

# 群桩基础沉降计算中的若干问题

秋仁东, 刘金砺, 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:** 桩基的沉降变形不仅受制于地基土性状, 也受桩基与上部结构共同作用的影响, 可以说是桩基计算中最为重要、最为复杂的课题之一。本文根据竖向荷载下群桩沉降性状试验的实测资料, 厘清了群桩沉降的基本构成, 探讨了群桩沉降计算中的几个关键问题, 即土中竖向应力的求解、压缩层厚度的确定、长桩基础沉降计算中桩身压缩量应予以考虑, 并给出了相应的解决思路。

**关键词:** 桩基沉降; 竖向应力; 压缩层厚度; 桩身压缩

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)S2-00015-09

**作者简介:** 秋仁东(1981-), 辽宁人, 博士, 从事岩土工程方面的研究、设计咨询和开发工作。E-mail: qiurend@163.com。

## Some problems on settlement calculation of pile group foundation

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

(Institute of Foundation Engineering, China Academy of Building Research, Beijing 100013, China)

**Abstract:** The settlement behaviors of pile group foundation have a close relationship to the ground strata and the interaction between foundation and superstructure. It is an important and complicated part in pile foundation calculation field. Based on a series of large scale mode tests on pile groups, the settlement behaviors of pile group foundation are revealed by the corresponding test data. Furthermore, some important problems to calculate the settlement of the pile group foundation are discussed, such as the calculation of the vertical stress, the compression layer thickness and the pile shaft compression for long piles. Finally, the solutions to these problem are presented.

**Key words:** pile group foundation settlement; vertical stress; compression layer thickness; pile shaft compression

## 0 引言

桩基的沉降变形不仅受制于地基土性状, 也受桩基与上部结构的共同作用的影响, 可以说是桩基计算中最为重要、最为复杂的课题之一<sup>[1]</sup>。说沉降计算重要, 是因为所设计的桩基其最终的沉降变形能否控制在允许范围之内, 能否按计算分析结果进行调整优化以实现变形控制设计, 完全取决于沉降计算结果。说沉降计算复杂, 是因为有以下三方面原因: 一是线弹性连续介质理论与地基土实际性状之间存在差异; 二是影响沉降计算的因素甚多, 计算中不得不对制约沉降变形的诸多因素作适当简化; 三是地基土变形参数的测定和地层分布的勘察等还存在诸多不真实性, 等等。这使得计算结果与实际之间不可避免地存在差异。由此可见, 探讨研究群桩的沉降计算方法, 提高沉降计算的可操作性和可靠性, 是一项极具工程应用价值的工作。群桩基础的沉降变形性状由于受承台-桩土相互作用的影响而变得远比平板基础和单桩(墩)复杂。一般情况下群桩沉降包含: 桩身弹性压缩引起的

桩顶沉降、桩侧应力传递到桩端平面引起的桩端沉降、桩端阻力引起的桩端沉降、各桩相互影响引起的桩端附加沉降。

群桩基础的沉降变形就其发生的部位可划分为桩间土的压缩变形和桩端平面以下地基土的整体压缩变形。群桩沉降计算结果的可靠性主要取决于三个因素, 即土体中的竖向应力、压缩层厚度、土的压缩模量。本文中以不同的群桩基础模型试验为依据分析研究了群桩基础的沉降性状, 在此基础上, 指出了目前已有沉降计算方法的特点与不足, 对群桩沉降计算中几个基本的问题进行了探讨。

## 1 从实测桩土变形剖析群桩基础的沉降性状

### 1.1 桩间土压缩沉降变形性状

刘金砺等人通过系统的大比例尺群桩模型试验,

分别研究了粉土、黏土和砂土地基上群桩基础的沉降性状。结果表明：群桩沉降  $s$  由桩间土压缩变形  $s_i$  和桩底平面地基土整体压缩变形  $s_g$  二部分组成，桩间土的压缩变形所占群桩沉降比例在工作荷载下达 25%~82%，随着桩距增大而增加，见图 1。

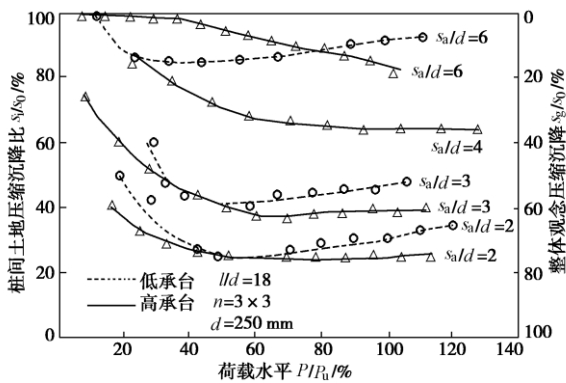


图 1 桩间土压缩沉降比  $s_i/s_0$ 、地基整体压缩沉降比  $s_g/s_0$  随荷载水平的变化 (刘金砺, 1995) <sup>[2]</sup> (粉土地基,  $d=250\text{ mm}$ ,  $l/d=18$ ,  $n=3\times 3$ )

Fig. 1 Variation of settlement ratio of interior soil between piles  $s_i/s_0$  and soil settlement ratio  $s_g/s_0$  under pile point with load (From Liu, 1995)

1.2 桩端平面以下地基土的整体压缩变形

试验表明，桩端土的整体压缩沉降，既与桩端持力层性质有关，而且随桩长、桩距、排列、桩的数量而变化。桩距小、桩数多，土的压缩层厚度大，压缩变形量大，但桩间土的压缩量相对较小；桩距大、桩数相同情况下，桩端以下的压缩层深度和压缩量将相

应减小，但桩的单独贯入量和桩间土压缩将大幅增加，见图 2、图 3。

1.3 长桩超长桩桩身压缩对沉降值的贡献

如图 4 模型试验所示，大比例尺 ( $l/d=50$ ) 长群桩基础在小荷载水平下，桩身压缩沉降比约为 31.5%~14.94%；文献[3]中所给出的大量桩身压缩工程实测资料表明，极限荷载下桩身压缩沉降比介于 100%~50%，压缩量值是相当可观的，群桩沉降计算中应予以考虑。

1.4 群桩沉降变形机理

上述不同试验表明，桩间、桩端土压缩变形特性随地层土性、桩距、桩数、桩长等因素不同而变化。桩端平面以下地基土的整体压缩变形和桩间土体的压缩变形是桩基沉降变形的基本构成。对于桩长较短的群桩而言，桩间土压缩变形源于桩侧剪应力和承台压力外，更主要是源于桩端的单独贯入，即桩端压力对土产生局部压缩，桩端荷载超过允许端阻力时还产生塑性刺入；对于桩侧土模量较好的非软土地区长桩和桩侧土模量较差的软土地区超长桩而言，桩间土的压缩变形主要源于桩身的弹性压缩。若基于承台以下土的竖向压缩分析桩基的沉降，则桩端平面以下土的整体压缩  $s_g$  和桩间土压缩  $s_i$  之和为桩基的沉降  $s$ ：

$$s = s_i + s_g \quad , \quad (1)$$

两边同除以  $s$  得

$$s_i / s + s_g / s = 1 \quad . \quad (2)$$

换言之，桩间土压缩变形比率  $s_i/s$  愈大，桩端以

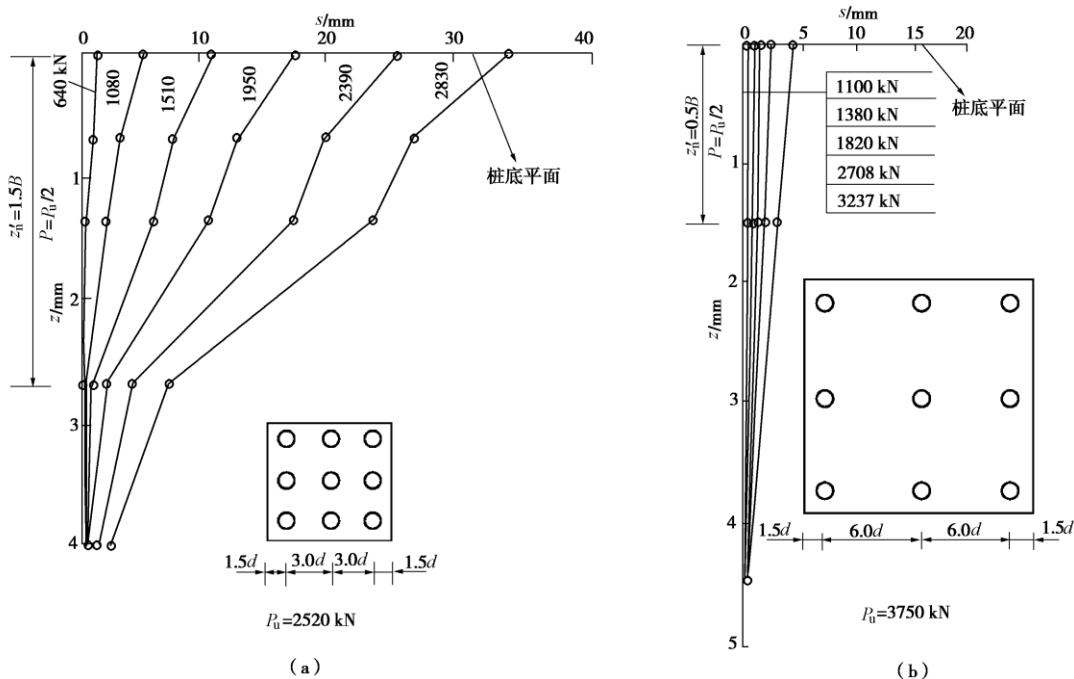


图 2 粉土中群桩桩端平面下地基土整体压缩变形及压缩层深度 (刘金砺, 1995) <sup>[2]</sup>

Fig. 2 Soil settlement behavior under pile point and compression layer thickness in silt (From Liu, 1995)

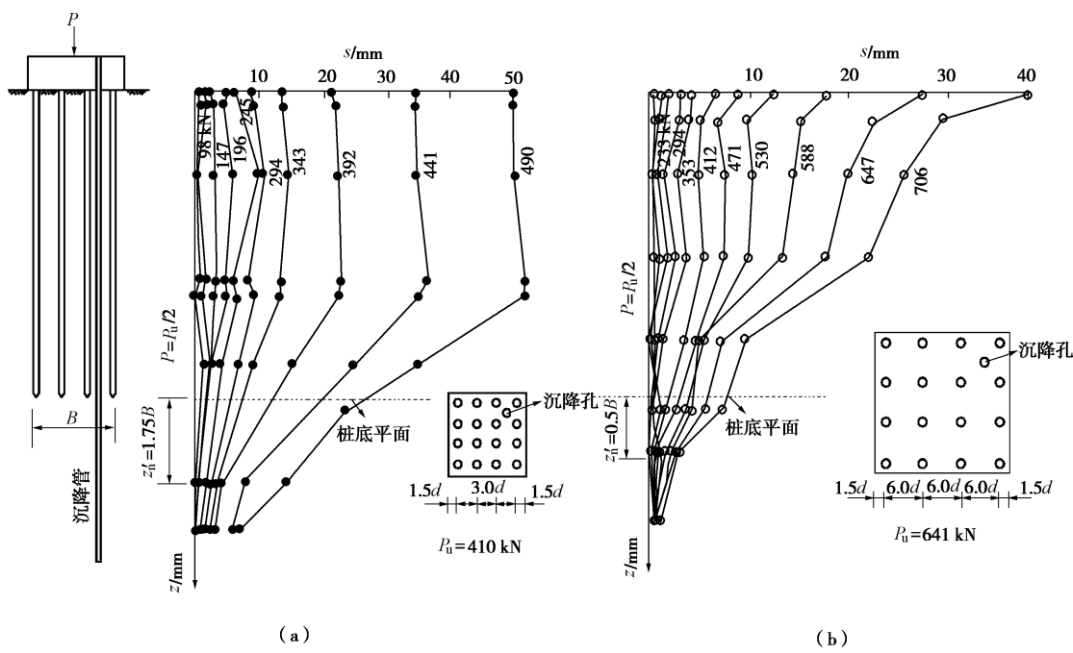


图 3 软土中群桩桩间、桩端土体压缩变形及桩端平面以下压缩层深度 (刘金砺, 1995) [2]

Fig. 3 Soil settlement behavior and compression layer thickness in soft soil (From Liu, 1995)

下整体压缩变形比率便愈小, 即压缩层厚度和压缩层的压缩变形量愈小。目前长桩、超长桩施工工艺因地区地层不同采用成桩工艺不同, 沿海软土地区采用预制桩较为普遍, 采用钻孔灌注桩工艺的工程多辅以后注浆技术进行桩端、桩侧加强处理; 土层较好的非软土地区多采用钻孔灌注桩或长螺旋后插钢筋笼施工工艺。对于后注浆灌注桩, 桩端以下的土体多进行了较好的处理 (沉渣问题), 特别是对于长桩、超长桩群桩基础而言, 在工作荷载条件下, 由于桩端荷载比例较小, 基桩相互影响增沉作用提高, 桩端沉降可认为是没有基桩贯入的桩端土体整体压缩变形。

2 已有的群桩沉降计算方法分析

常规小桩距的群桩基础, 在工作荷载下的沉降计算方法, 目前有两大类。一类是按实体深基础计算模型, 采用弹性半空间表面荷载下 Boussinesq 应力解计算附加应力, 用分层总和法计算沉降; 另一类是以半无限弹性体内部集中力作用下的 Mindlin 解为基础计算沉降。后者主要分为三种, 一种是 Poulos 提出的相互作用因子法; 第二种是 Geddes 对 Mindlin 公式积分而导出集中力作用于弹性半空间内部的应力解, 按叠加原理, 求得群桩桩端平面下各单桩附加应力和, 按分层总和法计算群桩沉降; 第三种是《建筑桩基技术规范》(JGJ94—2008)规定的等效作用分层总和法, 该法考虑了桩距、桩径、桩长等因素, 引入了等效沉降系数来修正附加应力, 使得附加应力更加趋近于 Mindlin 解, 计算简单方便[4]。

2.1 等代墩基法

模式一: 不考虑墩底侧剪应力的扩散, 等代墩基底面积为  $A_b=a \times b$  (图 5 (a)), 墩底附加压力  $\sigma_0$  为作用于承台底面的附加荷载  $F_F$  除以墩底面积  $A_b$ , 即

$$\sigma_0 = \frac{F_F}{A_b} \quad (3)$$

另一种  $\sigma_0$  计算方法是将  $F_F$  扣除等代墩基侧表面的总侧阻力, 即

$$\sigma_0 = (F_F - Q_s) / A_b = [F_F - 2(a + b) \sum q_{sk} l_i] / A_b \quad (4)$$

模式二: 考虑墩侧剪应力按  $\varphi/4$  角扩散, 扩散线与墩底水平面相交的面积为等代墩基底面积 (图 5 (b)),

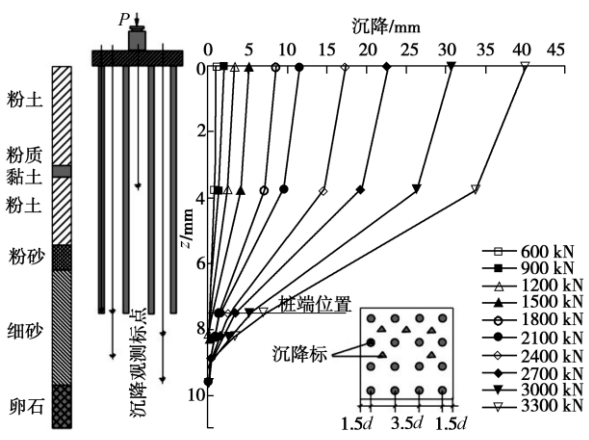


图 4 成层土地基中群桩桩间土、桩端平面以下土体整体压缩变形[3]

Fig. 4 Soil settlement behavior and compression layer thickness in layered soil (From Qiu, 2011)

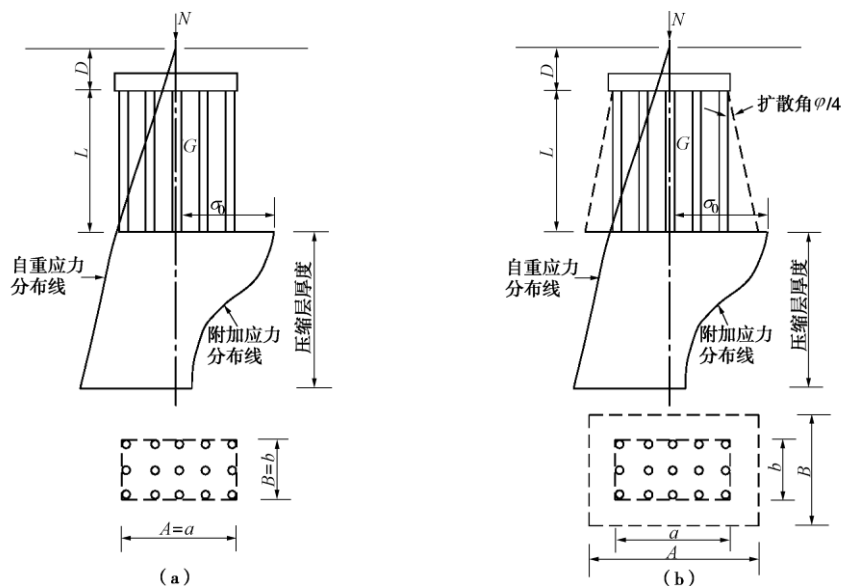


图5 等代墩基法计算沉降模式

Fig. 5 Settlement calculation mode by equivalent abutment foundation method

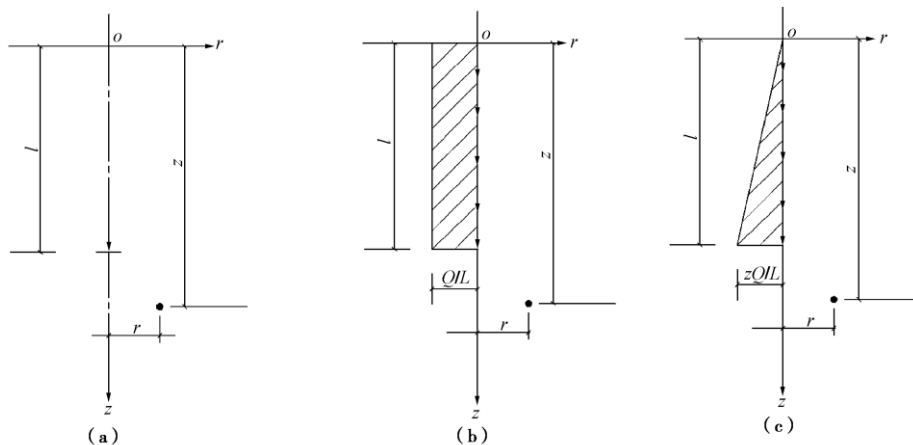


图6 土中应力图示

Fig. 6 Geddes stress in soil

即

$$A_b = AB = (a + 2l \tan(\bar{\varphi}/4))(b + 2l \tan(\bar{\varphi}/4)), \quad (5)$$

式中,  $\bar{\varphi}$  为桩长范围土的内摩擦角加权平均值,  $q_{sik}$  为第  $i$  层土极限桩侧力标准值。

等代墩基法计算桩基沉降在我国应用时间较长, 该法可考虑土的成层性, 操作较简便。缺点: ①墩底平面以下土的应力采用了半无限体受表面荷载的 Boussinesq 解, 导致其计算应力与按半无限体内部受集中力的 Mindlin 解计算结果偏大, 且其差异随桩群中桩数和面积而变化。这样, 就使得压缩层深度也随之偏大, 较大幅度地影响了沉降计算结果。②模式一的假定中, 需要扣除等代墩基侧表面的总侧阻力, 在较小桩数群桩基础模型中会导致墩基基底的附加压力小于 0, 从而算不出沉降, 这显然是不合理的。③模式二的假定中, 由于土体的成层性和不均匀性, 很难准确地确定每层土体的内摩擦角  $\varphi$  值, 这样桩长范围

土的内摩擦角加权平均值的取值具有很大的误差, 导致计算结果失真。④该法在计算中未考虑桩身的弹性压缩。

## 2.2 基于弹性理论 Mindlin 课题的 Geddes 公式算法

Geddes (1965) 基于作用于半无限体内部集中力的 Mindlin 课题, 将桩端分布压应力简化为作用于桩轴线的集中力; 将桩侧剪应力简化为作用于桩轴线上的集中力, 沿深度呈均匀分布和线性增长分布模式(图 6) 条件下, 求得土中任一点竖向应力计算式:

$$\sigma_z = \sigma_{zp} + \sigma_{zsr} + \sigma_{zst}, \quad (6)$$

$$\sigma_{zp} = \frac{Q_p}{l^2} K_p = \frac{\alpha Q}{l^2} K_p, \quad (7)$$

$$\sigma_{zsr} = \frac{Q_{sr}}{l^2} K_{sr} = \frac{\beta Q}{l^2} K_{sr}, \quad (8)$$

$$\sigma_{zst} = \frac{Q_{st}}{l^2} K_{st} = \frac{(1 - \alpha - \beta) Q}{l^2} K_{st}. \quad (9)$$

式中  $l$  为桩长;  $Q_p$ ,  $Q_{sr}$ ,  $Q_{st}$  分别为桩端荷载、矩形分布侧阻力分担的荷载和正三角形分布侧阻力分担的荷载;  $K_p$ ,  $K_{sr}$ ,  $K_{st}$  分别为桩端、矩形分布侧阻和三角形分布侧阻情况下地基中任一点的竖向应力系数;  $\alpha$ ,  $\beta$  分别为桩端荷载占总荷载的比例和桩侧阻力呈矩形分布的桩侧荷载占总荷载的比例。

群桩基础(刚性承台)的沉降,可按上述 Geddes 公式求得群桩桩端平面中心点以下的竖向应力,按有限压缩层模型,采用单向压缩分层总和法计算沉降如公式(10),(11)所示:

$$s = \psi_s \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{zi}}{E_{si}} \Delta z_i, \quad (10)$$

$$\sigma_{zi} = \sum_{j=1}^k \frac{Q_j}{l_j^2} [\alpha_j K_{p,ij} + \beta_j K_{sr,ij} + (1 - \alpha_j - \beta_j) K_{st,ij}] \quad (11)$$

式中  $\sigma_{zi}$  为群桩中各桩对群桩中心线第  $i$  计算土层  $1/2$  厚度处产生的竖向应力之和;  $Q_j$ ,  $l_j$  分别为第  $j$  桩的桩顶荷载和桩长;  $\alpha_j$ ,  $\beta_j$  分别为第  $j$  桩的总端阻力占荷载的比例和矩形分布总侧阻力占荷载的比例;  $K_{p,ij}$ ,  $K_{sr,ij}$ ,  $K_{st,ij}$  分别为第  $j$  桩对群桩中心线第  $i$  计算土层  $1/2$  厚度处产生的竖向应力系数;  $\Delta z_i$  为第  $i$  计算土层的厚度; 计算土层的分层厚度不应超过计算深度的  $0.3$  倍;  $E_{si}$  为第  $i$  计算土层土的压缩模量,取自重力至自重应力与附加应力和线段的试验值;  $n$ ,  $k$  分别为压缩层范围内的计算土层数和群桩中的桩数;  $\psi_s$  为沉降计算经验系数。

弹性理论 Geddes 应力公式叠加法计算群桩基础沉降具有如下特点: ①该法在计算土中应力时,忽略群桩在土中的“加筋效应”和“遮帘效应”,即在考虑桩与桩的相互作用时,仅对各桩的应力、变形进行叠加,并未考虑桩的存在所带来的影响。这将对计算结果带来一定影响,导致计算值偏大。②该法未考虑桩径的影响。按 Geddes 应力公式求得桩端平面以下任一点的竖向应力系数。该应力系数比分布于具有一定尺度界面上的桩端应力和桩侧剪应力在同一点的应力系数要大。特别是桩端以下  $1/10$  桩长范围内偏离度很大。因此,用该法计算的沉降比考虑桩径影响偏大。③该法有一个突出特点,就是不同桩距、不规则布桩、桩长度不一等因素均可在计算中如实反映,而等代墩基法则无法考虑这些因素。④该法在计算中未考虑桩身的弹性压缩。⑤按叠加原理求计算点的竖向应力十分繁琐。

### 2.3 相互作用因子叠加法与沉降比法

#### (1) 相互作用因子叠加法

基于两根桩相互作用因子,采用叠加原理扩展至

群桩基础的沉降计算(H.G.Poulos, 1968; H.G.Poulos 和 N.S.Mattes, 1971) [5]。由  $n$  根桩组成的群桩,其中  $i$  桩的沉降为

$$s_i = \delta_{ii} \sum_{j=1}^n \alpha_{ij} Q_j \quad (12)$$

式中  $Q_j$  为作用于  $j$  桩上的荷载;  $\alpha_{ij}$  为相互作用因子,定义为

$$\alpha_{ij} = \frac{\text{由 } j \text{ 桩上作用单位荷载对 } i \text{ 桩所引起的沉降}}{\text{由 } i \text{ 桩上作用单位荷载对自身引起的沉降}} = \frac{\delta_{ij}}{\delta_{ii}} \quad (13)$$

$\alpha_{ij}$  与桩的长径比  $l/d$ 、距径比  $s_a/d$ 、桩相对刚度  $K$  ( $K=E_p/E_s$ , 桩土模量之比) 有关。两桩的相互作用表示于图 7。相互作用因子  $\alpha_{ij}$  是采用 Mindlin 解求得。受桩的相互作用影响,桩基中不同位置的基桩的沉降和桩顶荷载随之变化。

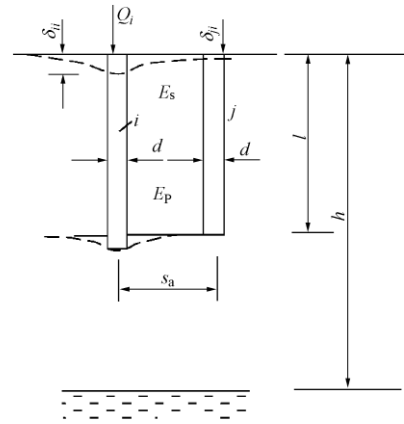


图 7 两根桩相互作用示意图

Fig. 7 Interaction between two piles

#### (2) 沉降比法计算群桩基础沉降

利用两根桩间相互作用系数进行叠加,可求得刚性承台一定排列形式群桩基础的沉降比。沉降比的定义为

$$R_s = \frac{\text{群桩沉降 } s}{\text{单桩在群桩各桩平均荷载作用下的沉降 } s_1} \quad (14)$$

由此群桩的沉降为

$$s = s_1 R_s \quad (15)$$

群桩沉降比  $R_s$  (Butterfield 和 Banerjee, 1971; Morgan 和 Poulos, 1968 年给出) 取决于桩的长径比  $l/d$ 、桩土刚度比  $K$  ( $K=E_p/E_s$ )。当群桩中有更多的桩时,  $R_s$  值可按下式差值确定:

$$R_s = (R_{25} - R_{16})(\sqrt{n} - 5) + R_{25} \quad (16)$$

式中,  $R_{25}$ 、 $R_{16}$  分别为  $5 \times 5$ 、 $4 \times 4$  群桩沉降比,  $n$  为群桩中桩数。

相互作用因子叠加法与沉降比法具有如下特点:

①这两种方法的理论基础和基本原理是相同的,都是以 Mindlin 解为基础计算单位荷载下单桩的沉降对相

邻单桩产生的沉降影响,采用叠加原理计算群桩沉降。  
 ②由于单桩的压缩层薄,其沉降未反应群桩压缩层范围内土的成层性影响,因而导致桩数愈多、土的成层性影响愈明显,带来的计算误差愈大。对于桩数较少(压缩层厚度与单桩差异较小)的群桩,计算误差较小。  
 ③单桩试验时间短,所得到的沉降非最终沉降,对于不同性质的土层应乘以不同时效系数 $\zeta$  ( $\zeta > 1$ )放大,对于砂土,可近似取 $\zeta_s = 1.1 \sim 1.2$ ;粉土 $\zeta_f = 1.3 \sim 1.4$ ,黏性土 $\zeta_c = 1.5 \sim 1.7$ 。  
 ④视土为弹性连续介质,所求得的相互作用系数偏大,由此导致计算的沉降变异性偏大。  
 ⑤该法在计算中未考虑桩身的弹性压缩。

#### 2.4 《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008)中的等效作用分层总和沉降算法

对于桩中心距不大于6倍桩径的桩基,其最终沉降量计算可采用等效作用分层总和法。等效作用面位于桩端平面,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分布采用各向同性均质直线变形体理论。计算模式如图8所示,桩基任一点最终沉降量可用角点法按下式计算:

$$s = \psi \psi_e s' = \psi \psi_e \sum_{i=1}^m p_{0j} \sum_{i=1}^n \frac{z_{ij} \bar{\alpha}_{ij} - z_{(i-1)j} \bar{\alpha}_{(i-1)j}}{E_{si}} \quad (17)$$

式中  $s$  为桩基最终沉降量(mm);  $s'$  为采用布辛奈斯克(Boussinesq)解,按实体深基础分层总和法计算出桩基沉降量(mm);  $\psi$  为桩基沉降计算经验系数,当无当地可靠经验时可按规范第5.5.11条确定;  $\psi_e$  为桩基等效沉降系数,可按规范第5.5.9条确定;  $m$  为角点法计算点对应的矩形荷载分块数;  $p_{0j}$  为第 $j$ 块矩形底面在荷载效应准永久组合下的附加压力(kPa);  $n$  为桩基沉降计算深度范围内所划分的土层数;  $E_{si}$  为等效作用面以下第 $i$ 层土的压缩模量(MPa),采用地基土在自重压力至自重压力加附加压力作用段的压缩模量;  $z_{ij}$ 、 $z_{(i-1)j}$  分别为桩端平面第 $j$ 块荷载作用面至第 $i$ 层土、第 $i-1$ 层土底面的距离(m);  $\bar{\alpha}_i$ 、 $\bar{\alpha}_{(i-1)}$  分别为桩端平面第 $j$ 块荷载计算点至第 $i$ 层土、第 $i-1$ 层土底面深度范围内平均附加应力系数,可按规范附录D选用。

桩基等效沉降系数 $\psi_e$ 可按下列公式简化计算:

$$\psi_e = C_0 + \frac{n_b - 1}{C_1(n_b - 1) + C_2} \quad (18)$$

$$n_b = \sqrt{n B_c / L_c} \quad (19)$$

式中  $n_b$  为矩形布桩时的短边布桩数,当布桩不规则时可按(5.5.9-2)近似计算,  $n_b > 1$  或  $n_b = 1$  时,可按规范(5.5.14)计算;  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$  分别为根据群桩距径比( $s_a/b$ )、长径比 $l/d$ 及基础长宽比 $L_c/B_c$ ,按规范附

录E确定;  $L_c/B_c$ 、 $n_b$  分别为矩形承台的长宽比及总桩数。

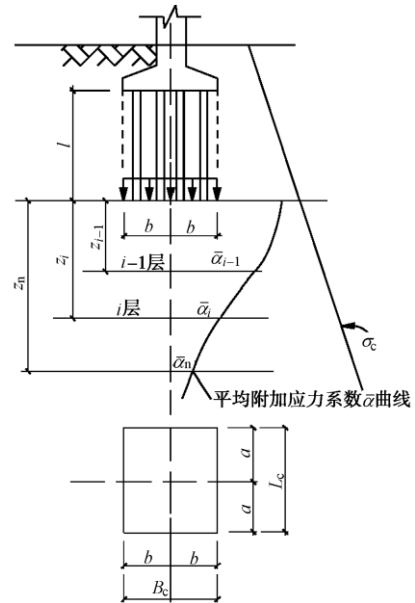


图8 等效作用分层总和法沉降计算示意图

Fig. 8 Equivalent effect layer-wise summation method

#### 2.5 群桩计算方法小结

以上所述方法存在以下不足:

- (1) 实体深基础法没有考虑桩间土的压缩变形,其附加应力按 Boussinesq 解计算与实际不符(计算应力偏大),且实体深基础模型不能反映桩的长径比、距径比、桩数等的影响;
- (2) 相互作用因子法不能反映压缩层范围内土的成层性,没有考虑桩间土的压缩变形;
- (3) Geddes 应力叠加-分层总和法对于大桩群不能手算,且要求假定侧阻力分布,并给出桩端荷载分担比,没有考虑桩间土的压缩变形,桩端下一定深度范围内应力计算水平偏大。
- (4) 等效作用分层总和法没有考虑桩间土的压缩变形,忽略了侧阻分布模式、端阻比例对沉降的影响,直接将承台底部的附加压力当做桩端附加压力,使得附加应力计算值偏大,桩越长这样取值越不合理,即桩愈长,应力误差愈大,导致压缩层厚度取值变大,最终计算结果有可能偏大,没有考虑桩间土的压缩。
- (5) 上述各方法均未考虑长桩桩身的压缩问题。

### 3 目前已有的压缩层厚度确定方法及存在问题

现行规范中确定压缩层厚度的方法主要有基础宽度比法、应力比法及变形比法3种。

#### 3.1 基础宽度比法

《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002)

中给出当无相邻荷载影响、基础宽度  $b$  在 1~30 m 范围内时, 基础中点地基变形计算深度  $z_n$  的简化计算公式<sup>[6]</sup>:

$$z_n = b(2.5 - 0.4 \ln b) \quad (20)$$

行业标准《高层建筑岩土工程勘察规程》(JGJ 72—2004) 中对于摩擦型桩群桩基计算深度可以按桩端平面以下  $(1 \sim 1.5)b$  ( $b$  为假想实体基础宽度) 的深度进行考虑。

该法目前工程中应用少, 尚缺乏经验。此外尚有一些资料建议取  $z_n = (1.2 \sim 1.6)$  倍基础宽度。

### 3.2 应力比法<sup>[4, 7-8]</sup>

应力比法源自前苏联有关规范, 以地基附加应力对自重应力之比作为控制计算压缩层厚度的标准。《建筑桩基技术规范》(JGJ 94—2008) 中规定, 采用等效作用分层总和法计算桩基沉降时, 地基沉降计算深度  $z_n$  按应力比法确定,  $z_n$  处的附加应力 ( $\sigma_z$ ) 与土的自重应力 ( $\sigma_c$ ) 应符合下式:

$$\sigma_z = 0.2 \sigma_c \quad (21)$$

行业标准《高层建筑岩土工程勘察规程》(JGJ 72—2004) 中直接规定群桩桩基沉降估算厚度宜取桩桩端平面以下附加应力为上覆土有效自重压力 20% 的深度确定, 与上式一致。《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2002) 对于采用 Mindlin 应力公式计算时, 未明确如何确定计算深度, 而在某些地方规范中, 如上海标准《地基基础设计规范》(DGJ 08—11—2010) 则明确规定沉降计算压缩层厚度从计算点所处桩位的桩端平面算至土层附加应力等于土层自重应力的 10% 处。

应力比法是取自桩端平面至基础中轴线上土的竖向附加应力  $\sigma_z$  等于土的自重应力  $\sigma_c$  的 20% (软土地基为 10%) 深度处为压缩层计算范围。这种方法应用于长桩 ( $l/d \geq 60$ ) 和超长桩显示出明显的不合理。这时由地面至桩端处的土自重应力值常超过 100 kPa, 由桩顶传递到该深度的附加应力却很小, 这时取  $\sigma_z = 0.2 \sigma_c$  (或  $0.1 \sigma_c$ ) 为压缩层下限, 往往导致压缩层很薄甚至桩端以下根本不存在压缩层。但实际上桩基仍然会由于土的压缩产生一定沉降。

### 3.3 变形比法

《建筑地基基础设计规范》(GB 5000—2002) 中采用实体深基础计算桩基础最终沉降量时, 采用单向压缩分层总和法, 地基变形计算深度采用变形比法, 应符合下式:

$$\Delta s'_n \leq 0.025 \sum_{i=1}^n \Delta s'_i \quad (22)$$

式中  $\Delta s'_i$  为在计算深度范围内, 第  $i$  层土的计算变形值;  $\sum_{i=1}^n \Delta s'_i$  为计算层深度范围内总的变形值;  $\Delta s'_n$  为

计算深度向上取厚度为  $\Delta z$  的土层计算变形值,  $\Delta z$  根据基础宽度确定。

该法的缺点是由式 (22) 确定的压缩层深度取决于土层结构和模量, 与荷载大小无关。

## 4 群桩沉降计算中有关问题的改进

由以上分析可以得到如下结论: ①土体中的竖向应力计算相关理论有待改进, 需要采用更为合理的应力计算理论; ②长桩超长桩桩身压缩量占沉降量相当可观, 在沉降计算中应予以考虑, 使得沉降计算方法真实地反映群桩的沉降机理; ③有关压缩层厚度确定的相关方法有待进一步改进, 从而适应桩基工程的发展需要。

### 4.1 土体中的附加竖向应力的计算

Mindlin 方法计算桩基应力的合理性被越来越多的学者所接受并采用, 该法有一个突出特点, 就是不同桩距、不规则布桩、端阻比、侧阻分布模式、桩长度不一等因素均可在计算中如实反映, 而 Boussinesq 应力计算方法则无法考虑这些因素。

目前已有的群桩 Mindlin 应力算法未考虑桩径的影响。因此, 用该法计算的沉降比考虑桩径影响偏大。因此, 笔者建议采用考虑桩径影响的 Mindlin 群桩平均应力计算方法。

基于 Mindlin 课题 (考虑桩径影响) 的平均竖向应力基本思想为: 桩端下同一土层平面上, 应力分布随着桩距减小而趋于均布, 其桩端下应力叠加分布模式与较大桩距群桩基础截然不同, 见图 9。故可认为在常用小桩距条件下群桩基础桩端以下的应力为均匀分布, 求出桩端下不同深度处土层的平均附加应力, 则根据单向压缩分层总和法计算群桩沉降。其具体的计算过程可参见文献[3]。

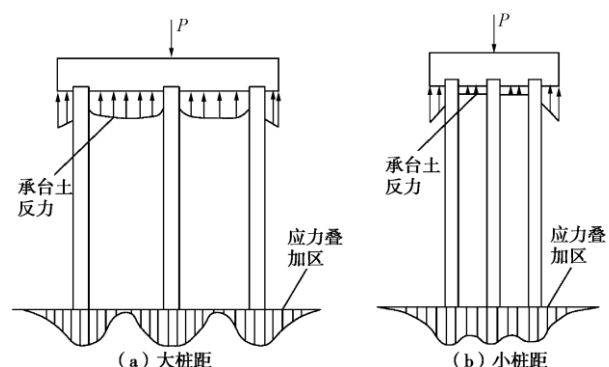


图 9 群桩效应致使小桩距群桩桩端下应力分布均匀化示意图

Fig. 9 Distribution behaviors of mean stress under pile tip of pile group foundation with different pile spacings

### 4.2 桩身压缩量的计算

由前述群桩压缩性状的试验结果可知, 长群桩的

压缩沉降不是单一的桩端下土体整体压缩,其桩间土的压缩量(桩身压缩量)值相当可观,在极限荷载情况下甚至可达总沉降量 80%~100%,如果在沉降计算模式中不反映桩身的压缩沉降部分,这显然与实际沉降机理不符。从目前的施工工艺分析可知,桩端以下的土体多进行了较好的处理(沉渣问题),特别是对于长桩、超长桩群桩基础而言,在工作荷载条件下,由于桩端荷载比例较小,桩间土的压缩变形可认为是桩身的压缩变形。桩身的压缩量  $s_e$  计算如下式:

$$s_e = \xi_e \frac{Q_0 l}{AE_p} = f(\alpha) \frac{Q_0 l}{AE_p} \quad (23)$$

$\xi_e$  称为桩身压缩系数,它是与端阻比例系数、桩侧阻力分布模式的函数,其具体关系如下式所示,具体的参数涵义参见文献[3]。

$$\left. \begin{aligned} \xi_{e\text{正三角}} &= 0.33\alpha + 0.67, \\ \xi_{e\text{矩形}} &= 0.50\alpha + 0.50, \\ \xi_{e\text{倒三角}} &= 0.67\alpha + 0.33. \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

#### 4.3 压缩层厚度确定的建议

总结目前规范确定沉降估算压缩层厚度的 3 种方法,基础宽度比法十分简单,易于确定,并且总结了相关经验数据,应该算是一种经验的估计,使用很方便。应力比法沿用至今具有相当的经验,确定计算深度相对简单,但它没有考虑到土层的构造与性质,过于强调应力比对压缩层深度的影响,同时由于桩长的增加导致桩端位置处的土体自重应力值很大,即桩端平面处附加应力的计算值要小于自重应力值的 20%,有时甚至要小于自重应力值的 10%,这种情况下算不出桩端下的压缩沉降,这显然是不合理的;而变形比法直接考虑了桩端以下土体随深度增加,压缩变形量的变化对桩基最终沉降量的影响,但由于没有考虑荷载对压缩层厚的影响,计算厚度需要对沉降量的计算才能确定,同时该方法另一缺陷是压缩层厚度的确定与桩端位置平面处的附加应力无关,即如果地层条件确定,无论上部荷载多大压缩层厚度是不变的,这显然不合理。压缩层应反映的以下相关因素

##### (1) 基础的宽度 $b$

采用单向压缩分层总和法计算桩基沉降,所选定的压缩层应是绝大部分沉降变形发生区,其依据应包括影响桩基沉降变形机理。

由于土的非理想连续性,实测压缩层相对厚度  $z_n/b$  与基础宽度并非呈线性关系,而是随着基础宽度的增大呈自然对数减小,大体可表示为  $z_n/b = f(\ln b)$ ,

其界限值为  $\ln \frac{b}{10}$  (如图 10 所示)。

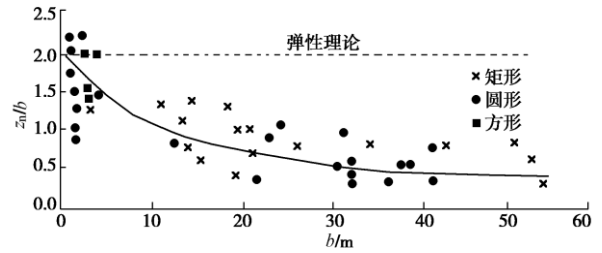


图 10 实测压缩层相对深度  $z_n/b$  与基础宽  $b$  的关系<sup>[9]</sup>

Fig. 10 Relationship between measured relative compression layer thickness and foundation width

##### (2) 考虑桩的长径比

桩顶荷载向深部的传递随长径比  $l/d$  增大而衰减,一般土层条件下长径比  $l/d > 50$  桩身轴力显著降低。故以  $l/d = 50$  为临界值,即  $l/d > 50$  桩身轴力呈自然对数减小,表示为  $\ln \frac{l/d}{50}$ 。

##### (3) 基本基宽比

以中小基宽比  $z_n/b = 1.2$  为基本值。

##### (4) 土体压缩的起始压缩附加应力

根据我国有些生产部门的经验,发现很多土体的起始压缩应力常小于 50 kPa<sup>[10]</sup>,不易测定出来,因此规定土体压缩的起始应力如下式:

$$\sigma_z \geq 50 \text{ kPa} \quad (25)$$

##### (5) 压缩层计算厚度

$$\left\{ \begin{aligned} z_n &= B[1.2 - 0.3(\ln \frac{B}{10} + \ln \frac{l/d}{50})], \\ \sigma_z &\geq 50 \text{ kPa}. \end{aligned} \right. \quad (26)$$

压缩层厚度取两条件先满足者,式中,  $B$  为基桩包络线的宽度,  $l/d$  为长径比。

## 5 结 论

(1) 以不同的群桩基础模型试验为依据分析研究了群桩基础的沉降性状,在此基础上,指出了目前已有沉降计算方法的特点与不足。

(2) 通过分析小桩距群桩基础土中应力的分布特点,指出采用考虑桩径影响的 Mindlin 群桩平均应力计算方法是较为合理的。

(3) 为了反映长桩、超长桩基群桩基础沉降计算中有关桩身变形部分的沉降计算,给出了桩身压缩系数的确定方法。

(4) 考虑的群桩基础宽度、桩长等因素,结合已有的压缩侧厚度的实测资料,给出了确定压缩层厚度的计算公式。

## 参考文献:

- [1] 刘金砺, 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))
- [2] 刘金砺, 黄 强, 李 华, 等. 竖向荷载下群桩变形形状及沉降计算[J]. 岩土工程学报, 1995, **17**(6): 1 - 13. (LIU Jin-li, HUANG Qiang, LI Hua, et al. Deformation behavior and settlement calculation of pile group under vertical load[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1995, **17**(6): 1 - 13. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 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))
- [5] POULOS H G, DAVIS E H. Pile foundation analysis and design[M]. New York: Wiley, 1980.
- [6] 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))
- [7] JGJ 72—2004 高层建筑岩土工程勘察规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. (JGJ 72—2004 Specification for geotechnical investigation of tall buildings, 2004. (in Chinese))
- [8] 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))
- [9] 刘金砺, 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))
- [10] 郭见扬. 关于地基压缩沉降的起始阻力问题[J]. 土工基础, 2008, **22**(5): 76 - 80. (GUO Jian-yang. Initiative resistant force of compressed settlement of ground[J]. Soil Engineering and Foundation, 2008, **22**(5): 76 - 80. (in Chinese))

(本文责编 明经平)