DOI:10.3724/j.issn.1004-3918.2026.02.017

不同黏粒含量细砂在地下水位上升时的渗漏侵蚀机理研究

王贵喜[1]， 陈 亮[1,2]

（1. 河海大学 岩土工程科学研究所，南京 210098； 2. 西藏农牧学院
西藏土木水利电力工程技术研究中心，西藏 林芝 860000）

摘 要： 地下管线是城市功能的重要组成部分，但近年来由于地下管线破损进而渗漏导致的地面塌陷灾害事故屡屡发生，严重影响和危害人民生命财产安全。对于地面塌陷灾害的研究，当前国内外的研究尚处于起步阶段，相关试验规律较少。为研究地面塌陷的形成过程与塌陷灾害发生规律，本文开展地下水位上升条件下无压管线破损渗漏侵蚀破坏试验，同时针对工程中常见的含有黏粒的砂土，利用自行设计的半结构试验模型进行室内模型试验，并对试验结果进行分析与研究，主要研究内容与成果如下：在地下水水位上升条件下，无压管线渗漏侵蚀破坏可以分为三个阶段：起始流失阶段、侵蚀空洞扩展阶段和土体表面塌陷扩展阶段。在地下水水位上升条件下，随着黏粒含量的增加，细砂土体的受侵蚀程度下降，10%黏粒含量细砂土体虽然侵蚀程度下降，但会形成蛰伏于地下的侵蚀空洞，当黏粒含量增至15%时，试验过程中不会发生土体侵蚀，因此在实际无黏性细砂土体中添加黏粒可以显著降低地下土体因管线渗漏而引起的侵蚀程度。通过对不同黏粒含量下细砂土体侵蚀空洞面积与黏粒含量关系进行拟合分析发现，二者符合S型Logistic模型，并且具有较好的拟合优度。

关键词： 渗流；管涌；砂土；侵蚀空洞

中图分类号： TU411 **文献标志码：** A **文章编号：** 1004-3918(2026)02-0400-09

Seepage and Erosion Mechanism of Fine Sand with Different Clay Contents During Rising of Groundwater Level

WANG Guixi[1], CHEN Liang[1,2]

（1. Geotechnical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory for Engineering Technology Research Center of Tibet Civil Engineering, Water Conservancy and Electric Power , Tibet Agriculture and Animal Husbandry University, Linzhi 860000, Tibet China）

Abstract: Underground pipeline is an important part of urban function, but in recent years, ground subsidence disaster accidents due to underground pipeline damage and then leakage have occurred repeatedly, which seriously affects and jeopardizes the safety of people's lives and properties. For the research of ground subsidence disaster, the current domestic and international research is still in the initial stage, and the relevant experimental law is relatively small. In order to study the formation process of ground subsidence and the law of occurrence of subsidence disaster, this paper carries out the erosion damage test of unpressurized pipeline breakage and seepage under the condition of rising groundwater. At the same time, for the sandy soil containing clay grains which is common in the project, it carries out the indoor modeling test by using its own self-designed semi-structural test

收稿日期： 2025-09-25 **修回日期：** 2025-11-07 **接受日期：** 2025-12-05

基金项目： 国家自然科学基金(U24A20171)

作者简介： 王贵喜(2000-)，男，硕士研究生，主要研究方向为岩土渗流，E-mail:15856831971@163.com

引用格式： 王贵喜，陈亮. 不同黏粒含量细砂在地下水位上升时的渗漏侵蚀机理研究[J]. 河南科学，2026，44(2)：400-408.

Wang G X，Chen L. Seepage and erosion mechanism of fine sand with different clay contents during rising of groundwater level[J]. Henan Science，2026，44(2)：400-408.

model, and analyzes and researches on the test results. The main contents and results of the research are as follows: Under the condition of rising groundwater level, the erosion damage of seepage of unpressurized pipeline can be divided into three stages: the initial loss stage, the erosion cavity expansion stage and the soil surface collapse expansion stage.Under the condition of rising groundwater level, the erosion degree of fine sandy soil decreases with the increase of clay content. The degree of erosion of fine sandy soil with 10% clay content decreases, but it will form the dormant erosion cavities in the ground. When the clay content increases to 15%, no soil erosion occurs in the test process. Therefore, adding clay to actual non-cohesive fine sand soil can significantly reduce the erosion caused by pipeline leakage in the underground soil. By fitting the relationship between the area of erosion cavities and the clay content of fine sandy soils with different clay content, it is found that the two conform to the S-type Logistic model and have a good goodness of fit.

Key words：seepage; pipe surges; sandy soils; erosion cavities

0 引言

随着城市化的发展与城市化率的提高，城市地下空间得到充分的开发和利用。城市地下管线作为城市功能的重要实现部分，其总长度与数量在逐年增加，但作为地下工程，其存在的安全隐患与问题也正在逐渐显现[1]。地下管线由于工程施工及自身质量问题，可能在管身产生破损口。在地下水和管线中水的作用下，地下管线破损将会对地下土体造成弱化与侵蚀，从而导致地面塌陷事故灾害的发生[2]。根据已有的统计研究，我国城市地下管线平均渗漏率已达到15%。在较高的地下管线渗漏比例的情况下，地面塌陷在城市道路发生的频率越来越高，不断影响人民生活和危害生命财产安全。

地下管线破损后为土体颗粒流失创造了通道，但仍需合适的水力条件才可以发生侵蚀流失。对城市地面塌陷事故的水力因素统计中，地下水水位的变化与暴雨占比逐年上升[3-4]。其中暴雨及暴雨过后引起的地面塌陷其本质仍是引起地下水的变化。在强降雨和供水管线渗漏情况下，地下水水位将上升，在暴雨结束后和地下工程施工抽水下，地下水水位会下降，这都成为诱发土体颗粒流失的原因[5-6]。

叶英[7]系统地阐述了地面塌陷灾害的分类、发生机制和危害，将地面塌陷按形成的类型分成自然塌陷和人为塌陷两大类。李涛等[8]通过地面塌陷事故成因分析，认为软土与粗粒土地层的地面塌陷破坏模式不同，通过分析粗粒土地层塌陷形成规律，提出基于土层厚度和塌陷漏斗最大沉降的预测和评估方法。侯超群等[9]分析研究松散土体型地面塌陷灾害事故，结果表明渗流造成松散土体中流失形成骨架结构，在外界干扰作用下造成临界稳定状态失稳进而发生地面塌陷。郭帅[10]针对管道破损后，管道渗流对管周土体的腐蚀状况，建立了计算渗漏水量的数学模型，并利用渗流模型试验，研究了影响管周土体冲刷坑形状的各种因素。Rutsch等[11]基于达西定律分析地下管线破损后的外渗速率，建立了相关的机理模型，通过模型检验得到了渗漏的主要影响因素。何双华[12]根据管道连接处局部损伤的特点，对地下管线在地震中的损伤特点及响应特点进行了全面的研究。从地质环境、施工工艺、管道间相对位置等因素进行了分析，由于地质条件差、管周回填细砂、施工工艺差等原因，埋在地下水位以下的管线一旦发生开裂，管周土体就会顺着管线的破损处流入管线中，形成侵蚀空洞，进而造成地面塌陷[13-14]。许兆栋等[15]对具有不同级配指标的含黏粒砂土进行变水头渗透试验，分别得到不均匀系数、曲率系数与渗透系数之间的关系。Davies等[16]总结概述了影响地下管线结构稳定性的因素，描述了地下管线破坏与地面塌陷的一般过程，管线之间的接头易发生断裂，地下水会从破裂口进入渗管，造成地下空洞的形成进而诱发塌陷。

实际工程中土体多数并非均质土，土体中可能存在黏粒。砂土作为无黏性土，在掺杂黏粒后土体的物理力学性质发生显著改变[17]。土体的物理力学性质是影响无压管线渗漏侵蚀破坏的重要因素[18-19]，因此开展含黏粒砂土在地下水位上升的情况下无压管线渗漏侵蚀试验是必要的。依靠设计的变地下水位无压管线渗漏侵蚀模拟试验装置，以不同粒径单一粒组砂土为研究对象，本文开展不同土体黏粒含量下渗漏侵蚀试验研究，使用S型Logistic模型进行拟合，最终得到含黏粒土体因无压管线渗漏引起的侵蚀状态的相关关系。

1　试验方案与材料

1.1　试验装置

试验装置（图1）可分为三部分：主体试验模型装置、流失颗粒测量装置和水位测量与供水部分。主体试验模型（图2）为一长方体砂箱，材质采用透明有机玻璃，可以方便观察试验过程并拍摄。在砂箱底部设置外径10.0 cm，内径9.5 cm的硬质PVC管，来模拟地下无压管线。在PVC管一端采用透明有机玻璃密封，同时在PVC管顶部开直径5 mm的圆孔，来模拟地下管线破损口。流失颗粒测量装置采用排水法称量流失土颗粒质量。供水系统采用直流隔膜泵供水，直流隔膜泵具有扬程大、流量易控制的优点。

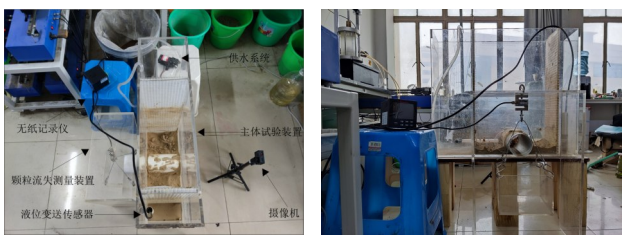


图1　整体试验模型图

Fig.1　Overall test model diagram

1.2　试验材料

选用单一粒组的砂土作为试验材料，用粒径为0.075~0.25 mm的细砂来研究地下水位变化条件下地面塌陷发生规律。砂土试验前过筛，筛除范围外粒径颗粒以及植物根茎等杂质，而后清水冲洗砂土中可能存在的附着细粒。试验土样的物理性质通过室内试验测得，将相关参数列于表1和表2。

表1　试验土样基本参数

Tab.1　Basic parameters of soil samples

土样	最小干密度 ρ_{dmin}/(g·cm^{-3})	最大干密度 ρ_{dmax}/(g·cm^{-3})	相对密实度 Dr	渗透系数 K/(cm·s^{-1})
细砂	1.5	1.7	0.7	5.1×10^{-3}

表2　试验黏土物理力学性质

Tab.2　Physical and mechanical properties of test clay

土样	重度 γ/(kN·m^{-3})	含水率 ω/%	孔隙比 e	塑性指数 I_p/%	黏聚力 C/kPa
黏土	18.2	10	0.9	11.8	13.5

1.3　试验步骤

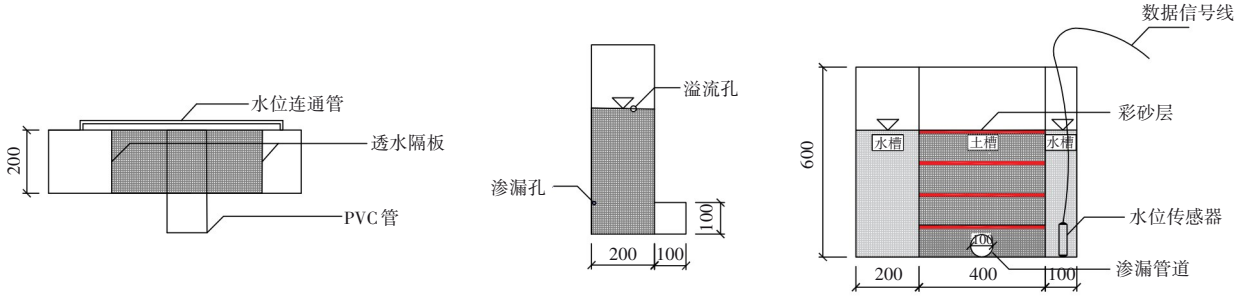
在试验过程中采用分层填筑的方法进行制样，土样是控制含水率为10%的非饱和土，制作土样前按照相对密实度0.7来计算所需砂土，称取每层土的质量，随后称取对应含水率下水的质量，将二者充分搅拌均匀后填入砂箱。在细粒砂土中，掺入不同含量的黏性颗粒，研究黏性颗粒含量对无压管线渗漏侵蚀的影响。具体试验方案见表3。

2　不同黏粒含量下细砂渗漏侵蚀特性研究

2.1　黏粒含量对细砂土侵蚀过程及形态影响

2.1.1　黏粒含量为0%时影响分析

图3所示为粒径0.075~0.25 mm均质细砂土在



（a）主体模型俯视图　　（b）主体模型侧视图　　（c）主体模型正视图

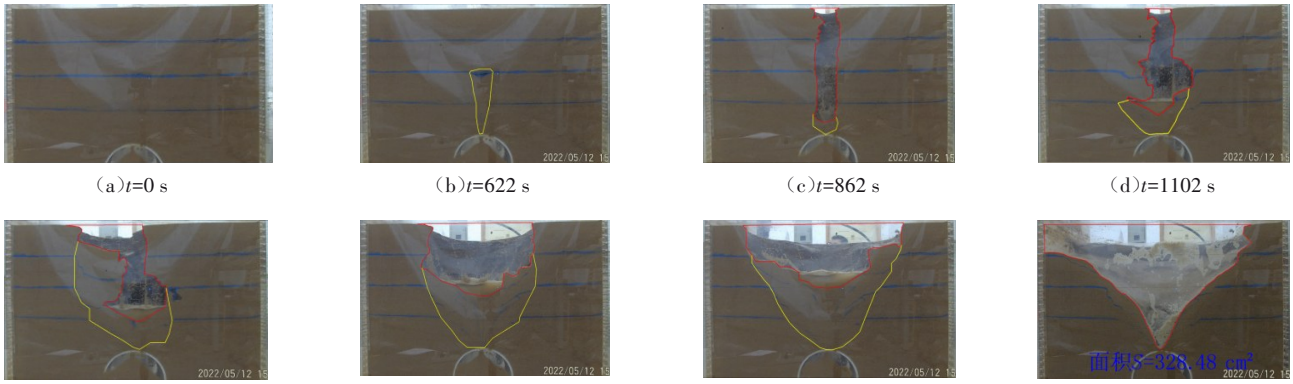
图2　主体试验模型图（单位：mm）

Fig.2　Main experiment model diagram

表3　地下水上升条件不同黏粒含量试验方案

Tab.3　Test schemes for different clay contents under groundwater rise conditions

序号	土体类型	管上土层厚度/cm	水位变化幅度/cm	供水流量/(mL·min^{-1})	黏性颗粒含量/%
1	细砂	20	20	500	0
2	细砂	20	20	500	5
3	细砂	20	20	500	10
4	细砂	20	20	500	15



（a）t=0 s　（b）t=622 s　（c）t=862 s　（d）t=1102 s

（e）t=1222 s　（f）t=1462 s　（g）t=1612 s　（h）t=1942 s（结束）

图3　细砂试验组侵蚀试验部分过程图

Fig.3　Partial process of erosion test for fine sand test group

地下水位上升条件下无压管线渗漏侵蚀试验过程图。图中土体空洞区用红色边界线标识，土体流动区采用黄色边界线标识。整体来看均质细砂土在地下水位上升条件下无压管线渗漏侵蚀破坏分为三个阶段。

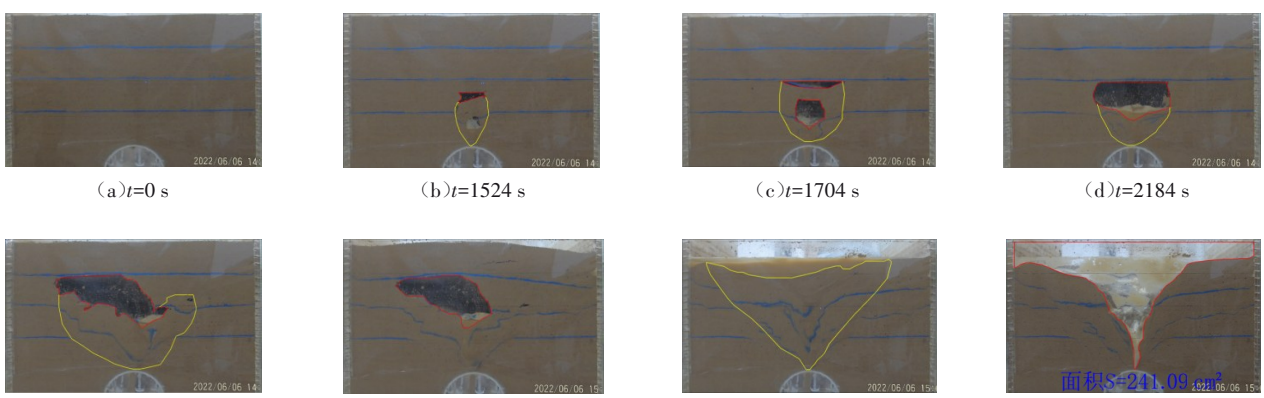
第一阶段土体颗粒起始流失阶段：从试验时间t=622 s开始产生土颗粒流失，侵蚀流失过程表现为竖向空洞区的不断发展扩大。随着水位的不断上升，土体颗粒在水力作用下从渗漏口不断被带走，竖向方向上的土体不断向下流动并补给到流失孔附近，而水平方向上土体侵蚀空洞发育并不明显。最终在t=862 s时形成流失孔贯通土体表面的侵蚀坑，如图所示。侵蚀坑呈圆柱体，自上至下贯通土体，此时土体表面其他地方并未有明显沉降与变形。

第二阶段侵蚀空洞扩展阶段：在第一阶段侵蚀坑形成后，从流失孔附近土体开始横向补给流动，并从流失孔流失。流动区域呈一定角度的“碗状”，同时随着土体流失的发展，上部土体逐渐失去下部支撑，并逐层向下塌陷，土体侵蚀空洞不断扩展发育，面积逐渐增大。最终在t=1222 s时，由于下部侵蚀空洞跨度过大，土层支撑力下降，土体表面出现较大面积的塌陷坑。

第三阶段土体表面塌陷扩展阶段：从t=1222 s后，土体表面塌陷坑的面积迅速发育，面积与流失土颗粒质量增加迅速。随着地下水位的不断升高，从流失孔到土体表面的空洞区与流动区的放射角不断增大，而靠近流失孔附近土体基本不再流动与流失，大部分流失颗粒均来自上层土体的塌陷补给。最终在t=1942 s形成如图中所示的塌陷坑，塌陷坑呈开口喇叭状，并且其顶部较为尖锐，开口大，这是由于在侵蚀过程中流失土颗粒主要来自上层土体而非流失孔附近土体造成的。

2.1.2　黏粒含量为5%时影响分析

图4所示为黏粒含量5%的土体在地下水水位上升条件下无压管线渗漏侵蚀破坏试验过程图，图中土体空洞区用红色边界线标识，土体流动区采用



（a）t=0 s　（b）t=1524 s　（c）t=1704 s　（d）t=2184 s

（e）t=2304 s　（f）t=2424 s　（g）t=2568 s　（h）5%黏粒含量最终侵蚀空洞形态

图4　黏粒含量5%细砂侵蚀过程图

Fig.4　Erosion process diagram of fine sand with 5% clay content

黄色边界线标识。根据整体试验过程图并对比黏粒含量0%试验组来看，整体破坏过程仍可分为三个阶段：

第一阶段中，起始土体颗粒流失时间大大延长，黏粒含量0%试验组在试验时间t=622 s开始出现土体的流动变形，而黏粒含量5%试验组则在试验时间t=1434 s才产生，土体起始流动变形时间延后130%。起始流失开始后，流动区的扩展高度大大降低，黏粒含量0%试验组在土体开始流动变形后，流动区不断向土体表面发展并带动土体向下运动，而黏粒含量5%试验组仅发展到管线埋深以上8 cm处，流动区不再向上部发育，开始横向侵蚀发展。在此阶段结束后黏粒含量0%试验组在土体表面产生了初步的圆柱形地下侵蚀空洞，黏粒含量5%试验组在土体表面并未有明显变化与沉降，仅在流失孔上部有限范围内存在地下侵蚀空洞。

第二阶段中，流动区横向侵蚀发展更加剧烈，在第一阶段结束后，流动区在水位不断升高的条件下，开始横向土体的侵蚀与流失。从图中可以看出，与黏粒含量0%试验组相比，横向侵蚀宽度大大增加，同时上部土体并不会随着侵蚀空洞出现零星的塌落。地下水水位不断抬升使得地下土体横向侵蚀作用继续增强，地下侵蚀空洞不断扩大，在t=2424 s时，地下侵蚀空洞上部土体开始出现沉降，从彩砂线可以看出明显的变形，土体表面产生了不均匀沉降。上部土体的不断沉降挤压了地下侵蚀空洞的面积与空间，最终沉降完成时地下侵蚀空洞被完全挤压消失，但试验过程中，土体从沉降开始发生到完全挤压侵蚀空洞过程缓慢，历时较长。

随着地下水水位上升和土体沉降，在试验后期地下水水位出现了没过土体表面的现象。当地下水水位没过土体后，土体的流动区并未发生明显的变化，原有流动区内土体颗粒继续流失，随后地下水水位到达试验设定水位高度后便结束试验。与黏粒含量0%试验组相比，最终形成的侵蚀空洞形状相似，均为开口喇叭状，但黏粒含量5%试验组的顶端更加尖锐，开口角度更小。同时黏粒含量0%试验组地下侵蚀空洞边界范围外的土体并未出现流动与变形，彩砂线均保持原有试验设置状态，而黏粒含量5%试验组的地下侵蚀空洞在边界范围外的土体出现彩砂线的错位与变形，表明周围土体虽然没有被水流侵蚀并流失，但已经发生了土体的流动与变形。

2.1.3 黏粒含量为10%和15%时影响分析

图5所示为黏粒含量10%试验组试验过程中部分图。结合前两组不同黏粒含量试验可知，随着黏粒含量的增加，在第一阶段的土体颗粒起始流失变形时间延长，黏粒含量10%试验组在试验时间t=1312 s才观察到土层的变形。土体流动区的扩展范围缩小，黏粒含量10%试验组仅扩展至管线以上4.5 cm土层范围内。由于砂土中黏粒可以增加土体间的黏聚力，使得土体强度增加，土体颗粒的流失起动会更加困难。同时黏粒的掺入使得土体渗透性下降，水分从管线流失孔流失速率和拖曳力均下降，从而使得土体起始流动区减小。

横向侵蚀开始时间随着土体中黏粒含量增加而提前，但横向侵蚀的速度在下降。在黏粒含量10%试验组中，土体横向侵蚀过程中范围较小，并且上部土体塌落更为缓慢。土体中彩砂线的变形与流失范围相比于前两组试验大大减小，表明土体的抗侵蚀能力提高明显。试验过程中随着地下水水位的提高，流动区以及侵蚀空洞向土体表面扩展不明显，仅在管线埋深以上10 cm土层内产生。

在黏粒含量10%试验组中，试验结束后侵蚀空洞并未发展到土体表面，土体表面没有出现明显变形与沉降。根据彩砂线来看仅有管线埋深以上10~20 cm范围内土层有变形，这是由于地下侵蚀空洞导致土体下沉。随着土体中黏粒含量的增加，地下侵蚀空洞的面积逐渐减小，并且流动区的发展程度大大削弱。

在黏粒含量15%试验组中，土体全过程并未出现明显的土层变形与侵蚀空洞及塌陷坑的形成。

总体来看，随着砂土中黏粒的掺入含量增加，土



（a）t=1312 s （b）t=1432 s （c）10%黏粒含量最终侵蚀空洞形态

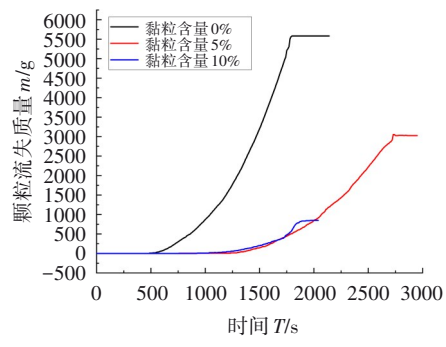
图5 黏粒含量10%部分试验过程图

Fig.5 Partial test process of fine sand with 10% clay content

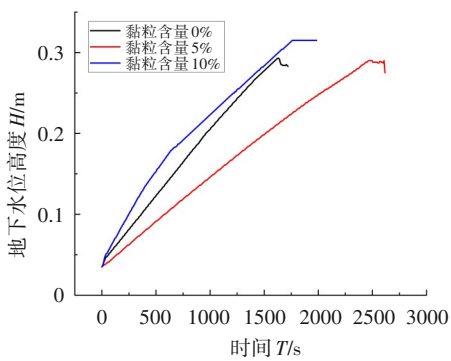
体在地下水水位升高条件下因无压管线渗漏而引起的侵蚀程度减小，试验最终的土体侵蚀空洞面积减小，土体的流动变形区发展受限。当土体中黏粒含量增加到一定量时，土体表面不会因地下水水位上升而产生沉降与塌陷。由此可见，在一定黏粒含量范围内，虽然土体中黏粒含量增加可以增强土体的抗侵蚀能力，减小土体在地下侵蚀程度，但并不能阻止侵蚀的发生，在后期地下水水位反复升降的过程中，地下侵蚀空洞势必进一步发展，在外部因素作用下引起的突然塌陷带来更大隐患与风险。

2.2 黏粒含量对细砂土颗粒流失质量及速率影响

图6为不同黏粒含量下土体在地下水水位上升条件下无压管线渗漏侵蚀试验过程中的土体流失颗粒质量及试验水位随时间变化曲线，由图分析可知：在地下水水位上升的条件下，不同黏粒含量的土体起始颗粒流失时间不同。黏粒含量0%试验组在试验时间t=490 s检测到土体颗粒流失，黏粒含量5%试验组则在试验时间t=760 s检测到土体颗粒流失，黏粒含量10%试验组在试验时间t=930 s才检测到土体的颗粒流失。随着土体中黏粒含量的增加，土体颗粒起始流失时间在延长，这是由于土体中黏粒显著增强了土体的物理力学性质，使得土体颗粒在水力作用下起动更加困难，在地下水水位不断上升的情况下，水力作用逐渐增强，从而可以带动土体颗粒流失。



（a）颗粒流失质量随时间变化曲线



（b）土体试验水位随时间变化曲线

图6 不同黏粒含量土体颗粒流失质量及试验水位随时间变化曲线

Fig.6 Variation curves of soil particle loss mass and test water level with time under different clay contents

结合地下水水位变化图来看，在同一时刻，黏粒含量0%试验组土体颗粒流失质量最大，而黏粒含量5%和10%试验组土体颗粒流失质量接近，但同一时刻地下水水位高度为黏粒含量5%试验组最低，黏粒含量10%试验组最高。这表明在侵蚀破坏过程中，黏粒含量5%试验组从流失孔流失的土水混合物水的比例偏高，这是因为在此黏粒含量下，土体侵蚀的流动区主要呈横向扩展，在横向扩展过程中，可能在土体的内部形成与水箱联通的通道，使得地下水流动阻碍减小，因此在土体侵蚀过程中流失更多的地下水。

在地下水水位变化图中，黏粒含量10%试验组地下水水位曲线在试验时间t=640 s时出现明显转折，在此以后地下水水位上升速度下降。这同样是因为土体中黏粒含量的增加，土体侵蚀过程中流动区横向扩展程度变大，在流动区横向扩展过程中与水箱形成地下水流失通道，造成地下水的大量流失。

图7为不同黏粒含量下土体颗粒流失速率变化。由图可知，随着土体中黏粒含量的增加，土体在侵蚀过程中的土体颗粒流失速率降低，并且速率变化曲线的三阶段特征逐渐消失。黏粒含量5%试验组颗粒流失速率在前期逐渐提高，但增加范围相较于黏粒含量0%试验组大大减小，试验中期维持一段时间的最大土体颗粒流失速率，而后在试验后期逐渐降低并停止颗粒流失。黏粒含量10%试验组

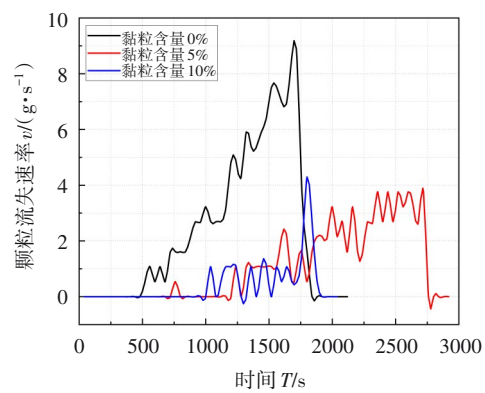


图7 不同黏粒含量土体试验颗粒流失速率随时间变化曲线

Fig.7 Variation curve of soil particle loss rate with time under different clay contents

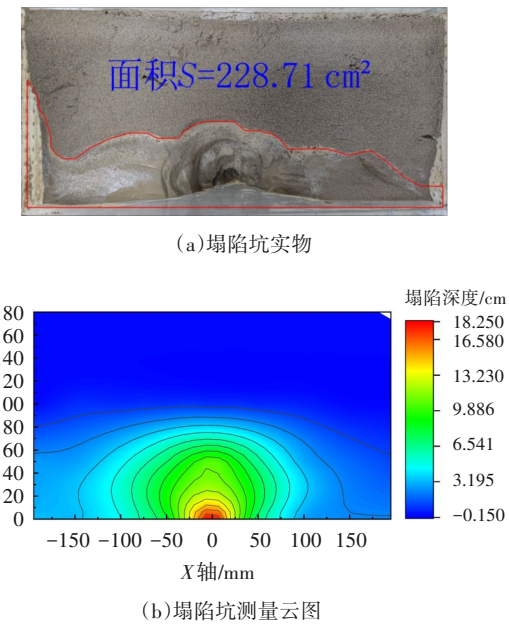
的土体颗粒流失速率则在试验过程中维持一个较低但稳定的颗粒流失速率，并在试验后期快速降低并停止土体颗粒的流失。

总体来看，随着土体中黏粒含量的增加，土体受侵蚀的最终颗粒流失质量下降。且由于土体侵蚀过程中流动区的扩展随着黏粒含量的增加而逐渐增强横向扩展，导致在土体内部产生连通水箱的地下水流失通道，从而使得流失孔流失的土水混合物中水的比例增加。侵蚀试验中土体颗粒流失速率随着土体中黏粒含量增加而显著减小，并且土体颗粒流失速率曲线的三阶段变化特征逐渐消失。

2.3　黏粒含量对细砂土塌陷及地下空洞影响

图8为黏粒含量5%试验组在试验结束后，土体表面塌陷坑照片及深度测量云图。黏粒含量10%试验组在最终试验结束后土体表面并未出现沉降与变形。

由图8可知，黏粒含量5%试验组的土体表面塌陷坑与黏粒含量0%试验组相比，塌陷坑更加扁平，形状呈长条状，并失去以流失孔为圆心的特征。塌陷坑两侧均延伸扩展至砂箱边界并与水箱连通，塌陷坑面积相较于黏粒含量0%试验组减小，对于黏粒含量10%试验组可以认为土体表面塌陷坑面积为0，因此随着土体中黏粒含量的增加，土体表面受侵蚀后形成的塌陷坑面积在减小。



(a)塌陷坑实物

(b)塌陷坑测量云图

图8　黏粒含量5%试验组土体表面塌陷坑实物图与测量云图

Fig.8　Physical image and measured cloud diagram of subsidence pits on the surface of the test group soil with 5% clay content

从塌陷坑测量云图来看，相比于黏粒含量0%试验组，塌陷坑从外围至塌陷坑中心的深度变化梯度减小，同时塌陷坑的整体深度下降。随着土体中黏粒含量的增加，塌陷坑逐渐不再以流失孔为圆心呈半圆形而逐渐向地下水来源延伸呈长条状。这是由于土体中黏粒含量的增加使得土体侵蚀主要以横向侵蚀为主，在横向侵蚀扩展过程中不断向土体两侧发展，同时横向侵蚀的发展使得上部土体发生沉降与变形，同时地下水在试验后期会没过土体表面，因此形成长条状塌陷坑。

图9所示为细砂土体在不同黏粒含量下地下侵蚀空洞面积变化曲线，对不同黏粒含量下土体受侵蚀后形成空洞面积进行统计分析并拟合。

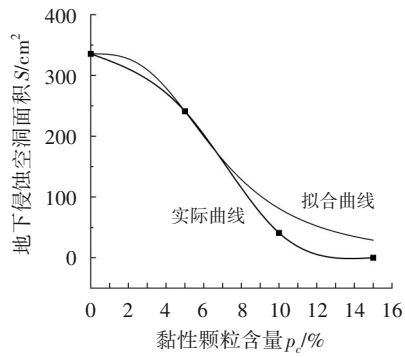


图9　地下侵蚀空洞面积随土体黏粒含量变化曲线

Fig.9　Change curve of underground erosion cavity area with soil clay content

土体受侵蚀后形成的地下侵蚀空洞面积与土体中黏粒含量的关系是非线性的，由于黏粒掺入，改变了土体的物理力学性质，土体的渗透性、黏聚力均产生显著的不同，因此在多因素的共同影响下两者的变化关系呈非线性。通过观察发现，地下侵蚀空洞面积与土体中黏粒含量呈S型曲线关系，利用S型Logistic模型进行关系拟合，可以发现两者具有较好的拟合关系，拟合优度R^2=0.968 2。所得公式：

$$y=\frac{335.54}{1+\left(\frac{x}{6.831\,9}\right)^3},\tag{1}$$

式中：x为细砂土体中的黏粒含量，%；y为地下侵蚀空洞面积，cm²。

拟合所得的相关关系可以为预测以及处置含黏粒土体因无压管线渗漏引起的侵蚀等相关问题提供依据。

3　结论

为研究土体在不同黏粒含量条件下渗漏侵蚀变

化规律，利用自行设计的无压管线渗漏侵蚀模型试验装置，对细砂进行不同黏粒含量的渗漏侵蚀试验，对试验过程及数据分析得到以下结论：

1）在地下水水位上升条件下，无黏性土的无压管线破损渗漏侵蚀过程可分为三个阶段：第一阶段土体颗粒起始流失阶段，在此阶段土体会形成初步的、小面积的侵蚀塌陷坑；第二阶段侵蚀空洞扩展阶段，随着土体流动区扩展，侵蚀空洞面积不断增加，地下侵蚀空洞发育；第三阶段土体表面塌陷扩展阶段，当地下空洞发展到一定程度，上部土体不能支撑自身重量而塌陷，在土体表面塌陷范围不断增大。

2）在地下水水位上升条件下，土体受侵蚀后形成的地下侵蚀空洞面积随土体中黏粒含量增加而减小，并且当细砂土体中黏粒含量增加至15%时，在地下水水位上升条件下没有出现任何土体颗粒的流失。因此在实际无黏性细砂土体中添加黏粒可以显著降低地下土体因管线渗漏而引起的侵蚀程度，但结合前文分析，需注意在一定范围内的黏粒含量并不会阻止地下渗漏侵蚀的发生，地下侵蚀空洞仍会形成，并且在土体表面没有任何可以表征的现象，使得安全隐患增加。

3）土体受侵蚀后形成的地下侵蚀空洞面积与土体中黏粒含量的关系是非线性的，通过拟合不同黏粒含量下细砂土体侵蚀空洞面积随黏粒含量的变化曲线，两者对S型Logistic模型有着较好的拟合优度，可以为工程中预测及处置提供依据。

参考文献：

[1] 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 research on the mechanism of pavement collapse caused by leakage of urban underground pipelines[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.

[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 C P, Zhang D L, Wang M S, et al. Catastrophe mechanism and control technology of ground collapse induced by urban tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 303-309.

[3] 万志清，秦四清，李志刚，等. 土洞形成的机理及起始条件[J]. 岩石力学与工程学报，2003，22(8)：1377-1382.
Wan Z Q, Qin S Q, Li Z G, et al. Formation mechanism and initial condition of soil cavity[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1377-1382.

[4] 童景盛，李菊红，周志华. 城市道路塌陷成因分析及精细化预防处理措施[J]. 城市道桥与防洪，2021(2)：29-33，8.
Tong J S, Li J H, Zhou Z H. Analysis on causes of urban road collapse and refined prevention and treatment measures[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021(2): 29-33, 8.

[5] 郑颖人，徐浩，王成，等. 隧洞破坏机理及深浅埋分界标准[J]. 浙江大学学报（工学版），2010，44(10)：1851-1856.
Zheng Y R, Xu H, Wang C, et al. Failure mechanism of tunnel and dividing line standard between shallow and deep bury[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2010, 44(10): 1851-1856.

[6] 余乐. 城市地层不同形态空洞失稳破坏机制的试验研究[D]. 北京：北京交通大学，2013.
Yu L. Experimental study on instability mechanism of urban stratum voids with different forms[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

[7] 叶英. “塌陷”缘何频现[J]. 地质灾害与环境保护，2013，24(1)：36-40.
Ye Y. Why frequent cave-ins appear[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2013, 24(1): 36-40.

[8] 李涛，张子真，宗露丹. 地下空洞引起土质地层地陷的形成机制与预测研究[J]. 岩土力学，2015，36(7)：1995-2002.
Li T, Zhang Z Z, Zong L D. Study of formation mechanism and prediction of sinkholes in soil stratum induced by subterranean cavity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(7): 1995-2002.

[9] 侯超群，董满生，逄焕平. 松散土体型地面塌陷成因分析及机理研究[J]. 合肥工业大学学报（自然科学版），2013，36(1)：63-67.
Hou C Q, Dong M S, Pang H P. Research on genesis and mechanics of land collapse in incompact soil[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2013, 36(1): 63-67.

[10] 郭帅. 城市排水系统地下水入渗及土壤侵蚀问题研究[D]. 杭州：浙江大学，2012.
Guo S. Study on groundwater infiltration and soil erosion of urban drainage system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.

[11] Rutsch M, Rieckermann J, Krebs P. Quantification of sewer leakage: A review [J]. Water Science and Technology,

2006,54(6/7):135-144.

[12] 何双华. 供水管网系统抗震可靠性分析及加固优化研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
He S H. Study on seismic reliability analysis and reinforcement optimization of water supply pipe network system[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2009.

[13] 刘海俊. 市政道路埋设塑料排水管道塌陷原因分析[J]. 山西建筑,2015,41(36):147-148.
Liu H J. Analysis on municipal road buried plastic drainage pipeline collapse causes [J]. Shanxi Architecture, 2015,41(36):147-148.

[14] 苏永华,周乾,蹇宜霖. 孕育型土洞地陷判据研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2020,47(5):39-47.
Su Y H,Zhou Q,Jian Y L. Study on the criterion of land subsidence for gestation type soil cave [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47 (5): 39-47.

[15] 许兆栋,李鸣,洪昌伟,等. 含黏粒砂土颗粒级配对渗透性的影响研究[J]. 中外公路,2022,42(6):179-182.
Xu Z D,Li M,Hong C W,et al. Study on effect of particle size on permeability of clay sand[J]. Journal of China & Foreign Highway,2022,42(6):179-182.

[16] Davies J P,Clarke B A,Whiter J T,et al. Factors influencing the structural deterioration and collapse of rigid sewer pipes[J]. Urban Water,2001,3(1/2):73-89.

[17] 刘秀敏,陈从新,于群群,等. 黏土颗粒含量对土洞稳定性影响试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(9):1914-1922.
Liu X M,Chen C X,Yu Q Q,et al. Experimental study on the influence of clay particle contents on the stability of soil caves [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2021,40(9):1914-1922.

[18] 苏永华,廖君橙,黄腾. 城区地表塌陷土洞发育破坏特征[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2021,48(11):177-184.
Su Y H,Liao J C,Huang T. Study on development and failure characteristics of soil caves in urban surface subsidence [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2021,48(11):177-184.

[19] 徐坤,苏永华,刘煌海,等. 深水位地下渗流诱发的地面塌陷模型试验[J]. 实验力学,2022,37(2):221-233.
Xu K,Su Y H,Liu H H,et al. Model test of ground collapse induced by groundwater seepage at deep water level[J]. Journal of Experimental Mechanics,2022,37(2):221-233.

(编辑 许军策)