



大面积堆载对临近桩基力学性能的影响*

方国华, 耿长春, 丁志全

(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 码头堆场的地基通常较为软弱, 当在堆场附近有重要的建(构)筑物时, 为保证建筑物结构安全, 须评估大面积堆载对临近桩基力学性能的影响, 包含桩位位移和桩身内力, 但现行规范对此未作规定。本文利用经典 Boussinesq 应力位移解为基础, 推导出计算任意荷载作用下土体位移和应力的方法, 自编相应的计算程序, 并利用土体的位移和应力间接计算桩身的变形和内力。以某煤棚项目为例, 采用上述方法计算煤堆荷载作用下桩顶位移和桩身内力, 结果表明桩基的最大侧移满足规范要求, 桩身轴力和弯矩较大, 桩身强度验算需考虑上述荷载产生的桩身内力。采用本计算方法可以方便计算任何荷载下桩基的位移和内力, 计算较准确, 可为类似的项目提供参考。

关键词: 大面积堆载; Boussinesq; 桩位移; 桩身内力

中图分类号: U65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)08-0288-07

Influence of large-area loading on mechanical properties of adjacent pile foundations

FANG Guohua, GENG Changchun, DING Zhiquan
(CCCC-FHDI Engineering Co., Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: The foundation of the dock yard is usually relatively weak. When there are important buildings (structures) near the yard, in order to ensure the structural safety of the buildings, it is necessary to evaluate the effect of large-area loading on the mechanical properties of the adjacent foundation piles, mainly including the displacement of the foundation piles and the internal force of the pile body. However, the current regulations do not specify this. This article uses the classic Boussinesq stress displacement solution as the basis to derive a method for calculating the soil displacement and stress under arbitrary load, and develops corresponding calculation programs. The displacement and stress of soil are used to indirectly calculate the deformation and internal force of pile body. Taking a coal shed project as an example, the above method is used to calculate the displacement of the pile top and the internal force of the pile body under the coal pile loads. The results show that the maximum lateral displacement of the foundation pile met the requirements of the specifications, and the axial force and bending moment of the pile body are relatively large. The strength calculation of the pile body should consider the internal force of the pile body generated by the above loads. The use of this calculation method can conveniently calculate the displacement and internal force of foundation piles under any load, and the calculation is more accurate, which can provide reference for similar projects.

Keywords: large-area loading; boussinesq; pile displacemen; internal force of pile

大面积堆载广泛出现在码头、桥梁基础、工业(民用)建筑等建(构)筑物建造及使用过程中, 引起地基土体水平位移与沉降。大面积堆载对临

近桩基的影响主要表现在: 1) 桩顶产生较大的变形, 影响上部结构; 2) 地面堆载迫使地基土侧向变形, 使桩扰曲甚至断裂产生附加弯矩和剪力;

收稿日期: 2024-05-08

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2604200)

作者简介: 方国华(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事结构设计工作。

3) 地面堆载引起桩周地基土产生较大的竖向沉降, 将产生负摩擦力, 导致桩的轴向荷载增加, 降低承载力并产生附加沉降。例如上海宝山钢铁厂的钢渣处理厂房由于十多年的长期堆载, 引起柱下桩基发生较大侧移, 导致上部结构断裂而倒塌; 上海莲花河畔景苑 7 号楼倾覆事故, 由于大楼一侧堆载, 另一侧开挖基坑, 两侧的压力差使土体产生水平位移, 过大的水平力超过了桩基的抗侧能力, 导致房屋倾覆。因此开展地面堆载对邻近桩基的受力和变形特性研究具有重要的现实意义。目前研究方法主要采用有限元法^[1-2]和试验法^[3], 但均有缺点, 有限元法需假设较多条件, 如桩与土的摩擦、土层本构等, 结果离散性较大。试验方法的数量偏少, 利用经典 Boussinesq 位移应力解为基础, 自编相应的计算程序, 并利用土体的位移和应力间接计算桩身变形和内力, 计算结果明确, 假定条件少, 便于实际工程应用。

1 Boussinesq 应力位移解

1.1 点荷载下的应力和位移解

Boussinesq 应力位移解是基于弹性理论和半无限体假定, Joseph Boussinesq 在 1885 年首次提出这一理论。假定弹性体是均质、各向同性、线弹性的, 并且材料性质(如弹性模量和泊松比)在整个体积中恒定。根据 Boussinesq 的理论, 1 个弹性体表面点载荷(q)在半无限体内任意一点 $M(x, y, z)$ 引起的应力、位移计算式为:

$$\begin{cases} \sigma_x = \frac{3q}{2\pi} \left\{ \frac{x^2 z}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left[\frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3(R+z)} - \frac{x^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right] \right\} \\ \sigma_y = \frac{3q}{2\pi} \left\{ \frac{y^2 z}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \left[\frac{R^2 - Rz - z^2}{R^3(R+z)} - \frac{y^2(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right] \right\} \\ \sigma_z = \frac{3qz^3}{2\pi R^5} \\ \tau_{xy} = -\frac{3q}{2\pi} \left[\frac{xyz}{R^5} + \frac{1-2\nu}{3} \cdot \frac{xy(2R+z)}{R^3(R+z)^2} \right] \\ \tau_{yz} = -\frac{3q}{2\pi} \cdot \frac{yz^2}{R^5} \\ \tau_{zx} = -\frac{3q}{2\pi} \cdot \frac{xz^2}{R^5} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} u_x = \frac{q(1+\nu)}{2\pi E} \left[\frac{xz}{R^3} - (1-2\nu) \cdot \frac{x}{R(R+z)} \right] \\ u_y = \frac{q(1+\nu)}{2\pi E} \left[\frac{yz}{R^3} - (1-2\nu) \cdot \frac{y}{R(R+z)} \right] \\ u_z = \frac{q(1+\nu)}{2\pi E} \left[\frac{z^2}{R^3} + 2(1-\nu) \frac{1}{R} \right] \end{cases} \quad (3)$$

式中: x, y, z 是以点荷载 q 为坐标原点的 M 点坐标, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 为 M 点的 x, y, z 方向的正应力, $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$ 为 M 点在 xy, yz, zx 面上的剪应力, u_x, u_y, u_z 为 M 点在 x, y, z 方向的位移, $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ 为 M 点距离原点的距离, E, ν 为土的弹性模量和泊松比。

1.2 矩形均匀荷载下的应力位移解

对于矩形(边长分别为 a 和 b)均匀荷载 q , 可将其视为无数个点荷载的叠加。因此, 可以先考虑单位点荷载在任意点产生的应力和位移; 然后通过积分获得总的应力和位移。假设单位点荷载在半空间内部任意点产生应力 σ_i 、位移 u_i , 再考虑荷载分布区域上的一个微小矩形, 边长分别为 x', y' , 微矩形荷载为 $qdx'dy'$ 。这个微小荷载在任意点产生的应力($d\sigma_i$)和位移(du_i)按式(4)计算:

$$\begin{cases} d\sigma_i = \sigma_i q dx' dy' \\ du_i = u_i q dx' dy' \end{cases} \quad (4)$$

然后对整个荷载分布区域进行积分, 得到均布荷载下应力($\sigma_{i均布}$)和位移($u_{i均布}$), 按式(5)计算:

$$\begin{cases} \sigma_{i均布} = \iint_A d\sigma_i = \iint_A \sigma_i q dx' dy' = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} \sigma_i q dx' dy' \\ u_{i均布} = \iint_A du_i = \iint_A u_i q dx' dy' = \int_{-a/2}^{a/2} \int_{-b/2}^{b/2} u_i q dx' dy' \end{cases} \quad (5)$$

式中: A 为矩形荷载分布区域, a, b 为矩形荷载的长和宽。

1.3 任意荷载下的应力位移解

对于任意形状下的荷载 q_i , 可以通过划分多个矩形均布荷载分别计算, 然后求和近似计算, 划分的单元越多, 结果越准确。任何荷载下的应力($\sigma_{i任意}$)和位移($u_{i任意}$)按式(6)计算:

$$\begin{cases} \sigma_{i任意} = \sum \sigma_{i均布} \\ u_{i任意} = \sum u_{i均布} \end{cases} \quad (6)$$

2 程序编写及验证

2.1 程序编写

上述计算方法需编写程序实现。程序前处理主要功能是将计算区域离散为多个矩形均布荷载，计算每个均布荷载单元相对于计算点的位置坐标，将荷载和位置坐标形成输入数据文件。程序应力位移函数将输入文件中的每个均布荷载进行积分运算，得出单个均布荷载作用下的应力和位移，将所有单个均布荷载作用下的应力和位移进行求和，得出所有外荷载作用下某点的应力和位移。采用 python 语言编写计算程序，应力位移函数采用 SciPy 库 integrate 模块中的 dblquad 函数，这是一个强大的数值积分工具，可用于计算在矩形区域上的二元函数的积分。程序后处理将计算结果显示在计算点上。

2.2 程序验证

2.2.1 集中荷载作用

100 kN 集中力，在深度 2 m 时，不同水平距离竖向应力计算对比，见表 1。100 kN 集中力，水平距离为 0 m 时，不同深度竖向应力计算对比，见表 2。

表 1 不同水平距离竖向应力计算对比

水平距离/m	竖向应力/kPa	
	理论值	本程序
0	11.90	11.93
1	6.80	6.80
2	2.10	2.10
3	0.60	0.60
4	0.20	0.20

注：本程序采用 0.1 m×0.1 m 荷载块，均布荷载为 10 MPa。

表 2 不同深度竖向应力计算对比

深度/m	竖向应力/kPa	
	理论值	本程序
1	47.80	47.50
2	11.90	11.90
3	5.30	5.30
4	3.00	2.98

对于集中力，采用小面积均布荷载等效后，本程序与理论解^[4]几乎相等，误差来源于集中荷载采用等效均布荷载后数值积分运算产生的误差。

2.2.2 均布荷载作用

200 kPa 均布荷载，1.4 m 宽的条形基础，采用 1.4 m×1.4 m 的荷载单元，纵向长度为 13 个单元，荷载布置见图 1。均布荷载作用下与理论值的对比见图 2。

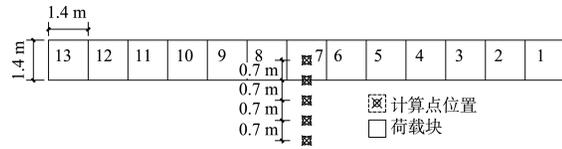


图 1 均布荷载下载荷单元布置

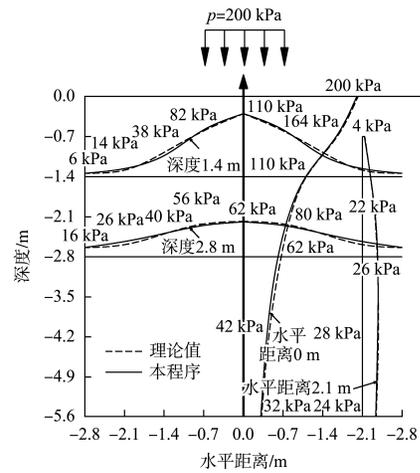


图 2 均布荷载作用下理论值与本程序的对比

水平距离为 0 m 时，在不同深度竖向应力计算对比，见表 3。竖向深度 1.4 m、不同水平距离竖向应力计算对比，见表 4。

表 3 不同深度竖向应力计算对比

深度/m	竖向应力/kPa	
	理论值	本程序
0.7	164	164
1.4	110	110
2.1	80	79
2.8	62	61
4.2	42	41
5.6	32	31

表 4 不同水平距离竖向应力计算对比

水平距离/m	竖向应力/kPa	
	理论值	本程序
0	110	110
0.7	82	82
1.4	38	37
2.1	14	14
2.8	6	6

由图 2 可知, 本程序在均布荷载作用下, 任意位置的计算结果与理论解决的误差很小, 具有足够的精度。

2.2.3 梯形荷载作用

梯形荷载作用下中间矩形区域荷载单元尺寸为 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, 两侧三角部分为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$, 纵向设置 20 列, 荷载布置见图 3。

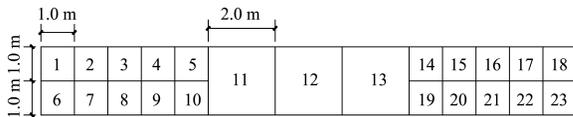


图 3 梯形荷载—列荷载单元布置

梯形荷载作用下理论值与本程序的对比见图 4, 理论值为 35.41 kPa , 程序计算值为 35.33 kPa , 计算表明, 梯形荷载作用下, 本程序有足够的精度。

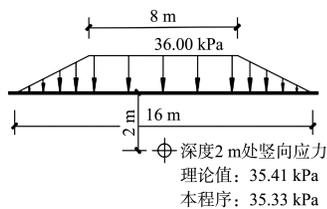
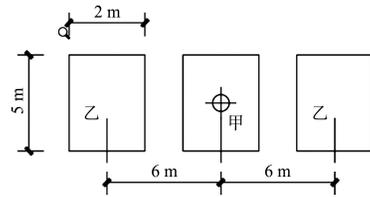


图 4 深度 2 m 处梯形荷载作用下理论值与本程序的竖向应力对比

2.2.4 沉降计算

由于 Boussinesq 的基本假定是半无限体和均质材料, 而实际沉降主要产生在压缩层内, 且土层是分层的, 各层的土力特性不同, Boussinesq 位移解计算沉降时采用的方法: 首先弹性模量用 GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》^[5] 中的压缩模量当量值, 考虑几何位置和竖向应力对压缩模量的影响; 其次压缩层深度下限位置的应力约为最大竖向应力的 10%。最终沉降(s)为基底的 Boussinesq 的竖向位移(s_0)减去压缩层深度下限处的 Boussinesq 的竖向位移(s_z)^[6]。

本算例基础持力层为厚 4 m 的粉质黏土, 下卧较厚的黏土层, 压缩模量当量值 $\overline{E}_s = 2.84$, 计算甲基础的沉降, 并考虑其两侧乙基础的影响, 荷载与基础布置见图 5。



注: 基础基底均布附加压力 100 kPa 。

图 5 荷载与基础布置

采用本程序计算的沉降 s 为 158.9 mm 。 s_0 处的竖向应力为 99.9 kPa , s_z 处的竖向应力为 8.8 kPa , 为最大应力的 8.8%。采用规范推荐的分层总和法计算的沉降为 160 mm 。表明采用本程序计算沉降具有足够的精度。

3 案例计算

3.1 工程概况

广东惠州港荃湾港区煤码头一期工程(1#、2#条形封闭煤场工程), 上部为三心圆网壳, 下部为桩基础框架结构, 桩基持力层为中风化凝灰岩, 主要功能为储存煤炭, 以供附近的发电厂使用。总建筑面积 11.48 万 m^2 , 总煤容量约 102 万 t。工程实景见图 6, 1#煤场位置原为海面, 主要采用吹填疏浚淤泥成陆, 成陆后真空联合堆载约 166.7 kPa , 卸载完成后表层土强夯, 场地软土厚约 20 m, 经处理后软土的压缩模量为 5 MPa , 泊松比为 0.25, 软土表面约有 5 m 的开山石, 压缩模量约为 20 MPa , 软土下为中风化凝灰岩。在煤堆荷载作用下, 土体的水平变形对桩顶水平位移影响较大, 上部钢结构对支座的水平位移较敏感, 需准确评估煤堆荷载下结构的支座位移。端承桩在煤堆荷载下产生水平应力, 桩身产生附加内力, 需要准确计算桩身产生的附加内力。



图 6 工程案例实景

为解决上述问题，采用 Boussinesq 位移应力解，利用自编程序对大面积堆载下土体应力变形计算，间接计算桩身的变形和内力。

3.2 建模计算

弹性模量采用《建筑地基基础设计规范》中的压缩模量当量值 \bar{E}_s ，按规范计算得 $\bar{E}_s = 5.3 \text{ MPa}$ 。

煤堆荷载分布及结构断面见图 7，煤堆沿整个煤场纵向分布，形成断面为 2 个三角形的条形荷载，三角形底边长 41 m，最高 14 m，煤堆脚距离桩 5 m，煤密度为 1.2 t/m^3 。

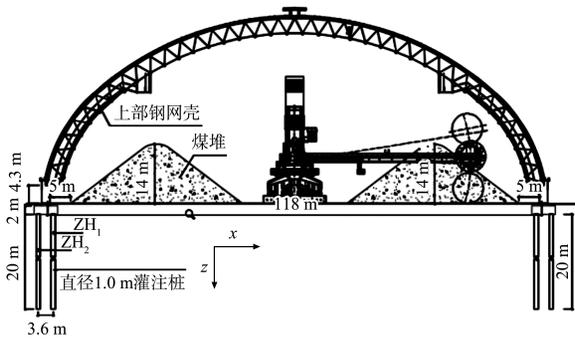


图 7 煤堆荷载分布及结构断面

荷载单元分布及计算点见图 8，煤堆荷载沿煤场纵向通长分布，可取一个典型柱下的桩位作为计算点。荷载单元采用 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ，纵向布置 20 m 长，跨越 2 个柱网，共 1 680 个荷载单元。

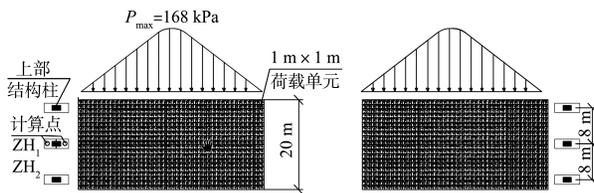
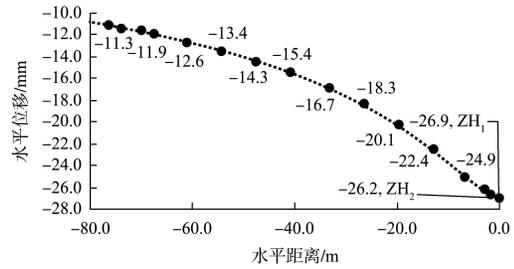


图 8 荷载单元分布及计算点位置

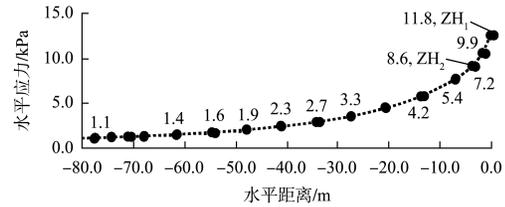
3.3 计算结果

3.3.1 桩身处土的应力和位移

桩顶高程在地面下约 2.5 m，桩顶位移和桩身应力(内力)见图 9~11。

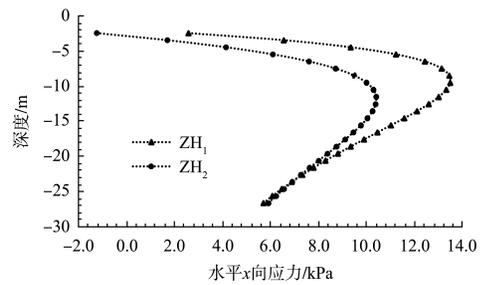


a) 不同距离下土的水平位移

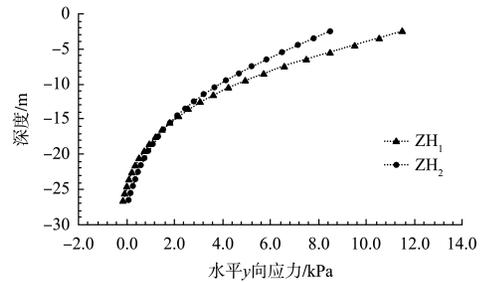


b) 不同距离下土的水平应力

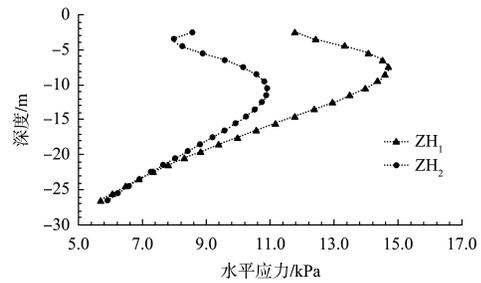
图 9 桩顶高程-2.5 m 处不同距离下水平位移、应力变化



a) 水平x向



b) 水平y向



c) 综合水平向

图 10 桩水平不同方向的应力沿深度变化

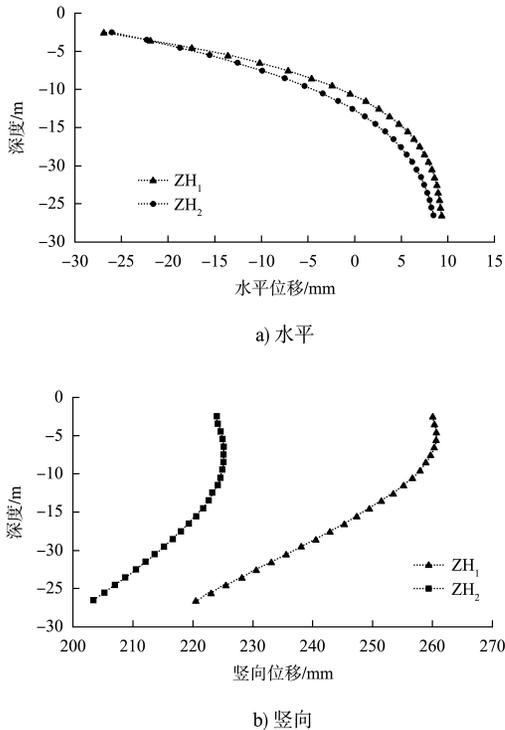


图 11 桩水平、竖向位移沿深度变化

图 9 显示在煤堆荷载下, 桩顶高程处不同水平距离(指室外距离 ZH_1) 下的位移和应力变化, 由图可以知: 水平位移随距离的增大而减小, 近似成线性关系。忽略桩与土的相互作用, 桩顶土的位移近似看成桩的位移。桩顶最大位移 26.9 mm (ZH_1)、26.2 mm (ZH_2), 距离为 80 m 时, 最大位移为 11.0 mm, 约为最大值的 40%; 桩顶水平应力($\sigma_{\text{水平}}$)计算按式(7)计算:

$$\sigma_{\text{水平}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (7)$$

式中: σ_x 、 σ_y 为桩顶 x 和 y 向的正应力。

桩顶水平应力与距离在 30 m 前呈指数关系, 30 m 以后近似呈线性关系, 桩顶最大水平应力分别为 11.8 kPa (ZH_1)、9.0 kPa (ZH_2)。80 m 后仅 1.0 kPa, 约为最大值的 10%。说明水平应力开始衰减快于水平位移, 到一定距离后衰减变缓。堆载的水平位移和应力影响范围均较大。

图 10、11 显示桩顶应力和位移随深度变化情况, 由于桩底支撑在基岩上, 最大深度计算至基岩面。图 10a) 表明, 桩的 x 向(煤场的横向)水平应力开始随深度增大而增大, 在 -11 m 左右达到最大值 12.8 kPa (ZH_1)、10.1 kPa (ZH_2), 之后沿着深度方向减小。图 10b) 显示桩 y 向(煤场的纵

向)的水平应力沿深度方向逐渐减小, 在 22 m 左右减小到 0。图 10c) 显示, 桩水平应力变化趋势与 x 向水平应力类似, 表明 x 向的应力是主要的, 符合条形荷载作用下平面应力的分布规律。

忽略桩与土的相对位移, 图 11a) 显示桩的水平位移在顶部最大, 然后逐渐线性减小, 到深度 -15 m 时, 减少到 0, 随后沿深度在反方向指数增加, 25 m 时达到最大值, 从桩身水平变形曲线可知, 桩身有弯曲内力。桩顶的最大位移为 26.9 mm, 实际上桩与土的相互作用关系较复杂, 桩顶的水平位移小于周边土的计算位移。按《建筑桩基技术规范》, 桩的最大水平位移可为 30~40 mm, 文献[7]对本案例采用 midas/GTS 模拟计算表明, 最大水平位移为 33 mm, 与本文所采用的方法计算结果接近。计算结果表明在煤堆荷载下, 桩的最大侧移满足要求。

图 11b) 显示桩位处土体竖向位移为 220~260 mm (ZH_1)、205~225 mm (ZH_2), 沿竖向变化并不大, 桩周围土体的沉降远大于桩的压缩量, 表明煤堆荷载对桩产生负摩阻力。

3.3.2 桩身内力

桩身某点负摩阻产生的轴力(N)按式(8)计算。

$$N = \sum \sigma_{i,\text{水平}} \zeta_n \pi d l_i \quad (8)$$

式中: ζ_n 为负摩阻力系数, 按 JGJ 94—2008《建筑桩基技术规范》^[8] 取 0.3; d 为桩基直径; $\sigma_{i,\text{水平}}$ 为计算点以上某个高程桩身水平应力, 按式(7)计算; l_i 为对应桩身水平应力对应的长度。

图 12 显示煤堆荷载对桩产生负摩阻力在桩身产生的轴力, 最大值出现在在桩底, ZH_1 最大值为 255 kN, ZH_2 为 205 kN。桩身的弯矩和剪力采用弹性地基梁的计算模型通过桩身应力间接计算获得。基床系数根据桩身周围的土层性质确定。 $K_1 = 50 \text{ MN/m}^3$, $K_2 = 1 \text{ MN/m}$, $K_3 = 200 \text{ MN/m}^3$, 桩身内力计算模型见图 13, 图 14 为桩身弯矩剪力分布, 采用 midas/GEN 计算, ZH_1 桩身最大弯矩为 222 kN·m, 最大剪力 90 kN; ZH_2 桩身最大弯矩为 180 kN·m, 最大剪力 80 kN, 由于煤堆荷载引起的桩身内力较大, 桩身强度验算时需要考虑上述荷载产生的桩身轴力、弯矩, 以保证桩身安全。

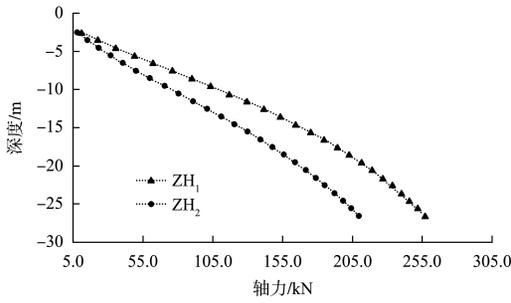


图 12 桩轴力沿竖向变化

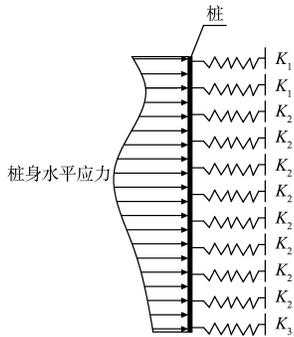


图 13 桩身内力计算模型

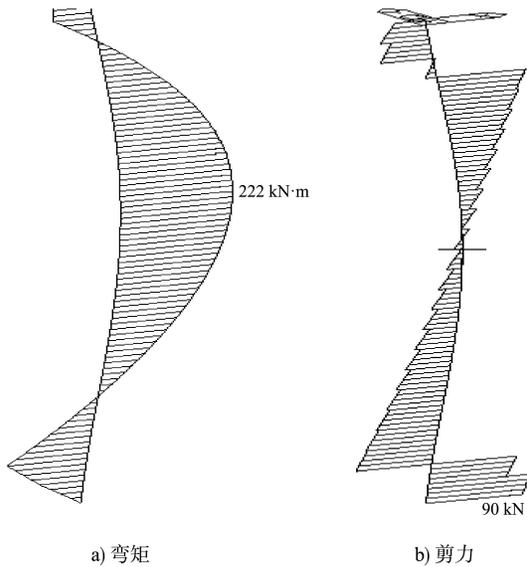


图 14 HZ₁ 桩身弯矩剪力分布

4 结论

1) 自编基于 Boussinesq 位移应力解的程序, 可以方便计算任何荷载下任意位置的应力和位移, 计算准确精度高、前处理方便, 可推广使用。

2) 软弱地基上, 最高煤堆 14 m, 堆脚距离桩 5 m 条件下, 煤堆对桩基产生的水平位移在规范允许范围内, 且产生的桩身内力较大, 不可忽略。

3) 本程序用桩周土的位移代替桩的位移, 未考虑桩土之间复杂的相互关系, 需要进一步研究。

参考文献:

[1] 魏焕卫, 杨敏. 大面积堆载情况下邻桩的有限元分析[J]. 工业建筑, 2000, 30(8): 30-33.

[2] 陈星星. 大面积堆载对临近桩基影响的有限元分析[J]. 中国水运(下半月), 2013, 13(5): 251-252.

[3] 周勇, 康迪, 李韬, 等. 大面积堆载对桩基工作性能影响的数值模拟和监测分析[J]. 兰州理工大学学报, 2016, 42(5): 112-116.

[4] 张克恭, 刘松玉. 土力学[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.

[5] 中国建筑科学研究院. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

[6] 丁继辉, 袁满, 王岩. 基于 Boussinesq 应力解和位移解的复合地基沉降可靠度分析[J]. 工程力学, 2011, 28(S1): 35-39.

[7] 方国华, 张立平, 刘观发, 等. 孤岛强台风环境下封闭煤场的优化设计[J]. 工业建筑, 2021: 51(增刊). 379-384.

[8] 中国建筑科学研究院. 建筑桩基技术规范: JGJ 94—2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

(本文编辑 赵娟)

著作权授权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。本刊支付的稿酬已包含上述公司著作权使用费, 所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。

《水运工程》编辑部