

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.04.014

# 砂卵石地层圆形深基坑支护结构土压力

张家国<sup>1a,2</sup>, 肖世国<sup>1a,1b</sup>, 邹力<sup>2</sup>, 吴兴序<sup>1a</sup>, 涂文博<sup>1a</sup>

(1. 西南交通大学 a. 土木工程学院; b. 地球科学与环境工程学院, 成都 610031;  
2. 成都市建工科学研究设计院, 成都 610051)

**摘要:**在以砂卵石地层为主的成都平原地区,近年来圆形深基坑工程逐渐出现,但一直无适宜的支护结构土压力的确定方法,对土压力分布特征尚不清楚。运用弹塑性数值模拟方法,充分考虑桩土变形协调关系,确定了成都地区砂卵石地层的圆形深基坑支护结构上土压力的分布规律,呈现出在围护桩中下部偏大的近似三角形分布模式,平均值小于 Rankine 主动土压力。开展了模型试验研究,针对试验模型,数值计算值与试验值分布规律整体上具有相似性,二者较为接近,说明了数值计算结果具有一定的合理性。

**关键词:**砂卵石地层;圆形深基坑;土压力;数值模拟;模型试验

**中图分类号:**TU470 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)04-0089-05

## Earth Pressure on Retaining Structure of Round Deep Foundation Pit in Sand-cobble Soils

Zhang Jianguo<sup>1a,2</sup>, Xiao Shiguo<sup>1a,1b</sup>, Zou Li<sup>2</sup>, Wu Xingxu<sup>1a</sup>, Tu Wenbo<sup>1a</sup>

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, P. R. China;  
2. Chengdu Construction Engineering Science Research and Design Institute, Chengdu 610051, P. R. China)

**Abstract:** In recent years, the round deep foundation pits engineering gradually appears in Chengdu Plain whose strata are mainly sand-cobble soils. However, there are no proper calculation methods of earth pressure in retaining structure like this and distribution mode of the pressure is unknown. With the use of elastoplastic numerical simulation method involved in interaction between retaining piles and soil, the distribution law of earth pressure of the round deep foundation pit retaining structure is determined. The result shows that distribution of earth pressure on a pile is triangular and the maximum lies in the location of pit bottom, but the average value of the pressure is less than Rankine active earth pressure. Model tests have also been carried out so as to verify the distribution mode. As for the test model, the values obtained by the numerical simulation method are approximately similar to the experimental results in the distribution law as a whole, which to some degree suggests the rationality of the numerical simulation results.

**Key words:** sand-cobble soils; round deep foundation pit; earth pressure; numerical simulation; model test

圆形深基坑因其内部空间大等突出优点而越来越多地出现在工程实践中,但目前的圆形深基坑工程大多集中在软土地区,且主要采用地下连续墙作为围护结构<sup>[1-2]</sup>。近几年来,伴随着经济的发展,以

收稿日期:2012-11-20

作者简介:张家国(1976-),男,高级工程师,博士生,主要从事深基坑工程与桩基工程研究,(E-mail)474139777@qq.com。  
肖世国(通信作者),男,副教授,博士(后),(E-mail)739624439@qq.com。

砂卵石地层为主的成都平原地区也逐渐出现了圆形深基坑工程。典型实例为目前中国西南地区最深的德阳二重厂热处理车间新增淬火炉装置深基坑工程,其开挖深度达到 37.4 m,采用钢筋混凝土排桩与钢腰梁构成的排桩框架支护结构,基坑直径约为 12 m。对于软土地区采用地下连续墙支护的圆形深基坑,已有许多学者研究了相关计算方法<sup>[3-12]</sup>,主要表现为基于平面弹性地基梁或三维弹性地基板的圆形地下连续墙算法,对相应实际工程问题的分析与解决提供了重要参考依据,但是对于砂卵石地层中采用排桩框架结构支护的圆形深基坑,因在地层条件、支护结构类型等方面与前者存在很大差异,决定了其不能简单套用前者的相关方法。同时,圆形基坑与普通的矩形基坑有很大的不同,圆形基坑属于典型的空间问题,且需要充分考虑基坑周围土体与支护结构之间存在变形协调关系<sup>[13-14]</sup>,而按普通的矩形基坑中选取典型地层剖面的平面应变问题求解方法,对圆形基坑并不适合。另外,根据中国《建筑基坑支护规程(JGJ120—2012)》及四川省地方标准《成都地区建筑深基坑工程安全技术规范(DB51/T5072—2011)》,对基坑围护结构的侧向位移限制均较高<sup>[15-16]</sup>。因而,对于砂卵石地层中的圆形深基坑排桩框架支护结构,在整个开挖支护过程中,支护结构产生的侧移不足以使其后侧土体达到极限平衡状态。实际上,围护桩后的土体是处于非极限状态的,对于在坑底以上作用于围护桩后的土压力,也不适合采用传统的 Rankine 主动土压力理论计算确定。有鉴于此,有必要针对砂卵石地层圆形深基坑排桩框架支护结构的具体实际情况进行研究,并充分考虑桩土变形协调关系,以合理确定实际作用于围护桩上的土压力及其分布规律。

## 1 分析模型

如图 1 所示的某排桩框架结构支护的圆形深基坑,基坑净内径为 12 m,坑深 33 m。围护桩直径 1.2 m,浇筑 C30 混凝土。桩顶设置冠梁,宽度为 1.2 m,高度为 0.8 m。内支撑采用环形箱梁,共设置 4 道,设置深度分别为 7、14、20、26 m,其中前 3 道支撑尺寸为 400 mm×300 mm×14 mm×14 mm(宽×高×壁厚×壁厚),后一道支撑尺寸为 600 mm×550 mm×16 mm×16 mm(宽×高×壁厚×壁厚)。排桩墙由 28 根排桩在平面上以 1.5 m 等间距排列,桩长 40 m,嵌固深度 7.0 m。基坑周围地层由上至下依次粉土(0~3 m)、中密卵石(3~18 m)、密实卵石(18~33 m)、泥岩(33 m 以下),各地层土

体的主要参数如表 1 所示。

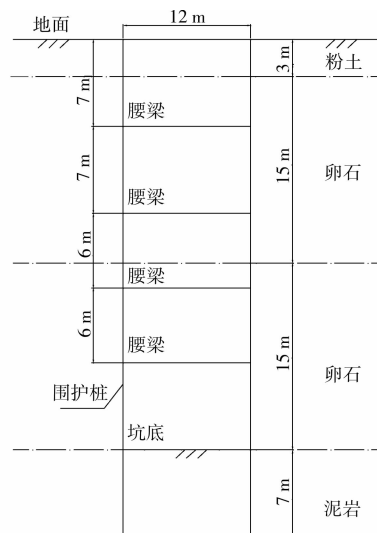


图 1 排桩框架结构支护的圆形深基坑

表 1 地层主要物理力学参数

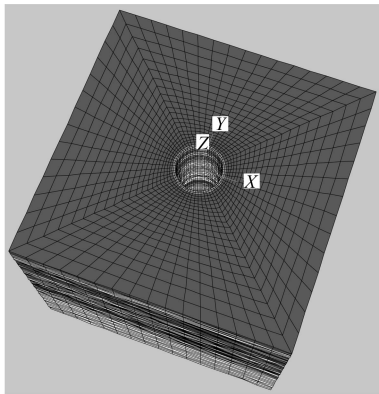
地层	重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	泊松比	弹性模量/ MPa
粉土	18.0	10	19	0.40	5
中密卵石	21.5	0	40	0.28	30
密实卵石	22.0	0	45	0.26	50
泥岩	22.0	150	45	0.25	300

采用 Flac3D 进行数值模拟,对地层采用理想弹塑性本构模型和 Mohr-Coulomb 强度准则,并采用非关联流动法则;对围护桩、冠梁、腰梁均采用线弹性模型模拟。模型左右两侧面距基坑中轴线距离为 5 倍坑径,采用水平位移约束;底端距坑底 0.5 倍桩长,采用水平与竖向双向位移约束。如此建立的数值分析模型如图 2 所示。

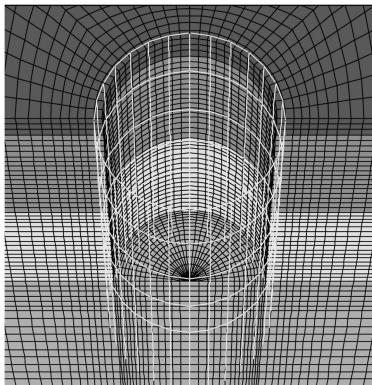
## 2 计算结果

取施作第 1~4 道腰梁后、开挖到坑底这 5 种典型工况的开挖底面以上桩侧土压力计算结果,如图 3 所示。

可见,桩后侧土压力均具有随深度逐渐增大的特征,在靠近开挖面附近土压力有急剧增大的特点,各工况下桩后土压力在某种程度上均可近似简化成三角形分布模式。同时,在开挖施工过程中,每道腰梁施工完成后,桩后土压力主要在上下两道腰梁之间有显著增大,在上一道腰梁以上的部分几乎没有变化。在开挖到坑底的工况也有类似特征。这说明各道腰梁起到良好的支撑作用,以致于后续的开挖施工对其上面的部分影响很小。



(a) 整体模型



(b) 开挖完成后剖面(附加支护)

图2 数值分析模型

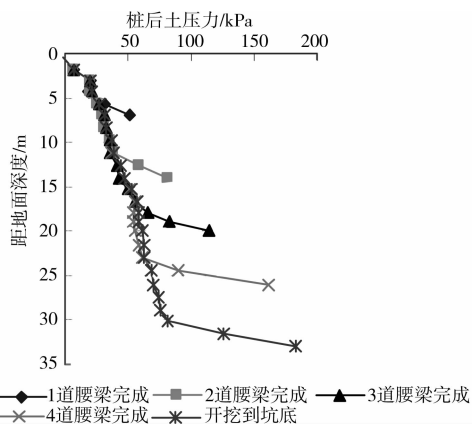


图3 典型工况下桩后侧土压力分布

### 3 模型试验验证

#### 3.1 模型尺寸

模型箱尺寸为 1.5 m×1.5 m×1.5 m,模型基坑内径(桩心距)为 46 cm,基坑净内径为 40 cm,坑深 110 cm。模型地层如图 4 所示。

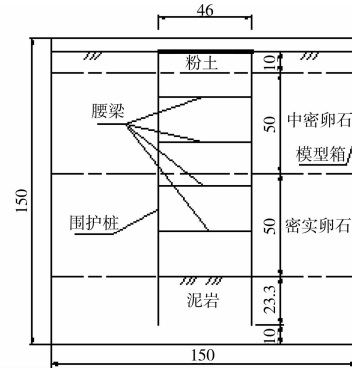


图4 试验模型地层

#### 3.2 材料模拟

3.2.1 各类地层 采用不同规格的石英砂、滑石粉、铁粉等材料配制成整体上满足要求的试验材料。通过正交配比试验,确定出模型材料参数如表 2 所示。

3.2.2 支护结构 桩采用直径约 4 cm 的塑料管,桩长 133.3 cm,桩心距约为 5 cm。冠梁采用 60 mm(宽)×30 mm(厚)×400 mm(内径)环形木板。腰梁采用直径约为 2 mm 的铁丝,试验共设 4 道腰梁,距地面深度分别为 23.3、46.7、66.7、86.7 cm 处。围护桩与冠梁模型见图 5 所示。



图5 试验模型中的冠梁与桩

表2 试验模型地层主要物理力学参数

模型地层	距地表深度/cm	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比	变形模量/MPa
粉土	0~10	18.0	0	19	0.40	0.5
中密卵石	10~60	21.5	0	40	0.28	1.0
密实卵石	60~110	22.0	0	45	0.26	2.0
泥岩	110~箱底	22.0	5	45	0.25	10.0

#### 3.3 测点布置

选取两桩对称布置土压力盒,以取其平均值消

除偶然误差。在坑底以上部分,桩外侧自地面向下 10 cm 后等间距(15 cm)布设 7 个土压力盒,通过应

变仪测量土压力。土压力盒的布置见图 6 所示。



图 6 土压力盒的布置位置

### 3.4 试验结果及分析

如图 7 所示的分步开挖施工过程中,坑底以上桩侧土压力分布图。可见,对于坑底以上部分,在加第 4 道腰梁之前的各工况下,桩侧土压力随着深度增加具有逐渐增大的特点,在施作第 4 道腰梁及其以后的工况下,桩侧土压力在基坑深度  $2/3$  以下位置沿深度逐渐有所减小,但幅度不大。在开挖深度较浅(约为坑深一半及其以上)的情况下,桩侧土压力沿深度几乎呈线性增长;但在开挖到  $3/5$  坑深以后,桩下部的增长幅度开始逐渐降低,桩侧土压力呈增幅递减的非线性增长分布。这可能是由于在开挖深度较浅时,基坑周围土体卸荷量相对较小,开挖深度范围内的坑周土体变形近似接近于弹性变化特征,土压力随深度呈线性增大,但当开挖深度较深时,基坑周围土体卸荷量相对较大,尤其在开挖底面附近,而上部土体因压应力较小仍呈现一定的弹性变形特征,但开挖底面附近土体因压应力较大则呈一定的塑性变形特征,因而沿着整个开挖深度桩侧土压力不再呈连续线性变化。同时,在第 4 道腰梁施作以前,同一位置的土压力随着开挖进行逐渐发生较为显著的变化,尤其是桩的中上部位置,这是由于桩的中上部变形相对较大,使得土压力得到一定程度的释放。在开挖到坑底时,坑底以上近坑底位置桩后土压力达到约  $2.0 \text{ kPa}$ 。

针对试验模型,根据前述的数值模拟方法可得,在开挖到坑底时刻,坑底以上部分桩侧土压力分布如图 8 所示。由同一图中所示的试验结果对比可见,本文模拟计算值与试验值分布规律整体上具有相似性,土压力整体上都随深度增加逐渐增大;采用本文方法计算的土压力值比试验值平均超出约  $20\%$ ,且在坑深  $2/3$  以下计算值与试验值差别较大,可能是由于数值模型的误差以及模型桩与土体参数的离散性和某些试验误差所致。另外,对比图 8 中的静止土压力和 Rankine 主动土压力结果还可看出,本文方法得到结果比 Rankine 主动土压力平均

约小  $30\%$ 。总体而言,本文计算结果与试验值较为接近,且与传统算法之间也具有较好的可比性,这些均说明了模拟计算结果具有一定的合理性,即图 3 所示的开挖施工过程中桩后土压力分布模式较符合实际。

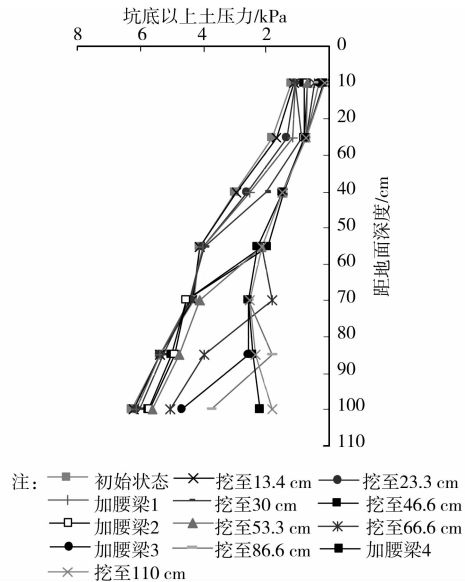


图 7 试验测得坑底以上桩侧土压力分布图

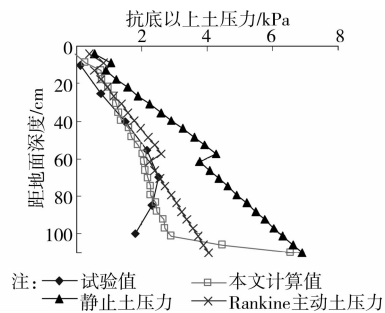


图 8 坑底以上桩侧土压力试验值与理论值对比

## 4 结论

圆形深基坑因其诸多优点逐渐应用于成都平原地区(以砂卵石地层为主),然而经典的朗肯土压力及库仑土压力理论并不适用于此类侧移较小的基坑支护结构分析。本文采用数值模拟和模型试验方法研究,主要得到如下结论:

1) 可以利用有限差分数值模拟的方法近似计算在开挖施工过程中圆形深基坑围护桩后的土压力,在开挖施工过程中,每道腰梁施工完成后,桩后土压力主要在上下两道腰梁之间有显著增大,在上一道腰梁以上的部分几乎没有变化,各道腰梁起到了良好的支撑作用。

2) 砂卵石地层圆形深基坑桩后土压力,总体表

现为随深度增加而逐渐增大的特征,在靠近开挖面附近土压力有急剧增大的特点,各工况下桩后土压力在某种程度上均可近似简化成三角形分布模式,土压力平均小于 Rankine 主动土压力,约为 Rankine 主动土压力的 70%。

#### 参考文献:

- [1] 边亦海, 黄宏伟, 张冬梅. 宝钢轧机旋流池深基坑的监测分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(Sup2): 491-495.  
Bian Y H, Huang H W, Zhang D M. Monitoring and analysis of deep excavation in whirlpool of Baogang rolling mill [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25 (Sup2): 491-495.
- [2] 贾坚, 谢小林, 翟杰群, 等. “上海中心”圆形基坑明挖顺作的安全稳定和控制[J]. 岩土工程学报, 2010, 32 (Sup1): 370-376.  
Jia J, Xie X L, Zhai J Q, et al. Safety and stability control of circular foundation pit of Shanghai Tower [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup1): 370-376.
- [3] 宋青君, 王卫东. 上海世博 500 kV 地下变电站圆形深基坑逆作法变形与受力特性实测分析[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(5): 181-187.  
Song Q J, Wang W D. Analysis of monitored displacement and stress of deep cylindrical structure for the 500 kV World Expo underground transmission and substation project during excavation by top-down method [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31 (5): 181-187.
- [4] 翁其平, 王卫东, 周建龙. 超深圆形基坑逆作法“两墙合一”地下连续墙设计[J]. 建筑结构学报, 2010, 31 (5): 188-194.  
Weng Q P, Wang W D, Zhou J L. Design of diaphragm wall of an ultra-deep cylindrical excavation constructed by top-down method [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(5): 188-194.
- [5] 王林, 谢亮, 杨文琦, 等. 软土地区深基坑圆筒支护结构三维数值分析模拟[J]. 建筑结构, 2011, 41(3): 88-91.  
Wang L, Xie L, Yang W Q, et al. Three-dimensional numerical analysis and simulation of circular deep excavation in soft ground region [J]. Building Structure, 2011, 41(3): 88-91.
- [6] 翟杰群, 谢小林, 贾坚. “上海中心”深大圆形基坑的设计计算方法研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(Sup1): 392-396.  
Zhai J Q, Xie X L, Jia J. Design method for large-deep circular foundation pit of Shanghai Tower [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(Sup1): 392-396.
- [7] 沈健, 王卫东, 翁其平. 圆形基坑地下连续墙分析方法研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(Sup): 280-285.  
Shen J, Wang W D, Weng Q P. Analytic method of diaphragm walls of circular foundation pits [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30 (Sup): 280-285.
- [8] Cheng Y M, Hu Y Y, Wei W B. General axisymmetric active earth pressure by method of characteristics-theory and numerical formulation [J]. International Journal of Geomechanics, ASCE, 2007, 7(1):1-15.
- [9] Cheng Y M, Hu Y Y. Active earth pressure on circular shaft lining obtained by simplified slip line solution with general tangential stress coefficient [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(1):110-115.
- [10] Liu F Q, Wang J H, Zhang L L. Discussion of “General axisymmetric active earth pressure by method of characteristics-theory and numerical formulation” [J]. International Journal of Geomechanics, 2008(8): 325-326.
- [11] Liu F Q, Wang J H, Zhang L L. Axi-symmetric active earth pressure by slip line method with tangential stress coefficient [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36 (2): 352-358.
- [12] Youssef M A, Hashash C M. Novel approach to integration of numerical modeling and field observations for deep excavations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2006, 132(8): 1019-1031.
- [13] Vaziri H H, Simpson B, Pappin J W, et al. Integrated forms of Mindlins equations [J]. Geotechnique, 1982, 32(3): 275-278.
- [14] Vaziri H H, Troughton V. An efficient three-dimensional soil-structure interaction model [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1992, 29:529-538.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [16] 四川省住房和城乡建设厅. DB51/T 5072—2011 成都地区基坑工程安全技术规范[S]. 2012.