

关于长桩超长桩桩基沉降计算问题

刘金砾，秋仁东，高文生，邱明兵

(中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013)

摘要：随着高层超高层建筑的兴建快速发展，长桩超长桩桩基的使用随之增多，设计中长桩、超长桩桩基的沉降计算成为一个新的关注焦点。本文首先对既有主要沉降计算方法进行了浅析，通过工程案例采用既有方法进行了沉降计算比较，其中包括我们正在研究的 Mindlin 解均化应力系数法。通过计算过程中附加应力、压缩层厚度、沉降计算结果的合理性、可靠性的分析比较，提出了优化计算方法的意见。

关键词：长桩；超长桩；沉降计算；Mindlin 解均化应力法

中图分类号：TU473 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-4548(2011)S2-0038-05

作者简介：刘金砾(1933-)，湖南人，研究员，博士生导师，从事岩土工程方面的研究和开发工作。E-mail: liujinli8@sina.com

Settlement calculation of foundation with long and super-long piles

LIU Jin-li, QIU Ren-dong, GAO Wen-sheng, QIU Ming-bing

(Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research Beijing 10013 China)

Abstract: The high-rise and super high-rise buildings get a chance to be constructed rapidly with the development of economy and society in China. As the popular application cases of foundation with long and super-long piles in the buildings, the study on settlement calculation for these types of pile foundations has become a focus problem in the design of buildings. The authors analyze the merits and faults of the present settlement calculation methods for the foundation with long and super-long piles and compare the calculated results on the basis of engineering cases by means of these settlement estimation methods. Meanwhile, the Mindlin mean stress settlement calculation method is introduced. Based on the comprehensive comparison and analysis of these results, furthermore, especially considering the influences of additional stress, compression layer thickness and rationality and reliability of the methods on the settlement calculation, some suggestions are put forward to optimize the settlement calculation for the foundation with long and super-long piles.

Key words: long pile; super-long pile; settlement calculation; Mindlin mean stress method

0 前 言

随着高层、超高层建筑的发展，长桩超长桩桩基应用迅速增多，长桩、超长桩桩基设计中的沉降计算问题也随之提了出来。由于长桩、超长桩桩基具有埋深大，桩身长，桩身压缩量大，沉降变形受相关因素影响敏感，既有沉降计算方法对其适用性问题应予关注。与此同时，根据应用实践，基于长桩、超长桩桩基沉降变形特点，探讨合理的沉降计算方法也是岩土工作者面临的挑战。

本文以高层、超高层建筑中对差异沉降控制难度大的常用框一筒结构为例，采用等代墩基法、等效作用分层总和法和正在研究的 Mindlin 均化应力法三种方法进行计算比较。并通过影响计算合理性的两大核心问题——附加应力计算、压缩层计算厚度的确定进

行分析，进而探讨科学合理的长桩、超长桩桩基沉降计算方法。

1 既有桩基沉降计算方法浅析

1.1 等代墩基法

视桩基为等代墩基（等代实体基础），不计桩与桩间土的相对位移和压缩变形，将桩端平面作为假想墩底面^[1]。墩底面和作用于墩底面的压力有两种模式：一种是不考虑荷载的扩散，而是将总附加荷载扣除墩基外表面的总侧阻力，将其均布于墩底面；另一种是按桩侧土层内摩擦角加权平均值的 1/4，即 $\bar{\varphi}/4$ 角度向下扩散，扩散线与墩底面相交围成等代墩基底面，

将总附加荷载均布于该等代墩底面作为计算沉降的压力。

采用作用于半无限体表面力的 Boussinesq 解确定中轴线上的附加应力, 按分层总和法计算沉降。由于 Boussinesq 附加应力显著大于 Mindlin 解计算结果, 沉降计算值偏大。

1.2 等效作用分层总和法

视桩土为实体基础, 将桩端平面视为等效作用面, 等效作用面积为桩承台投影面积, 等效作用附加压力近似取承台底平均附加压力。等效作用面以下的应力按 Boussinesq 解计算, 可用角点法按分层总和法求得任一点沉降 s' , 将 s' 乘以经验系数 ψ 和等效沉降系数 ψ_e , 即 $s = \psi\psi_e s'$, s 为所求桩基沉降。桩基等效沉降系数 ψ_e , 系按均质土中不同桩距、长径比、桩数、基础长宽比条件下刚性承台群桩的 Mindlin 位移解求得其沉降 w_m , 按 Boussinesq 解求得不计侧阻力的等代墩基的沉降 w_B , 取 $\psi_e = w_m/w_B$ 。将不同距径比 s_a/d 、长径比 l/d 、承台长宽比 L_c/B_c 、短边布桩数 n_b 对应的 ψ_e , 用计算机算出, 并进行统计回归得到相应的表格。计算沉降时, 按常规方法求得等代墩基沉降 s' , 便不难得求得最终沉降。该法被列入《建筑桩基技术规范》JGJ 94—94 和《建筑桩基技术规范》JGJ 94—2008^[2-3]。

等效作用分层总和法与等代墩基法相比有两点变化: 一是采用等效沉降系数反映 Mindlin 解与 Boussinesq 解应力分布的差异影响; 二是计算等代墩基沉降 s' 时, 将作用于承台底的平均附加压力直接移置于等代墩基底面, 且等代墩基底面积与承台面积相等。后者将导致附加应力影响和压缩层计算深度加大。另外, 采用等效沉降系数修正的办法是在按 Boussinesq 解应力分布和加深压缩层深度计算沉降之后实施的, 其步骤不同于先计算附加应力后计算沉降的正常程序, 必然也影响计算结果的真实可靠性。总的来说沉降计算值远小于等代墩基法。

1.3 基于 Mindlin 课题的计算方法

Geddes 根据 Mindlin 课题求得了将桩端阻力简化为集中荷载、将桩侧阻力简化为沿桩身轴线呈矩形分布集中荷载和呈三角形分布的集中荷载下土中任一点的竖向应力。利用叠加原理, 求得群桩对桩端平面任一点附加竖向应力影响之和, 采用分层总和法可计算该点的沉降。该方法被上海《地基基础规范》所采用^[4]。

由于上述 Geddes 解将桩侧阻力、桩端阻力简化为集中力, 未考虑桩径影响, 由此导致桩端平面以下一定范围内应力集中现象明显, 用于计算压缩层较小的桩基沉降显然不妥。为此, 我们研究给出了桩径影响的沿轴线的土中应力解析解和轴线以外的数值解, 并

制成表格。由此, 消除了桩端以下关键计算范围内的不合理现象。据此制定了单桩、单排桩、疏桩基础的 Mindlin 应力系数叠加分层总和法计算沉降, 并计入桩身的压缩沉降^[5,6]。该法被列入《建筑桩基技术规范》JGJ 94—2008。

采用 Mindlin 附加应力系数叠加法虽然理论上先进, 但实际操作繁琐。因而, 探讨既合理又简单可行的 Mindlin 解计算常规桩基沉降方法的任务势在必行地提了出来。利用数值分析法求得考虑桩径影响由端阻力、侧阻力(不同分布形态)在群桩桩端平面及以下产生的附加应力系数平均值, 据此按分层总和法计算沉降。称此为 Mindlin 解均化应力系数法^[7]。

2 既有沉降计算方法应用于工程案例

2.1 计算案例概况

(1) 建筑物概况 建筑物高度 99.8 m, 地面 25 层, 地下 5 层, 框架—核心筒结构; 基础埋深 20 m; 核心筒平面尺寸 20.5 m×22.5 m; 外框架柱轴线尺寸 48 m×48 m, 柱距两端跨为 9 m, 中间 3 跨均为 10 m。

(2) 地质条件 地面至基底 20 m 范围为素填土、粉质黏土、粉土; 基底以下为粉土 ($f_{ak}=150$ kPa) 10 m, 粉质黏土 12 m, 粉细砂 18 m, 粉土 6 m, 细中砂 16 m; 其中粉细砂层 $E_s=15$ MPa, 细中砂层 $E_s=50$ MPa; 80 m 深度范围内土体平均重度 $\gamma_m=19$ kN/m³。桩基布置及地基土层分布见图 1。

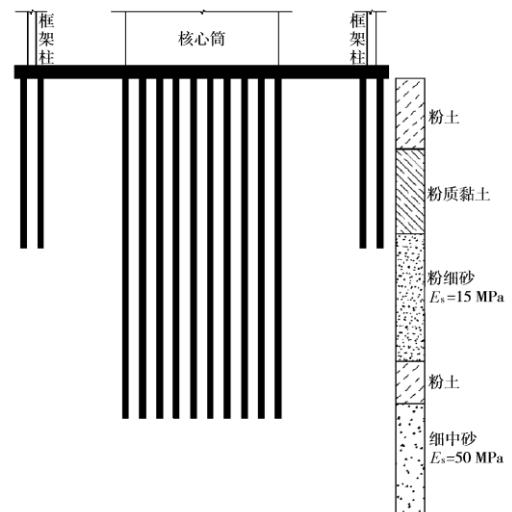


图 1 桩基布置竖向剖面图

Fig. 1 Profile of pile foundation

(3) 桩基设计 按变刚度调平原则设计, 强化核心筒支承刚度, 弱化外框架支承刚度。采用平板式桩筏基础, 筏板厚 $h_f=1.8$ m; 核心筒按普通桩基设计(不计承台效应), 采用后注浆钻孔灌注桩 $d=0.8$ m, $l=48$ m; 桩端进入细中砂层持力层 2 m, 桩身混凝土 C40,

配筋 12#18, 分二段变截面配筋; 单柱承载力特征值(由桩身强度控制)。 $R_a=(\gamma_s f_c A_{ps}+0.9 f_y A'_s)/1.35=6262$ kN/柱。荷载效应(含筏板自重)标准组合值 $F_{ck}=583800$ kN, 所需桩数 $n=F_{ck}/R_a=93$ 根。框架柱: 单柱荷载效应标准组合值 $F_{fk}=22809$ kN, 为弱化其支承刚度, 按复合桩基设计, 采用后注浆灌注桩, $d=0.8$ m, $l=24$ m, 桩端持力层为粉细砂层 ($E_s=15$ MPa)。复合桩基承载力 $R=R_a+\eta f_{ak}A_c/4=5360$ kN/柱。其中 $\eta_c=0.7$, A_c 系柱与核心筒之间 1/2 距离及相邻柱中间线所围成的不含基桩面积。单柱所需桩数 $n_1=F_{fk}/R=4.3$ 根。为强化核心筒支承刚度、弱化外框架柱支承刚度, 将核心筒桩数增至 100 根, 按 10×10 方形布桩, $S_a=3d$ 布置; 框架柱桩数减为 4 根, 按 2×2 方形布桩, $S_a=3d$ 布置。核心筒桩基的强化系数 $\zeta_s=1.07$, 外框架柱的弱化系数 $\zeta_f=0.93$ 。总体 $\zeta=\text{总抗力/总荷载}=1.01$ 。

2.2 核心筒桩基沉降计算

作用于核心筒群桩桩顶的附加荷载 $F_c=$

表 1 等代墩基法核心筒沉降计算过程

Table 1 Core tube settlement calculation process by physical deep foundation method

z/l	$z-l/m$	$(z-l)/b$	附加应力系数 α	附加应力/kPa	$0.2\sigma_c/\text{kPa}$	z_n/m	$\Delta z_i/m$	$\Delta s_i/\text{mm}$	S_e/mm	$S(=\psi_c \sum \Delta s_i + s_e)/\text{mm}$
1.000	0.000	0.000	0.250	532.020	258.400					
1.010	0.480	0.043	0.250	531.989	260.224		0.480	5.107		
1.020	0.960	0.086	0.250	531.771	262.048		0.480	5.105		
1.040	1.920	0.171	0.249	530.083	265.696		0.960	10.178		
1.060	2.880	0.257	0.247	525.773	269.344		0.960	10.095		
1.080	3.840	0.343	0.243	518.091	272.992		0.960	9.947		
1.100	4.800	0.429	0.238	506.781	276.640	14.40	0.960	9.730	8.09	93.97
1.120	5.760	0.514	0.231	492.027	280.288		0.960	9.447		
1.140	6.720	0.600	0.223	474.329	283.936		0.960	9.107		
1.160	7.680	0.686	0.214	454.364	287.584		0.960	8.724		
1.180	8.640	0.771	0.203	432.858	291.232		0.960	8.311		
1.200	9.600	0.857	0.193	410.496	294.880		0.960	7.882		
1.300	14.400	1.286	0.142	302.650	313.120		4.800	29.054		

注: 压缩层厚度采用应力比法确定, $z_n=14.40$ m; 根据《建筑桩基技术规范》中 5.5.11 条规定后注浆沉降折减系数 $\psi_c=0.7$, 以下计算均同。

表 2 等效作用分层总和法核心筒沉降计算过程

Table 2 Core tube settlement calculation process by equivalent layer-wise summation method

z/l	$z-l/m$	$(z-l)/b$	附加应力系数 α	附加应力/kPa	$0.2\sigma_c/\text{kPa}$	z_n/m	$\Delta z_i/m$	$\Delta s_i/\text{mm}$	$\sum \Delta s_i/\text{mm}$	ψ_e	S_e/mm	$S(=\psi_c \psi_e \sum \Delta s_i + s_e)/\text{mm}$
1.000	0.000	0.000	0.250	783.500	258.400							
1.010	0.480	0.043	0.250	783.454	260.224		0.480	7.521				
1.020	0.960	0.086	0.250	783.133	262.048		0.480	7.518				
1.040	1.920	0.171	0.249	780.647	265.696		0.960	14.988				
1.060	2.880	0.257	0.247	774.300	269.344		0.960	14.867				
1.080	3.840	0.343	0.243	762.987	272.992		0.960	14.649				
1.100	4.800	0.429	0.238	746.331	276.640	19.20	0.960	14.330	211.727	0.33	8.09	57.00
1.120	5.760	0.514	0.231	724.603	280.288		0.960	13.912				
1.140	6.720	0.600	0.223	698.539	283.936		0.960	13.412				
1.160	7.680	0.686	0.214	669.137	287.584		0.960	12.847				
1.180	8.640	0.771	0.203	637.465	291.232		0.960	12.239				
1.200	9.600	0.857	0.193	604.534	294.880		0.960	11.607				
1.300	14.400	1.286	0.142	445.709	313.120		4.800	42.788				

$F_{ck}-\gamma_m h A_c = 393131$ kN; 基桩顶附加荷载 $N_c=3931$ kN。

(1) 等代墩基法

设基桩端阻 $a=0.1$, 则桩侧平均侧阻力 f_s 平均 $= (3931 \times 0.9) / (3.14 \times 0.8 \times 48) = 29.34$ kPa; 则等代墩基底面附加荷载为 $393131 - 4 \times 22.4 \times 48 \times 29.34 = 266946$ kN; 等代墩基底面附加压力为 532.02 kPa。沉降计算列于表 1。

(2) 等效作用分层总和法

等效作用分层总和法桩端基底面附加压力为 $393131 / (22.4 \times 22.4) = 783.50$ kPa; 桩基等效沉降系数由桩基规范 5.5.9-1 计算 $\psi_e=0.33$ 。沉降计算列于表 2。

(3) Mindlin 解均化应力量法

$\alpha=0.1$ 、 $\beta=0.2$, 侧阻分布模式为正梯形分布模式。这里 $\sigma_{gi}=(N_c l^2) [\alpha I_{gp} + \beta I_{gsr} + (1-\alpha-\beta) I_{gst}]$, $\Delta s_i = (\sigma_{gi}/E_i) \cdot \Delta z_i$, 桩顶荷载 $N_c=3931$ kN。 I_{gp} , I_{gsr} , I_{gst} 由文献[7]附表 A 查得。沉降计算列于表 3。

1.400	19.200	1.714	0.103	323.409	331.360	4.800	31.047
-------	--------	-------	-------	---------	---------	-------	--------

注: 压缩层厚度采用应力比法确定, $z_n=19.20$ m。

表 3 Mindlin 解均化应力法核心筒沉降计算过程^[7]

Table 3 Core tube settlement calculation process by Mindlin mean stress method

z/l	$z-l/m$	I_{gpi}	I_{gsti}	I_{gsti}	I_{gi} 附加 应力 σ_{gi}/kPa	z_n/m	Δz_i /m	Δs_i /mm	$\sum \Delta s_i$ /mm	s_e /mm	$s(s=s_e+\psi_c \sum \Delta s_i)$ /mm
1.000	0.000	210.495	82.943	106.583	191.510						
1.010	0.480	206.065	82.130	105.461	189.137		0.480	1.816			
1.020	0.960	201.635	79.717	102.114	183.560		0.480	1.762			
1.040	1.920	189.276	75.909	96.849	173.864		0.960	3.338			
1.060	2.880	178.345	72.328	91.910	164.879		0.960	3.166			
1.080	3.840	168.040	68.961	87.274	156.435		0.960	3.004			
1.100	4.800	158.354	65.794	82.925	148.507	20.235	0.960	2.851	47.44	8.09	41.30
1.120	5.760	149.284	62.816	78.845	141.071		0.960	2.709			
1.140	6.720	140.799	60.015	75.017	134.096		0.960	2.575			
1.160	7.680	132.864	57.378	71.426	127.553		0.960	2.449			
1.180	8.640	125.441	54.896	68.054	121.412		0.960	2.331			
1.200	9.600	118.498	52.558	64.887	115.648		0.960	2.220			
1.300	14.400	89.937	42.727	51.698	91.668		5.770	10.579			
1.400	19.200	69.442	35.331	41.954	74.010		5.835	8.637			

注: 压缩层厚度采用式 $\begin{cases} z_n = B[1.2 - 0.3(\ln \frac{B}{10} + \ln \frac{l/d}{50})] \\ \sigma_z \geq 50 \text{ kPa} \end{cases}$ 两条件控制求得, 先满足条件的压缩层厚度 $z_n=20.24$ m。

表 4 不同方法沉降量计算结果

Table 4 Comparison of settlement values among different methods

计算方法	等效墩基法	等效作用分层总和法	Mindlin 解均化应力法
核心筒沉降 s_c/mm	93.97	57.00	41.30
外框柱沉降 s_k/mm	45.27	39.75	34.66
筒柱差异沉降 $\Delta s/\text{mm}$	48.70	17.25	6.64

表 5 不同方法的附加应力、计算压缩层厚度

Table 5 Comparison of additional stresses and compression layer thicknesses among different methods

计算方法	等效墩基法		等效作用法		Mindlin 解均化应力法	
	附加应力/kPa	压缩层厚度/m	附加应力/kPa	压缩层厚度/m	附加应力/kPa	压缩层厚度/m
核心筒	532.0~302.7	14.40	783.5~323.4	19.20	191.5~74.0	20.24
外框柱	441.9~171.3	2.88	1875~163.4	7.20	301.9~60.5	5.42

2.3 外框柱沉降计算

其计算过程类同于核心筒, 其计算结果列于表 4、表 5。

3 桩基沉降计算案例结果分析

3.1 变刚度调平设计优化筏板受力和变形

核心筒部分通过加大桩长, 强化支承刚度, 减小沉降; 桩集中布置于核心筒外墙 45° 扩散线以内, 消除了筏板传统承受核心筒巨大冲切、剪切而加大板厚, 使板厚降至 1.8 m。外框架减短桩长, 选择相对较弱持力层, 考虑承台效应, 按复合桩基设计, 弱化支承

刚度, 且桩集中布置于柱底冲切锥体以内, 对筏板不产生冲切。这种布桩格局可使筏板不出现马鞍形反力分布, 基本消除筏板整体弯矩, 从而减少配筋。

这种内强外弱的布桩格局, 促使核心筒沉降减小, 外框柱适当增沉, 从而大幅减小差异沉降。按 Mindlin 解均化应力法计算, 核心筒、外框架沉降为 $s_c=41.30$ mm, $s_f=34.66$ mm, $\Delta s=6.64$ mm。若考虑上部结构—筏板—桩土共同作用计算, 其沉降可趋于基本均匀。

3.2 三种沉降计算方法的比较

(1) 计算沉降量

从表 4 看出, 核心筒沉降量以等代墩基法计算沉降量最大, 以 Mindlin 解均化应力法最小, 两者相差 127.5%; 而外框柱沉降量三种方法的计算值差异不太大。这是由于基桩长仅为核心筒的 1/2, 附加应力计算值差异相对较小所致。

(2) 附加应力和压缩层计算厚度

影响沉降量计算值的因素是附加应力和压缩层计算厚度。由表 5 可知, 核心筒沉降计算部分, 等代墩基法所得附加应力为 Mindlin 解均化应力的 2.8 倍, 这是导致沉降计算差异的主要因素。等效作用法的附加应力和压缩层均比等代墩基法大得多, 但乘以等效作用系数 ($\psi_e=0.33$) 后计算沉降显著减小。

Mindlin 解均化应力法, 核心筒计算沉降相对于等代墩基和等效作用法(附加应力与压缩层计算厚度与等代墩基法类似)小, 其基本原因是 Mindlin 解和 Boussinesq 解计算附加应力的差异。两者的差异随桩的长径比增大, 桩数增多而增大, 尤以桩长影响最为明显。外框柱沉降, 采用三种方法的计算结果相差不大。

压缩层计算厚度的确定, 等代墩基法和等效作用法均按附加应力 σ_z 与 20% 土自重应力相等的条件确定, 即 $\sigma_z=0.2\sigma_c$ 。Mindlin 解均化应力法则以基宽和桩长径比为确定因素, 并规定 $\sigma_z \geq 50 \text{ kPa}$, 这是基于长桩超长桩基埋深大, 土自重应力大, 当 Mindlin 解计算的附加应力往往偏小的原因。由本工程案例看出, 这种压缩层计算厚度确定法较之应力比法更趋合理。

4 结 论

长桩超长桩基由于埋深大, 导致其土中附加应力按 Boussinesq 解与 Mindlin 解计算结果差异更大, 采用等代墩基法计算沉降显著偏大。采用 Mindlin 解均化应力法, 具有较多优点: 一是附加应力的计算更趋合理, 更能反映长桩超长桩荷载作用于地层深部的实际情况; 二是能够确切反映桩侧阻力随土层性质的分布特征和桩端阻力发挥相对较低等实际性状对附加应力的影响; 三是考虑了桩身压缩的影响。压缩层的确定能反映基础宽度、桩长径比的影响, 并考虑变形起始应力因素, 较应力比法、应变比法更趋合理。计

入桩身压缩理所当然。

本文工程案例也充分体现了变刚度调平设计带来的诸多益处。

参 考 文 献:

- [1] GB 50007—2002 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002. (GB 50007—2002 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002. (in Chinese))
- [2] JGJ 94—1994 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (JGJ 94—1994 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1994. (in Chinese))
- [3] 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 foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [4] DGJ 08—11—2010 地基基础设计规范[S]. 上海: 上海现代建筑设计(集团)有限公司, 2010. (DGJ08—11—2010 Foundation design code[S]. Shanghai: Shanghai Xian Dai Architectural Design(Group)Co Ltd, 2010. (in Chinese))
- [5] 刘金砾, 邱明兵. 单桩、单排桩、疏桩基础及其复合桩基的沉降计算[J]. 土木工程学报, 2007(增刊): 152—158. (LIU Jin-li, QIU Ming-bing. Settlement calculation for pile foundation and composite piled foundation with single pile and sparse piles[J]. China Civil Engineering Journal, 2007(S1): 152—158. (in Chinese))
- [6] 刘金砾, 高文生, 邱明兵. 建筑桩基技术规范应用手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. (LIU Jin-li, GAO Wen-sheng, QIU Ming-bing. Practical handbook of technical code for building pile foundation[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010. (in Chinese))
- [7] 秋仁东. 竖向荷载下桩身压缩和桩基沉降变形研究(博士学位论文) [D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2011. (QIU Ren-dong. Research on behavior of pile shaft compression and settlement deformation of pile group foundation under vertical load[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2011. (in Chinese))

(本文责编 明经平)