

DOI: 10.11779/CJGE2019S1023

# 黏性土复合地基挡墙侧压力研究

李连祥<sup>1, 2</sup>, 黄佳佳<sup>1, 2</sup>, 季相凯<sup>1, 2</sup>

(1. 山东大学基坑与深基础工程技术研究中心, 山东 济南 250061; 2. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061)

**摘要:** 因技术进步和经济效益良好, 现有大量工程项目采用复合地基。复合地基因其桩土共同作用, 能有效减小地基变形和侧移。基于砂土复合地基侧向开挖离心试验和有限元分析模型获得的砂性土复合地基侧压力研究结果, 建立黏性土 ABAQUS 有限元分析模型, 分析附加荷载、黏聚力、内摩擦角和挡墙刚度对黏性土复合地基挡墙侧压力的影响, 得出其侧压力沿深度分布规律, 并与砂性土复合地基挡墙侧压力相比较。研究有助于支护结构有效设计, 控制复合地基及上部结构变形, 降低工程造价。

**关键词:** 黏性土; 侧压力; ABAQUS; 复合地基; 有限元分析

中图分类号: TU441.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2019)S1-0089-04

作者简介: 李连祥(1966—), 男, 博士, 研究员, 硕士生导师, 主要从事土力学及岩土工程的教学及科研工作。E-mail: jk\_doctor@163.com。

## Lateral pressures on retaining wall of composite foundation in clayey soils

LI Lian-xiang<sup>1, 2</sup>, HUANG Jia-jia<sup>1, 2</sup>, JI Xiang-kai<sup>1, 2</sup>

(1. Foundation Pit and Deep Foundation Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** Due to the technological progress and good economic benefits, a large number of existing projects have adopted composite foundation. Because of the combined effects of piles and soils, the composite foundation can effectively reduce the deformation and lateral displacement of foundation. Based on the studies on the side pressures of composite foundation in sandy soil obtained by the centrifugal tests and finite element analysis models for sandy composite foundation, the ABAQUS finite element analysis models for composite foundation in clayey soils are established to analyze the influences of the additional loads, cohesive forces, internal friction angles and stiffnesses of retaining wall on the lateral pressures on the retaining wall, and the distribution of the lateral pressures along depth is obtained. The research is helpful to the effective design of supporting structures, to control the deformation of composite foundation and superstructure, and to save the cost of engineering projects.

**Key words:** clayey soil; lateral pressure; ABAQUS; composite foundation; finite element analysis

## 0 引言

当新建基坑邻近既有复合地基建筑时, 临近既有复合地基基坑开挖, 地基侧移引起荷载转移, 复合地基桩产生附加弯矩和挠度, 影响既有建筑及复合地基安全; 同时, 邻近复合地基因土拱和遮拦效应的影响会减弱支护结构侧压力, 从而减少其弯矩和变形<sup>[1]</sup>。复合地基相邻基坑开挖, 坑外土体卸荷, 引起边桩外侧土体首先变形, 推动支护结构产生侧移, 其实际条件远不同于经典土压力理论的基本假设。群桩对其后土体存在土拱效应和遮拦作用且相互影响, 抑制和减缓地基变形, 提高群桩复合土体侧向变形刚度, 减弱复合地基对支护结构土压力<sup>[2]</sup>。国内现有基坑工程理论和相关规范未考虑邻近基坑复合地基群桩的有利影

响, 保守地进行此类基坑工程设计<sup>[3]</sup>。

本文基于离心机试验成果基础, 将砂性土复合地基 ABAQUS 侧压力计算方法<sup>[4]</sup>, 进一步延展至黏性土复合地基, 综合考虑上覆荷载、黏聚力、内摩擦角和挡墙刚度对支护结构侧压力的影响, 得到支护结构所受侧压力沿深度分布规律, 并比较分析砂性土复合地基和黏性土复合地基侧压力。

## 1 砂性土复合地基有限元分析与离心试验结果验证

复合地基侧向开挖离心试验, 试验目的、方法、

基金项目: 国家自然科学基金项目(51508310); 山东省优秀中青年科学家科研基金项目(BS2013SF024); 济南市科技计划项目(201201145)

收稿日期: 2019-04-29

手段详见文献[5]。砂性土有限元分析模型分加载区和无载区，二者之间为挡墙。模型尺寸与离心试验一致，长为34 m，宽为16 m，高为26 m，其中加载区长27.2 m，无载区长6.8 m。复合地基基桩长14 m，桩径800 mm，桩中心距4 m，挡墙高22 m，宽16 m，厚0.38 m；褥垫层厚0.4 m，与挡墙及无载区齐平。地基土为福建标准砂，物理力学参数详见文献[5]。有限元计算采用D-P本构模型，其中换算内摩擦角为42.0°，流应力比为1，屈服应力为20 MPa，杨氏模量为56 MPa，泊松比为0.2。复合地基基桩和挡墙采用601铝合金材料，线弹性本构模型，弹性模量68.9G MPa，泊松比0.33。有限元分析模型分析为8步，地应力平衡及7级荷载加载步，各级累计荷载大小如图1。模型接触类型采用Penalty罚函数，切向摩擦系数为0.25，法向硬接触。模型边界条件为四周法向约束，底面固定，顶面自由。

### (1) 桩轴力

图1为桩轴力的分析结果及有限元分析和试验的相互验证。桩轴力沿深度先增大后减小，在桩下部达到最大值，随荷载的增大而逐级增大，轴力增加量与荷载增加量大致相当，同样说明了复合地基桩处于弹性变化阶段。桩轴力的数值结果与试验结果的整体变化趋势和最大值一致。

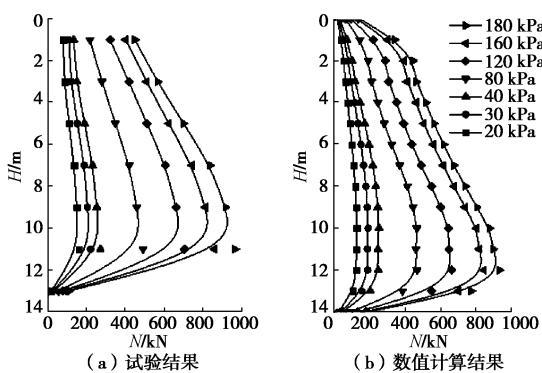


图1 桩轴力分析结果

Fig. 1 Comparison of results of axial forces of piles

### (2) 侧压力

图2为180 kPa时侧压力的有限元分析与试验对比。无论有限元分析结果还是数值结果，侧压力沿深度均大致呈线性增大，有限元分析结果的线性关系更加明显，侧压力随荷载的增大而逐级增大，二者的整体变化趋势大体一致，数值基本吻合。

从上述桩轴力和侧压力的有限元分析结果和试验结果对比分析可知，离心模型试验和ABAQUS有限元分析结果大体一致，证明了ABAQUS有限元分析模型的有效性、正确性和科学性。

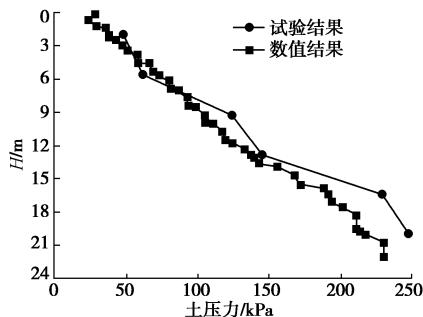


图2 180 kPa时侧压力分析结果对比

Fig. 2 Comparison of results of side pressure at 180 kPa

## 2 黏性土复合地基影响因素分析

### 2.1 附加荷载

基于砂性土有限元模型，改进黏性土ABAQUS有限元模型，采用莫尔-库仑本构模型，分析步为12步，地应力平衡及11级荷载加载步，其余不变。内摩擦角 $\varphi$ 为30°，黏聚力c为20 kPa，经ABAQUS有限元分析模型计算可得黏性土复合地基侧压力，如图3所示。

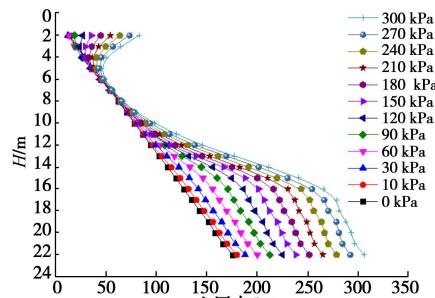


图3 黏性土复合地基侧压力

Fig. 3 Lateral pressures of composite foundation with load in clayey soils

当荷载较小时，黏性土复合地基侧压力沿深度方向基本上呈线性变化，与普通地基侧压力变化趋势一致。当荷载逐级增大，复合地基桩遮拦效应增强，其侧压力沿深度方向不再呈线性变化。荷载越大，侧压力非线性趋势越明显，复合地基桩遮拦效应越充分，表明复合地基的遮拦效应与上覆荷载大小密切相关。在地基中部，受复合地基遮拦效应影响最明显；在地基下部，未受到复合地基桩的影响，侧压力与普通黏土地基侧压力变化趋势一致。

设黏土复合地基侧压力为 $\sigma_{x2}$ ，相同条件下普通黏土地基侧压力为 $\sigma_{x1}=k_0(\gamma z+p_0)$ ， $k_0=0.95-\sin\varphi$ ，取二者差值 $\sigma_{\Delta x}=\sigma_{x1}-\sigma_{x2}$ 为遮拦效应值，计算结果如图4(a)。在复合地基桩影响深度内且遮拦效应显著时，遮拦效应沿深度先增大后减小，遮拦效应最大值所在深度随荷载增大而下移。与普通黏土地基相比，黏性土复合地基侧压力较普通黏性土地基侧压力最大可减小70%以上。取深度6 m处的遮拦效应值为参考点，可得遮拦效应与荷载关系，如图4(b)。在遮拦效应

最显著位置处, 遮拦效应与荷载呈良好的线性关系。

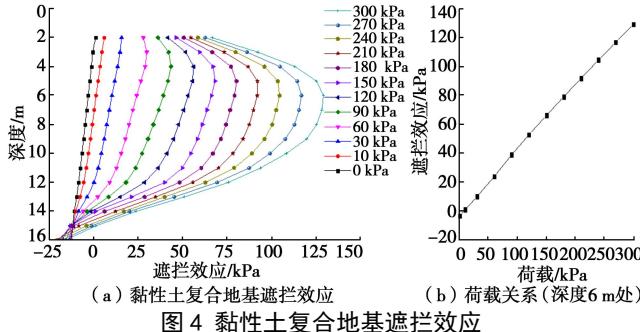


Fig. 4 Shielding effects of composite foundation in clayey soils

## 2.2 黏聚力

同样基于上述 Abaqus 计算模型, 取 10 组不同黏聚力  $c$  ( $5, 10, \dots, 50$  kPa), 内摩擦角  $\varphi$  取  $30^\circ$ , 其余条件不变。经计算可得黏性土复合地基侧压力在上覆荷载为 300 kPa 时随黏聚力变化关系 (图 5)。由图可知, 黏聚力  $c$  对黏性土复合地基侧压力影响较小, 相邻两组侧压力差值大约为  $k_0\Delta c$ , 且仅限于加固层深度内。在加固层深度内, 其侧压力随黏聚力的增大而减小, 这与经典侧压力理论结果一致 (朗肯土压力理论表明黏性土侧压力值等于无黏性土侧压力值减去侧压力系数与黏聚力的乘积); 在加固层深度以下, 黏聚力对其侧压力影响很小, 几乎可以忽略不计。

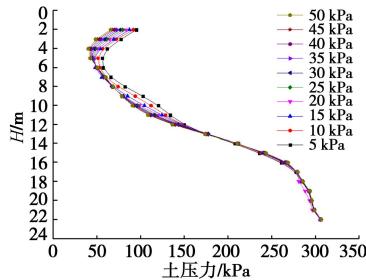


图 5 黏性土复合地基侧压力随黏聚力变化关系 (300 kPa)

Fig. 5 Variation of lateral pressures of composite foundation with cohesive force in clayey soils

## 2.3 内摩擦角

改变模型的内摩擦角  $\varphi$ , 参数条件, 黏聚力取 20 kPa, 其余不变, 经计算可得黏性土复合地基侧压力随内摩擦角  $\varphi$  变化关系 (图 6)。内摩擦角对黏性土复合地基侧压力影响较大, 且随荷载不同、土层深度不同, 其影响程度也不同。荷载较小时, 如荷载为 0 kPa (图 6 (a)), 黏性土复合地基侧压力沿深度呈线性变化; 且在中上部土层, 内摩擦角  $\varphi$  对侧压力大小几乎没有影响; 在下部土层, 侧压力随内摩擦角  $\varphi$  增大而减小并随后趋于稳定。当荷载较大时, 如荷载为 300 kPa (图 6 (b)), 黏性土复合地基侧压力沿深度不再呈线性变化, 在加固层上部有一小段呈减小趋势, 因为荷载较大时, 复合地基遮拦效应发挥明显, 在加固层以下, 因未受到遮拦效应影响, 黏性土复合地基侧压力

再次呈线性变化。同时, 内摩擦角越大, 其侧压力越小, 且当内摩擦角较小时, 相同深度处的侧压力随内摩擦角近似线性减小, 当内摩擦角较大时, 侧压力趋于稳定, 不随内摩擦角变化。

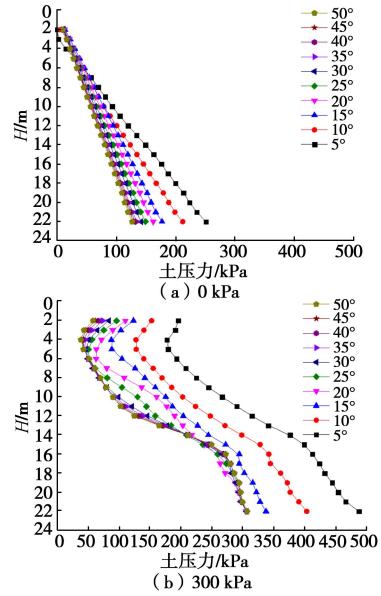


图 6 黏性土复合地基侧压力随内摩擦角变化关系

Fig. 6 Variation of lateral pressures of composite foundation with internal friction angle in clayey soils

## 2.4 挡墙刚度

同样基于上述 ABAQUS 计算模型, 取不同挡墙刚度参数, 内摩擦角  $\varphi$  取  $30^\circ$ , 黏聚力  $c$  取 20 kPa, 不限定挡墙侧移, 经计算可得黏性土复合地基侧压力随挡墙刚度变化关系 (图 7)。

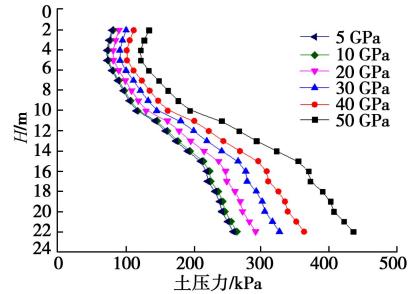


图 7 黏性土复合地基侧压力随挡墙刚度变化关系

Fig. 7 Variation of lateral pressures of composite foundation with stiffness of retaining wall in clayey soils

由图 7 可知, 非侧限条件下挡墙刚度对黏性土复合地基侧压力影响较大。不同荷载下侧压力沿深度分布大致一致, 上部受遮拦效应增加速率小, 下部增加速率大, 与上述所得结论一致。挡墙刚度对侧压力的影响主要通过土体侧向位移来体现, 当挡墙刚度较小时, 地基在附加荷载作用下侧向位移大, 土体应力释放充分, 从而挡墙侧压力较小, 反之, 侧压力较大。当挡墙刚度较小时, 挡墙刚度增大对侧压力影响较小,

因为挡墙刚度减小到一定程度后，土体因位移过大达到极限平衡状态。

### 3 讨 论

由文献[4]，基于砂性土复合地基挡墙侧压力分布规律研究结果可得黏性土复合地基挡墙侧压力分布规律。砂性土砂土、黏性土与一般土的侧压力曲线如图 8 所示，其中黏性土侧压力曲线沿深度分为四段线，在加固层中点处，侧压力因遮拦效应减小至静止侧压力水平处，各阶段侧压力系数如图 8，并可由下述公式得出。一般土根据砂土和黏性土( $c$  为 50 kPa)得出，介于砂土和  $c$  为 50 kPa 的黏性土之间，其依据为黏聚力，如公式(2)所示，一般土的平均黏聚力可由公式(3)得出。

$$K'_1 = \frac{K_3(0.5\gamma h_1 - p + c)}{0.5h_1}$$

$$K'_2 = \frac{K_2(0.75\gamma h_1 + p) - K_3c - K_3\gamma h_1}{0.25h_1} \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{一般土}} = \sigma_{\text{砂土}}(h) \frac{50 - \bar{c}}{50} + \sigma_{\text{黏性土}}(h) \frac{\bar{c}}{50} \quad (2)$$

$$\bar{c} = \sum_{i=1}^n \alpha_i c_i \quad (3)$$

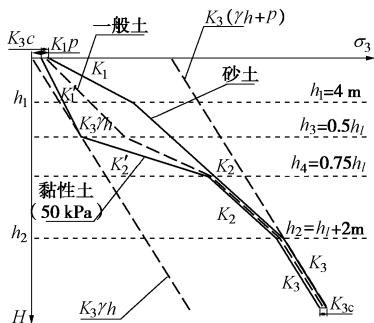


图 8 复合地基侧压力变化规律

Fig. 8 Variation of lateral pressures of composite foundation in sandy soils and clayey soils

与砂性土复合地基相比<sup>[4]</sup>(如图 9)，黏性土复合地基侧压力沿深度变化趋势大致相当，如荷载大小均能对复合地基遮拦效应发挥程度产生较大影响。同时，黏性土复合地基因黏聚力的存在而呈现一些不同的变化趋势，加固层段的遮拦效应相较于砂性土更大更明显，表明黏性土更有利与复合地基遮拦效应的发挥，同等条件下，其侧压力也比砂土复合地基略小。实际工程中黏性土地基远比砂土地基更常见，当开挖深度较浅且在加固层内时，黏性土复合地基的支护结构设计相对于砂土处于更有利的状态，可更进一步减小其经济造价；当深度大于加固层深度时，支护底端黏性

土和砂土的复合地基侧压力相差甚小，可忽略二者之间的差异。

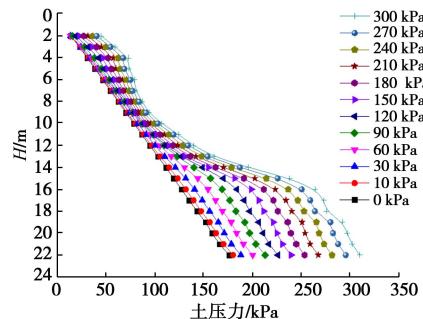


图 9 砂性土复合地基侧压力随荷载变化规律<sup>[5]</sup>

Fig. 9 Lateral pressures of composite foundation with load in sandy soils

### 参 考 文 献：

- [1] 刘燕, 聂淑敏, 刘涛. 既有地下结构对基坑位移的遮拦效应研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 400–403. (LIU Yan, NIE Shu-min, LIU Tao. Sheltering effect of existing subsurface structures on displacement of retaining wall of foundation pits[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(S2): 400–403. (in Chinese))
- [2] 张陈蓉, 黄茂松. 基坑开挖引起的邻近建筑物桩基变形受力响应[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增刊): 565–570. (ZHANG Chen-rong, HUANG Mao-song. Behavior of pile foundation due to excavation-induced lateral soil movement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S0): 565–570. (in Chinese))
- [3] JGJ120—2012 建筑基坑支护技术规程[S]. 2012. (JGJ120—2012 Technical Specification for Retaining and Protection for Building Foundation Excavations[S]. 2012. (in Chinese))
- [4] 黄佳佳. 既有复合地基形成机制与支护开挖力学性状研究[D]. 济南: 山东大学, 2018. (HUANG Jia-jia. Study on formation mechanism and mechanical properties of existing composite foundation with adjacent excavation[D]. Jinan: Shandong University, 2018. (in Chinese))
- [5] 李连祥, 符庆宏, 张永磊, 等. 基坑离心模型试验开挖方法研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(4): 856–864. (LI Lian-xiang, FU Qing-hong, ZHANG Yong-lei, et al. Research and application of a new excavation method in centrifuge model test on foundation pit engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(4): 856–864. (in Chinese))