

# 结构异形面平动在砂土中产生的土压力作用模式

李逸涛<sup>1,2</sup>, 周顺华<sup>1,2</sup>, 赵昱<sup>1,2</sup>, 姚琦钰<sup>1,2</sup>, 田志尧<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室, 上海 201804)

**摘要:** 为探究结构异形面对土-结构相互作用的影响, 通过室内模型试验, 研究了不同形状结构面在平动模式下与砂土的相互作用规律, 考虑外凸形、平板形和内凹形 3 种典型结构面, 测量了结构水平移动时表面不同位置的接触应力和土体位移场变化情况。试验结果表明, 结构形状对土压力最大值、土压力分布以及土体地表影响范围有显著影响。在相同的相对位移下, 外凸形的土压力最大值最大, 平板形次之, 内凹形最小; 土压力分布方面, 外凸形和内凹形结构的土压力分布为梯形与“斜椭圆”叠加, 平板形土压力分布为梯形与正弦函数叠加; 外凸形的地表影响宽度最大, 平板形次之, 内凹形最小。

**关键词:** 结构异形面; 结构平动; 土体位移; 土压力作用模式  
**中图分类号:** TU432 **文献标志码:** A

## Earth Pressure Model of Structure Irregular Surfaces in Translational Motion in Sand

LI Yitao<sup>1,2</sup>, ZHOU Shunhua<sup>1,2</sup>, ZHAO Yu<sup>1,2</sup>, YAO Qiyu<sup>1,2</sup>, TIAN Zhiyao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** To explore the influence of structure shape surface on soil-structure interaction, a series of laboratory model tests are conducted and the interaction between irregular structure surfaces and sand in the translational model is studied. The irregular structure surfaces include three typical structure surfaces, i. e., convex structure, plate structure, and concave structure. The contact pressure and soil displacement field in translation of structure are measured. The test results show that the structure shape has a noticeable influence

on the maximum soil pressure, soil pressure distribution, and affected region of soil displacement. With the same relative displacement, the maximum soil pressure of the convex structure is the largest, followed by the plate structure and the concave structure. The soil pressure distributions of the convex structure and concave structure are the superposition of trapezoid and “oblique ellipse”, and the soil pressure distribution of plate structure is the superposition of trapezoid and sine function. The influence width of the earth surface of the convex structure is the largest, followed by the plate structure and the concave structure.

**Key words:** irregular structure surface; structure translation; soil deformation; soil pressure model

随着我国城镇化进程的加快, 城市地下空间开发进入高速增长阶段。“十二五”时期, 我国城市地下空间年均增长 20% 以上<sup>[1]</sup>。与此同时, 我国城市地下空间的开发利用也呈现多样化、深层化和复杂化的发展趋势<sup>[2]</sup>。为满足不同的使用需求, 各种断面形式的地下结构不断涌现。这些地下结构在使用过程中受到周边环境或结构的影响, 与土发生相互作用, 如地铁隧道的沉降与抬升<sup>[3-4]</sup>, 深海管道的往复侧向屈曲<sup>[5-6]</sup>, 垂直锚板的抗拉作用<sup>[7-8]</sup>, X 形桩的水平受荷<sup>[9-10]</sup>, 上述结构从二维平面上分别可以抽象成圆形、矩形、X 型截面结构与土体发生相互作用。不同截面形状的结构受力特性显然不同, 因此, 研究截面形状对土体与结构相互作用的影响, 有助于明确异形结构与土的作用机理和特征, 为异形结构设计理论方法的建立提供基础。

目前, 国内外学者在不同的领域针对特定的结构形式与土体的相互作用开展了一系列研究。在地

收稿日期: 2021-06-30

第一作者: 李逸涛(1994—), 男, 博士生, 主要研究方向为城市轨道交通结构设计。E-mail: yitao\_li@tongji.edu.cn

通信作者: 周顺华(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市轨道交通与铁道工程。

E-mail: zhoushh@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

铁隧道方面,陈仁朋等<sup>[11]</sup>采用模型试验,研究干砂中盾构开挖的稳定性问题,得到了开挖面荷载与开挖面位移的关系。马忠武等<sup>[12]</sup>基于透明土模型试验,得到了开挖面失稳时土体扰动形态的发展规律。在海底管道方面,Chaloulos等<sup>[6]</sup>、Dong等<sup>[13]</sup>提出了管-土水平相互作用过程的大变形数值分析方法,得到了土体侧向抗力与管道位移的对应关系及土体位移场变化规律。在锚杆结构方面,宋享桦等<sup>[7]</sup>基于PFC(颗粒流程序)数值模拟研究了锚杆复合支护形式的支护机制,发现锚板水平移动时土体呈现具有收敛性的喇叭口状位移场。Yue等<sup>[8]</sup>采用室内模型试验的方法,结合DIC(数字图像相关法)观测技术,研究了垂直锚板在水平拉力作用下被动土压力变化规律以及土体失效机制,研究发现随着埋深增加,土体破坏机制由整体破坏逐渐变成局部破坏。Martin等<sup>[14]</sup>、Randolph等<sup>[15]</sup>基于极限分析法推导了黏土中管道的水平向极限承载力表达式。在X形桩方面,孔纲强等<sup>[16]</sup>基于圆形桩的 $p$ - $y$ (荷载-位移)曲线计算方法,考虑异形截面系数,建立了水平荷载作用下X形桩的承载力计算方法。Zhou等<sup>[17]</sup>利用复变函数理论,提出了二维条件下,非圆形桩水平受荷的响应解析模型。前述研究从理论、试验、数值模拟等角度研究了各自工程背景下特定结构与土的相互作用规律,但鲜有从结构形状的角度,在相同条件下研究不同形状结构的土压力作用模式的报道。

因此,本文通过室内模型试验,研究了不同形状的结构在平动模式下与土体相互作用的规律。试验过程中测量了结构的位移、接触面的土压力以及土体位移场的变化情况,讨论了不同形状结构面在平动过程位移场变化规律和土压力的作用模式,从而为后续研究和工程实践提供依据。

## 1 试验装置与方案设计

### 1.1 试验系统

试验系统包括模型箱、千斤顶加载系统、PIV(粒子图像测速)观测系统、数据采集系统,试验装置整体布置如图1所示。其中模型箱(图2)长 $\times$ 宽 $\times$ 高为700 mm $\times$ 300 mm $\times$ 700 mm,四面均为20 mm厚的透明有机玻璃板,板内部预涂凡士林进行润滑处理<sup>[18-19]</sup>。考虑到实际工程结构形状复杂,难以一一进行模型试验,因此本文从结构曲线函数的凹凸性出发,根据众多地下结构的几何特性,抽象设计了3种典型形状的结构模型——外凸形、平板形、内凹

形,分别代表函数曲线的二阶导数大于0,等于0和小于0的3种情况。结构模型同样采用20 mm厚的透明有机玻璃板制成。试验结构模型的平面尺寸如图2所示,3种结构模型的高度均为200 mm,宽度均为300 mm,与模型箱宽度一致,以便试验时满足平面应变条件,外凸形和内凹形的外表面半径均为100 mm。

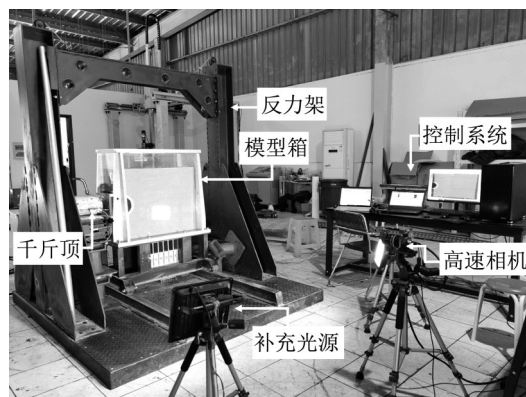


图1 试验装置布置图

Fig.1 Picture of test set-up

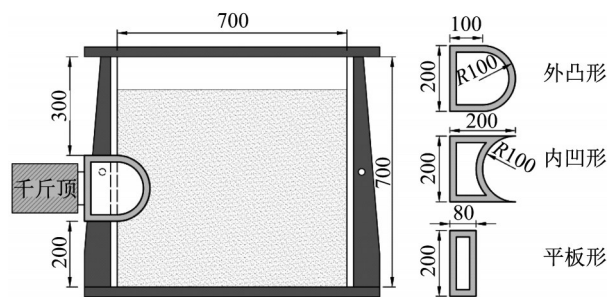


图2 模型箱及3种结构模型示意图(单位:mm)

Fig.2 Sketch of model box and different shapes of three structure models (unit: mm)

### 1.2 试验土样

试验采用的砂土为标准砂,其基本物理指标如表1所示,砂土颗粒粒径范围为0.5~1.0 mm,其颗粒集配曲线如图3所示。模型箱中的土体采用分层填筑进行,每次填土厚度100 mm,通过压实,控制填土相对密实度 $D_r=60\%$ ,属于中等密实状态,填筑后的砂土密度为 $1.56 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,孔隙比为0.70,通过直剪试验测得砂土内摩擦角为 $36.5^\circ$ 。

### 1.3 测点布置

试验中采用土压力传感器测量结构与土的接触应力,为保证土压力传感器的尺寸不影响曲面形状,传感器的尺寸需要尽可能小。文献[20]建议传感器敏感面直径要大于土介质最大颗粒粒径的50倍,因此,选用直径12 mm,厚度5 mm的微型土压力传感

表 1 标准砂基本物理指标

Tab.1 Basic physical indexes of standard sand

指标	数值
颗粒密度 $G_s / (g \cdot cm^{-3})$	2.65
最大孔隙比 $e_{max}$	0.876
最小孔隙比 $e_{min}$	0.584
不均匀系数 $C_u$	1.236
曲率系数 $C_c$	1.461
含水率 / %	0

器进行试验,其敏感面直径 10 mm,满足试验要求。土压力传感器的标定参考文献[21]。传感器布置如图 4 所示,每种结构布置 7 个传感器,其中外凸形和内凹形分别以水平对称轴为中心,上下 20°间隔布置,平板形则同样以水平对称轴为中心,上下 30 mm 间距布置。为减少模型箱边界对土压力的影响,传

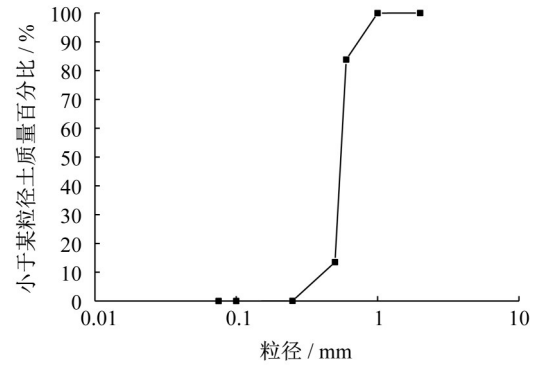


图 3 标准砂颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain size distribution curve of standard sand

感器均位于结构沿宽度方向的中心位置,即距离模型箱前后边界各 150 mm。结构水平位移采用弦拉式位移传感器进行测量,土压力及位移数据采集通过 DH-5922 动态信号测试分析系统完成。

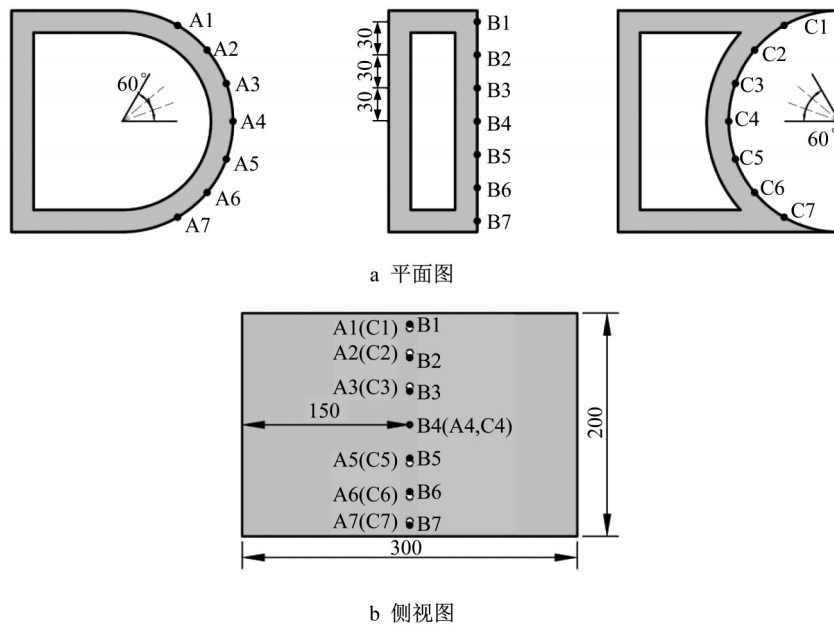


图 4 土压力传感器布置图(单位:mm)

Fig.4 Layout of soil pressure sensor (unit: mm)

试验中土体位移场利用粒子图像测速法(PIV)进行测量。PIV 技术是一种测定流场瞬态位移的测量方法<sup>[22]</sup>。它通过高速相机对观测面进行实时图像采集,然后利用图像处理软件将图像区域划分成若干网格,并根据图像相关性匹配获取位移场,再利用像素坐标和物理坐标的转换获得实际的颗粒位移<sup>[18]</sup>。本次实验所采用的 PIV 测试系统由一个高速相机(CCD)、一套 PIV 图像采集处理软件和两台补偿光源组成。其中 CCD 相机的分辨率为 2 456×2 056 像素,其图像采集最大频率为 11

帧·s<sup>-1</sup>。

#### 1.4 方案设计

本研究针对 3 种结构面类型进行了  $H/D=0.5$ 、 $1.0$ 、 $1.5$  共 9 组试验,其中  $H$  为覆土厚度, $D$  为结构高度。试验开始前,先将结构模型从左侧放入模型箱,由于外凸形和内凹形结构外表面半径为 100 mm,为保证结构与砂土接触区域完全在 PIV 相机拍摄范围内,因此外凸形和内凹形结构进入模型箱长度为 100 mm;为使 PIV 相机能够拍摄平板形结构与土接触时的初始状态,使其进入模型箱 20 mm。随

后调整千斤顶位置,使千斤顶作用面位于结构中心,且与结构密贴,以保证结构模型在试验过程中水平移动,随后按照1.2节所述进行填土。填土完成后,将土压力和位移传感器数值进行平衡清零。试验时千斤顶以 $4\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度匀速推动结构模型向右运动,当总位移达到 $20\text{ mm}$ 时停止试验。土压力传感器及位移传感器的采样频率为 $2\text{ Hz}$ ,PIV测试系统的图像采集频率为 $2\text{ 帧}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

## 2 试验结果分析

### 2.1 位移场

以 $H/D=1.0$ 为例,图5展示了不同位移比时结构模型的累积位移情况。根据土体位移情况,用白色虚线绘制影响区与非影响区的边界于图5中,可以看出除图5a中内凹形以外,其余位移场云中土体变形影响区边界线均以结构上下边界为起始点,延伸至地表,且曲线形状下半部分为对数螺旋线,上半部分为直线。将上下两条分界线分别记为 $p_1$ 、 $p_2$ ,并将 $p_1$ 直线段倾角标注于图5中。在图5a中,外凸形和平板形影响区已经到达地表,表明已经达到整体破坏状态,而内凹形影响区主要还集中于影响区前方,表明内凹形结构前方土体还处于被压缩状态,影响区尚未到达地表,即还未发生整体破坏。图5中 $p_2$ 直线段与水平轴倾角约为 $56^\circ\sim 66^\circ$ ,与经典Rankin土压力理论中的滑裂面倾角 $45^\circ+\varphi/2=63.25^\circ$ ( $\varphi$ 为砂土内摩擦角)<sup>[23]</sup>基本一致。随着相对位移 $S/D$ ( $S$ 为结构水平位移)的逐渐增大,影响区边界曲线 $p_2$ 基本保持不变,曲线 $p_1$ 逐渐向右移动。从图5c可以看出,3种不同结构产生的影响区域形态存在一定区别。曲线 $p_2$ 与水平方向的倾角大小关系是外凸形 $>$ 平板形 $>$ 内凹形,而曲线 $p_1$ 与水平方向的倾角大小关系是外凸形 $<$ 平板形 $<$ 内凹形。最终导致地表影响区宽度表现为外凸形 $>$ 平板形 $>$ 内凹形。从影响区域大小来看,外凸形的影响区域要显著大于平板形,受内凹形结构形状影响, $p_2$ 曲线起点并不是圆弧的端点,因此无法与外凸形和平板形进行直接对比。从影响区的地表宽度来看,外凸形的地表影响宽度为 $2.6D$ ,平板形和内凹形分别为 $2.1D$ 和 $1.9D$ ,说明外凸形结构发生变形对地表影响范围最大,平板形其次,内凹形最小。在结构设计中,为降低结构发生水平位移时对地表的影响,结构侧面边界可以采用直线甚至内凹形曲线。

### 2.2 土压力

图6、图7为土压力随位移变化曲线,需要说明的是,由于试验前需要对传感器的数值进行平衡清零,因此试验中所测得土压力实际为土压力增量,记为 $\Delta p$ 。为对比不同埋深的土压力变化情况,将土压力进行归一化处理,得到 $\Delta p/p_0$ ( $p_0$ 为水平中心点处上覆土压力, $p_0=\gamma(H+D/2)$ ),同样,对结构水平位移 $S$ 进行归一化处理,得到 $S/D$ 。从整体上看,3种结构各测点的土压力增长呈现明显的两阶段变化趋势,前期表现为随位移迅速增大,当达到极限状态后,表现为缓慢地近似线性增长。这与Yue等<sup>[8]</sup>、Ansari等<sup>[24]</sup>试验观测的规律一致。通过曲线斜率的变化情况,得到3种结构到达极限状态所需的位移比约在 $1\%\sim 2\%$ 之间,不同结构间差异较小,表明结构形状对结构达到极限状态所需的位移影响较小。将本文试验结果与挡土墙结构相比,一般认为达到被动极限状态的位移量约为挡土墙高度的 $2\%\sim 5\%$ <sup>[25]</sup>,说明具有上覆土的地下结构达到被动极限状态所需的位移要小于挡土墙结构。

对比3种结构中测量得到的最大土压力值,表现为外凸形最大,平板形其次,内凹形最小。由于外凸形结构的土体影响区域面积显著大于内凹形结构,因此外凸形结构的最大土压力值会大于平板形结构。对于内凹形结构,初始时土体被逐渐压密,当圆弧范围内的土体不被继续压密时与结构形成整体,此时可以将其看成特殊的平板形结构,而内凹形结构的接触面积比平板形大得多,因此最大土压力要小于平板形结构。

对结构表面的土压力增量分布进行分析,图7、图8分别展示了不同埋深以及不同相对位移条件下的土压力增量分布。由于进行了归一化处理,从某种程度上图7可以理解为被动土压力系数分布,不同埋深下的分布大小较为接近,说明在3种埋深条件下的土体破坏模式基本一致。结合图7、图8可以看出,外凸形和内凹形土压力增量分布类似于一个“斜椭圆”,其中外凸形中最大土压力位于下半曲面,而内凹形的“斜椭圆”与外凸形的“斜椭圆”关于水平轴对称,其最大土压力位于上半曲面。造成这种分布规律的原因可以结合结构形状进行解释,外凸形结构的下半曲面,其外法线方向有向下的分量,当结构水平运动时,下半曲面必然会向下挤压土体,相较于顶部的自由边界,下半曲面受到的土体阻力必然会大于上半曲面,同理,内凹形结构的下半曲面土压力要大于上半曲面。平板形的土压

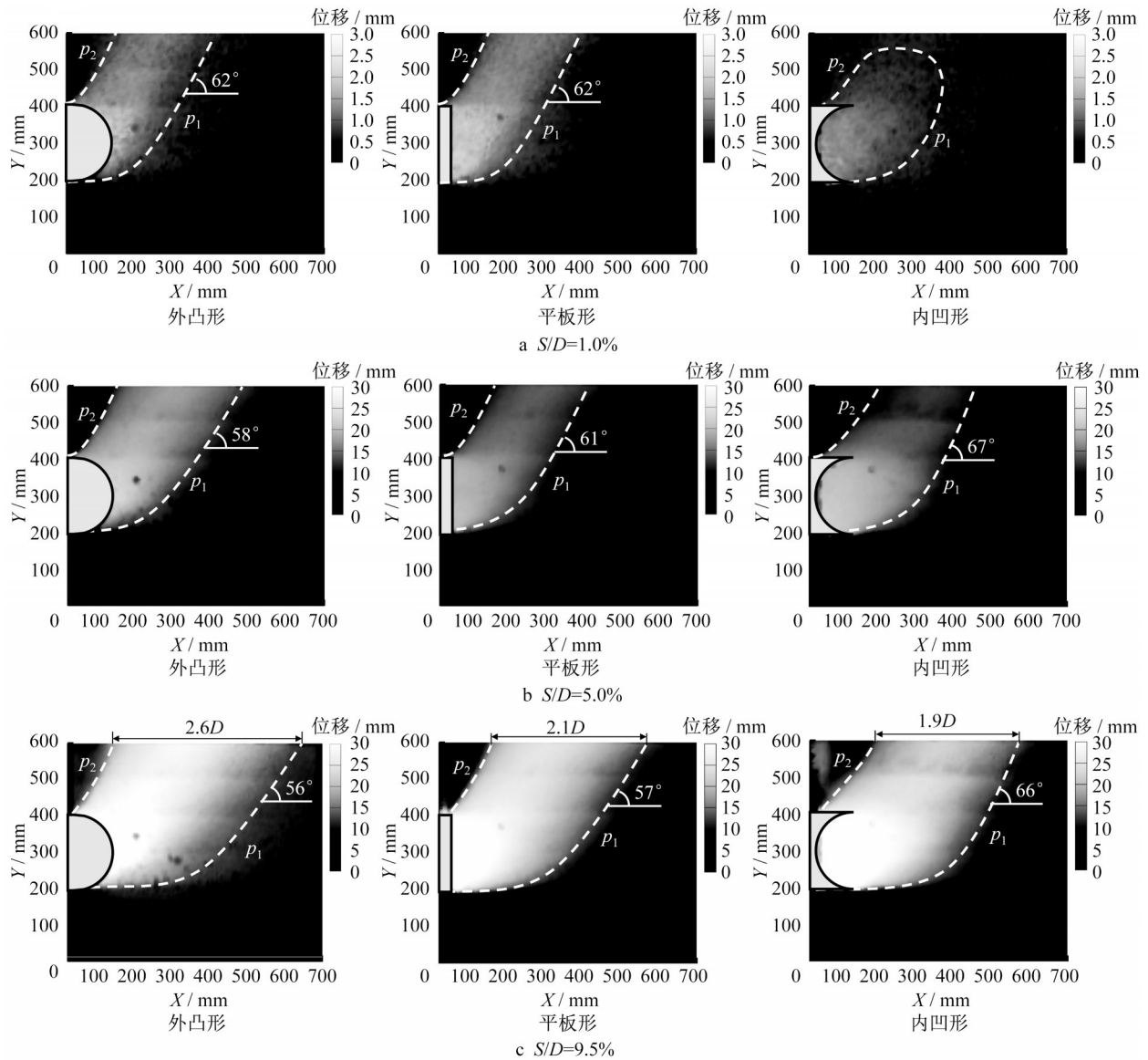


图5 不同阶段土体累积位移场云图( $H/D=1.0$ )

Fig.5 Total soil deformation of different stages ( $H/D=1.0$ )

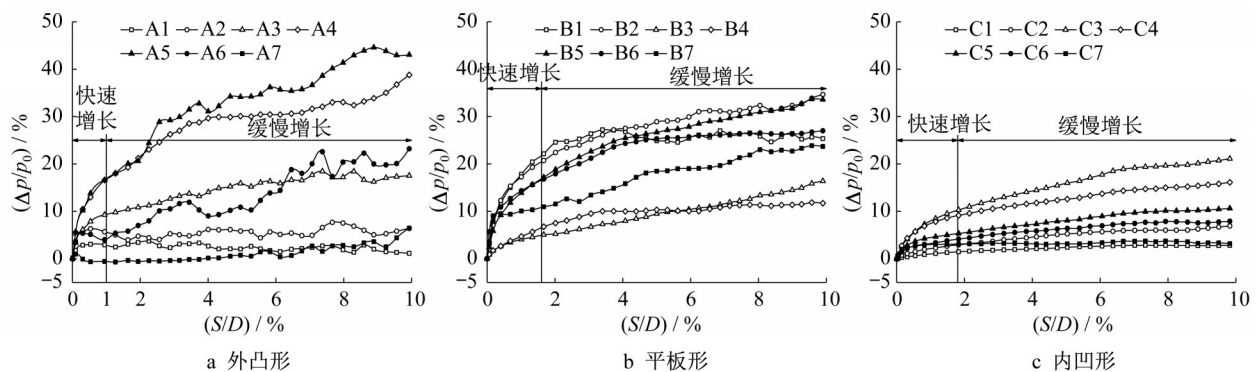


图6 土压力-位移曲线

Fig.6 Soil pressure -displacement curve

力增量呈现“R”形分布,土压力随着深度增大先增大后减小,随后再增大,最小值位于结构中部位

该规律与刚性挡墙发生T变位模式时被动土压力分布类似<sup>[26]</sup>。

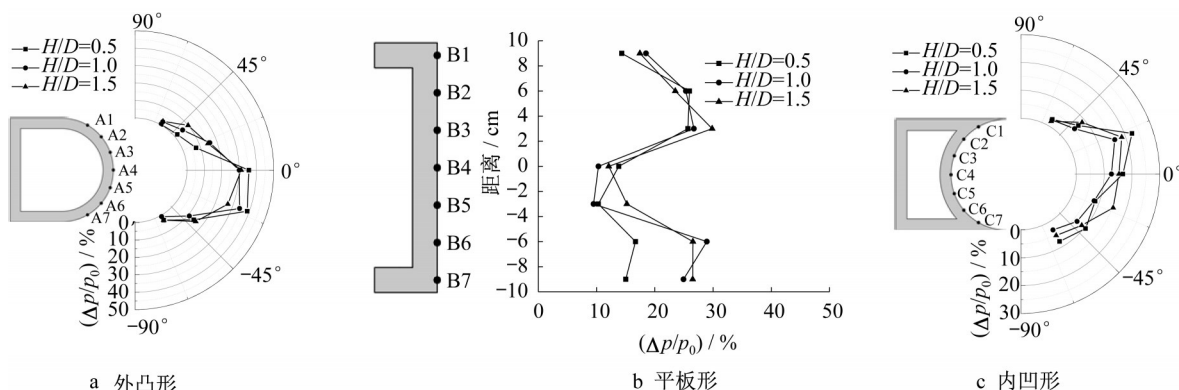


图7 不同埋深比下结构土压力分布( $S/D=5.0\%$ )

Fig.7 Soil pressure distribution of structure in different relative buried depths ( $S/D=5.0\%$ )

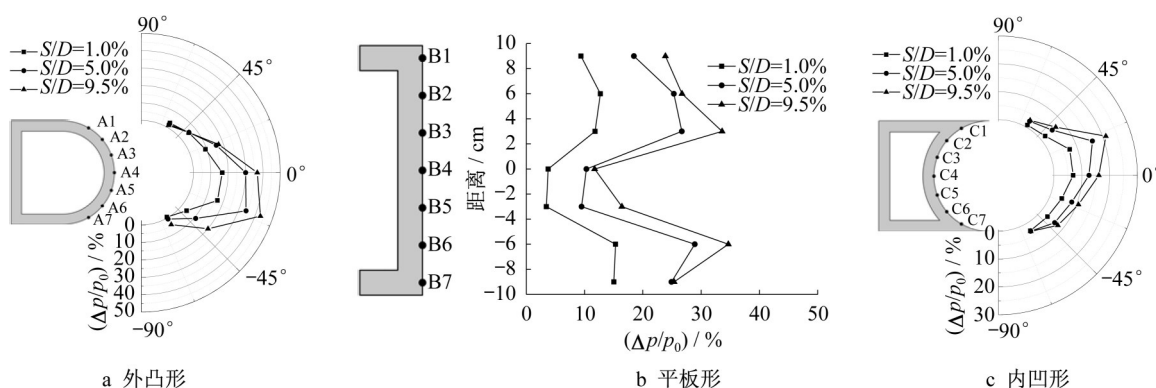


图8 不同相对位移下结构土压力分布( $H/D=1.0$ )

Fig.8 Soil pressure distribution of structure in different relative displacements ( $H/D=1.0$ )

将上述土压力增量分布与静止土压力叠加,可以得到不同形状结构在平动时土压力分布模式,如图9所示。静止土压力为梯形分布,外凸形和内凹形结构的土压力增量可以用一个长轴旋转的椭圆来描述,考虑到试验中测点选择的特殊性,旋转角度用 $\alpha$ 来表示。则外凸形土压力分布可以看成顺时针旋

转 $\alpha$ 的椭圆形与梯形叠加而成,内凹形结构的土压力分布可以看成逆时针旋转 $\alpha$ 的椭圆形与梯形叠加而成。平板形结构的土压力增量可以用正弦函数来描述,因此平板形结构的土压力分布可以看成是一个半波长的正弦函数与梯形叠加而成。

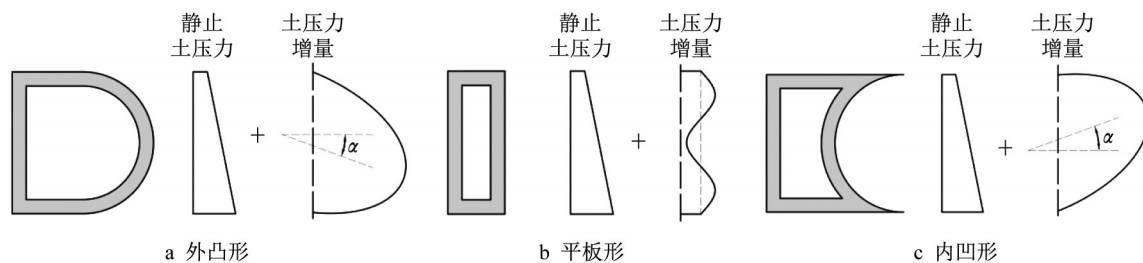


图9 不同结构水平平动时土压力分布模式

Fig.9 Soil distribution model of different structures in translational motion

由于本试验是对不同结构面的土压力作用模式的一个初步探究,仅对土压力作用模式进行定性分析及描述,后续将开展进一步的试验,探究旋转角 $\alpha$ 以及正弦函数的相关参数与土体参数以及结构面形状的具体数学关系。

### 3 结论

对3种典型结构面在平动模式下与砂土的相互作用进行研究,获得了不同形状结构面的土压力随位移的变化规律,主要结论如下:

(1)3种结构土压力随位移的增大呈现两阶段增长趋势,先随位移快速增长,当达到极限状态后,随位移缓慢增长。本研究中,3种结构达到极限状态所需的相对位移比在1%~2%之间,不同结构形状间差异较小。

(2)外凸形结构的土压力最大值最大,平板形次之,内凹形最小,结合位移场分布,外凸形结构平动时对土体影响区域要大于平板形,导致外凸形土压力整体量值要大于平板形;内凹形结构可以看成将平板形结构的土压力分布于半圆形的曲线上,因此内凹形土压力整体量值要小于平板形。在地表影响范围上,当埋深为 $1.0D$ 时,外凸形结构地表影响区域宽度为 $2.6D$ ,平板形和内凹形分别为 $2.1D$ 和 $1.9D$ 。

(3)3种结构的土压力增量分布与结构面的形状存在明显关系,外凸形和内凹形结构的土压力增量分布形状为“斜椭圆”,其中外凸形中最大土压力位于下半曲面,其实际土压力分布可以看成梯形与顺时针旋转 $\alpha$ 的椭圆的叠加;内凹形最大土压力位于上半曲面,其实际土压力分布可以看成梯形与逆时针旋转 $\alpha$ 的椭圆的叠加,平板形结构土压力增量分布为“R”形,其实际土压力可以看成梯形与正弦函数曲线的叠加。

#### 作者贡献声明:

李逸涛:设计试验方案,实施试验研究,撰写论文。

周顺华:提出研究课题,指导撰写论文。

赵昱:设计试验方案,提供试验技术指导。

姚琦钰:实施试验研究,处理试验数据。

田志尧:处理试验数据,修改论文。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市地下空间开发利用“十三五”规划[R]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部,2016.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Urban underground space development and utilization of the “13th Five-Year plan”[R]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. 2016
- [2] 朱合华,丁文其,乔亚飞,等. 简析我国城市地下空间开发利用的问题与挑战[J]. 地学前缘,2019,26(3):22.  
ZHU Hehua, DING Wenqi, QIAO Yafei, *et al.* Issues and challenges in urban underground space utilization in china [J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(3): 22.
- [3] DI Honggui, ZHOU Shunhua, XIAO Junhua, *et al.* Investigation of the long-term settlement of a cut-and-cover metro tunnel in a soft deposit [J]. Engineering Geology, 2016, 204: 33.
- [4] GONG Quanmei, ZHAO Yu, ZHOU Junhong, *et al.* Uplift resistance and progressive failure mechanisms of metro shield tunnel in soft clay [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82:222.
- [5] 冯凌云,朱斌,代加林,等. 深海管道水平向管-土相互作用大变形连续极限分析[J]. 岩土力学,2019,40(12):4907.  
FENG Lingyun, ZHU Bin, DAI Jialin, *et al.* Modelling lateral pipe-soil interaction on soft clay using large displacement sequential limit analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40 (12):4907
- [6] CHALOULOS Y K, BOUCKOVALAS G D, ZERVOS S D, *et al.* Lateral soil - pipeline interaction in sand backfill: effect of trench dimensions [J]. Computers & Geotechnics, 2015, 69:442.
- [7] 宋享桦,谭勇,刘俊岩,等. 拉拔作用下锚杆复合土钉支护协同作用细观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (3):591.  
SONG Xianghua, TAN Yong, LIU Junyan, *et al.* Mesoscopic mechanisms of collaborative working of composite soil nail-anchor supporting wall subjected to tension[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(3):591.
- [8] YUE Hongya, ZHUANG Peizhi, ZHANG Hongbo, *et al.* Failure and deformation mechanisms of vertical plate anchors subjected to lateral loading in sand [J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(11): 04020210
- [9] 刘汉龙,雍君,丁选明,等. 现浇X型混凝土桩的荷载传递机理初探[J]. 防灾减灾工程学报,2009,29(3):267.  
LIU Hanlong, YONG Jun, DING Xuanming, *et al.* Preliminary study on load transfer mechanism of cast-in-place XCC pile [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2009,29(3):267.
- [10] 王新泉,陈永辉,张世民,等. 反拱曲面X形异形桩产生附加应力计算方法研究[J]. 工程力学,2012,29(12):220.  
WANG Xinquan, CHEN Yonghui, ZHANG Shiming, *et al.* Study on calculation methods of additional stress of X-section abnormality pile with inverted arch surface [J]. Engineering Mechanics, 2012,29(12):220.
- [11] 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.  
CHEN Renpeng, LI Jun, CHEN Yunmin, *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.
- [12] 马忠武,孙吉主,刘佳佳. 基于透明土的隧道开挖面稳定性试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(S2):1.  
MA Zhongwu, SUN Jizhu, LIU Jiajia. Stability of tunnel excavation surface based on experiments of transparent soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(S2):1.
- [13] DONG Xiaoyu, ZHANG Wangcheng, SHIRI Hodjat, *et al.*

- Large deformation coupled analysis of embedded pipeline - soil lateral interaction[J]. *Marine Structures*, 2021, 78(11): 102971.
- [14] MARTIN C M, RANDOLPH M F. Upper bound analysis of lateral pile capacity in cohesive soil[J]. *Géotechnique*, 2006, 56(2): 141.
- [15] RANDOLPH M F, WHITE D J. Upper-bound yield envelopes for pipelines at shallow embedment in clay [J]. *Géotechnique*, 2008, 58(4): 297.
- [16] 孔纲强, 周立朵, 孙广超, 等. 水平荷载下X形桩承载特性简化计算方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(10): 2104.  
KONG Gangqiang, ZHOU Liduo, SUN Guangchao, *et al.* Simplified calculation method for bearing capacity of XCC pile under lateral load [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(10): 2104.
- [17] ZHOU Hang, YUAN Jingrong, LIU Hanlong. A general analytical solution for lateral soil response of non-circular cross-sectional pile segment [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 71: 601.
- [18] 毕宗琦, 宫全美, 周顺华, 等. 循环荷载下竖向土拱演化规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(3): 166.  
BI Zongqi, GONG Quanmei, ZHOU Shunhua, *et al.* Experimental study of the evolution law of vertical soil arch under cyclic loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(3): 166.
- [19] ZHAO Yu, GONG Quanmei, WU Yaojie, *et al.* Progressive failure mechanism in granular materials subjected to an alternant active and passive trapdoor [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 28: 100529.
- [20] 曾辉, 余尚江. 岩土应力传感器设计和使用原则[J]. *岩土工程学报*, 1994, 16(1): 93.  
ZENG Hui, YU Shangjiang. Design and application principle of rock and soil stress sensor [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 16(1): 93.
- [21] 李连祥, 符庆宏, 张海平. 微型土压力传感器标定方法研究[J]. *地震工程学报*, 2017, 39(4): 731.  
LI Lianxiang, FU Qinghong, ZHANG Haiping. Study on the calibration method of micro earth pressure sensors [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2017, 39(4): 731.
- [22] WHITE D J, TAKE W A, BOLTON M D. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(7): 619.
- [23] TERZAGHI K. *Theoretical soil mechanics* [M]. New York: Wiley, 1943.
- [24] ANSARI Y, KOURETZIS G, SLOAN S W. Physical modelling of lateral sand - pipe interaction [J]. *Géotechnique*, 2019, 71(1): 1.
- [25] 梅国雄, 宰金珉. 考虑位移影响的土压力近似计算方法[J]. *岩土力学*, 2001, 32(1): 83.  
MEI Guoxiong, ZAI Jinmin. Earth pressure calculating method considering displacement [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2001, 32(1): 83.
- [26] 杨泰华, 龚建伍, 汤斌, 等. 不同变位模式下无黏性土非极限被动土压力计算分析[J]. *岩土力学*, 2013, 34(10): 2979.  
YANG Taihua, GONG Jianwu, TANG Bing, *et al.* Calculation and analysis of unlimited passive earth pressure of cohesionless soil in different movement modes [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(10): 2979.