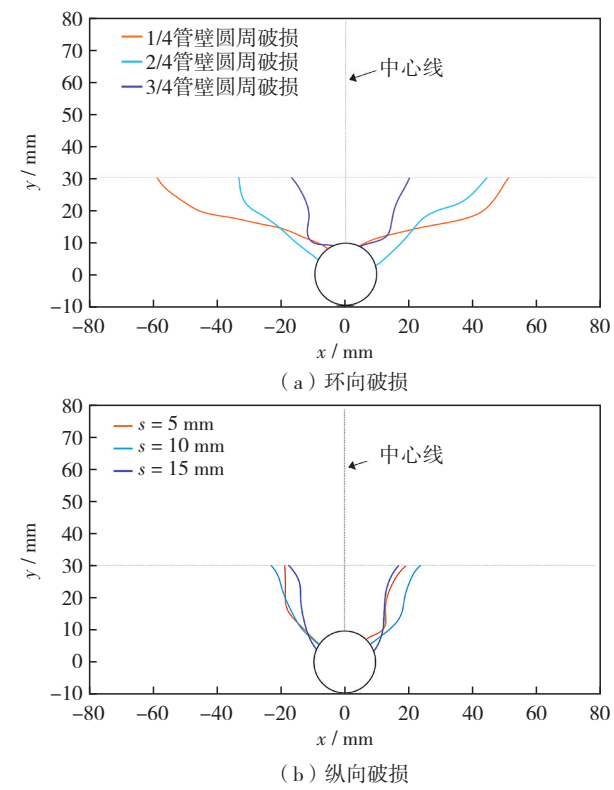


图6 管线不同破损条件下侵蚀坑的最终形态对比

Fig. 6 Comparison of final morphology of erosion pits under different breakout conditions of the pipeline.

4 地下管线内供水流速对地面塌陷的影响

在工程建设中, 地下管线内的流速会有所限制, 流速过慢可能会导致水流质量下降和水质问题, 而流速过快可能会增加管道的水压和能量损失. 地下管线内水的流速由多种因素决定, 包括工程应用需求、管道的直径、材质和耐压能力、液体的性质以及所需的流量等. 综合考虑工程实际情况以及室内模型试验条件, 在分析地下管线流速这一影响因素时, 控制管道破损口尺寸为2/4管壁圆周环向裂缝、管道埋藏深度为 $1.5d$, 水力条件则由变频水泵提供. 试验前用流量计测量变频水泵所能提供的水流速度, 试验时设置3组流速档位, 相应的流速值如表4所示.

4.1 土体侵蚀过程分析

以3档供水流速为例, 试验模型中砂土表面及内部的侵蚀发展如图7所示. 管道开始输水的瞬间, 土体表面由于砂土的快速流失形成1个较小的锥形塌陷坑, 管周土被破损口渗出的水浸润, 以管

表4 管线供水流速对管线渗漏致塌模型试验方案

Table 4 Test program for modeling the effect of pipeline water supply flow rate on pipeline leakage to collapse

组号	埋藏深度/mm	破损情况	水流档位	流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$)
3-1	1.5d	管壁2/4圆周破损	1档	0.33	0.24
3-2	1.5d	管壁2/4圆周破损	2档	0.95	0.69
3-3	1.5d	管壁2/4圆周破损	3档	1.51	1.09

道为中心向两侧扩张. 4 s后砂土快速流失, 出现1个较大的侵蚀空洞, 至21 s时侵蚀空洞范围更大, 呈半圆形. 该过程中随着空洞的变大, 上方土体表面有微小的向上位移, 之前形成的锥形坑逐渐恢复平面. 23 s时空洞上方土体突然失稳破坏, 水涌出, 形成侵蚀坑, 停止供水. 约28 s时塌陷坑形状稳定, 此时从侧壁可观察到明显的塌陷坑. 塌陷坑垂直于管线方向长度约为4.3 cm, 平行于管线方向长度约为1.9 cm. 收集沿管道被冲蚀出的砂土, 经烘干后测得其质量约为34.7 g.

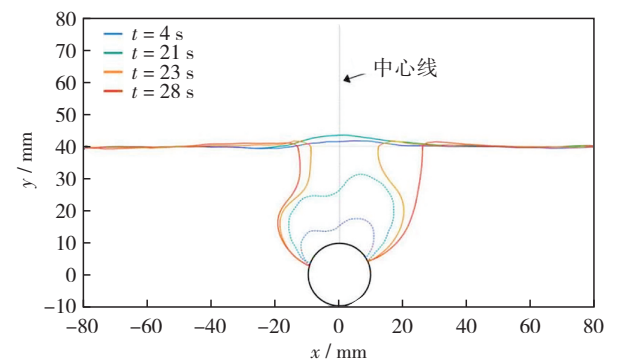


图7 三档流速条件下砂土表面及内部流失区域发展过程 (虚线代表地下发展, 实线代表表面发展)

Fig. 7 Development process of erosion areas on the surface and inside the sand under three flow rate conditions (dashed line for underground development, solid line for surface development).

4.2 不同水流速下地面塌陷规模与形态

不同供水流速下管线渗漏最终导致的塌陷范围、被水冲蚀流失的砂土质量和塌陷形成所需时间统计见表5. 由表5可见, 当供水流速增大3.6倍, 最终形成的塌陷坑的尺寸减小46%, 流失砂土的质量也减小48%, 最终形成塌陷坑所需时间缩短73%.

3 组不同流速侵蚀坑的最终形态对比见图 8。由图 8 可见, 侵蚀坑最终形态范围随供水流速的增大而减小, 说明随着管内供水流速增大, 塌陷范围减小, 历时也显著缩短, 可能是由于流速提高直接增大了渗流出口的水力梯度与渗流力, 使土颗粒移动速率剧增, 同时高流速水体让管周土体快速饱和, 导致孔隙水压力骤升, 土体有效强度瞬时衰减, 迅速瓦解了土体的自稳能力, 导致破坏模式从低流速下的渐进浸润软化, 转变为高流速下的集中水力冲蚀, 从而形成一个历时极短、发展路径集中、范围相对较小的陡立塌陷坑。

表5 砂土层中管线供水流速对管线渗漏致塌结果

Table 5 Test results of pipeline water supply flow rate on pipeline leakage-collapse modeling in sandy soil layer

组号	水力条件	垂直管道方向侵蚀坑长度/cm	平行管道方向侵蚀坑长度/cm	流失砂土量/g	塌陷形成时间/s
3-1	1 档	8.0	3.5	66.4	104
3-2	2 档	6.2	2.9	45.5	47
3-3	3 档	4.3	1.9	34.7	28

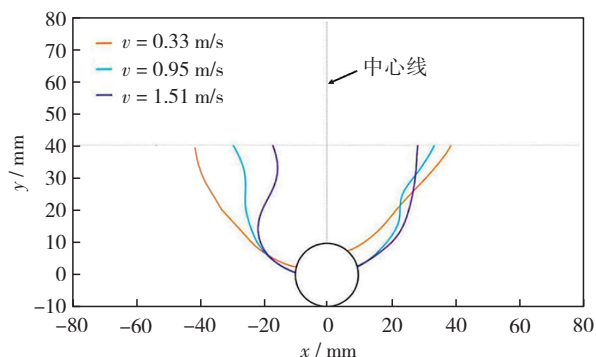


图8 三档流速条件下侵蚀坑的最终形态对比

Fig. 8 Comparison of final morphology of erosion pits under three flow conditions.

5 不同影响因素的对比分析

5.1 侵蚀坑规模随不同影响因素的变化

以土体表面侵蚀坑沿垂直管线方向尺寸代表侵蚀坑规模, 其随不同影响因素的变化情况可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S4。由图 S4 可见, 管线埋藏深度越大, 侵蚀坑尺寸越小, 且从曲线斜率可以看出, 随着管线埋藏深度增加, 侵蚀坑尺寸减小的幅度也越小; 供水流速越大, 侵蚀坑

尺寸越小, 但从曲线斜率可以看出, 随供水流速增加, 侵蚀坑尺寸减小的幅度接近。由图 S4 还可见, 侵蚀坑尺寸随地下管线环向破损尺寸的增加线性减小, 随着地下管线纵向破损距离的增加先增后减, 但整体变化幅度很小, 原因可能是破损尺寸越大, 水的流速越大, 地下空洞失稳极快。即当管周土体还未被渗出水体大范围浸润时, 上覆土体便失稳破坏, 故塌陷的规模呈减小趋势, 但引起塌陷所需时间较短。

5.2 砂土冲蚀量随不同影响因素的变化

冲蚀砂土质量随不同影响因素的变化情况可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S5。由图 S5 可见, 冲蚀砂土质量随着管线埋藏深度的增加呈线性减小趋势; 供水流速越大, 环向破损尺寸越大, 冲蚀砂土的质量越小, 对侵蚀坑大小的影响程度越大; 但冲蚀砂土质量随着地下管线纵向破损距离的变化不明显。

5.3 侵蚀坑形成时间随不同影响因素的变化

侵蚀坑形成时间随不同影响因素的变化情况可扫描论文末页右下角二维码查看补充材料图 S6。由图 S6 可见, 侵蚀坑形成时间随着管线埋藏深度的增加而增大, 随供水流速的增加而减小, 随环向破损口尺寸的增加而减小, 随着地下管线纵向破损距离的增加而减小。对比斜率变化还发现, 管线埋藏深度对地下管线渗漏致塌的时长影响最大, 而管线环向/纵向破损尺寸和供水流速的变化对时长的影响较小。

6 结 论

通过模型试验探究了管线埋深、管线破损口大小以及管线供水流速对砂土层地面塌陷的影响, 可得:

1) 地下管线发生渗漏时, 首先引起管线周围土体的流失, 管线破损口处的土体最先受到扰动, 被冲蚀运移至管道内部随水流冲出, 从而在破损口周围形成地下空洞, 砂土表面产生微小沉降。随着时间的增加, 管线渗出的水不断冲蚀上方砂土, 导致地下空洞的范围不断扩大至较为稳定的状态, 同时土体表面发生一定程度的隆起。随着渗漏持续, 水浸润的土体范围逐渐扩大, 且土体浸润区域优先往破损口附近垂直于水流方向的平面内向下及两侧扩展, 空洞上方土体强度不断被削弱直到无法支

撑, 隐伏空洞突然失稳, 这一过程中土体表面由于空洞下水压力出现向上的位移, 直到上方土体完全被破坏, 形成塌陷坑。

2) 砂土地层中管线的埋藏深度对地下空洞发育发展以及塌陷最终形态存在影响。管线埋藏深度的增加能够在很大程度上缩小塌陷规模, 减少砂土颗粒的流失, 且能够有效延长地下空洞及塌陷发生所需的时间。当埋藏深度增大1倍, 塌陷范围缩小76%, 最终形成塌陷坑所需时间延长24倍。

3) 环向破损尺寸增大2倍, 形成塌陷坑所需的时间缩短88%, 最终形成的塌陷坑规模减小70%, 流失砂土量减小70%。随着纵向破损尺寸的增加, 塌陷坑规模、流失砂土量均先增加再减小, 塌陷坑规模的变化程度较小。

4) 地下管线内水流速度较低时, 水力侵蚀砂土颗粒的速度较为缓慢, 管线上土体能够承受自身重力而形成较大的隐伏空洞, 侵蚀时间较长, 影响范围较大, 最终形成的侵蚀坑规模较大。随着管线内水流速度的增加, 水在砂土中的渗漏加快, 土体极限承载力降低迅速, 土体侵蚀速度加快, 管线上覆土层仍处于干燥状态时下部便已形成隐伏空洞。但空洞存在时间极短且占据的区域较小, 很快便因无法承受上部土体自重而发生塌陷, 最终形成的侵蚀坑规模较小。当水流速度增大3.6倍时, 最终形成塌陷坑所需时间缩短73%, 塌陷坑的尺寸减小46%, 流失砂土的质量也减小48%。

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(2018A0303130154); 广州地铁设计研究院股份有限公司资助项目(20231220-0002)

作者简介: 阮春喜(lvpqvl@gmail.com), 广州市交通运输局高级工程师。研究方向: 地下管线设置与地面塌陷。

朱苗苗(522024290031@smail.nju.edu.cn), 南京大学硕士研究生。研究方向: 地下管线设置与地面塌陷。

阮春喜和朱苗苗为共同第一作者。

引文: 阮春喜, 朱苗苗, 王一兆, 等. 管线渗漏源差异对砂土地面塌陷影响的量化分析[J]. 深圳大学学报理工版, 2026, 43(3): 290-298.

参考文献 / References:

- [1] 施秋华, 魏会龙, 谭飞, 等. 深圳城市地面塌陷灾害特征及其成因分析[J]. 地质科技通报, 2022, 41(2): 123-129.
SHI Qiuhua, WEI Huilong, TAN Fei, et al. Analyzing the characteristics and reason for the ground collapse hazard in Shenzhen [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(2): 123-129. (in Chinese)
- [2] WANG Ke, ZHANG Jianwei, GAO Guiqing, et al. Causes, risk analysis, and countermeasures of urban road collapse in China from 2019 to 2020 [J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2022, 36(6): 04022054.
- [3] 胡聿涵, 白玉川, 徐海珏. 近10年中国城市道路塌陷原因及防治对策分析[J]. 公路, 2016, 61(9): 130-135.
HU Yuhan, BAI Yuchuan, XU Haijue. Analysis of reasons for urban road collapse and prevention and control countermeasures in recent decade of China [J]. Highway, 2016, 61(9): 130-135. (in Chinese)
- [4] 吴远斌, 殷仁朝. 城市路面塌陷类型与防治对策[J]. 中国矿业, 2023, 32(S1): 117-120.
WU Yuanbin, YIN Renzhao. Types and countermeasures of urban pavement collapse [J]. China Mining Magazine, 2023, 32(S1): 117-120. (in Chinese)
- [5] 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 Chengping, YUE Yuejing, CAI Yi. 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)
- [6] 戴自立, 彭凌豪, 包扬娟. 地下水力管线外渗引起的道路塌陷机理模型试验[J]. 中国公路学报, 2024, 37(10): 49-60.
DAI Zili, PENG Linghao, BAO Yangjuan. Model test investigation on mechanism of road collapse induced by underground hydraulic pipe leakage [J]. China Journal of Highway and Transport, 2024, 37(10): 49-60. (in Chinese)
- [7] ALI H, CHOI J H. Risk prediction of sinkhole occurrence for different subsurface soil profiles due to leakage from underground sewer and water pipelines [J]. Sustainability, 2019, 12(1): 310.
- [8] 陶连金, 吴琦, 栗书亚, 等. 基于DEM-CFD方法的管线渗漏引发城市道路塌陷的致灾机理[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(22): 9495-9504.
TAO Lianjin, WU Qi, LI Shuya, et al. Mechanism of urban road collapse caused by pipeline leakage based on DEM-CFD method [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(22): 9495-9504. (in Chinese)
- [9] 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]. 淮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)
- [10] 王怀诺, 张健, 朱澳, 等. 砂土粗颗粒形状对管道破损致地面塌陷影响的离散元模拟[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(31): 13288-13294.
- WANG Huainuo, ZHANG Jian, ZHU Ao, et al. Discrete element simulation of the affect of particle shape on formation collapse caused by damaged pipeline [J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(31): 13288-13294. (in Chinese)
- [11] 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.
- [12] 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)
- [13] KAROUI 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): 679.
- [14] 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 Jingming, 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)
- [15] IBRAHIM A, MEGUID M A. CFD-DEM simulation of sand erosion into defective gravity pipes under constant groundwater table [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2023, 131: 104823.
- [16] 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.
- [17] XIE Xiaochuang, CECCATO F, ZHOU Mingliang, et al. Hydro-mechanical behaviour of soils during water-soil gushing in shield tunnels using MPM [J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 145: 104688.
- [18] DAI Zili, PENG Linghao, QIN Shiwei. Experimental and numerical investigation on the mechanism of ground collapse induced by underground drainage pipe leakage [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2023, 83(1): 32.
- [19] ZAMAN D, TIWARI M K, GUPTA A K, et al. A review of leakage detection strategies for pressurised pipeline in steady-state [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 109: 104264.
- [20] XU J W, LAI J X, QIU J L, et al. Disasters caused by underground water pipe leakage in Chinese cities: failure modes, influencing factors and prevention countermeasures [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2026, 167: 107008.

【中文责编：坪梓；英文责编：之聿】



补充材料