

高层建筑应用长 - 短桩复合地基的现场试验研究

Field study on behavior of composite piled raft foundation for high - rise buildings

陈龙珠, 梁发云, 黄大治, 王国才
(上海交通大学 建工学院安全与防灾工程研究所, 上海 200030)

摘要:对采用带垫层的长 - 短桩复合地基的 1 幢 14 层小高层建筑, 在建造和使用过程中观测了长桩、短桩和地基土的受力状况以及基础沉降的变化, 并由此分析了长 - 短桩复合地基中的桩 - 土荷载分担特性、桩 - 土共同作用机理和荷载 - 沉降特性, 所得结论可为进一步的理论研究及工程设计提供有益的参考依据。

关键词:高层建筑; 长 - 短桩复合地基; 褥垫层; 荷载分担; 沉降

中图分类号: TU 472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000 - 4548(2004)02 - 0167 - 05

作者简介:陈龙珠(1962 -), 男, 安徽枞阳人, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土动力学、基础工程及地基处理、工程结构振动、无损检测技术、城市综合防灾减灾等土木工程安全与防灾领域的科研与教学工作。

CHEN Long-zhu, LIANG Fa-yun, HUANG Da-zhi, WANG Guo-cai

(School of Civil Engineering and Mechanics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: To mobilize the bearing capacity of subsoil sufficiently, the long-short composite piled raft foundation with cushion was applied in a 14 - storeyed high-rise building. The load sharing among piles and soil as well as the settlement of foundation varied with change of superstructure loads were observed in construction and in the early service. The behavior of this composite foundation including load-settlement relations, loads sharing characters and interaction mechanism of piles and soil were analyzed in detail. The conclusions of this paper were useful for further theoretical studies and engineering design.

Key words: high-rise building; composite piled raft foundation; cushion; load sharing; settlement

0 引 言

在满足工程要求的前提下, 如何减少桩基础中的桩数是近年来岩土工程界致力探索的课题^[1,2]。上海近年来采用的控制沉降复合桩基^[3], 较充分地利用了地基土的承载力, 经济效益明显。但这种沉降控制复合桩基限于 8 层以下多层建筑, 如何在日益增多的小高层建筑中应用尚处于探索阶段。随着实践和理论的发展, 长 - 短桩复合地基的概念逐渐被提出并应用于工程实践中^[4,5]。这种新型复合桩基的设计思想是采用短桩对基础下的软弱土层进行加固, 提高浅层土的承载力; 而长桩则落在强度较高、压缩性较小的持力层上, 将荷载通过桩身向地基深处传递, 达到控制基础沉降的目的。一般短桩采用柔性桩, 长桩采用刚性桩较为经济。此外, 为了防止承台脱空, 充分发挥桩间土的承载能力和调整桩、土应力分担, 可在承台下设置褥垫层, 形成本文拟研究的带垫层长 - 短桩复合地基。目前, 这种长 - 短桩复合地基在浙江等软土地区已成功应用于一些多层和小高层建筑中。工程实践证明, 这种新型复合地基能有效地减小基础沉降, 协调地基强度与变形的关系, 可取得较为良好的经济效益。

长 - 短桩复合地基的理论研究明显落后于工程实践, 目前尚无比较成熟的分析方法供设计使用。因此,

要稳步推广应用和发展长 - 短桩复合地基技术, 就必须对它的实际工程性状进行系统的研究。为此, 本文通过对 1 幢 14 层建筑的现场原位试验, 观测加载过程中长桩、短桩和地基土的受力状况以及基础沉降的变化情况, 从而分析长短桩复合地基中的桩 - 土荷载分担特性、桩 - 土共同作用机理和荷载 - 沉降特性等。

1 工程概况与试验方法

该工程位于杭州市钱塘江北岸的南星桥, 设人防地下室 1 层(基坑开挖深度约 4.5 m), 地面以上 14 层, 采用壁式框架 - 剪力墙结构。表 1 中的工程勘察资料表明, 地基中存在着由古江堤护坡形成的块石混(粉)砂土夹层(③_夹)。现场试打桩施工发现, 原设计采用的钢筋混凝土钻孔灌注桩在③_夹层中钻孔难度大、速度慢。为解决这一问题, 将该建筑的基础设计方案改为长 - 短桩复合地基, 其中短桩为间隔 1.2 m、按方形布置的 $\phi 426$ 振动沉管砂石桩, 桩长以进入夹层后难以继续贯入为准(平均有效桩长约 6 m), 要求与地基土形成的复合地基承载力标准值不低于 200 kPa; 同时, 在上部结构荷载较集中处设 $\phi 457 \times 12$ 钢管桩 29 根,

基金项目: 上海市教育发展基金会曙光计划项目(2001sg013)

收稿日期: 2003 - 03 - 26

其有效桩长约 36 m (桩端持力层为强风化沉凝灰岩), 由钢板封闭的桩顶与地下室底板间设置 200 mm 厚的碎石垫层和 70 mm 厚的 C10 素混凝土垫层, 以利于较充分地发挥砂石桩复合地基的承载力。具体桩位布置见图 1。

桩复合地基的工程性状, 对该楼进行了较为全面的现场监测, 其中包括: ①砂石桩单桩复合地基静载试验; ②钢管桩高应变法动测; ③基底压力(含孔隙水压力)监测; ④基础沉降观测。各观测点位置如图 1 所示。在基底压力观测中, 为保证长期观测的可靠性, 采用了钢弦式压力盒和应变计。

为评价其是否满足工程设计要求, 并研究长 - 短

表 1 地基土主要物理力学指标与设计参数

Table 1 Geologic information and main design parameters for subsoil

层号	岩土名称	层厚 /m	含水率 /%	标贯击数	地基承载力标准值/kPa	预制桩侧摩阻力/kPa	预制桩端阻力/kPa
①	杂填土	0.8~3.7	—	—	30	—	—
②	黏质粉土	0.5~3.2	29.5	23	160	45	—
③ ₋₁	黏质粉土	0~11.6	31.6	8	100	22	—
③ ₋₂	粉砂	0~12.3	30.5	10	130	35	—
③ _夹	块石混粉/砂土	0.5~8.2	—	10	130	35	—
④	粉细砂	0.9~15.6	26.3	17	170	45	—
⑤	淤泥质粉质黏土	0~5.6	36.6	5	95	20	—
⑥ ₋₁	砂质粉土	0~7.5	25.4	17	170	45	3600
⑥ ₋₂	含卵石砾砂	0~10.2	—	20	190	50	3800
⑥ ₋₃	粉土	0~3.9	—	23	200	60	4000
⑦ ₋₁	全风化沉凝灰岩	4.3~11.2	39.7	—	210	65	3000
⑦ ₋₂	强风化沉凝灰岩	1.2~23.9	—	—	300	90	5000

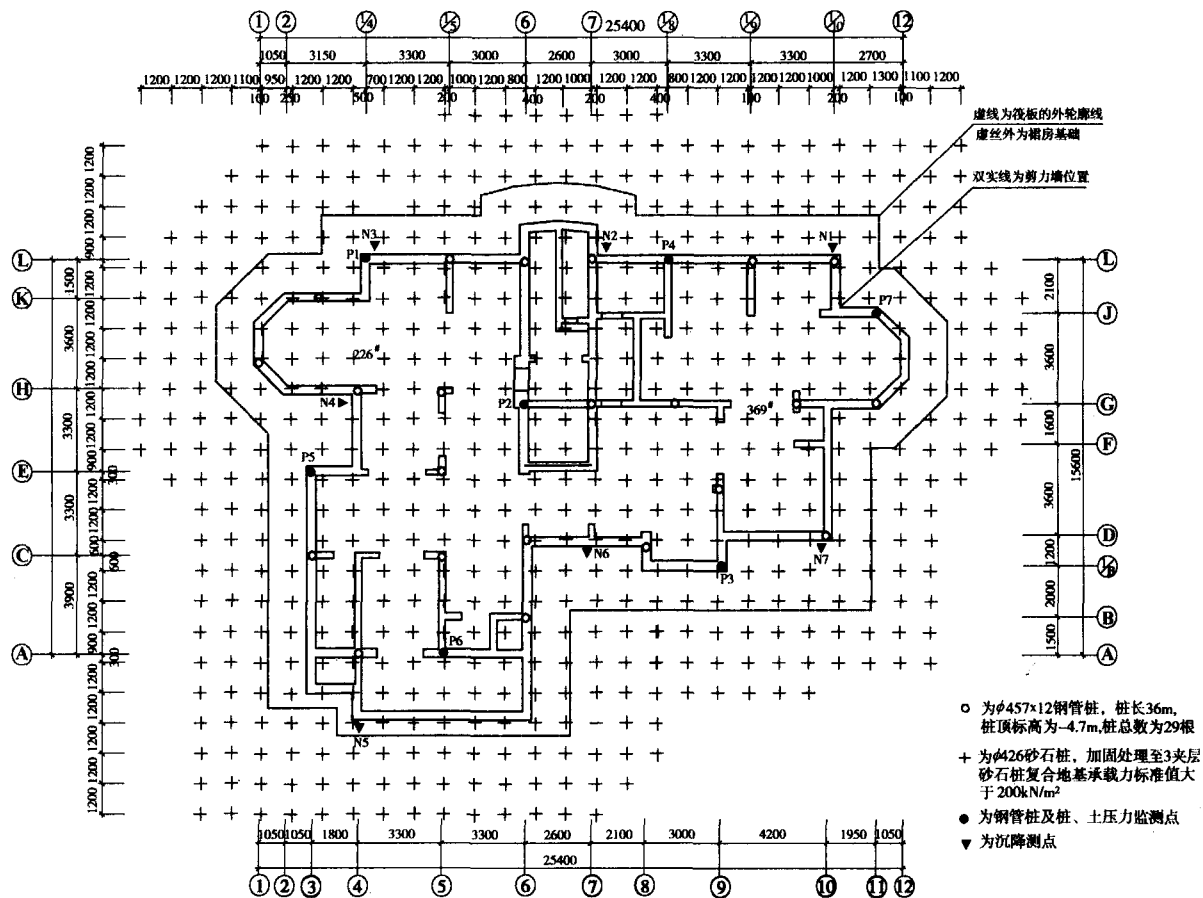


图 1 桩位及测点布置

Fig.1 Layout of piles and measuring points

2 实测试验数据

2.1 砂石桩单桩复合地基静载试验

试验采用慢速荷载维持法,测得两处砂石桩复合地基的承载力标准值分别为 245 kPa(226# 砂石桩)和 308 kPa(369# 砂石桩),满足工程设计要求。

2.2 钢管桩的高应变法动测

在基坑开挖见底后,对⊙轴线上的两根钢管桩进行了高应变法动测,由曲线拟合法推算出单桩极限承载力和端阻力。根据动测结果,钢管桩的单桩极限承载力平均值为 3200 kN,其中桩端阻力约为 700 kN,属端承摩擦桩。

2.3 基础沉降监测

从 2000 年 7 月 25 日第 4 层楼板浇注时开始观测基础沉降,至 2001 年 12 月 14 日房屋交付使用,共观测 21 次。基础沉降随时间的变化如图 2 所示(与 N_6 沉降曲线相接近的 N_2 和 N_4 点未在图中绘出)。在最后一次观测时,各测点沉降速率均小于 0.01 mm/d(N_7 测点最大,为 0.008 mm/d),表明基础沉降已趋于稳定。

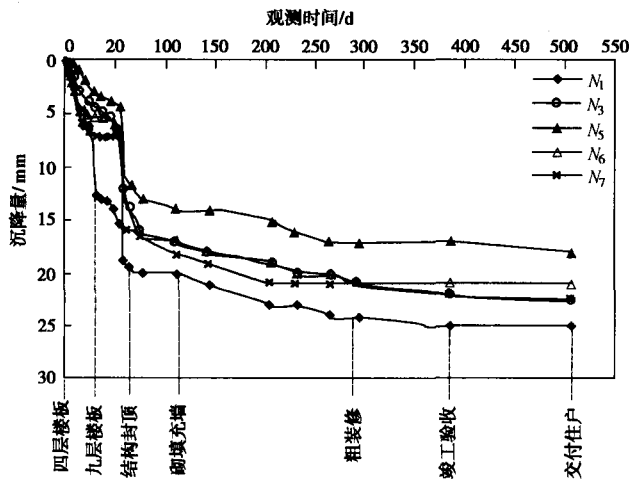


图 2 基础沉降随时间的变化关系

Fig.2 Curves of observed settlement vs. time

2.4 复合地基基底压力监测

从 2000 年 5 月 30 日浇好基坑的垫层开始观测,至 2002 年 7 月 3 日,共计观测 57 次。钢管桩、砂石桩及地基土受力情况随工程进度的变化关系如图 3 至图 5 所示,计算中已扣除实测基底水压力。

3 试验结果分析

3.1 有关的分析参数

基础筏板面积为 446.8 m²,标准层面积为 329.5 m²,屋顶中部机房面积 120 m²;基础筏板顶面建筑标高为 -3.60 m,地下室、1 层、2~14 层高度分别为 3.60、

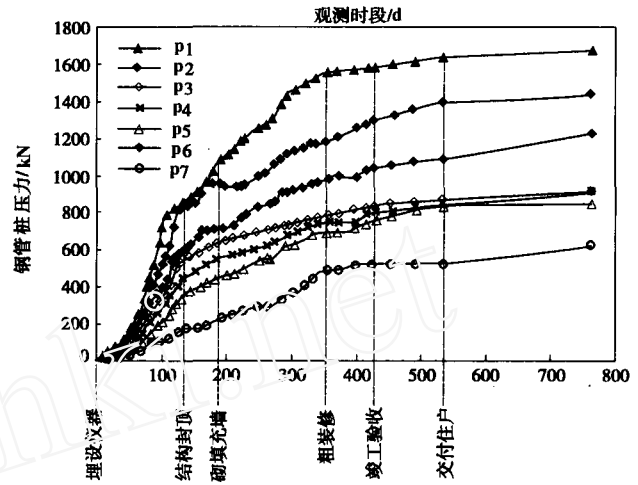


图 3 钢管桩受力变化

Fig.3 Variation of load sharing for steel-pipe pile

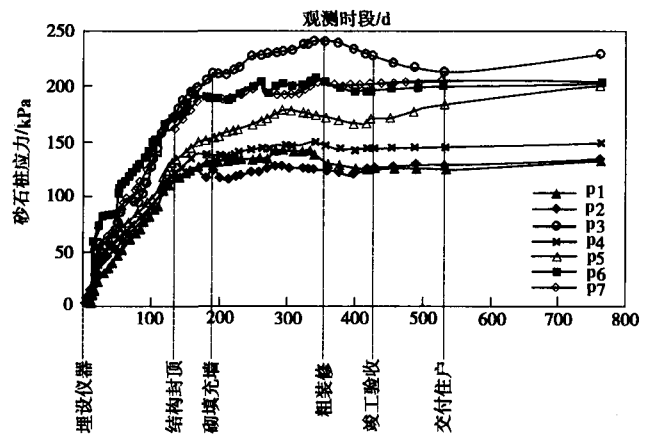


图 4 砂石桩应力变化

Fig.4 Stress variation of gravel piles

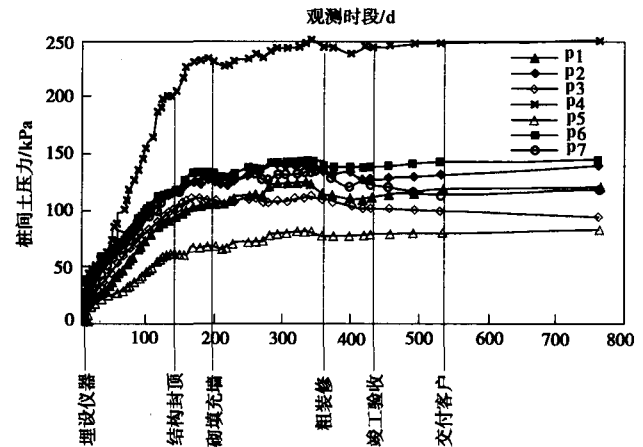


图 5 桩间土应力变化

Fig.5 Stress variation of subsoil

3.85 和 3.00 m,屋顶机房高度 5.10 m。基础筏板、底层和顶层楼板厚度分别为 800、250 和 120 mm,其他各

层均为 110 mm。地上、地下剪力墙厚度分别为 250 和 350 mm。

位于筏板作用范围内的砂石桩经折算为 340 根,其总截面面积为 48.5 m²(图 1 所示的砂石桩总数为 577 根,虚线范围内为筏板,其外侧为裙房基础),砂石桩的面积置换率为 10.8%。钢管桩总数为 29 根,钢管桩总截面面积为 4.8 m²。因此,扣除砂石桩和钢管桩的面积后,筏板下地基土的有效面积约为 393.5 m²。

3.2 试验结果整理

根据图 3 至 5 的观测结果,将钢管桩、砂石桩和桩间土的平均应力绘于图 6,并将钢管桩、砂石桩与地基土的平均应力比绘于图 7 中。

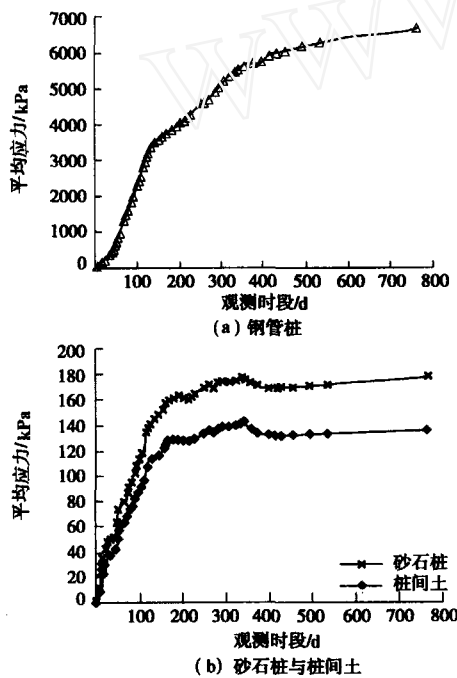


图 6 钢管桩、砂石桩与桩间土的平均应力

Fig.6 Average stress of steel-pipe piles, gravel piles and subsoil

根据图 6 得到的桩、土平均应力,图 8 给出了钢管桩、砂石桩及地基土各自所承担的荷载随工程进度的变化关系,其中的实测总荷载是指实测的钢管桩、砂石桩及地基土各自所承担的荷载之和。以图 8 的实测总荷载为基准,图 9 给出两类桩、土各自的荷载分担比随工程进度的变化曲线。

根据施工和设计资料,推算不同施工阶段作用在基础筏板上总荷载的理论值,结果表明它比实测总荷载相差小于 10%,各阶段的绝对误差平均值为 3.7%。因此,本次现场观测精度令人满意。

3.3 试验结果分析

通过对上述实测数据整理和分析,得出该工程的基底压力分担和沉降特性。

(1)到住户入住半年多时,钢管桩单桩承担的竖向

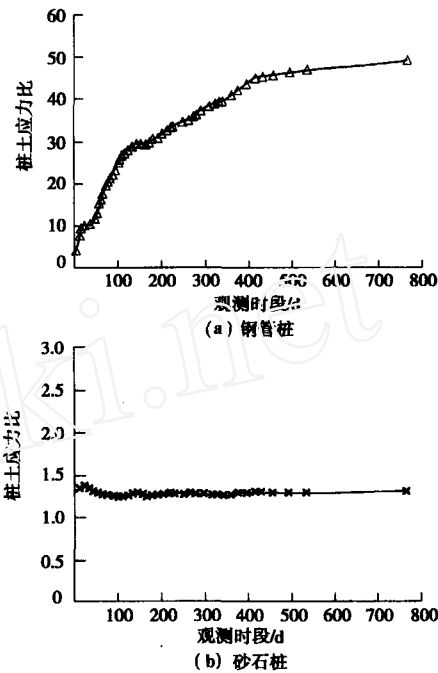


图 7 桩土平均应力比

Fig.7 Average stress ratios of piles to subsoil

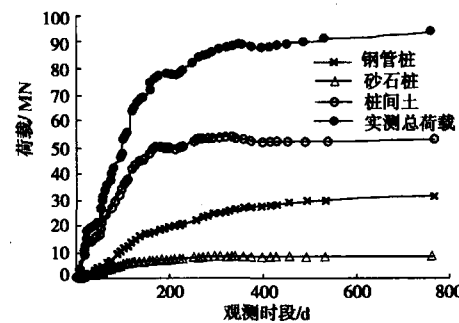


图 8 实测桩、土分担荷载

Fig.8 Observed load sharing of piles and subsoil

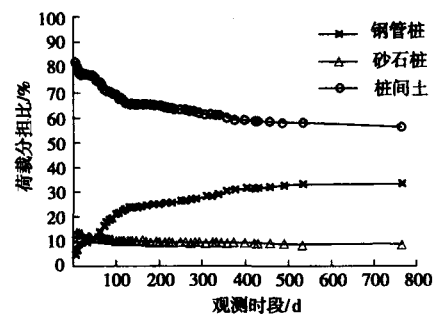


图 9 实测桩土荷载分担比

Fig.9 Observed load sharing ratios of piles to subsoil

荷载为 630 ~ 1670 kN,平均为 1090 kN,只相当于其极限承载力的 34%。因此,钢管桩承载力的剩余安全度较大。

(2)到竣工验收完成约 300 d 时,实测砂石桩和桩间土的平均应力分别约为 180 kPa 和 135 kPa,砂石桩

复合地基所受等效荷载为 140 kPa,相当于其设计要求的 70%。可见,地基土和砂石桩的承载力得到了充分的发挥,且短桩复合地基的实际承载力能够满足本工程的设计要求。

(3)从图 9 可以看出:房屋建造初期,桩间土承担的荷载超过 80%,砂石桩约 10%,钢管桩承担的荷载不到 10%。但随着上部荷载的不断加大,桩间土、砂石桩承担的荷载比例逐渐减小,而钢管桩的逐渐增大。到竣工验收后约 300 d 时,桩间土、砂石桩和钢管桩承担的荷载分别约为 56%、9%和 35%。

(4)上部结构封顶后,从图 3 至图 8 可以看出,钢管桩承担了大部分新增荷载(主要是装修和使用荷载)并有继续增加的趋势;砂石桩受力变化不大,而桩间土的应力有先减小后缓慢增大的趋势,这可能是地基的固结沉降和基础沉降不断协调所致。

(5)从图 6 和图 7 可以看出,砂石桩与桩间土的应力相差不大,其应力比约为 1.3。因此,本工程所用振动沉管砂石桩主要是通过挤密地基土来提高整个复合地基承载力的。

(6)位于建筑平面西北角(P1 测区)和西南角(P6 测区)的钢管桩受力高于 7 个测区钢管桩受力的平均值以及处于它们之间(P5 测区)的钢管桩的应力。这与刚性桩筏基础下角、边桩的受力特点相似。位于筏板内部的 P2 测区处钢管桩受力也比较大,这可能是由于 P2 测区位置布置了电梯间和屋顶机房等设备,此处的上部结构荷载比较大。

(7)位于东北角(P7 测区)的钢管桩受力最小,而该处对应的砂石桩受力却高于平均值,这可能与该区域错挖集水井坑(基坑面以下约 80 cm 深)的回填材料不够密实及钢管桩顶标高可能偏低(导致基础底板下的垫层过厚)密切相关。基础最大沉降出现在该区域与此相吻合。

(8)由于东北角区域的钢管桩-砂石桩-土复合地基存在上述缺陷,在基础整体刚度的调整下,与其临近的 P4 测区的基底压力明显偏高。

(9)到住户入住时,该楼各测点的实测沉降为 18~25 mm(相邻两幢基础和结构相同的小高层建筑的沉降与此相同),明显小于该地区仅采用砂石桩复合地

基的 7 层住宅楼的沉降(60~80 mm)^[6],说明增设少量钢管桩控制地基的沉降卓有成效。

4 结 语

(1)对于小高层建筑,可采用颇为经济的长-短桩复合地基新技术(通常长桩相对为刚性,短桩相对为柔性)。在这种地基中,柔性短桩起加固天然地基、消除地基土液化和加速土体固结等作用;褥垫层可使得柔性短桩和土承担大部分上部结构荷载,表层较好土层的承载力继而得以充分发挥。所采用的少量刚性长桩可以有效减少柔性短桩下卧土层的压缩量,达到控制基础沉降的目的,从而有效地避免发生结构开裂或倾斜的事故。

(2)在应用这种地基处理技术时,应重视基底与刚性桩顶面间垫层的厚度、密实度及其均匀性对长、短桩荷载分担特性所产生的重要影响。

根据沉桩可行性和经济指标的比较,刚性长桩可选用钢管桩、预应力混凝土管桩、预制钢筋混凝土方桩、钢筋混凝土沉管或钻孔灌注桩等,而柔性桩可以选用振动沉管砂石桩、振冲碎石桩、水泥搅拌桩、CFG 桩或低强度混凝土桩等,其具体方案的选定与地基土和荷载特性密切相关。当柔性短桩采用水泥搅拌桩、CFG 桩或低强度混凝土桩时,为确保其桩身质量不受影响,宜先进行刚性长桩施工。

参考文献:

- [1] Yang Min. Study on reducing-settlement pile foundation based on controlling settlement principle[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4): 481-486.
- [2] Poulos H G. Pile raft foundations: design and applications[J]. Geotechnique, 2001, 51(2): 95-113.
- [3] DGJ 08-11-1999, 地基基础设计规范[S].
- [4] 应永法, 章 雷. 复合桩地基构想[J]. 地基处理, 2000, 11(1): 27-30.
- [5] 石旭光. 刚柔组合桩复合地基性状的三维弹性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [6] 陈龙珠, 谢德贵, 等. 振动沉管碎石桩加固饱和粉土地基的机理研究[J]. 浙江建筑, 2002, (B02): 71-73.