

文章编号:1005-0523(2016)03-0001-06

# 基于透明土的隧道上浮过程结构与土相互作用模型试验

周俊宏, 宫全美, 周顺华

(同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804)

**摘要:**上覆土地基弹簧系数取值是盾构隧道纵向上浮计算的关键问题之一,该值的选取取决于隧道与土的相互作用特征,但该特征较为复杂且研究缺乏。为研究上浮过程隧道与土的相互作用特征,基于透明土设计了模拟盾构隧道上浮过程的小比尺室内模型试验系统,可得到不同上浮量下的抗浮力,同时结合 PIV 系统可实现非接触式地观测隧道上浮过程中土体内部连续位移场。通过一模型试验对系统功能进行了详细描述,并基于该组试验分析了抗浮力随上浮量变化规律及隧道周围土体位移场变化规律。研究结果表明:抗浮力随着上浮量增大而增大,但增大速率减小,当上浮量达 0.1 倍隧道外径时,抗浮力达峰值;隧道周围局部范围土体位移场近似呈现为漩涡状。

**关键词:**盾构隧道;上浮;透明土;可视化模型试验;隧道与土相互作用

**中图分类号:**U451

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16749/j.cnki.jecjtu.2016.03.001

软土地层盾构隧道施工期上浮问题极为普遍,监测数据显示,直径为 6 m 左右的盾构隧道上浮量一般在 0~60 mm 之间,部分隧道局部区段上浮超过 100 mm<sup>[1]</sup>,如上海翔殷路隧道施工期最大上浮量达 150 mm<sup>[2]</sup>。隧道上浮过大易引发管片张开、错台、破损等问题,从而对隧道成型质量造成影响。

目前,众多学者针对隧道上浮问题展开了大量研究,肖明清<sup>[1]</sup>、季昌<sup>[2]</sup>、周顺华<sup>[3]</sup>、Kasper T<sup>[4]</sup>、叶飞<sup>[5]</sup>等以数值模拟、现场试验为手段对盾构隧道上浮影响因素进行了分析;叶俊能等<sup>[6]</sup>采用有限元软件建立考虑管片环接头错台、张开影响的施工期隧道上浮分析数值模型,对管片容许上浮量进行了分析;魏纲等<sup>[7]</sup>分别考虑静态上浮力和动态上浮力,提出了上浮阶段管片的受力模型及计算公式;叶飞等<sup>[5,8]</sup>还对施工期的盾构上浮进行了纵向分析。分析中将隧道简化为一纵向梁,将上覆土的抗浮效应简化为地基弹簧,并通过实例分析,验证了该方法的可行性,但上覆土厚度有限导致存在上覆土地基弹簧系数取值困难的问题,同时提出其原因主要是隧道上浮过程结构与土相互作用复杂,且缺乏深入研究所致,因此为了能较为准确地分析隧道纵向的上浮规律,有必要对上浮过程隧道与土的相互作用特性进行分析。

模型试验以其易于观测、参数便于控制等优点在土与结构相互作用问题研究中广为采用<sup>[9-12]</sup>。常规试验方法只能观测到土体表面的位移场,而土体表面常因边界效应不能完全反映真实情况,为了实现非接触式地观测土体内部连续位移场,Iskander, Liu 等<sup>[13-14]</sup>配制了可在宏观力学性质上模拟黏土的透明材料, Ni 等<sup>[15]</sup>结合 PIV 技术将上述透明土应用于等截面圆形桩沉桩挤土效应模型试验中,得到了观测沉桩过程土体内部连续位移场的方法。

鉴于此,本文结合透明土及 PIV 技术设计研发了模拟隧道上浮过程的室内小比尺模型试验装置,并采用该装置进行了模型试验,基于该组试验对试验装置功能进行了详细介绍并对试验结果进行了初步分析。

收稿日期:2016-02-25

基金项目:国家自然科学基金项目(41472247;51478353)

作者简介:周俊宏(1989—),男,博士研究生,主要研究方向为岩土工程、隧道工程。

导师简介:宫全美(1967—),女,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为岩土工程、铁路线路动力学等。

## 1 模型试验设计

### 1.1 隧道上浮过程室内模拟方法

图 1 为叶飞等<sup>[8]</sup>对翔殷路隧道北线越江隧道进行纵向抗浮计算时所用的计算模型, 计算所得上浮量除了与上浮力及隧道结构特性相关外, 还受地基弹簧系数的影响, 而弹簧系数的取值和隧道与土相互作用特性有关。在对上浮过程隧道与土相互作用特征进行模型试验研究时, 为了简化试验方案可将图 1 考虑为沿纵向上浮量不同的连续断面, 即将其考虑为某一隧道断面在不同上浮量下与土的相互作用问题。鉴于此, 在模型试验中通过钢拉杆上拉隧道的方式模拟隧道上浮过程 (见图 2), 模型隧道采用表面光滑的实心不锈钢棒, 以保证隧道在纵向不发生不均匀上浮; 不锈钢拉杆表面光滑以减小上拉过程中与土的相互作用。试验得到的拉力  $T$  与模型隧道及钢拉杆自重的差值即为不同上浮量情况下土体施加于隧道上的抗浮力。

### 1.2 模型土制备

借鉴 Iskander 等透明土制备方法<sup>[13]</sup>, 采用体积比为 2.5:1 的 15# 白矿油和正十二烷混合液与无定形硅石粉末按质量比 5:1 混合制备透明土。土样配置过程主要包含以下 3 步: 材料混合、真空除气、加压固结, 各步骤的实际操作过程示意及说明如图 3 所示。

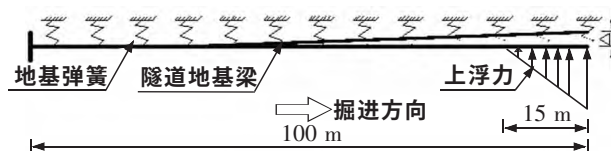


图 1 隧道纵向抗浮计算模型<sup>[8]</sup>

Fig. 1 Longitudinal anti-upward movement calculating model of tunnel<sup>[8]</sup>

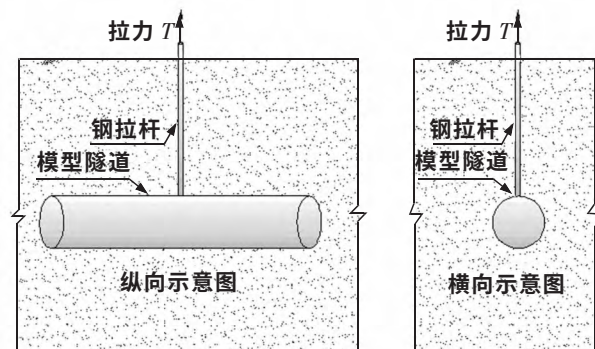


图 2 隧道上浮室内模拟方法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of test simulation method of tunnel upward moving

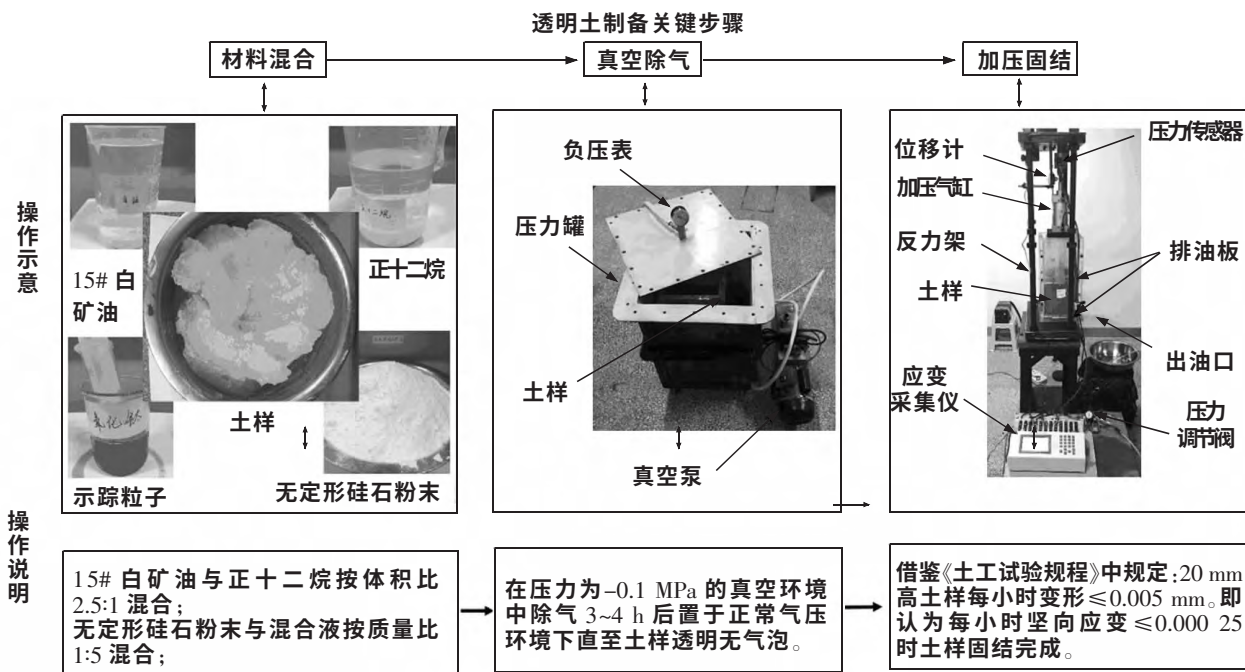


图 3 透明土制备关键步骤

Fig. 3 Key steps of transparent soil preparation

### 1.3 试验装置

室内模型试验装置如图4所示,其主要由模型土箱、等速加载设备、土体位移观测系统、拉压力采集系统等组成。

1) 模型土箱。为了保证面激光能穿透土箱侧壁射入模型土内,采用透光性较好的有机玻璃板为原材料制作模型土箱,所用有机玻璃模型箱内空长宽均设计为200 mm,高450 mm,有机玻璃板厚20 mm,有机玻璃土箱设计长度略大于模型隧道长度以避免隧道上浮过程中出现“卡死”于土箱侧壁的现象,模型箱侧壁设置尺寸标尺,以便于图像尺寸与真实尺寸之间的转换。

2) 等速加载设备。等速加载设备置于反力架顶,最大行程100 mm,加载速度 $0.8 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

3) 土体位移观测分析系统。土体位移观测分析系统可分为硬件和软件两部分,硬件部分包含:面激光源、CCD相机、计算机,软件部分包含:图像采集控制软件、PIV分析软件。激光器为集成化5 W 半导体激光器,激光能量可在0~5 W之间按需调节,激光波长为532 nm;采用科研级芯片CCD相机,相机分辨率 $2456 \times 2056$ 像素,像素尺寸 $3.45 \mu\text{m}$ ,通过计算机控制系统可实现最大拍摄频率为16帧/秒。

其中PIV技术是一种基于图像匹配技术发展起来流体测速技术<sup>[16]</sup>,对于土体的位移场可将其考虑为流速很低的流场,其所用的图像匹配标准关联函数为

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} f(m, n) g(m + \Delta x, n + \Delta y) \quad (1)$$

式中: $M, N$ 分别为图像块的长和宽; $f$ 为 $t_1$ 时刻图像中中心点坐标为 $(m, n)$ 图像块的灰度值分布函数; $g$ 为 $t_2$ 时刻图像中中心点坐标为 $(m + \Delta x, n + \Delta y)$ 图像块的灰度值分布函数; $\Delta x, \Delta y$ 分别为 $x, y$ 方向的位移增量。

通过关联函数可求得该图像块从 $t_1$ 时刻到 $t_2$ 时刻的位移,通过各个小图像位移块的位移便可得到整个图像的位移场。

该系统的基本工作原理如图5所示,通过面激光源照亮所需观测断面,并采用高速相机采集照亮断面的图片,最后利用PIV分析软件对图片进行分析处理,通过PIV软件分析可得土体位移场、速度场,其中位移场和速度场在分布特征上完全一致,仅在量值上有一定差别。

4) 抗浮力采集系统。如图2所示,试验中通过上拉隧道的方式模拟隧道上浮过程,试验时通过将拉压力传感器一端与等速加载设备相连,另一端与隧道钢拉杆相连的方式测定不同隧道上浮量情况下的拉力值,拉压力传感器量程50 kg(490 N),精度为满量程的0.05%,采取与应变采集仪连接的方式记录拉力值,采集仪的最短采集时间间隔为1 s。

### 1.4 试验步骤

盾构隧道上浮引起的结构与土相互作用室内模型试验主要包含如下步骤:

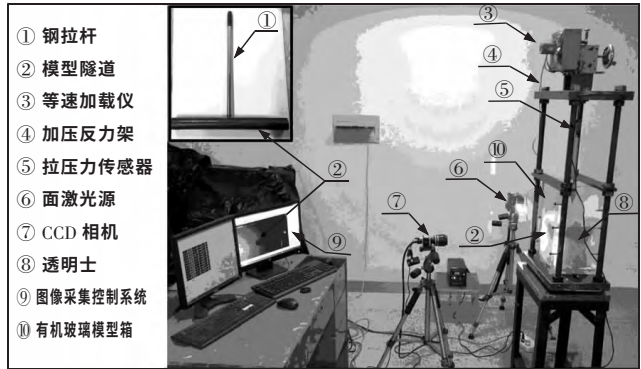


图4 模型试验装置示意图

Fig. 4 Schematic diagram of model test devices

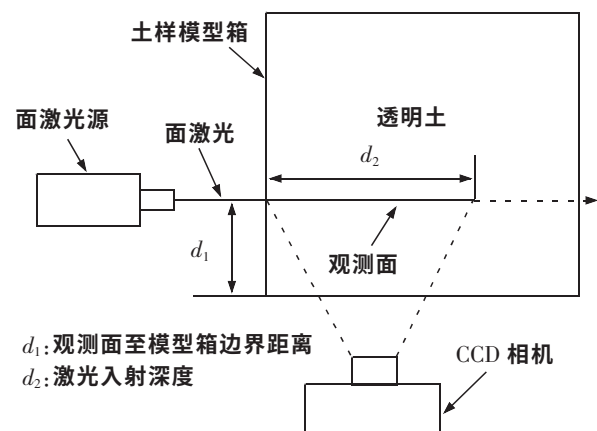


图5 工作原理示意图(俯视图)

Fig. 5 Schematic diagram of working principle (top view)



1) 按图 3 所示步骤制备透明土样,同时将隧道预埋于土样内部,隧道埋置过程中需保证隧道水平,而后加压固结透明土样直至稳定,稳定标准如图 3 所示;

2) 打开面激光发生器,调整激光源与模型箱之间的距离,使面激光的高度与所需观测高度一致,以减小激光能量的损失,而后旋转面激光发生器,在保证面激光竖直的前提下使照射在模型箱外壁上的面激光达到最薄;

3) 打开图像采集控制软件,结合软件调整 CCD 相机,保证相机镜头面与观测面平行,且使相机恰好能观测到整个模型土观测面;

4) 根据模型中预先设置的尺寸标尺及模型隧道抬升速率计算图像采集频率,而后设置压力传感器采集频率与图像采集频率;

5) 打开等速加载仪,等速上拉隧道模拟隧道上浮过程,试验完成后将 CCD 相机采集的图像通过 PIV 软件进行后处理分析。

## 2 试验效果分析

### 2.1 边界效应分析

图 6 为模型隧道上浮过程中覆土剪切滑移面分布特征实物图,其中剪切面 1 为边界面上所观察到的剪切滑移面,剪切面 2 为土体内部观察到的剪切滑移面。土体内部没有边界效应的影响更接近真实情况,因此可将剪切面 2 视为真实的剪切滑移面。在采用真实土体进行试验时一般只能观测到土体表面的剪切面即剪切面 1,而由图 6 可知,由于边界效应的存在,边界面上所观测到的剪切滑移特征与真实情况有所区别,这将直接影响试验结果的准确性。而本文所设计的模型试验系统可观测到土体内部的位移特征,即可消除边界效应的影响,因此该试验方法在位移场及破坏特征观测上具有一定的优势。

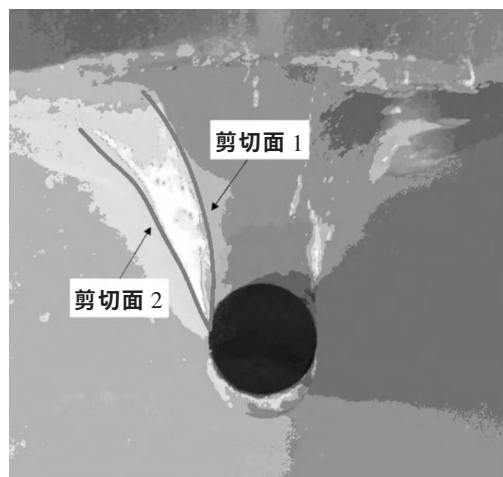


图 6 剪切面开展特征实物图

Fig.6 Characteristic picture of shear plane

### 2.2 抗浮力随上浮量变化规律

图 7 为土体固结压力 25 kPa,隧顶埋深比(隧顶埋深  $H$  与隧道直径  $D$  的比值)为 1.9 时模型隧道所受抗浮力随上浮量的变化曲线,其中横坐标表示模型隧道上浮量与隧道外径的比值( $S$  为隧道上浮量),纵坐标表示每延米模型隧道所受的抗浮力。

由图 7 可知抗浮力随着上浮量的增大而增大,但其增大速率缓慢减小,即在抗浮计算时地基弹簧系数并非为定值,其值随着上浮量增大而减小;当上浮量与隧道直径比为 0.1 左右时,抗浮力达到峰值,之后随着上浮量增大抗浮力减小,其主要由于随着上浮量的增大,因土体表面临空边界面的存在,导致土与土之间出现脱离引起土间相互约束作用减弱所致。

### 2.3 土体位移场分布特征

图 8 为隧道上浮量  $S$  为 0.08  $D$  时隧道周围土体位移场分布图。其中横坐标表示距离隧道中心的水平距离,纵坐标表示距离土体表面的竖向距离。由图 8 可知,隧道上浮过程中隧顶局部范围内土体随着隧道向上运动,其侧面部分范围内土体呈自上而下涡旋状运动。

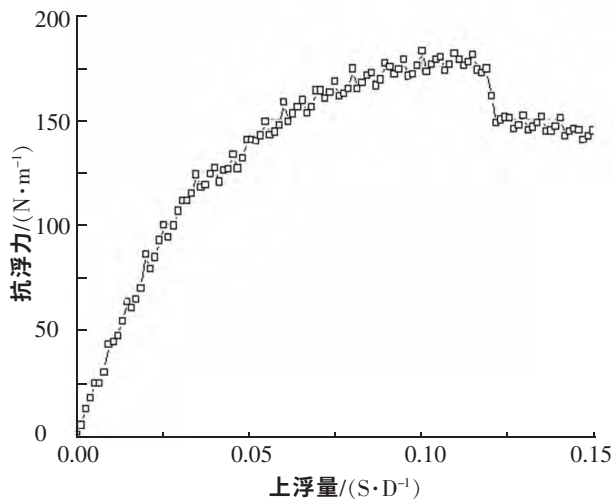


图7 抗浮力与上浮量关系曲线

Fig.7 Relationship between anti-buoyancy and upward displacement

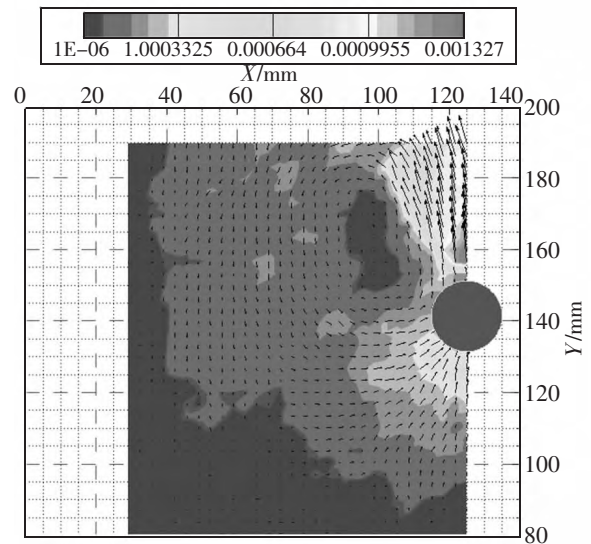


图8 土体位移场示意图

Fig.8 Schematic diagram of soil displacement around tunnel

### 3 结语

开发设计了模拟隧道上浮的小比尺室内模型试验系统,实现了隧道上浮过程土体内部位移场的可视化,消除了边界效应对实测位移场的影响。通过一组试验对试验系统可得试验效果进行了详细描述,并对该试验进行分析得:在本文试验条件下,隧道抗浮力随着上浮量的增大而增大,但其增大速率缓慢减小,即在抗浮计算时地基弹簧系数并非为定值,其值随着上浮量增大而减小,当上浮量与隧道直径比为0.1左右时,抗浮力达到峰值,之后随着上浮量增大抗浮力减小;隧道上浮过程中隧顶局部范围内土体随着隧道向上运动,其侧面部分范围内土体呈自上而下涡旋状运动。

### 参考文献:

- [1] 肖明清,孙文昊,韩向阳. 盾构隧道管片上浮问题研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(4): 1041-1046.
- [2] 季昌,周顺华,许恺,等. 盾构隧道管片施工期上浮影响因素的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(S2): 3619-3626.
- [3] ZHOU S, JI C. Tunnel segment uplift model of earth pressure balance shield in soft soils during subway tunnel construction[J]. International Journal of Rail Transportation, 2014, 2(4): 221-238.
- [4] KASPER T, MESCHKE G. On the influence of face pressure, grouting pressure and TBM design in soft ground tunnelling[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2006, 21(2): 160-171.
- [5] 叶飞. 软土盾构隧道施工期上浮机理分析及控制研究[D]. 上海: 同济大学, 2007: 82-83.
- [6] 叶俊能, 刘源, 陈仁朋, 等. 盾构隧道管片施工期容许上浮量研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(A02): 4067-4074.
- [7] 魏纲, 洪杰, 魏新江. 盾构隧道施工阶段管片上浮的力学分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1257-1263.
- [8] 叶飞, 朱合华, 丁文其. 基于弹性地基梁的盾构隧道纵向上浮分析[J]. 中国铁道科学, 2008, 29(4): 65-69.
- [9] 叶飞, 何川, 王士民. 浅析盾构隧道模型试验的现状与发展[J]. 现代隧道技术, 2011, 48(1): 66-73.
- [10] 向科, 周顺华, 詹超. 浅埋地下结构浮力模型试验研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(3): 346-352.
- [11] 刁心宏, 刘士雨, 官伟. 软岩隧道围岩压力模型试验研究[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(5): 1-7.
- [12] 耿大新, 李洪梅, 郭俊, 等. 地质雷达检测隧道衬砌常见病害模型实验研究[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(6): 7-12.
- [13] ISKANDER M G, LIU J, SADEK S. Transparent amorphous silica to model clay[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(3): 262-273.

- [14] LIU J, ISKANDER M G, SADEK S. Consolidation and permeability of transparent amorphous silica [J]. Geotechnical Testing Journal, 2003, 26(4): 390–401.
- [15] NI Q, HIRD C C, GUYMER I. Physical modelling of pile penetration in clay using transparent soil and particle image velocimetry[J]. Géotechnique, 2009, 60(2): 121–132.
- [16] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于透明土材料的沉桩过程土体三维变形模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(2): 395–400.

## Model Test on Upward Moving Tunnel and Soil Interaction Using Transparent Soil

Zhou Junhong, Gong Quanmei, Zhou Shunhua

(Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** The stiffness selection for foundation spring of overburden soil, as one of the intractable problems in longitudinal upward movement analysis of shield tunnel, depends on tunnel and soil interaction, which is complex and in lack of deep research at present. To probe into upward moving tunnel and soil interaction, based on a small-scale model indoor test system simulating shield tunnel upward movement, this study got anti-buoyancy during upward moving and non-contact observation of internal displacement field with PIV technology. On the basis of a model test for a detailed description of the system's functions, it finally analyzed the relationship between anti-buoyancy and upward displacement and soil displacement field features around tunnel. Results show that the anti-buoyancy increases with the increase of upward displacement of the model tunnel, but the increasing rate decreases. And the anti-buoyancy reaches peak value when the model tunnel upwardly moves to 0.1 times of the outer diameter of the model tunnel. The results also show that the displacement field around the model tunnel presents an approximately swirling pattern.

**Key words:** shield tunnel; upward movement; transparent soil; visual model test; tunnel and soil interaction

(责任编辑 王建华)