

高层建筑桩箱（筏）基础沉降计算方法

董建国¹, 董知真², 袁聚云¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063)

摘要: 提出高层建筑桩箱(筏)基础新的沉降计算方法——发展的简易理论法。此法简单、方便, 且可手算; 计算参数容易确定; 计算结果不需乘以桩基沉降修正系数; 能反映建筑物荷载与沉降的非线性关系; 计算沉降量与实测推算值相当接近; 该方法可适用于其他软土地基。这个方法可以作为国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002) 桩侧考虑剪应力的沉降计算模式的补充。

关键词: 桩箱(筏)基础; 简易理论法; 沉降计算模式; 经验系数; 最终沉降; 沉降机理

中图分类号: TU473.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2013)S2-1095-04

作者简介: 董建国(1941-), 男, 教授, 博士, 主要从事岩土工程及高层建筑桩箱筏基础与地基的共同作用研究。E-mail: dongcijie@hotmail.com。

Settlement calculation method for piled box (raft) foundations of high buildings

DONG Jian-guo¹, DONG Zhi-zhen², YUAN Ju-yun¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: A new method—the simplified theoretical method for calculating the settlement of piled box raft foundations for high buildings is proposed. This method is simple and convenient and can be calculated manually. Its calculated parameters are easy to be determined. The calculated value of settlement does not need the empirical coefficient for the depth modification. This method can show the nonlinear relation between the settlement and the load of the buildings. The comparison between the calculated and extrapolated measured values of the final settlement shows that the proposed method is feasible in Shanghai as well as in other cities. It can be supplement as the national standard "Code for design of building foundation" (GB50007-2002) considering the settlement calculation mode in shear stress of pile side.

Key words: piled box (raft) foundation; simplified theoretical method; settlement calculation mode; empirical coefficient; final settlement; settlement mechanism

0 引言

超高层建筑桩长超过 50 m, 估算桩箱(筏)基础的沉降日益引起人们的注意, 国内外不少学者为其沉降计算的合理而实用的方法进行不懈的努力与探索。在国内, 桩基础沉降计算方法是: ①弹性理论法。弹性理论法是以明特林(Mindlin)解为基础的一种桩基沉降计算方法。这个方法已在国家行业标准《建筑桩基技术规范》、上海市工程建设规范《地基基础设计规范》中应用, 它的优点是可以计算每根桩的沉降, 缺点是这些方法算式复杂, 手算化时多, 均要引入桩基沉降计算经验系数, 有的方法计算参数不易确定。②等代深基础法。国家标准《建筑地基基础设计规范》和一些地方规范均采用。国家规范 2010 年与 2002 年的区别是把图 1(a) 又变回到图

1(b), 这是因为 2002 年规范没有介绍具体计算方法, 也没有人推荐作者的方法, 使图 1(a) 的方法没有办法计算沉降, 同时认为, 反正使用桩基沉降计算经验系数, 因此又用最简单的图 1(b) 计算模式了。

事实上早在 1989 年作者已经发表了类似图 1(a) 的高层建筑桩箱(筏)基础沉降计算方法, 简称为简易理论法^[1], 这个方法可以计算桩长 8~60 m 的高层建筑桩箱(筏)基础的最终沉降。并在 1994 年前利用这个方法的沉降机理进行了工程实践, 为上海市罗山高层、九州高层、四联大厦分别作了缩短桩长、加层、缩小桩径和桩长的实践, 并获得成功, 为这些单位节省几百万元^[2-5]。简易理论法集中反映在作者 1997 年

著的《高层建筑地基基础—共同作用理论与实践》^[6]及 2002 年的博士论文《高层建筑地基基础设计理论与实践研究》^[7]中。经过数十年工程实践检验不断发展和完善的简易理论法, 简单、方便, 可以手算, 计算参数容易确定。

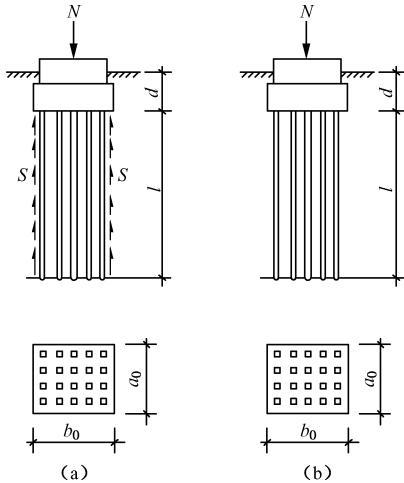


图 1 国家标准《建筑地基基础设计规范》

Fig. 1 National standard “Code for design of building foundation”

1 桩箱(筏)基础沉降计算的简易理论法简介

该理论的基本原理是: 通过对桩箱(筏)基础受力环境的比较, 以确定采用何种沉降计算分析模式。

(1) 当 $P \leq T$ 时, 采用复合地基计算模式, 附加压力从箱(筏)基础底算起(见图 2(a)):

$$\sigma_0 = P/A - \sigma_{czB} = p - \sigma_{czB} \quad (1)$$

$$s = s_s + s_p \quad (2)$$

$$s_p = \alpha (P/n_p)L/(2E_p A_p) \quad (3)$$

(2) 当 $P > T$ 时, 采用修改的实体深基础计算模式, 附加压力从桩端算起^[6](见图 2(b)):

$$\sigma_0 = (P+G-T)/A - \sigma_{czp} = p + (G-T)/A - \sigma_{czp} \quad (4)$$

$$s = s_s + s_p \quad (5)$$

$$s_p = \alpha (P/n_p)L/(E_p A_p) \quad (6)$$

式中 P 和 p 为作用在箱(筏)底平面处的总荷载和总压力; T 为箱(筏)基础沿着长、宽周边深度方向桩长范围的总抗剪力; A 为箱(筏)基础底面积; G 为包括土在内的群桩实体的重力; σ_{czB} 为箱(筏)基础底处土的自重应力; σ_{czp} 为桩端平面处土的自重应力(见图 2); s_s , s_p 分别为桩端平面下土的压缩量和桩长范围内土层的压缩量(即桩的压缩量); α 为群桩承担上部荷载的分担比, 若不考虑桩土共同作用, 则 $\alpha=1$; n_p 为桩数; E_p , A_p , L 分别为桩材料的弹性模量、桩截面积和桩长。

s_s 的计算采用人们熟悉的分层总和法。见下式:

$$s_s = \sum_{j=1}^m \frac{\bar{\sigma}_{zj}}{E_{sj}} \cdot H_j \quad (7)$$

式中, m 为桩端平面下压缩层厚度内土的分层数; j 为 $1 \sim m$; E_{sj} 为第 j 层土的压缩模量; H_j 为第 j 层土的厚度; $\bar{\sigma}_{zj}$ 为第 j 层土中的平均附加应力。

附加应力计算可用布西奈斯克解也可用明特林解。

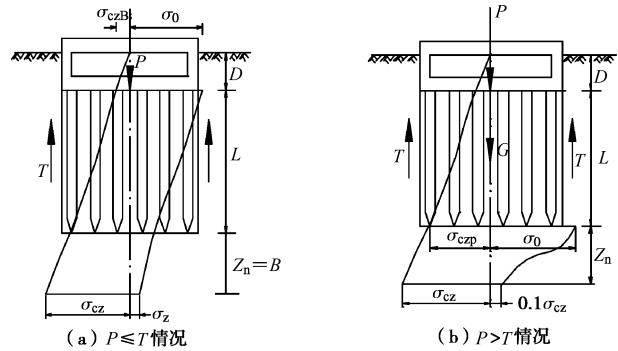


图 2 桩箱(筏)基础沉降计算的简易理论法

Fig. 2 A simplified theoretical method for calculating settlement of piled box (raft) foundations

2 总抗剪力 T 的计算

对于分层土, 利用抗剪强度公式, 通过推导, 得总抗剪力 T 的公式为

$$T = U \sum_{i=1}^n (\bar{\sigma}_{czi} \tan \varphi_i + c_i) h_i \quad (8)$$

式中: U 为箱(筏)基础平面的周长; n 为箱(筏)基础底面到桩端平面桩长范围内的分层数; $\bar{\sigma}_{czi}$ 为第 i 层土的平均自重应力; h_i 为第 i 层土的厚度; φ_i 和 c_i 为第 i 层土的直剪试验的两个强度指标。所以这个方法考虑了桩长范围土体的分层特性。

图 3 为典型的建筑物的荷载-沉降计算值, 可见这根曲线类似单桩的荷载-沉降曲线, 反映了高层建筑桩箱(筏)基础的荷载-沉降的非线性特性。

华东建筑设计院李来宝在《结构工程师》杂志上发表题为“上海地区高层建筑桩基沉降计算方法研究(一)”的文章^[8], 该文章对 14 幢高层建筑, 入土深度 31.3~65.85 m, 桩长 27~59 m, 分别用上海 1975 年规范 I、1989 年规范 II、李来宝法 III、上海民用设计院黄绍铭法 IV、董建国法 V 以及同济大学杨敏法 VI 等 6 个方法进行沉降计算并与实测推算最终沉降进行比较, 其估算值标准差 S_y 见表 1。尽管其他 5 个方法都采用各自的桩基沉降计算经验系数来修正, 但是, 它们与实测值的标准差均比简易理论法计得的沉降值与实测值的标准差来得大。因此, 从大量的计算

和实测数据对比可见, 简易理论法的基本原理是符合桩箱(筏)基础的变形机理的。

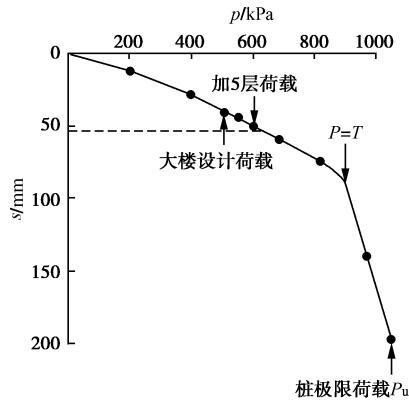


图 3 典型的建筑物的荷载 - 沉降计算值

Fig. 3 Typical calculation of building load settlement

3 简易理论法的应用

在上海有近百幢高层建筑用此方法估算高层建筑桩基础的最终沉降且获得成功, 并可用来选取合适的桩基持力层。简易理论法还在西安、南京、温州、南通地区使用并获得成功, 并已成功用于变形控制设计理论和高层建筑桩基变刚度调平设计中^[3,9]。最近又对上海三幢超高层建筑——金茂大厦、环球金融中心和上海中心作了沉降估算, 见表 2。这 3 幢超高层建筑基础埋深深, 桩基础长度长, 桩入土深度均在 80 m 左右。从金茂大厦的实测和计算沉降比较说明了考虑浮力计算沉降的合理性。同时, 从表 2 可以看到超长桩用明特林解计算土中附加应力得到的沉降更接近实测值, 因此, 超长桩基础计算沉降应该用明特林解计算土中附加应力。表 2 计算结果表明, 简易理论法计算高层建筑超长桩箱(筏)基础的沉降也是可行的。

表 1 估算值标准差 S_y

Table 1 Estimated values of standard deviation S_y

计算方法	1975 年	1989 年	$\psi_s =$	黄绍铭法	简易理论	半理论
	上海规范 I	上海规范 II	III	IV	V	VI
	S_y	20.29	10.95	2.35	5.34	2.28
						4.37

表 2 上海三幢超高层建筑最终沉降估算

Table 2 Estimated final settlements of three super-high buildings in Shanghai

建筑物	布氏解	沉降/mm		实测最大值
		$\mu=0.35$	$\mu=0.4$	
上海金茂大厦	111	90.3	92.4	82
上海环球金融中心	95.4	81.0	82.7	
上海中心	149	112	116	
上海中心 (未考虑浮力)	275	207	213	

4 结论与建议

(1) 简易理论法计算高层建筑桩箱(筏)基础的最终沉降不需引入桩基沉降计算经验系数, 该法简单、方便, 可以手算, 计算参数容易确定。还考虑了桩长范围土体的分层特性。可成功计算桩入土深度 80 m 的超长桩基础的沉降。计算沉降需考虑浮力的影响。

(2) 简易理论法计得的沉降值与实测值的标准差最小, 计得的高层建筑荷载 - 沉降曲线类似单桩的荷载沉降曲线, 反映了高层建筑桩箱(筏)基础的荷载沉降的非线性特性。简易理论法的基本原理符合桩箱(筏)基础的变形机理。

(3) 简易理论法给出了国家标准《建筑地基基础设计规范》(GB50007—2002) 的半经验的等代深基础法图 1(a) 的桩侧考虑剪应力的沉降计算模式的详细计算方法, 希望在下次规范编制时, 把简易理论法列入规范。

参考文献:

- [1] 董建国, 赵锡宏. 高层建筑桩筏和桩箱基础沉降计算的简易理论法[M]// 赵锡宏. 上海高层建筑桩筏与桩箱基础设计理论. 上海: 同济大学出版社, 1989: 179 - 194. (DONG Jian-guo, ZHAO Xi-hong. A simplified theoretical method for calculating settlement of piled raft and piled box foundations for tall buildings[M]// ZHAO Xi-hong. Theory of design of Piled Raft & Piled Box Foundations for Tall Buildings in Shanghai. Shanghai: Tongji University Press, 1989: 179 - 194. (in Chinese))
- [2] 董建国, 赵锡宏. 桩箱(筏)基础沉降计算新方法[J]. 岩土工程学报, 1996(1): 80 - 84. (DONG Jian-guo, ZHAO Xi-hong. Piled box (raft) foundation settlement calculation new method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996(1): 80 - 84. (in Chinese))
- [3] 董建国, 王约翰, 许希胜. 沉降控制理论在高层房屋加层中的应用[J]. 工程力学, 2000, 33(4): 56 - 60. (DONG Jian-guo, WANG Yue-han, XU Xi-sheng. Application of control settlement theory to add storeys to tall building[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(4): 56 - 60. (in Chinese))
- [4] 董建国, 魏正康, 王陈. 变形控制设计理论在四联大厦桩基础中的应用[M]// 陆培炎, 史永胜. 岩土力学数值分析与解析方法. 广东: 广东科技出版社, 1998: 369 - 374. (DONG Jian-guo, WEI Zheng-kang, WANG Chen. Application of deformation control design theory in Silian

- Building[M]// LU Pei-yan, SHI Yong-sheng. Rock and Soil Mechanics Numerical Analysis and Analytical Method. Guangdong: Guangdong Science and Technology Press, 1998: 369 - 374. (in Chinese))
- [5] 董建国, 赵忠. 高层建筑桩箱(筏)基础沉降机理分析[J]. 同济大学学报, 1997, 25(6): 663 - 668. (DONG Jian-guo, ZHAO Zhong. High-rise buildings piled box (raft) foundation settlement mechanism[J]. Journal of Tongji University, 1997, 25(6): 663 - 668. (in Chinese))
- [6] 董建国, 赵锡宏. 高层建筑地基基础——共同作用理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997. (DONG Jian-guo, ZHAO Xi-hong. Tall building soil foundation—theory and practice of interaction[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1997. (in Chinese))
- [7] 董建国. 高层建筑地基基础设计理论与实践研究[D]. 同济大学, 2001. (DONG Jian-guo. Research on theory and practice of design of soil and foundation for tall buildings[D]. Tongji University, 2001. (in Chinese))
- [8] 李来宝. 上海地区高层建筑桩基沉降计算方法研究(一)[J]. 结构工程师, 1992(1/2): 53 - 59. (LI Lai-bao. Shanghai high-rise buildings pile foundations settlement calculation methods (a) [J]. Structural Engineer, 1992(1/2): 53 - 59. (in Chinese))
- [9] 袁聚云, 等. 高层建筑基础分析与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011. (YUAN Ju-yun, et al. Analysis and design of high-rise building foundations[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011. (in Chinese))