

文章编号:1009-3087(2013)02-0068-07

地基附加应力和桩基沉降计算的修正 Geddes 应力解

吕亚茹^{1,2}, 刘汉龙^{1,2}, 王新泉³, 丁选明^{1,4}, 郑长杰^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098;
3. 浙江大学 城市学院, 浙江 杭州 310015; 4. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098)

摘要: Geddes 应力解计算桩周土沉降是工程中常用的计算方法, 其假设端阻力为桩端集中力, 侧摩阻力沿桩身轴线分布。此假设下计算得到的附加应力不能反映截面几何形状和大小的影响, 存在一定的误差。为了更精确地计算桩附加应力与沉降, 得到可以反映截面几何形状和大小的计算方法, 在 Geddes 应力解的基础上, 假设端阻力在桩端均匀分布, 侧阻力为桩侧表面均布力和线性力的综合。采用 2 重积分的思想, 推导出了圆形桩端阻力和桩侧摩阻力在桩周土产生的附加应力系数的计算公式, 称为修正的 Geddes 应力解。通过对 Geddes 应力解和修正 Geddes 应力解的对比计算表明: 随着桩径的增大, Geddes 应力解计算误差随之增大。桩径从 0.2 m 到 3 m, Geddes 应力解估算端阻力、均匀分布侧摩阻力、线性增长的侧摩阻力产生沉降的误差分别为小于 20%、140% 和 40%。综合端阻力与侧阻力结果, Geddes 应力解计算沉降结果偏大。将 2 种计算方法的计算结果与 3 维有限元 ABAQUS 计算结果进行了对比, 结果表明修正的计算方法更接近于模拟结果。因此工程中使用修正 Geddes 应力解计算桩基沉降更合理。

关键词: Geddes 应力解; 附加应力; 侧摩阻力; 端阻力; 沉降

中图分类号: TU44

文献标志码: A

A Modified Geddes Solution for Estimating Induced Stress Coefficient of Subsoil and Settlement of Pile Foundation

LYU Ya-ru^{1,2}, LIU Han-long^{1,2}, WANG Xin-quan³, DING Xuan-ming^{1,4}, ZHENG Chang-jie^{1,2}

(1. Key Lab. of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Eng., Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Inst., Hohai Univ., Nanjing 210098, China; 3. City College, Zhejiang Univ., Hangzhou 310015, China;

4. National Eng. Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Eng. Safety, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: Geddes's solution is one of a common approach to estimate the settlement of subsoil of pile foundation. In order to obtain more precious results, a modified Geddes's solution was performed as the assumptions that the end resistance uniformly distribute on the pile tip and the side resistance, and the component force of uniform and linear variation distribute on side surface of pile shaft. The formulas of induced stress due to side resistance and end resistance of circular cross-sectional pile were obtained and calculated by double integration. The results of comparative analyses between Geddes's solution and modified Geddes's solution showed that the differences between the two methods increase with the increase of pile radius. With pile radius varying from 0.2 m to 3 m, the results disparity between Geddes's and modified Geddes's solution are limited in 20%, exceeding to 140%, and closing to 40% due to end resistance, uniform side resistance, and linear variation of side resistance, respectively. The results estimated by Geddes's solution is greater than reality. Compared with Geddes's solution, the settlement of the modified Geddes's solution agrees well with that of finite element analysis. Therefore, the modified solution is more reasonable for designation and application.

Key words: Geddes's solution; induced stress; side resistance; end resistance; settlement

岩土工程中, 地表某一荷载产生的地基土的附

加应力通过 Boussinesq^[1] 解求得, 其成立的前提为: 土体为半无限空间体, 各向同性、均质, 应力应变关系服从胡克定理。因此, 多数浅基础, 如条形基础、矩形基础、圆形基础等在土体中产生的附加应力和沉降都通过 Boussinesq 进行估算。但深基础应力分布在地表以下, 采用上述方法计算误差很大, 不能很好反映地基应力变形特性。Mindlin^[2] 在 Boussinesq 的基础上, 推导出来计算某一深度荷载作用下, 地基

收稿日期: 2012-09-17

基金项目: 国家自然科学基金高铁联合基金资助项目(U1134207);
国家自然科学基金资助项目(51008115); 2012 江苏省普通
高校研究生创新计划资助项目(CXZZ12-0234); 江苏
省自然科学基金资助项目(BK2012811)

作者简介: 吕亚茹(1987-), 女, 博士生。研究方向: 软基处理。

E-mail: yaru419828@163.com

土中产生的附加应力。1953年 Geddes^[3]将这一方法用于估算桩基侧摩阻力和端阻力对周围土体产生的附加应力。但真正用于工程在1966年, Geddes^[4]将传统圆形桩受竖向荷载时对周围半无限空间土体的附加应力系数以表格的形式呈现出来。这也是《建筑地基基础设计规范》GB50007—2002^[5]计算桩基沉降的理论来源。

国内在上述几个理论研究的基础上,对桩产生的附加应力系数和沉降进行了一系列的研究。由于长桩或超长桩侧摩阻力分布并非简单均匀分布和线性增长的综合,郑刚等^[6]对长桩或超长桩沿深度分区,不同的区域假设侧摩阻力为均匀分布和线性增长的某种组合,这种做法可以更精确估算附加应力;王伟等^[7]在 Geddes 解和 Mindlin 解的基础上对刚性桩复合地基沉降进行了研究。王士杰等^[8]对 Mindlin 解计算端阻力进行了探讨,提出了积分解附加应力的思路。王新泉等^[9-10]在 Geddes 应力解的基础上进行优化,得出计算 Y 形桩附加应力系数的计算公式。

国内外不乏对桩基附加应力和沉降计算的研究,然而将圆形桩端阻力和侧阻力统一采用2重积分的思想,对计算方法进行修正的相关论述鲜见报道。目前采用的桩基规范已在《建筑地基基础设计规范》GB50007—2002的基础上进行了修正,但是该方法与本文方法不同。作者通过修正端阻力和侧摩阻力分布的假设,将端阻力和侧摩阻力分别在桩端截面和桩侧表面离散,得到可以反映截面形状和大小的、更加精确的估算附加应力和沉降的计算方法。除此,还可以进一步对计算公式编程,便于工程中直接使用。

1 Geddes 应力解计算桩基附加应力系数

Geddes 应力解将桩端阻力假设为桩端截面上的一个作用在截面中心处的集中力,端阻力产生的附加应力通过 Mindlin 解计算。将某一截面处侧摩阻力假设为桩轴线上的一个集中力,对任一点侧摩阻力产生的附加应力沿桩长积分,得到侧摩阻力在桩周土产生的附加应力。图1为 Geddes 计算桩侧摩阻力和端阻力产生的附加应力的示意图,其中, R_c 为桩截面外径, (R_c, α) 和 (r_j, α_j) 分别为截面周长上任意点和计算点的坐标, l 为计算点到荷载作用点距离。计算深度为沿计算点 (r_j, α_j) 以下的点,其中桩端以下为下卧层。在上述假设的前提下,计算点到桩侧阻力距离 l 不随计算桩截面半径或截面形状的变化而变化。因此这一计算公式忽略了桩径和截面形状的影响,桩周土体由于桩侧摩阻力产生的附加应力不随桩形而变化,这一结果

显然与实际情况不符。由于桩土差异刚度很大,桩径的大小和截面形状对周围土体的附加应力的影响不能忽视。

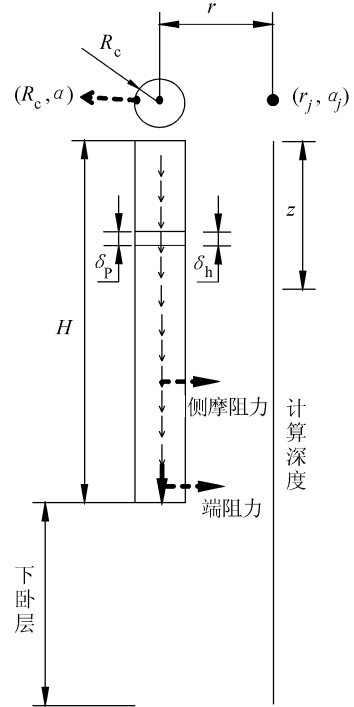


图1 Geddes 应力解假设侧阻力与端阻力分布图

Fig. 1 Distribution of side resistance and end resistance of Geddes's assumption

工程中桩基沉降计算大多采用此方法。具体端阻力和侧摩阻力引起的附加应力计算公式见文献[2,5],此处不再阐述。

2 修正 Geddes 应力解计算桩基附加应力系数

由于上述假设认为侧摩阻力分布在桩身轴线上,端阻力为集中力分布在截面中心处,因此 Geddes 应力解计算附加应力时没有考虑到桩截面半径的影响。为了更加真实地反映桩侧摩阻力和桩端阻力的实际情况,假设桩侧摩阻力沿桩身侧表面积均匀分布和线性增长,再沿桩深度方向和截面周长2重积分,从而得到侧摩阻力产生的附加应力的修正解。将这种计算方法叫做修正的 Geddes 应力解,如图2所示。

实际工程中,对于大直径桩而言,桩端阻力为桩截面上的均布力而非一集中力。在任意 z 深度内计算某一点受到端阻力的附加应力,可通过对微小截面上端阻力的积分得到。对于圆形截面桩,在 Mindlin 解的基础上,假设均匀分布的端阻力为 $P/\pi R_c^2$ 。截面上某一微小面积上的端阻力为 $\delta P = \frac{P}{\pi R_c^2} dA$,最后对其在桩截面上积分,为与 Geddes 应

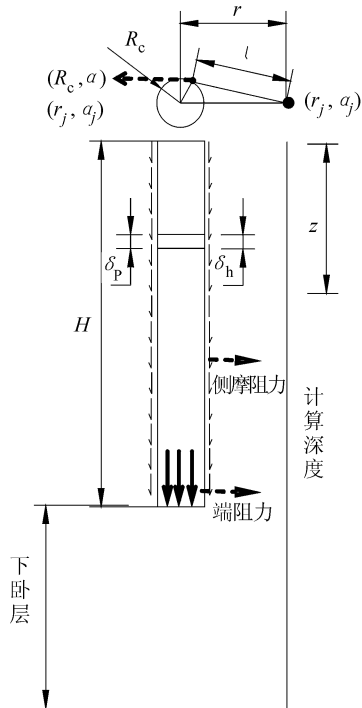


图 2 修正 Geddes 应力解假设侧阻力与端阻力分布图

Fig. 2 Distribution of side resistance and end resistance of Geddes's assumption

力解一致,积分式前乘以系数 H^2/P , 计算得到端阻力对周围土体产生的附加应力系数,其计算公式为:

$$I_{cp}' = \frac{H^2}{P} \iint_{Ac} \frac{P}{\pi R_c^2} \sigma_{cz}'' dx dy \quad (1)$$

其中, σ_{cz}'' 通过将 σ_z (Mindlin 解中) 中的 r 换为 l 得到, $l = \sqrt{r_i^2 + r_j^2 - 2r_i r_j \cos(\alpha_i - \alpha_j)}$ 。

实际情况中,桩侧阻力也不是分布在桩身轴线上,而是分布在桩外侧表面上。因此,修正 Geddes 应力解假设桩侧摩阻力沿桩周长均匀分布,沿桩长为均匀分布和线性增长分布的综合,某一微小深度的应力分别为 $\delta P = \frac{P}{2\pi R_c H} \delta h$ 和 $\delta P = \frac{2Ph}{2\pi R_c H^2} \delta h$ 。通过 2 重积分,得到的侧摩阻力对周围土体的附加应力系数的计算公式如下:

沿桩长均匀分布的侧摩阻力产生的附加应力系数:

$$I_{cs1} = \frac{H^2}{P} \int_0^H \oint \frac{P}{2\pi R_c H} \sigma_{cz}' ds dh \quad (2)$$

沿桩长线性增长的侧摩阻力产生的附加应力系数:

$$I_{cs2}' = \frac{H^2}{P} \int_0^H \oint \frac{2Ph}{2\pi R_c H^2} \sigma_{cz}' ds dh \quad (3)$$

其中, σ_{cz}' 通过将 σ_z 表达式 (Mindlin 解中) 中的 r 换为 l 得到, $l = \sqrt{R_c^2 + r_j^2 - 2R_c r_j \cos(\alpha - \alpha_j)}$ 。

3 Geddes 应力解与修正 Geddes 应力解对比分析

由于 Geddes 解计算点到端阻力点的距离 l 不随桩径的变化而变化,故 $n = r/H$ 也不随桩径的变化而变化。实际上,给定每个 n 值可对应无数个不同大小的桩径,每个桩径通过修正的 Geddes 应力解可以计算出不同的附加应力系数。文中计算结果通过 MATLAB 实现。由于《建筑地基基础设计规范》GB50007—2002 中计算方法采用 Geddes 应力解,因此计算结果可通过《建筑地基基础设计规范》进行对比验证。为比较 Geddes 解和修正 Geddes 解的差异,对 4 个 n 值 (0.02、0.05、0.15 和 0.2) 下不同截面半径的圆形桩进行计算,4 种计算工况的 m 、 n 值和对应不同的截面半径设置见表 1。

表 1 计算工况及相关参数

Tab. 1 Calculated cases and parameters

| 工况 | r/m | $n = r/H$ | R_c/m | | | |
|----|-------|-----------|---------|-----|-----|-----|
| 1 | 0.4 | 0.02 | 0.2 | 0.3 | N/A | N/A |
| 2 | 1.0 | 0.05 | 0.2 | 0.5 | 0.8 | N/A |
| 3 | 3.0 | 0.10 | 0.2 | 1.0 | 2.0 | N/A |
| 4 | 4.0 | 0.15 | 0.2 | 1.0 | 2.0 | 3.0 |

3.1 端阻力

图 3 为 2 种计算方法得到的 4 种工况的附加应力系数。 n 为 0.02、0.05、0.15、0.2 时计算结果见图 3。其中 4 个工况主要差异区域分别为 1 倍 ~ 1.05 倍桩深、0.85 倍 ~ 1.15 倍桩深、0.6 倍 ~ 1.2 倍桩深和 0.6 倍 ~ 1.5 倍桩深范围内,见各图的局部放大图。即 2 种计算结果的差异区域和误差大小均随 n 的增大而增大,而 n 值由计算点到端阻力的距离 r 决定,因此计算点越远, Geddes 解计算的误差越大。由于弹性解受计算点距离影响很大,因此 n 从 0.02 到 0.2, 端阻力产生的附加应力系数成倍减小。

从每组比较的放大图可以看出,桩径为 0.2 m 时修正 Geddes 应力解与 Geddes 应力解计算的结果基本吻合。随着桩径的增大,两者的差异逐渐增大,且桩径越大,修正 Geddes 应力解得到的结果越大。此结果说明:桩径越大 Geddes 应力解计算端阻力产生的附加应力偏小,即计算结果偏于不安全;当桩径小于 1 m 时, Geddes 应力解最大误差可达 20%, 发生在桩端附近;当桩径大于 3 m 时, Geddes 应力解误差局部可达 30% 以上,发生在桩端上部约 0.9 倍桩深处;规范上采用 Geddes 应力解计算得到的桩端阻力产生的沉降结果偏于不安全,特别对于桥梁、高层建筑等采用大直径桩基处理时,采用 Geddes 应力解进行计算需要引起注意。

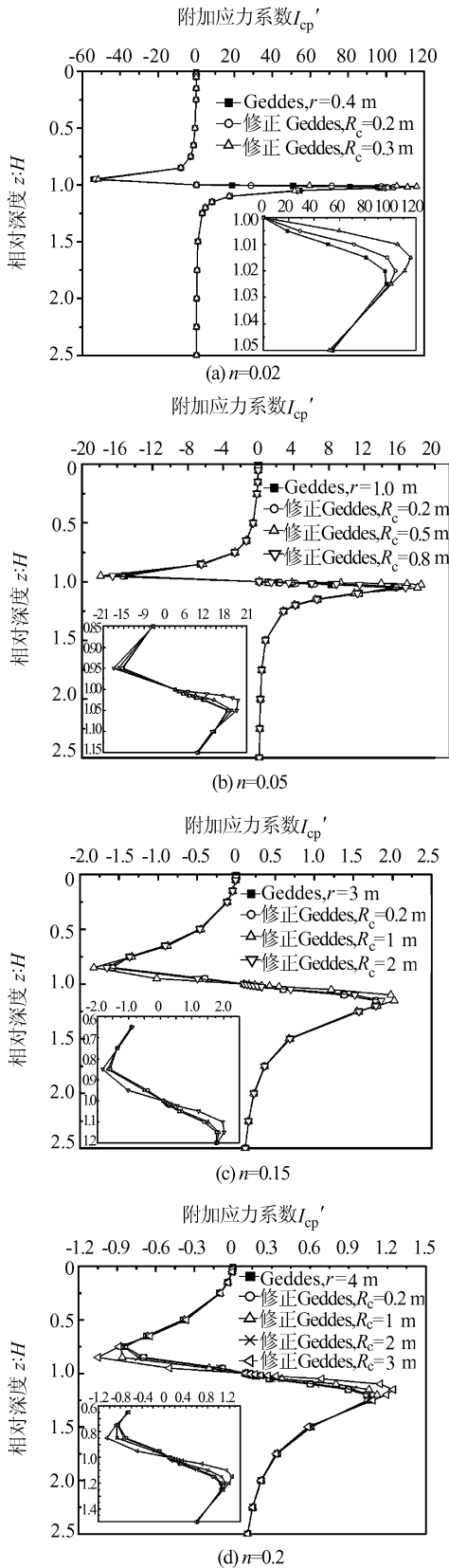


图3 Geddes 应力解与修正 Geddes 应力解计算圆形桩端阻力产生的附加应力系数比较

Fig. 3 Estimated stress coefficients due to end resistance of circular pile foundation using Geddes's and modified Geddes's solution

3.2 均匀分布侧摩阻力

图4为假设侧摩阻力沿桩长均匀分布情况下2种计算方法的计算结果,图4(a)、(b)、(c)、(d)分别为4种工况下2种计算方法得到的对比曲线。结果表明,当计算点位于桩轴线外1.0 m以内时,Geddes 应力解计算得到的结果大于修正 Geddes 解。且在0~0.2倍桩长和0.8倍~1.2倍桩长2个区域,两者的差异较大。即小桩径情况下,Geddes 应力解计算结果过大,偏于不经济。从图4(b)可知,计算点在轴线外1 m处为临界点,2种计算方法计算得到的结果相近。当计算点在轴线3 m以外时(工况3、4),Geddes 应力解计算得到的结果远远小于修正 Geddes 应力解,其误差可以达到140%以上。这意味着桥段、高层建筑等需要大直径桩进行软基加固的工程中,使用 Geddes 解偏于不安全。

综合4个工况结果,均在0.2倍桩长处出现反弯点,由于计算点应力通过所有离散的侧摩阻力沿桩身积分而成,因此,此现象可能由应力叠加产生。4个工况计算结果还显示,由修正 Geddes 应力解计算得到的不同桩径的结果差异也不大。表明当假设侧摩阻力沿桩长均匀分布时,圆形桩桩径对桩侧外一点的附加应力系数影响不大。但异形截面桩的影响不可忽视。

3.3 线性增长的侧摩阻力

侧摩阻力沿桩长线性增长的计算结果见图5。对于某一计算点,Geddes 解得到的附加应力系数唯一,结果可以通过《建筑地基基础设计规范》查找。而修正的 Geddes 解得到的结果有所不同。当计算点位于桩轴线外0.4和1.0 m时,Geddes 法计算得到的附加应力系数小于修正 Geddes 法计算得到的结果,且桩径越大附加应力系数越大。换言之,桩径小于1.0 m时 Geddes 解计算线性增长的侧摩阻力产生的附加应力偏于不安全。图5(a)图显示2种方法计算结果明显差异区域为0.95倍~1.1倍的桩长处(见图5(a)右下角局部放大图),图5(b)图显示主要差异区域分布在0.75倍~1.1倍的桩长处(见图5(b)右下角局部放大图)。当计算点位于桩轴线外3和4 m处,2种计算方法得到的结果相差巨大,且 Geddes 法计算得到的附加应力系数远远大于修正 Geddes 法计算得到的结果。同一计算点采用修正 Geddes 计算得到结果表明,随着桩径的增大计算附加应力系数增大。图5(c)和5(d)显示主要差异区域分别分布在0~1.8倍和0~2倍的桩长处。因此当假设侧摩阻力沿桩长线性增长时,在桥

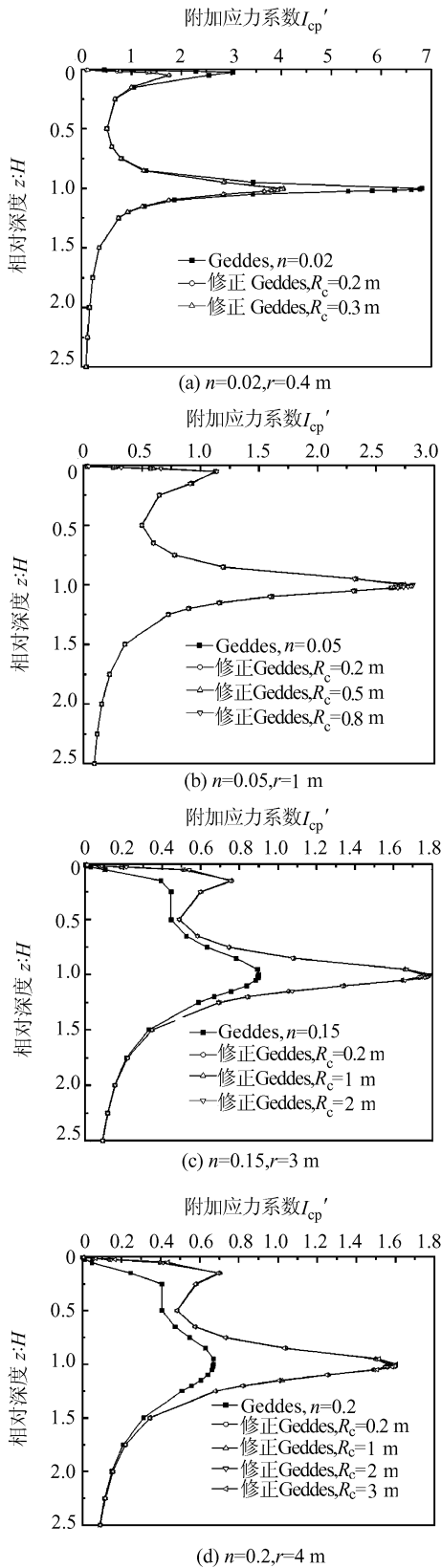


图 4 侧摩阻力沿桩长均匀分布时 Geddes 应力解与修正 Geddes 应力解计算圆形桩侧摩阻力产生附加应力系数比较

Fig. 4 Estimated stress coefficients due to uniform side resistance of circular pile foundation using Geddes's and modified Geddes's solution

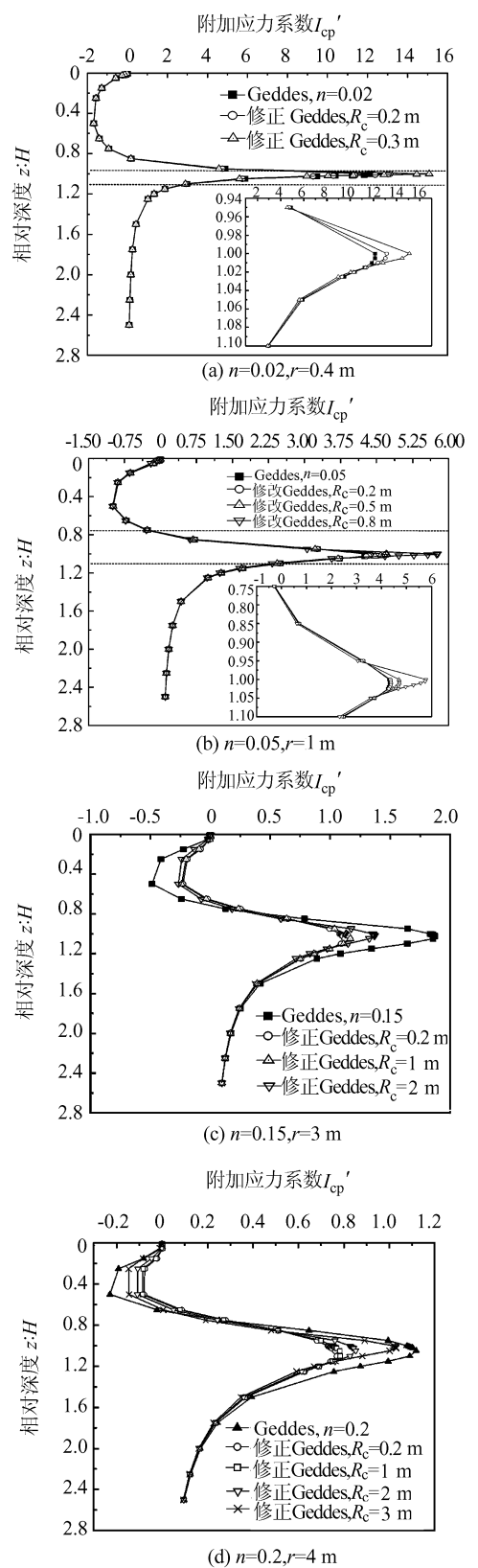


图 5 侧摩阻力沿桩长线性增长时 Geddes 应力解与修正 Geddes 应力解计算圆形桩侧阻产生的附加应力

Fig. 5 Estimated stress coefficients due to linear variation of side resistance of circular pile foundation using Geddes's and modified Geddes's solution

梁、高层建筑等大直径桩基工程中,应用 Geddes 法计算结果偏于不经济。从上述 4 个工况计算结果综合比较可知,随着桩径的增大,2 种计算结果的明显差异区域增大。桩径大于 1 m 时,2 个结果误差超过 40%,不容忽视。计算点距离桩轴心处越远,桩径越大,Geddes 法计算得到的附加应力误差越大。

4 个工况均在桩端上部约 0.8 倍桩长以上桩周土体出现受拉区,这是因为 Geddes 和修正 Geddes 法均假设土体为理想弹性材料,服从胡克定理。线性增长的侧摩阻力(端部侧阻力大)导致上部产生拉应力。侧摩阻力线性分布情况下,修正 Geddes 应力法计算得到的结果随桩径的变化差异也较大。因此,实际工程中如果假设侧摩阻力沿桩长线性分布,更应该考虑采用 2 重积分得修正 Geddes 应力法进行计算设计。

通过均布侧摩阻力和线性侧摩阻力的比较可知,假设侧摩阻力沿桩身线性增长时,桩端产生的由侧摩阻力引起集中应力是假设侧摩阻力沿桩身均匀分布时的 2 倍以上。且假设土体弹性时,线性增长的侧摩阻力对桩加固区上部产生 1 个受拉区。但是,均匀分布的侧摩阻力产生的附加应力由于应力重叠在 0.25 倍桩长附近出现 1 个反弯点。

4 单桩沉降计算

单桩沉降计算时,常将桩顶沉降分为 4 个部分: $S = S_e + S_s + S_p + S_{d\Delta}$,其中, S_e 为上部荷载作用下桩体弹性压缩量, S_s 为侧摩阻力引起的桩端土体压缩量, S_p 为桩端阻力引起的桩端土体压缩量, $S_{d\Delta}$ 桩端刺入土体的刺入量。

1) 桩身弹性压缩量 S_e

计算桩体压缩量时假设桩体为弹性体,将桩体沿深度微分,侧摩阻力沿桩深方向均匀分布和线性增长时, h 深度处截面顶部荷载为 $P_1(h) = P - \frac{(1-\beta)Ph}{H}$ 和 $P_2(h) = P - \frac{(1-\beta)Ph^2}{H^2}$,其中, P 为桩顶荷载, H 为桩长, β 为端阻力分担系数。因为桩为弹性体,则 $\frac{P_1(h)}{E_p A_p} dh$ 和 $\frac{P_2(h)}{E_p A_p} dh$ 分别为 h 深度 dh 厚度的弹性压缩量,沿深度方向积分得到桩身弹性压缩量分别为 $S_{e1} = \frac{(1+\beta)PH}{2E_p A_p}$ 和 $S_{e2} = \frac{(2+\beta)PH}{3E_p A_p}$,其中, E_p 为桩体弹性模量, A_p 为桩截面面积。

2) 桩侧摩阻力和桩端阻力引起的桩端下土体压缩量 S_s 和 S_p

采用分层总和法,将桩端以下影响范围内土体分为 m 层,将第 j 层分为 n_j 个计算层。

则侧摩阻力均匀分布时桩端土体由于侧摩阻力和端阻力产生的压缩量为 S_{01} :

$$S_{01} = \Psi_p \frac{P}{H^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} \frac{\Delta h_{ji}}{E_{s,ji}} [\beta (I_{cp}')_{ji} + (1-\beta) (I_{cs1}')_{ji}] \quad (4)$$

侧摩阻力沿桩身线性增长时,桩端土体由于侧摩阻力和端阻力产生的压缩量为 S_{02} :

$$S_{02} = \Psi_p \frac{P}{H^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_j} \frac{\Delta h_{ji}}{E_{s,ji}} [\beta (I_{cp}')_{ji} + (1-\beta) (I_{cs2}')_{ji}] \quad (5)$$

其中: Ψ_p 为桩基沉降计算经验系数,参照规范(建筑地基基础设计规范); $E_{s,ji}$ 为桩端下卧层第 j 层土的第 i 个分层的土体压缩模量,MPa; m 为桩端下卧层影响范围内有 m 个土层; n_j 为桩端下卧层影响范围内第 j 个土层共有 n_j 个计算分层; Δh_{ji} 为桩端下卧层第 j 层土的第 i 个分层的土层厚度,m。

3) 桩端刺入量 $S_{d\Delta}$

假设桩端为 Winkler 地基,则刺入量为:

$$S_{d\Delta} = \frac{\beta P}{k A_p}$$

其中, k 为基床反力系数,kN/m³。

5 计算案例

为比较 Geddes 应力解和修正 Geddes 应力解计算桩基沉降的差异,采用 3 维有限元 ABAQUS,建立 3 维弹性桩-土模型。通过有限元模型计算桩端阻力和侧阻力分配系数,并得到下卧层沉降结果。在有限元端阻与侧阻分配系数的前提下,采用修正 Geddes 应力解和 Geddes 应力解计算下卧层沉降,并将 3 者计算结果进行比较。

有限元计算中单元采用 3 维正八面体单元,桩体、土体均采用线弹性模型,弹性模量分别为 20 000 和 10 MPa,泊松比分别为 0.18 和 0.3。桩长为 7.5 m,模型取 1/4 实体大小,尺寸为 2.7 m × 2.7 m × 30 m。土体的弹性模量取值为 10 MPa,故属于软弱土层,根据文献[11],桩穿过软弱土层基床反力系数取值为 10 000 ~ 50 000 kN/m³,综合各个因素,取 11 000 kN/m³ 为地基反力系数。桩端阻力比根据有限元计算得到,其值为 0.328。单桩沉降由 3 部分组成,分别为:桩体压缩量、端阻力和侧阻力引起的下卧层沉降,桩端刺入量。3 种计算方法计算得到的结果见图 6。采用 Geddes 应力解计算时,按照工

程中常用的方法,侧摩阻力引起的附加应力为均匀分布和线性增长 2 种情况的组合。

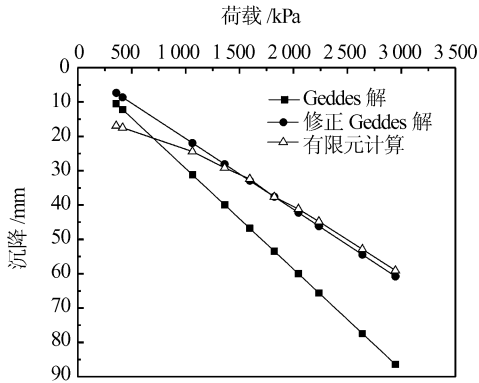


图 6 沉降对比计算

Fig. 6 Settlement calculated using different methods

由于有限元计算采用复杂边界条件,且桩-土相互作用可以通过桩-土接触面表达,因此计算结果并非完全线性。而 Geddes 应力解和修正 Geddes 应力解计算结果与荷载完全呈线性关系。通过图 6 对比结果可知,Geddes 应力解计算结果比数值计算结果大,且最大可达 54.5%。而修正 Geddes 应力解计算结果与有限元计算结果吻合较好,最大差异段发生在加载初期。随着荷载增加,两者差异逐渐减小。加载至 1 500 kPa 时,差异基本消失。

由于有限元建模过程复杂,不利于实际工程参与人员操作。而将理论解编制成计算程序或 excel 表格,简单改变参数即能重复计算,便于工程设计和施工人员使用。因此修正 Geddes 应力解具有较好的工程使用价值。

6 结论

通过对 Geddes 应力解假设进行修正,采用 2 重积分的思想,得到修正的估算端阻力和侧摩阻力产生附加应力的公式。通过得到的附加应力系数进一步计算桩基沉降,与 3 维有限元计算结果进行了比较。得到如下几个结论:

1) 修正 Geddes 应力解可以有效反映不同桩截面大小和截面形状下桩端阻力和侧摩阻力产生的附加应力。

2) 端阻力产生的附加应力计算时,Geddes 应力解计算结果小于修正的 Geddes 应力解;均匀分布侧摩阻力产生的附加应力计算时,截面小于 1 m 时 Geddes 应力解大于修正的 Geddes 应力解,截面大于 1 m 时 Geddes 应力解小于修正的 Geddes 应力解;线性增长的侧摩阻力引起的附加应力计算时与均匀分布的规律恰好相反。

3) 随着桩径的增大,Geddes 应力解与修正 Geddes

应力解计算差异随之增大。计算桩径从 0.2 到 3 m,端阻力差异小于 20%,均匀分布侧摩阻力差异可达 140%,而线性增长的侧摩阻力计算沉降误差可达 40%。

4) 修正的 Geddes 应力解计算单桩沉降结果与 3 维有限元弹性模型计算的结果吻合更好,因此修正 Geddes 具有更好的工程使用性。

参考文献:

- [1] Boussinesq J. Application des potentiels : à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques [M]. Paris: Gauthier-Villard, 1885.
- [2] Mindlin R D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid [J]. Physics, 1936, 7: 195 - 202.
- [3] Geddes J D. The bearing capacity of piles [D]. Durham: University of Durham, 1953.
- [4] Geddes J D. Tables for the calculation of stresses in a semi-infinite medium due to vertical subsurface loading [J]. loading [J]. Geotechnique, 1966, 16(3): 231 - 255.
- [5] 中华人民共和国建设部. GB50007—2002 建筑地基基础设计规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [6] Zheng Gang, Zhang Liming, Wang Qi. Distribution of shaft resistance of long piles and additional stress of foundation and their influences on settlement calculation of group piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1649 - 1658. [郑刚, 张立明, 王琦. 长桩桩侧摩阻力分布与地基附加应力问题及对群桩沉降计算的影响 [J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1649 - 1658.]
- [7] Wang Wei, Wang Shijie, Zhu Changzhi, et al. Study on settlement calculation of the rigid pile composite foundation [J]. Soil Engineering and Foundation, 2008, 22(1): 36 - 38. [王伟, 王士杰, 朱常志, 等. 刚性桩复合地基沉降计算方法研究 [J]. 土工基础, 2008, 22(1): 36 - 38.]
- [8] Wang Shijie, Zhang Mei, Zhang Jizhan. On Mindlin stress formulas [J]. Engineering Mechanics, 2001, 18(6): 141 - 148. [王士杰, 张梅, 张吉占. Mindlin 应力解的应用理论研究 [J]. 工程力学, 2001, 18(6): 141 - 148.]
- [9] 王新泉. Y 形沉管灌注桩承载特性及设计方法研究 [D]. 南京: 河海大学, 2009. [Wang Xinquan. Bearing behavior and design method research of Y-section pile [D]. Nanjing: Hohai University, 2009.]
- [10] Chen Yonghui, Wang Xinquan, Liu Hanlong, et al. Analysis and calculation of additional stress due to skin friction of Y-shaped vibro-pile [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(11): 2905 - 2918. [陈永辉, 王新泉, 刘汉龙, 等. Y 型桩桩侧摩阻力产生附加应力的分析计算 [J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 2905 - 2918.]
- [11] 顾晓鲁. 地基与基础 [M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.