

# 群桩基础地基中的竖向附加应力性状研究

楼晓明 洪毓康 陈强华

(同济大学地下建筑与工程系, 上海, 200092)

**文 摘** 根据我国 4 幢高层建筑桩基础的共同作用分析成果, 对群桩基础中桩的荷载传递特性, 桩间土、下卧层土中的竖向附加应力分布特性作了研究。结果表明, 群桩的荷载传递特性与单桩不同, 群桩基础在下卧层地基中的竖向附加应力分布特性也明显地区别于等代深基础。按本文方法得到的群桩基础地基中的竖向附加应力, 用分层总和法计算地基变形, 无论是桩间土的变形特性还是桩基沉降量均与现有的实测成果比较一致。

**关键词** 群桩基础, 共同作用分析, 竖向附加应力。

## 1 前 言

桩基础是高大建筑物的主要基础型式, 如何更准确地计算桩基沉降是目前迫切要解决的课题, 而确定地基中的竖向附加应力是解决该问题的关键之一, 基于 Boussinesq 解答的原等代深基础法已证明不适用于计算桩基沉降。

Poulos 首次系统地提出了根据 Mindlin 位移解答计算均质弹性半空间体中桩基沉降的弹性理论法<sup>[1]</sup>, 但是用单一的弹性模量参数去反映分层的、非线性的土的压缩特性是很困难的, 因此在工程应用中有很大的局限性。我国学者更倾向于采用 Mindlin 应力解求桩基下卧层中的竖向附加应力, 再用分层总和法计算桩基础的最终沉降<sup>[2]</sup>, 该方法比原来的等代深基础法有很大的进步, 因为 Mindlin 解答反映了桩基础将上部荷载直接传递到深层土中这一受力特性。可是, 该方法对承台下桩顶的荷载分布及各桩的摩阻力分布特性是按经验近似假定的, 没有考虑群桩基础的共同作用因素, 从而影响分析竖向附加应力特性的准确性。

文献[3, 4]也根据 Mindlin 的应力解答提出了分层地基中群桩基础共同作用分析的弹性理论法, 由于计算中采用了迭代法, 可用于分析大规模的群桩基础, 计算基底下桩、土反力及各桩的摩阻力。本文在此基础上再用 Mindlin 应力公式计算地基中任意一点的竖向附加应力和变形, 以我国 4 幢高层建筑桩基础为例, 着重研究群桩基础中桩的荷载传递特性, 桩间土、下卧层土中的竖向附加应力分布特性, 从而在更深层次上认识桩基础的受力变形机理。

## 2 群桩基础地基中竖向附加应力计算

### 2.1 基本假定

(1) Mindlin 应力解适用于成层地基, 与 Boussinesq 应力解用于分层总和法求浅基础沉降

一样,其误差略去不计。

(2) 不考虑桩的“加筋”“遮挡”作用。

(3) 不考虑桩的施工因素,如挤土效应等。

(4) 桩基础在工作荷载作用下处于弹性状态,基底与桩土之间,桩与土之间均为弹性接触。

(5) 高层建筑筏(箱)加桩基础可近似按刚性基础加桩来分析。

## 2.2 计算方法简介

整个计算过程分为三个步骤实施。

(1) 以刚性基础板为分析对象,做刚性基础-桩-土的共同作用分析

已知基础中心总荷载为  $P$ ,将基础底面划分成  $n$  个矩形网格单元,即各单元的集中反力  $p_i$ (包括桩间土与桩顶反力)和总沉降  $S$  可按式求解:

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^n \delta_{ij} \times p_j = S & (i = 1, 2, 3, \dots, n) \\ \sum_{j=1}^n p_j = P \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\delta_{ij}$  表示  $j$  单元在单位荷载作用下在  $i$  单元处产生的变形,是通过弹性理论法求得的桩-土-桩相互作用系数。

(2) 以刚性基础下的桩群为分析对象,作桩群与土的共同作用分析

桩顶和地表作用的荷载按第一步分析得到的刚性基础下桩、土反力取用,根据桩土间的位移协调条件,桩群与土共同作用的基本表达式为

$$([K_p] + [F_s]^{-1})\{w_p\} = \{Y\} + [F_s]^{-1}\{w_{so}\} \quad (2)$$

式中  $[K_p]$  是桩群的集合刚度矩阵;  $[F_s]$  是由 Mindlin 应力公式建立的分层地基柔度矩阵;  $\{w_p\}$  表示各桩身单元的沉降列向量,  $\{w_{so}\}$  为地面荷载引起的各桩单元处桩侧土的附加沉降列向量,  $\{Y\}$  为桩顶荷载产生的荷载列向量。

解方程(2)求得  $\{w_p\}$  以后,按公式(3)即可得到各桩每个单元的桩侧阻力(包括桩端阻力),其列向量用  $\{f_p\}$  表示。

$$\{f_p\} = \{Y\} - [K_p] \cdot \{w_p\} \quad (3)$$

在上述两个计算步骤中,分层地基的压缩层厚度是按经验假定的,为节省计算内存引进了迭代法,并可以针对地基内荷载影响范围有限性这一实际情况(如桩的影响范围约为桩径的 8~10 倍)对弹性理论法作近似修正。有关这方面的详细内容参见文献[3,4]。

(3) 求地基中任意点的竖向附加应力

地基中任意一点  $A$  的竖向附加应力  $\sigma_a$  为每根桩各单元的摩阻力和基底作用在桩间土各单元上的压力  $p_{si}$  在  $A$  点处产生竖向附加应力的总和,即

$$\begin{aligned} \Delta\sigma_a = & \sum_{i=1}^g \sum_{j=1}^m Q_p(c, r, z) \cdot f_{pij} + \sum_{i=1}^g Q_b(c, r, z) \cdot f_{pib} \\ & + \sum_{i=1}^k Q_s(r, z) \cdot p_{si} \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $g$  是桩数;  $m$  是桩侧单元数;  $k$  是基底下桩间土的单元数;  $f_{pij}$  表示第  $i$  根桩的第  $j$  个桩

身单元的侧阻力;  $f_{pib}$  表示第  $i$  根桩的桩端阻力;  $Q_p(c, r, z)$  是单位侧阻力在  $A$  点处产生的附加应力;  $Q_b(c, r, z)$  是单位端阻力在  $A$  点处产生的附加应力;  $Q_s(r, z)$  为单位地表荷载在  $A$  点处产生的附加应力;  $c$  为桩单元的埋深;  $z$  为  $A$  点的埋深;  $r$  是桩单元与  $A$  点间的水平距离。

将下卧层土中的竖向附加应力与同一深度的自重应力进行比较, 可按公式(5)的应力比原则确定群桩基础的压缩层厚度。

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{zn} = 0.2\sigma_{cn} & (\text{硬土}) \\ \Delta\sigma_{zn} = 0.1\sigma_{cn} & (\text{软土}) \end{cases} \quad (5)$$

其中  $\Delta\sigma_{zn}$ ,  $\sigma_{cn}$  分别表示土层中的竖向附加应力和自重应力。

如果压缩层厚度的确定值与假定值相差较大, 以确定值为准重新进行计算。

### 3 4 幢高层建筑基础工程概况

这 4 幢建筑的基础都做过原位观测, 并有成果公开发表。本文仅列出该 4 幢高层的主要工程特点如表 1, 各桩基下卧层土的分布情况见表 2, 其它详细资料见有关文献<sup>[5-8]</sup>。

表 1 4 幢高层的主要工程特点

房号	①	②	③	④
工程名称	上海某 18 层住宅 <sup>[5]</sup>	上海某 24 层住宅 <sup>[6]</sup>	上海某 30 层住宅 <sup>[7]</sup>	武汉某 22 层大楼 <sup>[8]</sup>
结构型式	剪力墙	剪力墙	剪力墙	框架-剪力墙
基础型式	箱基加桩	箱基加桩	箱基加桩	箱基加桩
基础埋深(m)	1.7	6.5	4.5	5.5
有效桩长(m)	7.5	24.2	54.6	22
桩型	预制方桩 0.4m × 0.4m	预制方桩 0.45m × 0.45m	预制方桩 0.5m × 0.5m	预制管桩 ∅0.55m × 0.08m
布桩与桩数	沿墙布置, 183	满堂布置, 233	沿墙布置, 108	满堂布置, 342
基础面积(m <sup>2</sup> )	431.3	917	563.2	1055
桩间土	粉质粘土, 粉砂	淤泥质粘土	淤泥质粘土	粉细砂
基底附加压力(kPa)	195.8	238.4	320.4	217.5

### 4 群桩基础中桩的荷载传递特性

原位测试成果表明<sup>[5, 9, 10]</sup> 群桩的荷载传递过程与单桩不同, 承台底面压力和邻近桩的影响限制了上部桩身桩土之间的相对位移, 摩阻力因而减小, 桩身下部(包括桩尖)的摩阻力相应增大。

图 1 给出了 ④号房桩基础的某边桩、中央桩和单桩的摩阻力分布计算结果(图中  $L$  表示桩长,  $d$  表示桩径,  $P$  表示桩顶荷载), 各桩尖反力占桩顶荷载的百分比分别是 11.5%, 23.3% 和 3.7%。这说明群桩摩阻力的分布重心与单桩相比明显偏低, 其趋势与原位测试成果是一致的, 而

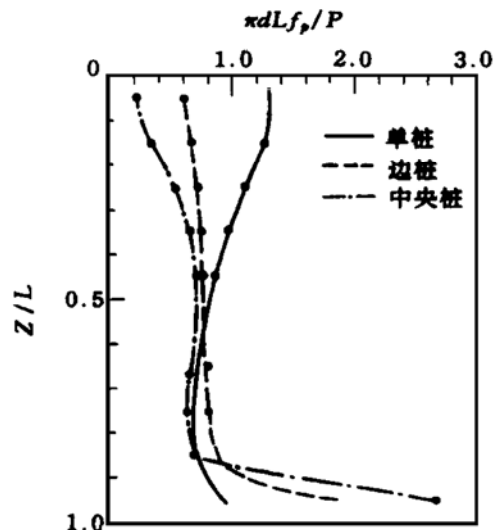


图 1 ④号房群桩与单桩的摩阻力分布图

且在同一组群桩中, 不同位置桩的摩阻力分布也不同, 中央桩桩顶附近的摩阻力削弱最多(有的甚至有负摩阻力出现), 边桩次之, 角桩最少。

因此, 计算群桩基础地基中竖向附加应力时, 采用单一、简化的摩阻力分布形式是不符合实际的。

## 5 桩间土中的竖向附加应力

4幢高层桩基础桩间土中的竖向附加应力系数  $\alpha$  的计算结果示于图2。 $\alpha$  为计算点的竖向附加应力与基底附加压力之比值。

从图2可见, 4幢高层桩间土的竖向附加应力分布特性差异较大, 这主要与基底的荷载分担比、桩身的摩阻力分布特性、桩群的大小以及桩距等因素有关。按照 Mindlin 公式, 在荷载作用点以上的附近区域会出现拉应力, 对于桩间土, 基底压力和各桩摩阻力所产生的应力的叠加结果, 使这种拉应力区可能被消除, 如①、④号房。当桩间土的压缩性明显高于下卧层土, 基底土的荷载分担比较小, 桩身下部摩阻力占桩顶荷载的比例较大时, 桩间土就出现拉应力区, 如②、③号房。通常情况下, 桩间土中的附加应力较小, 仅在桩端附近才有较明显的增加。①号房由于采用了沿墙布置的短桩基础, 计算点位于纵横剪力墙的中心, 该处底板下的土压力较大, 使得传递到桩间土中的附加应力明显增大; ②号房因为采用了满堂式的中长桩基础, 持力层相对桩间土刚度很大, 计算桩端反力约占桩顶荷载的70%, 桩间土中的拉应力较为显著, 但其数值仍小于相应的自重应力, 土体中不会出现真正的受拉现象。

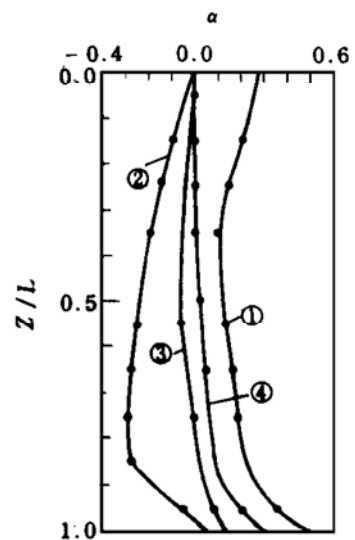


图2 4幢高层桩间土中的竖向附加应力在桩长范围内的分布

文献[11]中  $3 \times 3$  群桩的原位测试结果表明, 当桩距为 2~3 倍桩径时, 仅在靠近桩底  $1/4$  桩长范围内的桩间土压缩较明显, 当桩距增大至 6 倍桩径时, 沿整个桩长出现桩间土压缩变形, 这也说明对于疏桩基础, 桩间土的压缩变形问题是不可忽视的。可以看出, 上述桩间土的变形特点与桩间土中竖向附加应力分布特性的计算结果是一致的。

## 6 桩基下卧层土中的竖向附加应力分布

### 6.1 竖向附加应力系数沿深度分布

4幢高层桩基础下卧层土中的竖向附加应力计算结果也以附加应力系数  $\alpha$  的形式示于图3(a) 3(b)中(图中  $B$  表示等效基础宽,  $B = \sqrt{A}$ ,  $A$  为基础面积), 可见其结果显然要比按等代深基础法 Boussinesq 公式确定的附加应力小得多。等代深基础法由于忽略了桩尖平面上土层的影响, 因而过高地估计了桩基下卧层土中的附加应力, 计算桩基沉降明显偏大。

影响下卧层中附加应力系数分布的主要因素有: 桩长、基础面积、桩数、下卧层土与桩间土的刚度比, 从图中可见, 桩越长, 基础面积越小, 下卧层中的附加应力系数越小, 如③号房; 下卧层土与桩间土的硬度比越大, 桩端阻力占桩顶荷载的比例越高, 附加应力系数  $\alpha$  也就越大, 如②号房中的  $\alpha$  大于④号房。计算点离桩尖的远近对桩尖平面下约 3m 范围内的附加应力系数

有所影响,图中的虚线表示离桩尖近的点。

上述桩间土、下卧层计算点的平面位置均与基础中心相邻。由于刚性基础使得边缘桩的受力大于中央桩,桩基下卧层土中竖向附加应力在平面上的分布较为均匀,在群桩中心区域内改变计算点的平面位置对计算结果并无多大影响。

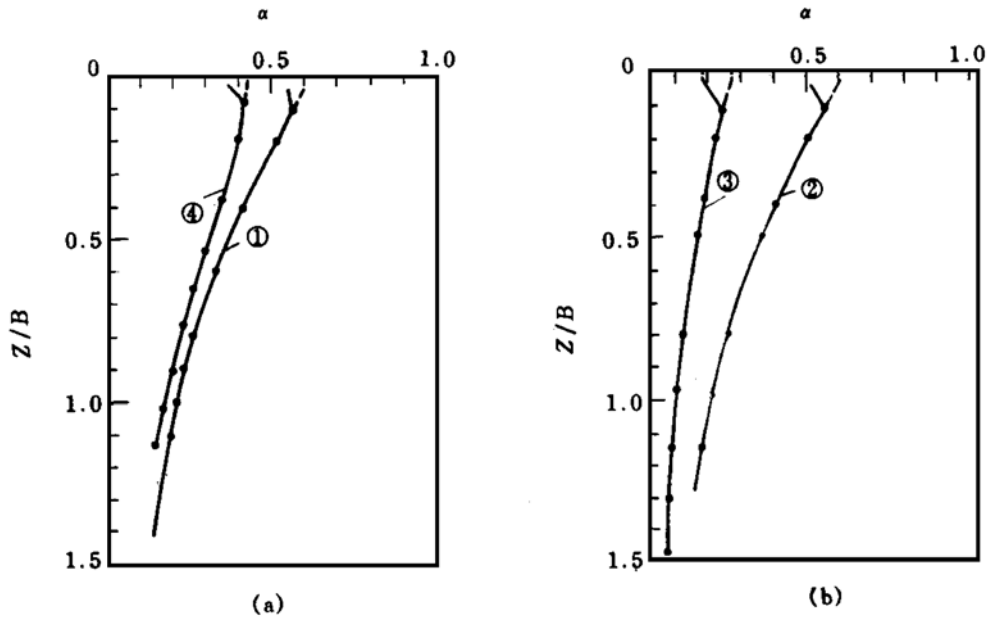


图3 桩基下卧层中的竖向附加应力分布

## 6.2 4幢高层建筑最终沉降计算

为检验图3中附加应力分布特性的真实性,可将它用分层总和法计算4幢高层的最终沉降,并与实测沉降值进行比较。基底附加压力已列于表1,一般情况下桩基础的沉降主要由下卧层地基的压缩变形组成,因此本文未计入桩间土的压缩变形。

土层的压缩模量要求采用地基土在自重应力—自重应力加附加应力阶段的实际压缩模量 $E_s$ ,但以往的勘察报告往往只提供 $E_{s,1-2}$ ,在4幢高层中只有④号房直接给出了 $E_s$ 值,其它3幢房的 $E_s$ 值只能参照现在勘察报告中相关土层的 $E_s$ 值取用。在桩基下卧层地基中,砂性土比较多,由于这类土难以取到原状土,要获得比较准确的压缩模量值是很困难的。为便于比较,本文分别按 $E_{s,1-2}$ 、 $E_s$ 计算了4幢高层的最终沉降,计算结果均列于表2(表中 $Z_n$ 表示桩尖下压缩层厚度)。

表2说明,依据本文的桩基下卧层土中的竖向附加应力值,只要土层的压缩模量取值合理,用分层总和法计算的桩基沉降就能与实测结果较为吻合;根据应力比原则确定的压缩层厚度 $Z_n$ 有以下规律:桩入土深度越深,基础等效宽度 $B$ 越小, $Z_n$ 也就越小。

## 7 结 语

本文从群桩基础共同作用分析入手,着重讨论了群桩基础地基中的竖向附加应力分布特性,结论如下:

(1)由于受承台及邻近桩的影响,群桩基础中桩的荷载传递特性与单桩不同,单纯以单桩为依据设计群桩基础是不科学的。

表2 4幢高层最终沉降的计算值与实测值比较

房号	压缩层名称	压缩层厚 (m)	土层压缩模量(MPa)		土层压缩变形(cm)		实测沉降 (cm)
			$E_{s, 1-2}$	$E_s$	$\Delta S_{i, 1-2}$	$\Delta S_i$	
①	粉砂	3.6	13.0	13.0	3.4	3.4	结构封顶2 年后沉降 24.5, 推算 $S_{\infty} = 39.7$
	淤泥质粘土	6.4	2.3	3.0	35.0	26.80	
	亚粘土	17.0	4.0	7.4	20.7	11.20	
	$\Sigma$	$Z_n = 27.0, Z_n/B = 1.3$			59.1	41.40	
②	亚粘土夹粉砂	6.0	14.81	24.4	5.1	3.10	结构到顶时 沉降3.10
	粉细砂	10.0	16.25	34.0	5.9	2.82	
	$\Sigma$	$Z_n = 16.0, Z_n/B = 0.55$			11.0	5.9	
③	亚粘土夹砂	7.6	5.16	16.0	10.2	3.29	结构到顶时 沉降2.37
	亚粘土	2.0	6.76	18.0	2.3	0.86	
	$\Sigma$	$Z_n = 9.6, Z_n/B = 0.40$			12.5	4.15	
④	粉细砂	7.2	—	20.5	—	3.09	结构到顶时 沉降2.55
	中粗细砂	3.8	—	34.5	—	0.91	
	粘土	2.5	—	12.8	—	1.48	
	粘土	1.2	—	13.5	—	0.64	
	$\Sigma$	$Z_n = 14.6, Z_n/B = 0.45$				6.12	

(2) 桩间土中的竖向附加应力一般较小, 仅在桩尖附近才有所增加, 说明桩间土的压缩变形主要发生在桩端附近, 但对于疏桩基础桩间土的压缩变形会在整个桩长范围内出现。

(3) 尽管群桩基础受力机理复杂, 其下卧层中的附加应力分布有其内在的规律, 它明显区别于等代深基础, 只有在计算中考虑了群桩基础的受力特性, 用分层总和法计算桩基沉降才能比较准确。

本文采用的群桩基础共同作用分析方法与三维有限元法相比的主要优点在于计算内存、计算时间占用量少, 计算参数简单, 同时也能反映桩基础的主要受力特性。该方法除了用于计算桩基沉降或沉降差外, 对于桩筏基础中筏板内力的计算、高层建筑桩基础对紧邻地铁隧道等市政设施影响的分析方面, 均很有应用价值。当然影响桩基础受力特性的因素是复杂的, 本文方法的理想化假定必然使计算结果带有局限性, 有待于进一步完善。

### 参 考 文 献

- 1 Poulos H G, Davis E H. Pile Foundation Analysis and Design. John Wiley and Sons, New York, 1980. 71~142.
- 2 黄绍铭, 裴捷等. 软土中桩基础沉降估算. 见: 第四届土力学及基础工程学术会议论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986: 237~243.
- 3 洪毓康, 楼晓明. 群桩基础共同作用分析. 见: 第六届土力学及基础工程学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社等, 1991. 427~430.
- 4 楼晓明. 承台-群桩-土共同作用的整体空间分析[硕士论文]. 同济大学, 1990.
- 5 洪毓康, 陈强华等. 高层建筑物下短桩基础的原位测试研究. 见: 高层建筑深基础及地下工程. 中国建筑

学会地基基础学术委员会第八九次年会论文集. 1988. 88~ 99.

- 6 洪毓康, 楼晓明等. 高层建筑桩-箱基础共同作用原位测试及计算分析研究. 岩土工程学报(待发表).
- 7 赵锡宏等. 上海高层建筑桩筏与桩箱基础设计理论. 上海: 同济大学出版社, 1989. 55~ 69.
- 8 何颐华, 金宝森等. 高层建筑箱型基础加摩擦桩的研究. 中国建筑科学研究院地基所, 1987.
- 9 O' Neill M W, Hawkins R A. Load Transfer Mechanisms in Piles and Pile Groups. ASCE, 1982, **108**(GT12): 1605~ 1623.
- 10 刘金砺, 黄强等. 软土中群桩承载性能的试验研究. 见: 第六届土力学及基础工程学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社等, 1991. 335~ 340.
- 11 刘金砺, 袁振隆. 粉土中钻孔群桩承台-桩-土的相互作用特性和承载力计算. 岩土工程学报, 1987, **9**(6): 1~ 15.

## Behavior of Applied Vertical Stress in Subsoil of Pile Group Foundations

*Lou Xiao-ming    Hong Yu-kang    Chen Qiang-hua*

(Department of Geotechnical Engineering, Tongji University)

**Abstract** Based on the results of pile- foundation- interaction analysis for four high rise buildings, a research on pile groups is made to reveal the load transfer of piles and the applied vertical stress distribution in subsoil. Analysis results indicate that pile groups are different from a single pile in load transfer behavior, and that pile group foundations are obviously different to equivalent deep foundations in applied vertical stress distribution in substratum. The applied vertical stress is used to calculate the deformation of subsoil. The results are in agreement with the deformation measured.

**Key words** pile group foundation, interaction analysis, applied vertical stress.