

DOI: 10.11779/CJGE202110005

# 基于透明土的隧道开挖面稳定性三维可视化模型 试验研究及应用

马少坤<sup>1,2</sup>, 韦榕宽<sup>1</sup>, 邵羽<sup>3,4</sup>, 黄震<sup>1,2</sup>, 段智博<sup>\*1</sup>

(1. 广西大学土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学工程防灾与结构安全重点实验室, 广西 南宁 530004;  
3. 广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029; 4. 广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029)

**摘要:** 为研究承压渗流条件下复合地层盾构开挖面失稳破坏模式及支护压力, 自行研发了一种可以自由施加多种渗流承压作用的三维可视化盾构开挖面稳定性模型试验系统。该系统首次采用两种不同透明土材料模拟黏土-砂砾石复合地层, 不仅可以消除原样砂砾的粒径效应, 而且可以清晰演示复合地层内部变形过程, 并基于数字图像测量技术和自行编写的三维地形位移场重构程序可精准获取开挖面三维破坏体视图。应用该设备进行了 7 组盾构隧道不同埋径比 ( $C/D=0.5, 1.0, 2.0$ ) 的模型试验, 系统研究黏土-砂砾石复合地层有无承压水渗流条件下盾构隧道开挖面稳定性。试验结果表明: 有无承压水渗流条件下, 支护压力随开挖面后撤位移曲线均存在明显 3 个阶段; 临界破坏状态下, 模型试验得到的破坏体形态与隧道埋径比  $C/D$  有关, 隧道浅埋与深埋时破坏体形态存在不同, 此外, 破坏体形态还与土层类别息息相关, 不同土层中土体破坏形态也不尽相同; 相比无渗流条件, 承压渗流条件下开挖面土体失稳破坏区域影响范围更广。同时, 以上试验也表明了该试验系统可形象地再现盾构开挖面失稳破坏演化过程, 具有采集精度高、稳定性好和可操作性强等优势, 适用于各种复杂工况下复合地层开挖面稳定性研究。

**关键词:** 盾构隧道; 复合地层; 开挖面稳定; 透明土; 模型试验

中图分类号: TU431 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)10-1798-09

**作者简介:** 马少坤(1972—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事地下工程的教学与研究工作。E-mail: mashaokun@sina.com。

## 3D visual model tests on stability of tunnel excavation surface based on transparent soil

MA Shao-kun<sup>1,2</sup>, WEI Rong-kuan<sup>1</sup>, SHAO Yu<sup>3,4</sup>, HUANG Zhen<sup>1,2</sup>, DUAN Zhi-bo<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004, China; 3. Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China; 4. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

**Abstract:** To study the supporting pressure and instability failure modes of shield tunnel face in composite soil strata under seepage and confined water, a three-dimensional visualized model test system for tunnel face stability is invented to freely exert multiple seepage and confining effects. For the first time, the system uses two different transparent soil materials to simulate a clay-gravel composite stratum, which can eliminate the particle size effect and demonstrate the internal deformation of the composite stratum clearly. Based on the digital image measurement technology and a self-written 3D reconstruction program, the 3D failure mode view of the excavation surface can be obtained accurately. A series of model tests are carried out to investigate the failure modes of the tunnel face with three different cover-to-diameter ratios of 0.5, 1.0 and 2.0 under seepage and confined water in clay-gravel composite strata. The test results show that the curve of the supporting pressure can be divided into three phases. In the critical failure state, the shape of the failure modes is related to the tunnel diameter ratio  $C/D$  obtained by the model tests. The shape of the failure modes is different when the tunnel covered depth is relatively small or large. In addition, the shape of the failure modes is also related to the type of soil strata. Compared to that under no seepage, the soil failure zone of the excavation surface under seepage confined water has a wider influence range. At the same time,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678166, 51968005); 广西自然科学基金重点项目(2020GXNSFDA238024); 广西研究生教育创新计划项目(YCBZ2020024); 中国博士后科学基金项目(2019M663874XB)  
收稿日期: 2021-01-25

\*通信作者 (E-mail: duanzhibo\_1993@163.com)

the test system can vividly reproduce the evolution process and development law of the failure zone on the tunnel face. It has the advantages of high sensitivity, good stability and strong operability. It can be used to study the stability of the tunnel face under various complex conditions.

**Key words:** shield tunnel; composite stratum; tunnel face stability; transparent soil; model test

## 0 引言

随着中国基础设施建设的蓬勃发展,大部分城市正兴建地铁盾构隧道,其中穿越地下水系较为发达且工程特性迥异的黏土-砂砾石复合地层极为常见,如中国华北地区的北京,华南地区的深圳、广州和南宁以及长江中下游地区的长沙和杭州等城市。如此复杂的地质条件,确保盾构开挖面的稳定极为重要。开挖面主动破坏或被动破坏可能导致地表坍塌或隆起,严重威胁人民生命财产安全,因此盾构隧道开挖面稳定性研究已成为当前城市地铁建设的热点和难点问题。近年来,许多学者针对开挖面稳定性问题开展了大量的物理模型试验:Krisch<sup>[1]</sup>通过全断面及 1/2 断面隧道模型试验装置,对干砂地层中开挖面失稳时土体破坏规律进行了研究,为后续物理模型试验研究奠定了基础;吕玺琳等<sup>[2]</sup>针对饱和圆砾地层土体粒径较大且易导致地层变形滞后的特性,开展了饱和圆砾地层盾构隧道开挖面失稳模型试验,结果表明开挖面前方土体破坏过程中变形滞后效应随着隧道埋置深度的减小而逐渐减弱;李君等<sup>[3]</sup>和陈仁朋等<sup>[4]</sup>研制大尺寸盾构开挖面稳定性模型箱,针对砂土地层中的盾构隧道开挖面稳定性问题进行研究,揭示了开挖面前方土体随着土拱效应的形成所产生的渐进破坏模式;Lü 等<sup>[5]</sup>分别对干砂、饱和砂及渗流条件下盾构隧道开挖面破坏机理和极限支护压力开展了模型试验研究,得到不同条件下砂土地层的破坏模式;刘海宁等<sup>[6]</sup>基于粒子图像测速技术,探究了砂土地层中泥水盾构掌子面主动破坏模式及支护压力,得到了掌子面位移和剪应变等变形过程;Lü 等<sup>[7]</sup>采用大米为试验材料,研究了土的各向异性对盾构隧道开挖面失稳的影响;米博等<sup>[8]</sup>针对砂土地基浅埋隧道层流条件下的开挖面支护压力及地层失稳规律进行物理模型试验研究,研究表明层流条件增大土压力及地层极限失稳区域。上述模型试验研究基本针对均质地层进行的,难以考虑复合地层软硬不均对开挖面的不利影响;其次,物理模型试验中采用粗颗粒材料作为试验土样时难以克服粒径效应;另外,天然土样具有不透明性,难以获取地层内部变形。

因此,针对目前相关模型试验研究的不足,课题组研制了基于透明土的黏土-砂砾石复合地层隧道开挖面稳定性三维可视化模型系统。该系统可自由施加

多种渗流承压水头以及不同渗流路径,并精准获取盾构隧道开挖面失稳区域位移场演化过程。应用该装置,开展了 7 组有无渗流条件的均质和复合地层开挖面失稳对比模型试验,着重研究开挖面失稳演变规律。在试验中采用两种不同透明土材料模拟黏土-砂砾石复合地层,不仅克服了天然土样的粒径效应,而且可重现地层内部变形;针对现有粒子图像测速技术(PIV)只能获取二维平面信息的局限性,通过自行编写的三维重构程序,精准获得了开挖面失稳区域土体的三维空间变形场。

## 1 试验装置及系统组成

试验系统主要包括:控制系统、渗流形式及路径控制系统、模型隧道及数据采集系统。系统整体设计图及实物图如图 1 所示,尺寸长×宽×高=1.5 m×1.0 m×1.5 m。正面选用钢化玻璃,其余各面选用不锈钢板。模型隧道采用 304 不锈钢制成,外径 120 mm,内径 108 mm,距离模型箱底部 150 mm,与原型隧道缩尺比例为 1:50。考虑采用透明土材料进行试验,为节约成本且方便从各个角度观测开挖面失稳破坏过程,模型箱内部增设有有机玻璃制成的 L 型隔板,形成如图 1(a)所示的试验区,其尺寸长×宽×高=0.85 m×0.22 m×0.75 m,参考前人相关试验<sup>[1,3-4]</sup>,该尺寸完全满足边界效应的要求。

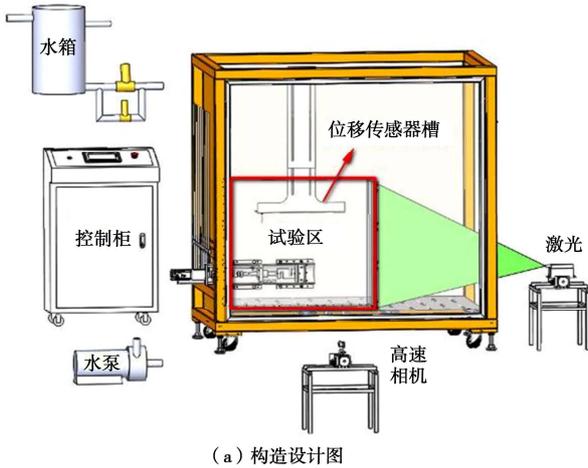
### 1.1 控制系统

本试验采用位移控制法模拟开挖面失稳过程。如图 1 所示,控制柜上部触摸屏与可编程控制器(PLC)相连,进行数据交换并实时显示。触摸屏可控制伺服电机,从而带动开挖面板的后退和前进来模拟盾构开挖面的主动破坏和被动破坏,还可在开挖面移动过程中任意设定行进速度,速度可调范围 0.00~50.00 mm/min。触摸屏可实时显示盾构开挖面位移与时间关系曲线及开挖面实时行进速度。此外,通过触摸屏还可控制电磁阀的开关从而控制水箱内水头高度。同时,控制柜配合计算机可控制 CCD 相机及激光器同步运动轨迹及行进速度。

### 1.2 渗流形式及路径控制系统

本装置具有两种供水方式及多个排水通道,确保模拟地下水不同渗流形式及路径下复合地层盾构开挖面失稳破坏模式。图 1 中供水形式主要分为常水头供

水和变水头供水两种：由上部水箱可进行常水头供水以期达到稳定渗流；由增压水泵可从模型箱下部进行变水头供水以期达到紊态渗流，模型箱下部钢板如图 2 所示。此外，为研究不同渗流路径对开挖面失稳破坏模式的影响，在开挖面后方安装一个直径为 5 cm 的刚性排水管，用于模拟开挖面突水。还可通过拆卸模型箱体右侧不同高度的挡板，满足不同位置高度的渗流。模型箱右侧挡板如图 3 所示。



(a) 构造设计图



(b) 系统实物图

图 1 承压渗流作用下开挖面稳定模型试验系统

Fig. 1 Model test system for excavation face stability under seepage and confined water

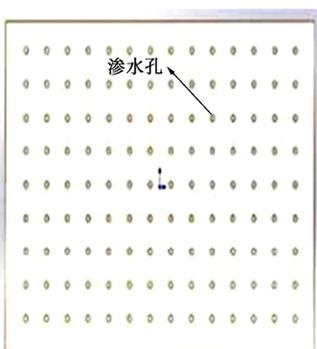


图 2 下部带孔钢板

Fig. 2 Lower steel plate with holes

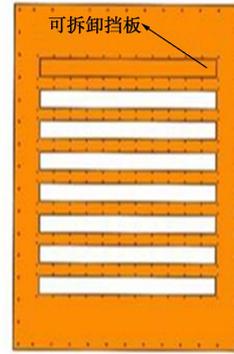


图 3 右侧挡板

Fig. 3 Right-side bezel

### 1.3 模型隧道

根据隧道的轴对称性，采用 1/2 模型隧道进行试验，前方采用刚性开挖面板。考虑透明土孔隙液体具有腐蚀性，模型隧道所有部件均采用 304 不锈钢，并在开挖面板处加设两层橡胶垫片防止拉压传感器浸水损坏。隧道外部，通过固定环壁与预制钢化玻璃相连，四周涂抹玻璃胶以保证密封完好；隧道内部，设有前后两个限位器，防止开挖面板前进及后退距离超过允许范围。伺服电机配备减速机连接丝杠，丝杠通过直线轴承与拉压传感器相连，带动开挖面板的前进和后退，开挖面板位移精度可达到 0.01 mm。模型隧道细部结构如图 4 所示。

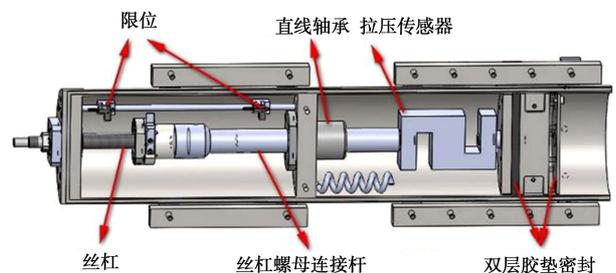


图 4 模型隧道细部结构

Fig. 4 Structure of model tunnel in detail

### 1.4 采集系统

采集系统包括数据采集系统和图像采集系统两部分。

数据采集系统可实时采集开挖面支护压力、地表位移、土压力及孔隙水压力。其中支护压力由模型隧道内部与开挖面相连的拉压传感器实时测量（拉压传感器精度不低于 0.1%）；地表位移由位移传感器（LVDT）量测，位移传感器固定在图 1 所示的位移传感器槽中。

图像采集系统通过控制 CCD (charge coupled device camera) 工业相机对模型箱正面进行拍照。当采用透明土材料进行试验时，通过两个高精度线性平

台控制 CCD 工业相机和激光器同步运动, 从而对模型箱进行“CT 扫描”获得不同切面图像。后期通过分析相同切片位置处不同状态时的图像, 得到每个切片位置处位移场, 同时采用自行编写三维重构程序, 将不同切片位置处的位移场进行重构, 得到三维空间地层变形。CCD 相机及激光器同步运动轨迹如图 5 所示, 图中 CCD 相机与激光器以 1 mm/s 的速度沿 z 方向同步运动, 每移动 5 mm 停下来进行拍照, 每次拍摄两张格式为 .png 和 .tif 图片并存储, “扫描”完成后返回初始位置, 路线如“S1-S2-...-S11-S1”。

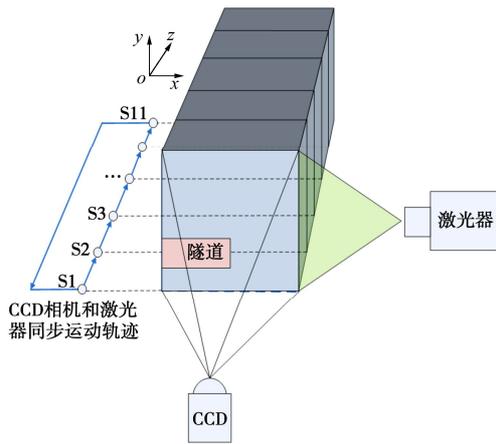


图 5 相机和激光器同步运动轨迹

Fig. 5 Synchronous motion track of CCD camera and laser

### 1.5 试验系统特点

本试验系统具有如下显著技术特点:

- (1) 可精准控制模型隧道开挖面板后退和前进, 进而精准模拟开挖面主动破坏及被动破坏渐进过程。
- (2) 渗流形式及路径控制系统, 通过两种供水装置可实现层流及紊流两种状态, 可自由施加承压水头, 最大水压可达 5 MPa, 具有多个供水及排水通道, 可通过开关控制以实现不同的渗流路径。
- (3) 当采用透明土材料时可进行“CT 扫描”, 配合三维重构程序, 精准获取三维可视化图像, 从而代替传统昂贵的 CT 设备并克服试样尺寸过小的局限性。
- (4) 系统控制简单, 可通过触摸屏操作, 测量精度高, 可靠性强, 试验系统自动化程度高, 可实时显示位移与时间关系曲线及储存量测数据。

## 2 试验准备及步骤

### 2.1 试验方案

前期开展了 7 组不同工况下开挖面失稳破坏模式的模型试验, 工况 1~6 为研究黏土-砂砾石复合地层在不同埋深及承压渗流条件下开挖面的失稳模式, 工况 7 为研究某一埋深 ( $C/D=1$ ) 时黏土地层盾构开挖

面的失稳模式。鉴于本文重点是对三维可视化模型系统综合性能的初步展示且篇幅所限, 本文主要对复合地层对称面 (S1) 的试验结果进行初步分析, 及对复合地层和黏土地层 ( $C/D=1$ ) “CT 扫描”的试验结果三维重构对比分析, 其余成果参见后续其他相关论文。试验方案如表 1 所示。

表 1 隧道开挖面稳定试验方案

Table 1 Schemes of tunnel face stability

工况	地层	渗流/承压水	埋深/直径 ( $C/D$ )
工况 1	黏土-砂砾石	无	0.5
工况 2	黏土-砂砾石	无	1
工况 3	黏土-砂砾石	无	2
工况 4	黏土-砂砾石	有/3D	0.5
工况 5	黏土-砂砾石	有/3D	1
工况 6	黏土-砂砾石	有/3D	2
工况 7	黏土	无	1

注:  $C$  为隧道上覆土层厚度,  $D$  为隧道直径。

### 2.2 透明土配置

目前多数透明土孔隙液体呈油状, 黏度高且折射率对温度敏感, 难以准确模拟承压渗流条件。针对此问题, 本试验选择了两种折射率不受温度影响且孔隙液体与水黏度相似的透明土材料 (Laponite RD 和石英) 分别模拟黏土和砂砾石。

#### (1) 透明黏土配置

Wallace 等<sup>[9]</sup>曾对 Laponite RD 进行了一系列的十字板剪切试验、固结试验及渗透系数试验, 结果表明 Laponite RD 具有与软黏土类似的宏观岩土特性, 可作为岩土物理模型测试中软黏土的替代物。在本次试验过程中, 将 Laponite RD 材料置于去离子水中进行分散、静置、凝固, 从而形成透明黏土<sup>[9]</sup>。Laponite RD 与去离子水的质量比为 4:96, 需要通过分散机进行分散, 分散速度为 1500 r/min, 分散时间 20 min 以上。本次透明土模型试验体积较大, 为便于后期图像分析, 分散过程中需加入粒径为 50  $\mu\text{m}$  的 PSP 示踪粒子, 透明黏土配置过程如图 6 所示。

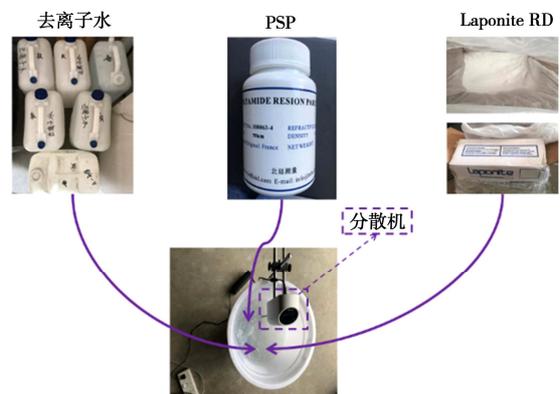


图 6 透明黏土配置过程

Fig. 6 Configuration process of transparent clay

## (2) 透明砂砾石配置

Carvalho 等<sup>[10]</sup>采用高纯度、棱角状的石英为骨料,以碘化钠-硫代硫酸钠的水溶液为孔隙液,配置透明砂砾石土。本次试验采用相同配置方法,其中石英级配依据南宁地铁二号线安吉站的圆砾土颗粒级配曲线配置,如图 7 所示<sup>[11]</sup>。对此级配下的石英采用 TST-70 渗透仪测得渗透系数为 0.096 cm/s,与勘察资料记录的圆砾土渗透系数 0.09259 cm/s 非常接近。孔隙液体由碘化钠溶于水,其中碘化钠与水的质量比为 1.18,通过 WAY-2S 阿贝尔折射仪测得碘化钠溶液折射率为 1.4585,使得孔隙液体的折射率等于石英折射率<sup>[12]</sup>。配置好的溶液中需加入硫代硫酸钠以去除孔隙液体中碘单质。反应化学方程式如下所示,孔隙液体配置过程如图 8 所示。

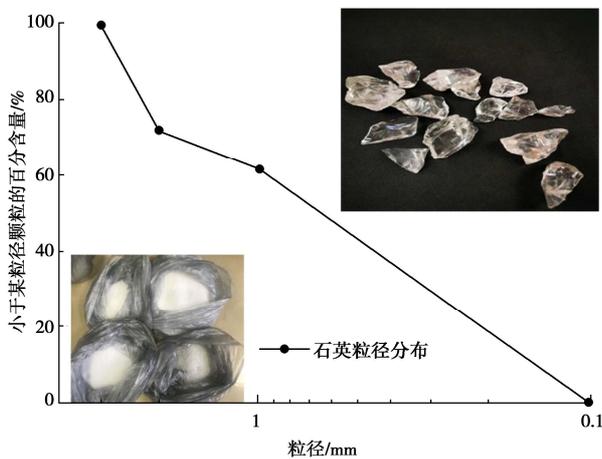


图 7 石英颗粒级配曲线

Fig. 7 Grain-size distribution curve of fused quartz

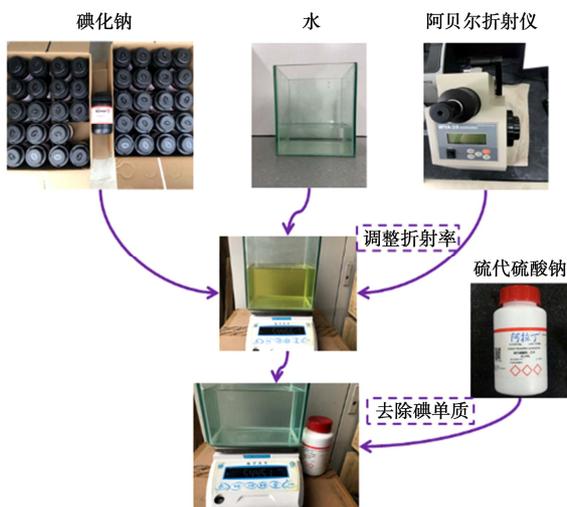


图 8 孔隙液体配置过程

Fig. 8 Configuration process of pore liquid

## 2.3 试验步骤

(1) 按照上述方法配制足量的模型试验用土。

(2) 通过控制柜将模型隧道开挖面复位,待各阀门开关关闭后检查设备密封性是否完好,将石英颗粒分层装入模型箱后倒入前期配置完成的孔隙液,倒入过程中需要不断搅拌,防止气泡进入而影响透明度。当下部砂砾石填筑到隧道开挖面中线后,填筑预先配置好的透明黏土到相应高度,静置两天后进行试验。

(3) 由与模型箱连接的储水罐施加承压水头,承压水头高度设定为距隧道顶部  $n$  倍直径高度,待隧道开挖面出水孔有水流出且出口处流量计度数稳定时可认为达到稳定渗流状态<sup>[8]</sup>,随后将 CCD 相机及激光器摆放于合适位置处。根据试验目的不同,各入水口及出水口均设有阀门,控制注水口及出水口开关,从而满足不同渗流路径及饱和和无渗流状态时开挖面失稳的模拟。

(4) 通过触摸屏可在任意时刻设定开挖面板后撤速度。本次试验设定速度为 0.05 mm/min<sup>[5]</sup>,开挖面共后撤 20 mm,前 6.0 mm 每一步增量 0.25 mm<sup>[1]</sup>,其余 14 mm 每一步增量取 0.5 mm<sup>[5]</sup>,每后撤 1 mm 后静置 20 min,使土体达到平衡状态,随后通过相关软件控制 CCD 相机及激光器同步运动,对模型箱透明土区域进行“CT 扫描”后保存图片。

## 3 复合地层对称面 (S1) 试验结果分析

### 3.1 饱和和无渗流工况

通过模型试验中模型隧道内部拉压传感器可得到后撤的相对位移 ( $S/D$ ,  $S$  为开挖面后撤位移) 与支护压力比 ( $\sigma_s/\sigma_0$ ,  $\sigma_s$  为支护压力,  $\sigma_0$  为初始支护压力) 关系曲线,如图 9 所示。曲线可以分为明显的 3 个阶段:第一阶段,随着开挖面的后撤,土体发生一定的塑性变形,支护压力快速下降,降低了约 50%;第二阶段,随着开挖面继续后移,支护压力虽继续减小,但变化率明显降低,此阶段降低约 5%;第三阶段,支护压力基本趋于稳定,此时所对应的支护压力可以作为极限支护压力。另外,由图 9 可知,随着隧道埋深的增加,极限支护压力减小,这与均质砂土地层明显不同<sup>[5]</sup>,这主要是黏土中存在较大的黏聚力可产生明显的土拱效应所致<sup>[13]</sup>。同时,相比均质砂土地层,该复合地层支护压力有着渐进减小阶段,也就是上述提到的第二阶段。已有文献表明<sup>[5]</sup>,均质砂层中极限支护压力随着开挖面后移而急剧减小,之后基本不存在上述第二阶段,这可能是开挖面下部的砾石层具有一定自稳性而使得开挖面未完全失稳。

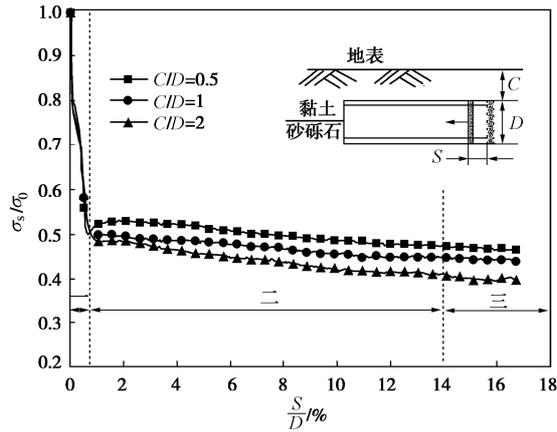


图 9 支护压力比与相对位移曲线 (饱和无渗流)

Fig. 9 Curves supporting pressure ratio and relative displacement pressure (Undrained)

饱和条件下复合地层开挖面失稳模式如图 10 所示, 失稳区域主要集中在黏土区域。随着开挖面板的后撤, 土体的失稳区域逐渐扩大, 当开挖面板后撤 6 mm 时, 失稳区域趋于稳定。当  $C/D=0.5$  和 1 时, 下部砾石层破坏体形态类似于楔形体, 上部黏土层破坏体形态类似于倒圆锥; 当  $C/D=2$  时, 下部砾石层破坏体形态类似于楔形体, 上部黏土层破坏体形态类似于筒仓体。从图 10 还可以看出, 开挖面前方土体的失稳区域与水平方向的夹角与隧道埋深无关, 在无水条件下失稳区域与水平方向的夹角为  $\pi/4+\varphi/2$ , 其中  $\varphi$  为土体的内摩擦角<sup>[5]</sup>, 呈现出地基典型的主动破坏特征。

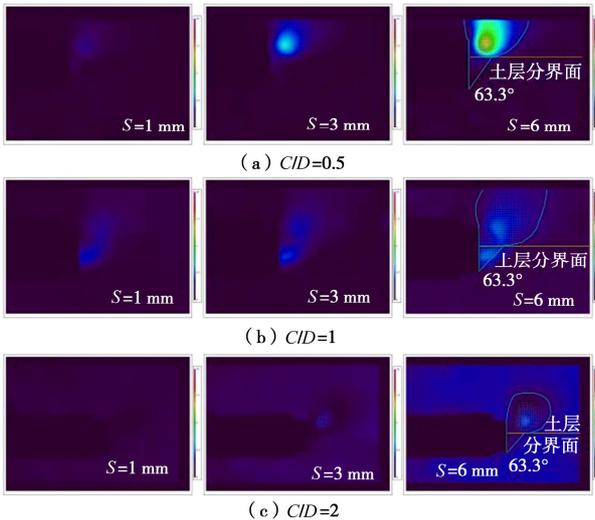


图 10 复合地层变形过程 (饱和无渗流)

Fig. 10 Deformations of composite soil strata (undrained)

图 11 为饱和无渗流  $S=6\text{ mm}$  时的土体位移等值线图, 可以看出, 隧道失稳对地表的位移影响随着隧道埋深的增加而逐渐减小。此外, 当  $C/D=2$  时, 从等值线图中可以看出, 土体失稳区上部土体变形明显小于其他区域, 再次证明土拱效应的存在, 相应随着  $C/D$  的增

加极限支护压力反而降低。由于试验中相机的轻微扰动, 导致  $C/D=2$  时整体出现微小的位移, 对试验结果的分析无影响。

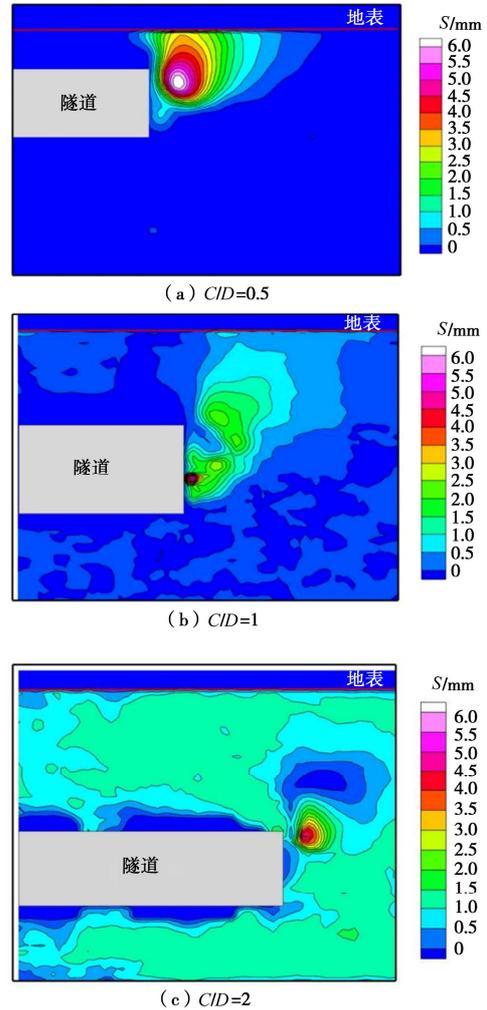


图 11 开挖面失稳等值线图 (饱和无渗流)

Fig. 11 Contour map of excavation face instability (Undrained)

### 3.2 承压渗流工况

承压渗流条件下后撤的相对位移与支护压力比演化曲线如图 12 所示。隧道埋置深度越深, 极限支护压力减小, 但  $C/D=1$  和 2 时极限支护压力减小幅度不大。与无渗流情况下相似, 支护压力位移曲线仍分为 3 段: 第一阶段, 随着开挖面后撤, 支护压力快速下降, 降低了约 47%; 第二阶段, 支护压力出现反弹, 反弹了约 5%, 可能是由于周边地下水渗入隧道而产生渗透压力导致支护压力增加; 第三阶段, 随着开挖面继续后撤, 支护压力趋于稳定。对比图 9 与图 12 可知, 承压渗流条件下极限支护压力均大于无渗流条件下极限支护压力, 这是由于承压渗流条件下对开挖面产生了一定的渗流力导致土体向开挖面方向移动, 从而增大了开挖面支护压力。

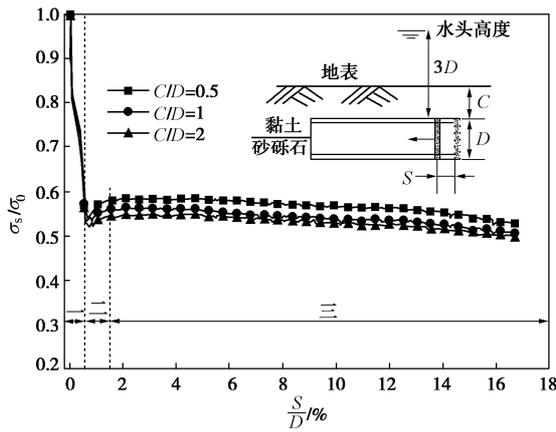


图 12 支护压力比与相对位移曲线 (承压渗流)

Fig. 12 Curves of supporting pressure ratio and relative displacement pressure (seepage and confined water)

承压渗流条件下复合地层开挖面失稳模式如图 13 所示。由图 13 可知,承压渗流条件下开挖面失稳破坏模式与饱和条件下相似,破坏区域随着隧道埋深增加而逐渐减小,但破坏区发展较早。当开挖面进一步后撤,形区域沿着开挖面自下而上向地表延伸。在埋深及开挖面后撤位移相同条件下,开挖面失稳破坏模式更加明显。这是由于渗流力的作用加剧了地层的破坏区域,从而导致土体失稳区域与水平方向的夹角(约 30°)小于无渗流条件(约 63.3°)。另外,对比图 10 和图 13,可以看出,承压渗流条件下复合地层上部黏土变形大于无渗流工况,这可能是由于砂砾石土渗透系数较大,渗流力带动了下部砂砾石的失稳移动而导致的。

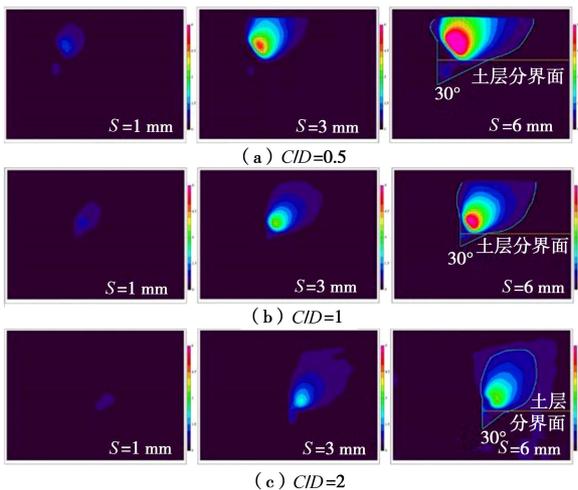


图 13 复合地层变形过程 (承压渗流)

Fig. 13 Deformations of composite soil strata (seepage and confined water)

图 14 为承压渗流  $S=6\text{ mm}$  时的土体位移等值线图。对比图 11 和 14,更加明显地观察到渗流条件下土体破坏区域影响范围更大,下部砾石层变化更加显著。同时还可观察到,渗流条件隧道开挖面右上方的

土体最大位移位置相对于饱和条件发生上移,上移值约  $D/3$ ,表明渗流力加剧了土体的失稳区域,失稳区从隧道开挖面逐渐向地表延伸。同时当  $C/D=0.5$  时,渗流条件下失稳区域对地表的影响范围(约  $2.8D$ )大于无渗流条件(约  $2.6D$ ),增加了 7.7%;当  $C/D=1$  时,增加了 9.1%;当  $C/D=2$  时,渗流条件失稳区域未及地表,距隧道开挖面水平方向最远影响区域约  $1.6D$ ,饱和条件下距隧道开挖面最远约  $0.75D$ ,增加了 113%。

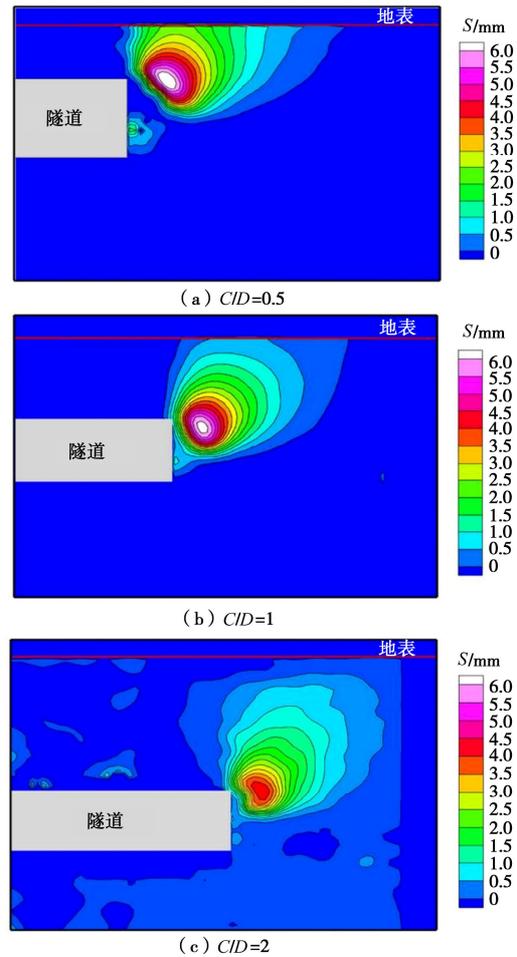


图 14 开挖面失稳等值线图 (承压渗流)

Fig. 14 Contour map of excavation face instability (seepage and confined water)

### 4 开挖面失稳区域三维重构

岩土工程多涉及三维变形问题,但传统数字图像处理技术只能获取二维平面信息,存在一定的局限性,针对此问题已有学者采用相关技术获取了土工试验<sup>[14-17]</sup>中土体及桩土相互作用<sup>[18-20]</sup>模型试验中地层的三维变形场,但对于盾构隧道开挖面失稳时三维地层位移场的精准获取方法未见有报道。基于 1.4 小节所述图像采集系统获得了一系列二维图像,并借助自主编写的三维重构程序建立三维模型。具体实现步骤为:①

采用图像处理技术对同一切片位置处开挖面不同后撤阶段土体位移变形进行计算, 构造 11 张切面图像的数据集。②采用 Matlab 软件图像处理功能中的三维体数据缩减函数 (reducevolume) 对  $x$  和  $y$  方向上每隔 2 个数据进行缩减保留一个数据,  $z$  方向不进行缩减, 使得处理速度加快并采用高斯滤波 (Gauss filter) 对像素平滑处理。③三维重构过程中对获取的图像采用差值处理, 为了使得重构图像精度足够高, 本文首先对相邻图片采用线性插值处理在此基础上再采用三次样条差值算法实现图片间差值。④基于三维重构图像可视化在光线投射的体绘制算法基础上进行改进, 采用了自适应的建模方法, 对模型细节较为丰富的区域采用较为密集的建模方式, 从而更好地呈现三维位移场。采用上述算法对复合地层和黏土地层中开挖面位移场进行三维重构, 得到土体破坏区域三维模型以  $C/D=1$  为例, 如图 15 所示, 图中  $x$  为水平方向,  $y$  为深度方向,  $z$  为相机和激光器同步运动方向。

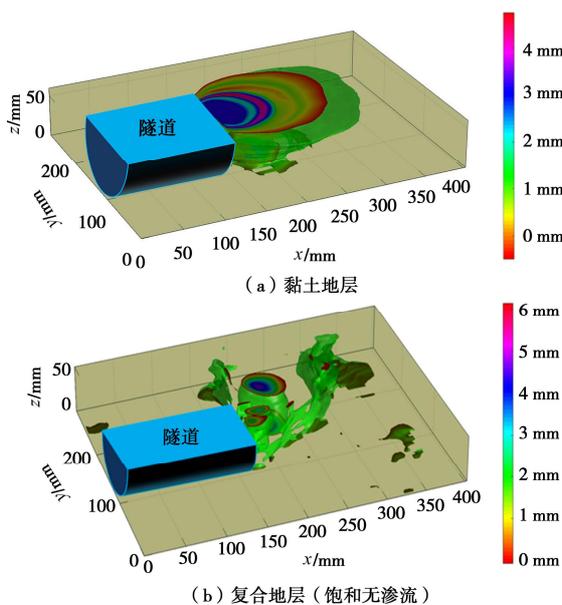


图 15 开挖面失稳区域三维重构视图

Fig. 15 Three-dimensional reconstruction view on failure zone of excavation face

从重构视图中可以非常直观看出, 黏土地层开挖面失稳模式类似漏斗状, 而复合地层开挖面失稳模式在下部砾石层中类似楔形体, 上部黏土层中类似倒圆锥。两种情况下沿着  $z$  方向, 隧道开挖面失稳影响区域是逐渐变化的, 其中黏土地层中变化明显, 复合地层中也存在微小变化, 这是由于在复合地层中土体失稳规律更加复杂, 需要考虑不同土层及土层分界面位置等因素。同时在相同  $[x, y]$  位置坐标点, 不同  $z$  值处土体位移方向大小均不相同。由此看来, 开挖面失稳模型为三维问题, 如仅仅从二维平面中观测土体失稳

影响区域及破坏形态存在一定的局限性, 无法揭示真实开挖面失稳所致地层破坏体形状, 故此三维重构才能准确地完整再现开挖面失稳的真实状态。

## 5 结 论

本文介绍了可自由施加多种渗流承压水作用的三维可视化开挖面稳定性模型试验系统。同时开展 7 组不同埋径比的盾构隧道开挖面失稳试验, 结合数字图像测量系统及自行编写的三维重构程序获得了以下结论:

(1) 该试验系统控制开挖面前进和后退距离精度足够高, 还可自由施加承压水条件, 更加符合实际工程, 且本模型试验装置可模拟多种工况, 具有显而易见的优越性。

(2) 采用自行设计的“CT 扫描”装置, 并自主编写了三维重构程序, 可精准获取开挖面失稳破坏体的三维模型, 更加直观、立体地对土体破坏模式进行解释, 同时可以代替传统 CT 设备, 克服了试验费用昂贵及试样尺寸受限的问题。

(3) 应用该装置首次采用两种不同透明土材料对软硬不同的土层进行模拟, 并结合数字图像测量系统进行分析, 结果表明该方法是可行的。

(4) 复合地层条件下开挖面支护压力曲线分为 3 个阶段。饱和条件下第一阶段支护压力迅速减小发生塑性变形; 第二阶段随着开挖面后撤支护压力缓慢减小; 第三阶段支护压力稳定。承压渗流条件下第一阶段支护压力迅速减小, 发生塑性破坏。第二阶段支护压力出现反弹, 地下水涌入隧道。第三阶段开挖面支护压力趋于稳定, 前方破坏体形成。

(5) 临界破坏状态下, 模型试验得到的破坏体形态与隧道埋径比  $C/D$  有关, 当  $C/D=0.5$  和 1 时, 破坏体区域延伸至地表, 下部砾石层破坏形态类似于楔形体, 上部黏土层破坏形类似于倒圆锥。当  $C/D=2$  时尚处于地基内部, 下部砾石层破坏体区域为楔形体, 上部黏土层破坏区域类似于筒仓体。

## 参考文献:

- [1] KIRSCH A. Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand[J]. Acta Geotechnica, 2010, 5(1): 43 - 62.
- [2] 吕玺琳, 曾 盛, 王远鹏, 等. 饱和圆砾地层盾构隧道开挖面稳定性物理模型试验[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊 2): 129 - 132. (LÜ Xi-lin, ZENG Sheng, WANG Yuan-peng, et al. Physical model tests on stability of shield tunnel face in saturated gravel stratum[J]. Chinese Journal of Geotechnical

- Engineering, 2019, **41**(S2): 129 - 132. (in Chinese))
- [3] 李 君, 陈仁朋, 孔令刚. 干砂地层中盾构开挖面失稳模式及土拱效应试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, **44**(7): 142 - 148. (LI Jun, CHEN Reng-peng, KONG Ling-gang. Model test study of the failure mechanism of shallow tunnels in dry sands[J]. China Civil Engineering Journal, 2011, **44**(7): 142 - 148. (in Chinese))
- [4] 陈仁朋, 李 君, 陈云敏, 等. 干砂盾构开挖面稳定性模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(1): 117 - 122. (CHEN Reng-peng, LI Jun, CHEN Yun-min, et al. Large-scale tests on face stability of shield tunnelling in dry cohesionless soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(1): 117 - 122. (in Chinese))
- [5] LÜ X L, ZHOU Y C, HUANG M S, et al. Experimental study of the face stability of shield tunnel in sands under seepage condition[J]. Tunnelling & Underground Space Technology, 2018, **74**: 195 - 205.
- [6] 刘海宁, 张亚峰, 刘汉东, 等. 砂土地层中泥水盾构掌子面主动破坏模式试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, **38**(3): 572 - 581. (LIU Hai-ning, ZHANG Ya-feng, LIU Han-dong, et al. Experimental study on active failure modes of slurry shield-driven tunnel faces in sand[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, **38**(3): 572 - 581. (in Chinese))
- [7] LÜ X, ZENG S, ZHAO Y C, et al. Physical model tests and discrete element simulation of shield tunnel face stability in anisotropic granular media[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(10): 3017 - 3026.
- [8] 米 博, 项彦勇. 砂土地层浅埋盾构隧道开挖渗流稳定性的模型试验和计算研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(3): 117 - 128. (MI Bo, XIANG Yan-yong. Model test and calculation analysis of excavation-seepage stability for shallow shield tunneling in sandy ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, **41**(3): 117 - 128. (in Chinese))
- [9] WALLACE J F, RUTHERFORD C J. Geotechnical properties of LAPONITE RD®[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, **38**(5): 574 - 587.
- [10] CARVALHO T, SUESCUN-FLOREZ E, OMIÐVAR M, et al. A nonviscous water-based pore fluid for modeling with transparent soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2015, **38**(5): 20140278.
- [11] 马少坤, 王 博, 刘 莹, 等. 南宁地铁区域饱和圆砾土大型动三轴试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, **41**(1): 168 - 174. (MA Shao-kun, WANG Bo, LIU Ying, et al. Large-scale dynamic triaxial tests on saturated gravel soil in Nanning metro area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, **41**(1): 168 - 174. (in Chinese))
- [12] WEAST R C. Handbook of Chemistry and Physics[M]. Boca Raton: CRC Press, 1985.
- [13] LEE C J, WU B R, CHEN H T, et al. Tunnel stability and arching effects during tunneling in soft clayey soil[J]. Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2006, **21**(2): 119 - 132.
- [14] WANG P P, GUO X X, SANG Y, et al. Measurement of local and volumetric deformation in geotechnical triaxial testing using 3D-digital image correlation and a subpixel edge detection algorithm[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(10): 2891 - 2904.
- [15] 王鹏鹏, 郭晓霞, 桑 勇, 等. 基于数字图像相关技术的砂土全场变形测量及其DEM数值模拟[J]. 工程力学, 2020, **37**(1): 239 - 247. (WANG Peng-peng, GUO Xiao-xia, SANG Yong, et al. Full-field deformation measurement of sand using the digital image correlation technique and numerical simulation using the discrete element method[J]. Engineering Mechanics, 2020, **37**(1): 239 - 247. (in Chinese))
- [16] WANG P P, SANG Y, GUO X X, et al. A novel optical method for measuring 3D full-field strain deformation in geotechnical tri-axial testing[J]. Measurement Science and Technology, 2019, **31**(1): 015403.
- [17] WANG P P, SANG Y, SHAO L T, et al. Measurement of the deformation of sand in a plane strain compression experiment using incremental digital image correlation[J]. Acta Geotechnica, 2019, **14**(2): 547 - 557.
- [18] 赵红华, 刘 聪, 唐小微, 等. 基于透明土和三维重构技术的空间变形可视化测量系统的研究[J]. 岩土力学, 2020, **41**(9): 3170 - 3179. (ZHAO Hong-hua, LIU Cong, TANG Xiao-wei, et al. Research on the visualization measurement system of spatial deformation based on transparent soil and three dimensional reconstruction technology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **41**(9): 3170 - 3179. (in Chinese))
- [19] HUANG B, ZHANG Y, FU X, et al. Study on visualization and failure mode of model test of rock-socketed pile in soft rock[J]. Geotechnical Testing Journal, 2019, **42**(6): 1624 - 1639.
- [20] YUAN B X, LIU J Y, CHEN W W, et al. Development of a robust Stereo-PIV system for 3-D soil deformation measurement[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2012, **40**(2): 256 - 264.