

数字图像测量技术及在隧道室内模型试验中的应用

韩兴博¹, 冯浩岚¹, 何乔², 王培源¹, 陈子明¹, 娄智普³

(1. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064; 2. 贝尔福-蒙贝利亚技术大学信息学院, 贝尔福 90000; 3. 中铁二十一局集团轨道交通工程有限公司, 山东济南 250000)

摘要: 首先按照数字图像技术分析基本原理差异, 对数字图像相关(DIC)、粒子图像测速(PIV)等二维数字图像测量方法在隧道模型试验中的应用现状、技术发展以及基本原理进行梳理。进一步, 对三维测量方法的原理及在隧道模型试验中的应用潜力进行分析。最后, 通过黄土地层盾构隧道的掘进模拟试验, 对数字图像测量技术在隧道模型试验中的应用进行示范。结果表明: DIC、数字照相变形量测(DPDM)等非接触测量方法以照片上点的相关性判断各点的位移, 使用场景更偏向于室内试验道路、桥梁、隧道、基础、河坝、钢结构、钢混结构等土建结构的变形监测中; 而 PIV 分析可测量流体中流动的大小和方向, 被广泛运用于浆液、泥石流、喷泉等流体运动的研究中。此外, 基于黄土地层盾构隧道室内模型试验方案发现, 低含水率黄土地层盾构掘进 8 环管片距离时, 围岩的扰动范围为盾构掘进中轴线两侧 $1D$ (管片外径) 左右和盾构上方 $1D$ 范围内。

关键词: 隧道工程; 模型试验; 非接触测量方法; 数字图像相关; 盾构掘进; 土体变形

中图分类号: U456.1

文献标志码: A

Digital Image Measurement Technology and Its Application in Tunnel Indoor Model Test

HAN Xingbo¹, FENG Haolan¹, HE Qiao², WANG Peiyuan¹, CHEN Ziming¹, LOU Zhipu³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Information, University of Technology of Belfort-Montbéliard, Belfort 90000, France; 3. China Railway 21st Bureau Group Rail Transit Engineering Co., Ltd., Jinan 250000, China)

Abstract: Based on the difference in basic principles of digital image technology, the application status, technical

development, and basic principles of two-dimensional digital image measurement methods such as digital image correlation (DIC) and particle image velocimetry (PIV) in tunnel model test are summarized. Moreover, the principle of the three-dimensional measurement method and its application potential in tunnel model tests are analyzed. Furthermore, the application of digital image measurement technology in the tunnel model test is demonstrated through the tunneling simulation test of the shield tunnel in the loess stratum. The results show that DIC, digital photogrammetry for deformation measurement (DPDM), and other non-contact measurement methods judge the displacement of each point by the correlation of points on the photo, and the use scenarios are more inclined to the deformation monitoring of civil structures such as indoor test roads, bridges, tunnels, foundations, dams, steel structures, and steel-concrete structures. PIV analysis can measure the size and direction of the fluid flow and is widely used in the study of fluid motion, such as slurry, debris flow, and fountains. Based on the indoor model test scheme of the shield tunnel in the loess stratum, it is found that the disturbance range of surrounding rock is about $1D$ on both sides of the central axis of shield tunneling and $1D$ above the shield when the shield tunneling is eight-ring segment distance in low water content loess stratum.

Key words: tunnel engineering; model test; non-contact measurement method; digital image correlation; shield tunneling; earth deformation

隧道模型试验以其相较原位试验的经济性与可重复性, 以及相较理论分析及数值计算的客观性与

收稿日期: 2023-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108360); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102213206)

第一作者: 韩兴博(1991—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为隧道及地下结构受力与安全评价。
E-mail: xingbo.han@chd.edu.cn

通信作者: 何乔(1997—), 男, 工程师硕士, 主要研究方向为信息系统及地下结构受力与安全评价。
E-mail: qiao.he@utbm.fr



论文
拓展
介绍

直观性,在岩土隧道工程领域的研究中占据重要地位,是不可或缺的研究手段之一^[1]。

隧道模型试验中一般采集的数据包括地表位移、围岩与衬砌的接触压力、衬砌的变形及结构内力等。早期,郭舜年等^[2]、顾金财等^[3]通过百分表及位移计测量衬砌变形,以及通过观察围岩开裂的宏观现象对不同工况隧道结构的受力特性进行了模型试验研究。后续,学者们也在模型试验的地层顶部增设了多组百分表以观察隧道开挖引起的地表沉降规律。此类衬砌变形、地表沉降等数据,可以通过百分表、位移计等设备接触结构体直接进行观测,获取较为便捷。但是除此类结构体表面的位移外,围岩内部的位移也对隧道开挖后地层影响规律的研究具有重要价值。因此,为了观测岩土体内部的位移,李又云等^[4]通过多点位移计监测了隧道模型试验围岩内部位移。这类多点位移测量系统及方法,为获取围岩内部的变形规律提供了条件,但是仍然属于通过少量点的位移来推测整个围岩的变形情况,试验结果分析具有一定的偶然性。此外,该类位移计多为自研,不同研究团队的制作工艺水平会较大程度影响测量结果的准确性^[5]。后续,随着光纤测量技术的发展,刘泉声等^[6]通过在围岩内部布设光纤,实现围岩变形的监测。但是,不论内置的多点位移计还是光纤测量仪器,其均需将测量元件埋置于土体内部,这些元件不同程度上会影响其周边土体位移的发展,从而一定程度影响试验结果。

随着数字图像测量技术的发展,李元海等^[7]提出了采用标点法计算图像的相关性,并开发了相应的软件系统 PhotoInfor。Stanier 等^[8]通过改良算法实现了粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术在岩土变形监测中的应用,并研发了基于 MATLAB 的 GeoPIV-RG 程序并可开放获取。Blaber 等^[9]基于数字图像相关 (digital image correlation, DIC) 技术,也研发了可开放获取的 MATLAB 程序 Ncorr。上述技术及实践对隧道模型试验围岩衬砌等的位移及裂缝发展的非接触测量提供了强力支撑。因此,本研究拟首先从 DIC、PIV、数字照相变形量测 (digital photogrammetry for deformation measurement, DPDM) 三类技术出发,对数字图像测量方法在隧道模型试验中的应用现状及技术发展进行梳理,并介绍各类测量方法的基本原理。其后通过黄土盾构隧道的掘进模拟试验,对数字图像测量技术在隧道模型试验中的应用进行示范。研究以期对隧道模型试验的围岩及结构变形量

测提供思路及具体方法。

1 数字图像测量方法应用概述

1.1 数字图像相关 DIC

DIC 技术较早被应用于固体力学中,测试刚性材料(如钢和铝)的应变。岩土工程研究对象相对刚性材料,试验中的应变明显更大(应变范围在 0.1%~1%)且显著高于与该技术的典型误差幅度。因此,在 20 世纪 90 年代末,研究人员意识到 DIC 特别适用于岩土工程领域,开始在地层变形的分析中广泛应用。

在公路隧道方面,基于缩尺离心试验,Idinger 等^[10]对不同围岩压力下隧道掌子面塌方的破坏机理进行了分析,进一步利用 DIC 分析地面变形规律并将分析结果与理论模型进行了对比。Huang 等^[11]基于物理模型试验,采用 DIC 技术分析了隧道开挖后围岩的变形情况,研究了断层带附近隧道围岩的破坏机理。在地铁隧道方面,Sun 等^[12]采用透明砂和 DIC 技术对盾构机掘进时的土体变形规律进行了实验研究,研究发现土体的沉降槽类似于高斯曲线。李堂勇^[13]依托成都地铁某运营区间,通过模型试验及 DIC 等方法对浅埋地铁隧道抗震性能进行了研究。

此外,针对许多岩土破坏过程,如浅基础的塑性破坏或山体滑坡涉及的类似颗粒流运动,也可以利用图像相关技术解决流体力学领域的相关问题^[14]。

1.2 粒子图像测速 PIV

相较 DIC 技术,PIV 技术不仅可以分析不同工况下的岩土体位移场,还可以针对盾构隧道壁后注浆等流体在空隙中的填充情况和扩散范围进行分析。

在分析材料试件的基本性能方面,王文学等^[15]对试件开展压剪试验,探究了裂隙张开度对试件强度、变形及破坏的影响。而在桩土变形及隧道施工方面的分析中,曹兆虎等^[16]对沉桩过程中桩周土体的位移场进行测量,并研究了不同因素对桩周土体位移场的影响规律。方焘等^[17]开展了不同埋深盾构隧道施工时砂土地层的变形规律模型试验,得出了不同埋深情况下地层的变形规律。

此外,在土动力学以及流体力学相关的研究中,Cilingir 等^[18]利用 PIV 测量了隧道周围的加速度和土压力,发现最大加速度对隧道承受的最大荷载有重要影响。李文涛^[19]利用 PIV 测试,对盾构隧道壁后

注浆控制地层沉降的效果及注浆浆液的填充情况和扩散范围进行了研究。

1.3 数字照相变形监测 DPDM

DIC 和 PIV 作为主流的非接触测量方法,在此两者基础上,学者们非接触测量方法进行了拓展,形成了更多元化的测量手段。数字照相量测技术^[20]主要通过单反相机、电荷耦合器件(CCD)摄像机或者其他拍照设备当作图像采集的手段,从而得到需要观测物体的数字图片,进一步利用数字图像处理以及分析软件对所量测的目标的变化趋势进行分析与处理^[21]。

其中,李元海团队研发的 DPDM 软件^[20]最具代表性,DPDM 软件包括 2 个图像分析程序(PhotoTarget、PhotoInfor)和 1 个后处理程序 PostViewer。用户在应用该技术时只需要采集数字照片并准备一个控制点文件,系统便可完成剩余分析处理工作。基于此,李元海等^[22]对压缩试验时的混凝土试件进行观察,得到了其表面位移、应变等发展、演变过程。

2 测量方法的原理

2.1 二维图像测量

2.1.1 基本原理

(1) 数字图像相关 DIC

数字图像相关又称数字散斑相关法,其基本原理是在变形前对图像中的感兴趣区域进行网格划分,并将每个子区域视为刚体运动。然后,通过预定义的有关函数计算每个子区域,在变形后的图像中找到对应的子区域,从而确定该区域的位移。通过计算所有子区域,得到整个场的变形信息。该方法具有全场测量、抗干扰能力强、测量精度高的优点。该方法中的局部 DIC(是传统 DIC 的一种,与全局 DIC 不同^[23])分析方法的原理如图 1 所示。

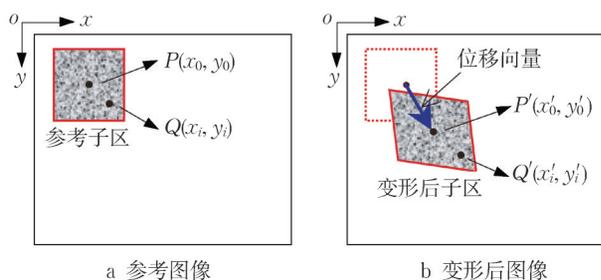


图 1 DIC 变形子区示意图^[24]

Fig. 1 Schematic of DIC deformation sub-region^[24]

图 1 中, $P(x_0, y_0)$ 为参考子区的中心坐标, $Q(x_0, y_0)$ 为图像子区中任意一点的坐标。而

$P'(x'_0, y'_0)$ 和 $Q'(x'_0, y'_0)$ 分别为变形后,子区中心 $P(x_0, y_0)$ 和任意一点 $Q(x_0, y_0)$ 对应的坐标。针对研究对象依次拍摄的图片进行相关性分析,得到物体的相应位移,其核心思想是将计算区域离散化为独立的图像子区,并在每个子区内分别搜索目标位置。在变形前后的图像中,应用相关系数公式计算它们之间的相关性^[24]。在搜索区域内,当相关系数达到峰值时,该位置即为目标子区的位置。目标子区的定位过程包括整像素搜索和亚像素匹配,实际上使用了优化方法。

(2) 粒子图像测速 PIV

通常将跟随性好且反光性强的示踪粒子大量地释放到所测流场内,粒子会跟着流体运动并保持一致的运动状态,此时即可以示踪粒子的运动速度反映出同一位置流体的运动速度,激光器发射出来的光束经柱面透镜散射后用来照亮测试流场中的示踪粒子,同时利用垂直于测试流场的 CCD 相机进行不间断的两次曝光,将同一区域不同时刻的粒子运动图像记录在 PIV 底片上^[25]。

图像处理技术能够针对较大测试区域难以准确确定同一粒子运动轨迹的问题将原本较大的区域划分成若干个称为查问区的小区域。再利用统计技术得出每个查问区粒子在流场中的位移大小和方向,再结合跨帧时间 Δt 计算粒子的速度矢量,如图 2 所示。通过统计每个查问区的粒子,得到每个查问区的速度矢量,再对所有的查问区进行处理,最终统计出整个测试区域的速度矢量场。

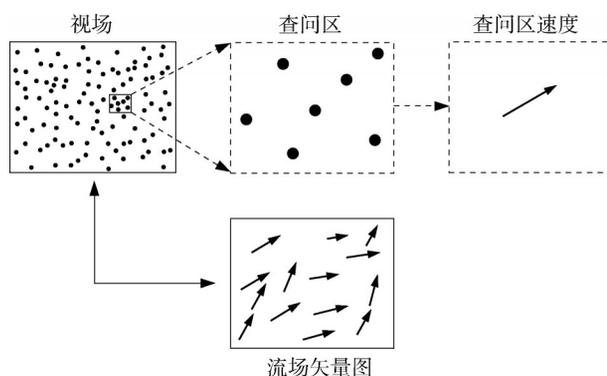


图 2 PIV 原理图^[25]

Fig. 2 Schematic diagram of PIV^[25]

在二维平面上,选取任一运动的示踪粒子,时间间隔为 Δt ,则它在 x 方向和 y 方向上的位移均与时间 t 存在函数关系,即:

$$v_x = \frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} = \bar{v}_x \quad (1)$$

$$v_y = \frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(t+\Delta t) - y(t)}{\Delta t} = \bar{v}_y \quad (2)$$

式中: v_x 、 v_y 分别为 x 、 y 方向上的瞬时速度; \bar{v}_x 、 \bar{v}_y 分别为 x 、 y 方向上的平均速度; Δt 为两次测量的时间间隔。

当测量间隔满足一定条件时,平均速度就能反映出瞬时速度。PIV测速即是根据示踪粒子的瞬时平均速度来反映出整个二维流场。

(3)数字照相变形量测(DPDM)

DPDM软件系统中,根据观测目标上是否使用人工量测标志点,将DPDM分为标点法和无标点法,前者因不受观测区域变形限制,图像处理速度较快等优点适用于模型试验、现场观测等大范围变形观测场景,但其测点布置操作较复杂且数量受限;后者因测点布置灵活且无需人工物理量测适用于小范围观测,但其缺点是量测精度对观测区变形突变性和环境光线变化敏感且图像分析时间较长^[20]。其中,图像分析程序PhotoTarget专门用于标点法数字照片的处理分析。而PhotoInfor既可以用于无标点法图像处理,也可以处理标点法图像。

进一步,针对岩土类材料局部化变形特性,提出了旋转加平动的图像相关分析三步搜索算法,然后说明了基于等参四边形单元的坐标转换与变形解释方法。DPDM软件系统可为砂土、黏土、钢筋混凝土、岩石等岩土工程常用材料的数字照相变形全程观测、演化过程以及局部分析提供有力支持。

2.1.2 测量方法原理的差异

DIC、DPDM等非接触测量方法虽然在基础数据的采用等方面存在差异,但基本原理均以照片上

$$\begin{cases} u + \Delta u - u_0 = c_x \frac{r_{11}(X_w - X_0) + r_{21}(Y_w - Y_0) + r_{31}(Z_w - Z_0)}{r_{13}(X_w - X_0) + r_{23}(Y_w - Y_0) + r_{33}(Z_w - Z_0)} \\ v + \Delta v - v_0 = c_y \frac{r_{12}(X_w - X_0) + r_{22}(Y_w - Y_0) + r_{32}(Z_w - Z_0)}{r_{13}(X_w - X_0) + r_{23}(Y_w - Y_0) + r_{33}(Z_w - Z_0)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u 和 v 为控制点在数字图像上的像素坐标; $c_y = f/dy$ 和 $c_x = f/dx$ 分别表示相机在纵轴与横轴上的聚焦程度; Δu 和 Δv 为像素点的畸变值,由式(4)求解; u_0 和 v_0 为像平面坐标原点(像主点)在数字图像上的

$$\begin{cases} \Delta u = (u - u_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + p_1 [3(u - u_0)^2 + (\nu - \nu_0)^2] + 2p_2(u - u_0)(\nu - \nu_0) + s_1 r^2 \\ \Delta \nu = (\nu - \nu_0)(k_1 r^2 + k_2 r^4) + 2p_1(u - u_0)(\nu - \nu_0) + p_2 [(u - u_0)^2 + 3(\nu - \nu_0)^2] + s_2 r^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: k_1 、 k_2 、 p_1 、 p_2 、 s_1 、 s_2 分别表示相机的径向、离心和薄棱镜畸变系数; r 为像素点与像主点间距, $r = \sqrt{(u - u_0)^2 + (\nu - \nu_0)^2}$ 。

点的相关性判断各点的位移,并进一步分析观察区域内的位移。图像相关技术在应用于实验流体力学时就发生了很大变化。如果两幅图像是在激光照射流体流动平面上的已知时间间隔内拍摄的,则图像分析可以用来测量流体中流动的大小和方向。在流体力学应用中,因为该技术被用来测量某种粒子的速度,基于DIC原理的图像相关技术通常也被称为PIV。

DIC和DPDM使用场景更偏向于室内试验道路、桥梁、隧道、基础、河坝、钢结构、钢混结构等土体结构的变形监测中。而PIV被广泛运用于浆液^[19]、泥石流^[26]、喷泉^[27]等流体运动的研究中。

2.2 三维图像测量

针对二维数字照相量测方法在透明岩体内部变形破裂观测方面存在的不足,林志斌等^[28]通过研究近景摄影测量相关算法开发三维数字照相量测技术,该技术采用多台图像采集设备(数码相机、摄像机等)观测目标,然后利用三维数字图像的相关算法解算观测目标上各待测点的三维变形,适用范围广泛。模型试验中该方法的量测求解过程大致为:

① 在试验开始前,布置至少8个已知空间坐标的控制点于观测目标周围,然后使用2台或2台以上的数码相机同时拍摄观测目标及设置的控制点;

② 联立每台数码相机的三维坐标模型方程,如式(3),求解得到各相机的6个畸变参数($k_1, k_2, p_1, p_2, s_1, s_2$)、4个内方位元素(u_0, v_0, c_x, c_y)与6个外方位元素($\varphi, \omega, \kappa, X_0, Y_0, Z_0$);

坐标; X_0, Y_0, Z_0 表示相机光心在三维空间中的坐标; X_w, Y_w, Z_w 为控制点的三维空间坐标; $r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33}$ 为相机旋转矩阵 R 中的9个系数,由相机3个独立的姿态角 φ, ω, κ 构成。

③ 保持数码相机静止,开始试验并控制各台相机在试验不同时间节点同时对模型进行拍摄;

④ 根据步骤②中求出的畸变参数、内外方位元素及不同时刻观测目标在各台数码相机中的图像坐

标,求得观测目标上各待测点的三维空间坐标;

⑤ 将所求的三维坐标值与初始状态下相应测点的坐标值相减,得到不同时刻各测点的变形值。

事实上,上述求解思路在近景摄影测量中一般被称为“直接线性变化法”,其求解精度往往相对较低。而基于“直接线性变换法”的“光束平差法”精度更高,该方法在平差计算时加入各待测点图像坐标,联立形成庞大的方程组,最终一次性求解得到所有相机的参数及各待测点的三维空间坐标。

基于直接线性变换法,结合光束平差法,林志斌等^[28]采用DELPHI结合MATLAB开发了三维数字照相量测软件系统Photogram_3D,该方法适用于以透明岩体为相似材料的相关室内试验。

3 DIC在室内盾构隧道施工模型试验中的应用

盾构隧道施工过程中,管片从盾尾脱出后,与土

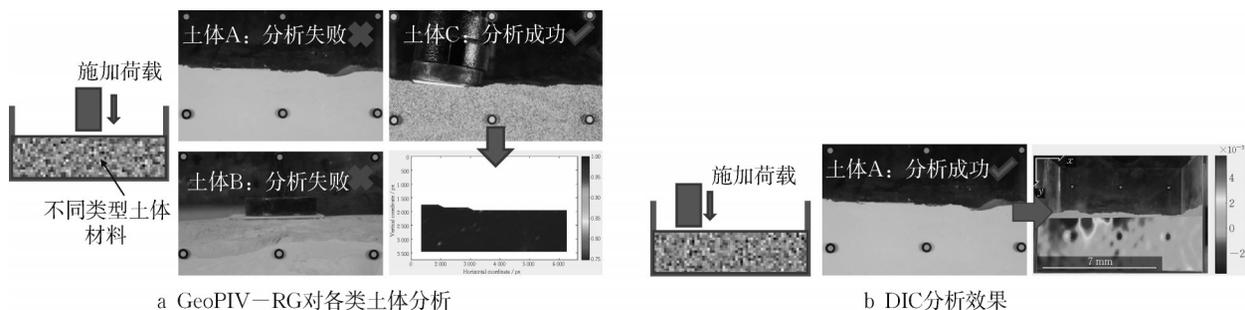


图3 不同算法分析结果对比

Fig. 3 Comparison of analysis results of different algorithms

3.1 试验系统

本试验的整体布置如图4所示,模拟装置包括围岩模拟装置(模型箱及相似土等)、掘进装置(伺服转动系统、伺服推进系统、导轨、反力支撑架、刀盘和盾壳等)、支护装置(管片等)。此外,图像采集设备包括:模型箱两侧的补光灯、盾构掘进口正断面的补光灯、3台高清拍照设备(2台侧面+1台正面)。补光灯的光色应与相机的焦距、曝光时间相协调,共同保证图片的清晰度,以便于土体位移分析的准确性。

结合目前西安地铁盾构隧道管片外径6.2 m的特点和边界效应,所用管片模型外径124 mm,试验模型箱长1 156 mm、宽500 mm、高1 000 mm。由于有机玻璃易刮花,重复使用率较低,且刮花会导致图像分析的结果误差较大。因此,模型箱前后均使用

体之间形成盾尾间隙,对围岩造成一定扰动。针对黄土地层盾构隧道施工时的围岩变形特性及围岩压力计算模型,结合第1节关于非接触测量方法在岩土工程、隧道工程等诸多领域应用广泛的特点,本文以黄土地层盾构掘进的室内模型试验为案例,对数字图像测量方法在模型试验中的应用过程进行具体介绍,并对试验结果进行分析。

在隧道掘进试验前,首先对基于PIV的GeoPIV-RG程序以及基于DIC的Nocrr程序进行适用性验证。在试验箱中添加本次模型试验材料,通过顶部施加荷载,观察荷载作用过程中土体颗粒的位移情况。如图3所示,发现当土体颗粒较为细时,土体颗粒A及掺入染色剂增加颗粒辨识度的土体B,采用GeoPIV-RG均无法成功分析。但当采用较粗颗粒的土体C时,分析可正常进行。相对PIV分析手段,DIC对均一的土体A可以成功分析。因此后续试验使用DIC进行位移分析。

8 mm厚的超白透明钢化玻璃便于观察围岩变形现象,如图5所示。

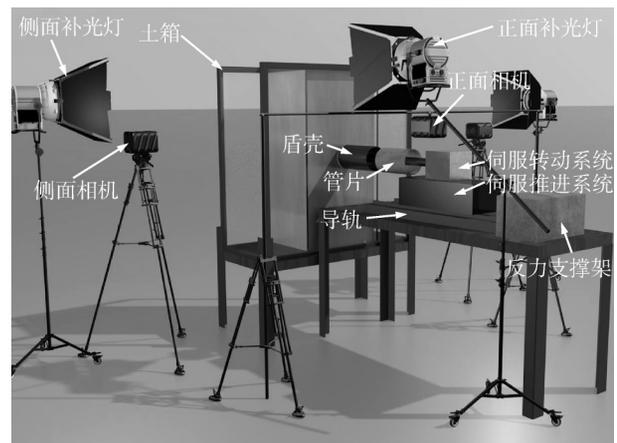


图4 模型试验C4D效果图

Fig. 4 C4D effect of model test



图5 模型试验箱(单位: mm)

Fig. 5 Chamber of model test (unit: mm)

以西安地铁某区间为依托工程,依托盾构机图纸,对刀盘及盾壳进行简化并制作,如图6所示。其中,盾构模型掘进时,保证盾构刀盘以一定线速度推进的同时以一定的角速度转动。由于现场的盾构推进速度为 $40\sim 60\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,刀盘转速为 $1.50\sim 1.60\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。因此,设定模型推进速度为 0.02

$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$,故掘进一环需 25 min ,刀盘转动速度为 $1.50\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

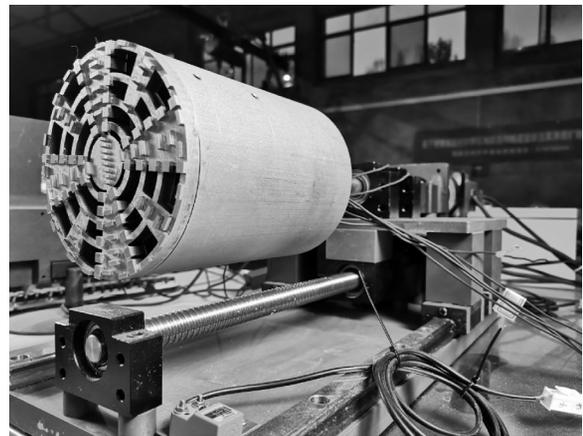


图6 盾构机模型

Fig. 6 Model of shield machine

试验期间的主要监测项目为盾构掘进时的进洞口横断面土体变形情况,运用DIC技术对相机拍摄的土体变形图片进行处理,得到盾构掘进时的土体位移规律,具体流程如图7所示。

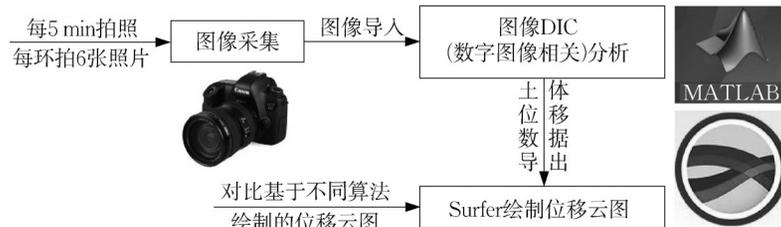


图7 图像分析流程

Fig. 7 Image analysis process

3.2 2D边界条件下盾构掘进土体变形情况

盾构掘进(图6)时,距离隧道轴心不同距离边界条件下的土体变形规律相似。本文选择距离管片轴心 2 倍管片外径($2D$)条件下的土体变形规律进行分析,对盾构掘进到 8 环距离时的土体水平和竖向位移进行分析。其中, x 和 y 的正方向分别为向右和向下,如图1所示。此外,对室内模型试验的尺寸进行几何相似(相似比为 50),使之与实际工程相联系。

3.2.1 进洞口横断面土体水平位移

盾构掘进时进洞口横断面土体水平位移如图8所示,虽然对土体拍摄的范围较广,但试验发现低含水率黄土的自稳性较好,只有盾构隧道上方的部分土体变形较大。

由图8可知,低含水率黄土地层中盾构掘进 8 环管片距离时,隧道两侧围岩的扰动范围在盾构掘进中轴线两侧 $0.75D$ 左右。盾构掘进时,水平位移存

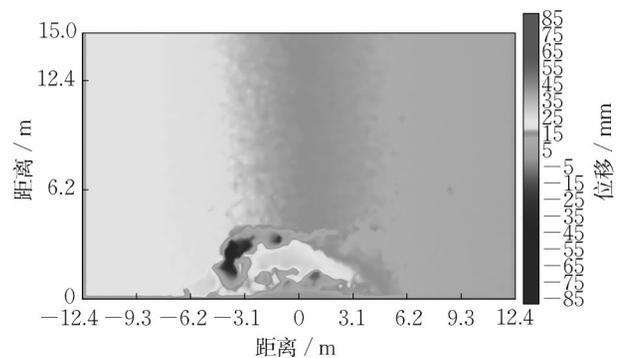


图8 盾构掘进8环时进洞口横断面土体水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement of soil in cross-section of entrance at a shield tunneling of eight rings

在竖直向的等高线,土体沿水平向呈现整体移动规律;且土体整体呈现右移现象,这与盾构机顺时针

转动掘进密不可分。

3.2.2 进洞口横断面土体竖向位移

盾构掘进时进洞口横断面土体竖向位移如图9所示。

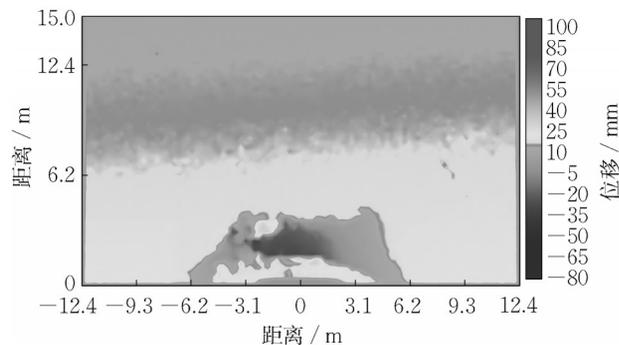


图9 盾构掘进8环时进洞口横断面土体竖向位移

Fig. 9 Vertical displacement of soil in the cross section of entrance at a shield tunneling of 8 rings

由图9可知,低含水率黄土地层中盾构掘进至8环管片距离时,隧道两侧围岩扰动范围在盾构掘进中轴线1D左右。与水平位移相似,竖向位移存在水平向的等高线,且大范围土体发生了整体向下的位移。此外,与盾构隧道紧密相连的上方小部分土体下移,发生松动塌落,而上方一部分土体隆起,在盾构机掘进时土体随盾构机转动掘进发生顺时针方向的偏转,土体出现隆起、抬升现象。

4 结论

本文重点介绍了二维数字图像测量方法在隧道模型试验中的应用现状、技术发展和基本原理。并对三维测量方法的原理及在隧道模型试验中的应用潜力进行分析。最后,通过黄土地层盾构隧道的掘进模型试验,对数字图像测量技术在隧道模型试验中的应用进行示范。主要得出如下结论:

(1) DIC、DPDM等非接触测量方法的基本原理均以照片上点的相关性判断各点的位移,并进一步分析观察区域内的位移。该方法的使用场景更偏向于室内试验隧(巷)道、基础、边坡、大坝、路面、桥梁、钢筋混凝土结构、钢结构等结构的变形监测。

(2) PIV分析中两幅图像是在激光照射流体流动平面上的已知时间间隔内拍摄的,图像分析可以用来测量流体中流动的大小和方向,该方法被广泛应用于浆液、泥石流、喷泉等流体运动的研究中。

(3) 通过开展黄土地层盾构隧道室内模型试验发现,低含水率黄土地层盾构掘进8环管片距离时,

围岩的扰动范围为盾构掘进中轴线两侧1D左右和盾构上方1D范围内。

作者贡献声明:

韩兴博:论文初稿,指导论文思路和框图,校核论文。

冯浩岚:室内试验,试验结果分析,绘图和修改论文。

何乔:调研室内试验的相关资料,DIC软件调试。

王培源:补充室内试验的相关资料。

陈子明:调研及参与论文的修改。

姜智普:参与论文的修改。

参考文献:

- [1] 刘博,徐飞,赵维刚,等.隧道工程结构模型试验系统研究综述与展望[J].岩土力学,2022,43(S1):452.
LIU Bo, XU Fei, ZHAO Weigang, *et al.* Review and prospect of model test system for tunnel engineering structure[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022,43(S1):452.
- [2] 郭舜年.二滩水电站导流隧洞围岩与支护系统的地质力学平面模型试验研究[J].水电站设计,1997(2):96.
GUO Shunian. Study on geomechanical plane model test of surrounding rock and supporting system of diversion tunnel of Ertan hydropower station[J]. Design of Hydroelectric Power Station, 1997(2):96.
- [3] 顾金才,沈俊,陈安敏,等.锚固洞室受力反应特征物理模型试验研究[C]//第一届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会论文集(下册).太原:[s.n.],1999:91-95.
GU Jincai, SHEN Jun, CHEN Anmin, *et al.* Physical model test on mechanical response characteristics of anchored caverns[C]// Proceedings of the First Cross-Strait Academic and Technical Symposium on Tunnel and Underground Engineering(Vol. 2). Taiyuan:[s.n.],1999:91-95.
- [4] 李又云,张志耕,谢永利,等.隧道洞顶围岩竖向全位移量测及变化规律研究[J].岩土力学,2013,34(6):1703.
LI Youyun, ZHANG Zhigeng, XIE Yongli, *et al.* Study of site monitoring of vertical full displacement of vault surrounding rock of tunnels and its change law[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6):1703.
- [5] 李仲奎,王爱民.微型多点位移计新型位移传递模式研究和误差分析[J].实验室研究与探索,2005(6):14.
LI Zhongkui, WANG Aimin. Research on the displacement transfer pattern and error analysis for mini-type multi-point extensometer[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2005(6):14.
- [6] 刘泉声,徐光苗,张志凌.光纤测量技术在岩土工程中的应用[J].岩石力学与工程学报,2004(2):310.
LIU Quansheng, XU Guangmiao, ZHANG Zhiling. Applications of fiber optic sensors to geotechnical engineering monitoring[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004(2):310.
- [7] 李元海,靖洪文,刘刚,等.数字照相量测在岩石隧道模型试验中的应用研究[J].岩石力学与工程学报,2007(8):1684.
LI Yuanhai, JING Hongwen, LIU Gang, *et al.* Study on

- application of digital close range photogrammetry to model test of tunnel in jointed rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007(8): 1684.
- [8] STANIER S A, BLABER J, TAKE W A, *et al.* Improved image-based deformation measurement for geotechnical applications[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2016, 53(5): 727.
- [9] BLABER J, ADAIR B, ANTONIOU A. Ncorr: open-source 2D digital image correlation matlab software [J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 55(6): 1105.
- [10] IDINGER G, AKLIK P, WU W, *et al.* Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel[J]. *Acta Geotechnica*, 2011, 6(2): 105.
- [11] HUANG F, WU C, NI P, *et al.* Experimental analysis of progressive failure behavior of rock tunnel with a fault zone using non-contact DIC technique [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 132: 104355.
- [12] SUN J, LIU J. Visualization of tunnelling-induced ground movement in transparent sand[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 40: 236.
- [13] 李堂勇. 基于数字图像相关技术的浅埋隧道振动台试验研究[D]. 都江堰: 四川农业大学, 2019.
LI Tangyong, Experimental study on shaking table of shallow tunnel via digital image correlation technology [D]. Dujiangyan: Sichuan Agricultural University, 2019.
- [14] TAKE W A. Thirty-sixth Canadian geotechnical colloquium: advances in visualization of geotechnical processes through digital image correlation[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2015, 52(9): 1199.
- [15] 王文学, 苏凌煜, 薛景元, 等. 基于PIV技术的贯通单裂隙岩体压-剪破坏特征试验[J]. *工程地质学报*, 2021, 29(4): 1121.
WANG Wenxue, SU Lingyu, XUE Jingyuan, *et al.* PIV technology based experiment for compression shear failure characteristics of connected fissure rock mass [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2021, 29(4): 1121.
- [16] 曹兆虎, 孔纲强, 刘汉龙, 等. 基于PIV技术的沉桩过程土体位移场模型试验研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(8): 168.
CAO Zhaohu, KONG Gangqiang, LIU Hanlong, *et al.* Model test on deformation characteristic of pile driving in sand using PIV technique[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(8): 168.
- [17] 方焘, 梁连, 颜建伟. 不同埋深下盾构隧道施工引起的地层变形试验[J]. *长江科学院院报*, 2023, 40(3): 85.
FANG Tao, LIANG Lian, YAN Jianwei. Experimental study on stratum deformation caused by shield tunnelling at different buried depths [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2023, 40(3): 85.
- [18] CILINGIR U, MADABHUSHI S P G. A model study on the effects of input motion on the seismic behaviour of tunnels[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(3): 452.
- [19] 李文涛. 基于人工合成透明土盾构隧道壁后同步注浆模型试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
LI Wentao. Model test of shield tunnel backfill grouting using synthetic transparent soil[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.
- [20] 李元海, 靖洪文, 曾庆有. 岩土工程数字照相量测软件系统研发与应用[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006(S2): 3859.
LI Yuanhai, JING Hongwen, ZENG Qingyou. Development and application of digital photogrammetry software package for geotechnical engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006(S2): 3859.
- [21] 李元海, 朱合华, 上野胜利, 等. 基于图像相关分析的砂土模型试验变形场量测[J]. *岩土工程学报*, 2004(1): 36.
LI Yuanhai, ZHU Hehua, KATSUTOSHI Ueno, *et al.* Deformation field measurement for granular soil model using image analysis[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2004(1): 36.
- [22] 李元海, 靖洪文, 刘刚, 等. 数字照相量测在岩石隧道模型试验中的应用研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007(8): 1684.
LI Yuanhai, JING Hongwen, LIU Gang, *et al.* Study on application of digital close range photogrammetry to model test of tunnel in jointed rock masses [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007(8): 1684.
- [23] SUN Y, PANG J H L, WONG C K, *et al.* Finite element formulation for a digital image correlation method [J]. *Applied Optics*, 2005, 44(34): 7357.
- [24] PAN B, QIAN K, XIE H, *et al.* Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review[J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, 20(6): 062001.
- [25] 黄瀚仪. 长压短抽式掘进工作面流场PIV实验研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2022.
HUANG Hanyi. PIV experimental study on flow field of long pressure short suction heading face[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2022.
- [26] 周航, 邹宗良, 刘汉龙. 基于PIV技术的透明粘性泥石流冲击桥墩模型试验[J/OL]. *中国公路学报*, [2023-03-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1313.u.20230228.1630.002.html>.
ZHOU Hang, ZOU Zongliang, LIU Hanlong. Model test of transparent viscose debris flow impact on bridge pier based on PIV technology [J/OL]. *China Journal of Highway and Transport*, [2023-03-02]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail//61.1313.u.20230228.1630.002.html>.
- [27] 夏耀稳. 温度和浓度共存均匀环境流体中弱轴对称圆形喷泉流动行为研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2022.
XIA Yaowen. Behavior of weak axisymmetric round fountains in homogeneous fluid under the combined temperature and concentration effect[D]. Kunming: Yunnan Normal University, 2022.
- [28] 林志斌, 张勃阳, 李元海, 等. 透明岩体三维数字照相量测技术开发与应用[J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(5): 1077.
LIN Zhibin, ZHANG Boyang, LI Yuanhai, *et al.* Development of three-dimensional digital photogrammetry technology and its application in transparent rock [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(5): 1077.