

基坑开挖对既有复合地基单桩的位移性状影响分析

李连祥^{1,2}, 陈天宇^{1,2}, 白璐^{1,2}, 季相凯^{1,2}, 黄亨利^{1,2}

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

摘要: 在无载复合地基侧向开挖离心机试验基础上建立了数值模拟模型, 基于 Winkler 地基模型, 根据桩土的位移变形协调方程, 采用两阶段法求解复合地基单桩的水平位移, 并与数值模拟结果进行对比。在数值模拟基础上, 改变复合地基的置换率, 得到了不同置换率以及不同开挖深度下的单桩的水平位移, 模拟并对比了在复合地基至支护结构不同距离情况下的土体最大水平位移, 研究表明: ①将复合地基视为均质土体, 通过二阶段法求解复合地基单桩位移的方法可行; ②当复合地基桩间距大于 4 倍单桩桩径时, 复合地基对于单桩的水平位移影响较小。在设计支护结构时, 当基坑深度小于 5 m 时, 可以忽略复合地基与土体间的相互影响, 深度大于 5 m 时, 应充分考虑复合地基的影响; ③当复合地基距离支护结构的距离在基坑开挖深度的 0.8 倍以内时, 其对土体的侧向加固作用才有较好效果。

关键词: 复合地基; 单桩水平位移; 二阶段法; Winkler 模型; 置换率

中图分类号: TU441

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)04-0486-07

Analysis of horizontal displacement of single-pile of existing composite foundation subjected to pit-excavation

LI Lianxiang^{1,2}, CHEN Tianyu^{1,2}, BAI Lu^{1,2}, JI Xiangkai^{1,2}, HUANG Hengli^{1,2}

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Foundation Pit and Deep Foundation Engineering Research Center,
Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Based on the lateral excavation of unloaded composite foundation centrifuge test, a numerical simulation model is established. Based on Winkler foundation model, the two-stage method is used to calculate the horizontal displacement of single pile based on the displacement-deformation coordination equation of pile-soil, and compared with the numerical simulation results. Based on numerical simulation, by changing the displacement of composite foundation, different displacements and horizontal displacements of single pile under different excavation depths were obtained. The horizontal displacement is calculated under different distances from composite foundation to the retaining wall. The results can be concluded as follows: ①The applicability of regarding composite foundation as a homogeneous soil to solve the horizontal displacement of Single Pile is proved. ②When the distance between piles is greater than 4 times of single pile diameter, the horizontal displacement of composite foundation has little effect on the horizontal displacement of pile; when the depth of the foundation pit is less than 5m, the interaction between the composite foundation and the soil can be neglected; and when the depth is more than 5m, the influence of the composite foundation should be taken into full consideration. ③When the distance of the composite foundation from the supporting structure is within 0.8 times of the excavation depth of the foundation pit, it has a better effect on the lateral reinforcement of the soil.

Key words: composite foundation; horizontal displacement of single-pile; two-stage method; Winkler's model; replacement rate

在城市建设的过程中, 存在着在既有复合地基旁开挖基坑的问题, 在设计基坑支护结构时, 最重要的是控制支护结构变形, 由于复合地基与土体相互作用, 使得主动区土体的水平位移减小, 从而导致支护结构实际受土压力要小于无复合地

基时的土压力。而现有的标准及规范并没有考虑主动区为复合地基的情况。

要研究土体的水平位移与复合地基相互作用下的特性, 首先要考虑的是复合地基内部 CFG 单桩的变形, 实质是求解被动桩的问题, 目前土压

方法、有限元法、土位移法在研究被动桩上有比较多的应用, 尤其是土位移法。土位移法通常采用的两阶段分析方法, 其中黄茂松等^[1-2]采用基于 Winkler 地基模型的两阶段简化分析方法分析了隧道施工对临近群桩的沉降影响。梁发云等^[3-4]则基于 Winkler 地基模型分析了土体水平位移作用下的单桩性状。以上考虑的都是单桩, 或者两根桩在土体初始位移下的变化规律, 而在复合地基这种多桩的情况下, 要研究土体水平位移下复合地基每根桩的特性未免过于复杂。

基坑开挖对邻近群桩的影响研究, Leung 等^[5-8]通过多组对比试验, 研究了采用稳定和非稳定支护结构基坑开挖对邻近单桩、群桩的影响。

虽然结合了济南大剧院的工程实际, 在考虑复合地基对土体侧向加固作用, 采用离心机试验模拟无载复合地基下基坑土体开挖过程^[10-13], 认为既有复合地基对土体的侧向加固作用明显, 但只是描述了试验现象, 没有进一步揭示复合地基与土体相互作用下的位移特性。

本文在离心机试验模型的基础上建立了基于 PLAXIS 的分析模型, 并提出了一种方法, 将复合地基视为均质土体, 研究无载复合地基中的单桩的位移。并以数值模型为基础, 分析了复合地基置换率、复合地基至支护结构的距离、土体开挖深度对土体水平位移的影响。

1 模型试验

1.1 工程背景

山东济南市文化艺术中心(大剧院)基础采用 CFG 桩复合地基基础及筏板基础, 其舞台台仓处于 CFG 复合地基包围之中, 其中 CFG 桩桩径 400 mm, 桩间距 2 m, 如图 1 所示。台仓顶部高低错落, 呈不规则 T 型。基坑四周侧壁分别高为 12.9 m, 10.55 m, 7.6 m。如图 2 所示。

在进行台仓支护结构设计时, 由于周边的 CFG 桩已施工完毕, 考虑到 CFG 群桩对原状土的侧向加固作用, 经过多方论证后, 将三排锚索减少至一排。

1.2 模型试验与数值模拟分析

1.2.1 模型试验

考虑试验的可行性等, 对这一复杂工程进行多方面简化, 考虑到在实际施工中, 大剧院侧向开挖时, 复合地基上部结构还未开始施工, 可作为无载复合地基侧向开挖处理, 最后确定了简化后的模型试验方案, 如图 4 是建立的试验模型示意图。

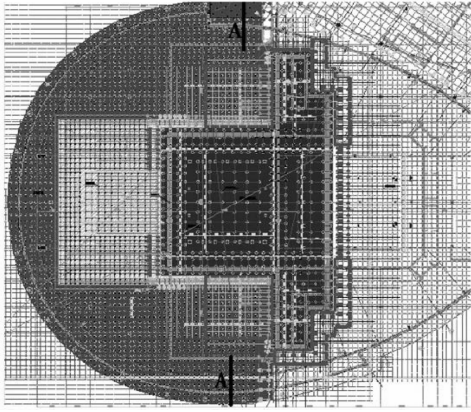


图 1 台仓平面位置图

Fig. 1 Plan of stage-bin

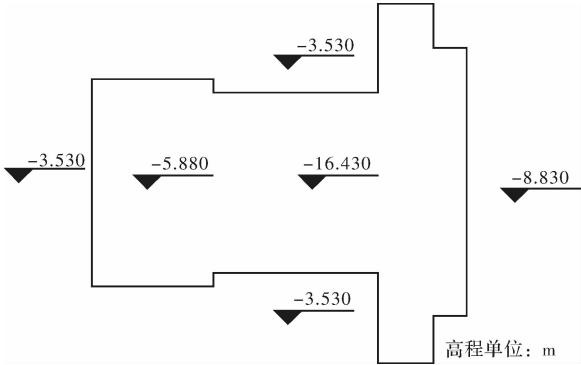


图 2 台仓顶面标高图

Fig. 2 Elevation of top and bottom of stage-bin

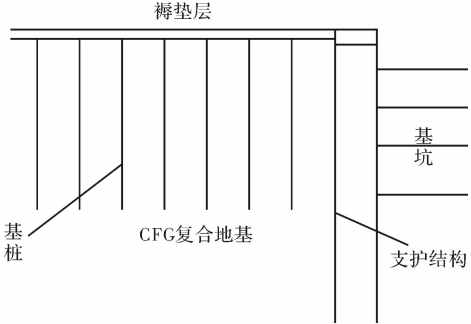


图 3 双排桩与 CFG 桩关系示意图

Fig. 3 Double-row pile and CFG composite foundation

试验模型地基土材料采用福建标准砂, 土体参数如表 1。

表 1 福建砂物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of Fujian sand (F. S.)

项目	取值	项目	取值
D_r	85%	天然孔隙比	0.663
干密度/ $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	15.9	e_{\min}	0.611 7
粘聚力/ kPa	0	e_{\max}	0.957
平均粒径/ mm	0.17	内摩擦角/ $^\circ$	33

离心模型试验拟采用铝合金 6 061 板模拟基坑支护桩。为保持面积置换率不变, 模型桩中心距

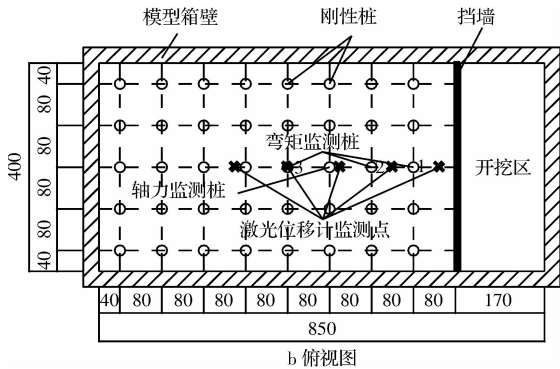
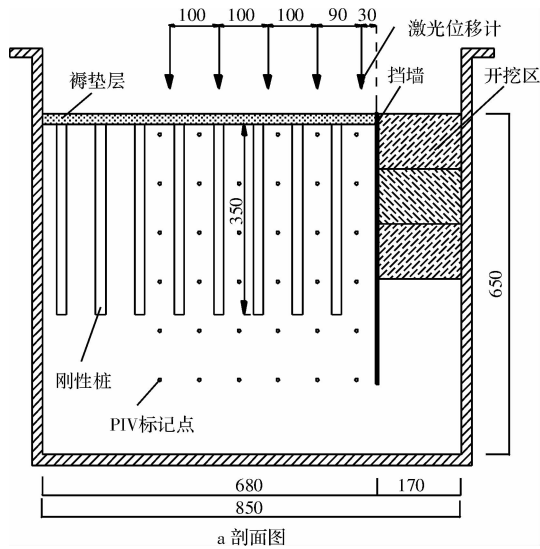


图 4 模型试验示意图(单位: mm)

Fig. 4 Foundation model (Unit: mm)

为 80 mm, 模型桩的尺寸及桩间距如表 2.

表 2 模型挡墙和桩相关参数

Tab. 2 Relevant parameters of simulated supporting structure and piles

项目	参数
置换率	0.049 1
桩中心距	80 mm
桩尺寸/mm	20×0.5×350/外径×壁厚×桩长
挡墙尺寸/mm	550×400×9.5/高度×宽度×厚度

1.2.2 数值模拟

数值模拟软件采用 PLAXIS 3D, 尺寸参数选择与实际情况相符, 其中 CFG 桩采用实体线弹性模型, 桩径 0.8 m, 桩间距为 3.2 m, 换算置换率为 0.049 1, 桩与土界面影响参数 $R_{inter} = 0.28$, 支护结构挡墙厚度取 0.6 m, 模拟的工况分别对应模型试验的三步开挖工况. 单元整体划分如图 5 所示:

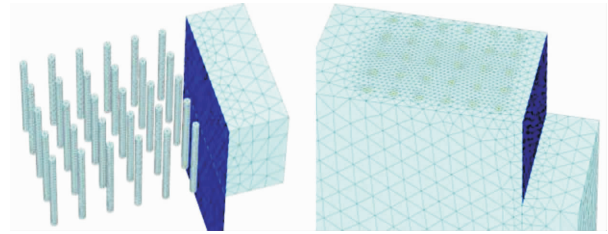


图 5 单元网格划分

Fig. 5 Cell meshing

1.2.3 模型试验与数值模拟结果比较

模型试验将开挖区由上至下分成 3 部分, 分别对应开挖工况一、二、三, 由于工况一开挖深度太浅, 土体水平位移过小, 这里仅比较工况二、三中模型试验与数值模拟的挡墙的水平位移. 如图 6 所示:

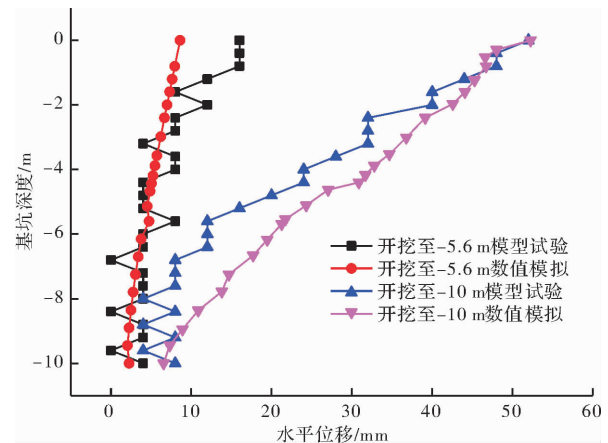


图 6 模型试验与数值模拟挡墙水平位移对比

Fig. 6 Comparison of horizontal displacement between model test and numerical simulation

可以看出 PLAXIS 模拟的挡墙的位移结构较好地符合离心机试验结果. 可以用 PLAXIS 的位移结果进一步来分析复合地基桩的水平位移特性.

2 被动单桩的分析方法

2.1 水平位移控制方程

梁发云等^[3-4]基于 Winkler 地基模型, 将单桩视为弹性地基梁, 并根据挠曲线方程得到:

$$\frac{d^4 U(z)}{dz^4} + 4\lambda^4 [U(z) - h_s(z)] = 0 \quad (1)$$

式中: $U(z)$ 为桩最终的水平位移; $h_s(z)$ 为土体的初始位移.

其中, $\lambda = \sqrt[4]{\frac{k_z}{4E_p I_p}}$ 被称为柔度系数. $E_p I_p$ 为单桩的刚度, K_z 为基床反力模量.

在单一土层中, Vesic^[9]提出的一种方法将其与土体参数、泊松比联系起来.

$$k_z = \frac{0.65E_0}{1-\nu^2} \sqrt{\frac{d^4 E_0}{E_p I_p}} \quad (2)$$

其中, E_0 为土体的变形模量, d 为单桩的直径。

本文将复合地基视为均质土体, 复合地基的变形模量 E_1 可以根据原土体的变形模量 E_0 、单桩的桩体变形模量 E_p 以及复合地基的置换率 m 求出。

$$E_1 = (1-m)E_0 + mE_p \quad (3)$$

此时, 复合地基的基床反力模量:

$$k_z = \frac{0.65E_1}{1-\nu^2} \sqrt{\frac{d^4 E_1}{E_p I_p}} \quad (4)$$

受到单桩位移边界条件的限制, 即便是处于均质土体中, 该微分方程的解析解仍然有未知常量无法确认。

2.2 试验结果验证

砂土的弹性模量 $E_0 = 43 \text{ MPa}$, 泊松比 $\nu = 0.33$, 复合地基 CFG 桩按 C20 的弹性模量取值, 即 $E_p = 2.55 \times 10^4 \text{ MPa}$, 试验的置换率 $m = 0.049$ 。桩身刚度 $E_p I_p$ 为 $5.1245 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ 。由 $E_1 = (1-m)E_0 + mE_p$, 得: $E_1 = 1293 \text{ MPa}$, 复合地基基床反力模量 $K_z = 9.4575 \times 10^5 \text{ kN/m}^2$, 由于单桩处复合地基的初始位移场 $h_s(z)$ 可由试验所测数据的曲线模拟出来, 如图 7(a)所示, 则(1)式可以化为

$$\frac{d^4 U(z)}{dz^4} + 1.845 \times 10^{-4} [U(z) - (4.536 \times 10^{-3} - 5.22 \times 10^{-3} \times Z + 1.5 \times 10^{-4} \times Z^2)] = 0 \quad (5)$$

基于 Matlab 中的四阶龙格库塔法可以模拟出该方程解的曲线。边界条件中, 将位于基坑底部深度处的桩的水平位移设为土体的初始水平位移, 以同样的方法可求得第二排桩的水平位移, 结果如图 7。

从图中可以看出, 本文方法所得的单桩的水平位移要略小于数值模拟结果, 但总体上吻合较

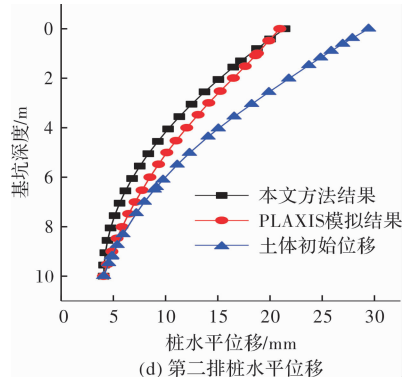
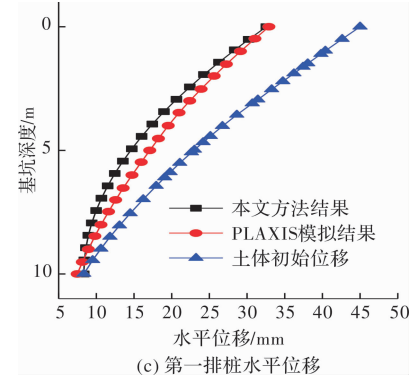
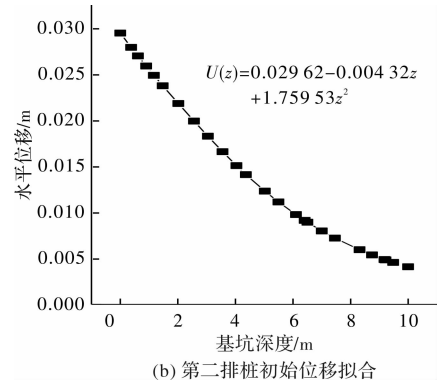
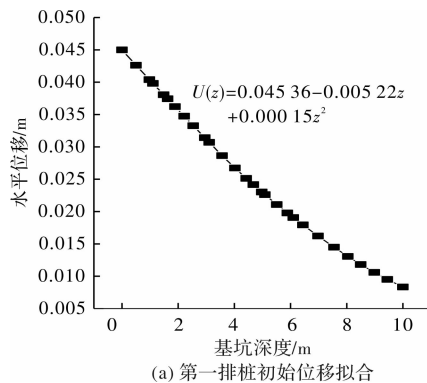


图7 单桩水平位移结果比较

Fig. 7 Comparison of single-pile horizontal displacements

好。表明了复合地基分布均匀的前提下, 将复合地基土体视为均质土体, 得到均质土体的复合模量, 并以此求得复合地基单桩水平位移方法的适用性。

3 复合地基置换率对桩位移影响分析

置换率是影响复合地基性状的一个重要因素, 通过本文方法, 改变复合地基置换率, 也就是改变复合地基桩间距, 进而得到不同的基床反力模量, 在初始位移场相同的前提下, 比较不同置换率下复合地基桩的水平位移, 考虑到初始位移场如果过小, 单桩的水平位移不易区分, 故单独考虑第一排桩的上部分桩的水平位移如图 8 所示。

可以看出在桩间距变大时, 单桩水平位移也逐渐变大, 但变大趋势逐渐减小, 在不同置换率下, 比较桩顶水平位移的最大值, 如图 9。

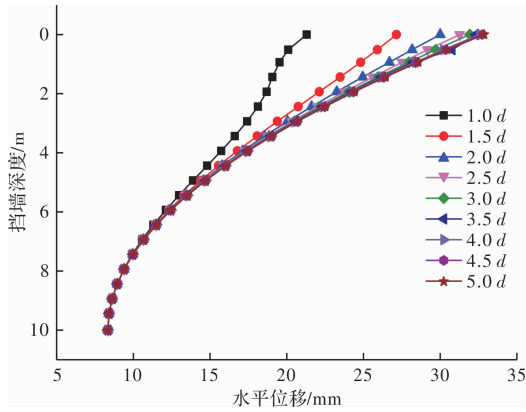


图8 不同置换率下桩上部水平位移

Fig. 8 Horizontal displacement of pile at different replacement rates

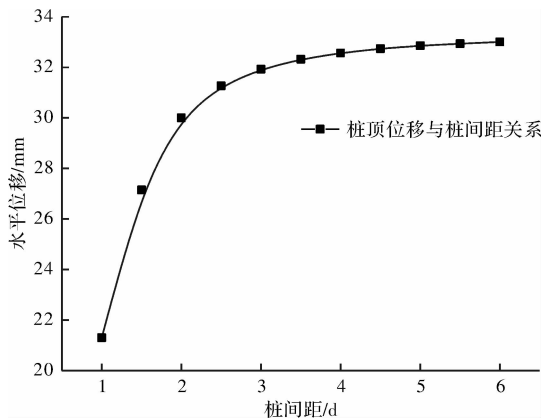


图9 不同置换率下桩顶最大水平位移比较

Fig. 9 Maximum displacement of pile under different replacement rates

从图中可以看出当桩间距在 $1 \sim 4d$ 之间时, 桩顶水平位移的变化趋势最为明显, 且随桩间距增大逐渐变小, 变化幅度约为 30%, 此时复合地基群桩整体对于单桩的水平位移有较大影响且逐渐减弱, 当桩间距大于 $4d$ 时, 桩顶的最大水平位移变化趋势已不再明显, 群桩对于单桩的影响可不计。

4 基坑开挖深度与复合地基桩位移

随着基坑开挖, 土体的位移会逐渐增大, 也就表示土体的初始位移场在不断变化, 在桩间距为 $4d$ 条件下, 随着开挖深度的变化, 土体的初始位移场改变, 导致单桩的水平位移变化, 如下图:

由于复合地基的影响导致的第一排桩位置处的土体的位移减小量, 以及前后土体的最大位移差如图 11、12 所示:

可以看出在开挖深度小于 5.0 m 时, 单桩的前后位移变化很小, 在开挖深度大于 5.0 m , 存在复合地基时, 土体的前后位移差随开挖深度不断

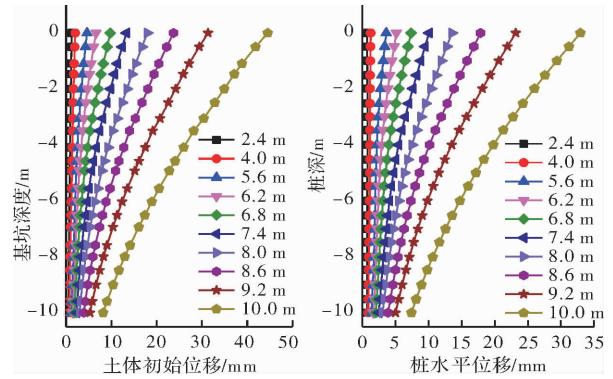


图10 不同开挖深度下的单桩水平位移

Fig. 10 Horizontal displacement of single pile under different excavation depth

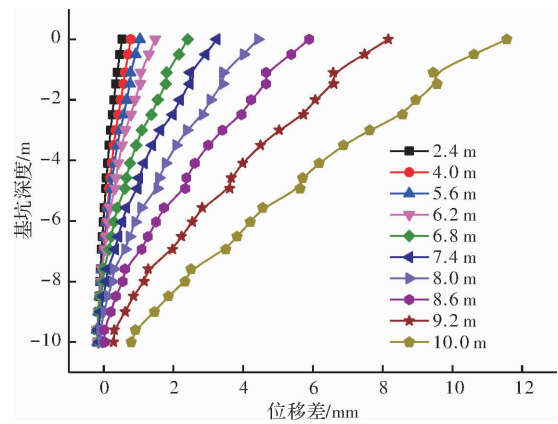


图11 有无复合地基下桩位置处土体的位移差

Fig. 11 The displacement difference of the soil at the position of the pile

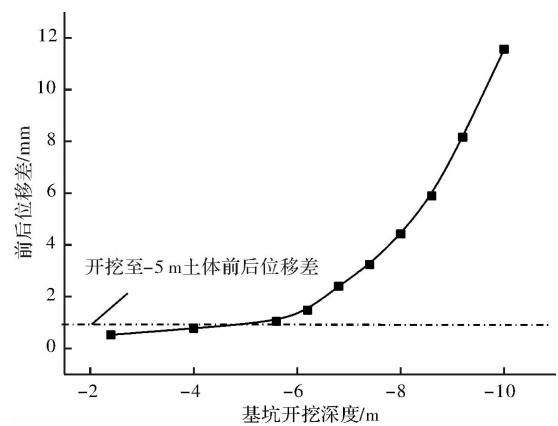


图12 土体的最大位移差与开挖深度关系

Fig. 12 Relationship between maximum displacement of soil and depth of excavation

增大, 复合地基在初始土体位移场越大的情况下发挥的效果越好。在土体最大初始位移在 10 mm 以下时, 复合地基受土体位移影响可忽略不计, 在现有的支护结构设计位移控制的方法中, 通常将支护结构的最大位移控制在 $1.0 \sim 2.0\%$, 当基坑深度小于 5 m 时, 土体的最大位移不超过 10 mm , 可忽略复合地基与土体间的相互影响, 而

当开挖深度大于 5 m 时,土体的初始位移场增大,复合地基受土体的水平位移影响效果明显

5 复合地基至支护结构距离对挡墙位移的影响

在保持原有参数不变的情况下,改变复合地基整体至支护结构的水平距离,在取不同距离的情况下模拟土体侧向开挖,挡墙的水平位移以及最大水平位移对比如图 13~14:

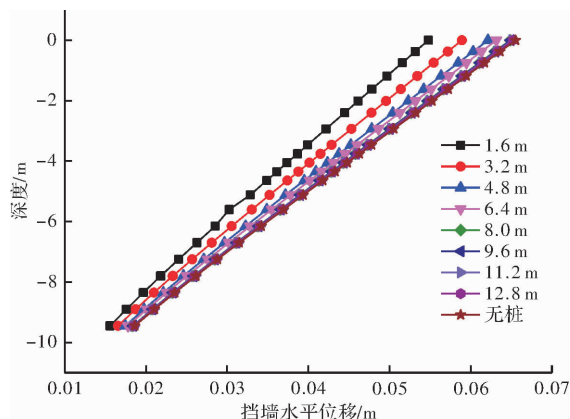


图 13 复合地基至挡墙不同距离挡墙水平位移

Fig. 13 Horizontal displacement at different distances from composite foundation to the retaining wall

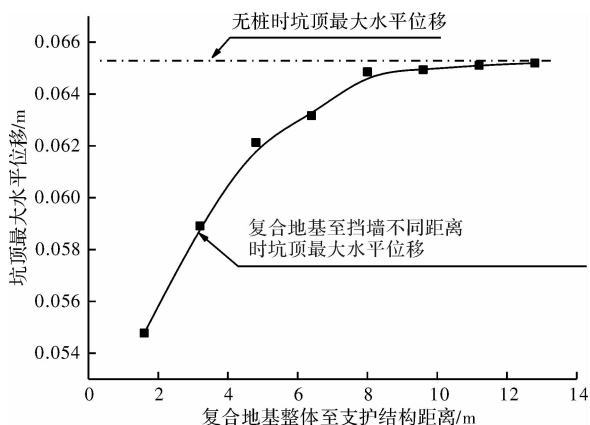


图 14 复合地基至挡墙不同距离挡墙最大水平位移比较

Fig. 14 Comparison of the maximum horizontal displacement at different distances from composite foundation to the retaining wall

从图中可以看出,在复合地基桩间距取桩径 4 倍的前提下,当复合地基距离支护结构挡墙越近,坑顶的水平位移越小,随着此距离的增大,坑顶的最大水平位移虽不断增加,但是增长趋势却逐渐趋于平缓,在 8 m 处已经接近无复合地基时的最大水平位移。表明复合地基对于土体的侧向加固作用只有当复合地基至支护结构的距离处于 0.8 倍基坑开挖深度范围以内时,才能有比较好的土体侧向加固作用。当此距离超过基坑开挖深度后,

不用再考虑复合地基对于基坑侧向开挖土体的加固作用。

6 结论

本文将复合地基视为均质土体,结合土体位移分析法,比较分析本文计算的单桩水平位移与离心机试验所得数据,并在此基础上,改变置换率,进一步分析了单桩桩顶的水平位移与置换率的关系。结果表明:

(1)将复合地基视为均质土体,通过两阶段分析方法结合 Winkler 地基计算模型得到的复合地基在土体初始位移场作用下的单桩水平位移方法是可行的;

(2)当复合地基的桩间距大于 $4d$ 时,复合地基整体对于单桩的水平位移影响较小;桩间距在 $1\sim 4d$ 之间时,复合地基群桩对单桩的水平位移影响随桩间距的减小而增大,单桩水平位移变化幅度约 30%。在基坑开挖深度低于 5 m 时,复合地基对土体位移影响较小,在设计基坑支护结构时,可忽略复合地基与土体间的相互影响,复合地基对于基坑侧向土体的加固作用仅当复合地基至支护结构的距离在 0.8 倍基坑开挖深度以内时,才有较好的效果;

(3)将复合地基视为均质土体只适用于复合地基均匀分布在支护结构一侧,且本文所得到的结论均基于基坑侧向悬臂开挖,在实际中悬臂支护结构应用较少,对于其他支护结构的形式,还需进一步研究。

参考文献 References

- [1] 李早,黄茂松. 隧道开挖对群桩竖向位移和内力影响分析[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(3): 398-402.
LI Zao, HUANG Maosong. Analysis of settlement and internal forces of group pile due to tunneling[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29 (3): 398-402.
- [2] 黄茂松,李早,杨超. 隧道开挖条件下被动群桩遮拦效应分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(6): 69-74.
HUANG Maosong, LI Zao, Yang Chao. Analysis of the shielding effect of a pile group adjacent to tunneling [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40 (6): 69-74.
- [3] 梁发云,韩杰,李静培. 基坑开挖引起的土体水平位移对单桩性状影响分析[J]. 岩土工程学报, 2008, 30 (S2): 260-265.
LIANG Yunfa, HAN Jie, LI Jingpei. Behavior of sin-

- gle pile subjected to lateral soil displacement induced by excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(S2): 260-265.
- [4] 梁发云, 于峰, 李镜培, 等. 土体水平位移对邻近既有桩基承载性状影响[J]. 岩土力学, 2010, 31(2): 449-454.
- LIANG Yun-fa, YU Feng, LI Jingpei, et al. Analysis of bearing capacity of a single pile under adjacent building subjected to lateral soil movements[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2): 449-454.
- [5] LEUNG C F, CHOW Y K, SHEN R F. Behavior of pile subject to excavation-induced soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2000, 126(11): 947-954.
- [6] LEUNG C F, LIM J K, SHEN R F, et al. Behavior of pile groups subject to excavation-induced soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(1): 58-65.
- [7] ONG D E L, LEUNG C F, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. I: Stable wall[J]. Journal of and Geoenvironmental Geotechnical Engineering, ASCE, 2006, 132(1): 36-44.
- [8] LEUNG C F, ONG D E L, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay. II: Collapsed wall[J]. Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, ASCE, 2006, 132(1): 45-53.
- [9] VESIC A S. Bending of beams resting on isotropic elastic solids[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 1961, 87(2): 35-53.
- [10] 李连祥, 张海平, 徐帮树, 等. 考虑 CFG 复合地基对土体侧向加固作用的基坑支护结构优化[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(11): 500-506.
- LI Lianxiang, ZHANG Haiping, XU Bangshu, et al. Optimization of excavation supporting structure considering lateral reinforcement effect of CFG composite foundation on soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(11): 500-506.
- [11] 李连祥, 符庆宏, 张永磊. 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 Lianxiang, FU Qinghong, ZHANG Yonglei. 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.
- [12] 李连祥, 符庆宏. 临近基坑开挖复合地基侧向力学性状离心实验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 85-93.
- LI Lianxiang, FU Qinghong. Lateral mechanical behavior of composite ground due to adjacent excavation: centrifuge model test [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 85-93.
- [13] 李连祥, 符庆宏, 黄佳佳. 砂土地基和粉质黏土地基基坑悬臂开挖离心模型试验[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 529-536.
- LI Lianxiang, FU Qinghong, HUANG Jiajia. Centrifuge model tests on cantilever foundation pit engineering in sand ground and silty clay ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(2): 529-536.
- [14] 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(S2): 400-403.
- LIU Yan, NIE Shumin, 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.
- [15] 吉庆祥. 既有建筑复合地基对邻近基坑性状影响的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- JI Qingxiang. The research on influence to the behavior of adjacent excavation by existing composite foundation[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015.
- [16] 周秋娟, 陈晓平, 徐光明. 软土基坑离心模型试验及数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(11): 2342-2348.
- ZHOU Qiujuan, CHEN Xiaoping, XU Guangming. Centrifugal model test and numerical simulation of soft soil foundation pit [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(11): 2342-2348.
- [17] 乔京生, 梁乐杰, 赵晓波, 等. 复合地基在基坑开挖作用下的力学性状[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 90-98.
- QIAO Jingsheng, LIANG Lejie, ZHAO Xiaobo, et al. Research on the mechanical behavior effect of composite foundation under foundation pit excavation [J]. Journal of Hebei United University (Natural Science Edition), 2013, 35(4): 90-98.

(编辑 桂智刚)