维普资讯 http://www.cqvip.com

第25卷第7期 岩 土 力 学 Vol.25 No.7
2004年7月 Rock and Soil Mechanics Jul. 2004

文章编号：1000－7598－(2004)07－1171－04

按复合桩基设计锚杆静压桩处理地基

李 韬[1]，毕兆云[2]，高大钊[1]

（1.同济大学 地下建筑与工程系，上海 200092，2.山东莱芜市公路局，山东 莱芜 271100）

摘 要：基于复合桩基设计理论，针对一采用锚杆静压桩处理烂尾楼地基的工程实例，分析了基础的承载力与沉降随锚杆桩数量的变化，对设计方案进行了优化，同时，讨论了锚杆桩施工后桩与土体的荷载分担和基础整体安全度。分析表明：采用复合桩基的设计理论，可以减少地基处理需要桩数，节约经济投入。

关 键 词：锚杆静压桩；复合桩；地基

中图分类号：TU 473 **文献标识码**：A

Foundation treatment using jacked archor pile with composite pile design concept

LI Tao[1], BI Zhao-yun[2], GAO Da-zhao[1]

(1.Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2.Highway Bureau of Laiwu city, Laiwu 271100, China)

Abstract: The design concept of composite pile is introduced into foundation treatment using jacked archor pile. The development of foundation bearing capacity and settlement with number of archor piles is also considered. Thus the plan of foundation treatment is optimized.Simuteniously, the load sharing contribution of soil and the whole safety of foundation are discussed. It is shown that the number of piles needed can be reduced, thus the investment can be saved.

Key words: jacked archor pile; composite pile; foundation

1 引 言

锚杆静压桩是锚杆和静压桩结合而成的一种桩基施工工艺，它是通过在原基础上埋设受拉锚杆，利用锚杆固定压桩架以建筑物所能发挥的自重作为压桩反力，用电动液压千斤顶将桩段从基础预留或者开凿的压桩孔内，逐段压入地基中，然后，将桩和基础连在一起，锚杆静压桩加固机理是利用锚杆桩将上部结构的部分荷载通过桩身和桩尖传入地基较深的持力层，减轻基础持力层的负载，从而，达到控制建筑物过大沉降以及不均匀沉降的目的。复合桩基设计方法是近年来常用的一种桩基础设计方法，考虑群桩、承台、地基土体的共同作用，桩长较短、桩径较小、桩距一般大于6倍桩径。目前的理论一般认为，复合桩基中单根桩可以达到单桩的极限承载力状态，超过群桩承载力和的荷载部分由土体分担，控制标准为承载力和沉降双重控制。

采用锚杆静压桩方法对既有建筑地基进行补强加固，要考虑到技术可行性和经济合理性，在满足安全度要求的基础上尽量减少投资，充分利用已有地基承载力和抵抗变形的能力。由此看来，采用复合桩基的设计方法对加固方案进行分析比较是比较合适的。本文将介绍复合桩基设计方法用于分析锚杆静压桩加固地基的主要思想，并将此方法应用于上海一工程实例中。

2 复合桩基设计方法

2.1 复合桩基承载力计算

复合桩基考虑群桩、承台、地基土体的共同作用，桩距一般大于6倍桩径。目前的理论一般认为，复合桩基中单根桩可以达到单桩的极限承载力状态，承台下土体承担的荷载按照下式计算：

收稿日期：2002-04-04 修改稿收到日期：2003-05-30
作者简介：李韬，男，1977年生，博士生，目前主要从事桩基础研究。

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$Q_{承}=Q_{总}-nP_u \tag{1}$$

复合桩基极限承载力计算公式为

$$P_u=\eta_{sp}nP_u+\eta_c f_{su}A_c \tag{2}$$

式中 n 为桩数；P_u 为单桩极限承载力（kN）；f_{su} 为承台极限承载力（kPa）；A_c 为承台面积（m^2）；η_{sp},η_c 分别为群桩效应系数和承台效应系数，当平均桩距大于 6 倍桩径时，均近似取 1。

地基极限承载力的一般表达式为

$$f_{su}=N_B\gamma_B B+N_D\gamma_D D+N_C c \tag{3}$$

式中 γ_B 为地基持力层土的重度，地下水位以下取浮重度（kN/m^3）；γ_D 为基础底面以上土层的加权平均重度（kN/m^3）；B 为基础底面宽度（m）；D 为基础埋置深度（m）；c 为土的内聚力（kPa）；N_B，N_D，N_C 均为承载力系数，并为土的内摩擦角 ϕ 的函数。

上海市工程建设规范建议采用汉森公式，即

$$\left.\begin{aligned}N_D&=N_\phi e^{\pi\tan\phi}\\N_B&=1.5\left(\frac{N_D-1}{2}\right)\tan\phi\\N_C&=(N_D-1)\cot\phi\end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中 $N_\phi=\tan^2\left(45^\circ+\frac{\phi}{2}\right)$；$N_B$，$N_D$，$N_C$ 可以按照规范查表得到。

单桩极限承载力可以按照下式计算：

$$P_u=P_{su}+P_{pu}=\sum_{i=1}^{n}sl_i p_{si}+A_p p_p \tag{5}$$

式中 P_{su} 为桩侧极限承载力（kN）；P_{pu} 为桩端极限承载力（kN）；p_{si} 为单桩极限侧摩阻力（kPa）；p_p 为单桩极限端阻力（kPa）；s 为桩截面周长（m）；l_i 为土层厚度（m）；A_p 为桩端截面积（m^2）。

2.2 复合桩基沉降计算

复合桩基的沉降计算原则是比较 $P-\sigma_c A_c$ 与 kP_{uk} 值，其中：P 为总荷载（kN）；σ_c 为承台底面处土的自重应力（kPa）；k 为承台下桩数；P_{uk} 为单桩极限承载力标准值（kN）；G_{pk} 为扣除浮力作用后的桩自重标准值（kN/m^3）；$P-\sigma_c A_c\leqslant kP_{uk}$ 时，复合桩基产生的沉降即为 k 根桩在桩顶附加荷载为 $(P-\sigma_c A_c)/k+G_{pk}$ 作用下产生的沉降。$P-\sigma_c A_c\geqslant kP_{uk}$ 时，复合桩基沉降由两部分组成，一部分为 k 根桩在桩顶附加荷载为 $P_{uk}+G_{pk}$ 作用下产生的沉降，可参照上海市工程建设规范《地基基础设计规范》6.4.2 条计算[1]，沉降计算经验系数宜取 1.0；另一部分为承台底面附加荷载为 $P-\sigma_c A_c-kP_{uk}$ 作用下产生的沉降，可以按照 4.3.1 条计算。

根据上海市工程建设规范[1]规定，复合桩基最终沉降量计算采用以 Mindlin 应力公式为依据的单向压缩分层总和法计算：

$$\left.\begin{aligned}s&=\psi_m\sum_{t=1}^{T}\frac{1}{E_{s,t}}\sum_{i=1}^{n_t}\sigma_{z,t,i}\Delta H_{t,i}\\\sigma_z&=\frac{Q}{L^2}\sum_{j=1}^{k}[\alpha I_{p,j}+(1-\alpha)I_{s,j}]\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

式中 T 为在沉降计算点处压缩层范围内自桩端平面往下的土层数；$E_{s,t}$ 为桩端平面下第 t 层土在自重压力至自重压力加附加压力作用时的压缩模量（MPa）；n_t 为桩端平面下第 t 层土的单向压缩计算分层总数；$\sigma_{z,t,i}$ 为桩端平面下第 t 层土的第 i 个分层处土体的竖向附加压力（kPa）；$\Delta H_{t,i}$ 为桩端平面下第 t 层土的第 i 个分层的层厚（m）；α，$1-\alpha$ 分别为桩的端阻力和侧阻力占沉降计算荷载的比，α 近似按单桩的端阻比 ρ_p 取值；$I_{p,j}$，$I_{s,j}$ 分别为第 j 根桩桩端阻力和桩侧摩阻力对应力计算点的应力影响系数，据 Mindlin 解计算；Q 为单桩沉降计算荷载（kN）；L 为桩长（m）；k 为总桩数；ψ_m 为桩基沉降计算经验系数，此处取 1.0。

压缩层厚度自桩端所在平面至土层附加应力等于土层自重应力的 10 %处止。

采用以 Mindlin 应力公式为依据的单向压缩分层总和法进行桩基最终沉降量计算时，须进行桩端平面下地基中竖向附加应力的计算。对于 k 根桩组成的桩基，桩端平面以下地基中任意一点的竖向应力可以按下式表示：

$$\sigma_z=\sum_{i=1}^{k}(\sigma_{zp,i}+\sigma_{zs,i}) \tag{7}$$

式中 $\sigma_{zp,i},\sigma_{zs,i}$ 分别为第 i 根桩的桩端阻力和桩侧摩阻力在计算点产生的附加应力。

采用 Geddes 基于 Mindlin 应力公式积分得出的单桩荷载在半无限体中的应力解析式，并假定群桩中各桩具有完全相同的受荷特性，按简单叠加法原则，即可计算群桩荷载在地基中产生的竖向应力，则公式也可以用下式表示：

$$\sigma_z=\frac{Q}{L^2}\sum_{j=1}^{k}[\alpha I_{p,j}+(1-\alpha)I_{s,j}] \tag{8}$$

根据计算荷载，由应力公式计算得到的竖向附加应力后，可采用单向压缩的分层总和法进行沉降计算：

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$s=\sum_{i=1}^{T}\frac{\sigma_{z,i}}{E_{s,i}}\Delta H_i=\sum_{i=1}^{T}\frac{\sigma_{zp,i}+\sigma_{zs,i}}{E_{s,i}}\Delta H_i=\frac{Q}{L^2}\sum_{i=1}^{T}\Delta H_{i,i}\sum_{j=1}^{k}[\alpha I_{p,i,j,i}+(1-\alpha)I_{s,i,j,i}] \quad (9)$$

3　计算程序编制

根据以上思路与方法编制了计算程序，程序流程如下：

（1）计算复合桩基的地基土极限承载力标准值、单桩极限承载力标准值以及复合桩基整体的极限承载力；

（2）确定基础与上部结构总荷载，并据此计算复合桩基整体安全系数；

（3）比较 $P-\sigma_c A_c$ 与 kP_{uk} 的大小，若 $P-\sigma_c A_c \leqslant kP_{uk}$，则计算每根桩分担的上部荷载 $(P-\sigma_c A_c)/k+G_{pk}$；

（4）计算桩端土体内土的自重应力 $\sigma_{c,i,j}$

（5）计算第 j 根桩上作用荷载 Q，产生的 $I_{p,j}, I_{s,j}$ 为第 j 根桩的桩端阻力和桩侧摩阻力对应力计算点的应力影响系数（j=1，2，…，k），计算该桩对计算点产生的附加应力 $\sigma_{z,i,i}$，给出各桩坐标。求出计算点下不同深度处附加应力 $\sigma_{z,i,i}$；

（6）确定 $\sigma_{z,i,j}<>0.1\sigma_{c,i,j}$ 时的深度，给出压缩层厚度并进行分层；

（7）采用分层综合法进行最终沉降量计算；

（8）若 $P-\sigma_c A_c > kP_{uk}$，按桩顶附加荷载为 $P_{uk}+G_{pk}$ 的 k 根桩作用下产生的沉降，转第步骤(5)，另一部分为承台底面附加荷载为 $P-\sigma_c A_c-kP_{uk}$ 作用下产生的沉降，计算并与第一部分累加；

（9）输出结果，结束计算。

4　工程实例

4.1　工程概况

上海市某 5 单元多层住宅烂尾楼工程，始建于 1993 年，采用天然地基，建至一层后停工，2002 年被另一单位接盘。根据现行的上海市工程建设规范[1]规定，需要对该楼盘基础承载力补强加固，确定采用锚杆静压桩的方法。锚杆桩截面 200 mm×200 mm，长 16 m。若按照传统桩基设计方法，不考虑土体承担荷载，则是不经济的，因此采用复合桩基的设计方法进行了计算和方案优化设计。

根据上海市工程建设规范[1]规定，复合桩基整体安全系数在 2.0 以上，建筑物计算最终沉降量在 15 cm 以内是安全的。据此，可以对建筑物基础所要布置的锚杆静压桩数量和布局进行比较分析，选择最优方案。根据本工程施工至一层后中断的情况，故沉降控制可适当小于 15 cm。

4.2　计算与方案设计

采用上述方法和对不同的锚杆桩加固方案进行了计算比较。表 1 中给出了对应于不同桩数承载力与安全度计算结果，同时给出了土体分担比，也给出了平面内不同计算点处的沉降，其中 1 号点为角点，2 号点为长边中点，3 号点为建筑物中心点。

根据表 1 可以得到桩数与最大沉降量的关系曲线见图 1。图 2 为土体荷载分担比与桩数的关系。从图中可以看到，若按照安全度与沉降的双重控制设计沉降控制复合桩基，当桩数达 160 根左右的时候，沉降已经完全满足要求。而从图 2 中可以发现，桩数为 160 根时，土的分担比较小，约为 0.05，不利于充分利用土的承载力。因此，桩数可适当的少于 160 根[2]。为安全起见，实际施工采用了 160 根桩。

表 1　不同桩数下数值计算计算结果

Table 1　Predicted results at different number of piles

桩数	总荷载	总承载力	土承担荷载	土荷载分担比	总安全系数	测点沉降/cm		
n	Q/kN	Q_u/kN	/kN		K	1 号	2 号	3 号
0	102 480	152 983	102 480	1.0	1.49	37.6	75.8	76.2
40	102 480	174 454	69 310	0.68	1.7	28.3	56.8	56.9
80	102 480	195 923	47 839	0.47	1.91	18.9	38.5	39.6
100	102 480	206 658	37 105	0.36	2.01	13.8	30.9	31.9
120	102 480	217 394	26 370	0.26	2.12	9.2	22.7	24.8
144	102 480	230 275	13 488	0.13	2.25	4.4	12.9	15.1
162	102 480	239 937	3 826	0.04	2.34	2.75	8.3	10.6
182	102 480	250 672			2.45	2.74	7.9	10.4
200	102 480	260 334			2.54	2.74	7.9	10.3

维普资讯 http://www.cqvip.com

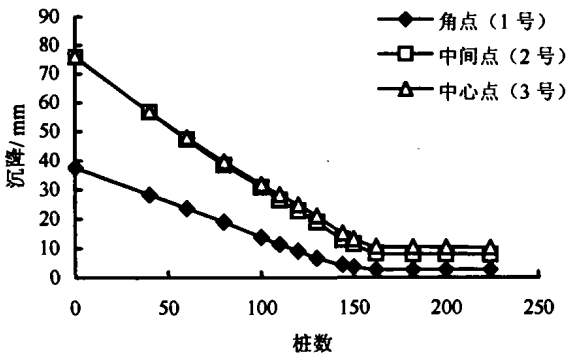


图 1 沉降与桩数关系曲线

Fig.1 Predicted curves of settlement at different number of piles

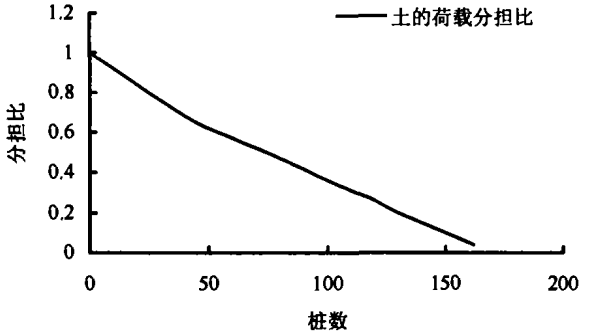


图 2 土的荷载分担比与桩数关系曲线

Fig.2 Predicted ratios of load carried by soil at different number of piles

目前，建筑物上部结构已经竣工，建筑物角点沉降为 1.3 cm、长边中点观测沉降量为 3.2 cm，根据沉降观测趋势预计，对应于该两实测点的最终沉降量分别为 2.4 cm 和 6.5 cm。实测结果表明，本设计满足实际承载力和变形要求。

5 结 语

本文采用复合桩基的设计理论，对一个采用锚杆静压桩处理烂尾楼地基的工程实例做了分析。分析表明，按照复合桩基的方法设计锚杆静压桩进行地基加固是合理可靠的，并能够对设计方案进行优化，充分利用天然地基承载力，采用最优桩数，可避免经济上的浪费；按照复合桩基设计方法进行数值计算，可以得到桩数与沉降关系曲线、土的分担比变化曲线，据此可以得到最优压桩数量。这个思路对今后类似工程的施工具有一定实用价值。

参 考 文 献

[1] DGJ08-11-1999. 上海市工程建设规范地基基础设计规范[S].

[2] 高大钊. 高层建筑桩基础的安全度与可靠性评价[A]. 21 世纪高层建筑基础工程[C]. 史佩栋, 高大钊主编. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001. 86－95.

投稿须知

针对来稿中出现的若干问题，例如同一单位或研究课题组中，不同的作者所投来的稿件内容雷同；作者一稿多投；一稿多名作者对论文内容意见不同，个别作者抄袭他人研究成果引起的矛盾和纠纷等，今后为避免上述问题的发生，凡投到本刊的论文一经录用，要求作者在承诺书上签字并及时返回编辑部，本刊只有在收到承诺书后才安排编辑、排版。具体承诺内容为：

1. 拟发表的论文没有抄袭、剽窃他人成果，对引用他人的成果有明确的说明；

2. 对有多名作者的论文，已征得署名者本人同意，并将录用稿件告知承担该项研究的负责人；

3. 所录用的论文没有一稿多投和重复发表；

4. 文责及违反上述自律行为所引起的一切矛盾与纠纷由论文第一署名人自负；

5. 由于本刊为中国科技论文统计源期刊（中国科技核心期刊），所发表的论文被“万方”数据库、清华光盘版全文收录；其部分论文题目、作者姓名、作者单位名、关键词等英文信息为“EI comendex”收录，故凡在本刊上发表的论文，本刊认为作者默认同意加入以上数据库，论文的稿费由编辑部一次性发放。

《岩土力学》编辑部

2004 年 6 月