

基于 PIV 技术的砂卵地层浅埋隧洞诱发形变规律研究¹

邓凤¹, 王进尚^{2, 3}, 刘宏道¹, 张兴胜², 王少凯²

(1. 洛阳农发黄河水利建设开发有限公司, 河南 洛阳 557104; 2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046; 3. 郑州工程技术学院 土木工程学院, 河南 郑州 450044)

摘 要:【目的】探明松散砂卵体地层中浅埋隧洞施工诱发前方及上覆地层形变位移机制, 分析不同隧洞埋深诱发松散砂卵地层形变影响规律。【方法】以小浪底南岸灌区引水隧洞为原型, 采用粒子图像测速 (PIV) 技术模型试验揭示砂卵地层中隧洞开挖诱发地层形变机制, 模拟不同埋深工况下隧洞开挖诱发上覆地层沉降形变模式及幅值。【结果】随着隧洞在砂卵地层进尺的增大, 诱发上覆地层产生移位的范围以隧洞中心以牛角状向周围逐渐扩展, 且形变量值呈现出由中心向两侧逐渐减小的趋势。随着隧洞埋深的增加, 竖直方向上地表沉降量呈现出逐渐减小的趋势, 而地表水平方向上影响范围在扩大。【结论】基于 PIV 技术揭示了隧洞埋深对地层变形模式的调控机制, 随埋深的增加, 土拱效应有效抑制了地表沉降, 从而致使主要剪切带倾角增大, 显著扩大了水平向的影响范围。结果可为隧洞施工影响范围、邻近构筑物风险评估提供预测依据, 对优化砂卵地层隧洞工程支护设计与安全控制具有理论意义和工程价值。

关键词:隧洞开挖; 砂卵地层; PIV 技术模型试验; 地层形变

中图分类号:TV223

文献标识码:A

进入 21 世纪, 我国水资源空间分布不均导致部分地区水资源严重短缺已成为制约社会稳定、经济发展的重要因素。因此, 引调水工程对水资源重分配成为解决水资源空间分布不均的重要途径之一^[1-3]。

砂卵地层作为一种特殊工程地质体, 在小浪底南岸灌区广泛分布, 引水隧洞工程不可避免地穿越该地层。砂卵石颗粒间空隙大, 黏聚力弱, 砂卵地层表现为力学性质不稳定、受地层扰动性强的特点^[4-7], 隧洞开挖改变了地层原有的应力状态, 导致开挖面周围地质体产生位移, 出现较大的地层损失, 从而造成上覆地层发生沉降, 若控制不当, 甚至可能导致地表局部塌陷^[8-9]。在小浪底南岸地区, 卵石粒径大 (20~100 mm)、含量大, 细砂含量小, 隧洞开挖过程中易发生坍塌事故。

针对砂卵地层隧洞开挖引起的地层沉降特征, 国内外学者开展了一些研究。目前, 预测地层沉降变形的的方法主要有经验法、数值模拟、模型试验等方法。在经验法方面, Peck 于 1969 年提出的高斯方程是目前描述地表沉降特征最简便且应用最为

广泛的方法^[10], 一些学者采用 Peck 公式来预测和解释地层变形规律^[11]。王海涛等^[12]在对砂性地层沉降分析的过程中得出隧道施工引起的砂土地表沉降槽曲线同样服从高斯分布, 并从砂土地质的角度对 Peck 公式进行修正; 冯亮等^[13]分析 Peck 公式适用于砂卵地层的隧道盾构开挖引起的地表沉降预测; 高洪吉等^[14]对比分析了不同覆土厚度下地表最大沉降、沉降槽宽度和地层损失率的变化规律。数值模拟可通过高效的数值计算, 赋予地层物理特性, 模拟真实工况下的工程效应, 徐平等^[15]用有限元软件分析了砂卵地层盾构掘进压力、等代层厚主要因素对盾构引起地表沉降的影响规律, 刘招伟等^[16]采用离散元软件模拟分析了盾构掘进引起砂卵地层扰动规律、以及盾构穿越建筑物时的地表沉降分布规律。数值模拟法的计算结果受所选择本构关系影响较大且建模过程所需的各种参数需依靠试验测得; 物理模型试验可以根据相似理论, 通过缩小比例尺获得真实原型的规律, 物理模型试验能够揭示隧洞埋深、地层含石量、地质参数等多种因素影响下的地层沉降特征, IMAMURA S 等^[17]利用

收稿日期/Received:2025-06-13

修回日期/Revised:2025-09-25

基金项目:国家自然科学基金项目 (42207187); 河南省自然科学基金项目 (242300420227); 河南省高等学校重点科研项目 (26B570002, 23A440010); 河南省重点研发与推广专项 (科技攻关) 项目 (242102320346)。

第一作者:邓凤 (1984—), 女, 高级工程师, 从事水利水电工程建设及管理方面的研究。E-mail:47450341@qq.com。

通信作者:张兴胜 (1978—), 男, 教授, 博士, 从事工程地质与地质灾害方面的研究。E-mail:xingsheng.zhang@ncwu.edu.cn。

微型盾构机对隧道开挖进行模拟,研究了在不同覆土情况下沉降变形规律;马亮等^[18]以深圳地铁项目为工程背景,对隧道开挖进行了离心模型试验,分析得到地表沉降随时间变化的规律;范祚文等^[19]采用土压模型盾构机开展了砂卵地层(含石量约22%)的开挖面稳定性研究,李伟平等^[20]研究了浅埋砂卵地层(含石量:40%)盾构掘进对地表沉降槽形态的影响,胡熊玉^[21]等研究了土压平衡盾构掘进对散粒体地层和开挖面的影响;宋伟涛^[22]研究砂卵石地层隧道开挖过程中地表变形规律及掌子面失稳变形规律。传统物理模型试验主要通过在地层内部预埋位移传感器等仪器测量相似模拟材料的位移,对于一些复杂的工况,模拟材料达到稳定所需时间较长。

粒子图像测速 (Particle Image Velocity, PIV) 方法通过激光发射器和图形采集系统识别流速与深度的关系,可用来模拟采动引起的地表和地层的沉降和移动特征,有助于岩土工程领域研究地层的沉降和变形规律。PIV 方法作为一种非接触式的、瞬时的、动态的位移场测量方法,不仅可以监测相似材料的微小变形^[23],同时也避免了传统物理模型试验中由于测量元件的布置对试验结果的干扰。非接触式测量方法最初由 ADRIAN R J^[24]提出,用于实验流体理论中的流速测试,应用于砂土变形试验的测量;梁连等^[25]采用 PIV 方法研究了不同隧道埋深、地层损失率可对砂土地层变形规律的影响;ZHANG X S 等^[26]基于 PIV 方法对采空区埋深、开采厚度对砂土地层变形规律的影响进行了研究,CHENG C 等^[27]采用 PIV 技术对不同纵倾角的盾构隧道穿越密砂地层进行试验研究。目前,PIV 方法多用于砂土地层开挖引起的地层变形研究,然而砂卵地层作为一种土石混合物,在受到扰动时砂卵地层相较于砂土地层更不稳定,工作面更易坍塌且事故危害性更大,采用 PIV 技术能更好的针对开挖过程中的周围地层连续、微小的形变进行监测,对隧洞穿越砂卵石层引起的地层变形规律研究具有重要意义。

以小浪底南岸灌区工程引水隧洞为研究原型,设计了一个模拟在砂卵地层隧洞开挖引起的地层变形的 PIV 模型。分析地层不同含石量、隧洞不同埋深下的地层变形规律。研究砂卵地层埋深诱发沉降规律,为砂卵地层沉降规律及治理提供参考。

1 工程概况

小浪底南岸灌区工程位于河南省洛阳市北部邙岭地区,设计灌溉面积 53.68 万亩,其中的一

段引水隧洞全长 1 582.5 m,隧洞穿越的地层为砂卵地层,卵石含量为 40%~60%,粒径以 20~100 mm 为主,填充物主要为细砂,含量为 20%~35%,单个卵石的单轴抗压强度大约在 87.5~196 MPa,砂卵地层如图 1 所示。



图 1 砂卵地层现场图

Fig. 1 Field photo of the sandy cobble layer

输水隧洞净宽 3.0 m,净高 4.2 m,拱顶为半圆形,半径 1.5 m (见图 2),隧洞埋深 0~80 m,隧洞施工过程中频繁发生掌子面失稳,延误工程进度,不仅影响工程质量,而且威胁工程安全,如图 3 所示。

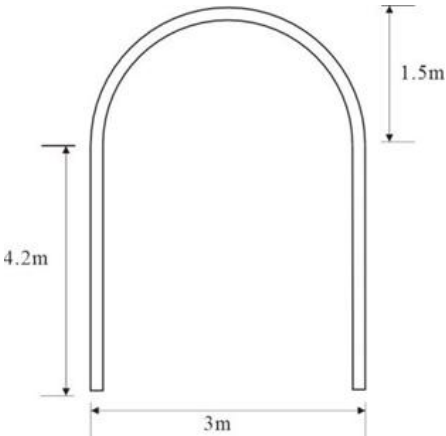


图 2 输水隧洞结构示意图

Fig. 2 Layout of the water conveyance tunnel



图 3 砂卵地层隧洞开挖面坍塌图

Fig. 3 Tunnel face collapse in gravel-cobble

ground

2 隧洞掌子面极限分析理论

基于极限分析原理,构建隧洞掌子面失衡模型,该理论模型定义了一个围绕旋转中心 Ω 发生刚体转动的失稳区域。其破坏面的几何形状由对数螺旋线族构成,确保了模型严格满足相关联的流动法则。如图4所示,在通过隧道轴线的纵向剖面上,失稳区域轮廓由两条以 Ω 点为圆心的对数螺旋线所界定,其极坐标方程可表示为:

$$r_A(\theta) = r_0 \cdot \exp[-(\theta - \theta_0) \cdot \tan\phi] \quad (1)$$

$$r_B(\theta) = r_0 \cdot \exp[(\theta - \theta_0) \cdot \tan\phi] \quad (2)$$

式中: $r_A(\theta)$ 和 $r_B(\theta)$ 分别为两条极径; θ 为极角; r_0 和 θ_0 为参考半径和角度,同时也是描述失稳体大小的关键参数; ϕ 为土体的内摩擦角。

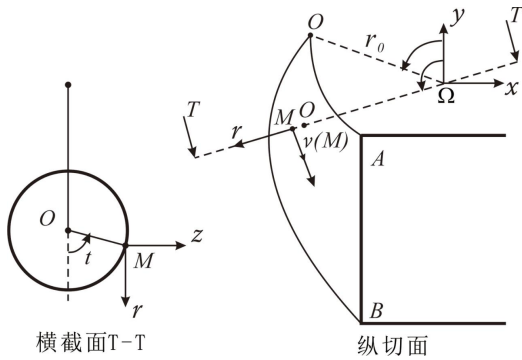


图4 三维旋转破坏机制纵向剖面图

Fig. 4 Longitudinal section view of the 3D rotational failure mechanism

该失稳面可被视为由上述平面极径绕点 Ω 共同构成,其上任一点 M 的坐标由两个参数 (t, θ) 组成,形成一个连续的“牛角状”曲面。该模型揭示了隧洞开挖过程中上前方失稳范围的数学描述,反映多孔介质材料中隧道失稳的数学解析。本研究采用PIV技术模拟城门洞型隧洞在砂卵地层中开挖诱发失稳规律研究,形象地探究了隧洞施工诱发的“牛角状”变形扩展区域。

3 PIV 模型试验

3.1 技术原理

PIV测试原理是在布满均匀示踪粒子的待测流场中通过片光源将带有示踪粒子的流场照亮,由图像采集设备进行光学成像以记录流场中粒子的运动,再由计算机及图像处理算法对采集到的图像进行处理分析,即可得到待测流场的变化信息,如图5所示, t 为时间变量, ΔX 为粒子在 x 方向的

位移距离, S 为光学成像时的物距, S' 为光学成像时的像距, d_1 为一个像素的边长。

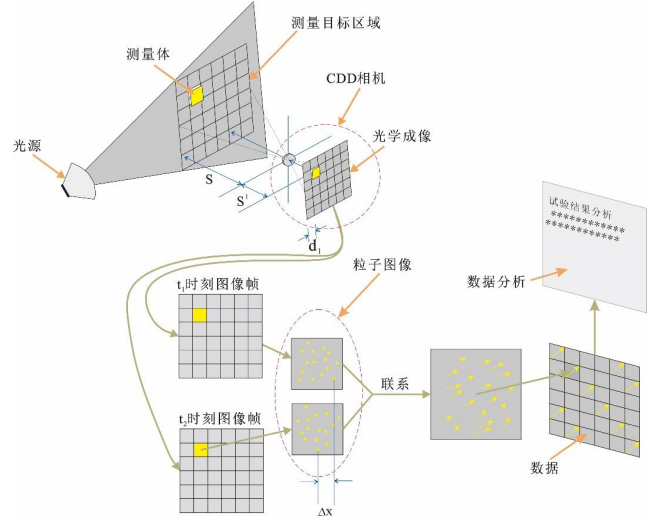


图5 PIV 试验原理图

Fig. 5 PIV experimental principle

3.2 相似参数的选取

PIV模型试验不像传统模型试验内部放置传感器,PIV模型可以使用较小的模型尺寸;同时,相机的有效拍摄面积也是决定模型箱大小的重要因素。基于相似理论以及地质原型尺寸,得到PIV模型试验各种相似比常数,见表1。本次试验模拟在重力作用下的物理相似规律。

表1 PIV 相似模型试验参数

Tab.1 Similitude parameters in PIV scale model

物理量	相似关系	相似常数
模型尺寸	S_L	30
试验砂密度	S_ρ	1
内摩擦角	$S_f = 1$	1
泊松比	S_ν	1
弹性模量	$S_E = S_L S_\rho$	30

3.3 PIV 模型试验装置

本次PIV模型试验装置模拟不同工况参数的砂卵地层隧洞施工诱发地层变形规律研究,该模型装置可以实现多工况的反复试验,基于粒子颗粒成像技术揭示砂卵地层中隧洞施工诱发地层位移形变机制。本次模型箱装置主要由箱体框架以及隧洞模型装置两部分组成(见图6),为便于PIV模型试验实施,将隧洞模型设计好后放至模型底部,隧洞以上的填充厚度视作隧洞埋深。为满足透光性和侧面钢化玻璃强度的要求,选用厚度为10 mm的透明钢化玻璃,框架部分为10 mm厚的不锈钢组成,根据现场实际工程情况以及相似系数,试验模型整体尺寸为500 mm × 300 mm × 700 mm(长×宽

×高)。为了更直观地观察隧道工作面附近的破坏模式,考虑对称原理,将隧洞模型剖分为半洞截面,活塞净宽 50 mm,净高 140 mm,顶拱为 90°的扇形,半径 50 mm,然后将垂直方向的对称平面前放置透明钢化玻璃便于观察。本研究采用位移控制法模拟隧洞开挖过程。如图 6 所示,活塞沿隧道模型纵向安装在螺杆上,通过转动箱体外侧转盘拉动螺纹杆来控制活塞进行移动,观察活塞下方的刻度尺来确定活塞运动的距离。为消除活塞与有机玻璃壁之间的摩擦,在活塞边缘安装一个厚度为 3 mm 的薄橡胶垫并涂抹凡士林,进一步增强了活塞的密封性。

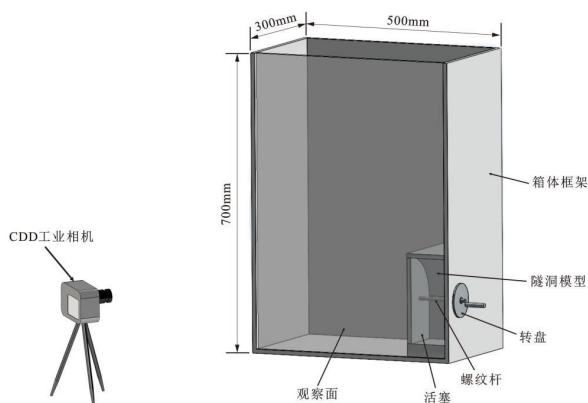


图 6 PIV 试验模型装置示意图

Fig. 6 Configuration of PIV experimental model system

3.4 PIV 模型试验监测系统

采集系统主要由 CDD 摄像机和数据分析系统组成,通过高速摄像机和数据分析系统可以获取和解译高分辨率的图像,进而分析地层随时间位移和运动规律。PIV 模型试验优势在于非侵入模式可在不扰动试验本身的情况下获取沉降变形。快速相机可以在极短的快门时间内获取图像,每秒可捕获多达 20 多张,可精确捕获快速运动的物体,具有轻便、抗磁场干扰、能承受振动和冲击等特点,能够进行光学影像和数字信号的转换,储存数字信号,并且可以导出至其它设备。本次试验使用 PIV 技术采集试验图像,获得隧洞开挖过程中地层移动形变特征规律。

3.5 PIV 模型试验材料的选择及制备

PIV 模型试验材料通过相似级配法采用福建标准砂和卵石配置,采用 0.2~0.3 mm 的干砂以及 5~10 mm 粒径卵石,测得自然状态下干砂密度为 1620 kg/m³,卵石密度为 2 650 kg/m³,测得相似材料摩擦角为 32°,试验模型模拟材料如图 7 所示,模型的制备采用人工分层压实法制备,以确保试验

工况下地层初始状态下的均匀性和一致性,使试验结果可重复性与可比性。具体制备流程如下:

1) 称重与混合,根据设计的目标孔隙比和模型箱体积,计算所需砂、卵石的总质量。本次试验控制砂卵石混合物的体积比。将所需的细砂与卵石充分均匀混合。

2) 分层填筑,将混合好的材料分层填入模型箱中,每层厚度控制在 50 mm。

3) 压实控制,利用底面平整的重物对每层材料进行压实。每层压实至厚度为 45 mm,以确保整个模拟体密实均匀。



图 7 细砂与卵石混合试验材料

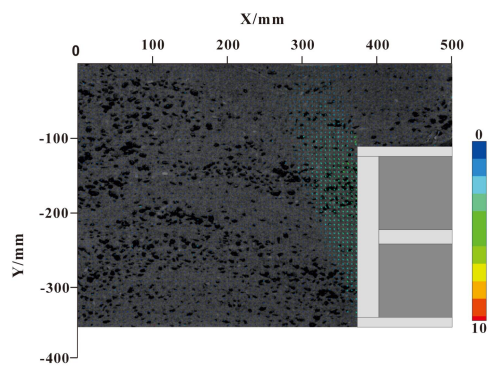
Fig. 7 Test materials of fine sand and cobble mixture

3.6 PIV 模型试验方案及结果

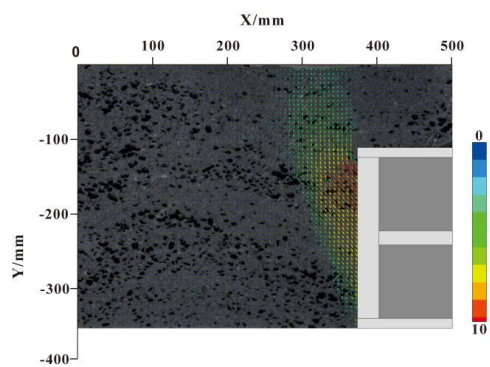
本次 PIV 模型试验主要研究砂卵石地层隧洞不同埋深工况下隧洞施工诱发砂卵石地层形变位移规律,依据现场隧洞纵断面的地层下沉形态和下沉程度的工况,基于工程原型与相似定律,模型试验主要开展隧洞埋深为 100、200、300 mm 3 个工况砂卵石地层隧洞施工诱发地层形变位移规律。

图 8 为隧洞埋深 100 mm 时隧洞上前方地层形变位移 PIV 模型试验结果,PIV 模型试验矢量结果形象地揭示隧洞施工诱发砂卵石地层形变位移主要集中在掌子面区域,随着进尺增加,掌子面前方地层位移愈加明显,隧洞开挖诱发地层位移矢量从开始出现的图 8 (a) 至最明显的图 8 (d) 它们的矢量图中心与竖直方向夹角约为 16°。随着进尺的增加,位移矢量呈现出与竖向约成 16° 夹角,并向斜前方延伸扩展。

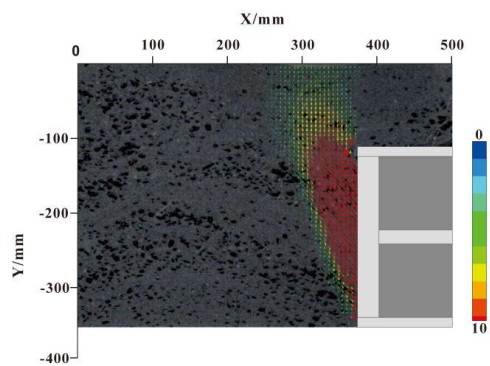
图 9 为隧洞埋深为 100 mm 时不同进尺时的隧洞前方及上覆地层位移云图,可以看出最大位移发生在洞顶及洞腰部位。从图 8 和图 9 可知,随着隧洞进尺的增加,其诱发地层与地表位移影响范围的几何中心与竖向约呈 16° 夹角且沿斜前方延伸扩展。



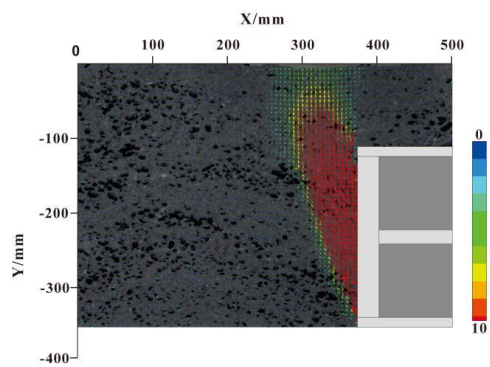
(a) 第一阶段



(b) 第二阶段



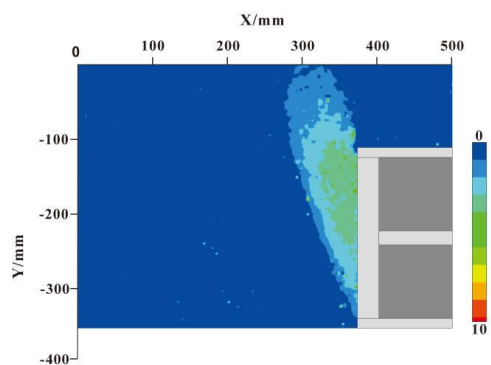
(c) 第三阶段



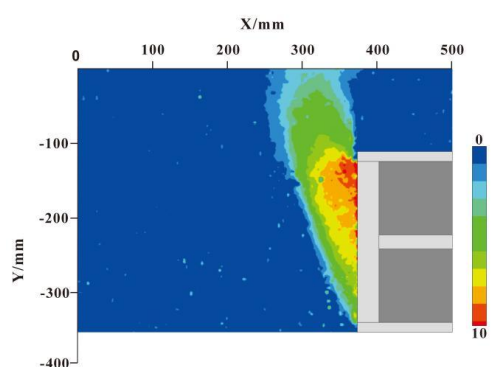
(d) 第四阶段

图 8 隧洞埋深 100 mm 时地层位移矢量图
Fig. 8 Stratum displacement field under 100mm

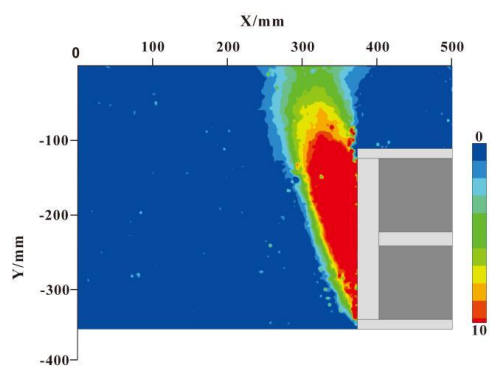
tunnel burial depth



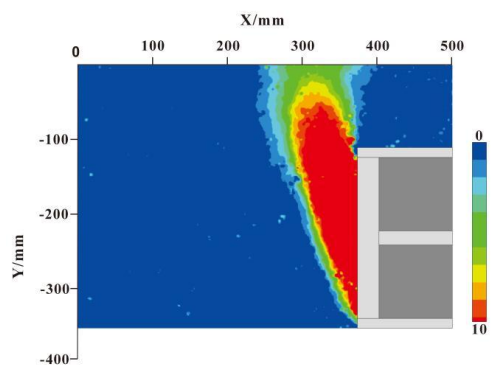
(a) 第一阶段



(b) 第二阶段



(c) 第三阶段

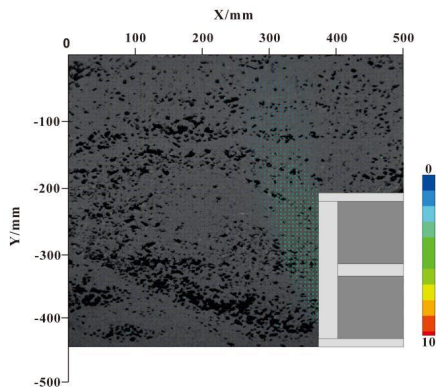


(d) 第四阶段

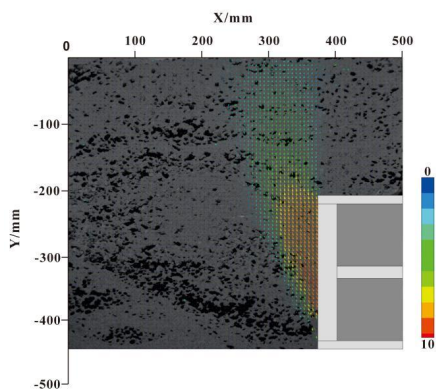
图 9 隧洞埋深 100 mm 时地层位移云图

Fig. 9 Displacement contours under 100mm tunnel burial depth

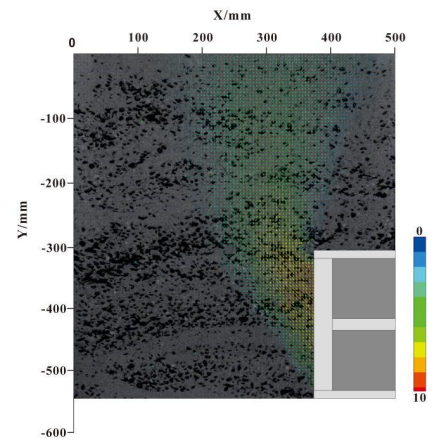
图 10 和图 11 为砂卵地层隧洞埋深 200 mm 时的 PIV 试验结果，随着隧洞埋深的增加，地层位移运动几何中心与竖向夹角约为 18° ，较隧洞埋深 100 mm 时增加了 2° 。将图 8 与图 10 对比可以看出，随着隧洞埋深的增加，其诱发上覆地层下沉幅值呈现出减小的趋势。



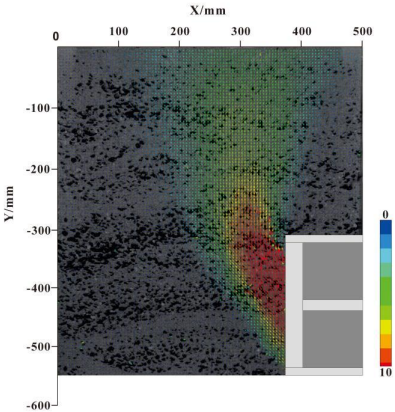
(a) 第一阶段



(b) 第二阶段

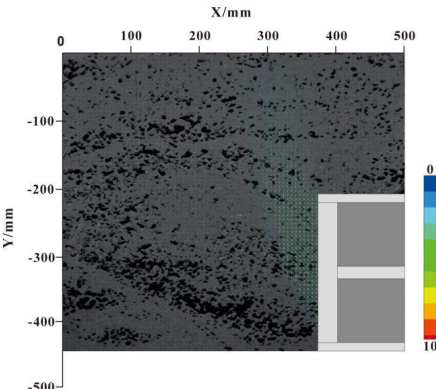


(c) 第三阶段

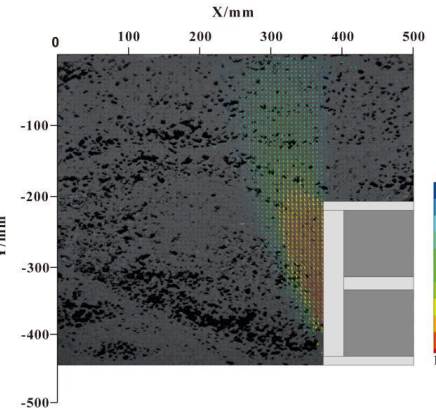


(d) 第四阶段

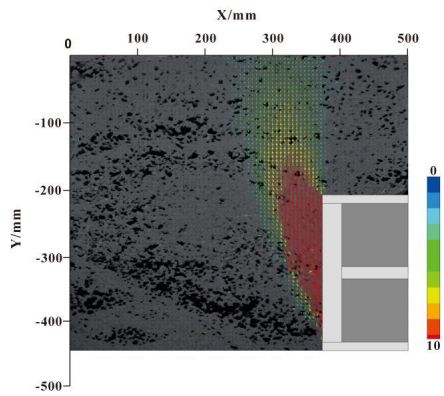
图 10 隧洞埋深 200 mm 时地层位移矢量图
Fig. 10 Stratum displacement field under 200mm tunnel burial depth



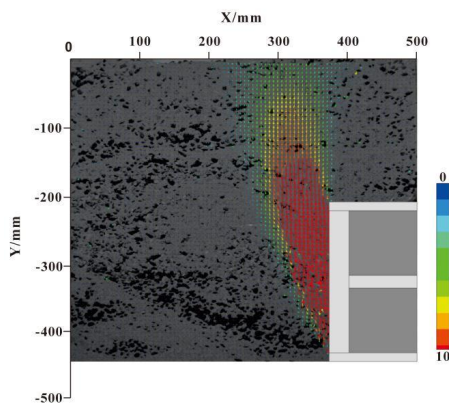
(a) 第一阶段



(b) 第二阶段



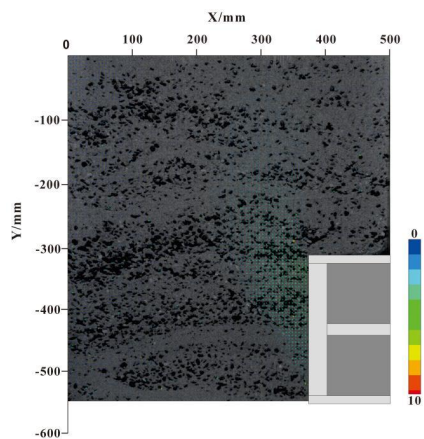
(c) 第三阶段



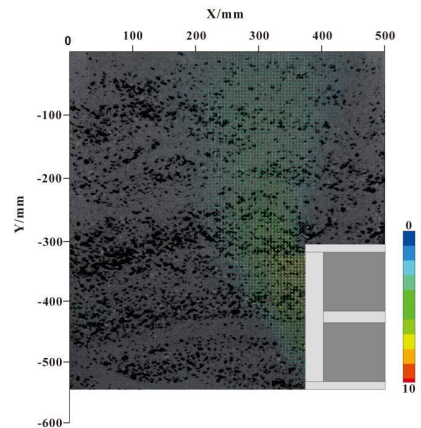
(d) 第四阶段

图 11 隧洞埋深 200 mm 时地层位移云图
Fig. 11 Displacement contours under 200mm
tunnel burial depth

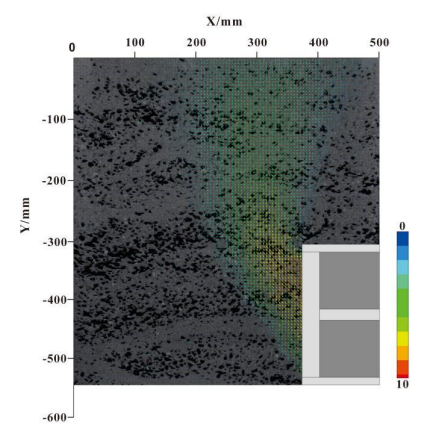
图 12 和图 13 分别为隧洞埋深 300 mm 时地层位移矢量图和地层位移云图。由图可知，随着埋深的增大，隧洞开挖诱发上覆地层形变影响范围呈现出逐渐增大的趋势，而影响量值呈现减少的趋势。还可以看出，埋深的增加使隧洞最大位移越靠近掌子面，而远离地表，从而更有利于地表地面沉降控制。



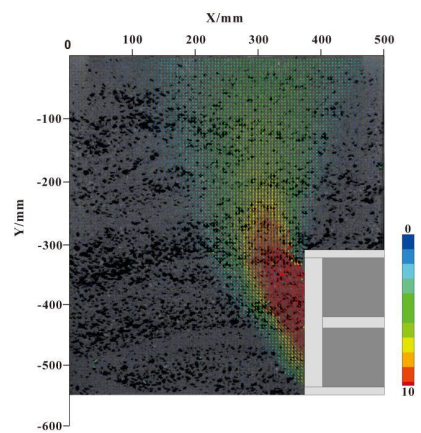
(a) 第一阶段



(b) 第二阶段

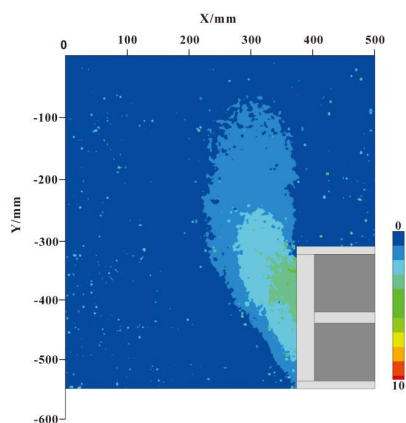


(c) 第三阶段

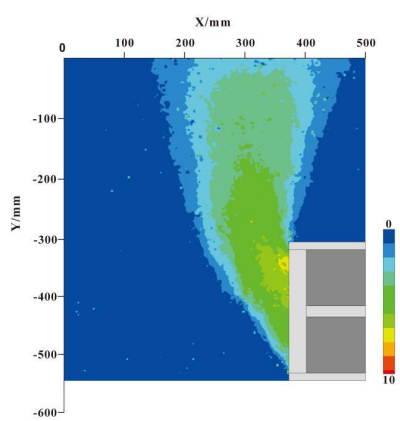


(d) 第四阶段

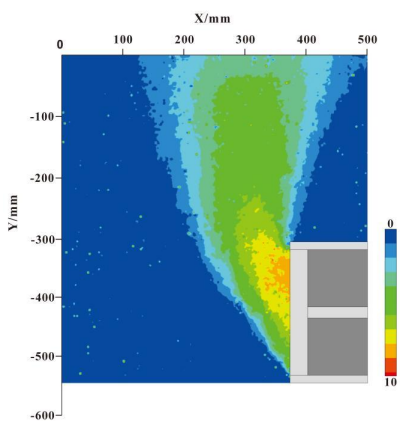
图 12 隧洞埋深 300 mm 时地层位移矢量图
Fig. 12 Stratum displacement field under 300mm
tunnel burial depth



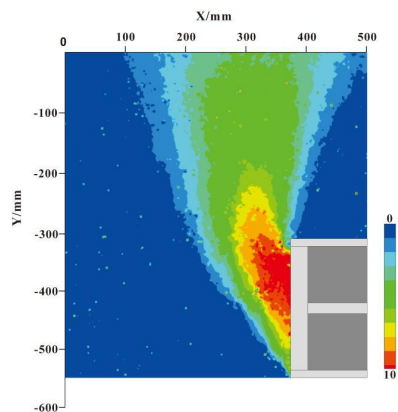
(a) 第一阶段



(b) 第二阶段



(c) 第三阶段



(d) 第四阶段

图 13 隧洞埋深 300 mm 时地层位移云图
Fig. 13 Displacement contours under 300mm
tunnel burial depth

3.7 PIV 模型试验结果与讨论

本研究通过 PIV 模型试验清晰展示出“牛角状”扩展变形模式，揭示了砂卵地层隧洞开挖独特的力学响应机制。隧洞开挖诱发的形变起于掌子面并向前上方扩展，其内部发育的集中剪切应变带形象地揭示了砂卵混合物非连续变形规律。形变带的发育方向与竖向的夹角随埋深增加呈现出从约 16° 增至 18° 的增大趋势。这一角度变化揭示了此次试验条件下松动扰动带的发展趋势。该角度为确定隧道开挖影响的‘牛角状’范围提供了关键参数，对于优化隧道支护系统的设计，特别是超前小导管或注浆加固区的设置角度和范围，具有重要的参考价值。

同时，本研究通过 PIV 试验量化了“埋深增加导致沉降量减小、影响范围扩大”这一效应，并阐释了其内在规律。埋深增加意味着上覆土体自重增大，其产生的“土拱效应”对开挖卸荷区土体移动的约束作用显著增强，表现为传递至地表的竖向位移得以减弱。同时，深部的应力释放与变形调整需通过较厚土体向周边扩散，依据应力传播的基本原理，必然引发水平方向上位移影响区域的扩展增宽。这一现象具有工程应用价值，为准确预测地表沉降影响范围、评估对邻近构筑物的风险提供了基于试验的量化参考。同时，试验影响区扩展角可为界定安全防护范围提供了新的科学依据。

需要指出的是，本研究采用的 PIV 试验揭示隧洞开挖诱发砂卵地层形变位移规律，如所有光学测量方法，其本身并不直接提供应力释放路径这一内在力学机制。然而，位移场的演化模式是内部应力重分布的直接外在表现。本研究观测到的、具有明确方向性的位移矢量，其成因可逆向推演隧洞开

挖导致掌子面初始应力释放,使其周边土体为达到新的平衡,应力状态发生旋转和重分布,最大剪应力方向发生变化,最终驱动土体颗粒沿潜在滑动面发生相对运动,从而在宏观上形成了PIV所观测到的定向位移模式。这个‘潜在滑动面’的方向,即本研究测得的结果,从根本上受控于土体的内摩擦角、初始应力状态以及开挖卸荷的边界条件。因此,本文所量化的位移场,为反演砂卵地层在开挖卸荷条件下的应力响应机制提供了一个关键的、可观测的宏观证据。后续研究可将PIV位移场监测与应力传感器相结合,从而更直观形象地揭示位移场发育与应力释放路径之间的因果关联规律。

4 结论

本文依据小浪底南岸引输水隧洞原型,开展了砂卵地层隧洞PIV相似模型试验,研究砂卵地层中浅埋隧洞施工进尺诱发前方及上覆地层形变位移规律以及不同隧洞埋深对地层形变影响规律。得出如下结论:

(1) 隧洞开挖引发的砂卵体扰动并非均匀扩展,而是以掌子面为起点,形成一对近似对称的集中变形松动带,并呈“牛角状”向前上方扩展。

(2) 变形量值自中心向周边呈现出逐渐减小的趋势,其分布特征精准定位出掌子面前方与拱顶为最不利的潜在失稳区,可为优化支护设计从而控制局部大变形提供依据。

(3) 研究揭示了埋深对地层变形模式的调控机制,随埋深的增加,土拱效应有效抑制了地表沉降,从而致使主要剪切带倾角增大(由 16° 至 18°),显著扩大了水平向的影响范围。该影响规律的研究成果可为施工影响范围、邻近建构筑物的风险评估提供预测依据,同时对优化砂卵地层隧洞工程支护设计与安全控制具有重要理论意义和工程价值。

参 考 文 献

- [1] 付军,程曦,王亚琦,等.南水北调中线工程渠道及建筑物淤积情况研究[J].人民长江,2021,52(增刊1):347-350. [FU J, CHENG X, WANG Y Q, ZHU X X, et al. Investigation on deposit condition in canals and buildings of South-to-North Water Diversion[J]. Yangtze River, 2021,52(S1):347-350.]
- [2] 钮新强,吴永妍,王磊,等.高质量建设国家水网工程的思考与建议[J].中国工程科学,2024,26(6):108-119. [NIU X Q, WU Y X, WANG L, et al. Thoughts and suggestions on high-quality construction of national water network project[J]. Strategic Study of CAE,2024,26(6):108-119.]
- [3] 刘信勇,王超,肖新宗,等.南水北调中线总干渠高锰酸盐指数影响因素分析[J].人民长江,2025,56(6):1-9. [LIU X Y, WANG C, XIAO X Z, et al. Analysis on factors influencing permanganate index in main canal of South-to-North Water Diversion Middle Route Project[J]. Yangtze River, 2025,56(6):1-9.]
- [4] MIGLIAZZA M, CHIORBOLI M, GIANI G P. Comparison of analytical method, 3D finite element model with experimental subsidence measurements resulting from the extension of the Milan underground[J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36: 113-124.
- [5] WANG Y, MA G, MEI J Z, et al. Machine learning reveals the influences of grain morphology on grain crushing strength[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16:3617-3630.
- [6] GANJU E, KILIÇ M, PREZZI M, et al. Effect of particle characteristics on the evolution of particle size, particle morphology, and fabric of sands loaded under uniaxial compression[J]. Acta Geotechnica, 2021, 16: 3489-3516.
- [7] HUANG Q, ZHOU W, MA G, NG T T, XU K. Experimental and numerical investigation of Weibullian behavior of grain crushing strength [J]. Geoscience Frontiers, 2020, 11: 401-411.
- [8] 滕丽,张桓.盾构穿越砂卵石地层地表沉降特征细宏观分析[J].岩土力学,2012,33(4):1141-1150. [TENG L, ZHANG H. Meso-macro analysis of surface settlement characteristics during shield tunneling in sandy cobble ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012,33(4): 1141-1150.]
- [9] 王立新,胡瑞青,任超,等.砂卵石地层盾构隧道掌子面稳定性理论分析[J].同济大学学报(自然科学版),2023,51(9):1362-1371. [WANG L X, HU R Q, REN C, et al. Study on face stability of shield tunnel in sandy cobble stratum [J]. Journal of Tongji University (Natural Science),2023,51(9):1362-1371.]
- [10] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of the 7th International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico,1969: 225-290.

- [11] 韩焯, 李宁, STANDING J R. Peck公式在我国隧道施工地面变形预测中的适用性分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 23-28. [HAN X, LI N, STANDING J R. An adaptability study of Gaussian equation applied to predicting ground settlements induced by tunneling in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(1): 23-28.]
- [12] 王海涛, 金慧, 涂兵雄, 等. 砂土地层地铁盾构隧道施工对地层沉降影响的模型试验研究[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(6): 70-78. [WANG H T, JIN H, TU B X, et al. Model test study on influence of ground settlement caused by shield tunnel construction in sand stratum[J]. China Railway Science, 2017, 38(6): 70-78.]
- [13] 冯亮, 巫锡勇, 牟迪, 等. 成都砂卵石地层双线隧道Peck公式参数取值研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(1): 100-109. [FENG L, WU X Y, MU D, et al. Parameters selection research of Peck formula for twin tunnels in sandy-pebble stratum[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(1): 100-109.]
- [14] 高洪吉, 谢文达, 孙正阳, 等. 浅覆土盾构隧道施工引起地表沉降规律研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(29): 12143-12149. [GAO H X, XIE W D, SUN Z Y, et al. Analysis on surface subsidence by shallow buried shield tunneling. science technology and engineering[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(29): 12143-12149.]
- [15] 徐平, 黄振磊. 富水砂卵石层盾构施工影响因素及敏感性分析[J]. 工程地质学报, 2024, 32(5): 1787-1797. [XU P, HUANG Z L. Influencing factors and sensitivity analysis for shield construction in water-rich sandy cobble stratum[J]. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(5): 1787-1797.]
- [16] 刘招伟, 王梦恕, 董新平. 地铁隧道盾构法施工引起的地表沉降分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1297-1301. [LIU Z W, WANG M S, DONG X P. Analysis on ground surface subsidence of metro tunnel induced by shield construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(8): 1297-1301.]
- [17] IMAMURA S, HAGIWARA T, MITO K. Settlement trough above a model shield observed in a centrifuge[C]. Centrifuge, 1998: 713-719.
- [18] 马亮, 高波. 隧道施工地表沉降控制的离心模型试验[J]. 施工技术, 2005, 34(6): 6-8. [MA L, GAO B. Centrifugal Model Test of Ground Surface Sedimentation Control in Construction of Tunnels. Construction Technology, 2005, 34(6): 6-8.]
- [19] 范祚文, 张子新. 砂卵石地层土压力平衡盾构施工开挖面稳定及邻近建筑物影响模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2506-2512. [FAN Z W, ZHANG Z X. Model test of excavation face stability of EPB shield in sandy cobble ground and adjacent building effect[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2506-2512.]
- [20] 李伟平, 李兴, 薛亚东, 等. 砂卵石地层浅埋盾构隧道开挖面稳定模型试验[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(增 2): 199-203. [LI W P, LI X, XUE Y D, et al. Model tests on face stability of shallow shield tunnels in sandy cobble strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(S2): 199-203.]
- [21] 胡雄玉, 晏启祥, 何川, 等. 土压平衡盾构掘进对散粒体地层扰动和开挖面破坏特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1618-1627. [HU X Y, YAN Q X, HE C, et al. Study on the disturbance and excavation face failure feature of granular mixtures stratum due to EPB shield tunneling[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1618-1627.]
- [22] 宋伟涛, 张佩, 杜修力, 等. 砂卵石地层盾构开挖面失稳破坏模型试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(5): 486-495. [SONG W T, ZHANG P, DU X L, et al. Model test study on instability and failure of shield excavation face in sandy cobble stratum[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(5): 486-495.]
- [23] WU J B, KOURETZIS G, SUWAL L, et al. Shallow and deep failure mechanisms during uplift and lateral dragging of buried pipes in sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2020, 57: 1472-1483.
- [24] ADRIAN R J. Particle-Imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. Annual review of fluid mechanics, 1991, 23: 261-304.
- [25] 梁连, 方焘, 方立建, 等. 基于PIV技术的隧道施工引起的地层变形规律试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(4): 625. [LIANG L,

FANG T, FANG L J, et al. Experimental study on deformation law of stratum caused by tunnel construction based on particle image velocimetry technique experimental study on deformation law of stratum caused by tunnel construction based on particle image velocimetry technique[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(4): 625.]

[26] ZHANG X S, LIU Z H, WANG D B. et al.

Research PIV-based model on subsidence caused by coal mining[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 26269.

[27] CHENG C, JIA P J, ZHAO W, et al. Experimental and analytical study of shield tunnel face in dense sand strata considering different longitudinal inclination[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103950.

Study on the Deformation Characteristic Induced by Shallow Buried Tunnels in Sandy Cobble Stratum Based on PIV Technology

DENG Feng¹, WANG Jinshang^{2,3}, LIU Hongdao¹, ZHANG Xingsheng², WANG Shaokai²

(1. Luoyang Nongfa Yellow River Water Resources Construction and Development Co., Ltd., Luoyang 557104, China; 2. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 3. School of Civil Engineering, Zhengzhou University of Technology, Zhengzhou 450044, China)

Abstract: **【Objective】** This study aims to examine the deformation mechanisms of the ground ahead of and above a tunnel face induced by shallow tunneling in loose sandy cobble strata, and to assess how these deformations are influenced by variations in burial depth. **【Methods】** This study reveals the controlling mechanism of tunnel burial depth on ground deformation patterns based on the PIV technique. With increasing burial depth, the soil arching effect effectively suppresses surface subsidence, which in turn leads to a steeper inclination of the major shear zone and a significant expansion of the horizontal influence zone. These findings provide a predictive basis for assessing the extent of tunnel construction impact and the risks to adjacent structures, offering both theoretical insights and practical value for optimizing support design and safety control in tunnel engineering through sandy cobble strata. **【Results】** As tunnel excavation progresses through the sandy cobble stratum, the induced displacement zone in the overlying strata expands progressively from the tunnel center to the surroundings in a horn-shaped pattern. The magnitude of deformation decreases gradually from the center to the outside. With increasing burial depth, ground subsidence in the vertical direction shows a decreasing trend, while the influence range in the horizontal direction expands. **【Conclusion】** This study reveals the controlling mechanism of tunnel burial depth on ground deformation patterns based on the PIV technique. The results demonstrate that with increasing burial depth, the soil arching effect effectively suppresses surface settlement. This suppression consequently results in a steeper inclination of the major shear zone and a significant expansion of its horizontal influence. The results provide a predictive basis for assessing construction-induced impact zones and risks to adjacent structures, offering theoretical and practical guidance for optimizing support design and safety protocols in sandy cobble strata.

Keywords: tunnel excavation; sandy cobble stratum; PIV-based model test; stratum deformation