

地面荷载引起的附加应力影响分析

程天笑

同济大学土木工程学院

DOI:10.12238/gmsm.v7i2.1648

[摘要] 在工程建设时,常常需要考虑地面荷载对于周围构筑物的影响,不合理的新建建筑以及不合理的地面堆放可能会引起已有基坑、建筑物等的变形和破坏。根据规范中给出的角点法进行计算沉降需要进行查表,比较耗时。本文根据弹性理论编制Python程序,可以根据土层参数、附加应力、计算点的位置信息快速计算该点处的竖向附加应力大小以及沉降大小,并进行可视化,使得工程师可以对附加应力带来的影响有快速直观的判断。此外,本文依据该程序讨论附加应力的形状对于附加应力以及周围基础沉降量的影响。

[关键词] 附加应力; 分层总和法; 沉降分析

中图分类号: TU196.2 文献标识码: A

Analysis of the Influence of Additional Stress Induced by Ground Loads

Tianxiao Cheng

School of Civil Engineering, Tongji University

[Abstract] In engineering construction, it is often necessary to consider the impact of ground loads on surrounding structures. Unreasonable new construction and improper ground stacking may cause deformation and damage to existing pits and buildings. Calculating settlements using the corner point method outlined in standards requires table lookups and is time-consuming. This paper develops a Python program based on elastic theory, which allows for the rapid calculation of the magnitude of vertical additional stress and settlement at a given point, based on soil layer parameters, additional stress, and the location of the calculation point. The program also provides visualization, enabling engineers to make quick and intuitive judgments about the impact of the additional stress. Additionally, this paper discusses the influence of the magnitude and shape of additional stress on both the additional stress itself and the settlement of surrounding foundations.

[Key words] Additional Stress; Layer Summation Method; Settlement Analysis

引言

在工程建设中,相邻荷载对于已有构筑物产生的影响不容忽视。随着城市建设的加速,构筑物数量与密度增加,不合理的荷载或是新建工程设施可能会引起基坑变形^[1],造成已有构筑物的不均匀沉降、倾斜甚至破坏,威胁人们的生命财产安全^[2]。特别是在软弱地基上,相邻荷载所产生的附加应力可能会引起较大的沉降,带来隐患。此外,在城市工程建设中,新建建筑距离原有建筑较近时^[3],或是进行人工造景时,常常需要在场地内堆积大量土石方,在距离已有构筑物较近或进行大面积堆载时很容易引发事故,因此需要快速进行定量化的分析,确定其可能带来的影响,完善计算方法^[4,5]。

本文根据基于弹性理论的附加应力公式编制Python程序,分析地面荷载引起的附加应力的分布并进行可视化,从而可以直观地分析地面荷载带来的影响。同时通过ABAQUS有限元计算

软件进行对比分析,讨论如何进行地基处理减少地面荷载产生的附加应力的影响。此外,讨论不同附加荷载下对于基础沉降的影响。

1 基于弹性理论的附加应力计算

通常将地基视为半无限体,若考虑其表面受到法向集中力的作用,可将问题转化为如图所示的关于z轴的轴对称问题,取双调和函数的线性组合作为Love位移函数进行分析(式中 φ 为位移函数, B_1 , B_2 为待定系数),可得到该问题的位移、应力解答。在岩土工程中,常常考虑竖向附加应力 σ_z 的影响,通过位移变换,即可得到其计算公式。由Saint-Venant原理可知,该公式在荷载P作用点附近结果不准确。

$$\varphi = B_1 R + B_2 [R - z \ln(R + z)]$$

$$\sigma_z = -\frac{3P}{2\pi} \cdot \frac{z^3}{[(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2 + z^2]^{\frac{5}{2}}}$$

实际工程计算中荷载并不会以点荷载形式出现,因此需要计算分布力下的附加应力,在分布力 $p(x, y)$ 作用下,在空间内任意一点 $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ 处所产生的应力可由上式积分得到。

$$\sigma_z(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}) = -\frac{3P}{2\pi} \cdot \iint_D \frac{\bar{z}^3 p(x, y) dx dy}{[(x-x_o)^2 + (y-y_o)^2 + z^2]^{\frac{5}{2}}}$$

2 附加应力影响范围分析

确定附加应力的影响范围对于分析地面荷载的影响非常重要,荷载本身的性质,如荷载作用面积、荷载作用大小会影响附加荷载的影响范围。如大面积的堆载会使得附加应力影响深度大大增加,如果没有合理的分析并采取相应措施,可能会引起基坑变形、地面沉降等严重后果^[6]。即使是同样多的土,不同的堆载方式也会引起附加应力影响深度的很大变化。按照上一部分所述附加应力计算公式编写Python程序,可对附加应力大小进行计算及可视化,同时结合ABAQUS有限元分析软件,讨论荷载性质与其影响范围的关系。

为讨论荷载性质对附加荷载的影响,选取算例。在工况1下,加载面积为 $4m \times 2m$ 的矩形均布荷载,荷载大小为 $100kPa$ 。地面以下有三层土层,第一层土厚 $1.5m$,弹性模量为 $6.0MPa$,第二层土厚 $6.0m$,压缩模量为 $2.4MPa$,第三层土厚 $5.0m$,压缩模量为 $3.5MPa$ 。由于弹性理论计算得到的附加应力假设土层为均质半无限体,采用由弹性理论计算得到的竖向附加应力的解答仅与荷载的大小、范围以及计算点的位置有关。以加载中心点为坐标原点,输入加载范围, $-2m \leq x \leq 2m$, $-1m \leq y \leq 1m$,

$p = 100kPa$ 同时输入需要计算附加应力的点集,即可同时进行计算。得到的三维沉降,可选取剖面进行细节的观察,根据 $Y=0$ 剖面上的应力分布情况,可以看出附加应力影响深度在 $5m$ 左右。图1中蓝色曲线为附加应力随深度的变化,橙色直线为附加应力 $20kPa$ 的位置,附加应力低于 $20kPa$ 则认为影响可以忽略。从图1(a)中可以看出,在荷载作用中心处,至地下 $10m$ 时附加应力可以忽略不计。改变荷载的大小,将荷载变为原来的5倍,

即 $p = 500kPa$,其他条件保持不变,计算得到工况2下的附加应力分布情况,荷载作用中心处的附加应力如图1(b)所示,影响深度有所增加,但是增加并不显著,依然低于 $10m$ 。

若工况2下的荷载为堆土产生,保持堆土总体积不变,扩大堆土面积为原来的4倍,即加载范围 $-4m \leq x \leq 4m$,

$-2m \leq y \leq 2m$, $p = 125kPa$,计算工况3下的竖向附加应力 σ_z 的分布情况。如图2所示,相较于工况2情况下,虽然土的总重不变,但是堆载方式的差异对于附加应力的影响深度有显著的影响,堆载中心处至地下 $20m$ 处竖向附加应力才降至 $20kPa$ 。

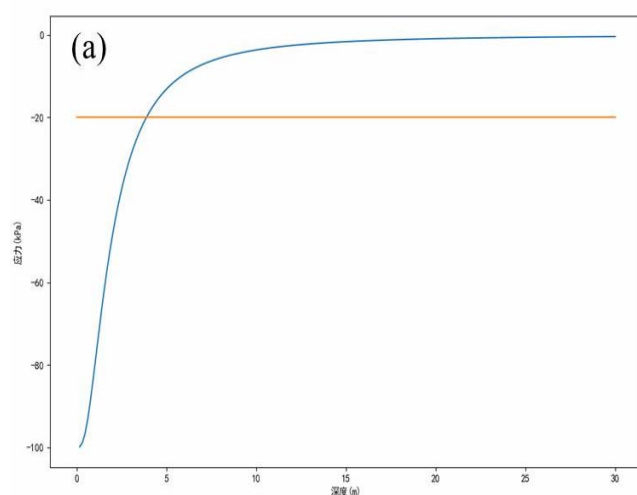
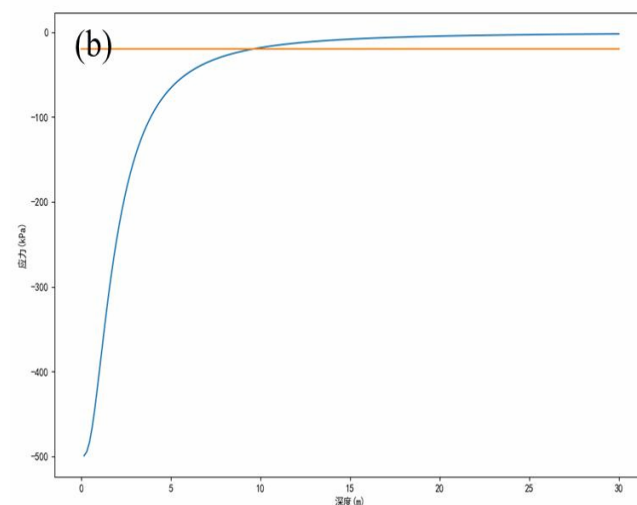


图1 (a) 工况1下坐标 (0, 0) 点的竖向附加应力 σ_z 随深度的变化



(b) 工况2下坐标 (0, 0) 点的竖向附加应力 σ_z 随深度的变化

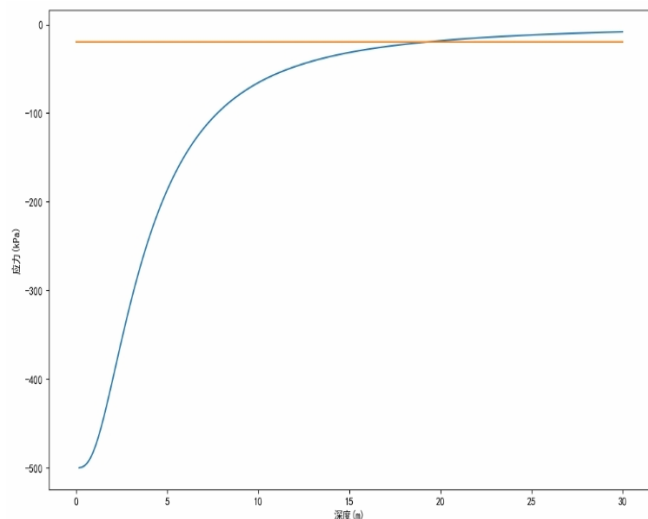


图2 工况3下坐标(0,0)点的竖向附加应力 σ_z 随深度的变化

ABAQUS是一款功能强大的通用有限元软件,包含很多的材料模型、单元模型、荷载以及边界条件等,适用性很广^[7]。本文使用ABAQUS有限元计算软件对上述问题进行计算对比,为了减少边界条件对于计算结果造成的影响,将有限元模型的长、宽、高设置较大,根据对称性,选取1/4部分进行分析即可,设置长、宽、高均为50m。通过草图创建模型并进行拉伸形成三维实体,为了施加表面局部荷载,需要绘制出加载的区域边界,将土层表面相应区域分隔开。在Property模块中选择材料为各向同性材料,并在相应区域设置材料参数,使用该材料创建截面属性并赋予给部件。创建静力加载分析步,之后定义荷载和边界条件。考虑土层实际的受约束情况,约束土层底部X、Y、Z三个方向的位移,考虑选取1/4模型进行简化,在X=0平面上约束X方向的位移,在Y=0平面上约束Y方向位移,用以模拟对称条件。设置六面体单元网格,考虑到距离加载位置越远,附加应力的值和变化情况都会减少,因此在加载位置附近加密网格,在距加载位置较远处网格设置的较为稀疏。之后即可提交计算进行可视化。选择场输出为S33(竖向应力),即可绘制等值线云图,观察矩形局部荷载下的竖向应力分布规律。同时在荷载作用范围中心线处创建路径,观察中心线处附加应力沿深度的分布情况。分别模拟工况2以及工况3的情况,结果如图4所示,可以发现,堆土总量不变的情况下,将堆土面积扩大为原来的4倍后,附加应力影响范围显著增加,趋势与编制程序计算得到的结果一致。

3 基于弹性理论的沉降计算

对地基土的沉降进行分层计算,假设每一层土均为弹性体。

每一层土的压缩模量分别为 $E_{si} (i=1,2,3,\dots,n)$,在竖向应力作用下,土层发生压缩,第 i 层土在水平坐标为 (x,y) 处的沉降 $\Delta S_i(\bar{x},\bar{y})$ 为:

$$\Delta S_i(\bar{x},\bar{y}) = \bar{\epsilon}_i \Delta Z_i = \frac{\bar{\sigma}_i}{E_{si}} (z_i - z_{i-1})$$

上式中 $\bar{\sigma}_i$ 为第 i 层土的平均压应力, $\bar{\epsilon}_i$ 为平均应变, ΔZ_i 为土层厚度。所有土层的累计压缩量即为基础的总沉降量,引入修正系数 φ_s 后总沉降量计算公式如下:

$$S(\bar{x},\bar{y}) = \varphi_s \sum_{i=1}^n \Delta S_i(\bar{x},\bar{y}) = \frac{3\varphi_s}{2\pi} \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_{si}} \int_{z_{i-1}}^{z_i} \left[\iint \frac{Z^3 P(x,y) dx dy}{D[(\bar{x}-x)^2 + (\bar{y}-y)^2 + (\bar{z}-z)^2]^{\frac{5}{2}}} \right]$$

上式即为我国现行的地基基础设计规范中规定的分层总和法地基沉降计算公式,规范中对其进行积分后得到计算表格供设计时查找使用。工程中常用的角点法沉降计算就是根据该方法得到的。

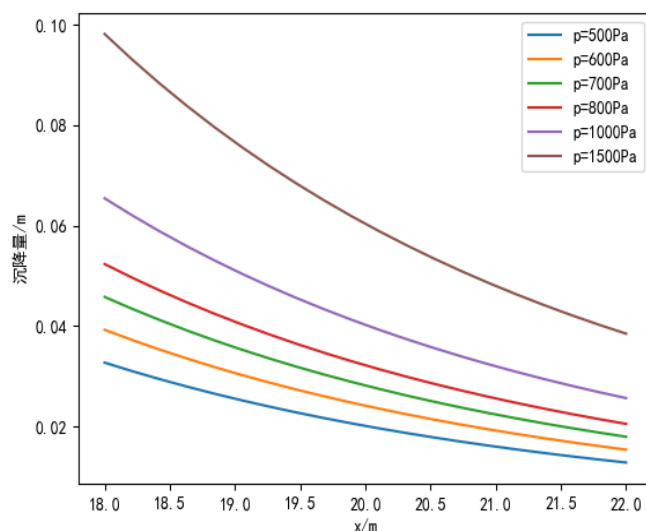


图3 不同大小附加荷载下Y=0剖面的基础沉降曲线

选取算例进行沉降计算,讨论在弹性理论下,附加荷载对于基础沉降的影响。地基土层分布情况与上一部分所述工况保持一致,简化附加荷载为矩形荷载,荷载中心为坐标原点。在实际工程中有不同形状的基础,且基础形状在一定程度上会对沉降产生影响^[8],考虑到对问题的简化,假设在不远处有一矩形构筑物,取修正系数 $\varphi_s = 1.2$ 。讨论荷载对于基础的沉降,特别是不均匀沉降的影响。在加载范围 $-8m \leq x \leq 8m$,

$-4m \leq y \leq 4m$,荷载大小为 $p = 500kpa$ 时,根据上述的总沉降量计算公式,计算得到构筑物基础两侧的沉降大小分别为0.0327m和0.0128m,倾斜率约为0.50%。程序可以快速计算多个点处的总沉降量,不断增大荷载大小,得到不同荷载下的基础沉降曲线(图3)。随着附加荷载的增大,基础每一点的沉降量增

大, 且不均匀沉降的现象逐渐严重, 在 $p = 1500\text{kPa}$, 倾斜率
达到1.49%。

分析附加应力分布面积对于该基础沉降情况的影响。保持
加载面积与荷载大小的乘积不变, 实际意义为定量的土石方不
同的堆载方式下的差异。程序对该问题进行一定简化, 保持基础
的形状, 即长宽比不变, 改变长宽时计算相应的荷载大小。取堆
载总量与上述问题 $p = 1500\text{kPa}$ 时保持一致, 不同加载面积
下基础沉降曲线如图4所示, 在保持加载面积与荷载大小的乘
积不变的情况下, 基础处附加应力随着加载面积的增大显著
增加。在加载范围为 $-18\text{m} \leq x \leq 18\text{m}$, $-9\text{m} \leq y \leq 9\text{m}$
时, 附加应力大小约 296.30kPa , 沉降差达到 0.48m , 达到
 $p = 1500\text{kPa}$ 时的8倍以上。

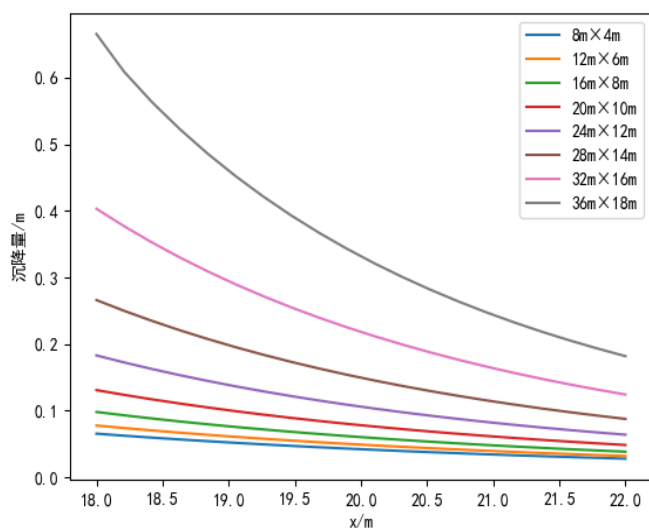


图4 不同加载面积下Y=0剖面的基础沉降曲线

4 总结

本文依据弹性理论给出的附加应力计算公式, 编制了
Python程序, 讨论了不同加载方式, 即荷载的大小和加载的面积
对于地基附加应力的影响, 并与通过ABAQUS有限元计算结果进
行对照, 说明计算的正确性。经过分析, 加载面积的变化对于附
加应力的影响远大于荷载大小变化带来的影响。此外, 本文编制
了弹性理论下根据分层总和法得到的分层土层的地基沉降计算
程序, 通过实例分析讨论附加荷载对于已有构筑物的影响。同时
可以很方便地进行沉降曲线可视化, 可以辅助岩土工程师判断
附加荷载是否会对周围建筑物带来严重影响。

[参考文献]

- [1]汪继文, 喻军. 土压力作用下邻近基坑地表沉降计算分析[J]. 建筑技术, 2014, 45(02): 178-80.
- [2]赵挺生, 顾祥林, 张誉. 新建建筑物对旧有建筑物附加沉降的影响分析[J]. 结构工程师, 2001, (01): 20-3.
- [3]马福强. 处理相邻建筑物地基沉降影响的方法[J]. 建筑结构, 2002, (05): 56-7+5.
- [4]彭惠, 陈竹昌. 大面积堆载条件下相邻荷载影响问题[J]. 土工基础, 2001, (01): 33-8.
- [5]贾世文, 李遇春. 相邻荷载对既有基础的沉降影响分析[J]. 结构工程师, 2010, 26(01): 74-9.
- [6]金宗川, 顾国荣, 韩黎明, 等. 大面积堆载作用下软土地基变形特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, (06): 1056-60.
- [7]费康, 彭劼. ABAQUS岩土工程实例详解[M]. 1ed.: 人民邮电出版社, 2012.
- [8]LI K S. Elastic Solutions for Arbitrarily Shaped Foundations [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(6).