

# 黏土浅埋隧道开挖面稳定性模型试验研究

邹金杰<sup>1</sup>, 赵宇<sup>2</sup>, 李姣阳<sup>3,4</sup>, 甘鹏路<sup>4,1</sup>, 闫自海<sup>1</sup>, 刘维<sup>5</sup>

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院, 浙江杭州 311122; 2. 浙江大学防灾工程研究所, 浙江杭州 310058;  
3. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 湖北武汉 430063; 4. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江杭州 310058;  
5. 苏州大学城市轨道交通学院, 江苏苏州 215131)

**摘要:** 为研究不同加固条件下黏土隧道开挖面失稳发展过程及地表变形规律, 采用轴对称半隧道模型, 进行了无加固、管棚加固和“管棚+水泥土”加固条件下的三组试验, 研究了开挖面支护力、地表沉降规律和开挖面失稳发展过程。研究发现, 管棚加固后的土体地表沉降明显减小, 而水泥土加固对地表沉降的减小作用有限。随着支护板位移增大, 支护力出现快速下降阶段、稳定阶段和丧失阶段。开挖面失稳过程中, 土体变形出现主要变形区域、次要变形区域和变形延伸区域。管棚加固或“管棚+水泥土”加固能延缓变形向地表发展, “管棚+水泥土”加固还能降低开挖面附近土体变形大小和范围以及支护力的大小。

**关键词:** 开挖面失稳; 模型试验; 地表沉降; 管棚加固; 土体变形

**中图分类号:** TU 41

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2017)04-0478-07

## Model test study of the face stability of the shallow tunnel in the clay

ZOU Jinjie<sup>1</sup>, ZHAO Yu<sup>2</sup>, LI Jiaoyang<sup>3,4</sup>, GAN Penglu<sup>4,1</sup>, YAN Zihai<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>5</sup>

(1. Power China Huadong Engineering Corporation, Hangzhou 311122, China;  
2. Institute of Disaster Prevention Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;  
3. China Railway No. 4 Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan 430063, China;  
4. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;  
5. School of Urban Rail Transportation, Soochow University, Suzhou 215131, China)

**Abstract:** In order to study the development of the tunnel face instability in the clay under different conditions of reinforcements, by using of symmetry, half of the tunnel model was introduced to conduct three tests for no reinforcement, pipe-shed reinforcement and “pipe-shed + cemented soil” reinforcement. Support pressure on the excavation face, ground deformation and the instability mode of the tunnel face were investigated. It was found that the surface settlement decreased remarkably after the pipe-shed reinforcement, while the effect of the cemented soil reinforcement on the reduction of the settlement was limited. With the increase in the face displacement, the support pressure appeared three stages i. e. the rapid decline stage, steady stage and disappearing stage. During the process of the tunnel face instability, the soil deformation appeared three regions, i. e. the main deformation areas, secondary deformation areas and the extended areas. The pipe-shed reinforcement or “pipe-shed + cemented soil” reinforcement can delay the development of soil deformation toward the surface, and the latter can also reduce the value and scope of the soil deformation near the excavation face and the support pressure of the excavation face.

**Key words:** excavation face instability; model test; surface settlement; pipe-shed reinforcement; soil deformation

随着社会的发展, 城市人口急剧膨胀, 交通拥堵日益加剧。城市隧道建设往往成为缓解交通压力的重要途径。而隧道工程因开挖面失稳造成工程事故的情况时有发生, 因此开展开挖面稳定性研究很有必要。

已有众多学者对开挖面稳定性进行了研究。

Leca and Dormieux<sup>[1]</sup>采用极限分析法得到了支护力的上下限解。黄茂松<sup>[2]</sup>、吕玺琳<sup>[3]</sup>等对机动场进行改进使其得到更广泛的应用。Horn<sup>[4]</sup>率先采用极限平衡法提出了楔形体筒仓模型, Broere<sup>[5]</sup>、Anagnostou<sup>[6]</sup>分别考虑成层地层和渗流, 改进了楔形体筒仓模型。数值模拟方面, 秦建设<sup>[7]</sup>等采用有限

收稿日期: 2016-10-11

修改稿日期: 2017-07-15

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51508503); 浙江省自然科学基金(LY16D020002); 华东勘测设计研究院科技项目(KY2013-02-30)

第一作者: 邹金杰(1980—), 男, 高级工程师, 主要从事隧道及地下工程的研究。E-mail: zou\_jj@ecidi.com

通讯作者: 赵宇(1981—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事地质灾害防治的研究。E-mail: zhao\_yu@zju.edu.cn

差分软件 FLAC3D 对开挖面稳定性进行了研究。

模型试验是研究开挖面稳定性的重要方法。Chambon 等<sup>[8]</sup>采用离心模型试验, 研究了不同埋深比下开挖面失稳模式。Mair<sup>[9]</sup>通过文献综述总结了砂土和黏土地层开挖面失稳的最终破坏形式。陈仁朋等<sup>[10]</sup>针对干砂地层, 研究了开挖面支护力、地表沉降随开挖面位移的变化规律。许明<sup>[11]</sup>采用离心机试验研究了小导管注浆下黏土隧道稳定性问题, 通过减小支撑压力使隧道失稳, 得到了支撑力和地表沉降与地层损失率的关系。王承震<sup>[12]</sup>以扬州瘦西湖隧道为背景, 开展了模型试验和数值模拟研究了隧道开挖面稳定性, 提出了控制措施。上述模型试验多为砂土地层中开挖面稳定性问题, 而黏土地层加固条件下的研究较少, 并缺少对开挖面前方土体失稳发展全过程的直接观测与分析。

为了更好的了解黏土地层中浅埋隧道在不同加固条件下开挖面失稳发展过程, 本文以杭州紫之隧道 I 标浅埋暗挖段为工程背景, 进行了三种加固条件下模型隧道失稳的试验研究, 得到了不同加固条件下开挖面支护力和地表沉降规律, 并通过颗粒图像测速技术(PIV)分析了开挖面失稳区域位移场和失稳发展过程。

1 模型试验概况

1.1 试验方案设计

试验分别采用钢壳和支护板来模拟隧道环向支护和掌子面支撑。试验中通过支护板后退来简化模拟隧道开挖引起的主动失稳过程, 通过安装在连接支护板的轴力计监测支护力, 通过数码相机进行数字图像的采集。采集的数字图像采用颗粒图像测速技术(PIV)进行处理分析。进行了无加固条件、管棚加固和“管棚+水泥土”加固三组试验, 方案如表 1 所示。

表 1 模型试验方案设计

Tab. 1 Design of the model test scheme

加固条件	无加固	管棚加固	“管棚+水泥土”
浅埋条件		$C/D=0.5$	
位移条件		$s_{\max}=2\text{ cm}, D=20\text{ cm}, s/D\leq 1/10$	
轴力及数字图像采集频率		1/20 s	

1.2 模型设备

黏土模型试验箱如图 1 所示, 模型箱长 $\times$ 宽 $\times$ 高为  $0.5\text{ m}\times 0.6\text{ m}\times 0.6\text{ m}$ 。模型槽侧面和底面采用钢板焊接而成, 前后为钢化玻璃面板, 制成

以前玻璃面板为对称面的半隧道模型。隧道模型直径  $D=0.2\text{ m}$ , 长度  $L=0.2\text{ m}$ 。掌子面采用半圆形钢板支护。支护板由前后两个面板通过钢柱连接, 通过安装在面板边缘的滚轮在隧道(钢壳)内前后移动。安放在模型槽外部的电机连接传动杆带动支护板移动。轴力计安装在支护板和传动杆的连接处, 用于测量施加在支护板上的压力。

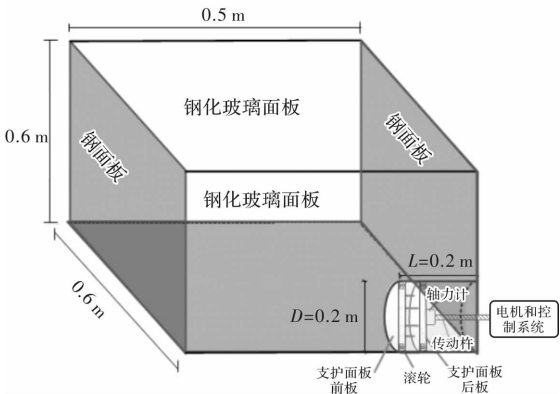


图 1 模型试验装置图

Fig. 1 Setup of tunnel model

试验土样为含水量较高的软黏土, 为了防止土样经隧道模型连接处缝隙排水而引起局部固结, 对连接处涂抹凡士林进行防水处理。此外, 为了在黏土试验过程中模拟管棚支护效果, 在隧道模型前端可安设多根钢条, 用于模拟工程中的管棚支护, 如图 2 所示。钢条直径 4 mm, 长度为 20 cm。



图 2 管棚安装图

Fig. 2 Setup of pipe-shed

1.3 试验土样制备

试验土样取自紫之隧道 I 标浅埋暗挖段淤泥质黏土。将软黏土烘干(干法)后砸成小块, 经粉碎机粉碎后得到黏土粉末。为观察土体运动失稳过程, 配制的黏土样需具有一定的流动性, 经对比试验选取 1.7 倍液限含水量配制黏土试样。制样时将黏土粉末与所需的水加入搅拌机中, 真空搅拌 2 小时后获得黏土试样, 其物理指标见表 2。

水泥土采用 42.5R 复合硅酸盐水泥配置, 水

泥掺量为 2%，水灰比取 1.0，水泥土龄期取 1 d。42.5R 水泥土在室温 10℃ 下 1 d 龄期可达终凝强度的 8%<sup>[13-14]</sup>。

按  $C/D=0.5$  ( $C$  为隧道埋深,  $D$  为模型隧道直径) 填筑黏土试样, 填土总高度为 30 cm, 分 6 层填入模型箱内, 每层厚度为 5 cm。每层填土完毕后进行整平和刮毛后再填筑下一层土。

“管棚+水泥土”实验组中水泥土的填筑范围是: 沿开挖方向至支护板前方 20 cm (即管棚前端头), 沿横向至隧道边缘外侧 5 cm, 沿竖向至隧道顶部和底部, 总体积为  $20 \times 15 \times 30 = 9\,000\text{ cm}^3$ 。水泥土与黏土一起分层填筑。

表 2 试验黏土物理指标

Tab. 2 Parameters of clay in tests

砂土物理指标	黏土
比重 $G_s$	2.65
内摩擦角 $\varphi$	$8^\circ$
粘聚力 $c$	13 kPa
含水量	62%
塑限	21%
液限	36%
孔隙比 $e$	1.71
密度 $\rho$	1.65 g/cm <sup>3</sup>

#### 1.4 颗粒图像测速技术应用

颗粒图像测速技术 (PIV) 是 70 年代末发展起来的一种瞬态、多点、无接触式的激光流体力学测速方法, 近几十年来得到了不断完善与发展。PIV 技术的特点是能在同一瞬态记录大量空间点的速度分布信息, 并可提供丰富的流场空间结构以及流动特性。2002 年, D. White 第一次将 PIV 技术引用到岩土变形量测中<sup>[15]</sup>。然而, 岩土工程领域已有的 PIV 图像分析研究多侧重于砂土试验<sup>[16-17]</sup>, 而在黏土试验中运用相对较少。这主要是因为 PIV 分析黏土照片时存在以下两方面困难: (1) 试验过程中, 黏土试样容易在玻璃面产生糊壁, 导致照片无法拍摄出玻璃背后的土体运动情况, 进而无法使用 PIV 进行分析处理。经过多次尝试发现, 在玻璃面上同时涂抹纳米镀膜材料和机油能够解决该问题。(2) 黏土颗粒太细, 难以识别。在玻璃面涂抹纳米镀膜材料和机油后, 洒上极薄的一层细砂。细砂在黏土粘聚力的作用下随紧邻玻璃面的黏土一起运动。由于机油的润滑作用, 细砂与玻璃间的摩擦很小可忽略不计。

图像采集所用数字摄影相机, 安放在模型槽

前方 (如图 3), 对焦位置为支护板附近土体颗粒处, 用于记录试验过程中开挖面前方土颗粒的运动情况。图像采用 Thielicke and Stamhuis<sup>[18]</sup> 编写的 PIVlab1.35 进行后处理。

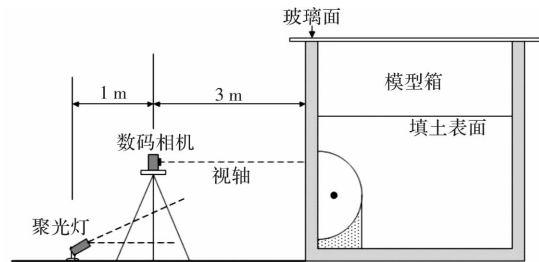


图 3 观测位置布置图

Fig. 3 Set-up of observation of the tests

#### 1.5 试验过程

按照 1.1 节中的方案, 试验分别在三种不同加固条件下进行, 试验过程中实时记录监测数据, 具体步骤如下:

(1) 在拍摄区域设置 30 个控制点, 共 6 行 5 列, 间距为 5 cm, 用于矫正拍摄图片产生几何畸变所带来的分析误差, 如图 4 所示

(2) 在玻璃面上标出试验时移动面板拟后退的最大距离为 2 cm;

(3) 调节电动机控制面板, 三组试验面板的后退速度均为 0.025 mm/s;

(4) 启动电机时, 第一次记录轴力计读数, 同时拍摄第一张图片, 之后每隔 20 s 记录一次轴力计读数, 并拍摄照片。整个试验过程持续 800 s, 共计拍摄 41 张照片。

(5) 当移动面板接近标定终点 (2 cm 左右) 时, 关闭电机和监测系统, 保存监测数据。

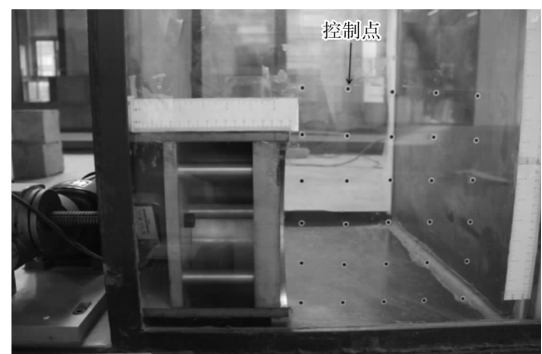


图 4 模型箱控制点

Fig. 4 The reference points of the model box

重复上述试验步骤 (1)~(5), 得到三种不同的土体加固方式下开挖面前方土体运动的数字图像, 再经过 PIV 分析来研究开挖面前方土体变形失稳过程。另外, 在未填筑土样前, 需测量支护板

后退时的阻力,用于矫正模型轴力。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 支护力

图5为不同加固条件下开挖面支护力随支护板位移的变化规律,同时也增加了相同埋深比的砂土试验结果进行对比。纵坐标为无量纲化支护力  $N_D(P/\gamma D)$ ,横坐标为无量纲化开挖面位移  $S/D$ 。开挖面支护力  $P=8F/\pi D^2$ ,其中, $F$ 为开挖面轴力,为试验黏土容重, $D$ 为模型隧道直径。由支护力曲线可以看出,不同加固条件下黏土以及砂土试验中支护力变化基本可以呈现为不同阶段。

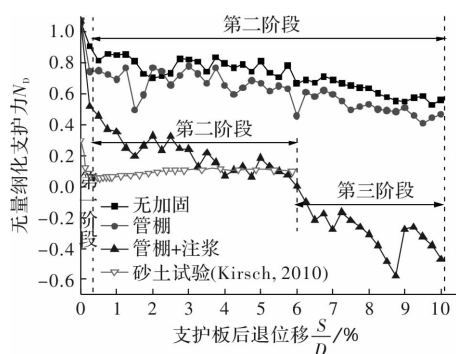


图5 支护力变化规律

Fig. 5 Support pressure-displacement curve of tunnel face

第一阶段为支护力快速下降阶段,该阶段大致发生在支护板后退  $0\sim 0.3\% D$  之间。此阶段内支护板附近土体经历弹塑性变形,土体抗剪强度迅速发挥,面板支护力快速下降。无加固条件下黏土的抗剪强度最低,支护力下降最慢;管棚加固条件下由于管棚的支撑和拱效应,支护力下降较快;“管棚+水泥土”的加固条件下,除了管棚的效果外,隧道附近土体也因水泥的掺入而大大提高了抗剪强度,因此支护力下降最快。

第二阶段为支护力稳定阶段,该阶段出现在土体抗剪强度发挥到极限之后至土体与面板脱离之前。无加固和管棚加固条件下,该阶段支护板位移在  $0.3\%\sim 10\% D$  之间,而“管棚+水泥土”加固条件下,该阶段位移区间约为  $0.3\%\sim 6\% D$  之间。由于黏土与隧道模型内壁存在粘结作用,因此支护力呈缓慢下降趋势。此阶段支护力缓慢下降为零,可见此时开挖面前方土体已具备自承能力。

第三阶段为支护力丧失阶段,该阶段仅出现在土体与面板脱离过程中,仅出现在“管棚+水泥土”加固条件下支护板位移在  $6\%\sim 10\% D$  之间。脱离过程中土体对面板存在一定的粘结作用,导致支护力进一步减小至负值。

三种加固条件下支护力变化规律与 Kirsch<sup>[16]</sup>

砂土试验中支护力变化规律对比发现,加固条件及土体性质基本不影响第一阶段对应的支护板后退位移。黏土在第二阶段支护力有缓慢下降趋势,而砂土则有缓慢上升的趋势。

### 2.2 地表沉降槽

黏土表面松软,难以通过 LVDT 等接触式方法测量地表沉降。本文通过试验首末照片的对比处理得到照片中地表相对沉降量,进而再转化为模型试验中的地表沉降量。

图6是试验结束时隧道的隧道中线纵向沉降槽,其中加固后的地表沉降明显小于无加固的模型。由于管棚的支撑和拱效应,管棚加固后地表沉降明显减小。相对于管棚,水泥土加固的作用主要体现在提高开挖面前方土体的自承能力,而对地表沉降的进一步减小作用有限。无加固和管棚加固条件下,地表最大沉降出现在开挖面前方  $15\text{ cm}$  (约为  $0.75D$ ) 附近;而“管棚+水泥土”加固条件下,地表最大沉降出现在开挖面前方  $2.5\text{ cm}$  (约为  $0.125D$ ) 附近。另外,黏土沿隧道中线的沉降影响范围较大,开挖面前方  $30\text{ cm}$  处,无加固时仍有较大的沉降量,而加固后(尤其是“管棚+水泥土”加固)的地表沉降量已经变得很小,说明采用管棚和水泥土加固可以减小隧道中线地表纵向沉降槽范围。

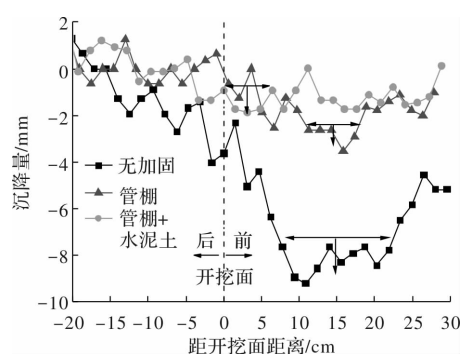


图6 试验结束时隧道中线纵向沉降槽

Fig. 6 The longitudinal settlement groove of the central axis of the tunnel at the end of the tests

### 2.3 开挖面失稳发展过程

PIV 分析得到了不同加固方式下开挖面失稳引起的位移矢量云图。图7给出了三组黏土试验最终变形区域的分布云图。图8为支护板后退  $0.5\text{ mm}$ 、 $2\text{ mm}$  和  $8\text{ mm}$  时的位移矢量及其云图。图中无云图位置为控制点遮挡处,但不影响对地层变形发展趋势和影响范围分析。本节从变形区域的分布和形成发展来分析黏土失稳发展规律。

### 2.3.1 变形区域的分布

考虑到黏土破坏区域内的变形量是渐变的, 可以按照位移大小将图 7(a)~(c)中的渐变运动场大致分为三个区域:

(1)主要变形区域: 此区域紧接开挖面, 受开挖面变形影响最为严重, 土体位移量约等于面板后退的距离. 三组试验的主要变形区域均可以看作是一个半椭圆形范围, 短半轴约  $0.35D$ , 长半轴约  $0.5D$ . 无加固条件下主要变形区域的位移方向为斜下方向(见图 7(a)); 管棚加固和“管棚+水泥土”加固条件下, 由于管棚支护的作用, 变形区域的位移方向近乎水平(见图 7(b)~(c)).

(2)次要变形区域: 该区域的变形相对主要变形区域的变形有所衰减, 变形量逐渐衰减为最大变形的  $1/3$  左右. 无加固条件时, 次要变形区域从

主要变形区域的边界一直向斜上发展至地表, 最远发展至开挖面前方大致  $1D$  的距离(见图 7(a)). 当采用管棚支护时, 次要变形区域沿隧道顶部水平发展至开挖面前方  $0.85D$ (见图 7(b)~(c))左右.

(3)变形延伸区域: 该区域为开挖面失稳破坏过程中, 在主要、次要变形区域基础上逐渐扩大的区域. 虽然变形延伸区域内的位移大小要远小于前两个区域, 但其影响的范围仍然较大, 且会随着开挖面破坏而扩大.

开挖面失稳黏土变形区域(图 7(a)~(c))与 Chambon 等<sup>[8]</sup>和 Kirsch<sup>[16]</sup>试验中最终砂土变形区域的对比发现: 黏土变形区域范围明显大于砂土的变形范围. 黏土变形主要集中在开挖面前方直径范围内, 而砂土变形集中在开挖面前方和上方, 形状为“楔形体+筒仓”.

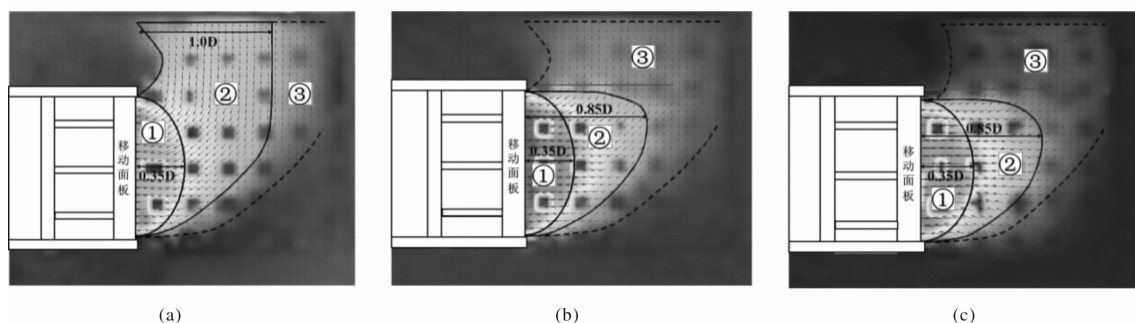


图 7 不同加固条件下变形区域的划分(a 无加固, b 管棚加固, c“管棚+水泥土”)

Fig. 7 The division of deformation areas for different conditions of the reinforcements(a No reinforcement b The pipe-shed reinforcement c The “pipe-shed + cemented soil” reinforcement)

### 2.3.2 变形区域的形成发展

当支护板位移  $S=0.5\text{ mm}$  时, 三组试验的土体变形主要集中在开挖面正前方区域, 朝向支护板水平运动, 主要变形区域为以隧道直径为长轴的椭圆形. 管棚和“管棚+水泥土”加固条件下, 主要变形区域与无加固基本相同, 但变形区域的位移量明显减小; 三种工况下次要变形区域则依次减小(见图 8(a<sub>1</sub>)~图 8(c<sub>1</sub>)).

当支护板位移  $S=2\text{ mm}$  时, 无加固条件下的土体变形已经延伸至地表(见图 8(a<sub>2</sub>)), 管棚加固下的土体变形区域由半椭圆形逐步扩展为倒三角形, 即三维时的楔形体(见图 8(b<sub>2</sub>)), “管棚+水泥土”加固下土体变形区域仍为半椭圆形(见图 8(c<sub>2</sub>)). 说明管棚加固能延缓土体变形向地表的扩展, 而“管棚+水泥土”加固还能降低开挖面处土体变形大小和范围.

当支护板位移  $S=8\text{ mm}$  时, 无加固条件下的

土体变形进一步扩大(见图 8(a<sub>3</sub>)), 管棚加固和“管棚+水泥土”加固下的土体变形也已发展至地表, 但相应位置的变形量小于无加固组的变形量(见图 8(b<sub>3</sub>)和图 8(c<sub>3</sub>)).

## 3 结论

通过模型试验中不同加固条件下开挖面支护力、地表沉降规律、开挖面失稳过程的对比分析, 可以得到以下结论:

(1)在开挖面失稳破坏过程中, 支护力变化可分为两个(无加固和管棚)或三个阶段(管棚+水泥土): 支护力快速下降阶段, 支护力稳定阶段和支护力丧失阶段. 加固强度越大, 第一阶段支护力下降的程度越大, 但加固条件及土体性质基本不影响第一阶段的支护板后退位移. 水泥土加固可以显著提高开挖面前方土体的自承能力

(2)不同加固条件下, 开挖面失稳过程中地表

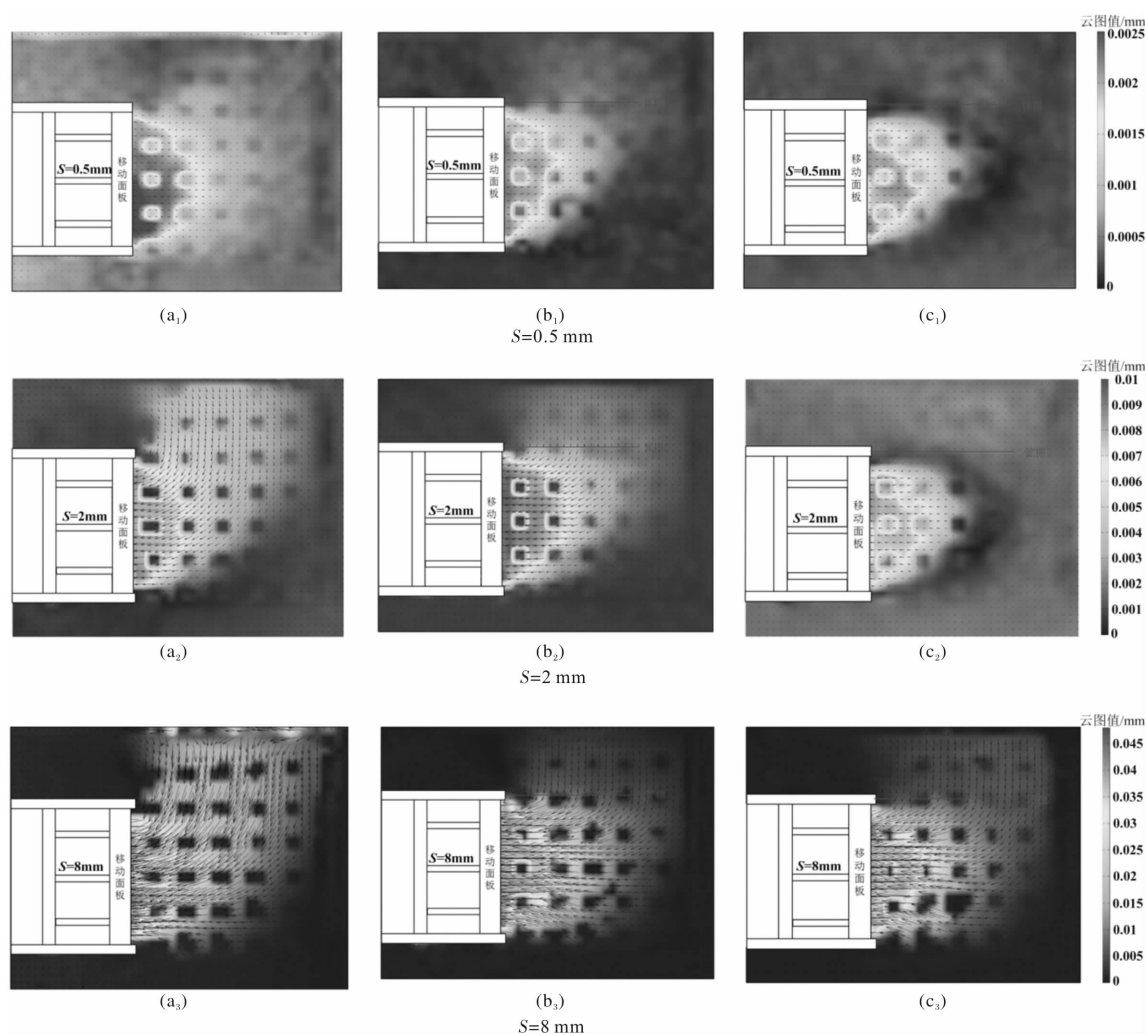


图8 不同加固条件下位移增量随支护板位移变化模式(a无加固, b管棚加固, c“管棚+水泥土”)

Fig. 8 The displacement increment for different face displacement and different conditions of the reinforcements

(a No reinforcement, b The pipe-shed reinforcement, c The “pipe-shed + cemented soil” reinforcement)

沉降存在差异. 管棚加固后地表沉降明显减小, 而水泥土加固对地表沉降的进一步减小作用有限. 另外, 采用管棚和水泥土加固可以减小纵向沉降槽范围.

(3) 开挖面失稳过程中黏土变形范围明显大于砂土, 且在变形范围内不存在明显剪切带. 可以根据位移量将变形场大致分为三个区域: 主要变形区域、次要变形区域、变形延伸区域. 三个变形区域的位置受加固条件的影响.

(4) 黏土位移场的发展受加固方式影响. 无加固时, 变形快速发展至地表; 管棚加固或“管棚+水泥土”加固能延缓变形向地表发展, 且“管棚+水泥土”加固还可降低开挖面附近土体变形大小和范围以及支护力的大小.

本文试验采用的重塑黏土样与实际工程中的土体存在一定差异, 且未严格遵循相似比, 旨在定性探索黏土浅埋隧道开挖面变形发展规律及失

稳机理, 可为工程建设提供理论指导.

## 参考文献 References

- [1] LECA E, DORMIEUX L. Upper and lower bound solutions for the stability of shallow circular tunnels in frictional material[J]. Géotechnique, 1990, 40(4): 581-606.
- [2] HUANG M S, SONG C X. Upper bound stability analysis of plane strain tunnel in non-homogeneous clay[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 213-223.
- [3] 吕玺林, 王浩然, 黄茂松. 盾构隧道开挖面稳定性极限理论分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(1): 57-62. LÜ Xilin, WANG Haoran, HANG Maosong. Limit theoretical study on face stability of shield tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 57-62.
- [4] HORN N. Horizontal erddruck auf senkrechte ab-

- schlussflächen von tunnelröhren[C]//Landeskonferenz der Ungarischen Tiefbauindustrie, 1961: 7-16.
- [5] BROERE W. Tunnel face stability and new CPT applications[D]. Delft: Technical University of Delft, 2001.
- [6] ANAGNOSTOU G, KOVARI K. The face stability of slurry-shield-driven tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 165-174.
- [7] 秦建设, 虞兴福, 钟小春, 等. 黏土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(S1): 511-515.
- QIN Jianshe, YU Xingfu, ZHONG Xiaochun, et al. Numerical research on face movement and collapse of shield tunneling in silt ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(S1): 511-515.
- [8] CHAMBON P, CORTÉ J F. Shallow tunnels in cohesionless soil: Stability of tunnel face[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(7): 1148-1165.
- [9] MAIR R J, TAYLOR R N. Theme lecture: bored tunneling in the urban environment[C]//Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Hamburg: [s. n.], 1997: 2353-2385.
- [10] 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 Renpeng, LI Jun, CHEN Yunmin, et al. Large-scale tests on face stability of shield tunneling in dry cohesionless soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(1): 117-122.
- [11] 许明. 黏土隧道小导管注浆离心机模型试验[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(3): 423-434.
- XU Ming. Centrifuge model test of clay tunnel with embedded small duct grouting[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(3): 423-434.
- [12] 王承震. 扬州瘦西湖隧道全黏土地层泥水盾构施工开挖面稳定性研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(7): 642-649.
- WANG Chengzhen. Study on stability of full clay excavation face in boring of slurry shield[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(7): 642-649.
- [13] 杨滨. 水泥土强度规律研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- YANG Bin. Cement soil strength properties [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [14] 郭印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学. 2007.
- GUO Yin. Study on stabilization of muddy soil and mechanical properties of stabilized soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [15] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. Géotechnique, 2003, 53(7): 619-631.
- [16] KIRSCH A. Experimental investigation of the face stability of shallow tunnels in sand[J]. Acta Geotechnica, 2010, 5(1): 43-62.
- [17] IDINGER G, AKLIK P, WU W, et al. Centrifuge model test on the face stability of shallow tunnel[J]. Acta Geotechnica, 2011, 6(2): 105-117.
- [18] THIELICKEW, STAMHUIS E J. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB[J]. Journal of Open Research Software, 2014, 2(1): 30.

(编辑 桂智刚)