

文章编号: 1000-7598 (2011) 04-1138-06

超高层建筑桩筏基础的桩顶反力计算研究

巢 斯¹, 赵锡宏², 张保良², 姜文辉¹, 孔 娟³, 肖俊华⁴, 袁聚云³

(1. 同济大学 建筑设计研究院, 上海 200092; 2. 上海新华国际岩土技术有限公司, 上海 200092;
3. 同济大学 地下建筑工程系, 上海 200092; 4. 山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250100)

摘 要: 根据上海高 88 层、筏板厚度为 4 m 的金茂大厦和高 101 层、筏板厚度为 4.5 m 的上海环球金融中心桩筏基础的实测沉降资料, 论证超高层建筑的桩筏基础为弹性体。对以上两幢超高层建筑和正在建造中的高 121 层、筏板厚度为 6 m 的上海中心大厦的桩筏基础, 采用偏心受压公式和高层建筑与地基基础共同作用理论方法(混合法)进行详细对比计算, 论证按弹性体计算桩顶反力的合理性, 阐明《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008)的 3.1.8 条的正确性和合理性。期望能够改变过去按偏心受压公式计算桩顶反力的传统观念, 提高设计水平。

关 键 词: 超高层建筑; 桩筏基础; 桩顶反力

中图分类号: TU 473.1; TU 973

文献标识码: A

Study of computation of load on pile top of piled raft foundation for superhigh buildings

CHAO Si¹, ZHAO Xi-hong², ZHANG Bao-liang², JIANG Wen-hui¹,
KONG Juan³, XIAO Jun-hua⁴, YUAN Ju-yun³

(1. Architectural Design & Research Institute of Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Xinhua International Geotechnical Engineering Co., Ltd., Shanghai 200092, China; 3. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
4. School of Civil Engineering, Shandong Architectural University, Jinan 250100, China)

Abstract: Based on the settlement data of the piled raft foundation in 88-storey, 4 m thick raft of Jinmao Building and 101-storey, 4.5m thick raft of Shanghai World Financial Center (SWFC), it is demonstrated that piled raft foundation is a real elastic body. Meanwhile, the eccentric compression formula and method on interaction between superstructure and foundation (mixed method) are used to compute the load on pile top of piled raft foundation for two superhigh buildings just mentioned and 121-storey, 6 m thick raft of Shanghai Tower which is under construction and compare each other in detail. The computed results have shown that the mixed method used is feasible and reasonable. It is hoped that the article 3.1.3 in *China Technical Code for Building Pile Foundations* (JGJ 94-2008) can change the traditional conception to use the eccentric compression formula for computing the load on pile top of piled raft foundation.

Key words: superhigh building; piled raft foundation; load on pile top

1 引 言

对于超高层建筑, 竖向静荷载(力)有 3 部分: 建筑物的向下荷载, 向上的水浮力和向上的桩反力, 3 个竖向静荷载(力)的决定是否合理, 对建筑物的安全与经济非常重要。本文主要论述桩顶反力的计算。

多年来, 土木工程界一直沿用如下刚性体的偏心受压公式计算桩基反力:

$$P_i = \frac{P_t}{n} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x_i^2} \quad (1)$$

式中: P_i 为任一桩的桩顶的反力; P_t 为建筑物总荷载; n 为总桩数; M_x 、 M_y 分别为对 x 和 y 轴的力矩; x_i 、 y_i 为分别为第 i 根桩到 y 轴和 x 轴的距离。

式(1)等号右侧的第 1 项是建筑物总荷载除以桩数的平均反力, 第 2、3 项是由于风荷载或地震力作用下的力矩引起的桩顶反力(如果桩筏基础本身有偏心, 应包括在内)。对于超高层建筑, 式(1)

收稿日期: 2010-02-09

第一作者简介: 巢斯, 男, 1956 年生, 硕士, 教授级高工, 总工, 主要从事高层建筑和基础设计与研究。E-mail: tj-tongyuan@vip.sina.com

是否适用,应取决于桩筏基础是刚性体还是弹性体,这是关键所在;其次,控制结构设计的主要因素是风荷载,而不是地震力,这也被工程界所公认。但风荷载和地震力均为瞬时作用荷载,对于软土地区,控制一般深埋达 18~30 m 的超高层建筑的桩筏基础是否也是风荷载;另外,如果式(1)对超高层建筑的深埋桩筏基础不适用,应采用何种理论和方法计算桩顶反力。这是本文研究和讨论的主题。

式(1)的原意是把桩基当作刚性体。在提出桩筏基础当作刚性体的年代,采用筏基(或称承台)的面积很小,只不过几十平方米,桩数也是很少,几十根而已,而且较短。当作刚性体设计很实用,无可非议。可是,当今社会越来越涌现许多超高层建筑,采用厚筏桩基,在软土地区,往往又采用超长桩,例如,上海市高 88 层的金茂大厦和高 101 层的上海环球金融中心,筏板厚为 4.0~4.5 m,筏板基础面积为 3 500~6 200 m²,埋深达 18 m 以上,基坑桩长约 80 m,建筑高度超过 400 m,均按刚性体设计。在建的高 121 层的上海中心大厦,筏板厚为 6.0 m,筏板基础面积为 8 250 m²,埋深超过 30 m,桩长也超过 80 m,仍然如此,因此,应予进行论证上述公式的合理性。

2 超高层建筑桩筏基础的现场试验

时代在前进,科技在发展,对现场测试研究日益重视,早在 20 世纪 70 年代,南京水利科学研究所陈绪禄等^[1]对上海港二区散粮筒仓的桩筏基进行现场测试研究。80 年代,中国建筑科学研究院地基所何颐华等^[2]对湖北省高 22 层的外贸中心大楼的桩箱基础进行测试研究,接着,同济大学高层建筑与地基基础共同作用课题组在 2 年内完成 3 幢高层建筑的桩筏和桩箱基础进行系统的现场和理论研究^[3]。综合分析这些基础形状比较规则情况下的桩顶反力分布规律,更重要的是验证桩基的沉降形状呈正锅底形。也就是说,这些 2.5 m 厚基础板的桩不是刚性体。在 1997 年前建成的 88 层,高 420.5 m 的金茂大厦,主楼基础为桩筏基础,φ914 mm 钢管桩,桩长为 80 m,429 根,筏厚 4 m,筏板基础面积为 3 519 m²,基坑深度为 19.65 m,具有近 10 年的沉降观测资料,论证基底沉降是一个正锅形,见图 1。2008 年建成的 101 层,高 492 m 的上海环球金融中心,也有相似之处,该主楼基础也为桩筏基础,φ700 mm 钢管桩,桩长约为 80 m,1 177 根,而筏板厚为 4.5 m,筏板基础面积为 6 200 m²,基坑深度为 18.45 m,多年的沉降观测资料表明,论证

基底沉降也是一个正锅形,见图 2。这样,上海有这两个超高层和深埋的桩筏基础的沉降证明桩筏基础是弹性体,既是一个非常宝贵的资料,又是一个非凡的对弹性体的论证,无疑对上海超高层建筑的桩筏设计改革提供一个理论和实践基础。

3 按刚性体计算桩顶反力

3.1 金茂大厦

建筑物总荷载约为 3 GN,荷载是对称无偏心的,筏板也是对称的。桩筏基础的面积为 3 519 m²,桩数 429 根,平均单桩受力约为 7 000 kN,小于容许承载力 7 500 kN。

该裙房的桩筏基础下面设有过滤水层,不考虑水浮力。

3.2 上海环球金融中心

建筑物总荷载 $P_t=4.4$ GN,桩总数 $n=1\ 177$,基底面积 $A=6\ 200$ m²,考虑浮力 60%,即埋深 10 m 时,浮力为 $p_w A=98.1 \times 6\ 200=608\ 220$ kN,最大力矩 $M=28 \times 10^6$ kN·m, $y_i/\sum y_i^2=11\ 544$ m,单桩容许承载力为 4 300 kN。

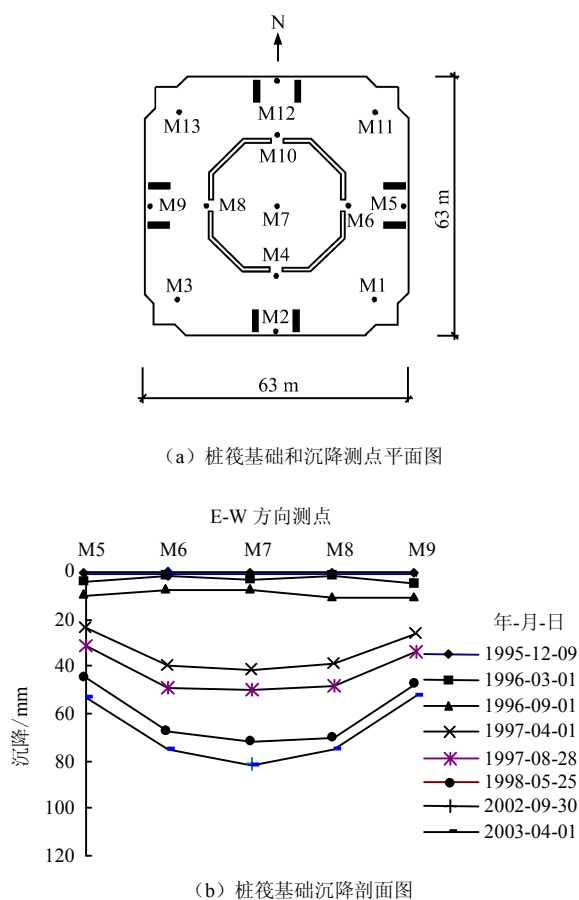
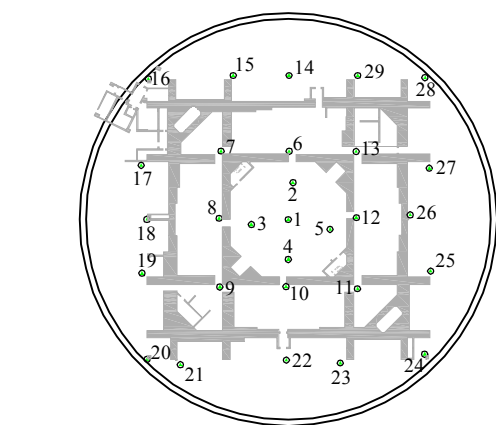
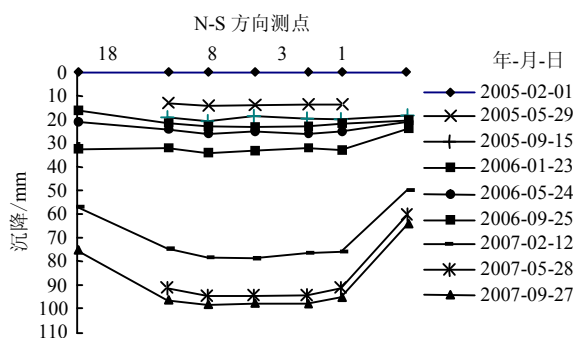


图 1 金茂大厦桩筏基础

Fig.1 Piled raft foundation of Jinmao Building



(a) 桩筏基础和沉降测点平面图



(b) 桩筏基础沉降曲线

图 2 SWFC 桩筏基础

Fig.2 Piled raft foundation of SWFC

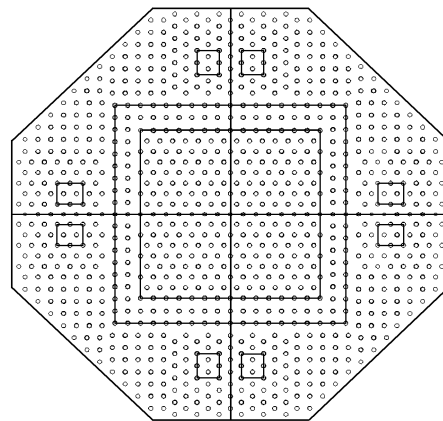
(1) 设计时考虑 60%浮力, 平均单桩桩顶反力 $P_i = (P_t - p_w A) / n = 3\,221 \text{ kN} < 4\,300 \text{ kN}$ 。

(2) 设计时考虑 60%浮力和力矩, 最大的桩顶反力 $P_i = (P_t - p_w A) / n + M y_i / \sum y_i^2 = 3\,221 + 2\,426 = 5\,647 \text{ kN} > 1.3 \times 4\,300 = 5\,590 \text{ kN}$ (小于 5%)。

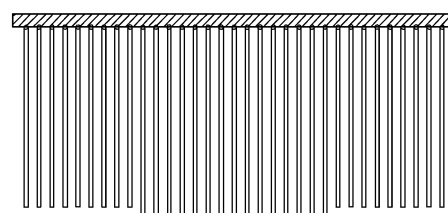
风载引起的力矩产生的桩顶反力占在静载下反力的近 80%。

3.3 上海中心大厦

该大楼为 121 层的超高层建筑的桩筏基础, 有别于金茂大厦和上海环球金融中心, 筏板基础上的核心筒, 巨型柱、小柱以及桩的布置如图 3 所示。两种桩长分别为 82、86 m, 直径均为 1 000 mm 的灌注桩 (桩底后注浆), 单桩容许承载力均取 10 000 kN, 桩数为 955 根。核心筒内桩长 86 m, 梅花形布置, 桩距为 $3d$ (d 为桩直径), 核心筒外面为 82 m, 桩距为 $3d \sim 4d$; 东南西北方向各两个巨型柱, 两对角线上各有两柱, 均为梅花形布置, 筏基的平面为八角形, 面积为 $8\,250 \text{ m}^2$, 筏板厚度为 6 m, 埋深为 30.5 m, 地下水离地面约 1 m。



(a) 平面图



(b) 剖面图

图 3 上海中心大厦桩筏基础图

Fig.3 Piled foundation of Shanghai Tower

按两种要求计算桩顶反力:

(1) 桩顶反力

无偏心时工况: 总荷载=1.35 静载+0.98 活载+0.98 浮力

$P_i = P_t / n = 9\,645\,253 / 955 = 10\,099.74 \text{ kN} > 10\,000 \text{ kN}$, 极微小超过容许承载力。

有偏心时工况: 总荷载= 1.20 静载+ 0.98 活载+ 1.4 风载+ 0.98 浮力

$P_i = \frac{P_t}{n} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x_i^2} = 8\,819.93 + 44.35 + 18.65 = 8\,883 \text{ kN} < 1.3 \times 10\,000 \text{ kN}$, 安全系数约为 1.5。

(2) 荷载组合下桩顶反力

①总荷载= 1.0 静载+ 1.0 活载+ 1.0 浮力

$P_i = (1.0 \text{ 静载} + 1.0 \text{ 活载} + 1.0H) \times 1.1 / n = [6\,585\,718 + 962\,919 - 973\,037] \times 1.1 / 955 = 7\,574 \text{ kN} < 10\,000 \text{ kN}$, 满足要求。

②总荷载= 1.0 静载+ 1.0 活载+ 1.0 浮力+ 1.0 风载 (RWDI 建议 24 种风况)

X 向力矩为 $39\,693\,110 \text{ kN} \cdot \text{m}$, Y 向力矩为 $43\,137\,698 \text{ kN} \cdot \text{m}$,

$\sum y^2 = 593\,469 \text{ m}^2$, $\sum x^2 = 618\,540 \text{ m}^2$,

$P_i = \frac{P_t}{n} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x_i^2} = 7\,574 + 4\,137 =$

11 711 kN < 1.2 × 10 000 kN, 仅仅满足要求。

风载引起的力矩产生的桩顶反力占在静载下的反力 54%。

③ 总荷载 = 1.0 静载 + 1.0 活载 + 1.0 浮力 + 1.0 地震力(百年一遇, 反应谱求得的频繁地震)

X 向力矩为 21 039 764 kN · m, Y 向力矩为 20 052 672 kN · m

$$\sum y^2 = 593\,469\text{ m}^2, \quad \sum x^2 = 618\,540\text{ m}^2,$$

$$P_i = \frac{P_i}{n} \pm \frac{M_x y_i}{\sum y_i^2} \pm \frac{M_y x_i}{\sum x_i^2} = 7\,574 + 1\,931 =$$

9 505 kN < 1.5 × 10 000 kN, 满足要求。

从以上 3 幢超高层大楼按刚性体的偏心受压公式的结果可见, 均能满足设计要求, 同时表明, 风载引起的力矩是控制桩顶反力的主要因素。

4 按弹性体计算桩顶反力

本节采用高层建筑与地基基础共同作用解析解和数值解结合方法^[4]对上海 3 幢超高层建筑计算分析。

4.1 金茂大厦

基本数据见 3.1 节, 引用文献[5]的计算结果如图 4 所示。由图可知, 按弹性体计算金茂大厦桩筏基础的桩顶反力, 不考虑浮力与考虑浮力的边缘反力分别为 8 500、7 400 kN, 跨中反力分别为 6 300、5 600 kN。因无偏心, 按刚性体的公式计算时不考虑浮力与考虑浮力的边缘反力分别为 7 000、5 531 kN, 故按弹性体比按刚性体的计算桩顶反力大。

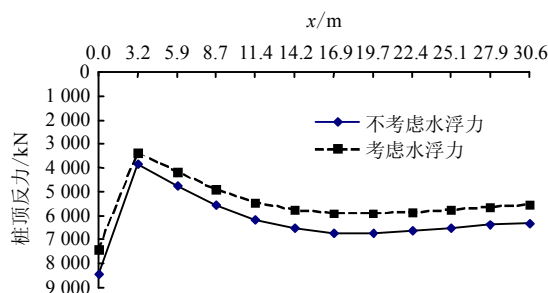


图 4 金茂大厦沿中心线的桩顶反力分布图

Fig.4 Distribution of load on pile group along center line in Jinmao Building

4.2 上海环球金融中心

基本数据见 3.2 节, 引用文献[5]的计算结果如图 5 所示。由图可知, 不考虑浮力与考虑浮力的边缘反力分别为 5 700、4 800 kN, 跨中反力分别为 3 000、2 500 kN。

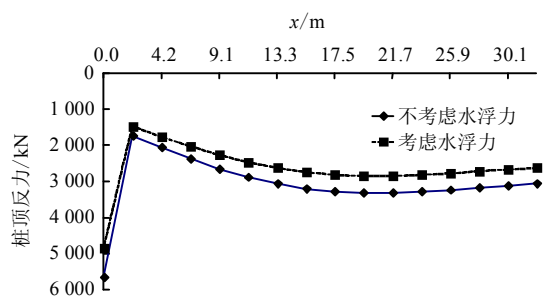


图 5 上海环球金融中心沿中心线的桩顶反力分布图

Fig.5 Distribution of load on pile group along center line of SWFC

当按刚性体的公式计算的边缘反力时, 不考虑浮力和考虑全浮力时分别为 6 164 kN、5 264 kN, 跨中反力分别为 3 738 kN、2 838 kN。因此, 不论考虑全浮力与否, 按刚性体计算比按弹性体计算反力大。

按刚性体和弹性体两种方法分别计算金茂大厦和上海环球金融中心的桩顶反力结果可见, 金茂大厦的基础无偏心受力, 无力矩影响, 按弹性体计算边缘的反力大, 是符合理论分析的; 上海环球金融中心的基础受风载引起的力矩影响, 按弹性体计算边缘的反力小, 也是符合理论分析的。

4.3 上海中心大厦

基本数据见 3.3 节。

(1) 按刚性体计算

为便于比较, 重复按 3.3 节中 (2) 计算桩顶反力的结果:

$$P_i = [6\,585\,718 + 962\,919 - 973\,037] \times 1.1 / 955 = 7\,574\text{ kN} < 10\,000\text{ kN}, \text{ 满足要求};$$

$P_i = 7\,574 + 4\,137 = 11\,711\text{ kN} < 1.2 \times 10\,000\text{ kN}$, 仅仅满足要求 (考虑风载);

$P_i = 7\,574 + 1\,755 \times 1.1 = 9\,505\text{ kN} < 1.5 \times 10\,000\text{ kN}$ 满足要求 (考虑地震)。

(2) 按弹性体计算

按照高层建筑与地基基础共同作用解析解与数值解 (混合法) 计算桩顶反力结果见图 6。

当考虑地下室刚度时, 桩顶最大反力在内筒边缘处, 为 1 1091 kN, 与内筒中心相差很小, 最小桩顶反力在边缘处为 8 755 kN, 当不考虑地下室刚度时, 桩顶最大反力在内筒, 内筒的桩顶反力均等, 为 1 0715 kN, 最小桩顶反力在边缘处为 8 958 kN。

从图 6 可见, 考虑与不考虑 5 层地下室的结构刚度对桩顶反力的影响, 两者相差很小。

比较图 4~6 可知, 不等桩长的上海中心大厦的桩顶反力分布与等桩长的金茂大厦和上海环球金融

中心的桩顶反力分布是不同的。对于不等长桩布置,按刚性体计算,边缘反力大,跨中小;按弹性体计算则相反,跨中大,边缘小,符合理论分析。

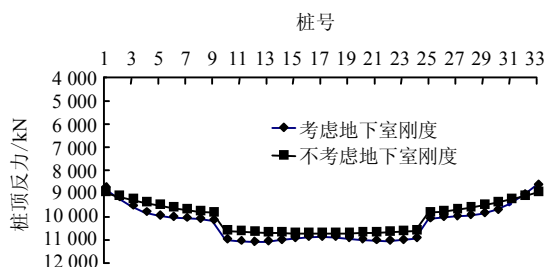


图6 上海中心大厦沿中心线桩顶反力分布图
Fig.6 Distribution of load on pile groups along center line in Shanghai Tower

5 讨论与结论

(1) 从高层建筑和超高层建筑桩筏基础的现场试验可见,桩筏基础为弹性体,不是刚性体,今后对桩筏基础应当按照弹性体理论和方法进行设计。这是对桩筏基础改革的主要途径。并且建议采用高层建筑与地基基础共同作用解析解与数值解(混合法)计算桩顶反力。

(2) 采用刚性体的偏心受压公式计算金茂大厦、上海环球金融中心和上海中心的桩筏基础的桩顶反力表明,风载是控制桩顶反力的主要因素。

采用弹性体的高层建筑与地基基础共同作用解析解与数值解(混合法)计算桩顶反力表明:对于等桩长,例如,金茂大厦和上海环球金融中心,反力分布接近拱形,这一结论与文献[3]一致,见式(2),

$$\left. \begin{aligned} P_c / P_{av} &= 1.32 \sim 1.50 \\ P_e / P_{av} &= 1.05 \sim 1.42 \\ P_i / P_{av} &= 0.40 \sim 0.86 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: P_c 、 P_e 、 P_i 和 P_{av} 分别为角桩、边桩、内部桩和平均桩反力。该成果一直为同行引用。特别指出:上海环球金融中心的实测也证明该成果仍然适用。

对于不等桩长,例如,上海中心大厦,反力分布是倒拱形,即正锅形。

图7可概括超高层建筑筒体结构桩筏基础等桩长和不等桩长的桩顶反力分布规律。

(3) 为了适应桩顶反力分布规律,使桩筏基础符合超高层建筑的受力状态,改善桩筏基础的地基变形、桩顶反力和筏板弯矩,早在20世纪国外已开始采用变桩长的设计,并有设计实例论证。在我国的《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)的3.1.8

条中明确提出变刚度调平设计,以节省投资。根据这个设计思路,为适应超高层建筑的桩筏基础设计,采用内刚外柔的设计方案,即强化核心筒区域桩基刚度(如适当增加桩长、桩径、桩数、采用后注浆等措施),相对弱化核心筒外围桩基刚度,(采用复合桩基,根据地层条件,减少桩长等措施)。对这样的桩筏基础,宜进行上部结构-承台-桩-土共同作用分析。按照共同作用混合方法计算上海中心大厦的不等桩长的结果,可表明我国规范3.1.8条的规定的正确性和合理性,期望该规定能改变按偏心受压公式计算桩基反力的传统观念,在桩筏基础设计中发挥巨大作用。

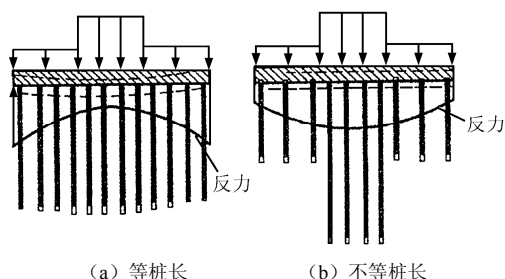


图7 超高层筒体结构的桩顶反力分布
Fig.7 Distribution of load on pile groups for super-tall building with tube structure

(4) 从以上3幢超高层大楼按刚性体的偏心受压公式的计算结果可见,风载是控制桩顶反力的主要因素。但根据上海高60层,埋深为19m,桩长为75m的长峰商场的现场实测钢筋应力变化^[6]以及上海环球金融中心的桩顶反力,钢筋应力和土压力的变化并无特殊现象表明,难于相信风载为控制桩顶反力的主要因素。可惜,这两个工程的现场实测,前者在施工早期测试设备已被破坏,后者原定在2009年夏天对风载进行实测和录像,测试设备也全部被破坏,无法论证。然而,笔者认为,风载对上海埋深18~30m的超高层建筑的桩筏基础不是主要因素,而且可能可忽略不计。至于将来是否考虑风载引起的力矩产生的桩顶反力的问题可另行讨论。

参考文献

- [1] 陈绪禄. 群桩基础原体观测—上海港二区散粮筒仓原观测报告[R]. 南京: 南京水利科学研究所, 1979.
- [2] 何颐华, 金宝森, 王秀珍, 等. 高层建筑箱形基础加摩擦桩的研究[R]. 北京: 中国建筑科学研究院地基所, 1987.

-
- [3] 赵锡宏, 等. 上海高层建筑桩筏和桩箱基础设计理论[M]. 上海: 同济大学出版社, 1989.
- [4] ZHAO X H. Theory of design of piled raft & piled box foundations for tall buildings in Shanghai[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990.
- [5] 龚剑, 赵锡宏. 对 101 层上海环球金融中心桩筏基础性状预测[J]. 岩土力学, 2007, 28(8): 1695—1699.
- GONG Jian, ZHAO Xi-hong. Prediction of behavior of piled raft foundation for Shanghai World Financial Center of 101-storey[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(8): 1695—1699.
- [6] DAI B B, AI Z Y, ZHAO X H, et al. Field experimental studies of super-tall building, super-long piles and super-thick raft foundation in Shanghai[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(3): 406—413.
- 戴标兵, 艾智勇, 赵锡宏, 等. 上海的超高层超长桩超厚筏基础的现场测试研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(3): 406—413.