

文章编号: 1000-4750(2013)Suppl-0059-04

基于实测值的桩基沉降计算方法对比分析

邝羽平¹, 姜忻良¹, 张云富², 张新民², 张立敏²

(1. 天津大学建筑工程学院/滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;

2. 中国建筑第六工程局有限公司, 天津 300451)

摘 要: 以天津滨海地区桩基工程实测资料为基础, 应用 MATLAB 软件编制桩基沉降计算程序, 分别用等效作用分层总和法和等代实体深基础法计算桩-承台基础沉降, 用明德林法计算桩筏基础沉降。分析表明: 等效作用分层总和法计算值小于实测值, 而实体深基础法和明德林法则基本大于实测值。分析结果可为 3 种沉降计算方法在天津滨海地区桩基工程中的应用提供参考。

关键词: 实测沉降; 桩基础; 等效作用分层总和法; 等代实体深基础法; 明德林法

中图分类号: TU473.1⁺2 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.06.S056

COMPARATIVE ANALYSIS OF SETTLEMENT COMPUTATION METHOD OF PILE FOUNDATION BASED ON MEASURED DATA

KUANG Yu-ping¹, JIANG Xin-liang¹, ZHANG Yun-fu², ZHANG Xin-min², ZHANG Li-min²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University / Key Laboratory of Coastal Civil Engineering Structure and Safety (Tianjin University),

Ministry of Education, Tianjin 300072, China;

2. China Construction Sixth Engineering Division Corp. LTD, Tianjin 300451, China)

Abstract: Based on the measured data of the pile foundation engineering in Tianjin Binhai, some programs for the settlement calculation of a pile foundation are compiled by MATLAB software, the settlements of the pile-pile cap foundation are respectively calculated by the summation method of an equivalent effect in layers and the equivalent entity deep foundation method, and the settlements of the piled raft foundation are calculated by Mindlin method. The analysis shows that the settlements calculated by the summation method of an equivalent effect in layers are smaller than its measured values, while the calculated settlements of the equivalent entity deep foundation method and the Mindlin method are all larger than their measured values. The analyzed results will provide a reference for the application of this three settlement calculation methods for the pile foundation in Tianjin Binhai.

Key words: filed settlement; pile foundation; summation method of equivalent effect in layers; equivalent entity deep foundation method; Mindlin method

天津滨海地区属于典型的软土地区, 在现代高层建筑中, 桩基应用非常普遍。群桩沉降计算一直是桩基设计理论中的一大难题, 其受到土的类别与性质、成桩工艺、荷载、群桩几何尺寸、承台-桩-土相互作用等的影响而变得比平板基础和单桩复

杂^[1-3]。目前, 群桩沉降计算方法主要有弹性理论法、剪切位移法^[4]、荷载传递法^[5]、变分法^[6]、非线性计算的近似混合法^[7]、等代实体深基础法、等效作用分层总和法及用单桩静载实验推求群桩沉降法^[8]等。由于桩基计算理论的不成熟, 加上地基土

收稿日期: 2012-06-21; 修改日期: 2012-11-30

通讯作者: 姜忻良(1951—), 男, 浙江人, 教授, 博士, 博导, 主要从事结构抗震与复杂结构分析研究(E-mail: jiangxinliang@126.com).

作者简介: 邝羽平(1988—), 女, 河南人, 博士生, 主要从事结构抗震分析研究(E-mail: kuangyuting_8826@163.com);

张云富(1968—), 男, 四川人, 高工, 硕士, 主要从事结构分析与施工研究(E-mail: zhangyf@csce6b.com);

张新民(1971—), 男, 内蒙人, 高工, 学士, 主要从事结构分析与施工研究(E-mail: Zhangxinmin008@126.com);

张立敏(1971—), 男, 山东人, 高工, 学士, 主要从事结构测量与施工研究(E-mail: yaredaicn@yahoo.com.cn).

的复杂性及差异性, 桩基实际沉降量和计算沉降量间往往有一定的差距。因此通过大量实际工程的计算, 结合实测沉降, 分析常用沉降计算方法在天津滨海软土地区应用的不足和合理之处, 对桩基初步设计及桩基理论的深入研究具有实际工程指导意义。

1 工程地质概况

天津滨海新区属于典型的软土地区, 上部土层

表 1 地质土层及其主要物理力学指标

Table 1 Main physical and mechanical index of geological layer

层号	土层名称	层顶平均 标高/m	平均 厚度/m	天然 含水量/(%)	天然 孔隙比	天然 承载力/kPa	内摩擦角 $\varphi /(^{\circ})$	粘聚力 C/kPa	压缩模量 $E_{s0.1-0.2}$ /MPa	压缩系数 $\alpha_{0.1-0.2} / (1/\text{MPa})$
1	素填土	2.4	1.8	37.7	1.053	80	11	14	3.62	0.576
2	粘土	0.6	1.5	39.4	1.102	90	13.3	26.3	3.74	0.557
3	淤泥质粉质粘土	-0.9	10	36.6	1.02	85	13.3	17.4	3.78	0.562
4	粉质粘土	-10.9	4	25.0	0.723	110	15.9	22.8	5.72	0.314
5	粉质粘土	-14.9	4	21.5	0.599	120	17.7	24.8	5.60	0.290
6	粉质粘土	-18.9	4	22.7	0.633	130	22.5	24.6	6.17	0.270
7	粉质粘土	-22.9	3	25.2	0.707	140	16.4	34.2	6.06	0.282
8	粘土	-25.9	3	34.8	0.978	120	12.9	38.4	5.11	0.393
9	粉质粘土	-28.9	5.5	24.5	0.687	130	17	27.2	5.92	0.290
10	粉砂	-34.4	15	19.6	0.57	190	31.6	17.3	17.87	0.088
11	粉质粘土	-49.4	2	26.4	0.724	150	17.2	43.3	6.78	0.263
12	粉土	-51.4	2.7	20.8	0.583	180	30.9	16	13.90	0.121

从表 1 可知, 天津滨海新区软土地质土层具有的主要特点是: 含有淤泥质土, 且深度较大, 天然含水量较大, 软塑及可塑土质埋藏较深, 大沽高程约-10.9m 以上的土层天然孔隙比均大于 1, 天然强度较低, 透水性较小, 抗剪强度较低, 高压缩性土层埋藏较深, 为典型的软土地区。

2 桩-承台基础的沉降计算值和实测值的比较分析

2.1 沉降计算方法概述和程序编制

本文对于桩-承台基础, 采用文献[9]中的等代实体深基础法和文献[10]中的等效作用分层总和法计算沉降。等代实体深基础法是将桩端面视为弹性体的表面, 桩端以上的承台、桩及桩周土视为假想实体深基础, 用布辛奈斯克(Boussinesq)解计算桩端面下各点的附加应力, 然后用单层压缩分层总和法计算桩端下地基土的沉降, 且不考虑桩间土压缩变形及桩弹性变形、桩长、桩距等对附加应力的影响。本文编程计算时考虑应力扩散, 扩散角取桩所穿过土层的内摩擦角加权平均值的 1/4。其沉降计算公式如下^[9]:

软弱, 地下水位较高, 属第四系全新统(Q_4^{1-3})、及上更新统(Q_3^{a-c})的河流相、滨海潮汐相及浅海相交互沉积的一套砂类土与粘性土的沉降地层。本文在滨海新区范围内搜集了已建建筑的沉降实测资料, 这些工程的地质勘察报告表明, 地质土层分布变化不大, 为使问题简单化, 给出其代表性的地质土层及其主要物理力学性质指标如表 1 所示。

$$s = \psi_p \cdot s' = \psi_p \cdot \sum_{i=1}^n \frac{p_0}{E_{si}} (z_i \bar{\alpha}_i - z_{(i-1)} \bar{\alpha}_{(i-1)}) \quad (1)$$

等效作用分层总和法是把桩端平面取为等效作用面, 桩基承台投影面积为等效作用面积, 等效作用面的附加压力取承台底的附加压力, 等效作用面以下的应力按 Boussinesq 解确定。它引入桩基等效沉降系数 ψ_e 来考虑群桩几何特性对附加应力的影响^[1], 使计算沉降值更接近于 Mindlin 解的计算沉降值。其沉降计算公式如下^[10]:

$$s = \psi \cdot \psi_e \cdot s' = \psi \cdot \psi_e \cdot \sum_{j=1}^m p_{0j} \sum_{i=1}^n \frac{z_{ij} \bar{\alpha}_{ij} - z_{(i-1)j} \bar{\alpha}_{(i-1)j}}{E_{si}} \quad (2)$$

本文采用 MATLAB 编制沉降计算程序, 计算单位面积重力时, 恒载根据《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ3-2010)相关规定取值, 活载参看《建筑结构荷载规范》(2006 年版)取值, 按准永久组合计算出作用在基础上的竖向荷载, 且不考虑相邻承台的影响; 沉降计算点取与沉降测点最近的承台的中心点; 其他参数根据设计说明、地质报告和相应规范等取值。

2.2 计算沉降值和实测值的比较分析

本文选取 6 幢基础形式为桩-承台的建筑进行分析。这些建筑基本是地上 6 层~12 层、地下 1 层的剪力墙结构,采用预应力混凝土管桩或泥浆护壁钻孔灌注桩,桩径 500mm~700mm,桩长 21.45m~24.95m,其测点处基础的承台大都为三桩承台,且都满足桩间距小于等于 6 倍桩径的要求。文中选取 41 个测点处的沉降计算值和实测值进行分析,这些测点均有较完备的地基勘察和沉降连续观测记录,并至沉降基本稳定(1mm/100d)时终止观测。

2.2.1 等效作用分层总和法计算值与实测值对比分析

现将 41 个测点处计算沉降值与实测值间的大小关系用 S/S_1 的值以图 1 的形式给出,其中 S 表示实测沉降值, S_1 表示等效作用分层总和法计算沉降值,其平均值 1.83,标准差 0.41。

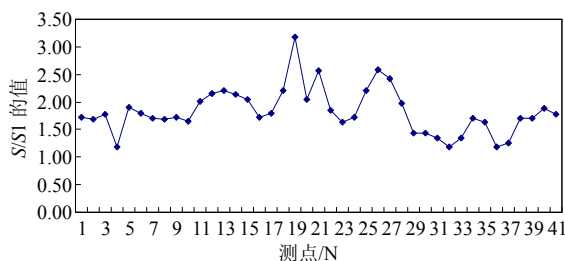


图 1 桩-承台基础 S/S_1 值的分布

Fig.1 Distribution of S/S_1 of the pile-pile cap foundation

由图 1 可知,用等效作用分层总和法计算的天津滨海地区建筑周边三桩承台下的沉降值比实测值小约 45.4%。等效作用分层总和法计算沉降值在 ψ 和 ψ_e 修正之前是比较大的, ψ 和 ψ_e 的大小对沉降计算结果和桩基的实际沉降都有很大的影响^[11]。本文计算中, ψ_e 平均值为 0.079。说明当用等效作用分层总和法计算天津桩-承台基础三桩承台下的沉降时,按文献[10]计算的 ψ_e 值偏小,所以使得最终沉降计算值小于实测值。

2.2.2 实体深基础法计算值与实测值对比分析

等代实体深基础计算的 41 个测点处沉降值和实测值间的大小关系用 S/S_2 的值以图 2 的形式给出,其中 S 表示实测值, S_2 表示等代实体深基础计算值,其平均值 0.71,标准差 0.16。

根据计算的当量压缩模量(均小于 15),由文献[9]可知, ψ_p 取 0.5。经过系数 ψ_p 的修正,建筑边上计算值比实测值大约 40.8%,可考虑根据实际工程,细化当量压缩模量小于 15 时 ψ_p 的取值,使计算值更接近实测值。

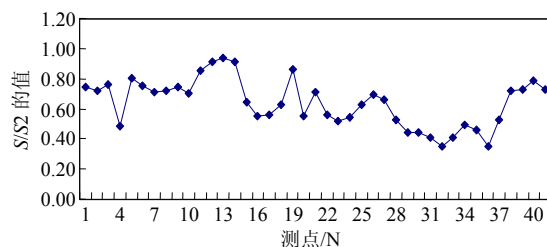


图 2 桩-承台基础 S/S_2 值的分布

Fig.2 Distribution of S/S_2 of the pile-pile cap foundation

由上述可知,在计算三桩承台下地基土的沉降值时,等效作用分层总和法计算沉降值与实体深基础法计算值相比偏小, S_1/S_2 约为 0.39,即等效作用分层总和法计算值比等代实体深基础计算值小约 61%。

3 桩筏基础的沉降计算值和实测值的比较分析

对于桩筏基础,本文选取了 10 幢基础形式为满堂桩筏的建筑进行分析。这些建筑为地上 8 层~32 层、地下 0~2 层的剪力墙住宅楼,筏板厚度 0.6m~1.5m,采用泥浆护壁钻孔灌注桩或混凝土预应力管桩,桩长 23m~48m,桩径 400mm~700mm。文中选取 36 个测点处沉降计算值和实测值进行分析,这些测点均有较完备的地基勘察和沉降连续观测记录,并至沉降基本稳定(1mm/100d)时终止观测。

3.1 沉降计算方法概述

对于满堂桩筏基础,当只考虑桩的承载作用,不考虑承台底地基土承担荷载时,可以采用文献[10]中考虑桩径影响的明德林应力解为基础的弹性理论方法计算沉降,并计入桩身压缩部分。

本文编程时沉降计算点取底层墙、柱中心点,应力计算点取与沉降计算点最近的桩的中心点。其沉降计算公式如下^[10]:

$$s = \psi \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} \Delta z_i + s_e = \psi \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} \Delta z_i + \xi_e \frac{Q_j l_j}{E_c A_{ps}} \quad (3)$$

$$\sigma_{zi} = \sum_{j=1}^m \frac{Q_j}{l_j^2} [\alpha_j I_{p,ij} + (1 - \alpha_j) I_{s,ij}] \quad (4)$$

3.2 计算值和实测值的比较分析

36 个测点处的实测值 S 与沉降计算值 S_1 比值的大小分布如图 3 所示,其平均值 0.71,标准差 0.12。

根据桩基规范,在本次分析计算中没有当地经验,沉降计算经验系数 ψ 都取 1,即未经 ψ 修正时,建筑边上沉降计算值比实测值大约 40.8%。根据本文的分析,当计算建筑边上沉降时,偏保守建议 ψ

取 0.75。表 2 给出当用 ψ 修正后的一个建筑物边上 4 个测点的沉降计算情况, 图 4 给出用 ψ 修正后 36 个测点的实测值 S 与 S_2 比值情况, S_2 为修正后的沉降计算值。

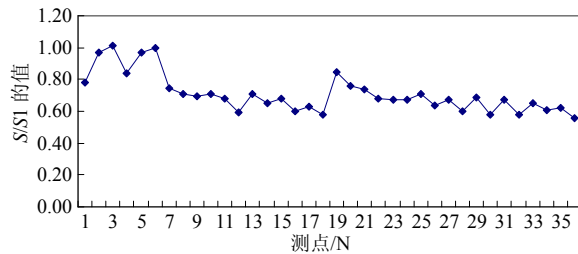


图 3 桩筏基础的 S/S_1 值的分布

Fig.3 Distribution of S/S_1 of the piled raft foundation

表 2 某建筑修正后沉降计算情况

Table 2 Settlement calculation condition of a building after correction

测点	S/mm	修正前 S_1/mm	修正后 S_2/mm	S_2/S
1	27.94	38.85	29.14	1.04
2	27.28	38.85	29.14	1.07
3	31.80	43.98	32.98	1.04
4	29.58	43.98	32.98	1.11

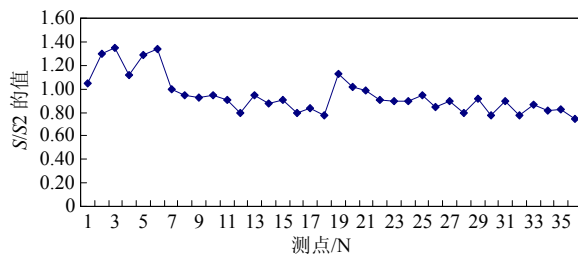


图 4 ψ 取 0.75 修正后 S/S_2 值的分布

Fig.4 Distribution of S/S_2 after correction by taking $\psi = 0.75$

由表 2 及图 4 可知, 经过 $\psi = 0.75$ 修正后, 沉降计算结果与实测值比较接近, 计算值比实测值大约 6.50%。因此, 用明德林应力解法计算天津滨海软土地区满堂桩基沉降时, 取 $\psi = 0.75$ 修正建筑边上的沉降计算值是比较合适的。

4 结论

本文探讨了等效作用分层总和法、等代实体深基础法和明德林应力法在天津滨海软土地区桩基工程沉降计算值与实测值的差异情况, 通过计算分析可得到如下结论:

(1) 计算天津滨海软土地区桩-承台基础沉降时, 采用等效作用分层总和法计算的 ψ_e 值偏小, 使得最终沉降计算值小于实测值。

(2) 天津滨海软土地区采用实体深基础法时, 计算值比实测值大约 40.8%, 可考虑根据实际工程,

细化当量压缩模量小于 15 时 ψ_p 的取值, 使沉降计算值更接近实测值。

(3) 对于本文中计算的三桩承台桩基工程, 等效作用分层总和法计算沉降值和实体深基础法计算值相比偏小。等效作用分层总和法计算值比等代实体深基础计算值小约 61%。

(4) 明德林应力解法计算的建筑边上沉降值与实测值偏差较大, 易用 ψ 进行修正, 经统计分析 ψ 取 0.75 是比较合适的, 修正后计算值比实测值大约 6.50%。

(5) 本文分析中所选工程算例的沉降情况代表了天津滨海新区特定土质条件下特定基础形式的沉降情况, 计算分析结果和建议计算系数可供同行参考, 虽具有一定的局限性, 但对于天津滨海新区桩基工程及类似土质条件和基础形式的沉降计算分析仍有一定的意义。然而由于群桩沉降的复杂性, 对于更广泛的地区和土质及其他基础形式的沉降情况也有待于今后进一步分析探讨。

参考文献:

- [1] 赵明华, 邹丹, 邹新军. 群桩沉降计算的荷载传递法[J]. 工程力学, 2006, 23(7): 119-123.
Zhao Minghua, Zou Dan, Zou Xinjun. Settlement calculation of pile groups by load transfer method [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(7): 119-123. (in Chinese)
- [2] 张乾青, 张忠苗. 群桩沉降简化计算方法[J]. 岩土力学, 2012, 33(2): 382-388.
Zhang Qianqing, Zhang Zhongmiao. A simplified calculation approach for settlement of pile groups [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2): 382-388. (in Chinese)
- [3] 刘金砺, 黄强, 李华, 高文生. 竖向荷载下群桩变形性状及沉降计算[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(6): 1-13.
Liu Jinli, Huang Qiang, Li Hua, Gao Wensheng. Deformation behaviour and settlement calculation of pile group under vertical load [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, 17(6): 1-13. (in Chinese)
- [4] Lee C Y. Settlement of pile group-practical approach [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1993, 119(9): 1449-1461.
- [5] Zhu H, Chang M F. Load transfer curves along bored piles considering modulus degradation [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(9): 764-774.
- [6] Shen W Y, Chow Y K, Yong K Y. A variational approach for vertical deformation analysis of pile group [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1997, 21(11): 741-752.

(参考文献[7]-[11]转第 108 页)

- 23(3): 324—329.
Yao Yangping, Zhang Baoyin, Zhang Guoqiang, Zhang Wei. Combination on frame-shear structure-piled raft-foundation in loess areas [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(3): 324—329. (in Chinese)
- [4] 王明恕, 王韶群, 许立珊. 高层建筑桩筏联合基础荷载分配测试研究[J]. 基础工程, 2000, 3(10): 34—37.
Wang Mingshu, Wang Shaoqun, Xu Lishan. The study on loading distribution test of the pile raft combined foundation of high-rise building [J]. Foundation Engineering, 2000, 3(10): 34—37. (in Chinese)
- [5] Wang Weiyu, Wang Liguang, Zhao Tuo. The study on optimization design of variable length pile raft foundation [J]. Civil Engineering in China-Current Practice and Research Report, 2011, 12: 321—326.
- [6] 王维玉, 李岩松. 桩筏基础不同布桩方式对沉降的影响研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2007, 25(4): 12—17.
Wang Weiyu, Li Yansong. The study on settlement of pile raft foundation under different cloth pile way [J]. Journal of Hebei Construction Engineering University, 2007, 25(4): 12—17. (in Chinese)
- [7] Wang Weiyu, Zhao Tuo. Experimental study on optimization design of variable diameter pile raft foundation [J]. Applied Mechanics and Material Engineering II, 2011, 11: 240—245.
- [8] Zhao Tuo, LiShiliang, Cao Haibo. The researche on optimization design of variable distance pile raft foundation [J]. Civil Engineering in China-Current Practice and Research Report, 2011, 11: 240—245.
- [9] JGJ 94-2008, 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 169—170.
JGJ 94-2008, Technical code for building pile foundation [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2008: 169—170. (in Chinese)
- [10] 王贤杰, 高永贵. 按桩-土共同作用确定单桩承载力, 中国土木工程学会第五届土力学及基础工程学术会议论文集[C]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990: 400—406.
Wang Xianjie, Gao Yonggui. According to joint action of pile and soil to determine single pile bearing capacity. The Fifth Soil Mechanics and Foundation Engineering Academic Conference Proceedings[C]. Beijing: China Building Industry Press, 1990: 400—406. (in Chinese)

(上接第 62 页)

- [7] 沈蕊文, 张英, 毛江才, 李靖. 群桩基础沉降计算的近似混合法[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2003, 31(6): 158—160.
Shen Biwen, Zhang Ying, Mao Jiangcai, Li Jing. Approximate hybrid method for computing the settlement of pile groups [J]. Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 2003, 31(6): 158—160. (in Chinese)
- [8] 董光辉, 杨敏, 卢俊义. 基于实测沉降比的群桩沉降分析[J]. 同济大学学报, 2009, 37(10): 1286—1290.
Dong Guanghui, Yang Min, Lu Junyi. Settlement behavior of pile group based on settlement ratio [J]. Journal of Tongji University, 2009, 37(10): 1286—1289. (in Chinese)
- [9] GB 50007-2011, 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
GB 50007-2011, Code for design of building foundation [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012. (in Chinese)
- [10] JGJ 94-2008, 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
JGJ 94-2008, Technical code for building pile foundations [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese)
- [11] 赖琼华. 桩基沉降实用计算方法[J]. 岩土力学与工程学报, 2004, 23(6): 1015—1019.
Lai Qionghua. Practical calculation procedure of pile-foundation settlement [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(6): 1015—1019. (in Chinese)