疏桩基础沉降计算方法的探讨及应用

崔连莲[1] 陈颖辉[1] 孙 芳[1] 唐 鹏[2]
（1 昆明理工大学建筑工程学院 云南昆明 650224 2 交通部公路科学研究院 北京 100088）

摘 要:本文通过对疏桩基础沉降特性的分析，提出三种具有代表性的沉降计算方法（建筑桩基规范法、以沉降量为控制指标法、双层应力法）进行对比、分析，经工程实例验证得出，利用建筑桩基规范法计算的沉降量与实测沉降量比较贴近。

关键词:疏桩基础 沉降计算 复合地基

引言

疏桩基础是近几年发展起来的一种新的地基基础形式。它是把建筑物按传统基础设计确定的桩的数量和间距（一般3-4倍桩径）进行精简与疏布（一般5-6倍桩径）的桩基础[1, 2]。具有施工方便，降低成本等优势，应用前景广泛。但目前，该种桩型的理论研究尚未完善，在现有研究成果[3, 4]中，对疏桩基础的一些特性进行了探讨以及它与常规桩基的性能和经济指标进行对比，并得出一些结论。但是，对疏桩基础的沉降特性，特别沉降计算方法争论比较大，这在一定程度上，限制了疏桩基础的推广和应用。

本文根据疏桩基础的特性，从三个不同的方法出发，即建筑桩基规范法、以沉降量为控制指标法、双层应力法对疏桩基础的沉降计算方法进行研究，并通过对一个工程实例的沉降计算，对上述三种计算方法进行对比、分析。

1 疏桩基础的沉降变形特性

根据文献[5]对疏桩基础的研究发现：疏桩基础受荷后即出现桩间土压缩，桩端刺入变形明显，在荷载下桩间土压缩引起的沉降占绝大部分，桩端平面以下土的压缩沉降较小。因此，若计算桩间土地基压缩量与桩—土相互作用沉降量之和，更符合实际，并可回避计算桩端塑性刺入的困难和不确定性。

2 沉降计算方法简述及工程实例分析

2.1 工程地质概况[6]

位于升华生物化工工业园区的德清升华污水处理厂，地处德清县钟管镇。德清升华污水处理厂以接纳园区内企业经预处理后的工业污水，同时为配合钟管镇的现代化小城镇建设，逐渐接纳钟管镇城镇居民生活污水的污水处理厂。根据勘察报告，该厂场地各层土的物理力学性质指标统计数据见表1。

对地基土评价:①杂填土成份杂；②粉质粘土工程力学性质一般；③-1淤泥质粘土厚度大，具大孔隙，高压缩性特征，为本场地软弱土层，不宜做基础持力层；③-2粉质粘土工程性质较差，厚度较薄，分布不稳定，不宜作为桩基础持力层；⑥粉质粘土工程性质一般，不宜作为桩基础持力层；⑥夹粉质粘土该土层工程性质相对较好，可作为拟建工程桩基础持力层。

以9#（HCR池）为例进行分析，桩采用规格为$\phi 400\times 75$mm，先张法预应力混凝土管桩，混凝土强度等级为C60，桩的型号为PC-A400（75）-12、12；桩长24m，桩端进入⑥$_{夹}$粉质粘土层。HCR池池体高度为8.5m，池体内长期水位高度为8m，平面尺寸为$22.4\times 52.8m^2$，池壁厚度为450mm，底板厚度为600mm，池体基础埋深为1.4m，平均桩距为7d，设计采用疏桩基础。

2.2 三种疏桩基础的沉降计算方法简述

文献[7]中谈到，考虑桩间土和桩体共同直接承担荷载是复合地基和复合桩基的本质，因此将疏桩基础归为一种类型的刚性桩复合地基。同时因为疏桩基础比按桩基理论设计的常规摩擦桩基础沉降量大，但考虑了桩间土对承载力的直接贡献，以较大的沉降换取工程投资的节约，是以控制沉降量为主要目的的桩基础。基于以上的分析，提出以下三种沉降计算方法。

表1　德清升华污水处理厂场地土层工程地质报告

分层号	土层名称	土层厚度（m）	E_S（MPa）	E_S(修)（MPa^{-1}）	q_{sik}	q_{pk}	土承载力特征值（kpa）
1	杂填土	0.6					
2	粉质粘土	1.2	4.5	4.5	10		80
3-1	淤泥质粘土	12.6	2.5	2.5	7		65
3-2	粘质粉土	3	8.5	9.7	22		140
6	粘质粉土	6.4	3.0	4.1	12		70
6夹	粉质粘土（夹砂）	5.8	7.0	11.8	25	600	180
6	粉质粘土	3.3	7.0	11.8	25	700	180
7	粉质粘土	5.5	7.0	11.8	25	700	180
8-1	细砂	4.3	8.3	15.3	28	1100	220
8-2	粉质粘土	4.2	7.4	13.6	27	900	200
8-3	粉砂	4.3	9.5	16.7	28	1500	220
8-5	粉砂（未揭穿）	4.0	9.7	17.6	28	1800	240

2.2.1 建筑桩基规范法（规范法）

桩基规范法[8]是以Mindlin位移公式为基础的计算方法，通过均质土中群桩沉降的Mindlin解与均布荷载下矩形基础沉降的Boussinesq解的比值来修正实体基础的基底附加应力，然后用分层总和法计算桩端以下土体的沉降。其计算模式如图1所示，桩基内任意点的最终沉降量用角点法按下式计算：

$$S=\psi\cdot\psi_s\cdot\psi_c\cdot S'=\psi\cdot\psi_s\cdot\psi_c\cdot\sum_{i=1}^{n}\frac{\bar{\sigma}_{zi}}{E_{si}}H_i \qquad (1)$$

式中，S — 桩基的最终沉降；S' — 按分层总和法计算出的沉降量；ψ — 桩基沉降计算的经验系数；ψ_c — 桩基等效沉降系数；ψ_S — 浅基础的沉降计算经验系数（本文计算未考虑这一项值）。

桩基沉降计算的经验系数 ψ 的确定可根据以下两种方法：

（1）若当地有可靠的经验时，根据经验值确定；

（2）若当地无可靠的经验时，按规范第5.4.10条确定。

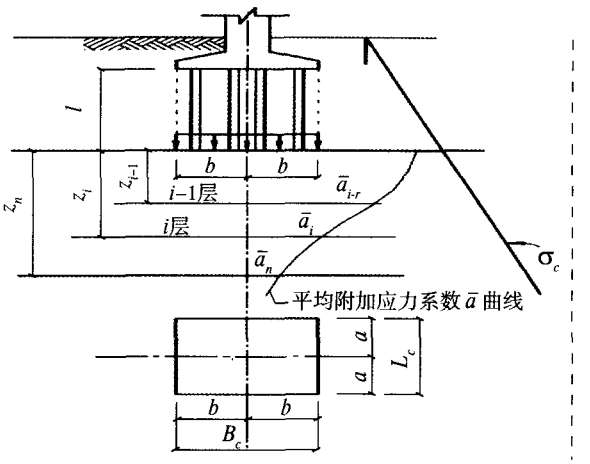

图1　桩基规范法沉降计算模式

2.2.2 以沉降量为控制指标法[9]

在一般情况下，摩擦桩桩基础的沉降主要由桩身压缩、桩尖刺入变形，桩尖以下土体的压缩变形（包括固结与流变）。在沉降的漫长过程中，桩尖以下土体的压缩变形起了非常重要的影响作用。虽然桩尖刺入变形及桩间和桩尖以下土体的变形（包括固结与流变）都不是简单的弹性理论能完全描述的，但为了解决工程实际问题，只能将研究的注意力集中于半理论半经验的计算方法上，例如工程中最常用的沉降计算方法是用弹性理论公式计算应力单向应力分层总和法，见式2，并且在用经验的方法对它进行修正后再用到工程中。

$$S=\psi_p\sum_{j=1}^{m}\frac{1}{E_{sj}}\sum_{j=1}^{n_j}\sigma_{j,i}\triangle H_{j,i} \qquad (2)$$

式中，S — 桩基最终计算沉降量（mm）；ψ_p — 桩基础沉降计算经验系数，原则上应按类似工程条件下的实测沉降资料确定，各地区应根据当地的工程实测资料统计对比确定；m — 桩端平面以下压缩层范围内土层总数；n_j — 桩端平面下第 j 层土的计算分层数；E_{sj} — 桩端平面下第 j 层土在自重应力至自重应力加附加应力作用段的压缩模量（MPa）；$\triangle H_{j,i}$ — 桩端平面下第 j 层土第 i 个分层厚度；$\sigma_{j,i}$ — 桩端平面下第 j 层土第 i 个分层的竖向附加应力（KPa）。

2.2.3 双层应力法[10]（刚性桩复合地基方面）

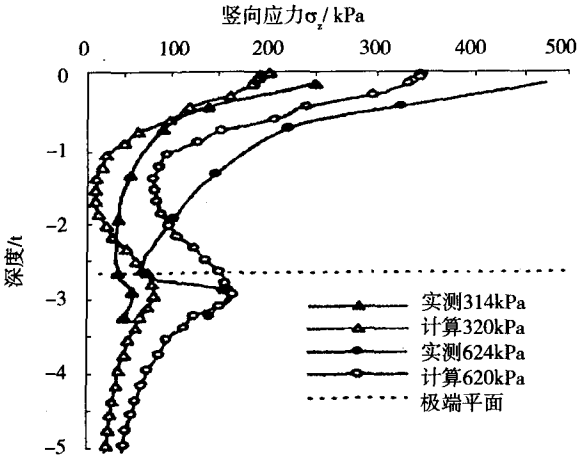

图2　土中应力分布图

文献[10]以图2所示的刚性桩复合地基实测的土中应力场为基础，假定土层的应力分布形式，并利用数值方法的计算结果与解析解来确定土层的应力分配比例，同时归纳出桩间土顶面和下卧层顶面应力水平系数的公式，即：

$$\delta_{sr}=\lambda\left[0.042\left(\frac{B}{L}\right)^2-0.109\left(\frac{B}{L}\right)+0.024\left(\frac{S_a}{d}\right)^2-0.141\left(\frac{S_a}{d}\right)+0.275\left(\frac{H}{d}\right)^{0.598}+0.162\left(\frac{E_{s2}}{E_{s1}}\right)^{0.170}-0.032\right] \quad (3)$$

$$\delta_{ss}=0.123\left(\frac{B}{L}\right)+0.017\left(\frac{S_a}{d}\right)^2-0.097\left(\frac{S_a}{d}\right)+0.365\left(\frac{E_{s2}}{E_{s1}}\right)^{0.741}-0.050 \quad (4)$$

式中，δ_{sr}—桩间土顶面应力水平系数；δ_{rr}—下卧层顶面应力水平系数；λ—为桩间土顶应力调整系数，一般取λ=1；$\frac{B}{L}$—基础宽度与桩长比；$\frac{S_a}{d}$—桩间距与桩径比；$\frac{H}{d}$—垫层厚度与桩径比；$\frac{E_{s2}}{E_{s1}}$—下卧层与加固区压缩模量的当量值之比。

若有当地经验时，δ_{sr}与δ_{rr}应取经验值。

确定δ_{sr}与δ_{rr}后，采用下式计算桩间土顶面附加应力P_{sr}与下卧层顶面附加应力P_{ss}，

$$P_{sr}=\delta_{sr}P_0;\ P_{ss}=\delta_{ss}P_0 \quad (5)$$

式中，P_0—上部结构传至基础底面的平均附加应力；P_{sr}—复合地基桩间土顶面的平均附加应力；P_{ss}—复合地基下卧层顶面的平均附加应力。

最后利用下式计算沉降：

$$S=\psi_{s1}S_1\cdot\psi_{s2}S_2=\psi_{s1}\sum_{i=1}^{n_1}\frac{P_{sr}}{E_{si}}(z_i\bar{a}_i-z_{i-1}\overline{a_{i-1}})+\psi_{s2}\sum_{j=1}^{n_2}\frac{P_{ss}}{E_{sj}}(z_j\bar{a}_j-z_{j-1}\overline{a_{j-1}}) \quad (6)$$

式中n_1、n_2—加固区、下卧层土层数；E_{si}、E_{sj}—加固区、下卧层土层的压缩模量；$\bar{a}_i$、$\overline{a_{i-1}}$—桩间土表面至加固区第i层和第i-1层底面范围内的平均附加应力系数；$\bar{a}_j$、$\overline{a_{j-1}}$—下卧层顶面至下卧层第j层和第j-1层底面范围内的平均附加应力系数；z_i、z_{i-1}—桩间土表面至加固区第i层和第i-1层底面的距离；z_j、z_{j-1}—下卧层顶面至下卧层第j层和第j-1层底面的距离；ψ_{s1}、ψ_{s2}—沉降修正系数，根据地区沉降观测及经验确定，或按《建筑地基基础设计规范》确定。

2.3 计算工程实例的沉降

笔者分别利用规范法、以沉降量为控制法，双层应力法对工程实例进行沉降计算，沉降计算深度为23m。三种方法的计算结果见表2。

表2　沉降计算结果

计算方法	规范法	以沉降量为控制法	双层应力法	实测结果
最终沉降量（mm）	54.3	65.39	32.71	53

3 沉降计算的对比与分析

（1）桩基规范法计算沉降时，不考虑桩基侧面应力的扩散作用，引入等效沉降系数来修正附加应力，使得附加应力更加趋近于Mildlin解，该系数反映了桩长径比、距径比、排列方式及桩数等因素对地基中附加应力的影响。这种方法原理简单，计算方便，是工程实践中应用最为广泛的一种近似计算方法。这是一种半经验的计算方法，在计算沉降时，还必须用一个经验系数来修

（下转第40页）

《体外预应力结构技术与工程应用》

本书由北京市建筑工程研究院李晨光、段建华、刘航三位教授高级工程师及柳州欧维姆机械股份有限公司黄芳玮高级工程师编著，北京市优秀人才培养专项经费资助，中国建筑工业出版社出版发行。

本书详细介绍了预应力材料、体外预应力体系及施工、体外预应力结构研究等内容。不仅集合了作者们十多年的科研成果与实践经验，还包括了清华大学、北京建筑工程学院等专家学者及研究生的科研试验成果。值得一提的是本书第一作者早在1992年即在香港林同炎顾问设计公司参加体外预应力桥梁的设计工作，之后一直坚持体外预应力结构技术领域的研究和应用探索，负责完成了多项体外预应力结构及成套施工技术等科研项目，参加编写了包括体外预应力结构设计与施工内容的《无粘结预应力混凝土结构技术规程》（JGJ92-2004）和《建筑工程预应力施工规程》（CECS180-2005）。除了作者们自身的理论与实践经验外，在编写中还参考国内外许多最新研究成果和工程应用实例，从而使本书内容翔实，具有新颖性、系统性和实践性。

书中所介绍的国内外桥梁与建筑结构中应用体外预应力技术的成功实例，充分表明体外预应力体系在桥梁与建筑两大领域中推广应用的普遍性及优越性，在新建、加固桥梁和建筑方面，尤其是在大跨度钢结构的建设方面具有广阔的发展空间。为此，本书作者专门编著了“张弦梁结构研究与设计”一章，概括介绍了张弦梁结构在国内外航站楼、飞机库、体育馆及会展中心等大型工程的应用实例，详细介绍了双向张弦梁结构的研究试验、设计理论和计算分析方法。为科研、设计、施工、检验及教学单位提供了有实用价值的文献资料。

（王守海）

（上接第36页）

正。这个沉降经验系数是实测值和计算值的比值，它随实测值数量的增加而逐渐趋于合理。

（2）以沉降量为控制指标法是主动考虑摩擦桩基础中客观上存在的桩间土直接承担荷载的性状，将建筑物沉降量控制在允许范围内的同时，减少桩数、减小桩径来降低工程造价。但桩间土体变形并不是简单的弹性理论能完全描述的，因而将其简化为单向应力分层总和法，产生的误差通过统一的经验修正来解决。

（3）双层应力法根据实测的土中应力场，利用桩间土顶面和下卧层顶面的应力值的应力水平系数，修正沉降计算公式。双层应力法在理论上比复合模量法更合理，但应力水平系数在实际应用中不易确定。

从以上各种沉降计算方法的对比和分析中可得知，对于疏桩基础这种新型基础形式，规范法考虑的较为全面，因此，笔者认为，采用桩基规范法计算疏桩基础的沉降还是比较合理的。

5 结束语

根据工程实际沉降观测资料，本工程基础形心的最终沉降值为53mm。由此可以看出，采用桩基规范法计算疏桩基础的沉降量更贴近工程实例，这与本文的分析是吻合的。

参考文献

[1] 寇卫峰. 疏桩基础设计原理分析[J]. 平顶山工学院学报，2007，16(4)：63-65.
[2] 侯伟，张建新，侯捷. 一种疏桩基础设计方法的分析及应用[J]. 河北建筑科技学院学报，2004，21(1)：60-62.
[3] 蒋建平. 疏桩基础有关问题分析[J]. 施工技术，2004，33(9)：29-31.
[4] 郑俊杰，彭小荣. 桩土共同作用设计理论研究[J]. 岩土力学，2003，24(2)：242-245.
[5] 刘金砺，邱明兵. 软土中群桩承载变形特性与减沉复合疏桩基础设计计算[J]. 岩土工程报，2008，30(1)：51-55.
[6] 唐颖栋. 疏桩基础沉降的性状分析[D]. 浙江大学，2005.
[7] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2002.
[8] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范(JGJ94-2008)，中华人民共和国建设部，2008.
[9] 龚晓南. 复合地基设计和施工指南[M].北京：人民交通出版社，2003.
[10] 池跃君，宋二祥，陈肇元. 刚性桩复合地基沉降计算方法的探讨及应用[J]. 土木工程学报，2003，36(11)：19-23.