

沉降控制复合桩基设计法的应用及有限元分析

孙立强, 闫澍旺

(天津大学 岩土工程研究所, 天津 300072)

摘 要: 常规复合桩基设计方法通常只考虑桩的承载作用, 忽略了桩间土的承载作用, 使实际工程过于安全而造成不必要的经济投入。通过对软土地基的研究, 提出了由容许沉降量确定桩数的复合桩基设计, 即按沉降量控制的复合桩基的完整设计法, 介绍了以沉降量为控制指标的设计原则和步骤, 并用一个工程实例说明了该方法的计算过程, 运用 ABAQUS 有限元软件对该工程进行了数值模拟计算。数值模拟计算的结果验证了该理论的合理性, 最后将其与常规方法设计进行了经济比较, 显示了前者有一定的经济优势。

关 键 词: 复合桩基; 沉降控制; 数值模拟; 经济优势

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Application and finite element analysis of designing method of settlement-controlled composite piled foundation

SUN Li-Qiang, YAN Shu-Wang

(Institute of Geotechnical Engineering, TianJin University, TianJin 300072, China)

Abstract: Considering the conventional designing method of composite piled foundation only takes the bearing of piles into account. Through studying of the soft soil foundation, a complete designing method has been developed to choose the number of piles on the basis of allowable settlement for the composite piled foundation; that is, to be settlement-controlled composite piled foundation. The paper introduces the basic principles and procedures of the design method taking settlement control as the key objective. Then, the calculation process is presented by a project example; and the numerical calculation is also made by finite element software. Compared with the conventional design method it shows great economic predominance.

Key words: composite-piled foundation; settlement control; numerical simulation; economic predominance

1 前 言

软土地基的基础设计采用桩基础的原因主要有两个: 一是地基的承载力不够, 用桩将上部结构的荷载传递到深层土和坚硬的持力层; 二是地基土发生较大的沉降变形, 需采用桩基来减少沉降量。不能采用天然地基基础方案的原因并不仅仅是天然地基的强度明显的不足, 而是由于高压缩性地基产生大的沉降。上海民用建筑设计院从 1982 年起就对软土中的单桩和群桩沉降量及桩与承台共同作用等问题进行了长期的理论与试验研究工作, 在此基础上参考国内外有关桩基沉降及桩与承台共同作用的研究成果, 探讨了按桩基沉降量控制的复合桩基的设计方法, 1987 年就在多层建筑和部分中高层建

筑的设计中采用沉降控制的复合桩基设计方法。所谓复合桩基是指桩与承台共同承担外荷载的一种桩基础, 按沉降控制设计的实质就是以沉降控制为原则, 考虑桩基与承台共同作用的一种设计方法, 它能使沉降量控制在容许范围之内。常规的桩基设计方法则是建立在满足承载力要求的理论上, 即全部荷载由桩承担, 不考虑承台与地基土的作用, 然后验算最终沉降量, 这样在承载力满足要求而沉降量不满足要求时就需要增加投入, 使承载力过于安全, 桩数较多。目前上海用沉降控制理论完成的施工设计图已有 70 万 m^2 以上, 已竣工的建筑面积达 20 万 m^2 , 这些已完成的工程实例证明了按沉降控制的复合桩基设计方法在工程中的可行性。本文通过对沉降控制复合桩基设计方法的研究, 并利用该

理论对某海上滑道基础进行设计, 提出了一套完整的基本设计方案及原则, 对桩基的实际工作过程进行了数值模拟, 工作过程中可看出最终沉降量小于设计控制量, 具有一定的安全系数。数值模拟结果证明了沉降控制复合桩基设计方法的可行性。

2 设计的基本原则

理论分析和荷载试验表明软土中承台与地基土始终保持接触, 桩与承台共同承担外荷载的复合桩基, 荷载-沉降关系如图 1 所示, 这种关系也可以用图中的 OAC 表示, 其中 P_a 为各单桩极限承载力之和; P 为外荷载; P_u 为桩基总的极限承载力。在外荷载作用下承台与桩沉降达到基本稳定的条件且荷载较小时, 主要由桩承担外荷载, 承台次之, 随荷载的逐步增大, 承台作用逐步发挥, 当荷载超出各桩的极限承载力之和 P_a 后桩始终承担 P_a , 而承台则承担外荷载的剩余部分。基于上述分析, 并做一定的简化假设后, 对沉降控制的复合桩基提出了以下设计原则。

2.1 复合桩基极限承载力的设计原则

复合桩基的极限承载力可按下式计算:

$$P_u = \eta_{sp} n Q_u + \eta_c RF \quad (1)$$

式中, n 为桩数; Q_u 为单桩的极限承载力; R 为承台底地基土的承载; F 为承台底静面积; 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 倍的桩径时均近似的取 1。由于在沉降控制桩基设计中桩距一般都大于 6 倍的桩径, 所以 η_{sp} 、 η_c 都取 1, 则复合桩基承载力变成: $P_u = nQ_u + RF$ 。

单桩的极限承载力一般由单桩荷载试验确定, 在没有现场试验资料的时候可以根据经验公式确定。根据《建筑桩基技术规范》^[1] 经验公式如下:

$$Q_u = U_p \sum q_{sik} l_i + p_{sk} A_p \quad (2)$$

式中, U_p 为桩身的周长; q_{sik} 为侧阻系数第 i 层土的极限侧阻力标准值; l_i 为桩穿越第 i 层土的厚度; p_{sk} 为桩端附近的静力触探贯入阻力标准值; A_p 为桩端面积。

2.2 复合桩基沉降简化计算原则

(1) 当外荷载小于桩基中所有单桩极限承载力之和 ($P < P_a$) 时, 桩基沉降就是荷载全部由桩承担条件下桩端至压缩层之间土层压缩产生的沉降量。

(2) 当外荷载大于桩基中各单桩极限承载力之和 ($P > P_a$) 时, 桩与桩间土产生相对的滑移, 桩

始终承担 P_a , 而承台承担荷载 ($P - P_a$), 这时桩基沉降由这两部分荷载共同作用下在承台底至压缩层下限之间土层压缩产生的沉降量, 其中桩承担的荷载所产生的沉降可参考文[2]提出的方法计算, 承台承担的荷载所产生的压缩量可按天然地基浅基础沉降计算分层总和法进行。

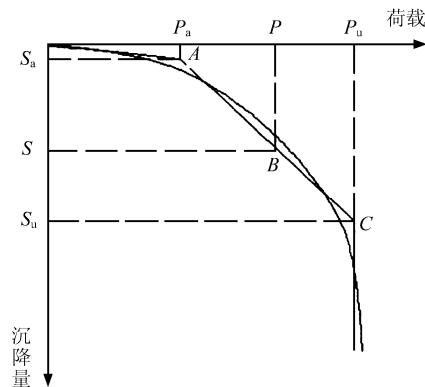


图 1 荷载沉降曲线

Fig.1 Settlement under the loading

3 设计方法及步骤

3.1 选择桩型、桩长和桩身截面

选择桩型时应采用桩身质量比较可靠的预制混凝土桩。选择桩长时应根据地基土的组成, 使桩端尽可能穿过压缩层范围内压缩性最高的土层, 进入压缩层相对低但不十分坚硬的土层。选择桩身截面时应按桩身结构强度确定的单桩容许承载力与地基土对桩的极限支承力二者之间相匹配的原则, 以充分发挥桩身材料承载能力, 单桩容许承载力为

$$R_1 = 0.5 A_p f_c \quad (3)$$

地基单桩极限为

$$R_2 = U_p \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \quad (4)$$

式中 f_c 为混凝土抗压强度设计值。

3.2 确定承台底面面积及其平面布置

(1) 按外部荷载由承台单独承担的假定, 确定承台底面面积 A (m^2):

$$A = \frac{F + G}{\eta f} \quad (5)$$

式中, f 为承台下地基土的极限承载力; G 为承台自重。

(2) 按上部结构的重心与承台底面形心相重合的原则确定承台底面的平面布置。

3.3 确定桩数

计算桩数时,先计算假定沉降控制复合桩基的若干种不同布桩方式相应的沉降量,以求得桩数与沉降的关系曲线,然后根据容许沉降量确定桩数。一般情况下计算三种情况下的沉降量,以确定桩数和沉降关系:(1)按外荷载全部由桩来承担的常规设计方法来确定桩数 n ;(2)按上述常规方法确定的桩数的 $1/3$;(3)桩数为零,然后按线性插值法估算容许沉降量下所需桩数。目前上海的几种主要的基础软件及PKPM中的JCCAD均能自动的对上述方法进行分析得到比较准确的沉降-桩数曲线。

3.4 验算沉降控制复合桩基的承载力

根据上述步骤得出 n 与 A ,按下式验算沉降控制复合桩基的承载力:

$$F + G \leq (nR + Af)/\xi \quad (6)$$

式中, f 为地基土极限承载力; R 为单桩的极限承载力; ξ 为复合桩基承载力经验系数,可取 $1.2 \sim 1.3$ 。

4 实例

某海上8000 t平台组块滑道,长300 m,要求滑道板宽10 m。荷载情况为:承建8腿8000 t组块,每腿最大荷载1300 t,每侧滑道荷载最大值为5200 t,码头前沿15 m范围内每腿荷载为1950 t。工程地质资料见表1。

表1 土的物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical index of the earth

土层	厚度 /m	γ /kN·m ⁻³	e	ω /%	E_s /MPa	c /kPa	φ /%
填土	1.5						
褐黄粉制黏土	1.5	18.8	0.93	32.9	4.33	19	12.5
灰淤质粉制黏土	4.0	17.5	1.29	46.8	2.7	9	15.3
灰淤质黏土	5.5	16.8	1.52	54.4	1.77	7	7.5
灰黏土夹砂	15	18.0	1.11	39.4	5.12	11	12
灰粉砂	24	18.6	0.91	31.8	6.61	5	25

该工程后285 m分5段进行设计,则每一段的设计过程如下。

4.1 确定桩的截面尺寸和桩长

按桩身结构强度确定单桩承载力 R_1 和地基土对桩的支撑力 R_2 ,二者数值基本相等的原则选择桩身截面尺寸,即

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= 0.5A_p f_c; \\ R_2 &= U_p \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由 $R_1 = R_2$ 得:

$$\left. \begin{aligned} 0.5A_p f_c &= U_p \sum q_{sik} l_i + q_{pk} A_p; \\ a^2 f_c &= 8a \sum q_{sik} l_i + a^2 q_{pk} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

所以, $14300a = 8(20 \times 1.5 + 20 \times 4 + 22 \times 6.5 + 35 \times 5) + 2100 \times a$ ($a = 30$ cm), $R_2 = 4 \times 0.3(20 \times 1.5 + 20 \times 4 + 16 \times 6.5 + 30 \times 5) + 2100 \times 0.3 \times 0.3 = 375$ kN
故采用横截面为300 mm×300 mm的方桩进行设计,此时的单桩承载力 $R = 375$ kN。选择相对压缩性较小的灰黏土夹砂层作为桩端层,选择桩长 $L = 17$ m。

4.2 确定桩数

利用PKPM中的JCCAD对该方法的沉降和桩数进行分析得到基础沉降与桩数的关系曲线如图2所示。将沉降控制在15 cm以内,所用的桩数大约181根。

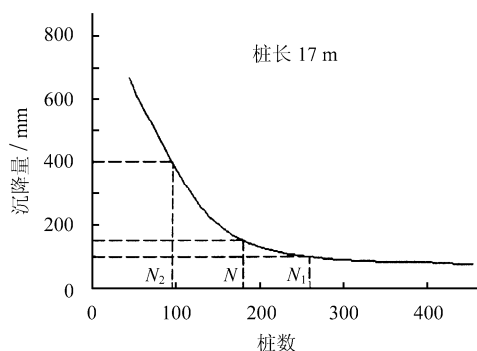


图2 沉降量-桩数关系曲线

Fig.2 Relation between settlement and number of piles

4.3 对桩基承载力进行验算:

桩基承载力: $F + G = 99280 < nR + fA/1.2 = (181 \times 375 + 95 \times 580)/1.2 = 102479$ kN, 设计符合承载力计算要求。经上述计算确定工程采用断面为300 mm×300 mm的钢筋混凝土预制桩,长17 m,根据要求,承台宽10 m,厚1.5 m,桩数为181根(图2),预估沉降量为15 cm。工程实践证明本文设计方法解决了软弱地基沉降量过大的难题。

4.4 建立数值模型进行有限元分析

为证明沉降控制复合桩基设计方法的可行性,本886利用有限元对该法设计桩基的实际工作过程进行了数值模拟。

4.4.1 数值模型的建立

本模型采用显式的线形积分单元形式(C3D8R),将土体定义为弹塑性材料,采用Drucker-Prager 屈

服准则。桩和承台定义为弹性材料。在桩土之间定义摩擦型接触。摩擦系数为 0.4。土的各物理性指标仍见表 1。

桩与承台均采用 C25 混凝土，弹性模量为 28 Gpa，将几何尺寸为 $51.5\text{ m} \times 60\text{ m} \times 30\text{ m}$ 模型划分成 8 节点的立方体单元，如图 3 所示。本模型将承台沿宽度和长度的轴线分成对称的四等份，根据对称的性质，取其中的一份作为研究对象，因为在对称面上的法向位移为零，因而约束分割面上的法向位移。这样可以准确的模拟实际情况。在承台上施加一均布荷载，大小为设计荷载的 1/4。

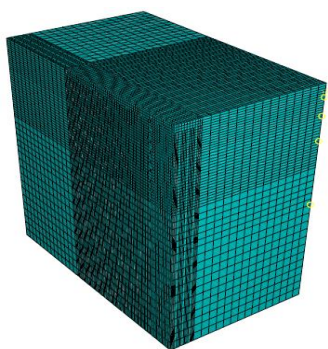


图 3 三维计算模型
Fig.3 3D numerical model

4.4.2 数值模拟的结果

(1) 桩基沉降曲线

图 4 为桩基沉降曲线，表示桩基在 U_2 方向上的最终位移量，即所要求的桩基的最终沉降量。竖向坐标为桩基随时间在 U_2 方向上的位移量，横坐标为固结时间（计总固结沉降时间为 1）。由图 4 可见，在桩基沉降结束时其最大沉降量为 10.01 cm，而沉降控制理论所控制的沉降量为 15 cm，分析结果说明由该方法设计的桩基是符合要求的。

(2) 模型竖向位移云图

图 5 为模型工作过程完毕后的竖向位移云图。桩基中间部分为沉降最大位置，最大沉降量为 10.01 cm，由中间往外逐渐扩展形成沉降等值面。

4.4 与常规设计方法作经济指标比较

工程设计方案的优劣性通常以技术与经济 2 个指标来衡量，上文对方案的技术指标进行了讨论，现在就常规设计方法与本文所叙述的方法进行经济指标比较，具体内容见表 2。

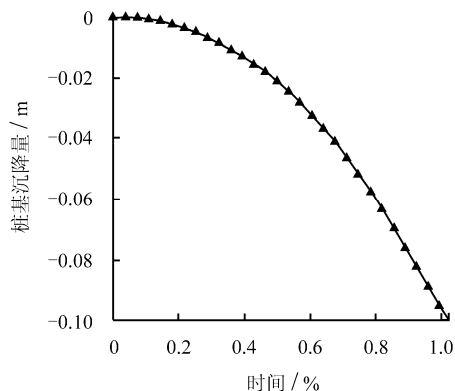


图 4 桩基沉降曲线
Fig.4 Settlement of piles

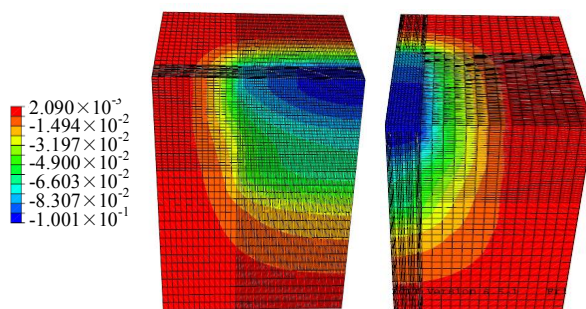


图 5 模型竖向位移云图(单位: m)
Fig.5 Nephogram of upright displacement of the model(unit: m)

表 2 经济指标比较
Table 2 Comparison of economic indexes

序号	地基处理方案	计算最大沉降/cm	每平方米建筑面积造价 / 万元	说明
1	常规方法进行桩基设计	13	0.17	利用钻孔灌注桩
2	采用本文所讲述的方法	15	0.11	利用 0.3 m×0.3 m 的预制桩

采用本文方法可以把沉降控制在 15 cm 以下，当在沉降满足要求时，用本文方法可以节省大约 35 % 的资金。本工程建筑面积为 $2\,900\text{ m}^2$ 的，可以节省资金约 174 万元。所以该方法显示出一定的经济优势。

5 结 语

通过对本文工程实例的设计及其工作过程的数值模拟，证明了沉降控制复合桩基设计方法的可行性，同时总结出沉降控制复合桩基设计有以下优点：（1）充分的利用和发挥了桩控制基础沉降的能力；（2）可单桩承载力设计，使桩的承载能力得到充分发挥，亦可使单桩的荷载比常规设计大；（3）

减少了桩数,与常规桩相比可节省 30 % 的资金,降低了工程造价。

长期以来,桩基工程采用了假设外荷载全部由桩承担,单桩设计承载力决定桩数的概念进行设计,在很多情况下都过于保守,而按沉降量控制复合桩基设计方法在这方面突破了常规方法设计的概念,得到了良好的效果。合理的桩基设计应该根据目的不同而分为 3 种情况:(1)所有荷载由桩来承担;(2)桩和承台基础分担上部荷载,即所说的复合基础;(3)桩用于减少或控制沉降,然后根据实际情况选用合适的设计方法,在上部荷载不是很大、地基的压缩性又很大的情况下选用沉降控制的复合桩基设计方法进行设计能收到良好的经济效益。今后还要对这种方法积累更多的实践资料,以改变或简化复杂的沉降计算过程,使其成为一种成熟、有效的设计方法。

参 考 文 献

- [1] JGJ94—94, 建筑桩基技术规范[S].
- [2] 陈仲颐, 叶书麟. 基础工程学[M]. 北京: 中国建筑工程工业出版社, 1990.
- [3] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.
- [4] 黄绍铭. 软土地基沉降[A]. 第四届全国土力学及基础工程学术会议论文集[C]. 北京: 中国建筑工程工业出版社, 1983.
- [5] 孙昱斌. 桩基设计与沉降控制[J]. 住宅科技, 2003, (7): 18—20.
SUN Yu-bin. Pile Foundation design and settlement control[J]. **Housing Science**, 2003, (7): 18—20.
- [6] 黄绍铭. 减少沉降量桩基的设计与初步实践[A]. 第六届全国土力学及基础工程学术会议论文集[C]. 上海: 上海同济大学出版社, 1991.
- [7] 刘金砺. 桩基础设计计算[M]. 北京: 中国工业出版社, 1990.
- [8] 朱向荣, 董宏波. 沉降控制桩基设计时单桩承载力取值讨论[J]. 住宅科技, 2003, (4): 10—12.
ZHU Xian-grong, DONG Hong-bo. Discussion on single pile bearing capacity in design of composite pile foundation for settlement control[J]. **Housing Science**, 2003, (4): 10—12.
- [9] 朱百里, 沈珠江. 计算土力学[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.
- [10] Poulos H G, Davis E H. Pile Foundation and Design[M]. New York: John Wiley and Sons, 1980.