

DOI: 10.11779/CJGE202111019

# 基于侧阻概念化的桩基沉降计算方法研究

王 涛<sup>1, 2, 3</sup>, 刘金砾<sup>1, 2, 3</sup>, 褚 卓<sup>1, 2, 3</sup>, 王 旭<sup>1, 2, 3</sup>

(1. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013; 2. 中国建筑科学研究院有限公司地基基础研究所, 北京 100013;  
3. 北京市地基基础与地下空间开发利用工程技术研究中心, 北京 100013)

**摘要:** 基于侧阻概念化的 Mindlin 解整体均化应力分层总和法计算群桩基础沉降的具体方法和细则。针对压缩层计算厚度、上部结构刚度贡献、变刚度调平设计中桩型多样性、复合桩基沉降计算等, 结合特定侧阻分布概念模式、不同长径比、不同桩距条件给出了基桩均化附加应力计算简易方法, 提出基桩均化附加应力叠加分层总和方法计算群桩基础沉降的具体步骤、细则。应用均化附加应力计算方法计算群桩沉降, 通过工程实例验证, 与 Boussinesq 实体深基础计算法和等效作用计算法比较, 其沉降计算值与实测竣工沉降值较为接近。

**关键词:** 附加应力系数; 基桩均化附加应力; 概念化; 桩基础; 沉降计算

中图分类号: TU470 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)11-2119-08

作者简介: 王 涛(1978—), 男, 辽宁鞍山人, 博士, 研究员, 主要从事桩基工程方面的研究工作。E-mail: taow715@sina.com。

## Calculation of settlement of pile foundation based on conceptualization of pile shaft resistance

WANG Tao<sup>1, 2, 3</sup>, LIU Jin-li<sup>1, 2, 3</sup>, CHU Zhuo<sup>1, 2, 3</sup>, WANG Xu<sup>1, 2, 3</sup>

(1. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China; 2. China Academy of Building Research Foundation Institute, Beijing 100013, China; 3. Beijing Engineering Technology Research Center of Foundation and City Underground Space Development and Utilization, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Based on the conceptualization of pile shaft resistance, the method of Mindlin's solution to calculate the settlement of pile group foundation is studied. According to the thickness of the compressive layer, the stiffness contribution of the superstructure, the diversity of pile type in the variable stiffness leveling design and the settlement calculation of the composite pile foundation, a simple method for calculating the homogenized additional stress of the foundation pile is given in combination with the generalized mode of the specific lateral resistance distribution, different length-diameter ratios, and different pile spacings. The steps and rules for calculating the settlement of pile group foundation by the superposition layer summation method for the additional stress of pile homogenization are put forward. The settlement of pile groups is calculated by the proposed method for homogenized additional stress. Through the verification of engineering examples, compared with that of the Boussinesqs method for solid deep foundation and the equivalent action method, the calculated settlement is closer to the measured one.

**Key words:** additional stress coefficient; additional stress of pile homogenization; conceptualization; pile foundation; settlement calculation

## 0 引言

桩基沉降计算一直是受设计人员关注的一个焦点, 因为工程设计人员对此接触颇多, 岩土科研人员对其中的相关问题也热衷研讨。《建筑桩基技术规范: JGJ94—2008》列入了等效作用分层总和法计算桩基沉降。该方法是于 25 a 前研发出台并列入规范, 在当时的历史条件下, 相对于传统的实体深基础计算法是一个进步。但要客观地分析等效作用法, 其最大缺陷是

未考虑桩侧阻力对附加应力场的实际贡献。在 20 世纪 90 年代要取得大量长桩、超长桩试桩的侧阻测试资料可以说是不可能的。近 10 a 来, 桩基规范研究小组围绕桩基沉降计算的相关问题进行了有意义的探索研究。

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8192050); “十二·五”国家科技支撑计划课题(2012BAJ07B01); 住房和城乡建设部课题(2020-K-122)

收稿日期: 2021-04-19

## 1 关于桩侧阻力概化研究

2013 年—2014 年, 邱明兵等<sup>[1]</sup>、刘金砺等<sup>[2-3]</sup>收集 24 组 51 根桩的侧阻力、端阻力、沉降测试资料开展“不同条件下桩侧阻力、端阻力性状及侧阻力分布概化分布与应用”研究, 将不同地质条件、不同长径比试验桩在工作荷载(特征值)下的侧阻分布曲线按“避繁就简, 作用等效”的原则进行概化, 所谓作用等效就是概化拆线包络图与实测曲线包络图外形相似、形心相近, 等代面积与桩侧荷载相等。对不同地层结构侧阻分布的概化模式归纳为 6 种: 正梯形、倒梯形、蒜头形、峰谷形、橄榄形、灯笼形。将每种概化模式分解为 2~3 个桩长为  $l$ ,  $kl$  的矩形、正三角形分布单元, 另加按端阻比确定的端阻单元。根据 Mindlin 解附加应力系数表可逐一确定供桩基沉降计算的附加应力。综合 153 根桩各试桩的端阻测试结果和桩端持力层性质、桩长径比、平均侧阻诸因素给出工作荷载下的端阻比  $\alpha$  如表 1。

表 1 端阻比  $\alpha$ Table 1 Ratio  $\alpha$  of pile tip resistance

桩端持力层	桩长径比 $l/d$	平均极限侧阻力 $\bar{q}_{su}$ /kPa			
		50	100	200	300
较硬	$l/d \leq 30$	0.25	0.15	0.08	0.02
	$30 < l/d \leq 60$	0.20	0.10	0.05	0.01
	$l/d > 60$	0.10	0.05	0.02	0
硬	$l/d \leq 30$	0.30	0.20	0.10	0.03
	$30 < l/d \leq 60$	0.20	0.15	0.08	0.02
	$l/d > 60$	0.15	0.08	0.03	0.01
坚硬	$l/d \leq 30$	0.35	0.25	0.15	0.04
	$30 < l/d \leq 60$	0.25	0.20	0.10	0.03
	$l/d > 60$	0.20	0.10	0.05	0.02

由表 1 可看出, 建筑桩基绝大部分为摩擦桩, 其沉降变形决定因素是侧阻力形成的附加应力场。2015 年至今, 借助前面课题成果桩基规范课题组进一步展开了 103 根桩侧阻力、端阻力、沉降测试, 将不同特色土层结构中的基桩侧阻力分别概化为正梯形、锥头形、蒜头形、凹谷形 4 种模式。分析具体工程时, 将桩侧土层柱状图与之比对, 综合判定其属于何种概化模式, 进而将其分解为 2~3 个基本单元, 并确定相关参数; 根据相关参数和上述均化附加应力系数计算桩端平面以下任一点的附加应力:

$$\sigma_{z,p} = \frac{4\alpha Q}{\pi d^2} k_p, \quad \sigma_{z,sr} = \frac{Q_{sr}}{\pi dl} k_{sr}, \quad \sigma'_{z,sr} = \frac{Q_{srkl}}{\pi dkl} k'_{sr}, \quad \sigma'_{z,st} =$$

$$\frac{Q_{st}}{\pi dl} k_{st}, \quad \sigma'_{z,st} = \frac{Q_{stkl}}{\pi dkl} k'_{st}。至此, \sigma_z = \sigma_{z,p} + \sigma'_{z,sr} + \sigma'_{z,st} +$$

$\sigma'_{z,st}$ 。上述均化端阻、矩形分布及正三角形分布侧阻附加应力系数  $k_p$ ,  $k_{sr}$ ,  $k_{st}$  均编成  $z/d$ ,  $S_a/d$ ,  $l/d$ ,  $\mu = 0.35$  的表格和程序, 可手算又可机算。2019 年,

笔者针对基桩侧阻力概化模式给出了正梯形、锥头形、蒜头形、凹谷形桩身压缩计算公式<sup>[4]</sup>。

## 2 关于桩基附加应力场均化研究

2000 年初, 关于桩径影响, 《建筑桩基技术规范》给出了沿桩身轴线的竖向应力影响系数解析角和轴线以外的数值解<sup>[5]</sup>。2014 年, 改进 Minlin-Geddes 的附加应力计算式<sup>[6-8]</sup>, 由原物理意义不明晰的  $Q/l^2$ ,  $I_p$ ,  $I_{sr}$ ,  $I_{st}$  为因子表述的计算式改造为作用力( $q_p$ ,  $q_{sr}$ ,  $q_{st}$ )与附加应力系数( $k_p$ ,  $k_{sr}$ ,  $k_{st}$ )相乘的计算表达式:  $\sigma_p = q_p \cdot k_p$ ,  $\sigma_{sr} = q_{sr} \cdot k_{sr}$ ,  $\sigma_{st} = q_{st} \cdot k_{st}$ ; 原考虑桩径影响的 Mindlin 解沿桩身轴线的竖向应力影响系数解析式相应调整为附加应力系数以深径比  $z/d$ 、距径比  $S_a/d$  为自变量的函数, 即表述为  $k_p(\mu, d, l, z)$ ,  $k_{sr}(\mu, d, l, z)$ ,  $k_{st}(\mu, d, l, z)$  解析式。这样使得描述任一点应力场其物理意义清晰, 应用方便<sup>[1]</sup>。

文献[5]是基于半无限弹性体内外力作用下按 Mindlin 解计算附加应力的理论, 包括附加应力系数考虑桩径问题、附加应力系数考虑均化问题。对于前者, 将集中力解析式改进为考虑桩径的解析式, 桩径之外采用数值分析法并兼顾桩径影响; 对于后者, 考虑桩自身荷载和相邻桩影响下产生的侧阻力附加应力系数, 在桩端平面下  $4d$  深度内桩身投影截面范围内存在较大差异, 而  $4d$  深度恰是基桩主要压缩变形区域, 对最终沉降计算影响较大; 对于端阻, 在桩自身荷载和相邻桩影响下产生的端阻附加应力系数, 在桩端平面下  $2d$  深度范围桩身投影截面范围内存在一定差异, 而  $2d$  深度恰是基桩主要压缩层, 对沉降计算影响较大。基于以上原因, 对基桩自身投影截面范围内的附加应力系数和受影响范围的基桩附加应力系数进行均化处理, 以均化附加应力系数(即曲面的平均矢高)取代轴线上的值<sup>[5]</sup>。

## 3 桩基沉降计算细则

采用基于桩侧阻力分布不同概化模式的 Mindlin 解计算桩基沉降。该计算方法有如下特点: ①桩侧土层性质与分布对附加应力场的影响得到反映; ②考虑基桩侧阻、端阻附加应力在桩自身及相邻影响桩端以下(2~4)  $d$  深度投影截面内的非均匀分布, 附加应力系数(单位荷载下的附加应力)以桩身投影截面内的均化值取代桩轴线上的值; ③按整体模式计算桩基沉降时, 其压缩层厚度采用以桩群包络线围成面宽度和桩长径比为参数的经验计算式确定。沉降计算可采用查表手算或利用既有程序机算。

(1) 承台底地基土不分担荷载的桩基。桩端平面

以下地基中由基桩引起的附加应力, 按考虑实际桩侧阻概化模式的 Mindlin 均化应力解计算确定。将沉降计算点水平面影响范围内各基桩对应力计算点产生的附加应力叠加, 采用单向压缩分层总和法计算土层的沉降, 并计入桩身压缩  $s_e$ 。桩基的最终沉降量可按下列公式计算:

$$s = \psi \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} \Delta z_i + s_e \quad , \quad (1)$$

$$\sigma_{zi} = \sum_{j=1}^m (q_{pj} \cdot k_{pj} + q_{sr,j} k_{sr,j} + \bar{q}_{st,j} k_{st,j}) \quad . \quad (2)$$

(2) 对于桩与承台底共同承载的复合桩基沉降采用复合应力分层总得法计算。将承台底土压力对地基中某点产生的附加应力按布辛奈斯克解计算, 与基桩产生的附加应力叠加, 采用与常规桩基相同方法计算沉降。其最终沉降量可按下列公式计算:

$$s = \psi \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi} + \sigma_{zci}}{E_{si}} \Delta z_i + s_e \quad , \quad (3)$$

$$\sigma_{zci} = \sum_{k=1}^u \alpha_{ki} \cdot p_{ck} \quad . \quad (4)$$

式中  $m$  为以沉降计算点为圆心, 水平面影响范围内的基桩数;  $j$  为水平有效影响半径范围内第  $j$  根基桩;  $q_{pj}$ ,  $q_{sr,j}$ ,  $\bar{q}_{st,j}$  分别为第  $j$  根基桩的端阻、均匀分布侧阻、正三角形分布平均侧阻;  $k_{pj}$ ,  $k_{sr,j}$ ,  $k_{st,j}$  分别为第  $j$  根基桩对被影响基桩第  $i$  分层的端阻、矩形分布侧阻、正三角形分布平均侧阻均化附加应力系数;  $n$  为沉降计算深度范围内土层的计算分层数, 分层数应结合土层性质, 分层厚度不应超过计算深度的 0.3 倍;  $\sigma_{zi}$  为水平面影响范围内各基桩对应力计算点桩端平面以下第  $i$  层土 1/2 厚度处产生的附加竖向应力之和, 应力计算点应取与沉降计算点最近的桩中心点;  $\sigma_{zci}$  为承台压力对应力计算点桩端平面以下第  $i$  计算土层 1/2 厚度处产生的应力; 可将承台板划分为  $u$  个矩形块, 可按桩基规范附录 D 采用角点法计算;  $\Delta z_i$  为第  $i$  计算土层厚度 (m);  $E_{si}$  为第  $i$  计算土层的压缩模量 (MPa), 采用土的自重压力至土的自重压力加附加压力作用时的压缩模量;  $p_{ck}$  为第  $k$  块承台底均匀分布压力, 可按  $p_{ck} = \eta_{ck} \cdot f_{ak}$  取值, 其中  $\eta_{ck}$  为第  $k$  块承台底板的承台效应系数, 按桩基规范表 5.2.5 确定,  $f_{ak}$  为承台底地基承载力特征值;  $\alpha_{ki}$  为第  $k$  块承台底角点处, 桩端平面以下第  $i$  计算土层 1/2 厚度处的附加应力系数, 可按桩基规范附录 D 确定;  $s_e$  为计算桩身压缩<sup>[4]</sup>;  $\psi$  为沉降计算经验系数, 无当地经验时, 可取 1.0。

对于孤立单桩或独立承台 (其下桩数小于 4 根)、单排桩、疏桩复合桩基础的最终沉降计算深度  $Z_n$ , 可按应力比法确定, 即  $Z_n$  处由桩引起的附加应力  $\sigma_z$ 、由承台土压力引起的附加应力  $\sigma_{zc}$  与土的自重应力  $\sigma_c$  应符合下式要求:

$$\sigma_z + \sigma_{zc} = 0.2 \sigma_c \quad . \quad (5)$$

对于桩中心距不大于 6 倍桩径的群桩基础的最终沉降计算深度  $Z_n$ , 可按下式计算确定<sup>[2]</sup>:

$$Z_n = B \left( 1.3 - 0.3 \ln \frac{B}{10} + 0.2 \ln \frac{l/d}{50} \right) \quad . \quad (6)$$

式中  $Z_n$  为桩端平面以下的压缩层计算厚度 (m);  $B$  为桩群包络线围成面宽度 (m),  $1.3B$  为基宽对压缩层厚度的基本影响值;  $0.3 \ln \frac{B}{10}$  为基宽对压缩层厚度影响的修正值, 当  $B = 10$  m 时, 不修正, 当  $B < 10$  m 时, 导致  $Z_n$  大于  $1.3B$ , 当  $B > 10$  m 时, 导致  $Z_n$  小于  $1.3B$ ;  $0.2 \ln \frac{l/d}{50}$  为长径比对压缩层厚度影响的修正值, 当  $l/d = 50$  时不修正; 当  $l/d < 50$  时, 导致  $Z_n$  减小, 当  $l/d > 50$  时, 导致  $Z_n$  增大。

基于考虑桩径影响的 Mindlin 解, 采用数值分析方法求得基桩由端阻、不同分布形态侧阻在桩端平面下任一点  $z/d$  处桩身投影截面范围内附加应力系数均化值 (应力分布曲面的平均矢高), 包括端阻均化附加应力系数  $k_p$ 、矩形分布侧阻均化附加应力系数  $k_{sr}$ 、正三角形分布平均侧阻均化附加应力系数  $k_{st}$ ; 并求得不同水平距离  $S_a/d$  基桩对计算基桩相互影响的端阻、矩形分布侧阻、正三角形分布平均侧阻的均化附加应力系数。已将上述均化附加应力系数随  $l/d$ ,  $z/d$ ,  $S_a/d$  ( $\mu=0.35$ ) 的变化值编列成表<sup>[5]</sup>。

基桩引起的桩端阻和侧阻在桩自身投影截面任一深度  $z$  处产生的均化附加应力  $\sigma_z$  为端阻均化附加应力  $\sigma_{zp}$  与侧阻均化附加应力  $\sigma_{zs}$  之和, 应根据考虑实际桩侧阻概化模式的 Mindlin 均化应力解按下列公式计算:

$$\sigma_z = \sigma_{zp} + \sigma_{zs,r} + \sigma'_{zs,r} + \sigma_{zs,st} + \sigma'_{zs,st} \quad , \quad (7)$$

$$\sigma_{zp} = \frac{4\alpha Q}{\pi d^2} k_p \quad , \quad (8)$$

$$\sigma_{zs,r} = \frac{Q_{srl}}{\pi d l} k_{sr} \quad , \quad (9)$$

$$\sigma'_{zs,r} = \frac{Q_{srkl}}{\pi d k l} k'_{sr} \quad , \quad (10)$$

$$\sigma_{zs,st} = \frac{Q_{stl}}{\pi d l} k_{st} \quad , \quad (11)$$

$$\sigma'_{zs,st} = \frac{Q_{stkl}}{\pi d k l} k'_{st} \quad . \quad (12)$$

式中  $\sigma_{zp}$  为端阻力在应力计算点引起的附加应力 (kPa);  $\sigma_{zs,r}$  为  $l$  桩长均匀分布侧阻力在应力计算点引起的附加应力 (kPa);  $\sigma'_{zs,r}$  为  $kl$  桩长均匀分布侧阻力在应力计算点引起的附加应力 (kPa);  $\sigma_{zs,st}$  为  $l$  桩长正三角形分布侧阻力在应力计算点引起的附加应力

(kPa);  $\sigma_{z,st}$  为  $kl$  桩长正三角形分布侧阻力在应力计算点引起的附加应力 (kPa);  $Q$  为基桩在荷载效应准永久组合作用下(对于复合桩基应扣除承台底土分担)桩顶的附加荷载 (kN); 当地下室埋深超过 5 m 时, 取荷载效应准永久组合作用下的总荷载为考虑回弹再压缩的等代附加荷载;  $Q_{stl}$ ,  $Q_{srkl}$ ,  $Q_{stl}'$ ,  $Q_{srkl}'$  分别为基桩在荷载效应准永久组合作用下,  $l$  桩长均匀分布侧阻下、 $kl$  桩长均匀分布侧阻下、 $l$  桩长正三角形分布侧阻下、 $kl$  桩长正三角形分布侧阻下桩顶的等效附加荷载 (kN); 当地下室埋深超过 5 m 时, 取荷载效应准永久组合作用下的总荷载为考虑回弹再压缩的等代附加荷载;  $k_p$  为考虑侧阻概化模式的端阻均化附加应力系数;  $k_{sr}$ ,  $k'_{sr}$ ,  $k_{st}$ ,  $k'_{st}$  分别为考虑侧阻概化模式的  $l$  桩长均匀分布侧阻均化附加应力系数、 $kl$  桩长均匀分布侧阻均化附加应力系数、 $l$  桩长正三角形分布侧阻均化附加应力系数、 $kl$  桩长正三角形分布侧阻均化附加应力系数;  $k$  为侧阻力局部分布长度与桩长之比;  $\alpha$  为桩端阻力比;  $l$  为桩长 (m);  $d$  为桩径 (m)。

考虑实际桩侧阻概化模式的 Mindlin 均化应力解法应综合考虑桩群密度和布桩参数、基础形式不同, 以及上部结构和桩基承台的刚度效应差异, 采用以下两种方法之一计算桩基础最终沉降。

(1) 整体均化分层总和法。此法适用于布桩密度大、上部结构整体刚度大的桩基, 如核心筒、剪力墙、电梯楼梯间等的桩基。

首先, 采用综合判定方法确定的侧阻概化分布模式和端阻比, 继而确定计算域内各基桩桩端平面以下各计算分层 1/2 厚度处基桩自身端阻、侧阻均化附加应力系数和受诸邻桩影响的端阻、侧阻均化附加应力系数, 并自桩端平面起分层 (计算压缩层范围按压缩模量、厚度分层) 叠加, 求得各桩侧阻、端阻各分层附加应力  $\sigma_{zi}$ ,  $\sigma_{zci}$ , 将其在计算域之和除以桩数得分层均化附加应力, 按式 (1), (2) 计算桩基最终平均沉降。

(2) 离散式分层总和法: 本法适用于布桩稀疏、上部结构和承台整体刚度弱的桩基, 如框架、贮罐等的桩基。

首先, 采用综合判定法确定侧阻概化分布模式和端阻比, 继而确定计算域坐标原点, 将各编号基桩的  $x$ ,  $y$  坐标列出, 计算各基桩自身和受相邻桩影响的端阻、侧阻分层均化附加应力系数分别在各基桩桩身投影截面内叠加, 求得各基桩桩端平面以下各分层 1/2 厚度处的均化附加应力。按应力比法确定压缩层厚度  $z_n$  (附加应力与土自重应力之比为 0.2 处为压缩层层底), 采用分层总和法按式 (1), (2) 逐一计算基桩最终沉降。

## 4 工程实测对比验证

### 4.1 北京中国尊

#### (1) 工程概况

中国尊大厦位于北京市朝阳区 CBD 核心区 Z15 地块。主塔地上共 108 层, 建筑高度约 528 m, 地下 5 层。塔楼地下结构与桩位布置见图 1, 2。

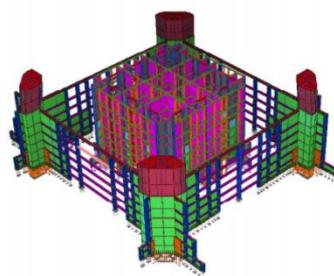


图 1 地下结构钢结构图

Fig. 1 Steel structure of underground structures

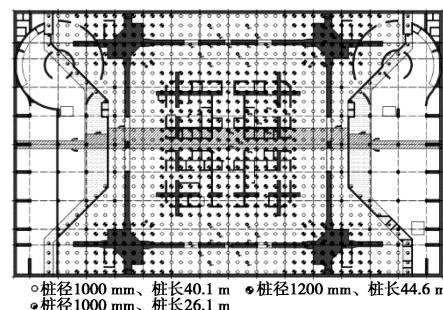


图 2 桩位布置图

Fig. 2 Layout of piles

主塔楼结构体系由周边巨型柱+巨型斜撑框筒和中央核心筒组成, 外框筒传力路径由边梁柱、转换桁架、巨型斜撑, 并通过巨型柱传至基础。筏板厚 6.5 m, 埋置深度为 38 m。在核心筒和巨型柱区域桩为桩径 1200 mm, 桩长 44.6 m, 承载力设计值为 16000 kN; 在其他大部分区域桩为桩径 1000 mm, 桩长 40.1 m, 承载力设计值为 14500 kN; 在筏板边缘区域桩为桩径 1000 mm, 桩长 26.1 m, 承载力设计值为 10000 kN。总桩数为 896。

#### (2) 场地地质条件

场地地层柱状图如图 3。基础底面为⑦层粉质黏土。基底⑦层粉质黏土以下为卵石圆砾、粉质黏土、中砂细砂、粉质黏土和卵石圆砾, 桩端所处持力层为⑫层卵石圆砾。

#### (3) 大楼部分桩基沉降计算

根据式 (6) 研究成果确定沉降影响深度  $z_n = 32.00$  m。

以核心筒区域桩为例, 平均极限侧摩阻力  $\bar{q}_{su} = 190.60$  kPa, 查表综合确定工作荷载下端阻比  $\alpha =$

0.03。根据本文研究成果, 根据本文研究成果判定其为锥头形概化分布。最终基桩总承载力工作荷载下侧阻概化结果如图 4 所示。

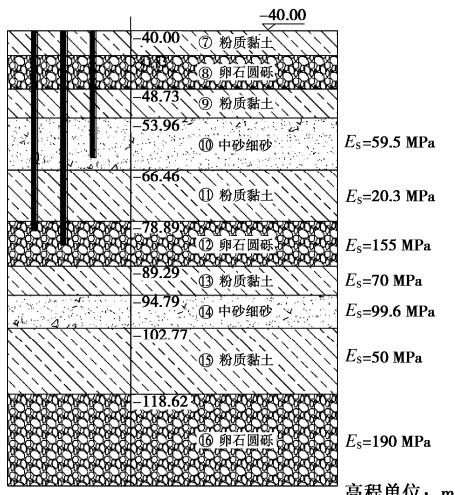


图 3 场地地层柱状图

Fig. 3 Stratigraphic histogram of site

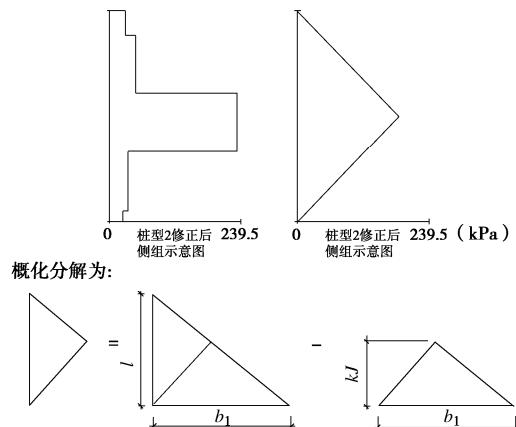


图 4 桩侧摩阻力概化模式图

Fig. 4 Conceptual model for pile shaft resistance

$$\bar{q}_{st} = b_1 / 2 = (1 - \alpha)Q / \pi d l (1 - k) = 190.6. \quad (13)$$

根据文献[7]研究成果计算桩身压缩变形量  $s_e = 10.03 \text{ mm}$ , 沉降计算最终结果见表 2, 3 与图 5。总沉降量为 102.90 mm。

表 2 北京中国尊沉降计算值与实测值比较

Table 2 Comparison of calculated and measured settlements of CITIC Tower

计算方法	s/mm
Boussinesq 解实体深基础计算法 (国标地基规范法)	62.3
《建筑桩基技术规范》JGJ94 等效 作用计算法	60.3
本文推荐方法 (最大沉降值)	121.53
本文推荐方法 (计算区域均化沉 降值)	102.90
实测竣工沉降最大沉降 (估)	98.0

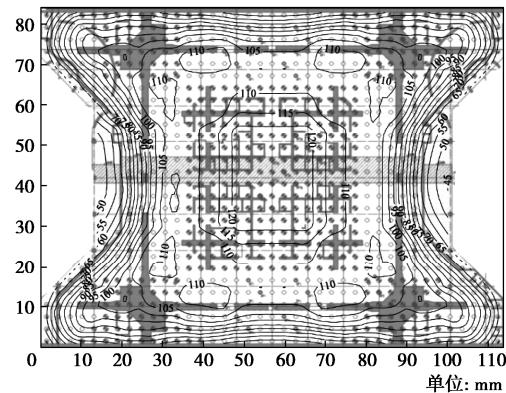


图 5 本文推荐方法计算等沉线图

Fig. 5 Isoline map of settlement calculated by proposed method

#### 4.2 金茂大厦

##### (1) 工程概况

金茂大厦的塔楼地面以上 88 层, 地下 3 层。大楼整体基础平面布置见图 6, 核心筒部分桩基平面布置见图 7。

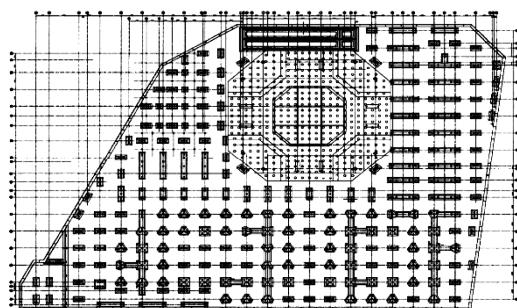


图 6 金茂大厦整体基础平面布置图

Fig. 6 Overall layout of foundation of Jinmao Building

该塔楼的设计竖向总荷载约为  $3 \times 106 \text{ kN}$ , 按核心筒结构范围内投影面积计, 平均承台底面总压力高达  $2060 \text{ kN/m}^2$ 。塔楼桩基选择⑨-2 层细砂夹中粗砂作为桩端持力层, 桩型采用直径 914.4mm、壁厚为 20 mm 钢管桩, 有效桩长为 61 m, 桩基承载力特征值为 7500 kN。塔楼桩基承台采用混凝土平板结构, 承台板平面为八边形(双轴对称), 承台板下共设置 429 根桩; 承台板厚度 4000 mm, 埋置深度为 23.45 m, 承台板混凝土强度等级 C50。

##### (2) 场地地质条件

场地地层柱状图如图 8, 平均地下水处于地面下 0.5 m。基础底面为⑥层粉质黏土。基底⑥层粉质黏土以下为砂质粉土, 粉细砂和砂质粉土, 核心筒部分的桩端所处持力层为⑨-2 细砂夹中粗砂, 以下为⑩粉质黏土。

##### (3) 大楼部分桩基沉降计算

确定沉降影响深度  $z_n = 50.95 \text{ m}$ 。平均极限侧摩阻力  $\bar{q}_{su} = 75.91 \text{ kPa}$ , 查表综合确定工作荷载下端阻比

表 3 整体均化分层总和法桩基沉降计算结果

Table 3 Calculated results of settlement of pile foundation by integral homogenization layer summation method

序号	层底标高 /m	侧阻附加应力 /kPa	端阻附加应力 /kPa	压缩模量 /MPa	分层压缩 /mm
1	-41.10	487.90	340.260		
2	-41.60	472.82	229.820	155	2.469
3	-42.10	457.73	119.380	155	2.064
...	...	...	...	...	...
43	-72.77	116.79	5.317	50	1.230
44	-73.10	115.63	5.241	50	0.802
总沉降量					92.870

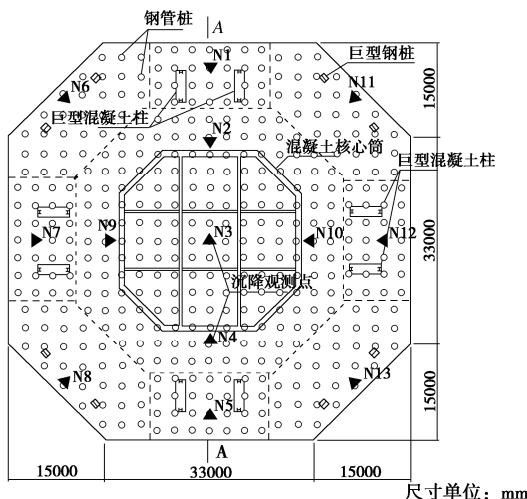


图 7 核心筒部分桩基平面布置图

Fig. 7 Layout of pile foundation of core tube

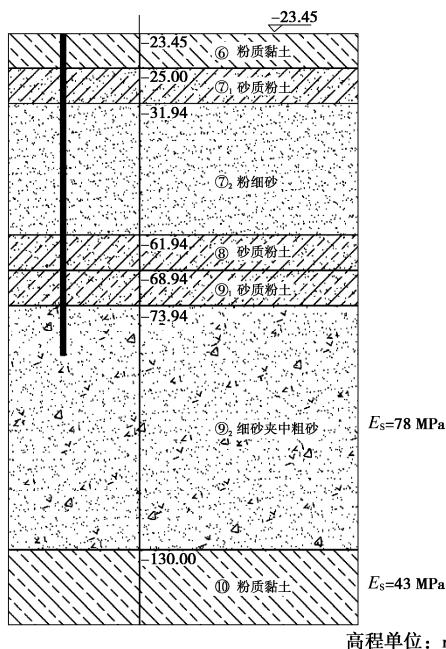
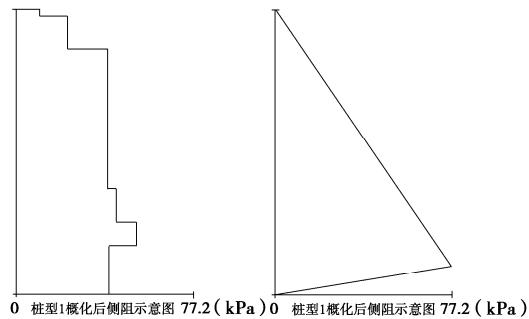


图 8 场地地层柱状图

Fig. 8 Stratigraphic histogram of site

$\alpha = 0.114$ 。根据本文研究成果, 根据本文研究成果判定其为锥头形概化分布。最终基桩总承载力工作荷载

下侧阻概化结果如图 9 所示。 $\bar{q}_{st} = 42.8$ 。计算桩身压缩变形量  $s_e = 18.77 \text{ mm}$ 。沉降计算最终结果见表 4, 5 与图 10。总沉降量为 79.79 mm。



概化分解为:

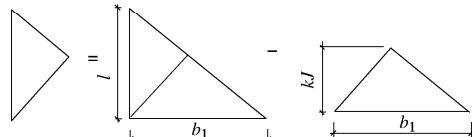


图 9 桩侧摩阻力概化模式图

Fig. 9 Conceptual model for pile shaft resistance

表 4 金茂大厦沉降计算值与实测值比较

Table 4 Comparison of calculated and measured settlements of Jinmao Building

计算方法	$s/\text{mm}$
Boussinesq 解实体深基础计算法 (国标地基规范法)	44.70
《建筑桩基技术规范》JGJ94 等效作用计算法	23.60
本文推荐方法 (最大沉降值)	88.59
本文推荐方法 (计算区域均化沉降值)	79.79
实测竣工沉降最大沉降	82.00
实测竣工沉降平均沉降 (核心筒)	77.40

## 5 其它工程应用案例验证

制定采用基于侧阻不同概化模式 Mindlin 解均化应力计算桩基沉降法, 通过表 6 所列工程案例应用表明, 计算值与实测值基本相符, 差异在 10% 以内者占 90%, 无需进行较大修正。

表 5 整体均化分层总和法桩基沉降计算结果

Table 5 Calculated results of settlement of pile foundation by integral homogenization layer summation method

序号	层底标高 /m	侧阻附加应力 /kPa	端阻附加应力 /kPa	压缩模量 /MPa	分层压缩 /mm
1	-84.45	213.340	667.360		
2	-84.95	204.730	377.100	78	4.688
3	-85.45	196.340	136.450	78	2.932
...	...	...	94.195	78	1.975
160	-135.00	25.413	5.557	43	0.360
161	-135.30	25.413	5.557	43	0.286
总沉降量					61.020

表 6 典型工程桩基沉降计算值与实测值比较

Table 6 Comparison of calculated and measured settlements of pile foundation in typical projects

工程名称	建筑高度 /m	地下室层数	桩径 /mm	桩长 /m	桩数	桩端持力层	Boussinesq 解实体深基 础计算法	等效作用计 算法(JGJ94 方法)	计算 $s'$ /mm	实测值 $s/mm$	计算 值/实 测值
北京国际财源中心 IFC (核心筒桩基)	156.0	7	1000	25.00	90	卵石	209.10	127.80	44.65	42.90	1.04
北京电视中心综合业 务大楼核心筒	236.0	3/4	1000/800	26.00	224	卵石	286.84	120.47	54.71	51.75	1.06
长青大厦 (酒店部分)	88.6	3	400	14.05	292	卵石/圆砾	135.54	82.68	32.16	30.00	1.07
北京佳美风尚中心 (西塔)	99.8	3	800	37/17.4	222	卵石/圆砾	73.69	44.21	31.10	29.90	1.04
北京望京悠乐汇	90.0	4	800	16.50	186	细中砂 /圆砾	176.32	89.20	33.97	29.90	1.14
上海环球金融中心	492.0	3	700	61.00	1215	含砾中粗砂 粉砂	351.70	277.20	121.27	126.30	0.96
上海中心大厦	632.0	5	1000	56.00	956		160.80	139.90	94.74	93.00	1.02

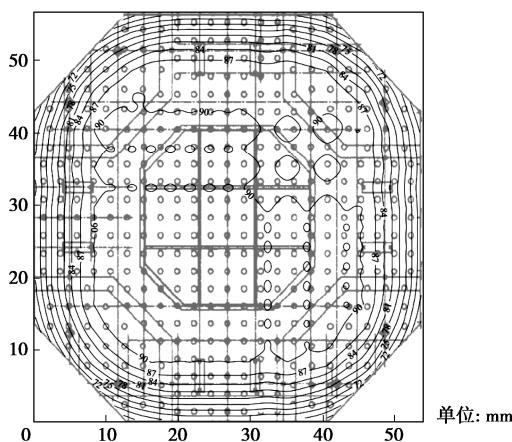


图 10 本文推荐方法计算主楼部分等沉线图

Fig. 10 Isopleth chart of main building calculated by proposed method

## 6 结语

本文通过对 154 根现场试桩实际桩侧阻力分布形式的测试结果, 将在工作荷载 (基桩承载力特征值)

下各种繁杂不同侧阻分布概化为正梯形、锥头形、蒜头形、凹谷形 4 种, 并给出相应简化分解方法。基于基础和结构刚度对沉降分布的影响, 通过对桩基 Mindlin 解附加应力场分布和桩基础变形特点研究, 对基桩侧阻进行概化和对基桩自身截面投影范围内附加应力系数进行均化, 同时对受影响桩在截面投影范围内附加应力系数进行均化处理。据此进一步提出基桩均化附加应力分层总和法计算常规桩基和复合桩基沉降的具体步骤、细则。通过实际工程案例计算表明, 本文推荐方法计算桩基沉降值在不经修正的情况下, 与工程实测值较为接近。该法计算沉降的可靠性、准确性, 仍需通过不同工程地质条件、不同建筑结构形式、基础形式的桩基工程进行检验。

## 参考文献:

- [1] 邱明兵, 刘金砾, 秋仁东, 等. 基于 Mindlin 解的单桩竖向附加应力系数[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3): 130–137.  
(QIU Ming-bing, LIU Jin-li, QIU Ren-dong, et al. Study on vertical additional stress coefficient for the single piles based

- on Mindlin's stress solution theory[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **47**(3): 130 – 137. (in Chinese))
- [2] 刘金砾, 秋仁东, 邱明兵, 等. 不同条件下桩侧阻力端阻力性状及侧阻力分布概化与应用[J]. 岩土工程学报, 2014, **36**(11): 1953 – 1970. (LIU Jin-li, QIU Ren-dong, QIU Ming-bing, et al. Behaviors of shaft resistance and tip resistance of piles under different conditions and conceptualization and application of distribution of shaft resistance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, **36**(11): 1953 – 1970. (in Chinese))
- [3] 刘金砾, 邱明兵, 秋仁东, 等. Mindlin 解均化应力分层总和法计算群桩基础沉降[J]. 土木工程学报, 2014, **47**(5): 118 – 127. (LIU Jin-li, QIU Ming-bing, QIU Ren-dong, et al. A layerwise summation method for settlement calculation of pile group based on the homogenized Mindlin stress[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **47**(5): 118 – 127. (in Chinese))
- [4] 王 涛, 褚 卓, 刘金砾, 等. 基于桩侧摩阻力概化模式的桩身压缩量计算[J]. 建筑结构, 2019, **49**(17): 130 – 135, 83. (WANG Tao, CHU Zhuo, LIU Jin-li, et al. Calculation of pile body compression based on pile shaft resistance conceptualization mode[J]. Building Structure, 2019, **49**(17): 130 – 135, 83. (in Chinese))
- [5] 王 涛, 刘金砾, 王 旭. 基于桩侧阻概化模式的基桩均化附加应力系数研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(4): 665 – 672. (WANG Tao, LIU Jin-li, WANG Xu. Homogenized additional stress coefficient of foundation piles based on generalized mode of pile shaft resistance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(4): 665 – 672. (in Chinese))
- [6] 刘金砾, 迟铃泉. 桩土变形计算模型和变刚度调平设计[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(2): 151 – 157. (LIU Jin-li, CHI Ling-quan. The modified model of pile-soil deformation calculation and variable rigidity design method for balance settlement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, **22**(2): 151 – 157. (in Chinese))
- [7] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid[J]. Physics, 1936, **7**(5): 195 – 202.
- [8] GEDDES J D. Stresses in foundation soils due to vertical subsurface loading[J]. Géotechnique, 1966, **16**(3): 231 – 255.