

DOI: 10.11779/CJGE20240825

透明土高对比度颗粒染色制斑法及试验应用

李赓照, 单仁亮*, 窦浩宇, 周博森, 王逸飞

(中国矿业大学(北京)力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 在透明土试验技术与数字图像技术的联合应用中, 散斑图像的质量稳定性直接决定着图像获取的质量和测量的精度。提出高对比度颗粒染色制斑法, 利用 MIG 和零位移试验对其开展散斑质量评价, 确定稳定的、高质量的透明土散斑图像的最优配置比。通过矩形顶管透明模型试验的应用例验证其应用效果, 结合现场监测数据, 以位移云图、位移矢量图和位移曲线阐述地表变形规律与背土效应的内部演化过程。结果表明: ①透明土散斑优选的双色染色剂为黑色水性色精染色液和白色水性哑光漆, 最优配置比 $B:W$ 为 8:10, 此时 MIG 最高, 应变云图平坦且拥有最少的散斑超限识别误差; ②透明土模型试验结果与现场监测结果均揭示了矩形顶管背土效应包括沿着顶进方向逐步出现的沉降区、补偿区、隆起区, 且长距离工程中, 背土效应的出现有连续性; ③沉降区与补偿区的隆起由顶进压力产生, 隆起区的隆起为顶进压力和管土摩阻力的共同结果, 由管土摩阻力引起的区域隆起变形为顶进压力引起变形的 2 倍; ④高对比度颗粒染色制斑法避免了过曝、失真、干扰、信息缺失等问题的出现, 获得了良好的试验应用效果。

关键词: 透明土试验技术; 数字图像技术; 散斑质量; 矩形顶管; 背土效应

中图分类号: TU432 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)11-2397-11

作者简介: 李赓照(1998—), 女, 博士研究生, 主要从事城市地下空间和交通岩土工程方面的研究工作。E-mail: cumtblg@126.com。

High Contrast Particle Staining method for transparent soil and its experimental application

LI Gengzhao, SHAN Renliang, DOU Haoyu, ZHOU Bosen, WANG Yifei

(School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: In the joint application of transparent soil testing technology and digital image correlation technology, the quality stability of speckle pattern directly determines image acquisition and measurement accuracy. The High Contrast Particle Staining (HCPS) method is proposed for the stable high-quality transparent soil speckle patterns, which is evaluated by MIG and zero-displacement test to determine the optimal configuration ratio of speckles. The application effects are verified through a transparent model test of rectangular pipe-jacking, the internal evolution process of surface deformation law and back-soil effect are elaborated by using displacement nephograms vector diagrams and curves combined with field monitoring data. The results show that: (1) The optimal staining agents for transparent soil is black water-based chromatin solution and white water-based matte paint, and the optimal configuration ratio $B:W$ is 8:10. At the moment, the MIG is the highest, the strain nephogram is flat and has the least identification error of speckle over-range. (2) The results of transparent soil model test and field monitoring data jointly revealed the occurrence of back-soil effect of rectangular pipe-jacking. It includes subside area, compensation area and uplift area gradually appearing along the jacking direction, and the occurrence of back-soil effect is continuous in long-distance projects. (3) The uplift of subside area and compensation area is caused by jacking pressure, and the uplift area is the influence of jacking pressure and pipe-soil friction. The regional uplift deformation caused by pipe-soil friction is twice than that caused by jacking pressure. (4) HCPS method avoids problems of overexposure, distortion, interference, and lack of information, and has achieved a good experimental application effect.

Key words: transparent soil testing technology; digital image correlation technology; quality of speckle patterns; rectangular pipe-jacking; back-soil effect

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52274148); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2022YJSLJ11) This work was supported by the General Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52274148), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2022YJSLJ11).

收稿日期(Received): 2024-08-14 修回日期(Revised): 2025-03-06 接受日期(Accepted): 2025-03-13 网络出版日期(Online): 2025-03-14

*通信作者 (E-mail: cumtblg@126.com)

0 引言

透明土试验技术的发展实现了土体内部变形的可视化^[1]，突破了传统土体模型试验对于土体内部变形的接触式、局部式、非连续性测量的壁垒^[2-4]。大量学者^[5-8]通过将透明土与数字图像技术结合，实现了对颗粒体应变场、位移场的全局观测，开展了卓有成效的定量化研究。

当前应用最广泛、最成熟的数字图像技术与分析方法是 DIC (digital image correlation) 法^[9]，该方法以散斑图像为信息载体^[10-11]。DIC 通过关联与比较创建在样品拍摄平面的散斑图案在变形前后的两幅图像，匹配参考图和变形图中的相关特征点，求解出全场位移与变形。因此，散斑图像的质量直接决定 DIC 图像获取的质量和测量的精度。

散斑的随机性、可识别性与同一性是最关键的 3 个特性，而现有制斑方法往往使得透明土散斑的生成质量低、稳定性差。激光散斑适用于严格满足固液二相体的土样，如若透明土内部存在气泡，激光在气泡处形成强烈地干涉与叠加，则导致对象识别异常，散斑标记发生错误，如图 1 (a)。当透明土模型内部有其他构件存在时，激光在构件表面产生反射或漫反射，使得构件周围散斑过曝，发生去相关效应，区域可识别性差，如图 1 (b)。通过外置人工圆珠测点或添加乳液与固化剂的方法提升散斑稳定性，如图 2，会导致散斑面土体性质有别于周围土体，丧失试验结果的可信度。

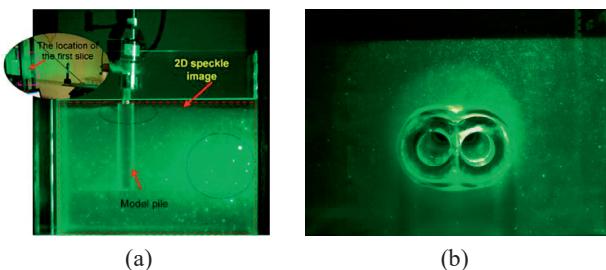


图 1 气泡与其他构件干扰下的激光散斑^[12-13]

Fig. 1 Laser speckles under interference of bubbles and other components^[12-13]

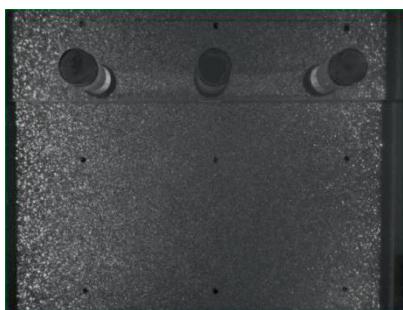


图 2 人工圆珠测点散斑^[14]

Fig. 2 Artificial balls measuring point speckles^[14]

对于被测对象来说，即使尺寸、变形情况和 DIC 计算的参数一样，不同的散斑图案得到的计算结果也会有很大差异，因此对于散斑图案质量的评价是至关重要的。有效地评估散斑图的质量对于修正算法的测量误差、提高测量的精度具有一定的意义。散斑质量评估局部参数主要包括子集熵^[15]、子集强度梯度平方和 (SSSIG)^[16]和子集强度标准差 (SDGIS)^[17]，全局参数主要包括散斑颗粒大小、平均散斑大小、平均灰度梯度 (MIG)^[18-19]、香农熵^[20]。局部参数只是用来描述单个子区的图像质量，相比之下全局参数则可以对整幅散斑图案进行评价，更具有普适性。一幅高质量的散斑图在颗粒尺寸合适的前提下，应该具有较大的 MIG 与熵值。在评价 MIG 值或者熵之间不是很明显的散斑图案质量时，可以进一步结合零位移试验来细化分析。

综上，为了获得稳定的高质量透明土散斑图像并验证其应用效果，以熔融石英砂为骨料，正十二烷与 #15 白矿油为孔隙流体的透明土为研究对象，提出高对比度颗粒染色制斑法（下文称 HCPS 方法），利用 MIG 和零位移试验开展散斑质量评价，确定稳定且高质量的透明土散斑的最优配置比。进一步，通过矩形顶管透明模型试验的应用例验证其应用效果，结合现场监测数据，以位移云图、位移矢量图和位移曲线阐述地表变形规律与背土效应的内部演化过程。研究成果为透明土试验技术的发展与应用，提供重要的试验借鉴。

1 HCPS 方法

HCPS 方法的原理是通过选用高对比度的双色染色剂，对透明土的熔融石英砂颗粒进行分组染色、烘干、定比例混合，使其显示出符合散斑随机性、可识别性与同一性标准的高质量散斑图案。

1.1 双色染色剂的选择

双色染色剂的选择应满足：

(1) 与孔隙流体不相溶。避免染色剂在透明土的配置与试验过程中因为相溶而从颗粒表面脱落、失真。

(2) 良好的耐热性能。保证在烘烤或高温试验中不脱色、不变色。

(3) 固化后染色剂的粘结力小于颜色在颗粒表面的附着力。即烘干后的砂粒团可以被轻易打散，颜色紧密附着于熔融石英砂颗粒表面，不会因为颗粒间接触而从熔融石英砂表面脱落。

(4) 颜色对比度高。为使得散斑图像的灰度值具有较高的对比度，散斑颜色选用黑色与白色^[21-22]。

(5) 哑光。确保在光源的照射下不会发生漫反射，不干扰识别性。

表 1 染色剂对比测试结果

Table 1 Experimental results of stain contrast test

编 号	染色剂	孔隙流体相溶 性	耐热性能		颜色附着 力	备注	实物图
			80℃烘 干 时间/min	烘 干 效 果			
1	高浓度水性色 精	不溶	15	极佳, 极 易打散	强	没有白色色精。	
2	高浓度油性色 精	溶	20	较佳, 易 打散	较弱		
3	水性哑光漆	不溶	10	极佳, 极 易打散	强	负压喷头对小粒径不友好, 推荐 采用浸泡后过滤的操作方法, 避 免喷涂上色。	
4	油性哑光漆	溶	20	一般, 不 易打散	弱		
5	酸性染料	不溶	30	较佳, 易 打散	较弱	烘干时间较久, 且存在偶发的颗 粒着色失败现象。	
6	丙烯	不溶	80	差, 无法 打散	强	结团严重, 强行打散会使得颗粒 破碎。	
7	铁氰化钾	不溶	25	较佳, 易 打散	强	只有橘红色。	

(6) 附着层厚度小, 不改变颗粒粒径, 且不会对熔融石英砂本身力学性质造成改变。

对多种染色剂开展了对比测试, 测试结果汇总于表 1。根据测试结果, 最终选用黑色水性色精染色液和白色水性哑光漆作为黑白双色染色剂。

1.2 制斑操作流程

图 3 为 HCPS 方法操作流程图。图 4 为采用 HCPS 方法制作的散斑颗粒实物图。

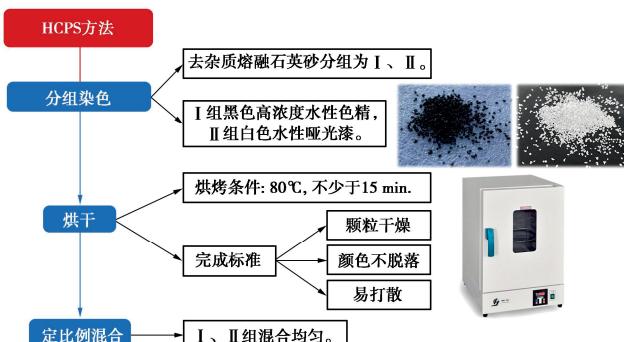


图 3 HCPS 方法操作流程

Fig. 3 Operation process of HCPS method

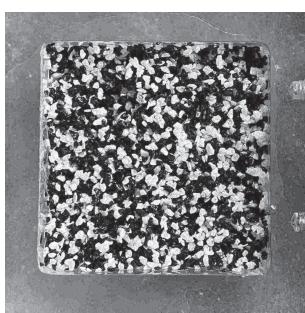


图 4 HCPS 散斑实物

Fig. 4 Object of speckles made by HCPS method

2 散斑质量评价

2.1 散斑图像与 MIG 评价

潘兵等^[18]、Pan 等^[19]提出平均灰度梯度 (MIG) 作为散斑全局评价参数:

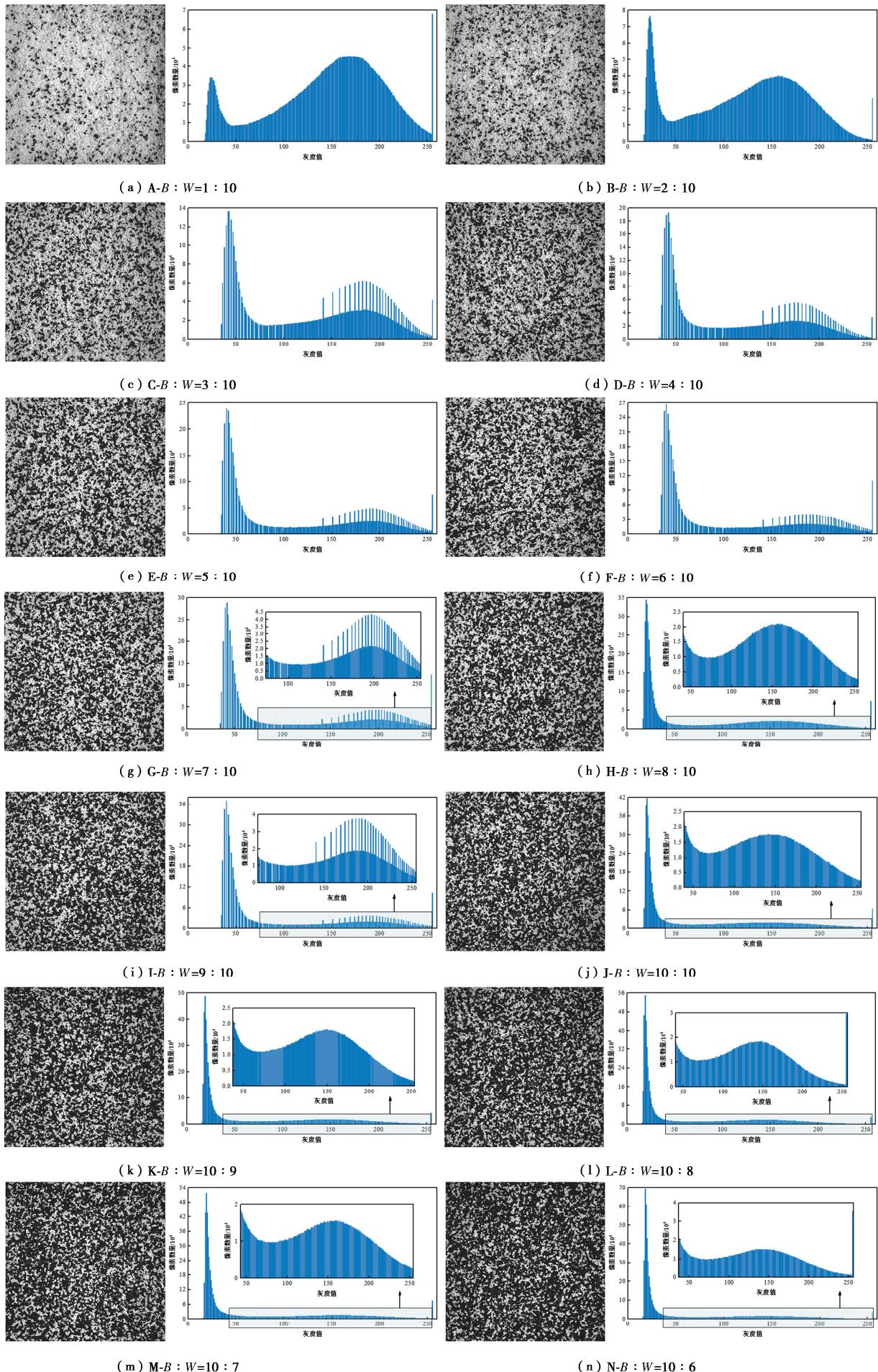
$$MIG = \frac{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H \sqrt{f_x(x_{ij})^2 + f_y(x_{ij})^2}}{WH} \quad (1)$$

式中: W 和 H 为以像素为单位的图像尺寸; $f_x(x_{ij})$ 和 $f_y(x_{ij})$ 为像素点在 x 和 y 方向的灰度梯度, 通过中心差分法计算确定。

在 DIC 方法中, 为了使子区被唯一识别, 子区内像素必须包含灰度梯度, 因此一幅高质量的散斑图像对应有具有较大的 MIG。MIG 越大, 散斑图像灰度的对比度越强烈, 越有利于 DIC 进行相关搜索与识别。

为确定散斑图像的最优黑白颗粒比, 采用 0.5~1.0 mm 的熔融石英砂, 经 HCPS 方法制成散斑, 按照黑白比 $B:W$ 为 (A)1:10, (B)2:10, (C)3:10, ……, (J)10:10, (K)10:9, (L)10:8, ……, (S)10:1 充分混合后拍摄 19 组散斑图像, 图像分析区域 AOI 为 2400 pixel×2400 pixel, 图 5 为散斑图像与对应灰度直方图。

表 2 列出了由式 (1) 计算得到的各散斑图像的 MIG, 可以看出, 随着 $B:W$ 的增大, 对应的 MIG 先增加后减小, 最大值与最小值之间相差较多。较高水平的 MIG 对应 $B:W$ 为 6:10, 7:10, 8:10, 9:10, 10:10 和 10:9, 即黑白颗粒占比相当的区间内。这 6 组散斑图像之间, MIG 浮动不明显。当 MIG 差距较小时, 不应由单一的 MIG 指标作为评价标准, 应当结合 DIC。



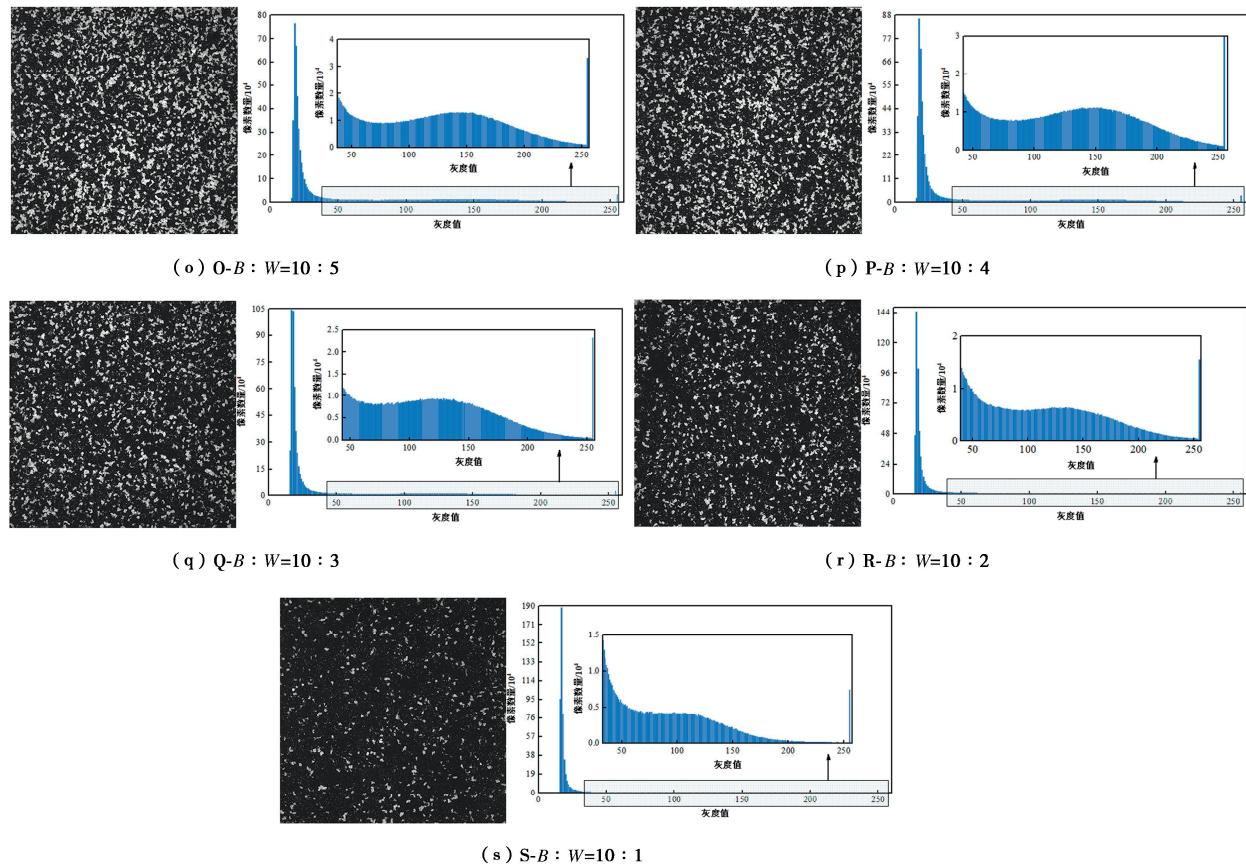


图 5 散斑图像及其灰度直方图

Fig. 5 Speckle patterns and corresponding histograms

表 2 所用散斑图像的 MIG

Table 2 MIG of speckle patterns used in the research

图像	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
MIG	6.46	20.98	26.17	26.34	34.03	44.21	43.82	48.39	43.33	45.68	43.92	41.70	41.85	41.81	39.82	31.03	27.58	19.25	14.56

2.2 零位移试验

将 F~K 散斑图像作为参考图像, 拷贝的副本作为变形图像, 对比 6 组横向应变与纵向应变。由于 DIC 的应变测量系统 MatchID-2D/Stereo 的应变分辨率为 10×10^{-6} , 在此范围内的应变量为可以接受的系统误差, 因此对应理想应变误差范围为 $\pm 10 \times 10^{-6}$ 以内。

图 6 (a), (b) 为各组横向应变与纵向应变误差云图, 图 7 (a), (b) 为应变误差曲线图, 表 3 汇总了在应变误差范围的散斑百分比。可以看出, 更高水平的 MIG 在一定程度上代表着更优异的散斑识别效果, 如 F, G, H, J 图像, 但也不可避免地出现了部分误差 (如 I) 或全域误差 (如 K) 较大的情况。进一步地对比发现, G 图像和 J 图像的应变识别误差超出容许范围的点数较多; 此项更具优势的 F 图像, 在云图中显示出不均匀的识别效果, 横向应变误差在左下边界集中, 纵向应变误差在右上边界集中, 且集中程度超过前者; 由此表明, 应变误差超限点数虽然较少, 但是其超限程度较高。H 图像的云图平坦, 且拥有最少的散斑超限识别误差, 因此综合分析认为, 最

优散斑图案对应的黑白颗粒比为 8 : 10。

表 3 在应变误差容许范围内的散斑占比

Table 3 Percentage of speckles within strain error tolerance

散斑图像	F	G	H	I	J	K
横向应变	93.67	84.75	93.67	23.93	84.10	0.85
纵向应变	84.81	88.56	94.94	63.25	84.10	28.81

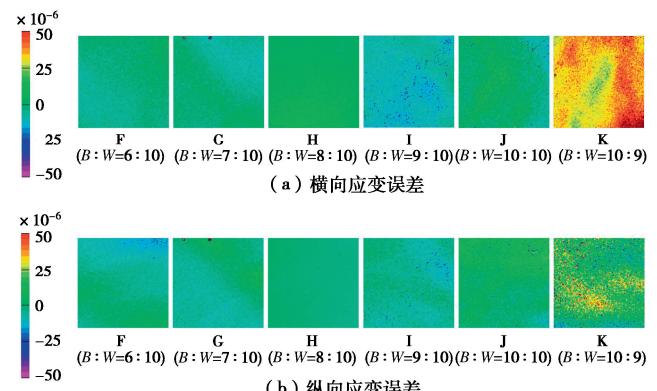


图 6 散斑图像横向应变与纵向应变误差云图

Fig. 6 Strain error nephograms in x and y direction of speckle patterns

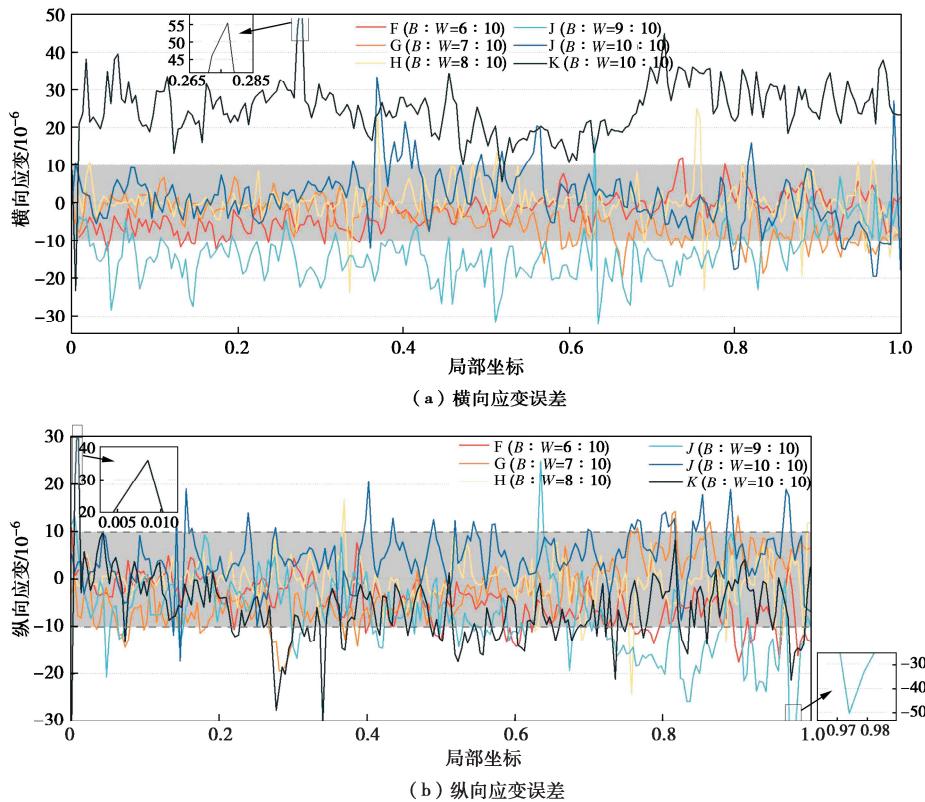


图 7 散斑图像横向应变与纵向应变误差曲线图

Fig. 7 Strain error curves in x and y direction of speckle patterns

3 试验应用分析

利用前文获得的 HCPS 方法的最优颗粒配置比, 以北京地铁#12 线三元桥站工程为原型, 通过矩形顶管背土效应缩尺模型试验的应用实例, 分析散斑信息, 揭示背土效应的内部演化过程, 阐述 HCPS 方法在最优颗粒比条件下的散斑识别与应用效果。

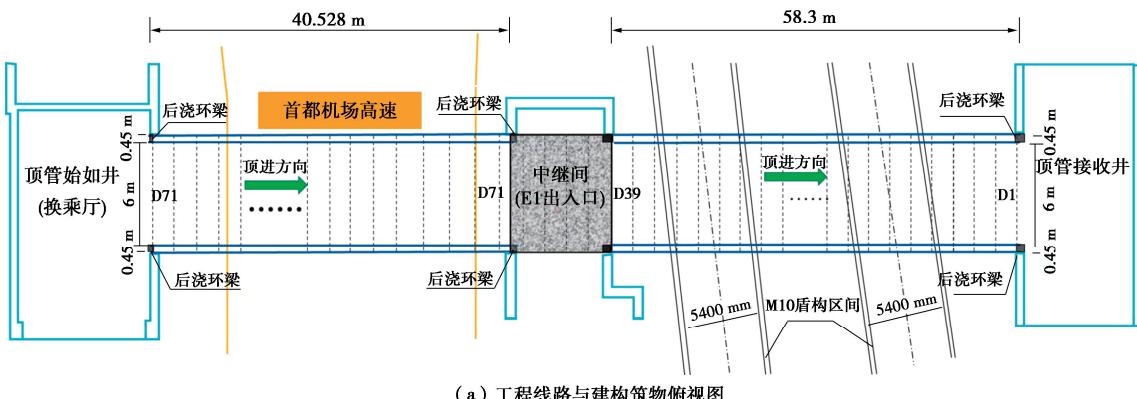
3.1 工程原型概况

如图 8 (a), (b) 所示, 北京地铁#12 线三元桥站矩形顶管工程从换乘厅内始发, 经过 E1 出入口后, 在 E2 出入口内接收, 前程 40.53 m, 后程 58.30 m。顶管机尺寸为 6940 mm×4940 mm, 管节外尺寸为 6900 mm×4900 mm。工程埋深 2.8~3.8 m, 覆土主要

为杂填土层和粉细砂层。顶推速度控制在 10~30 mm/min。

3.2 缩尺模型试验设备与材料制备

试验设备包括 DIC 成套设备和自主研发的矩形顶管缩尺模型试验系统, 如图 9 (a), (b) 所示。DIC 成套设备包括 CCD 摄像机、镜头、精密三角支架、冷光源, 以及光电转换传感器和后处理系统。采用一体化顶管和土体替代段, 二者通过磁吸和卡槽双对接, 简化了管节拼接、机头掘进和渣土排出的过程, 减弱了顶管机对覆土扰动的不可控性。同时, 模型试验系统还包括亚克力模型箱体、密封法兰、伺服电机、数电控制机、真空泵等结构。



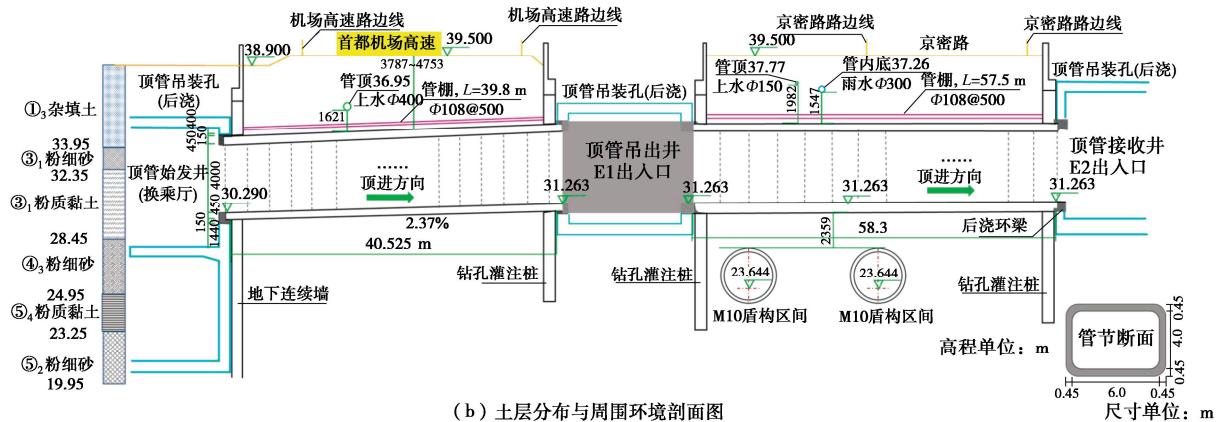


图 8 三元桥站工程概况

Fig. 8 Engineering layout of Sanyuanqiao station project



Fig. 9 Apparatuses of scaled model test

含 HCPS 散斑透明土材料的配置方法:

(1) 保持室内温度恒定, 按照正十二烷与^{#15}白矿油质量比约1:4混合为孔隙流体, 微调, 直至通过阿贝折射仪测定孔隙流体的折射率为1.4585。

(2) 按照 HCPS 方法制作 $B:W=8:10$ 的混合散斑。

(3) 将孔隙流体倒入模型箱内, 缓慢均匀撒入透明熔融石英砂, 在观测面位置替换为散斑颗粒, 压实土体

(4) 若(3)中气泡产生较多, 则配合真空泵做抽真空消气泡处理

3.3 背土效应试验过程

矩形顶管缩尺模型试验系统选择尺寸相似比

$C_L = 100$ ，压缩模量相似比 $C_E = 100$ ，利用量纲分析法和相似理论第2定理，可得到各物理参量相似比之间的关系。将三元桥工程条件简化为顶管机尺寸 $6940\text{ mm} \times 4940\text{ mm}$ ，管节尺寸 $6900\text{ mm} \times 4900\text{ mm}$ ，各边高度差 20 mm ；埋深 3 m ，顶程 40 m ，顶进速度 20 mm/min 。由此对应的缩尺模型试验中，土体替代段的截面尺寸为 $69.4\text{ mm} \times 49.4\text{ mm}$ ，管节尺寸为 $69\text{ mm} \times 49\text{ mm}$ ，各边高度差 0.2 mm ；埋深 30 mm （宽深比 C/D 为 0.45 ）、顶程 400 mm 、顶进速度 2 mm/min （其中，速度相似比的关系为 $C_v = \sqrt{C_L} = 10$ ）。

将一体化顶管和土体替代段在起点位置通过磁吸与卡槽双对接，确保二者中心对应，此时二者高度差即为 0.2 mm。将含 HCPS 散斑透明土填入模型箱体，散斑面位于顶进方向土体替代段中线位置，高度 30 mm，距离土体左、右边界均为 100 mm，以消除边界效应，如图 10 所示。调整 DIC 的拍摄视野，覆盖 400 mm 的顶程范围，并确保聚焦在散斑面上。设置顶进速度为 2 mm/min，平坡顶进。记录矩形顶管顶进诱发背土效应的全过程演化模式。

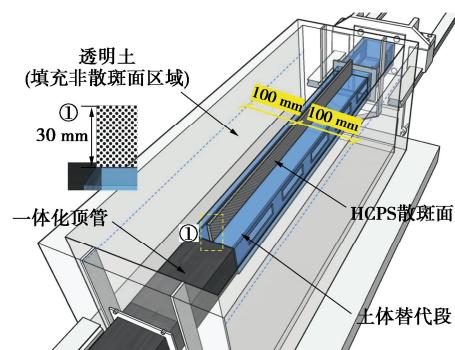


图 10 散斑面设置方式与相对位置

Fig. 10 Settings of speckle patterns and relative positions

3.4 地表变形的试验与工程对照

图 11 为工程现场测点布置示意, 将 DIC 采集的散斑图像通过 MatchID 进行后处理, 获得地表纵向隆

沉曲线,与工程中地表纵向位移的监测曲线进行比对,以隆起为正、沉降为负,如图 12 所示。

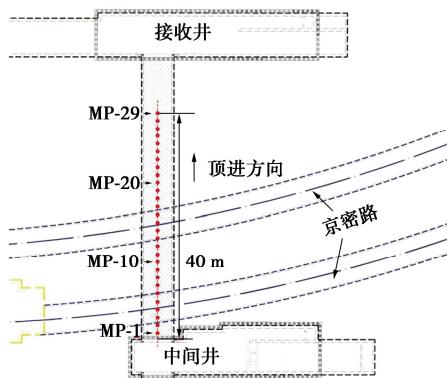


图 11 三元桥站地表变形测点布置 (40 m)

Fig. 11 Layout for 40 m of surface deformation measurement points at Sanyuanqiao station

为了更清晰地展现机理,模型试验保留了最关键的工程地质条件与施工控制条件,在无支护完全沉降的条件下发生的背土效应是最原始的、最完全的,所展现的是其最基础的扩展规律。而本工程是在繁华市区内的关键路网之下,条件严苛,因此在现场施加了严密的地表变形控制。按照北京市轨道交通相关规范,地表沉降控制值 ≤ 20 mm, 隆起控制值 ≤ 10 mm, 由图 12 可以明显看出,试验隆沉最大值均突破容许范围,而现场在变形控制措施的保护下,将隆沉值均控制在安全范围内。

但与此同时,图 12 还显示:①对于背土的分区与演化:二者的分区一致,隆沉分布规律一致,在 10~20 m 顶程之间发生地表沉降,在 25~40 m 顶程之间发生地表隆起,且隆沉之间并不连续,存在约 5 m 顶程的、短暂的无变形区域;②对于重点风险源:洞口处覆土最易发生扰动,试验与工程都表现出较大的洞口处沉降。试验结果与现场监测结果定性化表达的一致性高。

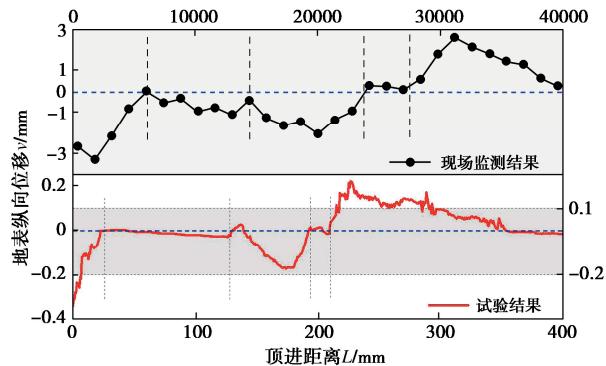


图 12 现场监测与试验所得地表纵向位移曲线

Fig. 12 Nephograms of longitudinal displacement of overburden in the whole jacking process

然而,现场监测只能获得地表的纵向隆沉曲线,不足以分析土体的内部变形,也无法获知背土效应的产生机制和演化过程。

3.5 背土效应发生机制与演化过程

对散斑图像分析后所获得的土体内部位移场为推演背土效应提供了依据。图 13 为顶进全过程典型位置的覆土纵向位移云图,其中图 13 (a), (c) 为前半程,图 13 (b), (d) 为后半程。由图 13 (c), (d) 可以明显看出,在顶进的前半程 8 m 位置处与后半程 32 m 位置处,各发生了一次明显的背土效应。两次完整的背土效应均包括沿着顶进方向逐步出现的沉降区、补偿区、隆起区,这与图 12 的地表变形特征对应。沉降区沉降最大量发生在覆土最下方,越向地表沉降越小,而隆起区的隆起最大量发生在地表,越向下方隆起越小。

从前程到后程,沉降区、补偿区、隆起区的扩展范围由 2:1:5 变为 3:1:4,且区域位置随沿顶进方向发生较大移动。由于前程背土效应的发生位置距离洞口较近,因此在后续的顶进过程中,3 个区域均发生了程度不一的沉降,补偿区与隆起区被沉降区覆盖。

图 14 位移矢量图展示了背土效应的演化过程。可

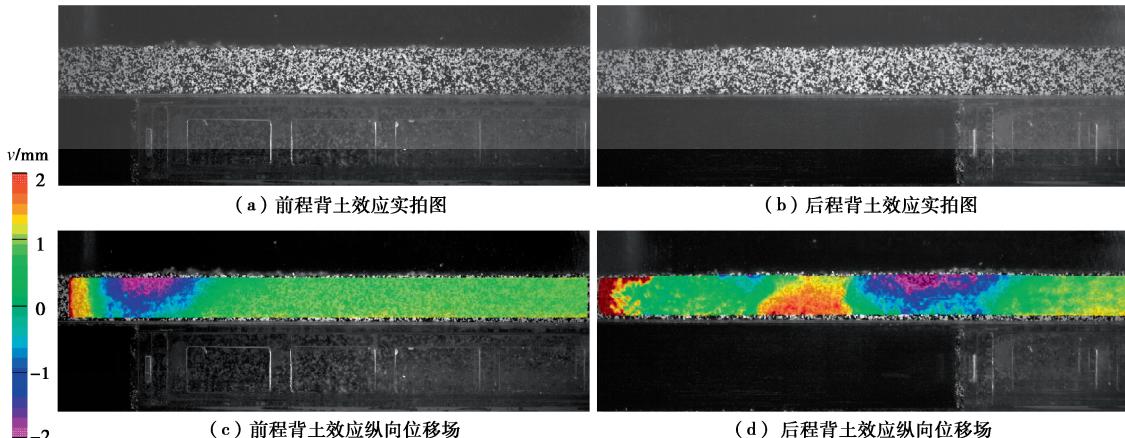


图 13 顶进全程覆土的纵向位移云图

Fig. 13 Nephograms of longitudinal displacement of overburden in the whole jacking process

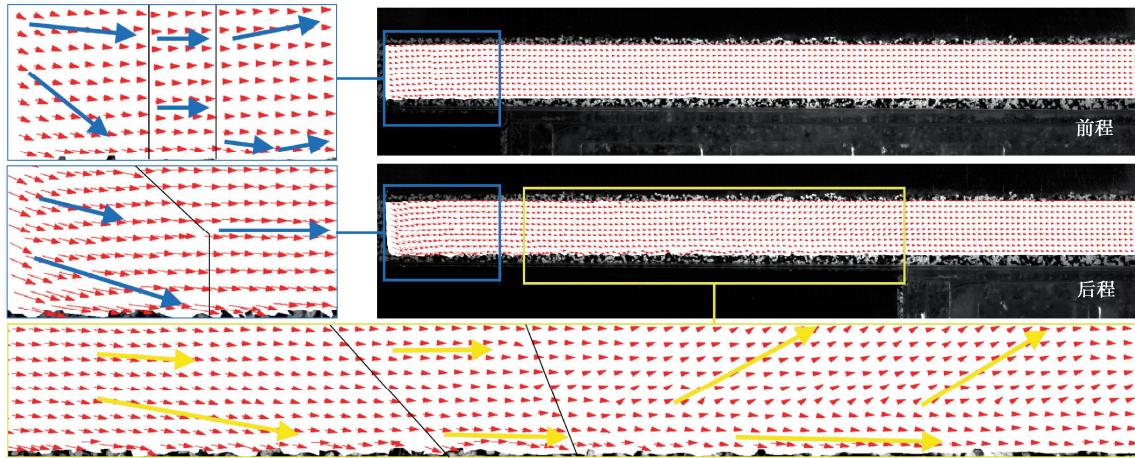


图 14 覆土位移矢量图

Fig. 14 Displacement vector diagram of overburden soil

以清晰地看出, 在沉降区, 超挖高度差的存在为上覆土提供了塌落的空间, 覆土进入超挖空间后, 随管节同步顶进, 因此在位移矢量图中, 沉降区表现出向下、向前的移动方向。

这部分来自沉降区的土体补偿了超挖空间, 因此覆土表观不再发生沉降, 形成了补偿区。在位移矢量图中, 补偿区的土体没有纵向位移产生, 只随管节向前移动。

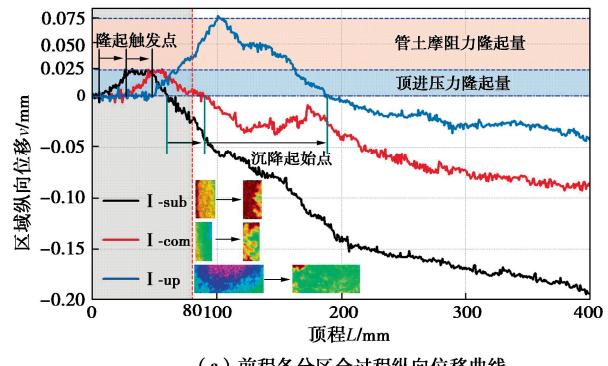
随着管土摩阻力增加, 与管节同步前移的土体增多、密实, 致使覆土发生整体隆起。因此在位移矢量图中, 隆起区的土体表现为向上、向前的移动方向。

由于管土接触最先发生在覆土的下方, 且顶进全程不停机, 因此, 后期沉降区和隆起区的范围都相对较大, 而补偿区也由相对独立变为与前后两个区域交叠。

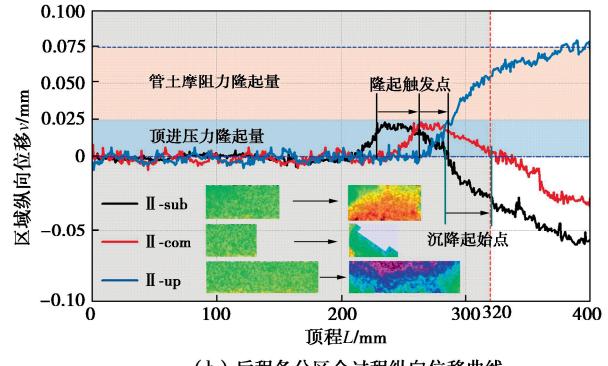
进一步地, 分别分析 3 个区域在顶进全过程中的纵向位移曲线, 如图 15 所示。其中, I-sub, I-com, I-up 分别代表前程沉降区、前程补偿区、前程隆起区, II-sub, II-com, II-up 分别代表后程沉降区、后程补偿区、后程隆起区。在发生背土效应的时刻, 沉降区、补偿区、隆起区对应的纵向位移分别为负值、0、正值。在发生背土效应前, 沉降区与补偿区分别发生了最大值为 0.025 mm 的隆起, 这是由于土体替代段模拟的顶管机经过, 对开挖处土体产生的扰动; 顶管机经过后, 扰动影响消失, 沉降区发生沉降并向前补充补偿区的超挖空间。隆起区在此之后, 持续产生隆起, 如前所述, 此时的隆起增量为后方土体随管节向前移动所产生, 约为 0.05 mm。由管土摩阻力引起的区域隆起变形为顶进压力引起变形的 2 倍。

图 13, 15 可以清晰地看出, 散斑面和分析区域在全过程均没有发生过曝、失真、干扰、信息缺失等问

题, 足以说明 HCPS 方法在最优颗粒比条件下取得了良好的散斑识别与应用效果。



(a) 前程各分区全过程纵向位移曲线



(b) 后程各分区全过程纵向位移曲线

图 15 各分区对应的全过程纵向位移曲线

Fig. 15 Longitudinal displacement curves of the whole jacking process corresponding to each area

4 结 论

针对稳定的高质量透明土散斑图像的获取、评价与应用, 提出高对比度颗粒染色制斑法, 并利用 MIG 和零位移试验开展散斑质量评价, 确定最优散斑的配置比。通过矩形顶管透明模型试验的应用例验证其应用效果, 结合现场监测数据, 以位移云图、位移矢量

图和位移曲线阐述地表变形规律与背土效应的内部演化过程。研究可得出 4 点结论。

(1) 透明土散斑优选的双色染色剂为黑色水性色精染色液和白色水性哑光漆, 散斑图案的最优配置比 $B:W$ 为 8:10, 此时 MIG 最高, 应变云图平坦且拥有最少的散斑超限识别误差。

(2) 透明土模型试验结果与现场监测结果揭示了矩形顶管背土效应包括沿着顶进方向逐步出现的沉降区、补偿区、隆起区, 且长距离工程中, 背土效应的出现有连续性。

(3) 顶管超挖区为覆土提供沉降空间, 随管节移动的土体实现对覆土的应力补偿, 管土摩阻力的累积使得覆土沿顶进方向隆起。沉降区与补偿区的隆起由顶进压力产生, 隆起区的隆起为顶进压力和管土摩阻力的共同结果, 由管土摩阻力引起的区域隆起变形为顶进压力引起变形的 2 倍。

(4) 高对比度颗粒染色制斑法在最优颗粒比条件下避免了过曝、失真、干扰、信息缺失等问题的出现, 获得了良好的试验应用效果。

利益冲突声明/Conflict of Interests: 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

作者贡献/Authors' Contributions: 李赓照提出研究理念和设计研究, 撰写文章; 单仁亮对重要文章内容进行关键性修改; 窦浩宇分析解释研究数据; 周博森、王逸飞获取研究数据; 对最终提交版本进行确认。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。LI Gengzhao proposed the research concept, designed the study, and drafted the manuscript. SHAN Renliang made critical revisions to the important content of the manuscript. DOU Haoyu analyzed and interpreted the research data. ZHOU Bosen and WANG Yifei acquired the research data and confirmed the final submitted version collaboratively. All authors participated in the review and revision of the manuscript, and reached a consensus on the content of the final version.

参考文献:

- [1] 杜建明, 房倩, 刘翔, 等. 透明土物理模拟试验技术现状与趋势[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(3): 852-861. (DU Jianming, FANG Qian, LIU Xiang, et al. The present and development trend of physical simulation experiment technology for transparent soils[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(3):852-861. (in Chinese))
- [2] 孔纲强, 沈扬, 杨庆, 等. 三维透明土实验技术平台开发及在实践教学中的应用[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(5): 94-97, 115. (KONG Gangqiang, SHEN Yang, YANG Qing, et al. Development of 3D transparent soil experimental technology platform and its application in practical teaching[J]. Experimental Technology and Management, 2020, 37(5): 94-97, 115. (in Chinese))
- [3] DENG H, ZHONG C Y, WU L Z, et al. Process analysis of causes of Luanshigang landslide in the Dadu River, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2021, 80(22): 737.
- [4] ZHANG Y S, CHEN J P, ZHOU F J, et al. Combined numerical investigation of the Gangda paleolandslide runout and associated dam breach flood propagation in the upper Jinsha River, SE Tibetan Plateau[J]. Landslides, 2022, 19(4): 941-962.
- [5] ADS A, SHARIFUL ISLAM M, ISKANDER M. Longitudinal settlements during tunneling in soft Clay, using transparent soil models[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 136: 105042.
- [6] 叶观宝, 李凌旭, 张振, 等. 基于透明土的填土密实度对土拱效应影响模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(增刊 2): 20-24. (YE Guanbao, LI Lingxu, ZHANG Zhen, et al. Model test study on the influence of fill density on soil arching effect based on transparent soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(S2): 20-24. (in Chinese))
- [7] 梁越, 代磊, 魏琦. 基于透明土和粒子示踪技术的渗流侵蚀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(6): 1133-1140. (LIANG Yue, DAI Lei, WEI Qi. Experimental study on seepage erosion based on transparent soil and particle tracing technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(6): 1133-1140. (in Chinese))
- [8] 卢谅, 何兵, 肖亮, 等. 基于透明土的成层土中 CPT 贯入试验研究[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(12): 2215-2224. (LU Liang, HE Bing, XIAO Liang, et al. Experimental study on CPT penetration in layered soil based on transparent soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(12): 2215-2224. (in Chinese))
- [9] 王永志, 段雪峰, 陈苏, 等. 基于颗粒特征与预设变形的人工砂土变形图像生成方法及应用[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(5):1047-1056. (WANG Yongzhi, DUAN Xuefeng, CHEN Su, et al. An approach for synthetic images of sand deformation based on grain features and prescribed traces and its application[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(5): 1047-1056. (in Chinese))
- [10] 苏勇, 高越, 郁泽仁, 等. 光绘: 自由开源的数字散斑图像生成和评价软件[J]. 实验力学, 2021, 36(1): 17-28.

- (SU Yong, GAO Yue, GAO Zeren, et al. Glare: a free and open source software for generation and assessment of digital speckle pattern[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2021, **36**(1): 17-28. (in Chinese))
- [11] STANIER S A, RAGNI R, BIENEN B, et al. Observing the effects of sustained loading on spudcan footings in clay[J]. *Géotechnique*, 2014, **64**(11): 918-926.
- [12] LIU C, TANG X W, WEI H W, et al. A new spatial deformation measurement method using 3D reconstruction technology during pile penetration[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2021, **25**(11): 4106-4120.
- [13] 何 磊. 基于透明土技术的双圆盾构隧道施工土体变形研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021. (HE Lei. Study on Soil Deformation in Double-circle Dshield Tunnel Construction Based on Transparent Soil Technology[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021. (in Chinese))
- [14] 李元海, 林志斌. 透明岩体相似物理模拟试验新方法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(11): 2030-2039. (LI Yuanhai, LIN Zhibin. Innovative experimental method based on development of transparent rock mass materials for physical tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2015, **37**(11): 2030-2039. (in Chinese))
- [15] SUN Y F, PANG J H L. Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, **45**(9): 967-974.
- [16] PAN B, XIE H M, WANG Z Y, et al. Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(10): 7037.
- [17] PARK J, YOON S, KWON T H, et al. Assessment of speckle-pattern quality in digital image correlation based on gray intensity and speckle morphology[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, **91**: 62-72.
- [18] 潘 兵, 吴大方, 夏 勇. 数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J]. 实验力学, 2010, **25**(2): 120-129. (PAN Bing, WU Dafang, XIA Yong. Study of speckle pattern quality assessment used in digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, **25**(2): 120-129. (in Chinese))
- [19] PAN B, LU Z X, XIE H M. Mean intensity gradient: an effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, **48**(4): 469-477.
- [20] LIU X Y, LI R L, ZHAO H W, et al. Quality assessment of speckle patterns for digital image correlation by Shannon entropy[J]. *Optik*, 2015, **126**(23): 4206-4211.
- [21] XI X L, LIU Y, XUE P, et al. High-speed multi-camera videogrammetric measurement of full-field 3D motion and deformation in full-scale crash testing of typical civil aircraft[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2024, **152**: 109375.
- [22] DONG Y L, PAN B. A review of speckle pattern fabrication and assessment for digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2017, **57**(8): 1161-1181.