

DOI: 10.11779/CJGE201804010

基于桩侧阻概化模式的基桩均化附加应力系数研究

王 涛^{1, 2}, 刘金砾^{1, 2}, 王 旭^{1, 2}

(1. 中国建筑科学研究院地基基础研究所, 北京 100013; 2. 建筑安全与环境国家重点实验室, 北京 100013)

摘要: 基于群桩 Mindlin 应力解附加应力场和群桩基础变形分布特征, 考虑承台和上部结构刚度对沉降变形的均化效应, 在现有 Mindlin 解均化应力分层总和法计算群桩基础沉降基础上, 提出任意布桩模式下基桩均化附加应力系数数值计算方法。针对特定侧阻分布概化模式给出不同长径比、不同桩距条件下的基桩均化附加应力系数表格, 为手算群桩基础沉降所需的均化附加应力计算提供有效的简易方法。提供的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: 侧阻力; 端阻力; 概化模式; Mindlin 应力解; 均化附加应力系数; 沉降计算

中图分类号: TU473 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)04-0665-08

作者简介: 王 涛(1978-), 男, 辽宁鞍山人, 工学博士, 研究员, 国家注册土木工程师(岩土), 主要从事桩基工程研究。E-mail: taow715@sina.com。

Homogenized additional stress coefficient of foundation piles based on generalized mode of pile shaft resistance

WANG Tao^{1, 2}, LIU Jin-li^{1, 2}, WANG Xu^{1, 2}

(1. Foundation Institute, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Building Safety and Built Environment, Beijing 100013, China)

Abstract: Based on the stress field calculated by the Mindlin stress theory with the pile diameter effect considered and the existing Mindlin homogenization stress summation method for calculating the settlement of pile group foundation, the deformation behavior of the pile group foundation as well as the homogenization effect of pile cap and the superstructure stiffness on the settlement deformation, the homogenized additional stress coefficient of foundation piles under the arbitrary pile distribution mode is proposed. In the light of the generalized model for specific shaft resistance distribution, the pile-pile homogenization stress coefficient table is given under different ratios of length to diameter and different pile spacing, so as to provide an effective simple method for the settlement of pile group foundation. The additional stress is provided for calculating the settlement of pile groups. This method is verified by the engineering examples. By comparing the Boussinesq method for deep foundation and the equivalent method, the calculated settlements are close to the measured ones at completion of settlement.

Key words: shaft resistance; tip resistance; generalized mode; homogenized additional stress coefficient; mean stress; settlement calculation

1 基桩均化附加应力系数的提出

为了提高桩基础沉降计算的准确性, 近年来研究人员聚焦于应用 Mindlin 应力解确定地基附加应力这一核心问题。传统 Mindlin-Geddes 应力解将桩侧阻力、桩端阻力都简化为集中力, 忽略了桩径影响, 从而导致桩端平面以下一定范围土体中应力集中现象较为明显, 应用此方法计算压缩层较薄地层的桩基础沉降显然不妥。国家行业标准《建筑桩基技术规范》JGJ94—2008 制定了单桩、单排桩、疏桩基础的明德林解应力影响系数叠加分层总和法计算桩基础沉降, 并考虑

计入桩身压缩变形量, 即 Mindlin 解应力影响系数叠加法(考虑桩径影响的改进 Mindlin-Geddes 应力解)。此法给出了考虑桩径影响沿桩中轴线上土中应力解析解和轴线以外的数值积分解, 并制成表格供设计人员手算查表。Mindlin 解应力影响系数叠加法虽然理论上先进, 但实际操作繁琐, 且各点计算值差异较大。除此之外, 现行国标地基规范和桩基规范及其它相关地

基金项目: “十二·五”国家科技支撑计划课题项目(2012BAJ07B01)

收稿日期: 2016-12-28

方标准中的 Mindlin-Geddes 应力解计算式大多表述为 $\sigma_{z,p} = \frac{\alpha Q}{l^2} I_p$, $\sigma_{z,sr} = \frac{\beta Q}{l^2} I_{sr}$, $\sigma_{z,st} = \frac{(1-\alpha-\beta)Q}{l^2} I_{st}$, 其中: σ_{zp} 为桩端阻力在应力计算点产生的附加应力; $\sigma_{zs,r}$ 为均匀分布桩侧阻力在应力计算点产生的附加应力; $\sigma_{zs,t}$ 为三角形分布桩侧阻力在应力计算点产生的附加应力; α 为桩端阻力占桩顶荷载比; β 为均匀分布侧阻力占桩顶荷载比; l 为桩长; I_p , I_{sr} , I_{st} 为考虑桩径影响的 Mindlin 解应力影响系数。鉴于上述附加应力计算表达式繁复, Q/l^2 , I (I_p , I_{sr} , I_{st}) 物理意义不明确, 无明确的数字变化规律。桩基规范课题组改进了桩基规范的附加应力计算式, 由原物理意义不明确的 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: $\sigma_p = q_p \cdot k_p$, $\sigma_{sr} = q_{sr} \cdot k_{sr}$, $\sigma_{st} = q_{st} \cdot k_{st}$; 而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, 这样使得描述任一点应力场的物理意义明确, 应用方便^[1]。式中, q_p , q_{sr} , q_{st} 分别为端阻、 l 桩长的矩形分布侧阻、正立三角形分布平均侧阻; k_p , k_{sr} , k_{st} 分别为端阻附加应力系数、 l 桩长的矩形分布侧阻附加应力系数和正立三角形分布侧阻附加应力系数。

考虑到各点计算值差异大的实际情况, 刘金砾研究员对群桩附加应力场进行剖析, 考虑基础(承台或筏板)刚度、上部结构刚度对基础沉降变形的均化效应, 提出 Mindlin 解均化应力分层总和法计算桩基础沉降^[3]。并以群桩 $l/d = 40$, $S_a/d = 3$, $n = 3 \times 3$, $\nu = 0.35$ 为例, 绘图示意分析了桩端平面以下土中的应力场, 见文献[3]中的图 2~4。

Mindlin 解均化应力分层总和法按桩端刺入变形和桩端以下土体整体压缩的均化应力原则求得群桩的均化附加应力系数。桩端阻力附加应力均化系数 \bar{k}_p , 在桩端平面至 $2d$ ($z/d = 0 \sim 2$) 深度范围内均化面积取各桩端(取 $1.1d$)投影截面积(图 1a), 桩端 $2d$ 以下的 \bar{k}_p 和桩端平面 ($z/d = 0$) 以下的 \bar{k}_{sr} , \bar{k}_{st} 的均化面积取桩群包络线范围内面积(图 1(b))。

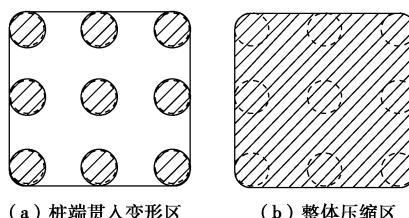


图 1 应力均化面积范围示意图

Fig. 1 Sketch of homogenized stress range

为了实际工程应用方便, 将桩长径比 $l/d = 20 \sim 100$, 桩距径比 $S_a/d = 3 \sim 5$, 桩数 $n = 2 \times 2, \dots, 20 \times$

20 , $\nu = 0.35$ 的群桩 \bar{k}_p , \bar{k}_{sr} , \bar{k}_{st} 制成表格。

以上方法在实际应用中存在如下问题:

(1) 桩端平面 $2d$ 以下 \bar{k}_p 和桩端平面 ($z/d = 0$) 以下 \bar{k}_{sr} , \bar{k}_{st} 的应力均化面积取桩群包络线范围内面积, 此包络线相当于人为规定应力扩散范围(默认包络线内所有基桩均相互影响), 与实际不符合。

(2) 实际应用过程中, 因布桩形式(不规则)和桩参数(因采用变刚度调平设计成不同桩长、不同桩径、不同桩距)不同, 很难统一应用上述表格进行查表计算。

基于以上原因, 本文提出均化面积均取自桩端截面投影面积。其理由如下:

(1) 端阻附加应力均化系数 \bar{k}_p 在桩端至 $2d$ 深度范围 ($z/d = 0 \sim 2$) 桩投影面积内附加应力系数远高于周围土中的附加应力系数。桩侧阻附加应力系数 \bar{k}_{sr} , \bar{k}_{st} 在桩端平面处桩投影面积内附加应力系数也高于周围土中的附加应力系数。因此, 该条件下原均化方法将桩土共同参与均化差异较大。

(2) 桩端 $2d$ 以下的 \bar{k}_p 和桩端平面 $3d$ 以下的 \bar{k}_{sr} , \bar{k}_{st} 因应力扩散而趋于均化, 因此, 该条件下考虑桩间土参与均化与否对于最终均化结果影响不大。因此均化可以近似忽略桩间土, 直接取桩投影截面积范围进行均化, 这样既提高了计算效率, 又使得结果差异变化不大。

综合以上诸因素, 本研究仅考虑将附加应力系数在桩投影截面范围内进行均化。此法便于计算距离主动影响桩 S_a/d 任一值处, 受影响桩投影截面范围内附加应力系数的均化值。这使得计算方法满足不同布桩形式和布桩参数的需要, 其机动灵活性和适用范围更强。

2 基桩均化附加应力系数研究

2.1 基本思路

对于单桩的 Mindlin 解进行积分并得到附加应力, 可将桩分为桩侧面及桩端面两个部分进行二重积分。桩侧面为圆柱面, 二重积分可分为极坐标圆弧长积分沿纵坐标积分两步。

龙贝格求积算法, 采用误差的事后估计法, 利用理查森外推加速法, 具有收敛速度快、计算效率高、对不充分光滑的函数亦可积分的优点, 缺点在于积分代码编写较为繁琐、调试过程复杂。因此, 应对多种积分编写统一的积分函数, 适应不同的求积函数, 从而提高代码编写及调试效率。

2.2 数值积分求解基桩均化附加应力系数

1936 年, Mindlin 提出了基于弹性半空间的附加

应力解, 如图2弹性半空间内作用一集中力, N 为求解点。单位竖向集中力作用下的竖向附加应力 σ_z 求解公式为

$$\sigma_z(x, y, z) = \frac{p}{8\pi(1-\nu)} \left[\frac{(1-2\nu)(z-C)}{R_1^3} - \frac{(1-2\nu)(z-C)}{R_2^3} + \frac{3(z-C)^3}{R_1^5} + \frac{3(3-4\nu)z(z+C)^2 - 3C(z+C)(5z-C)}{R_2^5} + \frac{30Cz(z+C)^3}{R_2^7} \right], \quad (1)$$

式中, $R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-C)^2}$, $R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+C)^2}$, ν 为土体泊松比, 一般取0.35。

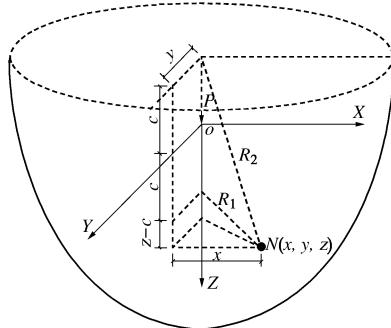


图2 Mindlin解计算简图

Fig. 2 Simple chart of Mindlin solution

基于上述Mindlin解公式, 进行数值积分求解附加应力系数, 详细坐标变换及积分求解、计算程序框图及流程限于本文篇幅不再赘述。

通过积分程序计算单桩侧阻附加应力系数($l/d = 40$, $\nu = 0.35$), 将矩形分布侧阻及三角形分布侧阻的近桩端平面土层应力场(单位侧阻下的附加应力系数场即为附加应力场)分别表示于图3~5(X 轴与 Y 轴交点为桩中心)。

如图3~5所示桩端平面应力场的特征为:

(1)桩端平面土层的附加应力在桩侧周围位置产生应力集中现象, 其原因有二: ①假定桩受力为桩侧弧面; ②Mindlin应力解为弹性介质。

(2)与相同位置桩端平面矩形分布侧阻附加应力系数相比, 三角形侧阻土层附加应力系数较大。

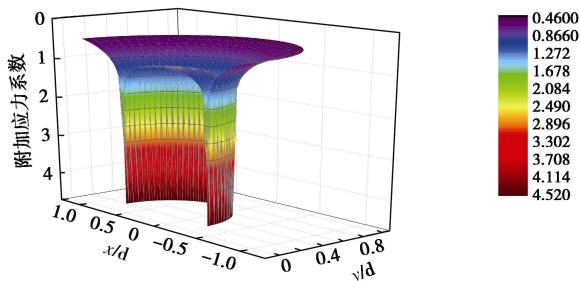


图3 矩形分布桩侧阻在桩端平面应力场(1/2剖面)

Fig. 3 Stress fields at pile tip for pile shaft resistance with rectangular distribution

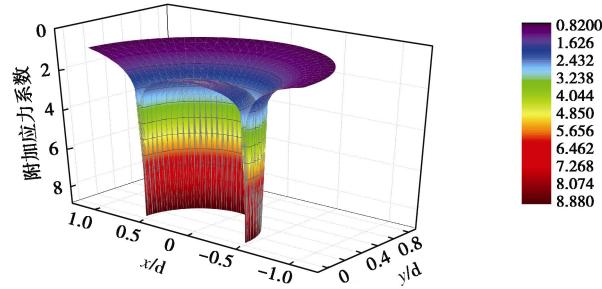


图4 三角形分布桩侧阻在桩端平面应力场(1/2剖面)

Fig. 4 Stress fields at pile tip for pile shaft resistance with triangular distribution

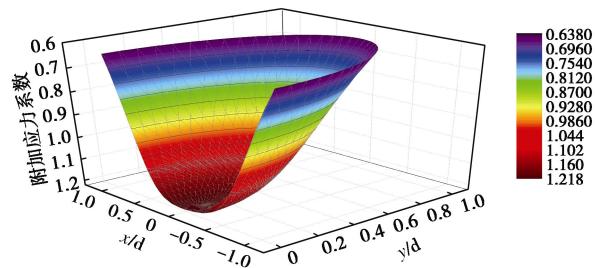


图5 三角形分布侧阻桩端平面以下0.5d位置的应力场(1/2剖面)

Fig. 5 Stress fields of 0.5d at pile tip for shaft resistance with triangular distribution

进一步研究发现, 三角形分布侧阻的桩端平面土层附加应力在桩侧位置产生应力集中的现象在桩端以下0.5d平面位置即消失, 附加应力场为圆滑曲面, 如图5所示。矩形分布侧阻情况也类似。

通过上述对基桩附加应力场的分析, 有必要对基桩自身桩投影截面范围内附加应力系数进行均化, 同时被影响桩投影截面范围内附加应力系数也需要均化处理。即利用数值积分方法求得由基桩端阻力、不同分布形态分布侧阻在桩端平面下任一点 z/d 处桩身截面范围内附加应力系数平均值(即曲面的平均矢高), 同时也可以积分求出基桩任一 S_a/d 处被影响桩身截面范围内附加应力系数平均值(即曲面的平均矢高)。为了方便设计人员手工计算, 可以将 $(z/d, S_a/d)$ 两因素影响下的基桩均化附加应力系数通过数值积分计算出来编制成表格。为便于设计人员手工计算的需要, 本研究将由基桩端阻力、矩形分布侧阻力、正三角形分布侧阻力产生的均化附加应力系数编制成表格(按 $l/d = 10 \sim 100$ 分别列出表格), 方便设计人员查询。表格编制考虑按桩侧扩散影响范围限于12倍桩径范围内。限于本文篇幅, 仅将 $l/d = 30$ 的情况示意列出, 见表1~3。

3 群桩附加应力及沉降计算方法

采用前述积分得到的基桩均化附加应力系数应用

叠加法计算群桩中每根桩桩端平面以下各点处总均化附加应力系数，再乘以由端阻力、不同分布形态侧阻在各点处产生平均阻力即为基桩的平均附加应力。对于上部结构刚度较大（如框筒结构中核心筒部分）的情况，为计入上部结构刚度影响，在求出每根桩端平面下的附加应力后，再将附加应力按桩数进行平均，即求出均化附加应力，据此可直接计算群桩沉降。

将上述计算过程用公式表述如下, 群桩中的基桩顶部附加荷载 Q 作用下桩端平面以下地基土任一点竖向附加应力 σ_z 由端阻产生附加应力 $\sigma_{z,p}$ 、侧阻基本单元产生附加应力的代数和 $\sigma_{z,s}$ 组成, 现分别表示如下:

桩端平面下地基任一点竖向附加应力

$$\sigma_z = \sigma_{z,p} + \sigma_{z,s} \quad \circ \quad (2)$$

端阻产生附加应力

$$\sigma_{z,p} = q_p k_p, q_p = \frac{4\alpha Q}{\pi d^2} \quad \circ \quad (3)$$

桩长 l 矩形分布侧阻产生附加应力

$$\sigma_{z,sr} = q_{sr} k_{sr}, q_{sr} = \frac{Q_{sr}}{\pi dl} \quad \circ \quad (4)$$

桩长 kl 矩形分布侧阻产生附加应力

$$\sigma'_{z,sr} = q'_{sr} k'_{sr}, q'_{sr} = \frac{Q_{srkl}}{\pi dk l} \quad . \quad (5)$$

桩长 l 正立三角形分布侧阻产生附加应力

$$\sigma_{z,st} = \bar{q}_{st} k_{st}, \bar{q}_{st} = \frac{Q_{stl}}{\pi d l} \quad \circ \quad (6)$$

桩长 k_1 正立三角形分布侧阻产生附加应力

$$\sigma'_{z, \text{st}} = \bar{q}'_{\text{st}} k'_{\text{st}}, \bar{q}'_{\text{st}} = \frac{Q_{\text{stkl}}}{\pi d k l} \quad . \quad (7)$$

以上各式中: α 为总端阻与附加荷载 Q 之比; Q_{stl} 为 l 桩长矩形分布侧阻下等效桩顶附加荷载; O_{stl} 为

表 1 基桩端阻力均化附加应力系数

Table 1 Homogenization additional stress coefficients of tip resistance

kl 桩长矩形分布侧阻下等效桩顶附加荷载; Q_{stl} 为 l 桩长正三角形分布侧阻下桩顶等效附加荷载; Q_{stkl} 为 kl 桩长正三角形分布侧阻下桩顶等效附加荷载; d 为桩径; l 为桩长; k 为局部分布侧阻力长度与桩长之比; q_p , q_{sr} , \bar{q}_{st} 分别为端阻、 l 桩长的矩形分布平均侧阻、正立三角形分布平均侧阻; q'_{sr} , \bar{q}'_{st} 分别为 kl 桩长的矩形分布侧阻和正立三角形分布平均侧阻; k_p , k_{sr} , k_{st} 分别为端阻附加应力系数、 l 桩长的矩形分布侧阻附加应力系数和正立三角形分布侧阻附加应力系数; k'_{sr} , k'_{st} 分别为 kl 桩长的矩形分布侧阻附加应力系数和正立三角形分布侧阻附加应力系数。

群桩基础沉降计算公式可以表述如下：

$$s = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi} + \Delta\sigma_{zi}}{E_{si}} \Delta z_i + s_e \quad (s_e \text{ 为桩身压缩量})。 \quad (8)$$

桩与桩之间应力叠加影响范围受桩土模量影响。在考虑桩侧力扩散相互影响时, 桩侧阻力产生附加应力的有效影响半径在文献[8]中做过实测方面的分析和研究。有效影响半径 ρ_e 按桩侧、端土的压缩模量加权平均值综合确定, 当 $\bar{E}_s \leq 1 \sim 4$ MPa, 取 $\rho_e = (6 \sim 8d)$; 当 $\bar{E}_s = 5 \sim 9$ MPa, 取 $\rho_e = (8 \sim 10d)$; 当 $\bar{E}_s > 10$ MPa, 取 $\rho_e = (11 \sim 12d)$ 。在无相关地区经验及试验值的情况下可以参照上述影响范围计算。

考虑桩-桩相互影响的应力计算采用叠加法进行, 影响应力 $\Delta\sigma_{ni}$ 按下式计算:

$$\Delta\sigma_{zi} = \sum_{k=1}^t (q_{p,k} \cdot k_{p,i} + q_{sr,k} \cdot k_{sr,i} + \bar{q}_{st,k} \cdot k_{st,i}) \quad . \quad (9)$$

式中 $\Delta\sigma_{zi}$ 为影响范围内基桩对计算基桩压缩层内第 i 分层的影响应力; k 为有效影响半径范围内第 k 基桩; t 为影响总桩数; q_{pk} , q_{srk} , \bar{q}_{stk} 为第 k 基桩的端

表2 矩形分布侧阻力的基桩均化附加应力系数

Table 2 Homogenization additional stress coefficients of side resistance with rectangular distribution

		$l/d = 30, \nu = 0.35$																			
z/d	s_a/d	0	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12
0	1.1242	0.1476	0.1258	0.1096	0.0971	0.087	0.0788	0.0719	0.0661	0.0611	0.0567	0.0529	0.0495	0.0464	0.0437	0.0412	0.0389	0.0369	0.035	0.0332	
1	0.5078	0.1456	0.1246	0.1087	0.0964	0.0865	0.0783	0.0715	0.0657	0.0608	0.0564	0.0526	0.0493	0.0462	0.0435	0.041	0.0388	0.0367	0.0349	0.0331	
2	0.2945	0.1376	0.1199	0.1058	0.0944	0.0850	0.0773	0.0707	0.0651	0.0602	0.0560	0.0522	0.0489	0.0459	0.0433	0.0408	0.0386	0.0366	0.0347	0.0330	
3	0.2027	0.1245	0.1114	0.1001	0.0905	0.0823	0.0752	0.0692	0.0639	0.0593	0.0552	0.0516	0.0484	0.0455	0.0429	0.0405	0.0383	0.0363	0.0345	0.0328	
4	0.1534	0.1102	0.1010	0.0926	0.0850	0.0782	0.0721	0.0668	0.0621	0.0578	0.054	0.0507	0.0476	0.0448	0.0423	0.0400	0.0379	0.0360	0.0342	0.0326	
5	0.1229	0.0970	0.0907	0.0845	0.0787	0.0733	0.0683	0.0638	0.0596	0.0559	0.0525	0.0494	0.0465	0.0440	0.0416	0.0394	0.0374	0.0355	0.0338	0.0322	
6	0.1021	0.0857	0.0812	0.0767	0.0723	0.0681	0.0641	0.0603	0.0568	0.0536	0.0506	0.0478	0.0452	0.0428	0.0406	0.0386	0.0367	0.0350	0.0333	0.0318	
8	0.0759	0.0681	0.0658	0.0633	0.0607	0.0582	0.0556	0.0531	0.0507	0.0483	0.0461	0.0440	0.0420	0.0401	0.0382	0.0365	0.0349	0.0334	0.0320	0.0306	
10	0.0599	0.0557	0.0544	0.0529	0.0513	0.0497	0.0481	0.0464	0.0447	0.0431	0.0415	0.0399	0.0384	0.0369	0.0354	0.0341	0.0328	0.0315	0.0303	0.0291	
12	0.0492	0.0467	0.0459	0.0449	0.0439	0.0429	0.0418	0.0406	0.0395	0.0383	0.0371	0.036	0.0348	0.0337	0.0326	0.0315	0.0304	0.0294	0.0284	0.0274	
14	0.0415	0.0399	0.0393	0.0387	0.0380	0.0373	0.0366	0.0358	0.0349	0.0341	0.0332	0.0324	0.0315	0.0306	0.0298	0.0289	0.0281	0.0272	0.0264	0.0256	
16	0.0357	0.0346	0.0342	0.0338	0.0333	0.0328	0.0323	0.0317	0.0311	0.0305	0.0298	0.0292	0.0285	0.0278	0.0272	0.0265	0.0258	0.0252	0.0245	0.0238	
18	0.0312	0.0304	0.0302	0.0298	0.0291	0.0287	0.0283	0.0278	0.0274	0.0269	0.0264	0.0259	0.0253	0.0248	0.0243	0.0237	0.0232	0.0227	0.0221		
20	0.0276	0.0270	0.0268	0.0266	0.0263	0.026	0.0257	0.0254	0.0251	0.0247	0.0243	0.0239	0.0235	0.0231	0.0227	0.0223	0.0218	0.0214	0.0210	0.0205	

表3 正三角形分布侧阻力的基桩均化附加应力系数

Table 3 Homogenization additional stress coefficients of side resistance with triangle distribution

		$l/d = 30, \nu = 0.35$																			
z/d	s_a/d	0	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12
0	2.0776	0.2002	0.1633	0.1365	0.1163	0.1007	0.0882	0.0781	0.0698	0.0629	0.0570	0.0521	0.0478	0.044	0.0408	0.0379	0.0353	0.0331	0.0310	0.0292	
1	0.8943	0.2046	0.1678	0.1407	0.1201	0.1040	0.0912	0.0808	0.0722	0.0650	0.0589	0.0537	0.0493	0.0454	0.0420	0.0390	0.0363	0.0340	0.0318	0.0299	
2	0.4920	0.1969	0.1652	0.1406	0.1211	0.1056	0.0929	0.0825	0.0739	0.0666	0.0604	0.0551	0.0506	0.0466	0.0431	0.0400	0.0372	0.0348	0.0326	0.0306	
3	0.3235	0.1782	0.1546	0.1348	0.1182	0.1043	0.0926	0.0828	0.0745	0.0674	0.0614	0.0561	0.0515	0.0475	0.0439	0.0408	0.0380	0.0355	0.0333	0.0313	
4	0.2353	0.1562	0.1398	0.1249	0.1118	0.1002	0.0902	0.0814	0.0738	0.0672	0.0615	0.0564	0.0519	0.0480	0.0445	0.0414	0.0386	0.0361	0.0338	0.0318	
5	0.1821	0.1355	0.1242	0.1135	0.1035	0.0943	0.0860	0.0785	0.0719	0.0660	0.0607	0.0560	0.0518	0.0480	0.0447	0.0416	0.0389	0.0364	0.0342	0.0322	
6	0.1470	0.1177	0.1099	0.1021	0.0946	0.0875	0.0808	0.0746	0.0690	0.0638	0.0592	0.0549	0.0510	0.0476	0.0444	0.0415	0.0389	0.0365	0.0343	0.0324	
8	0.1039	0.0906	0.0866	0.0824	0.0781	0.0739	0.0697	0.0656	0.0617	0.0580	0.0546	0.0513	0.0482	0.0454	0.0428	0.0403	0.0380	0.0359	0.0340	0.0321	
10	0.0789	0.0719	0.0697	0.0673	0.0647	0.0621	0.0595	0.0568	0.0542	0.0516	0.0491	0.0467	0.0444	0.0422	0.0401	0.0381	0.0362	0.0345	0.0328	0.0312	
12	0.0628	0.0587	0.0574	0.0559	0.0543	0.0526	0.0509	0.0491	0.0473	0.0455	0.0438	0.0420	0.0403	0.0386	0.0370	0.0354	0.0339	0.0325	0.0311	0.0298	
14	0.0516	0.0491	0.0482	0.0472	0.0462	0.0451	0.0439	0.0427	0.0414	0.0402	0.0389	0.0376	0.0363	0.0351	0.0338	0.0326	0.0314	0.0302	0.0291	0.0280	
16	0.0435	0.0418	0.0412	0.0405	0.0398	0.0390	0.0382	0.0374	0.0365	0.0355	0.0346	0.0337	0.0327	0.0317	0.0308	0.0298	0.0289	0.0280	0.0271	0.0262	
18	0.0373	0.0361	0.0357	0.0352	0.0347	0.0342	0.0336	0.0330	0.0323	0.0316	0.0309	0.0302	0.0295	0.0287	0.0280	0.0273	0.0265	0.0258	0.0251	0.0243	
20	0.0325	0.0316	0.0313	0.0310	0.0306	0.0302	0.0298	0.0293	0.0288	0.0283	0.0278	0.0272	0.0267	0.0261	0.0255	0.0249	0.0243	0.0237	0.0232	0.0226	

阻平均值、矩形分布平均侧阻、正三角形分布平均侧阻; $k_{p,i}$, $k_{srf,i}$, $k_{st,i}$ 为第 k 基桩对被影响基桩第 i 分层的均化附加应力系数, 可按本文编制的表格查取。

4 工程实测验证

某办公楼位于北京长安街 CBD 国贸中心对面西

南侧, 主楼高 156 m、36 层, 地面以下 7 层, 与周围地下车库连成一体, 基础埋置深度 26 m。主体结构为框架—核心筒结构, 地下车库为框架结构。基础设计按强化核心筒支承刚度, 弱化外框架支承刚度的变刚度调平总体设计思路, 核心筒采用常规桩基设计, 外围框架采用复合桩基承载。桩直径均为 1000 mm,

核心筒处桩长 25 m, 桩端持力层为 13 层细中砂; 外框架桩长 15 m, 桩端持力层为 ⑨ 层卵石, 所有桩基均采用桩端、桩侧后注浆。核心筒处单桩极限承载力标准值 $Q_{uk}=19000$ kN, 桩距 $S_a=3d$; 外围框架采用复合桩基, 桩土共同分担荷载, 单桩极限承载力 $Q_{uk}=14000$ kN。

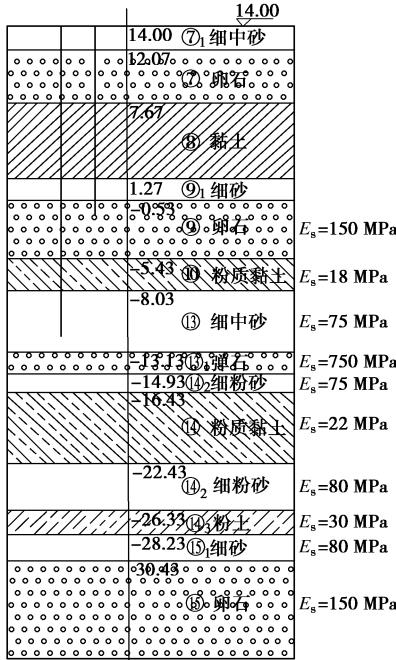


图 6 场地地层柱状土

Fig. 6 Histogram of soil strata

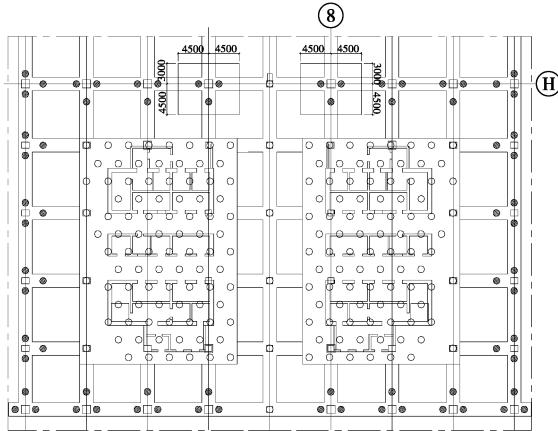


图 7 桩基平面图

Fig. 7 Layout of piles and pile cap

根据文献[2]提供的方法确定端阻比 $\alpha=0.1$ 。根据场地地质剖面图, 自上而下不同土层交互分布, 位于中下部具有应变硬化特性的卵石层, 随荷载增加, 其侧阻剧增, 桩身下部因桩身压缩随桩土相对位移趋零而锐减, 根据文献[2]综合判定桩侧阻形成锥头形概化分布。侧阻概化模式及分解过程如下图。由概化后折线形概化模式求其面积, 该面积与桩周长之乘积为总侧阻, 检验此总侧阻是否等于 $Q_s=Q(1-\alpha)$ 。

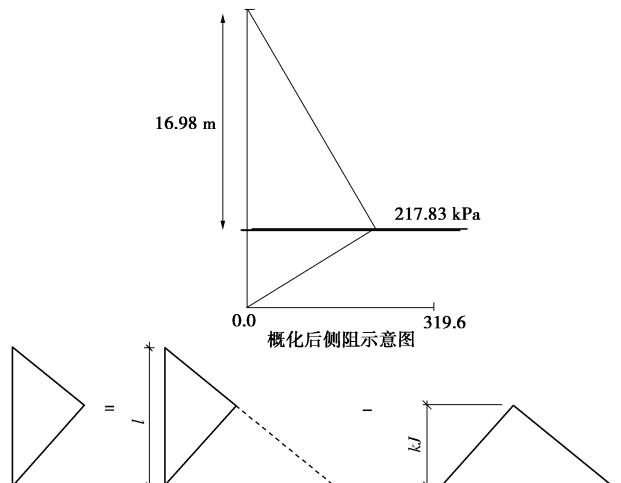


图 8 桩侧阻概化及分解示意

Fig. 8 Generalization and decomposition of pile shaft resistance

$$\sigma_{z,s} = \bar{q}_{st} k_{st} - \bar{q}'_{st} k'_{st} , \quad (10)$$

$$\bar{q}_{st} = \bar{q}'_{st} = b_1 / 2 , \quad (11)$$

$$\bar{q}_{st} = b_1 / 2 = (1 - \alpha)Q / \pi dl(1 - k) , \quad (12)$$

式中, k 为桩身中上部侧阻力最大土层 $1/2$ 厚度处至桩端平面距离与桩长之比, 锥头形峰值与土层侧阻峰值相对应, $k=0.32$ 。

将核心筒下群桩中每根桩经过不同桩间距的桩-桩均化附加应力表系数叠加求得每根桩的附加应力场。考虑核心筒主体区域上部结构刚度较好, 上部结构和基础刚度对沉降具有均化效应, 再将各桩的附加应力场叠加后除以桩数, 即得到任意布桩模式下桩基均化应力, 据此计算群桩沉降。

限于本文篇幅, 详细求解过程不再赘述。经过求解后核心筒桩基沉降结果(未经修正) $s=57.502$ mm, 考虑桩身压缩变形量 6.28 mm, 总沉降量为 $57.502+6.28=63.78$ mm。按建筑桩基规范规定, 后注浆灌注桩基础沉降计算应考虑后注浆减沉效应, 计算值应乘以 0.7(砂砾卵石)~0.8(黏性土、粉土)折减系数, 考虑后注浆减沉效应修正后沉降为 44.65 mm。将本文推荐方法计算本工程西塔核心筒平均沉降值与沉降观测资料中点最大沉降值(竣工时)比较列于表 4(详细计算过程列于表 5), 由表 4 可以看出,

表 4 沉降计算值与沉降观测值比较

Table 4 Calculated and measured settlements

不同计算方法	沉降计算值 s' /mm	后注浆折减系数	沉降计算经验系数 ψ	s /mm
Boussinesq 解实体深基础计算法	209.1	0.7	0.3	43.9
等效作用计算法	127.8	0.7	0.5	44.7
原 Mindlin 解均化应力计算法	66.8	0.7	1.0	46.8
本文推荐方法	60.454	0.7	1.0	44.65
实际观测沉降(竣工时)				37.3
最终沉降				46.6

表 5 桩基沉降计算

Table 5 Calculated settlements of pile groups

序号	层底标高/m	侧阻均化附加应力/kPa	端阻均化附加应力/kPa	模量/MPa	沉降/mm
	-25	152.19	605.62		
1	-25.5	144.84	371.06	75	4.344
2	-26	137.45	135.31	75	2.747
3	-26.5	132.48	101.32	75	1.801
4	-27	127.52	67.328	75	1.533
5	-27.13	126.44	65.728	75	0.361
6	-27.63	122.28	59.572	170	0.593
7	-28.13	118.21	54.282	170	0.562
8	-28.63	114.37	51.457	170	0.537
9	-29.13	110.65	48.792	170	0.517
10	-29.63	107.24	46.581	80	1.059
11	-30.13	103.86	44.685	80	1.024
12	-30.63	100.56	43.688	80	0.992
13	-31.13	97.401	42.551	22.4	3.437
14	-31.63	94.636	41.017	22.4	3.332
15	-32.13	91.871	39.482	22.4	3.227
16	-32.63	89.106	37.948	22.4	3.122
17	-33.13	86.440	36.480	22.4	3.02
18	-33.63	84.059	35.204	22.4	2.926
19	-34.13	81.677	33.927	22.4	2.838
20	-34.63	79.295	32.651	22.4	2.75
21	-35.13	77.016	31.371	22.4	2.664
22	-35.63	75.027	30.082	22.4	2.582
23	-36.13	73.038	28.794	22.4	2.503
24	-36.13	73.038	28.794	22.4	0
25	-36.63	71.049	27.505	80	0.679
26	-37.13	69.155	26.348	80	0.658
27	-37.63	67.527	25.567	80	0.639
28	-38.13	65.899	24.785	80	0.622
29	-38.63	64.271	24.003	80	0.605
30	-39.13	62.680	23.159	80	0.588
31	-39.63	61.194	22.136	80	0.571
32	-40.13	59.708	21.112	80	0.555
33	-40.63	58.222	20.089	80	0.539
34	-41.13	56.804	19.216	30	1.396
35	-41.63	55.580	18.772	30	1.359
36	-42.13	54.357	18.328	30	1.327
37	-42.63	53.134	17.884	80	0.485
38	-43.13	51.954	17.394	80	0.473
39	-43.63	50.900	16.776	80	0.462
40	-44.13	49.845	16.158	80	0.45
41	-44.63	48.790	15.539	180	0.195
42	-45.13	48.010	15.082	180	0.191
43	-45.63	48.010	15.082	180	0.189
总沉降量=					57.502

本文推荐的方法计算值与原先 Mindlin 解均化应力方法计算结果较为相近, 与实测值比较在不经验修正系数修正的情况下也较为相近, 这验证了此法计算群桩沉降的可行性。除本工程实测验证外, 笔者另选不同地区代表性工程应用此法计算桩基沉降进行验证, 其结果均无需经验系数修正或稍作修正即与实测沉降

值相接近, 限于篇幅其验证过程未在本文附上。

5 结语

本文基于群桩 Mindlin 应力解产生附加应力场分布和群桩基础变形特征, 考虑基础(承台或筏板)和上部结构刚度对沉降变形的整体均化作用, 提出任意

布桩模式下基桩均化附加应力系数计算方法。为满足手算群桩基础沉降所需的均化附加应力需要, 针对特定侧阻分布概化模式给出不同长径比、不同桩距条件下的基桩均化附加应力系数表格。通过实际工程验证, 应用本文提供的均化附加应力系数计算附加应力, 据此采用分层总得法计算群桩沉降, 与 Boussinesq 实体深基础计算法和等效作用分层总和法计算法比较, 其沉降计算值与实测沉降值较为接近。本文提供的计算方法, 可以适用不同布桩形式群桩计算沉降的需要。对于上部结构刚度很强的核心筒体部分和对于上部结构刚度为零的纯柔性基础下群桩采用本文推荐的方法均能计算沉降。

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. The additional stress coefficient research for the single pile based on Mindlin's stress solution theory under vertical load[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. Mindlin stress layer wise summation method for settlement calculation of pile group based on the Mindlin's stress solution[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, **47**(5): 118 – 127. (in Chinese))
- [4] JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008. (JGJ94—2008 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008. (in Chinese))
- [5] MINDLIN R D. Force at a point in the interior of a semiinfinite solid[J]. Journal of Applied Physics, 2004, **7**(5): 195 – 202.
- [6] GEDDES J D. Stresses in foundation soils due to vertical subsurface loading[J]. Géotechnique, 1966, **16**(3): 231 – 255.
- [7] 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. (DGJ 08—11—2010 Foundation design code[S]. Shanghai: Shanghai Xian Dai Architectural Design (Group) Co., Ltd., 2010. (in Chinese))
- [8] 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))