

横向流动土体作用下的群桩反应性状

韩爱民¹, 肖军华², 梅国雄¹

(1. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009; 2. 北京交通大学 土木建筑学院, 北京 100044)

摘要: 借助 FLAC^{3D} 程序, 分析了基坑开挖后土体横向流动作用下坑内群桩的反应性状。研究了两桩、四桩、五桩、六桩群桩中基桩的反应性状, 并与相同位置的单桩反应进行了比较, 得到了受横向流动土体作用的群桩相互作用规律: 桩基连线平行于边坡布置的两桩, 相互影响并不明显; 而在其它情况下, 前排桩对后排桩遮拦、后排桩对前排桩阻挡, 均使受影响的桩基内力分布改变, 桩身最大变形量减小; 受周围越多、越近桩基的影响, 基桩的内力和变位减少得越多。根据桩间土体的成拱特征, 定性解释了群桩相互作用的机理与规律, 具体工程的现场量测结果也验证了此结论。

关键词: 基坑开挖; 流动土体; 群桩; 相互作用; 土拱

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2005)12-1463-05

作者简介: 韩爱民(1963-), 男, 1992年毕业于南京大学, 副教授, 从事区域性土的特性及基础工程方面的研究。

Behavior of pile groups subject to excavation-induced lateral soil movement

HAN Ai-min¹, XIAO Jun-hua^{1,2}, MEI Guo-xiong¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, China; 2. School of Civil Engineering, Beijing

Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Three dimensional finite-difference program of FLAC^{3D} was applied to study pile groups behaviors due to excavation-induced lateral soil movements, including two piles in a row parallel to excavation slope or in a line perpendicular to slope, four-pile, five-pile, 3×2 and 2×3 pile groups. Comparing the response of a pile among pile groups with that of a single pile located in the same position on slope, the interaction effect in pile groups had been found. Namely, when piles were arranged in a row parallel to slope, the interaction effect between piles was insignificant, while in other arrangements, the existence of either a front pile (a row front piles) or a rear pile (a row rear piles) could all reduce the displacement and maximum bending moment of the adjacent pile, and when a pile was located in groups with small space or among a number of piles, the interaction effect would increase significantly. These conclusions were explained by arching effects of soil between piles theoretically, and verified by a practical project.

Key words: excavation; lateral soil movement; pile groups; interaction effect; soil arching

0 引言

软弱地基开挖, 土体横(侧)向流动对基坑内已成工程桩推挤, 导致桩基失稳; 或者由于固结、塑性屈服和流变等引起土体侧向移动, 导致工程桩侧向弯曲, 甚至发生折断^[1,2]。长期以来, 对流动土体作用下桩基的反应性状, 国内外学者通过模型试验、现场测试、数值模拟、理论计算等方法集中研究了码头、桥台桩基与岸坡运动土体间的相互作用, 取得了大量研究成果^[3~7]; 近年来, 软弱地层深挖基坑中流动土体作用下的桩基反应以及地下开挖或地面堆载对临近桩基的影响等问题, 成为岩土工程学科的热点、难点问题之一^[8~11]。但迄今为止, 针对基坑开挖后土体横向流动作用下, 坑内群桩反应性状的研究仍然较少。本文

采用三维有限差分数值计算程序(FLAC^{3D})研究了基坑开挖过程中流动土体对坑内工程桩的影响, 得到了群桩相互作用的规律, 并以实际工程为例进行了验证。

1 分析模型

采用2:1放坡的5m深基坑, 工程桩尺寸为0.45m×0.45m×36m, 地基土为饱和软粘土, 地下水位设在坑底。考虑坑底以上土层降水、固结, 土性参数取得略大于坑底下土体。土体采用8节点立方体实体单元离散, 并引用Mohr-Coulomb屈服准则。桩采用

基金项目: 霍英东青年教师基金(91076); 江苏省高校自然科学基金计划资助项目(04KJB560048)

收稿日期: 2005-03-07

表 1 土体计算参数
Table 1 Parameters of soils

土层	体积变形模量 K/MPa	剪切模量 G/MPa	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\phi/(^{\circ})$	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	厚度 /m
①粉质粘土	9.93	3.06	33.3	11.3	1.8	5
②淤泥质粘土	3.33	0.71	11.7	5.3	2.0	40
③粉细砂	12.50	5.77	0.00	35	2.0	

FLAC^{3D} 程序中的 pile 单元模拟, 桩土之间通过设置剪切弹簧和法向连接弹簧相互作用, 桩、土计算参数如表 1、2。接触弹簧的参数根据上海地区试验取值^[12]。地面堆载取 20 kPa。

表 2 桩的计算参数
Table 2 Parameters of pile

名称	标准单位	数值
杨氏模量	GPa	30
泊松比		0.2
横截面积	m ²	0.2025
极惯性矩	m ³	6.833×10^{-3}
绕y轴惯性矩	m ³	3.3172×10^{-3}
绕z轴惯性矩	m ³	3.3172×10^{-3}
剪切连接弹簧粘聚强度	MPa	3.63
剪切连接弹簧摩擦强度	degree	23.70
剪切连接弹簧刚度	N/m	1.32×10^8
法向连接弹簧粘聚强度	MPa	3.63
法向连接弹簧摩擦强度	degree	23.70
法向连接弹簧与接触面	on or off	on
法向连接弹簧刚度	N/m/m	1.05×10^8
周长	m	1.8

数值计算时, 选取 40 m×40 m×50 m 的三维尺寸。为减少边界效应带来的计算误差, 将桩的位置设在三维体中间, 并加密中间土体的网格划分。限制三维土体四个侧面的水平向位移, 底面固定, 只将顶面设为自由面。首先计算土体在自重应力作用下达到平衡状态, 将土层初始位移置零, 保留土层中初始应力大小分布并恢复土体为弹性状态。然后设置桩基位置, 并利用 null 命令依步骤模拟基坑的开挖, 计算达到最终平衡状态。

2 群桩反应性状的计算分析

本文计算了表 3 中常见几类桩基布置型式中基桩的变形、受力性状, 分析了群桩相互效应。需要说明的是, 由于计算中没有考虑桩的塑性和桩开裂后其截面抗弯刚度降低的影响, 桩基弯矩计算偏大。据文献[8], 考虑混凝土开裂后桩身刚度有较大降低, 桩身弯矩成倍减小, 而桩顶位移增加很少。因此, 基桩弯矩实际值比文中的计算值要小。

2.1 桩基连线平行于边坡布置的两桩

T1~T4 研究了位于坡前 3 m, 桩基连线平行于边坡的两桩, 当桩间距从 3D~10D (D 为桩身直径) 变化时, 基桩的反应性状。由于对称性, 只考虑其中一根。图 1 为随桩间距变化的桩身弯矩分布, 并与相同

位置的单桩反应作了比较。图 2 为各试验中基桩的桩顶位移。

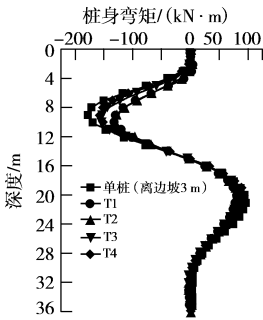


图 1 桩基连线平行于边坡的两桩反应
Fig. 1 Piles in a row parallel to slope

表 3 群桩布置型式与试验代号
Table 3 Arrangement of pile group and test code

群桩布置型式	试验代号	距离
	T1	$a = 3\text{ m}; b = 3D = 1.35\text{ m}$
	T2	$a = 3\text{ m}; b = 2\text{ m}$
	T3	$a = 3\text{ m}; b = 8D = 3.5\text{ m}$
	T4	$a = 3\text{ m}; b = 4.5\text{ m}$
	T5	$c = 1\text{ m}; d = 2\text{ m}$
	T6	$c = 2\text{ m}; d = 1\text{ m}$
	T7	$c = 3\text{ m}; d = 1\text{ m}$
	T8	$c = 3\text{ m}; d = 2\text{ m}$
	T9	$e = 1\text{ m}; f = g = 2\text{ m}$
	T10	$h = 1\text{ m}; i = 2\text{ m}; j = 3\text{ m}$
	T11	$k = 1\text{ m}; l = m = 2\text{ m}$
	T12	$n = p = 2\text{ m}$

从两图可以看出, 弯矩分布形状均与单桩时相同, 但是最大桩身弯矩略有减少, 桩间距越小, 减少越多。说明桩间存在一定的相互影响效应, 使得基桩的内力和变位均减少, 桩间距越小越明显。关于这一点, 也可从桩间土拱效应获得解释。桩间距越大、桩间土拱越不明显^[5], 故两桩相互作用减弱, 反之, 随着桩间

距减小, 拱效应越加明显就会加大两桩的相互作用。但是总的看来, 桩基连续平行于边坡布置的两桩, 相互影响并不强烈。从桩顶位移的比照图中也可以证实这一结论, 各试验的桩顶位移相差不大。

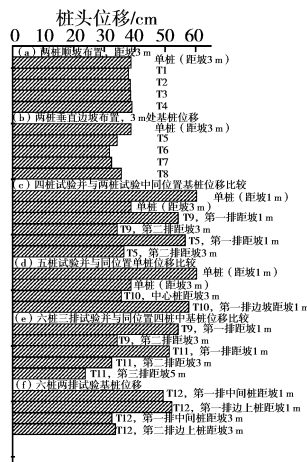


图 2 各试验桩顶位移比较

Fig. 2 Comparison of deflection of pile top

2.2 桩基连线垂直于边坡布置的两桩

T5~T8 研究了桩间连线垂直于边坡布置的两桩反应性状与相互作用。图 3 绘出了各试验的桩身弯矩分布曲线, 并与在距离边坡 3 m 处单桩的反应性状进行了比较。

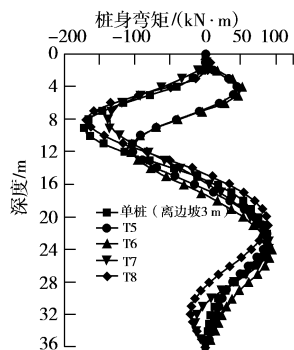


图 3 桩基连线垂直于边坡的两桩反应

Fig. 3 Piles in a line perpendicular to slope

从图 3 可以看出, 受前后其它桩基影响, 桩基桩身弯矩分布形状发生变化, 并与单桩有所不同。T5、T6 试验, 距离边坡 3 m 位置的桩基受桩前 2 m、1 m 的另一根桩基遮拦作用, 桩顶附近出现较小正弯矩, 桩身上部最大负弯矩有较大减少, 最大负弯矩位置下降, 桩身弯矩分布形状与该位置的单桩也不同。由于最大负弯矩位置即为土体潜在滑移面的深度, 说明桩基的遮拦作用, 导致桩后土体的潜在滑移面深度有所降低, 且位移减小。被遮拦桩基桩顶附近土体位移小于桩基位移, 桩顶受压, 出现正弯矩。T7、T8 试验, 距离边坡 3 m 位置的桩基受桩后 2 m、1 m 另一根桩基的阻挡作用, 桩身上部最大负弯矩有少量减少, 但桩身弯矩分布形状与该位置单桩相同。而随着两桩基

的间距加大, 被阻挡桩基的桩身弯矩分布逐渐趋于单桩, 两桩相互影响效应减弱。由图 3 的弯矩改变量和图 2 的桩顶位移比较图看, 桩基的遮拦对另一桩基产生的影响比阻挡要明显; 越近距离的遮拦或阻挡, 影响越大。

2.3 正方形布置的四桩群桩

T9 试验研究了 4 桩群桩中, 基桩各自反应性状。考虑对称性, 只需分析其中任一列 2 根桩基, 将它们的反应与 T5 试验、以及相同位置的单桩试验结果进行了比较, 如图 4。

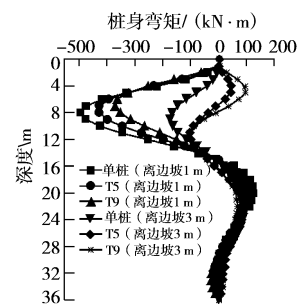


图 4 四桩群桩的反应

Fig. 4 Response of four-pile groups

T9 试验中基桩弯矩分布的形状、规律与 T5 试验相同, 只是 T9 试验中前排桩基的最大桩身负弯矩较 T5 试验中相同位置的桩基最大桩身负弯矩继续减少, 比该位置单桩最大桩身负弯矩更少。T9 试验中后排桩身弯矩分布形状和规律与 T5 试验中同位置基桩反应性状一致, 而且桩顶附近的正弯矩继续增加。可见, 由于 T9 试验中桩数比 T5 试验多, 故基桩的相互影响更加强烈, 说明桩数越多群桩效应越明显。由图 4 的弯矩改变量和图 2 的桩顶位移比较图看, 均可以证实这一规律。再从土拱原理的观点分析, 可以认为四桩群桩中前后各排桩相邻基桩之间的土拱效应加强了它们之间的相互作用, 使得群桩效应更明显。

2.4 梅花形布置的五桩群桩

T10 试验研究了 5 桩群桩中基桩各自的反应性状。考虑对称性, 只需分析中心 3 m 位置桩基及左右两列中任意一列的 2 根桩基, 将它们的反应性状与相同位置的单桩试验结果进行比较, 如图 5。

从图 5 中可以看出, 这些基桩的桩身弯矩分布形状与各位置的单桩相同, 只是数值上有些改变。由于中心桩受到周围 4 根桩基的影响, 所以其最大弯矩相对于该处单桩减少较多, 达到 57.1%。左右两列桩基虽然存在群桩之中, 但是与周边桩基距离较远 (9 倍桩径), 无法与相邻桩基形成土拱, 故受到的影响并不明显, 由图 5 的弯矩改变量和图 2 的桩顶位移比较图看, 均可以证实这一规律。

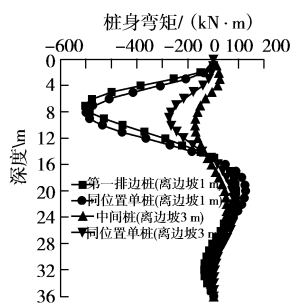


图5 五桩群桩的反应

Fig. 5 Response of five-pile groups

2.5 3行2列布置的六桩群桩

T11 试验研究了 6 桩群桩中各基桩的反应性状。群桩平行于边坡分三排布置, 共两列, 也即比 T9 试验多最后一排桩。考虑问题的对称性, 分析任意一列 3 根基桩的反应, 将它们的结果与 T9 试验中相同位置基桩的反应进行比较, 如图 6。

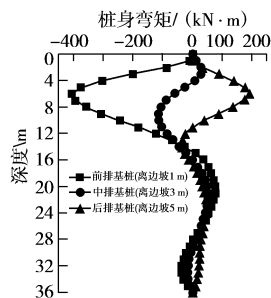


图6 六桩群桩三行两列布置时的反应

Fig. 6 Response of pile group with 3×2 piles

由图 6 和图 4 比较可得, T11 试验靠近边坡的前两排桩与 T9 试验中相同位置的基桩, 桩身弯矩分布形状一致, 但桩身最大弯矩值有些减小。T11 试验中间一排桩, 受第一排桩的遮拦作用, 类同前面的规律, 桩顶附近出现正弯矩, 但同时也受后排桩基的阻挡作用, 故桩顶附近的最大正弯矩较 T9 第二排桩减小, 而在 T11 试验最后一排桩桩顶附近出现很大的正弯矩。

这进一步说明, 桩数越多群桩效应越强烈。排桩受前排桩遮拦同时, 若也受后排桩的阻挡, 该桩桩顶附近的最大正弯矩反而有些减小, 最后一排桩的桩顶附近出现更大的正弯矩。

2.6 2行3列布置的六桩群桩

T12 试验研究了 6 桩群桩中各基桩的反应性状。桩基平行于边坡分两排布置, 共三列, 也即比 T9 试验多一列桩基。考虑问题的对称性, 分析左右任意一列和中间一列的四根基桩, 将它们的反应与 T9、T10 中同位置基桩试验结果进行比较, 如图 7。

第一排桩受第二排桩的阻挡作用, 桩身最大负弯

矩减少, 但弯矩分布形状与单桩相同。第二排桩受第一排桩的遮拦作用, 桩身最大负弯矩减少很多, 最大负弯矩位置下降, 桩顶附近出现正弯矩。第一排中间位置基桩, 由于同时与同排的左右桩基之间均形成土拱, 受到的影响效应很明显。因此, 比 T9、T10 试验中同在该位置的基桩桩身最大负弯矩值小, 也比同试验中左右两列的桩身最大负弯矩小。第一排边桩桩身最大负弯矩比同在该位置的 T10 试验中边桩的桩身负弯矩也小得多, 图 2 的桩顶位移大小规律也是如此, 是由于在 T10 试验中边桩间距为 4.0 m, 而 T12 试验中, 边桩与中间一列桩的间距仅为 2.0 m。

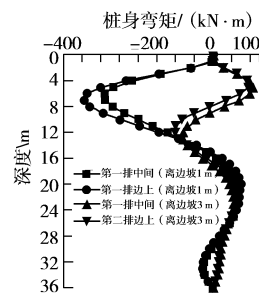


图7 六桩群桩两行三列布置时的反应

Fig. 7 Response of pile group with 3×2 piles

这就说明, 受周围越多、越近桩基的影响, 基桩的最大桩身弯矩和桩顶位移减少得越多。从土拱原理的观点分析, 可以认为基桩越近, 桩数越多, 基桩之间的土拱效应就更加强烈, 越是加强了基桩之间的相互作用, 使群桩效应更明显。

3 工程实例分析

某软土地基 50 m 深度内为构成均匀、厚度变化不大的淤泥质粉质粘土和软塑状粉质粘土, 拟建多栋毗邻的小高层住宅, 基础采用 400 mm×400 mm 钢筋混凝土预制方桩。该场区预计开挖 3.5 m 左右的地下车库, 其中一块场地两幢建筑连同其间空地部分一起开挖, 四面放坡, 基坑面积 4575 m², 基坑内工程桩共计 132+120 根, 有效桩长 36 m。

土方开挖后发现基坑东侧、南侧边坡附近的工程桩向基坑内出现有规律的偏移, 东侧向西偏移, 南侧向北偏移, 连续观测数日后才趋于稳定。分析发现, 紧邻基坑东侧有一高于开挖面 2.0 m 左右的道路 (超载)。而基坑南侧由于出土不及时, 直接将挖除土体堆在边坡上方, 堆载高度 1.5 m 左右。两种情况都降低了基坑边坡稳定性, 加大了边坡位移以及土体向坑内的塑性流动, 导致桩基偏移。

选取基坑中桩平面布置与表 3 群桩布置型式相同的几种情况进行计算分析。

情况 1: 基坑南侧边坡处的 3 桩群桩, 基桩布置如图 8 (a), 图中参数 $h = 0$, $i = 1\text{ m}$, $j = 1.6\text{ m}$ 。

情况 2: 距离基坑南侧边坡处 5 m, 有一电梯基础, 在坑底又开挖 2 m, 形成坑中坑, 导致六桩群桩基础偏位。基桩布置如图 8 (b), 图中参数 $h = 5\text{ m}$, $n = 2.2\text{ m}$, $p = 1.6\text{ m}$ 。

情况 3: 基坑东侧连续分布垂直于边坡的 3 根基桩, 基桩间距 1.8 m。基桩布置如图 8 (c), 图中参数 $c = 0$, $d = 1.8\text{ m}$ 。

情况 4: 距离基坑东侧边坡处 6 m, 有一电梯基础, 在坑底又开挖 2 m, 形成坑中坑, 导致六桩群桩偏位。基桩布置如图 8 (d), 图中参数 $k = 6\text{ m}$, $l = 1.6\text{ m}$, $m = 2.2\text{ m}$ 。

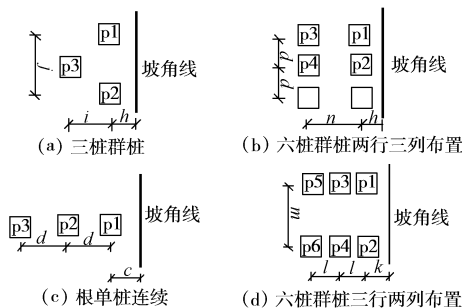


图 8 四种布置方式的群桩基础

Fig. 8 Four kinds of pile group arrangements

桩顶观测到的最终水平偏位值如表 4。

表 4 桩顶偏位量观测值

Table 4 Displacements of pile top

情况	桩号	偏位观测结果/cm
1	P1	43.0
	P2	43.0
	P3	29.0
2	P1	60.0
	P2	54.0
	P3	34.0
	P4	22.0
3	P1	100.0
	P2	92.0
	P3	74.0
4	P1	74.0
	P2	74.0
	P3	54.0
	P4	54.0
	P5	30.0
	P6	30.0

分析各桩桩顶位移的变化趋势, 反映出的流动土体作用下群桩相互影响的规律, 与图 2 通过数值模拟得到的结论完全一致。

4 结 论

(1) 流动土体作用下的群桩存在相互影响。桩基连线平行于边坡的两桩, 相互影响不明显; 桩基连线

垂直于边坡的两桩, 相互影响较明显。

(2) 受桩后另一根(排)桩基的阻挡, 桩基的最大负弯矩值减少, 但桩身弯矩分布形状与单桩时的情况相同; 受桩前另一根(排)桩基的遮拦, 桩基的桩身最大负弯矩减少, 最大负弯矩位置下降, 且桩顶附近出现较小正弯矩; 排桩受前排桩遮拦同时, 若也受后排桩的阻挡, 该桩桩顶附近的最大正弯矩减小, 最后一排桩的桩顶附近出现更大的正弯矩。桩基的遮拦对另一桩基产生的影响比阻挡要明显; 越近距离的遮拦或阻挡, 影响越大。

(3) 桩数越多、距离越近, 群桩效应越明显, 桩身的最大负弯矩和桩顶位移减少得越多, 在被遮拦桩基的桩顶附近, 出现越大的正弯矩。

参考文献:

[1] De Beer E E, Wallays M. Forces induced in piles by unsymmetrical surcharges on the soil around the piles[A]. Proc 5th ECSMFE[C]. Madrid, 1972, 1: 325 - 332.

[2] De Beer. Piles subjected to static lateral loads[A]. Proc 9th ICSMFE[C]. Tokyo: Sp Sess, 1997, 3: 1 - 14.

[3] Tomio Ito, Matsui T, Hong W P. Design method for stabilizing piles against landslide one row of piles [J] .Soils and Foundations,1981,21(1): 21 - 37.

[4] 桩基工程手册编写委员会. 桩基工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1999.

[5] 魏汝龙. 大面积填土对邻近桩基的影响[J]. 岩土工程学报, 1982,4(2):132 - 137.

[6] 魏汝龙, 王年香, 杨守华. 桩基码头与岸坡的相互作用[J]. 岩土工程报, 1992,14(6):38 - 49.

[7] Springman S M. Lateral loading of piles due to simulated embankment construction[D].University of Cambridge,1989.

[8] 茜平一, 冯国栋, 等. 软弱地基深挖基坑中桩的受力分析[J]. 岩土工程学报, 1993,15(1):60 - 66.

[9] Poulos H G, Chen L T. Pile response due to excavation—induced lateral soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE,1997,123(2): 94 - 99.

[10] Leung C F, Lim J K, Shen R F, et al. Behaviors of pile groups subject to excavation-induced soil movement [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironment Engineering. ASCE,2003, 129(1):58 - 65.

[11] 杨 敏, 朱碧堂, 等. 堆载引起某厂房坍塌事故的初步分析 [J]. 岩土工程报, 2002,24(4):446 - 450.

[12] 刘学增, 朱合华. 上海典型土层与混凝土接触特性的试验研究[J]. 同济大学学报, 2004,32(5): 601 - 606.