

DOI: 10.11779/CJGE2023S10035

# 地下渗漏条件下地基与隧道响应的离心模型试验研究

田谷雨, 刘素嘉\*, 张嘎

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 地下管线的渗漏会导致路面发生沉降, 威胁着周围土体和相邻结构的安全。采用离心模型试验方法探究了地下渗漏条件下周围土体与结构的响应。通过测定土体含水率变化以获取渗流场信息, 通过应变片测量隧道的应力应变响应。随着渗漏量的积累, 土体含水率先上升后达到稳定, 而应变与沉降持续增长。渗漏对沉降产生影响的土体局限在一定范围内, 沉降影响区增长速度随渗漏积累逐渐放缓。初期影响区形状呈现倒锥形。随着渗漏量的增大, 影响区基本充满隧道上部并扩散至下部, 影响区的面积在隧道下部增长缓慢, 且边界接近水平。土体的不均匀沉降导致临近的隧道产生弯矩, 弯矩的增长先快后慢, 与土体的沉降变化规律相近。

**关键词:** 地下渗漏; 土体沉降; 渗流; 离心模型试验

中图分类号: TV22 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)S1-0226-04

作者简介: 田谷雨(2002—), 男, 本科, 主要从事路面沉降方面的研究工作。E-mail: tiangy@mails.tsinghua.edu.cn。

## Centrifugal model tests on behavior of soil and tunnel under underground water leakage

TIAN Guyu, LIU Sujia, ZHANG Ga

(State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Underground water leakage may lead to pavement settlement, threatening the safety of surrounding soil and adjacent structures. The centrifugal model tests are conducted to explore the response of soil and tunnel under the underground water leakage. The seepage field information is obtained by measuring change of water content of soil, and the stress-strain response of the tunnel is measured by strain gauges. With the accumulation of leakage, the water content of soil first increases and then stabilizes, while the strain and settlement continue to increase. The effects of leakage on settlement are limited to a certain range, and the growth rate of the settlement-affected area gradually slows down with the accumulation of leakage. The shape of the initial settlement-affected area is inverted cone-shaped. With the increase of leakage, the settlement-affected area basically fills the upper part of the tunnel and spreads to the lower part, and the area of the settlement-affected area grows slowly in the lower part of the tunnel, and the boundary surface is close to be horizontal. The uneven soil settlement generates the bending moment in the tunnel. The development of the bending moment is first fast and then slow, which is similar to the development of settlement of soil.

**Key words:** underground leakage; soil settlement; seepage; centrifugal model test

## 0 引言

地下管线的渗漏是引起地面塌陷等灾害的主要因素之一<sup>[1]</sup>。2020年中国城市供水渗漏量78亿m<sup>3</sup>, 管线渗漏率13.4%<sup>[2]</sup>, 地下渗漏是城市安全的巨大隐患, 研究地下渗漏对周围土体和结构的影响具有重要意义。

实际工程中难以检测管线的地下渗漏, 无法观察其引发地面塌陷的过程。室内模型试验是研究地下渗漏对塌陷影响的常用方法。通过结构模型试验, 得出地下管道外渗产生的冲蚀空洞的形态和在不同管道破损状态下破坏的发展变化规律<sup>[3]</sup>。以室内模型试验探

究地下渗漏的破坏现象, 发现渗漏水弱化了地层的物理力学参数<sup>[4]</sup>, 土体会产生明显破坏而且沉降有随动的特征<sup>[5]</sup>。室内模型与足尺模型存在差异, 数值模拟是对此问题的有效手段。以离散元和有限元二者耦合模拟的方法研究管线渗漏位置和相邻管线影响这两个塌陷诱因, 较好地模拟了土颗粒运动造成地面沉降的过程<sup>[6]</sup>, 为地面塌陷监测预防提供了很好的思路<sup>[7]</sup>。

目前采用离心模型试验分析地下渗漏条件下土体

基金项目: 清华大学自主科研计划课题; 国家自然科学基金重点项目(52039005)

收稿日期: 2023-07-06

\*通信作者 (E-mail: liusj21@mails.tsinghua.edu.cn)

和结构的响应的研究较少。不同于室内试验与数值模拟的方法, 离心模型试验可以利用离心加速度场来补偿模型缩尺引起的自重应力损失, 且能还原模型与原型之间 1:1 应力-应变状态<sup>[8]</sup>。本文将以离心模型试验的结果, 探究地下渗漏条件下周围土体与结构的响应。

## 1 离心模型试验

### 1.1 试验设备

试验采用的主要设备是清华大学 50g·t 土工离心机。离心机有效半径为 2 m, 可施加 250g 的极限离心加速度。试验模型如图 1(a) 所示。试验中将模型置入长 600 mm、宽 200 mm、高 400 mm 的铝合金模型箱中。模型箱的一侧为厚有机透明玻璃, 其前方配有高清摄像头以记录试验过程中土体与隧洞的响应。

试验的渗漏模拟装置是一根直径 6 mm 的塑料细管, 一端连接水箱, 一端竖直埋在样方正中深 100 mm 处, 可提供向下的 190 g/min 的稳定水流。该装置通过遥控可随时开始和停止渗水, 提供可重复和可控的点渗漏试验条件。

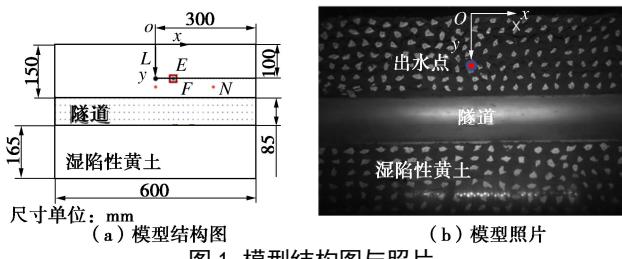


图 1 模型结构图与照片

Fig. 1 Structural view and photo of model tests

### 1.2 试验方案

本文的主要研究目的是探究地下水渗漏条件下土体的变形行为以及与隧洞的相互作用。离心模型测试主要分两步完成。首先将模型放入离心机中, 将离心机加速度提升到 50g, 每间隔 5g 稳定离心加速度一段时间, 使地基变形基本稳定, 达 50g 后稳定 20 min 进入下一步。以出水装置模拟地下渗漏, 设计渗漏速度 190 g/min。渗漏 30 s 后稳定 60 s, 重复该过程至渗漏量达到 250 m<sup>3</sup> (原型)。全程以一秒一帧的帧率录像。

模型采用的湿陷性黄土相对质量密度为 2.70, 塑限和液限分别为 17 和 31, 干密度为 1.60 g/cm<sup>3</sup>, 初始含水率为 13%。模型土层厚 400 mm。土层侧面随机嵌入白色石子以形成随机分布的灰度差, 通过其相关分析以测量土壤的位移。铝制的隧洞埋在了 150 mm 的深度。如图 1(b), 铝制隧洞外径 85 mm, 厚 5 mm, 长 600 mm, 杨氏模量为 72 GPa。由于对称性, 有机玻璃侧的管道为半圆形。

### 1.3 测量

模型的照片导入软件并通过相关算法分析, 可确定土体任意一点的位移, 基于对各点位移的测量可以

进一步得出土体中四边形单元的应变<sup>[9]</sup>。以土层表面中点, 渗水点正上方为原点建立直角坐标系, x 轴与 y 轴正方向分别以水平向右和水平向下为正(图 1(b))。根据离心模型试验相似率, 土体位移、渗漏速率原型尺寸为模型尺寸的 50 倍, 渗漏量原型尺寸为模型尺寸的 50<sup>3</sup> 倍。本文的测量结果皆以原型尺寸呈现。

试验中在隧洞上下两侧采用各 5 组测量隧洞的应变状态。应变片对称分布在隧洞两侧, 且在每一侧均匀分布。模型内部设多个电极, 用于测量土体电阻率。土壤电阻率随含水率的增加而降低, 电极数据的变化可计算土壤含水率的变化<sup>[10]</sup>。电极组由一对长 10 mm, 宽 5 mm 的铁片间隔 10 mm 组成。所有电极在 12V AC 电源上并联连接。电阻率数据通过电路传输到远程控制台, 采集系统以 400 条/s 的速率记录各电极数据。

## 2 土体变形响应

图 2 为渗漏量达到 62.5 m<sup>3</sup> 时的沉降分布矢量图。土体的沉降大小分布呈倒锥形, 有较明显对称性。水平方向上, 沉降大小在出水口附近达到峰值, 向两侧逐渐减小; 竖直方向上, 沉降大小从下到上逐渐增加。

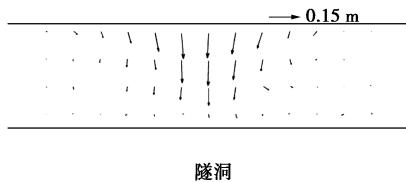


图 2 沉降分布矢量图 ( $I = 62.5 \text{ m}^3$ )

Fig. 2 Distribution of displacement vectors ( $I = 62.5 \text{ m}^3$ )

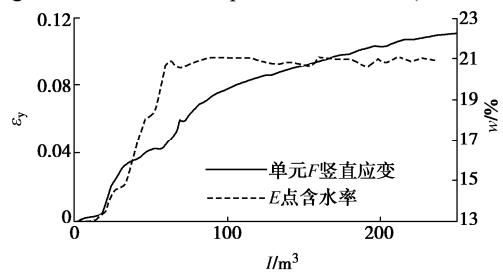


图 3 点 E 的含水率和单元 F 的竖直应变时程图(位置见图 1)

Fig. 3 Time histories of water content of point E and vertical strains of element F (locations are shown in Fig. 1)

本文将土单元的应变用于分析土体变形规律。基于图像测量系统, 计算边长约 10 mm 的正方形单元节点的位移, 以有限元方法中的形状函数计算单元的应变。如图 3, 选取特征点 E 进行含水率变化分析和四边形单元 F 进行竖直应变分析, 点和单元具体位置见图 1。随着渗漏量增加, 点 E 土体含水率先上升至约 21% 后基本稳定, 但其沉降和单元 F 的应变持续增长。

土体任一点的沉降可分为自身变形沉降和下方土

体沉降：土体含水率的变化导致其模量改变，土体自身发生变形而产生沉降；在该点含水率稳定后，下方土体含水率持续改变并产生沉降，此时该点周围应力场持续改变，其沉降因变形协调会继续增加，但是沉降增长会与该点下方土体较一致，也就是增长更缓慢。

图4选取了3个特征点绘制沉降曲线。3个点的沉降增长曲线均存在拐点，在拐点后沉降大小迅速增长，后逐渐放缓。相比出水点上侧点(L)，出水点下侧的点(M)沉降快速增长的速率较慢。点在与中心的水平距离较远时(N)，沉降增长速率较低，增长速率变化较小。这说明发生快速不均匀沉降的区域主要集中在中部。结合图3，出水口附近土体在渗漏初期因含水率的快速改变，沉降迅速增长。之后其含水率基本不变，沉降主要由下方土体沉降导致，其沉降速度逐渐放缓，与下方土体沉降速度接近。距出水点越远，土体沉降受周围应力场变化和相邻土体沉降影响越大。

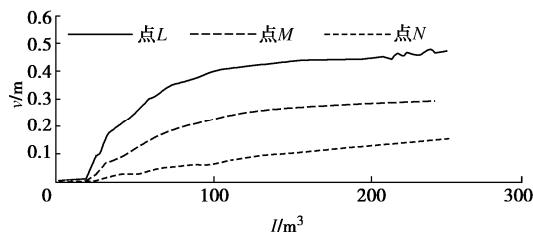


图4 特征点L/M/N沉降时程图(位置在图1中标出)

Fig. 4 Time histories of settlement of L/M/N (locations shown in Fig. 1)

如图5(a)，竖向应变在出水口深度附近最大，随着离出水口的水平距离增加而减小，在足够远处趋近于零。在浅处(0.83 m)和深处(6.83 m)，应变分布曲线存在拐点，因此出现显著变形仅发生在一定区域内。在含水率变化最快的出水口附近，应变相对较大，出现显著变形的区域在水平方向上较广。如图5(b)，竖向应变曲线在竖直方向上存在峰值，且集中在出水口附近。随着水平方向远离出水口，峰值应变明显降低，且峰值应变出现位置逐渐变深。因此，距离出水口越远，土体变形越小，且发生明显变形的区域越小。

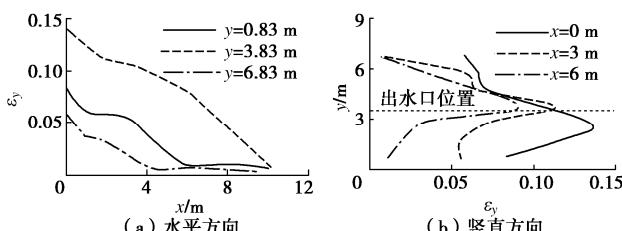


图5 竖向应变分布图( $I=75 \text{ m}^3$ )

Fig. 5 Distribution of vertical strain ( $I=75 \text{ m}^3$ )

### 3 地下渗漏影响区域

图6给出了渗漏量为 $250 \text{ m}^3$ 时沉降在水平分布和

竖直的分布，由对称性，图像仅显示出水口右侧土体的沉降分布。如图6(a)，在水平方向上位移大小在中间处达到峰值，并逐渐向两侧减小。随着深度增加，位移水平分布曲线逐渐平缓，峰值减小。如图6(b)，隧道下方土体存在一定沉降且大小接近；在隧道上方，土体的沉降从下到上逐渐增大，在几乎相同的深度出现拐点然后开始快速增长，沉降的差异也逐渐增大。

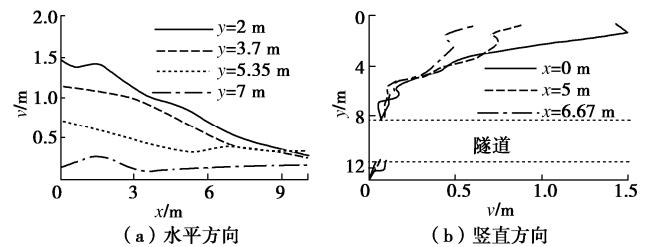


图6 沉降分布图( $I=250 \text{ m}^3$ )

Fig. 6 Distribution of settlement ( $I=250 \text{ m}^3$ )

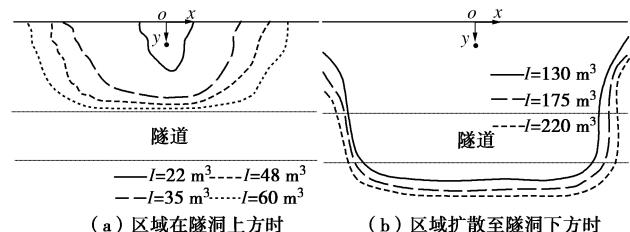


图7 不同渗水量下渗漏影响区域图

Fig. 7 Influence areas under different water leakages

本文中，定义沉降超过 $5 \text{ cm}$ (3像素)的区域为发生明显沉降的影响区。如图7所示，以60像素为横纵向间隔取点位测量了多个渗漏量对应的沉降分布，将区域最外侧点连接为一条平滑曲线得到影响区轮廓。

渗漏量较小时(图7(a))，影响区仅在隧道上部，形状前期呈倒锥形。随着渗流量增加，影响区在水平方向增长较快。在影响区边界接近隧道时，影响区快速往两侧扩展至基本充满隧道上侧土体。影响区面积增长速率随着渗漏量的积累逐渐变缓。渗漏量足够大时，影响区扩散到隧道下方(图7(b))，影响区增长速度较为缓慢且基本不变，隧道下方影响区边界线接近水平。

### 4 地下结构响应

图8(a)为隧道下侧弯矩的分布。隧道在渗漏过程中向出水口一侧弯曲，弯矩大小在隧道中间达到峰值，并向两侧递减。随着渗漏增加，弯矩大小先快速增长后放缓(图8(b))，与上方土体沉降增长趋势相似。在地下渗漏的条件下，可认为隧道的弯曲是由土体不均匀沉降所致，其分布和增长规律与土体沉降规律相近。

结合图7的分析，渗水量小于 $60 \text{ m}^3$ 时，影响区域扩展快，集中在隧道上方，下方基本未受影响，隧

道受不均匀沉降影响最大, 对应弯矩时程曲线前期的快速增长。结合图 6, 土体不均匀沉降程度在隧洞中部最大, 对应了隧洞弯矩在中部最大的特点。随着渗漏量增大, 影响区扩展到隧洞下方, 不均匀沉降的增长速度在一定程度上减慢, 因而弯矩的增速放缓。

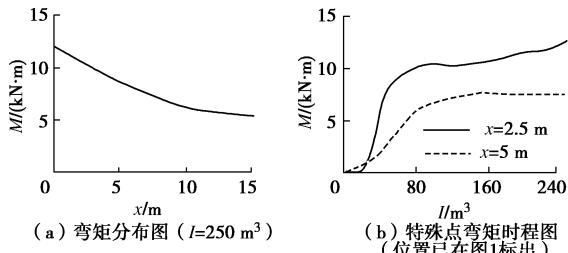


图 8 隧洞弯矩分布与时程图

Fig. 8 Distribution and time histories of bending moment

## 5 结 论

基于离心模型试验的结果, 对土体位移场、形变规律、结构受力进行分析, 得到以下 4 点结论。

(1) 随着渗漏量的增大, 土体一点含水率先上升后达到稳定, 而沉降持续增长。含水率达到稳定前沉降增长主要由土体模量改变导致, 之后则主要由相邻土体应力变化与下方土体产生的沉降共同导致。

(2) 渗漏使土体产生明显的竖向变形。土体沉降和变形大小在出水口附近达到峰值, 向周围递减至 0。竖直方向上, 随着水平方向远离出水口, 土体变形明显降低, 且发生明显变形的区域逐渐减小。

(3) 沉降的发生限制在一定区域内。沉降影响区域增长速度随渗漏积累逐渐放缓。初期区域形状呈现倒锥形, 水平方向扩展速度快于竖直方向; 后期影响区扩展至隧洞下部, 区域面积增长速度变缓。

(4) 由于土体的不均匀沉降, 隧洞结构体产生弯矩, 弯矩大小的增长速度先快后慢, 与土体的沉降变化规律相似。

## 参考文献:

- [1] 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(S1): 303-309. (in Chinese))
- [2] 胡子健. 中国城市建设统计年鉴. 2020[M]. 北京: 中国统计出版社有限公司, 2021: 22-23. (HU Zijian. China Urban Construction Statistical Yearbook. 2020[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021: 22-23. (in Chinese))
- [3] 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 Shuaichao. Analysis and Study on Subsidence Mechanisms of Road Caused by Leakage of Urban Underground Pipeline[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017. (in Chinese))
- [4] 张成平, 岳跃敬, 王梦恕. 隧道施工扰动下管线渗漏水对地面塌陷的影响及控制[J]. 土木工程学报, 2015, 48(S1): 351-356. (ZHANG Chengping, YUE Yuejing, WANG Mengshu. Influence of pipeline leakage on ground collapse and its control during adjacent tunnelling[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(S1): 351-356. (in Chinese))
- [5] 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 Gang, DAI Xuan, ZHANG Xiaoshuang. 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))
- [6] 付栋, 蔡剑韬, 张海. 上海地区由管线渗漏引发地面塌陷数值模拟研究[J]. 岩土工程技术, 2018, 32(4): 189-193, 198. (FU Dong, CAI Jiantao, ZHANG Hai. Numerical simulation of ground collapse caused by pipeline leakage in Shanghai[J]. Geotechnical Engineering Technique, 2018, 32(4): 189-193, 198. (in Chinese))
- [7] 李晓蛟, 陆烨, 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 Xiaoqiao, LU Ye, WU Yajun. Application of CFD-DEM coupling method in seepage-induced ground subsidence[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2020, 26(5): 842-852. (in Chinese))
- [8] 王海. 土工离心模型试验技术若干关键问题研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2019. (WANG Hai. Research on Several Crucial Problems of Geotechnical Centrifuge Modeling Techniques[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2019. (in Chinese))
- [9] ZHANG G, HU Y, ZHANG J M. New image analysis-based displacement-measurement system for geotechnical centrifuge modeling tests[J]. Measurement, 2009, 42(1): 87-96.
- [10] 贾红晶, 李顺群, 尚军. 土的电阻率与饱和度的关系研究[J]. 天津城建大学学报, 2014, 20(2): 87-90. (JIA Hongjing, LI Shunqun, SHANG Jun. Study of relationship between electrical resistivity and saturation degree of soils[J]. Journal of Tianjin Chengjian University, 2014, 20(2): 87-90. (in Chinese))

(编校: 孙振远)