

# 圆砾地层深基坑工程特性离心机试验研究<sup>\*</sup>

杨磊<sup>1</sup>, 谢雄耀<sup>2</sup>, 黄钟晖<sup>1</sup>

(1. 南宁轨道交通集团有限责任公司, 南宁 530029; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

**摘要:**以南宁轨道交通工程为背景,通过离心机试验对圆砾地层深基坑工程进行模拟,获取围护墙体变形、土压力分布及墙后地表沉降等基坑工程特性。研究表明,采用现场取土通过相似级配法制作圆砾地层离心机土体模型可较好地解决土体粒径效应与力学特性问题。试验数据表明,圆砾地层深基坑墙体最大水平位移 $D$ 为 $0.96\% H \sim 1.49\% H$ ( $H$ 为开挖深度);主、被动侧向土压力随深度不断增长,均呈三角形分布,土压力大小分别介于理论静止土压力与主、被动土压力之间;地表沉降呈凹槽形曲线分布,最大沉降点发生在距坑边约 $1.0 H$ 处,地表沉降最大值约 $1.0 D$ ,开挖主要影响范围约 $3.0 H$ 。

**关键词:**圆砾地层;深基坑;离心机试验

中图分类号:TU46

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)04-0987-07

## Centrifuge Testing Research on Engineering Characteristic of Gravel Deep Excavation

Yang Lei<sup>1</sup>, Xie Xiongyao<sup>2</sup>, Huang Zhonghui<sup>1</sup>

(1. Nanning Rail Transit Co. Ltd., Nanning 530029, P.R. China;

2. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, P.R. China)

**Abstract:** After a centrifuge testing simulating deep excavation engineering in gravel area based on Nanning rail transit project, the excavation engineering characteristics are obtained, such as the deformation of retaining wall, the distribution of lateral earth pressure and the surface settlement. The research results show that the centrifuge simulating model of gravel which was made of on-site soil by Similar Grading Method could solve particle size effect and mechanical properties problem. From the testing data, the maximum value of retaining wall deformation  $D$  equals  $0.96\% H \sim 1.49\% H$  ( $H$  is excavation depth). The active and passive earth pressure increase with depth, and show triangle distribution. And the earth pressure value is between theoretical static value and active or passive value. The surface settlement distribute as groove shape curve. The maximum settlement value is  $1.0 D$  which appears at the point about  $1.0 H$  far from the edge of excavation. And the influence range is about  $3.0 H$ .

**Keywords:** gravel soil; deep excavation; centrifuge testing

## 0 引言

南宁盆地圆砾地层具有分布广、厚度大及埋深浅的特点。随着南宁城市的飞速发展,越来越多的

深基坑工程将涉及圆砾地层,特别是在南宁轨道交通的建设中,大量圆砾层地区深基坑工程在短期内涌现。圆砾地层具有很强的特殊性,其工程特性介于岩石与土之间,而国内针对圆砾地层基坑特性的

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-02-10(修改稿)

作者简介:杨磊(1983-),男,湖南溆浦人,硕士,高级工程师,主要从事隧道及地下工程领域的研究工作。

E-mail:aleiyang2001@163.com

基金项目:南宁市科技基金(201107021C)

研究尚少。因此,对圆砾地层深基坑工程特性进行研究具有很好的现实意义。

离心机模型试验是研究岩土问题的有效手段<sup>[1-7]</sup>,是确定基坑工程重要参数的有效途径之一<sup>[8-10]</sup>。本文选择南宁市轨道交通 1 号线广西大学站试验深基坑作为模拟对象,建立基坑开挖离心机试验模型,分析研究圆砾地层深基坑围护墙体的变形规律、土压力分布规律及墙后地表沉降规律,最终的研究成果可供类似圆砾地层深基坑工程参考。

1 工程背景

广西大学站是南宁轨道交通 1 号线的试验车站,为地下两层车站。车站总长度 465 m,标准段宽度 20.7 m,车站主体基坑标准段开挖深度 16.08 m。围护结构采用 800 mm 厚地下连续墙结构,共设置 3 道支撑,基坑围护结构的剖面如图 1 所示。

基坑场地位于邕江北岸Ⅱ级阶冲积阶地,场区地层为二元结构,出露地层为第四系上更新统望高组上段,系河流冲积成因形成的粘土、粉质粘土、粉

土、粉砂、砾砂、圆砾等,下伏地层为第三系北湖组湖相沉积的泥岩、粉砂岩等;表层为素填土所覆盖,地下连续墙嵌入粉砂岩层 2 m 起止水作用。场地主要土层的物理力学指标如表 1 所示。

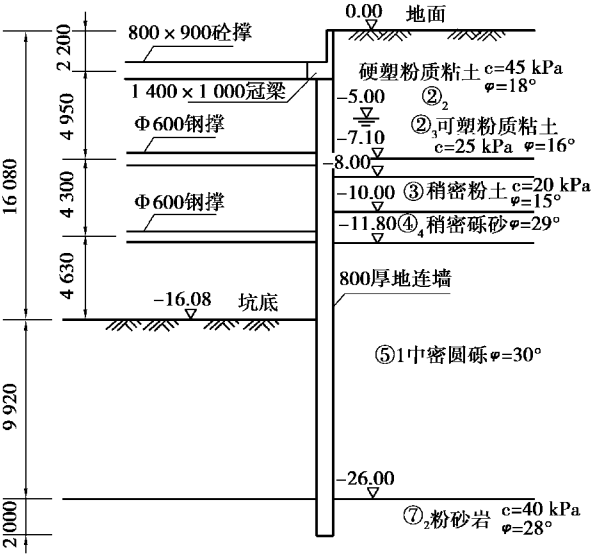


图 1 广西大学站标准段基坑剖面图(单位:mm)  
Fig. 1 Standard section of Guangxi University Station(unit:mm)

表 1 广西大学站主要地层物理力学指标表

Table 1 Physico-mechanical parameters of Guangxi University Station's major stratum

| 土层号              | 土层名称   | 层厚/m       | 含水量/% | 重度/(kN·m <sup>-3</sup> ) | 孔隙比   | 压缩系数/MPa <sup>-1</sup> | 压缩模量/MPa | 粘聚力/kPa | 内摩擦角/(°) |
|------------------|--------|------------|-------|--------------------------|-------|------------------------|----------|---------|----------|
| ①                | 填土     | 0.50~6.00  | —     | 18.5                     | —     | —                      | 6        | —       | —        |
| ② <sub>2</sub>   | 硬塑粉质粘土 | 0.00~8.80  | 25.7  | 19.5                     | 0.766 | 0.192                  | 11       | 45      | 18       |
| ② <sub>3</sub>   | 可塑粉质粘土 | 0.40~5.70  | 24.6  | 19.8                     | 0.702 | 0.214                  | 8        | 25      | 16       |
| ② <sub>4</sub>   | 可塑粉质粘土 | 2.40~5.50  | 23.6  | 20.5                     | 0.750 | 0.500                  | 7        | 25      | 10       |
| ② <sub>5</sub>   | 软塑粉质粘土 | 2.40~4.70  | 29.8  | 19.7                     | 0.779 | 0.510                  | 5        | 15      | 7        |
| ③                | 粉土     | 0.50~5.80  | 23.9  | 19.9                     | 0.750 | 0.179                  | 7        | 20      | 15       |
| ④ <sub>1</sub>   | 粉、细砂   | 1.00~8.30  | 35.0  | 19.5                     | 0.970 | 0.150                  | 8        | 4       | 26       |
| ④ <sub>4</sub>   | 砂砂     | 1.00~4.70  | —     | 21.0                     | 0.500 | —                      | 15       | —       | 29       |
| ⑤ <sub>1</sub>   | 圆砾     | 5.00~15.60 | —     | 22.0                     | 0.350 | —                      | 18       | —       | 30       |
| ⑦ <sub>1-1</sub> | 泥岩(上段) | 3.53~6.50  | 18.2  | 21.0                     | 0.533 | 0.156                  | 12       | 65      | 25       |
| ⑦ <sub>1-2</sub> | 泥岩(下段) | 6.00~4.80  | 14.5  | 22.0                     | 0.434 | 0.140                  | 20       | 90      | 30       |
| ⑦ <sub>2</sub>   | 粉砂岩    | >1.2       | 16.0  | 22.0                     | 0.500 | 0.150                  | 18       | 40      | 28       |

2 离心机试验方案

2.1 几何尺寸

在满足试验目标及方便实际操作的前提下,试验总体方案的制定基于以下几点假定与简化:

(1)广西大学站基坑标准段车站属于狭长型

基坑,本次试验把基坑简化为平面应变问题,并取实际基坑宽度的一半进行模拟,沿基坑方向的长度及墙后土体的宽度主要由模型边界效应来控制。

(2)本次模拟为了土层模型制作的方便,把地层简化为 10 m 厚粉质粘土层、16 m 厚圆砾层及粉砂岩层,并假定模拟范围内地层为均匀等厚度分布。

(3)广西大学站基坑的第一道钢筋砼撑为带肋撑,模型试验时,先把支撑等效为等截面的砼单撑,然后再按抗压刚度相似换算成与钢支撑等间距的等效支撑。

本次试验基于同济大学 TLJ-150 复合型岩土离心机试验平台,采用 700 mm×700 mm×900 mm

的模型箱安装基坑模型。在均衡考虑应力等效及时间问题后<sup>[11]</sup>,采用 1:50 的几何相似比,离心加速度加载到 50g 实现模型与实际基坑的应力等效。根据几何相似比,考虑到边界效应<sup>[12]</sup>,本次试验的总体布置如图 2 所示。

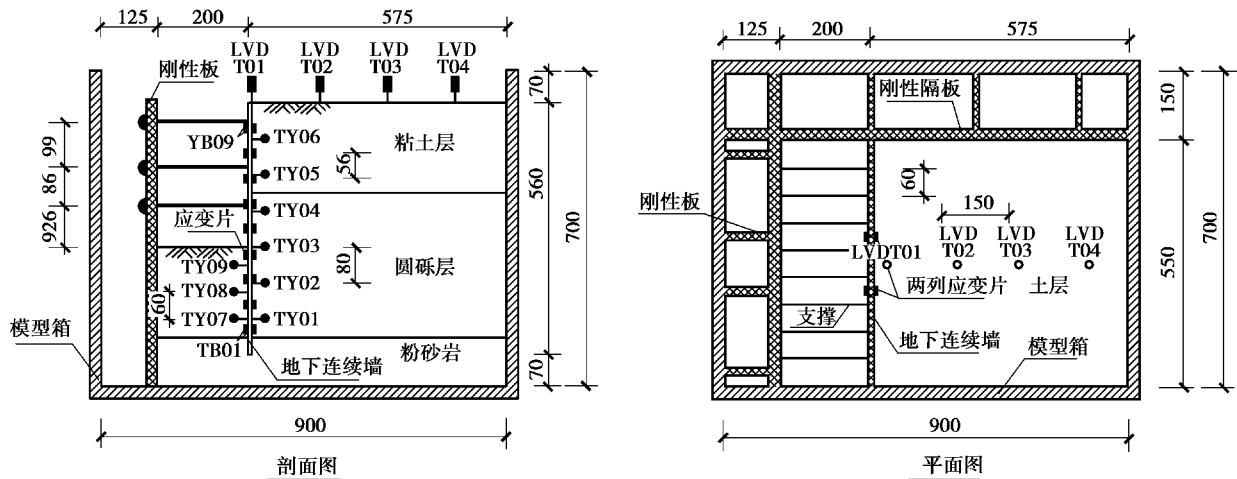


图 2 试验总体布置图(单位:mm)

Fig. 2 Overall layout of test(unit:mm)

## 2.2 施工步及开挖方法

根据原型施工情况,并考虑试验结果与监测数据的对比,试验将模拟 3 个施工步:①设置第 1 道撑,并开挖至-7.65 m;②设置第 2 道撑,并开挖至-11.95 m;③设置第 3 道撑,并开挖至坑底-16.08 m。

对于基坑工程的离心模型试验,模拟开挖的方法是关系到试验效果的关键之一。近年来,国内外常用的模拟方法主要有停机手动开挖、排出代土溶液模拟开挖及微型机械手开挖<sup>[13]</sup>。后两种方法是在不停机状态下进行的,各种方法均有优缺点。由于代土溶液多为重金属溶液、有毒,且液体侧向压力系数与土层差异较大,以及微型机械手费用昂贵,故本次试验采用传统、较成熟的停机手动开挖方法,即“停机→设撑→开挖→开机”的过程,根据施工步情况,试验将按此过程循环 3 次。

## 2.3 测点布置

根据试验的目的,试验对侧向土压力、墙体变形、地表沉降进行了监测。各测量传感器或监测设备的布置如图 2 所示,主要的测量传感器或监测设备如下:

采用电阻式应变片测量墙体内外应变差,在基坑长度方向共布置 2 列,竖向等间距布置,共 36 个

应变片,形成 18 个数据通道。

选择电阻式微型土压力盒测量墙体前后侧向土压力,在基坑长度方向居中布置 1 列,主动区等间距布置 6 个,坑底以下被动区等间距布置 3 个,共形成 9 个数据通道。

选择差动式位移传感器测量坑外地表沉降,量程为 50 mm,在基坑长度居中位置沿墙后方向等间距布置 1 列,共形成 4 个数据通道。差动式位移传感器通过螺纹套管与刚性的位移支架连接,位移支架固定在模型箱槽壁上。

## 3 试验模型制作

试验模型主要包括土层模型、地下水模拟、结构模型。试验前,模型箱中试验模型的制作步骤大致为:刚性隔板安装→边界处理→粉砂岩模型制作→地下连续墙模型制作→排水兼地下水控制管安装→圆砾地层及粉质粘土层模型制作。土层模型制作前,采用聚氟乙烯薄膜+白凡士林润滑剂+聚氟乙烯薄膜方案对土体与模型箱或刚性板的所有接触面进行边界处理,在土体与刚性板间形成一道可自由上下滑动的接触面,以减小试验的边界效应。

### 3.1 土层模型制作

对于粉质粘土层,采用重塑土样的方法进行制作。选用南宁②<sub>2</sub>硬塑粉质粘土层的现场取土,经过取土→切土→晒土→碾磨→浸泡成土膏→固结几个过程制作模型土层。由于所取土样与原型土层物理力学性质基本相似,且固结度一定程度上决定了土层的控制参数,因此,实际土层制作时,以固结度达 90% 作为控制参数。考虑土体固结过程水的损失,根据经验按设计含水量的 110% 进行配土能达较好的效果<sup>[13]</sup>。对于固结度的控制,一方面通过模型土样的渗透系数按时间相似比估算固结时间,另一方面取部分土样测试重度,并对土层微

型静力触探其强度指标,使重度及强度指标与实际土层相近。土层原型渗透系数为 0.006 5 m/d,通过在离心机上 100g 的离心场进行固结,经计算,固结时间 12 h 即可等效于实际重力场固结 13.7 年,固结度可达 90%。

圆砾地层的模拟是本次试验需解决的关键问题,需解决粒径效应与保持特有力学特性两个问题的统一<sup>[11]</sup>。因此,本次试验采用相似级配法对圆砾地层现场取土经晒干、颗粒筛分后配土模拟,根据粒径效应的相关研究<sup>[14-18]</sup>,选择 1/8 的相似比进行缩放,圆砾地层的实际级配及模型级配组成如表 2 所示。

表 2 圆砾地层实际级配及模型级配表

Table 2 Actual and modeling gradation of gravel stratum

|              | 粒径/mm   | 40~20   | 20~5  | 5~2     | 2~0.5    | 0.5~0.25   | <0.25  |
|--------------|---------|---------|-------|---------|----------|------------|--------|
| 实际土层         | 质量百分比/% | 25.8    | 42.1  | 11.7    | 6.9      | 5.3        | 8.2    |
| 不均匀系数:46.906 |         |         |       |         |          |            |        |
|              | 粒径/mm   | 5.0~2.0 | 2~1.0 | 1.0~0.5 | 0.25~0.5 | 0.075~0.25 | <0.075 |
| 模型土层         | 质量百分比/% | 34.2    | 22.79 | 14.85   | 7.77     | 6.11       | 14.28  |
| 不均匀系数:46.767 |         |         |       |         |          |            |        |

圆砾地层模型与粉质粘土层一样,通过控制土体固结度来大致实现力学性质与实际土层相近。对于固结度的控制,渗透系数大的土层固结较快。经估算,圆砾地层在离心机上 100g 离心场下预固结 2 h 足可完成固结。

实际基坑中的粉砂岩层主要起嵌固及基坑止水作用。模型土层采用配制低等级水泥砂浆的方法进行模拟,以极限抗压强度作为控制指标。根据试验安排,第 5 天为开挖模拟及数据采集时间,可按水泥砂浆强度增长曲线计算设计的配合比,使得试验时模型土层与实际土层具有相近的极限抗压强度。

### 3.2 地下水模拟

原型基坑地下水位为地面以下 5 m,模型的地下水位经相似比换算后为土层模型表面以下 20 cm。在圆砾地层模型填装前,分别于主、被动区角部设置两根垂直向排水管,四周开孔,顶露出。排水管一方面为圆砾地层、粉质粘土层预固结时的水体渗流通道,另一方面兼顾地下水位的观察与控制作用。在土层模型制作全部完成后,通过从顶口测量排水管内水位,并通过加減水、二次固结,最终控制水位与模型地面高差达到要求。

### 3.3 结构模型制作

为了模型制作方便,地下连续墙及支撑模型均采用工业纯铝作为替代材料。按离心试验的相似准则计算各结构模型的尺寸,地下连续墙按抗弯刚度相似,并忽略剪切变形的影响<sup>[13-19]</sup>,计算后所得的地下连续墙模型厚度取 12 mm;支撑按抗压刚度相似,计算后所得的第一道支撑截面面积为 65.14 mm<sup>2</sup>,第二、三道支撑截面面积为 51.09 mm<sup>2</sup>。

图 3 为试验模型实体照片。

## 4 试验数据分析

试验模型制作完成后,经加载固结土层、数据通道调试即可开始模拟开挖。整个模拟试验共历时约 250 min,共分为“停机开挖至-7.65 m→加载至 50g→施工步一 50g 状态运行约 15 min→制动→停机开挖至-11.95 m→加载至 50g→施工步二 50g 状态运行约 15 min→制动→停机开挖至-16.08 m→加载至 50g→施工步三 50g 状态运行约 15 min→制动停机”12 个时段。其中施工步一、二、三的等效力状态分别发生在第 16~31 min、109~124 min、229~241 min 时段。



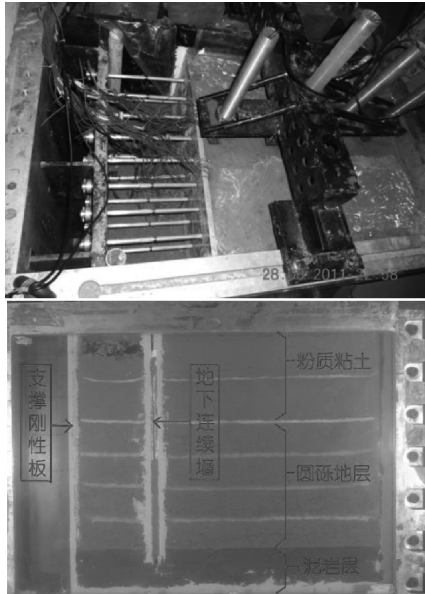


图3 试验模型实体图

Fig. 3 Photo of testing model

#### 4.1 墙体变形

墙体变形依据墙体前后应变差进行计算, YB01~YB09 各测点的应变差选取两列应变计的综合值,其数据时程曲线如图4所示。

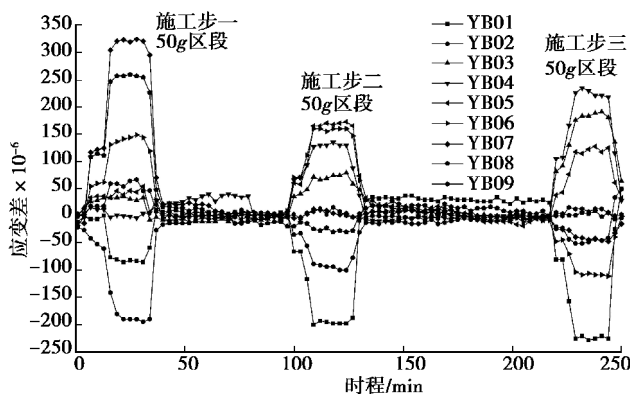


图4 应变差时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of strain difference

计算墙体变形时,根据近似圆弧方法计算各测点处的曲率半径、圆曲角度,并假定墙底为不动点,分别计算各测点相对于前一点的水平位移,再自下而上累积计算出各点水平位移值<sup>[19]</sup>。曲率半径、圆曲角度计算公式如下:

$$\rho_i = d / (\varepsilon_{\text{前}i} - \varepsilon_{\text{后}i}) \quad (1)$$

$$\theta_i = l_i / \rho_i \quad (2)$$

式中:  $\rho_i$  为各点的曲率半径;  $d$  为墙体厚度;  $(\varepsilon_{\text{前}i} - \varepsilon_{\text{后}i})$  为试验直接测量的各点墙前后应变差;  $\theta_i$  为各点对应的圆曲角度;  $l_i$  为点间距。

计算后,各施工步的墙体水平位移试验值如图5所示。由图可以看出:①墙体的总体水平变形模

式为墙体顶底端变形较小、近开挖面附近变形大;②随着开挖深度的增加,墙体最大水平位移位置不断下移,均发生在开挖面以下一定区域;③各施工步的墙体最大水平位移值分别为  $0.96\%H$ 、 $1.36\%H$  及  $1.49\%H$  ( $H$  为开挖深度)。

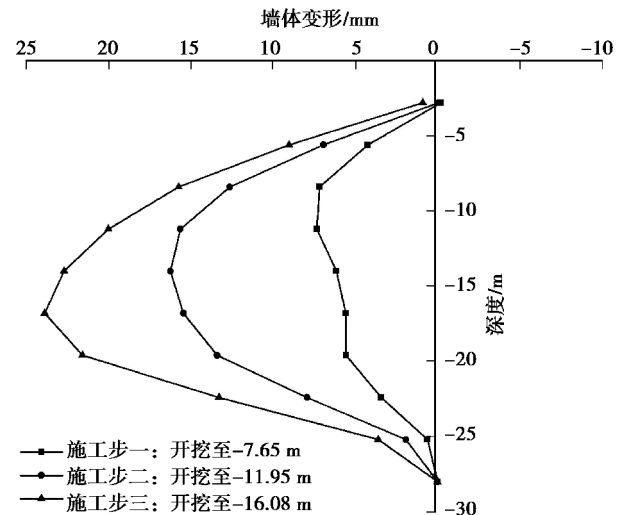


图5 墙体变形图

Fig. 5 Wall deformation

#### 4.2 土压力

试验中,除 TY03 土压力盒因损坏无法获得数据外,其他土压力盒均正常。各土压力盒试验数据时程曲线如图6所示。

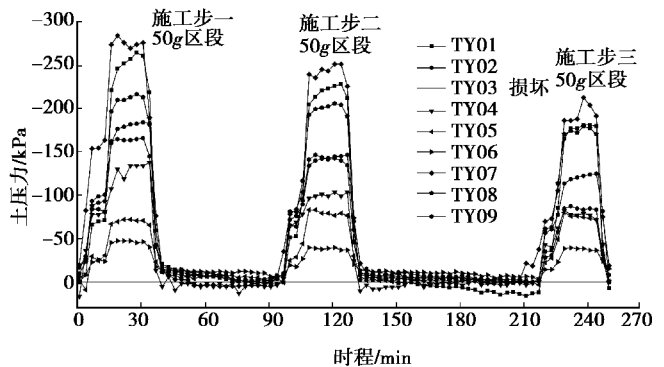


图6 土压力时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of earth pressure

时程数据经整理分析后得到各施工步土压力随深度的分布如图7所示。图中,主动区细实线为朗肯土压力理论计算的主动土压力分布线,各虚线均为静止土压力计算分布线,其中被动区3根虚线分别与各工况相对应。从图中可以看出:①主动侧土压力的分布形态随深度呈不断增长趋势,大致呈三角形分布;②经与理论计算值比较,主动侧土压力的大小介于朗肯主动土压力计算值与静止土压力计算值之间,并随着开挖造成墙体变形增加而不

断减小;③被动侧土压力分布形态基本呈现为随深度不断增长的三角形;④被动侧土压力同样因受墙体变形的影响,土压力大小随着开挖越来越趋向于朗肯被动土压力状态,但离被动土压力状态甚远,这是因为达到被动状态所需的土体位移较大。

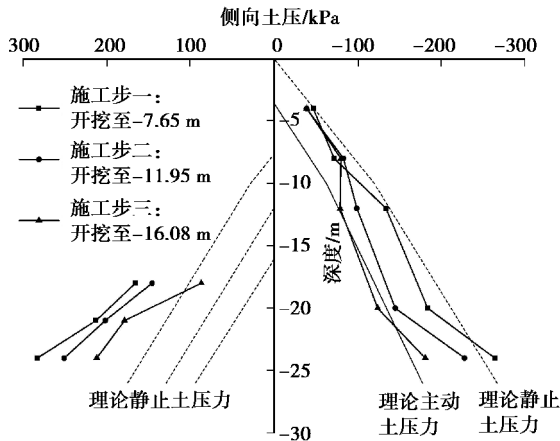


图7 土压力分布图

Fig. 7 Earth pressure distribution

### 4.3 地表沉降

地表沉降各测点的试验数据时程曲线如图8所示。

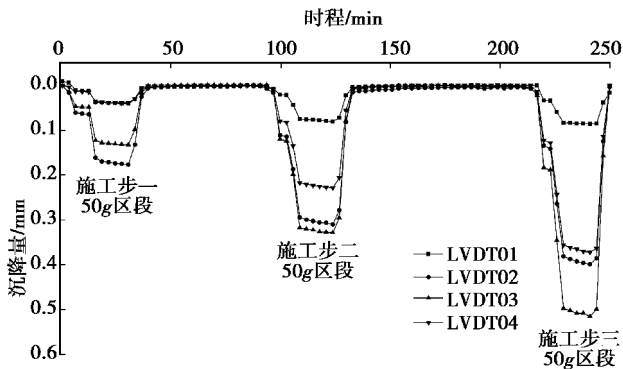


图8 地表沉降时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of surface settlement

经相似换算及整理分析后,可得到坑外地表沉降随开挖的曲线如图9所示。可以看出:①基坑墙后地表沉降形态为凹槽形曲线;②随着开挖的进行,地表最大沉降点不断向坑外移动,3个施工步的最大沉降点分别发生在距基坑边缘约 $0.98H$ 、 $1.26H$ 及 $0.93H$ 处(总体约 $1H$ , $H$ 为对应的开挖深度);③各施工步的地表最大沉降值分别为 $1.191D$ 、 $1.010D$ 、 $1.077D$ (总体约 $1.0D$ , $D$ 为对应施工步的墙体最大水平位移);④将曲线按直线延长,得到基坑开挖各施工步的影响区域分别约为 $3.35H$ 、 $3.31H$ 及 $2.62H$ (总体约 $3H$ )。

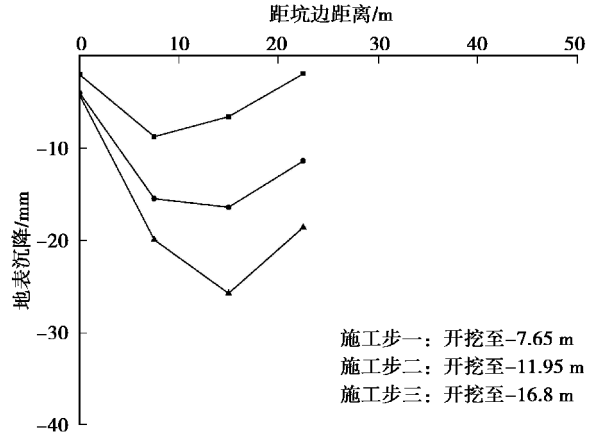


图9 地表沉降分布图

Fig. 7 Surface settlement distribution

## 5 结论

通过离心机试验对圆砾地层深基坑的工程特性进行了研究,通过试验数据整理分析,取得了如下几点结论:

(1)圆砾地层离心试验模型的制作采用相似级配法可取得较好的效果,相似比应使土颗粒满足粒径效应,并应采用现场取土筛选土样,以保证土体模型具有与原状土相近力学特性。

(2)圆砾地层深基坑围护墙体水平变形模式为墙体两端变形较小、近开挖面附近变形较大,随着开挖深度的增加,墙体最大水平位移发生的位置不断下移,墙体最大水平位移值为 $0.96\%H \sim 1.49\%H$ ( $H$ 为开挖深度)。

(3)圆砾地层深基坑围护墙体主、被动侧向土压力随深度不断增长,均呈三角形分布,土压力大小介于理论计算静止土压力与主被动土压力之间,决定于对应位置处墙体变形的大小。

(4)圆砾地层深基坑坑外地表沉降呈凹槽形曲线分布,随着开挖的进行,地表最大沉降点不断向坑外移动,最大沉降点发生在距坑边约 $1.0H$ 处,地表最大沉降值约 $1.0D$ ( $D$ 为对应施工步的墙体最大水平位移),开挖主要影响范围约 $3.0H$ 。

### 参考文献(References)

- [1] 胡琦,凌道盛,孔令刚,等.超深开挖对抗拔桩承载力影响的离心机试验研究[J].岩石力学与工程学报,2013,35(6):1076-1083. (Hu Qi, Ling Daosheng, Kong Linggang, et al. Effects of deep excavation on uplift capacity of piles by centrifuge tests [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 35(6): 1076-1083. (in Chinese))
- [2] 周健,杜强,李业勋,等.无黏性土滑坡型泥石流流形

- 成机理的离心机模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 2010-2017. (Zhou Jian, Duo Qiang, Li Yexun, et al. Centrifugal model tests on formation mechanism of landslide-type debris flows of cohesiveless soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(11): 2010-2017. (in Chinese))
- [3] 刘超, 宋飞, 张嘎, 等. 各向异性砂土主动土压力的离心模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增): 3201-3206. (Liu Chao, Song Fei, Zhang Ga, et al. Centrifuge model experimental study on active earth pressure of anisotropy sandy soils [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(Supp.): 3201-3206. (in Chinese))
- [4] 杨龙才, 王炳龙, 周顺华, 等. 基坑边坡变形和稳定性的离心试验研究[J]. 上海铁道大学学报, 2000, 21(10): 100-104. (Yang Longcai, Wang Binglong, Zhou Shunhua, et al. Centrifuge testing research on deformation and stability of excavation and side slope [J]. Journal of Shanghai Tiedao University, 2000, 21(10): 100-104. (in Chinese))
- [5] 张敏, 吴宏伟. 离心试验中的地下水模拟控制研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 355-360. (Zhang Min, Wu Hongwei. Groundwater control technique in centrifuge tests [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 355-360. (in Chinese))
- [6] Choudhury D, Shen R F, Leung C F. Centrifuge model study of pile group subject to adjacent excavation[A]//Geo Congress 2008[C]. 2008: 141-148.
- [7] Choudhury D, Shen R F, Leung C F, Centrifuge model study on pile responses due to adjacent excavation [A]//Foundation Analysis and Design: Innovative Methods(GSP 153) [C]. 2006: 145-151.
- [8] 陈兴年, 刘金元, 刘国彬, 等. 软土基坑开挖周围土体变形的离心模型研究[J]. 地下工程与隧道, 2000(1): 8-12. (Chen Xingnian, Liu Jinyuan, Liu Guobing, et al. Study on the deformation of surrounding rock in soft soil excavation by centrifugal model [J]. Underground Engineering and Tunnels, 2000(1): 8-12. (in Chinese))
- [9] 丁春林, 孟晓红. 承压水基坑离心模型试验与现场实测分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(1): 22-26. (Ding Chunlin, Meng Xiaohong. Centrifuge model test and field measurement analysis for foundation pit with confined water [J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition), 2008, 36(1): 22-26. (in Chinese))
- [10] Bryson L S, David G Z. Physical modeling of supported excavations [A]//Advances in Measurement and Modeling of Soil Behavior(GSP 173) [C]. 2007: 1-9.
- [11] Taylor R N. Geotechnical centrifuge technology [M]. London: London Blackie Academic & Professional, 1995.
- [12] Malushitsky Y N. The centrifuge model testing of waste-heap embankments [M]. London: Cambridge University Press, 1975.
- [13] 谢雄耀, 宁张伟, 周彪, 等. 内支撑基坑开挖对近间距下立交道路影响离心机试验[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1115-1123. (Xie Xiongyao, Ning Zhangwei, Zhou Biao, et al. Centrifuge modeling of effect of excavation on adjacent underpasses of deep foundation pits with shorings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1115-1123. (in Chinese))
- [14] 徐光明, 章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(3): 80-86. (Xu Guangming, Zhang Weimin. Study on particle size effect and boundary effect in centrifugal model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 80-86. (in Chinese))
- [15] Ovesen N K. The use of physical models in design; the scaling law relationships [A]//Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering [C]. Brighton, 1979: 318-323.
- [16] Craig W H. Simulation of foundation for offshore structures using centrifuge modeling [A]//Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering-Model Studies [C]. London: applied science publishers LTD, 1983: 1-27.
- [17] 柳飞, 郑西来, 杨俊杰, 等. 基础埋深对承载力离心模型试验中粒径效应的影响[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(10): 1621-1627. (Liu Fei, Zhen Xilai, Yang Junjie, et al. Influence of the depth of foundation on the particle size effect in the centrifuge test of bearing capacity [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(10): 1621-1627. (in Chinese))
- [18] 杨俊杰, 柳飞, 丰泽康男, 等. 砂土地基承载力离心模型试验中的粒径效应研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(4): 477-483. (Yang Junjie, Liu Fei, Toyosawa Y, et al. Particle size effects on bearing capacity of sandy ground in centrifugal tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(4): 477-483. (in Chinese))
- [19] 徐前卫, 马险峰, 朱合华, 等. 软土地基超深基坑开挖的离心模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 154-161. (Xu Qianwei, Ma Xianfeng, Zhu Hehua, et al. Centrifugal model test on extra deep foundation pit excavations in soft ground [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(12): 154-161. (in Chinese))