

DOI: 10.11779/CJGE2019S1039

复合地基侧向开挖上覆荷载影响规律离心机试验研究

李连祥^{1, 2}, 季相凯^{*1, 2}, 刘嘉典^{1, 2}, 贾斌^{1, 2}

(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: 进行了三组临近复合地基开挖的离心机模型试验, 对比分析了相同开挖工况、不同上覆荷载下的桩轴力、桩侧摩阻力、桩土应力比以及桩弯矩的变化规律。结果表明, 当复合地基上覆荷载增加时: ①桩轴力及其因开挖产生的增量明显增大, 桩侧摩阻力数值增大, 但方向不变; ②桩土应力比及其增量明显增大, 其变化趋势与桩轴力曲线一致; ③各级开挖工况下的桩体弯矩也会相应增加, 而且随着与基坑距离的增加, 弯矩值逐渐变小, 荷载的影响也逐渐降低; ④随着复合地基上覆荷载的增加, 高应力水平下的桩间土更容易受到临近基坑开挖的扰动, 荷载更多地向刚性桩转移, 桩轴力增加, 同时伴随着更大的桩体弯矩, 进而加快桩体的破坏趋势。研究成果可为既有复合地基临近基坑开挖支护设计提供参考。

关键词: 复合地基; 悬臂开挖; 离心模型试验; 桩体内力

中图分类号: TU473; TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)S1-0153-04

作者简介: 李连祥(1966—), 男, 河北人, 博士, 教授, 硕导, 从事岩土工程研究。E-mail: jk_doctor@163.com。

Centrifugal model tests on lateral mechanical properties of composite foundation under different additional loads

LI Lian-xiang^{1,2}, JI Xiang-kai^{1,2}, LIU Jia-dian^{1,2}, JIA Bin^{1,2}

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

Abstract: Three centrifugal model tests are carried out, and the axial force of piles, side friction resistance, pile-soil stress ratio and moment of piles under different loads are compared. The test results show that when the additional loads on the composite foundation increase: (1) The axial force of piles and the increments caused by the excavation increase obviously, and the value of pile side friction increases under the same direction. (2) The pile-soil stress ratio and its increment obviously increase. (3) The bending moment of piles under the excavation conditions increases correspondingly, and the effect of the load is gradually reduced as the distance from the foundation pit increases. (4) With the heavier additional load, the soil between piles is more susceptible to the disturbance of the excavation, and the load is more transferred to the rigid pile, so the axial force of piles increases, with the larger bending moment of piles, the demolition tendency of the piles is accelerated. The conclusions can provide reference for the design of retaining structures adjacent to the existing composite foundation, and the lateral displacement of the composite foundation should be strictly controlled.

Key words: composite foundation; cantilever excavation; centrifugal test; internal force of pile

0 引 言

新建基坑的开挖使临近的复合地基产生侧向卸荷作用, 造成较大的地基变形与桩土间的应力重分布, 影响原有建筑的安全^[1]。不同既有建筑间的荷载差异影响着复合地基内部的应力场和位移场, 使两者间的相互作用更加复杂, 难以进行归一化分析。

现阶段的研究大多局限于数值分析^[2-4], 缺乏试验的有效验证, 往往忽略了上覆荷载这一关键变量的作用。如余旭等^[2]利用 ABAQUS 建立 5×5 的简化 CFG 桩复合地基模型, 并在一侧进行基坑开挖, 但仅研究了

间距和挖深的影响, 并未涉及上覆荷载。李连祥教授针对支护结构紧邻复合地基的基坑工程开展深入研究^[5-7], 在离心机试验方面取得了较大的进展: 掌握了置换率对复合地基竖向力学性状的影响规律^[6]以及对复合地基侧向力学性状随临近基坑开挖的变化规律^[7]。

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

***通讯作者** (E-mail: jpaeen@163.com)

因此,本文在文献[5~7]的基础上开展了三组临近复合地基开挖的离心机模型试验,对比分析了开挖过程中,不同上覆荷载情况下的桩轴力、侧摩阻力、桩土应力比和桩弯矩受土体侧移影响的变化规律。

1 离心模型试验概况

本文试验设计方案与步骤以文献[5~7]为基础,将试验分成 3 组:无载、180 kPa 与 240 kPa 加载。三组试验除上覆荷载不同外,其余参数相同,详见表 1。

表 1 试验模型参数

Table 1 Parameters of centrifugal model tests

试验组	Test 1	Test 2	Test 3
上覆荷载	0kPa	180kPa	240kPa
模型尺寸	高度 650 mm, 长度 850 mm, 宽度 400 mm		
基桩参数	桩径 20 mm, 桩长 350 mm, 桩间距 80 mm		
挡墙参数	高度 550 mm, 宽度 400 mm, 厚度 9.5 mm		
开挖深度	依次挖深 60 mm (Step1), 80 mm (Step2), 110 mm (Step3)		

试验中以气囊加载装置分级施加附加均布荷载,采用福建标准砂模拟地基土,采用铝合金 6061 板模拟基坑支护桩,铝合金 6061 管模拟复合地基刚性桩^[5-7]。

2 试验结果分析

现将模型中的各参数通过离心机的相似比 1:40 换算为实际情况下的单位制,便于观察与比较。

2.1 桩轴力

如图 1 所示,各组试验的的轴力监测桩距基坑 9.6 m 远的位置。定义桩轴力受压为正,受拉为负。

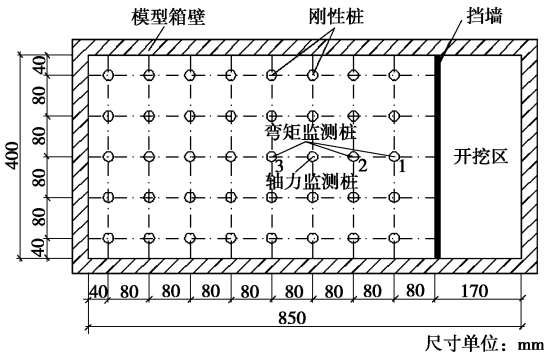


图 1 地基模型图
Fig. 1 Foundation model

图 2 中的 Step0 表示基坑开挖前的状态, Step1, 2, 3 表示临近基坑的各个开挖工况,下文亦然。可以发现:因基坑开挖而引起的刚性桩的轴力增量大致沿深度先增大后减小,且随开挖递增明显。其次随着开挖的进行,桩轴力的最大值所在的位置在同一荷载下并没有发生较大的改变。现将桩轴力因开挖而引起最大增量列于表 2 中,容易发现,在同级开挖工况中,附加荷载越大,复合地基桩轴力的增量也越大;其中

对比 test2 和 test3 试验,发现荷载增加 60 kPa 后,开挖完成后的最大桩轴力增加了约 26%左右。因此,在承受较高附加荷载的复合地基的临近处开挖基坑时,应该着重注意因开挖造成的桩轴力增加而对桩产生的压缩破坏。

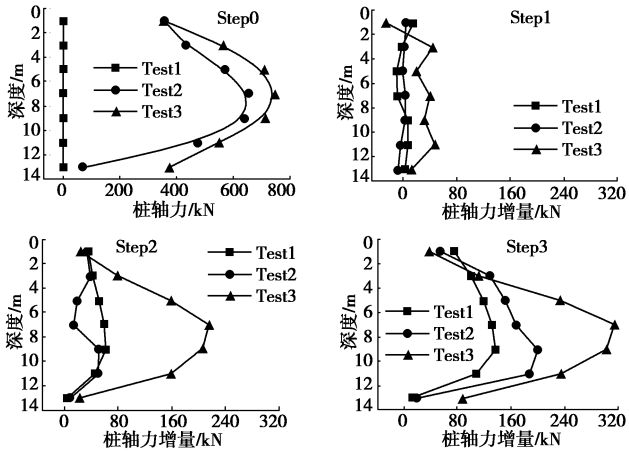


图 2 复合地基桩轴力及增量

Fig. 2 Change of axial force of piles in composite foundation with excavation

表 2 桩轴力最大值的深度及其随开挖产生的增量

Table 2 Maximum increments and depths of axial force

试验组	Test 1	Test 2	Test 3
轴力最大值所在深度	9 m	8 m	7 m
第一次开挖最大增量	3.31 kN	7.10 kN	39.40 kN
第二次开挖最大增量	61.10 kN	50.32 kN	215.71 kN
第三次开挖最大增量	136.78 kN	200.61 kN	314.10 kN

2.2 侧摩阻力

定义侧摩阻力向上为正,通过插值求导的办法,利用测得的桩轴力曲线计算出桩侧摩阻力^[5],结果如图 3 所示。

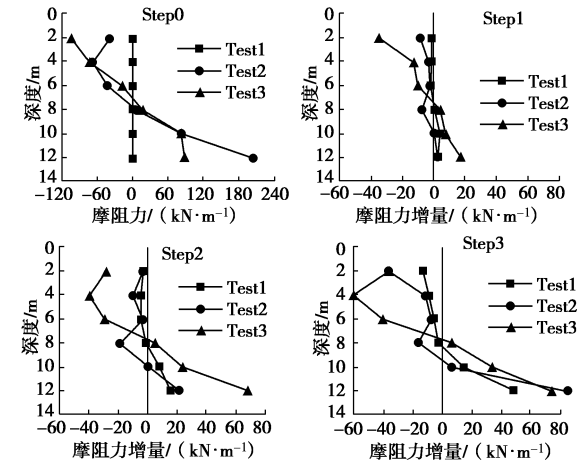


图 3 复合地基桩侧摩阻力及增量

Fig. 3 Change of side friction resistance of piles in composite foundation with excavation

对比图 3 中因开挖引起的摩阻力的增量,可以发现不管有无附加荷载,开挖基本上都会引起桩体的摩阻力数值的增大。利用赵明华的荷载传递理论^[8],可

作如下解释: 基坑开挖, 使得上部桩土之间的差异沉降增大, 负摩阻增加; 同时荷载向桩转移, 桩的整体沉降增大, 桩下部的正摩阻力也随之增大。荷载越大, 土体的原有应力水平越高, 越容易受到开挖影响, 加大桩土之间的差异沉降; 因此附加荷载为 240 kPa 时的桩侧摩阻力因开挖而产生更大的扰动, 约占未开挖前的 35.58%, 远大于 180 kPa 时的 17.91%。

2.3 桩土应力比

根据李连祥的推导公式^[5], 计算了桩土应力比, 并将其随开挖的变化规律绘制成图 4。

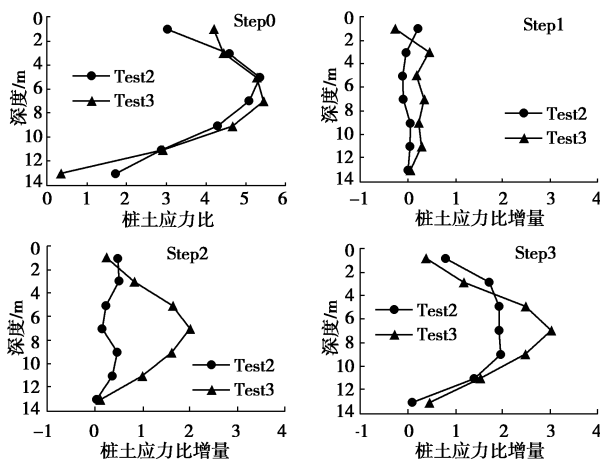


图 4 复合地基桩间土应力比及增量

Fig. 4 Change of pile-soil stress ratio in composite foundation with excavation

可以发现: 桩土应力比增量的变化趋势与桩轴力增量曲线相似; 新建基坑的开挖, 造成地基内土体随支护结构产生侧移, 上覆荷载从土体向桩体转移, 并随着开挖的进行, 转移比例越大。附加荷载增大后, 桩土应力比因开挖引起的增量也随之增大, 开挖完成后, 最大增幅从 1.9 变成 3.0。这表明, 当复合地基上覆附加荷载较大时, 桩间土应力值较大, 桩间土体更容易受到开挖的影响发生扰动, 使得荷载更多地向刚性桩转移, 这可能会加强桩的压缩破坏趋势。

2.4 桩弯矩

如图 1 所示, 各组试验中, 弯矩监测桩距离基坑分别为 3.2 m (#1), 6.4 m (#2), 12.8 m (#3)。定义向坑内挠曲为正, 加载前各桩弯矩为零。

图 5 为 #1 桩的弯矩随着开挖的变化规律。可以发现: 在第二、三次开挖中, 除无载复合地基依旧为弓形外, 其余两组有载复合地基中桩的上部都产生了较大的负弯矩, 其数值与桩下部的正弯矩数值大小相当。这是由于在荷载作用下, 加剧了复合地基因开挖引起的沉降, 桩向上刺入褥垫层, 同时桩体与褥垫层的相对位移较大, 桩顶受到褥垫层和加载气囊 (实际工程中为基础) 的约束作用, 进而在桩的上部产生负弯矩。同时对比 Test2 和 Test3 发现, 上覆荷载越大, 桩的弯

矩值也越大, 桩顶的约束作用也越强。

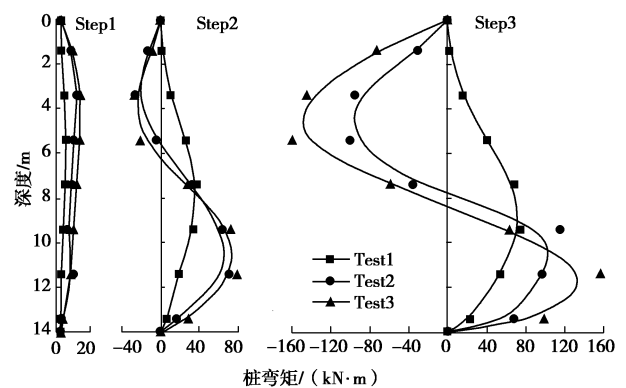


图 5 复合地基 #1 桩弯矩随开挖变化规律

Fig. 5 Change of bending moment of No. 1 pile in composite foundation with excavation

图 6 为 #2 桩的弯矩变化规律, 由图 6 可见, 有载复合地基在第二、三次开挖中呈现马鞍形。究其原因, 大抵是距基坑较远, 桩土之间的差异沉降与相对水平位移减少, 但桩顶处的约束依然存在; 第二、三次开挖进一步促进复合地基桩间土对于桩的作用, 而坑底之下土体对桩的位移约束越发明显。此外, 由于此时距离基坑较远, 基坑开挖引起此处复合地基的侧移量较小, 因此相对 #1 桩来说, #2 桩弯矩值大幅减小。而且因荷载变化而产生的最大弯矩值之差小于 10 kN/m, 远小于 #1 桩两组有载试验弯矩差, 后者最大可达 50 kN/m。

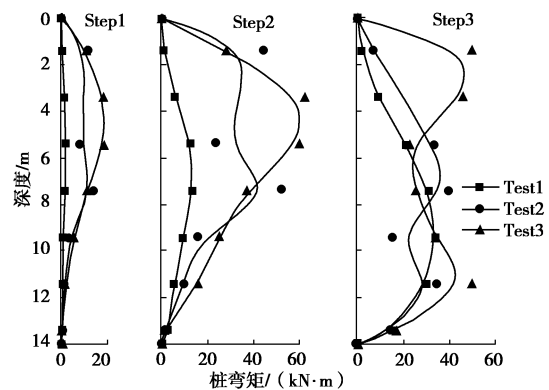


图 6 复合地基 #2 桩弯矩随开挖变化规律

Fig. 6 Change of bending moment of No. 2 pile in composite foundation with excavation

图 7 中为距离基坑更远的 #3 桩的弯矩变化规律。因为其受基坑开挖产生的影响较小, 弯矩值大幅减小, 三组试验开挖完成后的最大弯矩值约为同等工况下 #1 桩的最大弯矩值的 15.34%, 39.82%, 28.96%。同时, 由于此处的桩土之间的沉降差异较小, 桩顶与褥垫层的相对位移也较小, 因此桩顶受到的约束几乎为零。而且两组有载试验的弯矩变化曲线几乎重合, 结合 #1, #2 桩的弯矩变化, 表明此时荷载的相对大小对桩弯矩影响程度随距离增加而迅速减小。

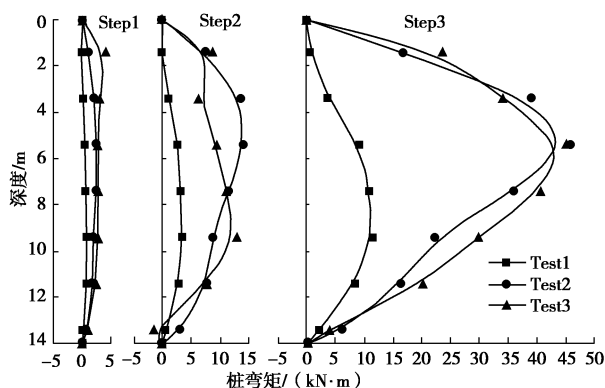


图7 复合地基#3 桩桩弯矩随开挖变化规律

Fig. 7 Change of bending moment of No. 3 pile in composite foundation with excavation

3 结 论

通过三组临近复合地基开挖的离心机模型试验,对比分析了不同荷载下复合地基中刚性桩与桩间土的各内力受开挖影响的变化规律,可为此类工程提供指导和参考。主要结论如下:

(1) 桩轴力因开挖而发生的增量沿深度先增大后减小,且随开挖而递增得越发显著;桩侧摩阻力上部为负下部为正,开挖只会增大其摩阻力值;且上覆荷载越大,桩轴力及摩阻力随开挖的变化幅度也越大。

(2) 当存在上覆荷载时,桩土应力比曲线与桩轴力曲线相似,其值随着开挖而不断增大;且附加荷载越大,桩土应力比增量越大,因开挖而向刚性桩转移的荷载也越多。

(3) 随着开挖的进行,各荷载下的桩体弯矩均相应增大,且附加荷载越大、距基坑越近,弯矩增大越明显;同时由于桩刺入褥垫层以及桩与褥垫层的相对水平位移,附加荷载对桩顶存在一定的约束作用,近基坑桩存在负弯矩;此外,距离基坑越远,附加荷载的相对大小对桩弯矩的影响程度和约束作用越小。

(4) 复合地基上覆荷载较大时,由于原有的桩间土应力水平相对较高,桩间土体更容易受到开挖的影响,使得荷载更多地向刚性桩转移,桩轴力增加;同时较大的土体侧移使桩体产生更大的弯矩,这使得刚性桩受到开挖影响而发生破坏的可能性增大。

参考文献:

[1] 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**(增刊): 500 - 506. (LI Lian-xiang, ZHANG Hai-ping, XU Bang-shu. Optimization of excavation supporting structure considering lateral reinforcement effect

of CFG composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(S0): 500 - 506. (in Chinese))

[2] 余旭, 邹燕. 基坑开挖对临近建筑物 CFG 桩复合地基的影响分析[J]. 安徽建筑大学学报, 2015, **23**(5): 16 - 21. (YU Xu, ZOU Yan. Influence of adjacent CFG pile composite foundation due to excavation[J]. Journal of Anhui Jianzhu University, 2015, **23**(5): 16 - 21. (in Chinese))

[3] LIYANAPATHIRANA D S, NISHANTHAN R. Influence of deep excavation induced ground movements on adjacent piles[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, **52**(2): 168 - 181.

[4] 张景尧, 乔京生, 梁乐杰. 土体侧向位移对周边复合地基力学性状影响研究[J]. 土工基础, 2013, **27**(3): 89 - 92. (ZHANG Jing-yao, QIAO Jing-sheng, LIANG Le-jie. Impact of the soil lateral displacement on the performance of the adjacent composite ground[J]. Soil Engineering and Foundation, 2013, **27**(3): 89 - 92. (in Chinese))

[5] 李连祥, 符庆宏. 临近基坑开挖复合地基侧向力学性状离心试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, **50**(6): 85 - 94. (LI Lian-xiang, FU Qing-hong. Centrifugal test study on lateral mechanical properties of composite foundation adjacent to foundation pit excavation[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, **50**(6): 85 - 94. (in Chinese))

[6] 李连祥, 黄佳佳, 符庆宏, 等. 不同置换率复合地基力学性状附加荷载影响规律离心试验研究[J]. 岩土力学, 2017, **38**(增刊 1): 131 - 139. (LI Lian-xiang, HUANG Jia-jia, FU Qing-hong, et al. A centrifugal test study on the influence of additional loads on mechanical properties of composite foundations with different displacement rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, **38**(S1): 131 - 139. (in Chinese))

[7] 李连祥, 黄佳佳, 成晓阳, 等. 刚性桩复合地基与临近基坑支护结构相互影响的离心模型试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(增刊 2): 4142 - 4150. (LI Lian-xiang, HUANG Jia-jia, CHENG Xiao-yang, et al. Centrifugal model test of interaction between rigid pile composite foundation and adjacent foundation pit supporting structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(S2): 4142 - 4150. (in Chinese))

[8] 赵明华, 贺炜, 曹文贵. 基桩负摩阻力计算方法初探[J]. 岩土力学, 2004, **25**(9): 1442 - 1446. (ZHAO Ming-hua, HE Wei, CAO Wen-gui. Study on calculation method of friction of piles[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(9): 1442 - 1446. (in Chinese))

(责编: 明经平)