

引用本文:杨 涛,童立元,李 丹.基坑开挖卸荷引起的公路桥梁桩基变形受力响应[J].建筑科学与工程学报,2020,37(5):214-222.

YANG Tao, TONG Li-yuan, LI Dan. Stress Response of Pile Foundation Deformation of Highway Bridge Caused by Unloading of Pit Excavation[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(5): 214-222.

DOI:10.19815/j.jace.2019.10007

基坑开挖卸荷引起的公路桥梁桩基变形受力响应

杨 涛¹, 童立元¹, 李 丹²

(1. 东南大学 交通学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京市公共工程建设中心, 江苏 南京 210019)

摘要:采用两阶段分析法分析基坑开挖卸荷作用下公路桥梁的受力变形规律,首先基于明德林解析解,利用复合辛普森公式进行数值积分求解得出基坑侧壁卸荷与坑底卸荷同时作用下土体内桩体位置处的水平附加应力;其次采用 Kerr 三参数地基模型建立公路桥梁桩基的挠曲微分方程,结合水平附加应力,利用有限差分数值计算方法得到桩基挠曲微分方程的数学解析矩阵表达式。利用所得计算公式对公路桥梁桩基附近有基坑开挖的工况进行计算,并通过与数值模拟计算结果的对比验证所提计算方法的有效性;最后针对桩基轴向荷载大小、基坑与桩基距离及基坑三维尺寸进行了影响因素分析。结果表明:桩基轴向荷载的变化对桩基水平位移及桩身弯矩影响不明显;随着桩基与基坑距离的加大,桩基水平位移及最大弯矩逐渐减小,并且在较大距离范围内桩基水平位移及弯矩变化愈发平缓;开挖深度对桩基水平位移及弯矩的影响远大于开挖长度和开挖宽度,基坑开挖宽度对桩基的影响最小。

关键词:基坑开挖;水平附加应力;有限差分法;两阶段分析法

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)05-0214-09

Stress Response of Pile Foundation Deformation of Highway Bridge Caused by Unloading of Pit Excavation

YANG Tao¹, TONG Li-yuan¹, LI Dan²

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. Nanjing Urban Public Project Construction Center, Nanjing 210019, Jiangsu, China)

Abstract: The two-stage analysis method was used to analyze the stress and deformation law of highway bridge pile foundation under unloading of foundation pit excavation. The first stage of the two-stage method was based on the Mindlin solution. Using the composite Simpson formula to solve the numerical integration, the horizontal additional stress at the pile position in the soil under the simultaneous action of the side wall unloading and the bottom unloading of the foundation pit was obtained. In the second stage, Kerr three parameter foundation model was used to establish the deflection differential equation of highway bridge pile foundation. Combined with the horizontal additional stress, the mathematical analytic matrix expression of the differential equation of pile deflection was obtained by using the finite difference numerical calculation method. The calculation formula was used to calculate the excavation condition of

收稿日期:2019-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(41572273,51878157);江苏省自然科学基金项目(BK20181282)

作者简介:杨 涛(1991-),男,山东临沂人,工学博士研究生,E-mail:yangtao_nxh@seu.cn.

foundation pit near the pile foundation of highway bridge, and the validity of the calculation method was verified by comparing with the numerical simulation results. The influence factors of axial load of pile foundation, distance between foundation pit and pile foundation and three-dimensional dimension of foundation pit were analyzed. The results show that the change of axial load of pile foundation has no obvious effect on the horizontal displacement and bending moment of pile body. With the increase of the distance between the pile foundation and the foundation pit, the horizontal displacement and the maximum bending moment of the pile foundation decrease gradually, and the change of the horizontal displacement and bending moment of the pile foundation becomes more and more gentle in a large range. The influence of excavation depth on horizontal displacement and bending moment of pile foundation is far greater than that of excavation length and width, and the influence of excavation width of foundation pit on pile foundation is the least.

Key words: excavation of foundation pit; horizontal additional stress; finite difference method; two-stage analysis method

0 引言

在城市交通网络快速发展的过程中,既有桥梁桩基、地铁站及市政隧道等地下构筑物之间相互影响越来越明显。进行基坑等地下工程开挖时,必然会导致周边土体应力场及位移场发生变化,由此会引起邻近公路桥梁桩基产生较大水平位移,从而对桩基本身及上部结构的安全产生严重威胁^[1-3]。因此,开展基坑开挖卸荷引起的桩基受力变形响应研究具有很重要的工程实际意义。

国内外岩土工程领域的专家学者就基坑开挖对邻近桩基的影响开展了相应研究^[4-12]。Poulos 等^[13]运用有限元与边界元相结合的方法,分析了基坑开挖引起邻近桩基受力变形的不同影响因素。张骁等^[14]基于基坑地表沉降和围护结构水平变形实测数据的位移反分析,对 HS-Small 模型参数进行优化和校准,在该基础上对桥桩变形的影响区进行研究。张治国等^[15]采用两阶段法研究了黏弹性地基中基坑开挖与邻近桩基相互作用的时域问题,针对 Boltzmann 黏弹性模型参数、桩径、桩与基坑间距等进行了影响因素分析。黄茂松等^[16]考虑土体的非线性,采用 Winkler 地基模型模拟被动单桩桩土之间的相互作用,并基于简化 Mindlin 方程考虑群桩的桩-桩相互影响,从而得到开挖条件下被动群桩水平反应的简化分析方法。

在前人研究的基础上,本文采用两阶段分析法分析基坑开挖卸荷作用下公路桥梁桩基的受力变形规律。首先,基于明德林解析解^[17],求出基坑开挖卸荷作用下桩基水平附加应力。其次,采用 Kerr 三

参数地基模型^[18]建立桩基的挠曲微分方程,利用有限差分数值计算方法得到桩基挠曲微分方程的数学解析矩阵表达式。最后,通过与数值模拟计算结果的对比验证了所提计算方法的有效性,并针对不同影响因素进行了分析。

1 水平附加应力求解

1.1 水平附加应力求解公式

本文建立的计算模型如图 1 所示。在桩基附近有一开挖深度为 d 、长度为 L 、宽度为 B 的矩形基坑,桩基距离基坑的距离为 S , h 为基坑围护墙埋深, N 为桩体受到的轴向荷载, H 为桩体长度, D 为桩体直径。建立如下空间坐标系:以地表处基坑中心为原点 O ;桩基位于 x 轴,且位于 x 轴正方向;基坑开挖方向为 z 轴正向。

基坑开挖引起的侧壁等效附加应力计算参考魏纲等^[19]提出的方法,取值建议参考具体数值模拟结果。

计算假定:①土体为均质、弹性半空间体;②不考虑基坑开挖的时序,不考虑降水;③基坑侧壁在开挖后会产生应力释放,等效为在侧壁施加向坑内方向的三角形分布荷载;④开挖至坑底时,考虑残余应力影响及围护墙遮拦效应,坑底土体释放应力转化为围护底部平面向上的等效荷载;⑤基坑开挖对桩基影响只考虑坑底及近桩基侧的侧壁处应力释放。

结合明德林解析解,具体计算过程如下:

(1) 基坑侧壁应力释放引起的附加应力 σ_x 为

$$\sigma_x = \frac{\int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \int_0^d \beta K_0 \gamma z S dy dz}{8\pi(1-\mu)} \left\{ -\frac{1-2\mu}{R_1^3} + \right.$$

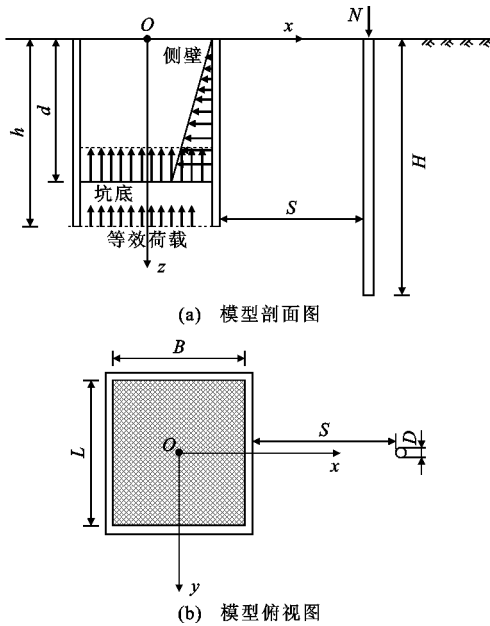


图 1 模型尺寸及位置

Fig. 1 Model Size and Location

$$\frac{(1-2\mu)(5-4\mu)}{R_2^3} - \frac{3S^2}{R_1^5} - \frac{3(3-4\mu)S^2}{R_2^5} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+d_p+z)^2} \left[3 - \frac{S^2(3R_2+d_p+z)}{R_2^2(R_2+d_p+z)} \right] + \frac{6z}{R_2^5} [3z - (3-2\mu)(d_p+z) + \frac{5S^2d_p}{R_2^2}] \quad (1)$$

式中: $R_1 = \sqrt{S^2 + y^2 + (d_p - z)^2}$; $R_2 = \sqrt{S^2 + y^2 + (d_p + z)^2}$; μ 为泊松比; d_p 为计算目标点的 z 轴坐标; β 为最终释放的侧壁应力与初始侧壁应力的比值, $\beta < 1$; K_0 为静止土压力系数; γ 为土体重度。

(2) 坑底应力释放引起的附加应力 σ_{zx} 为

$$\sigma_{zx} = \int_{-\frac{B}{2}}^{\frac{B}{2}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \frac{\sigma_d dx dy}{8\pi(1-\mu)} \left\{ \frac{(1-2\mu)(z-h)}{R_1^3} - \frac{3(S+B/2-x)^2(z-h)}{R_1^5} + \frac{(1-2\mu)[3(z-h)-4\mu(z+h)]}{R_2^3} - \frac{[3(3-4\mu)(S+\frac{B}{2}-x)^2(z-h)-6h(z+h)((1-2\mu)z-2\mu h)]}{R_2^5} - \frac{30h(S+B/2-x)^2z(z+h)}{R_2^7} - \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{R_2(R_2+z+h)} \left[1 - \frac{(S+B/2-x)^2}{R_2(R_2+z+h)} - \frac{(S+B/2-x)^2}{R_2^2} \right] \right\} \quad (2)$$

式中: $R_1 = \sqrt{(z-h)^2 + (\frac{B}{2}-x+S)^2 + y^2}$; $R_2 =$

$\sqrt{(z+h)^2 + (\frac{B}{2}-x+S)^2 + y^2}$; σ_d 为等效应力, 取值参考文献[18]。

1.2 水平附加应力求解方法

通过在荷载作用范围内积分即可求得在荷载作用下土体中任意点的水平附加应力大小。求解积分 $f(x, y) dx dy$ 时, 例如侧壁矩形面积荷载为 $S' = \{-a \leq x \leq a; -b \leq z \leq b\}$ (图 2), 将所求积分区域在 x, z 方向分别等分为 n 份和 m 份, 在每个子区间 $[x_k, x_{k+1}]$ ($k=0, 1, \dots, n-1$), 或子区间 $[z_l, z_{l+1}]$ ($l=0, 1, \dots, m-1$) 采用复合辛普森公式, 若记 $h_1 = \frac{2a}{n}, x_{k+\frac{1}{2}} = x_k + \frac{h_1}{2}, h_2 = \frac{2b}{m}, z_{l+\frac{1}{2}} = z_l + \frac{h_2}{2}$, 则双重积分下的复合辛普森公式在上述划分方式下可表达为

$$I = \int_{-b}^b \int_{-a}^a f(x, z) dx dz = \int_{-b}^b \left\{ \frac{h_1}{6} \sum_{k=0}^{n-1} [f(x_k) + 4f(x_{k+\frac{1}{2}}) + f(x_{k+1})] \right\} dz = \int_{-b}^b \left\{ \frac{h_1}{6} [f(x_0) + 4 \sum_{k=0}^{n-1} f(x_{k+\frac{1}{2}}) + 2 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} f(x_k) + f(x_n)] \right\} dz = \frac{h_1 h_2}{36} [f(x_0, z_0) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} f(x_k, z_0) + 4 \sum_{k=0}^{n-1} f(x_{k+\frac{1}{2}}, z_0) + f(x_n, z_0) + 4 \sum_{l=0}^{m-1} f(x_0, z_{l+\frac{1}{2}}) + 16 \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{m-1} f(x_{k+\frac{1}{2}}, z_{l+\frac{1}{2}}) + 8 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{l=0}^{m-1} f(x_k, z_{l+\frac{1}{2}}) + 4 \sum_{l=0}^{m-1} f(x_n, z_{l+\frac{1}{2}}) + 2 \sum_{l=1}^{m-1} f(x_0, z_l) + 8 \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=1}^{m-1} f(x_{k+\frac{1}{2}}, z_l) + 4 \sum_{k=0}^{n-1} \sum_{l=0}^{m-1} f(x_{k+\frac{1}{2}}, z_{l+\frac{1}{2}}) + 2 \sum_{l=1}^{m-1} f(x_n, z_l) + f(x_0, z_m) + 4 \sum_{k=0}^{n-1} f(x_{k+\frac{1}{2}}, z_m) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} f(x_k, z_m) + f(x_n, z_m)] \quad (3)$$

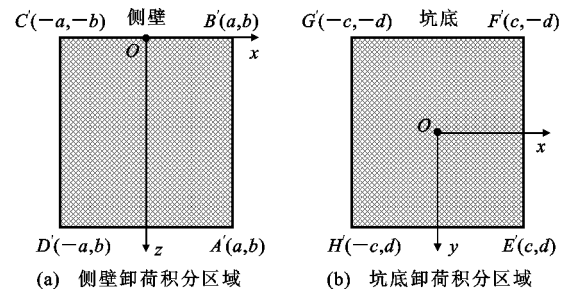


图 2 荷载积分区域

Fig. 2 Load Integration Area

将侧壁应力释放引起的附加应力公式(1)代入到上述双重积分公式(3), 即可得到矩形均布荷载下土体自由场中相应位置的水平应力。坑底应力释放

引起的附加应力求解过程相同。

2 Kerr 三参数地基梁模型

2.1 计算模型

基坑开挖卸载后,荷载经过土体的传递,变为作用于桩基的附加应力。Kerr 三参数地基梁模型在双参数地基模型的基础上增加了地基参数。该地基模型包含 2 个弹簧层(刚度分别为 c, k')和一个剪切层(剪切刚度为 G),模型如图 3 所示,其中, q 为梁上所受附加荷载。

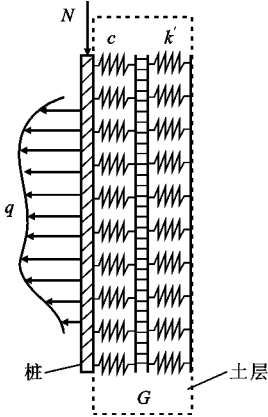


图 3 Kerr 三参数地基模型

Fig. 3 Kerr Three-parameter Foundation Model

2.2 具体计算过程

在附加荷载作用下桩基的挠度 w 可以假设为

$$w(x) = w_1(x) + w_2(x) \quad (4)$$

式中: w_1 为外层弹簧的变形量; w_2 为剪切层的变形量。

外层弹簧及剪切层下方的应力 q_1 与 q_2 分别为

$$q_1(x) = cw_1 = c(w - w_2) \quad (5)$$

$$q_2(x) = k'w_2 \quad (6)$$

对于剪切层,其微单元受力见图 4,其中 Q 为剪切层微单元所受剪力。

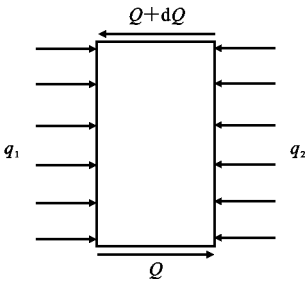


图 4 剪切层微单元受力

Fig. 4 Force on Shear Layer Micro-element

由剪切层微单元静力平衡可得

$$\frac{dQ}{dx} = Bq_1 - Bq_2 \quad (7)$$

对于剪切层,由于剪切作用会产生挠度,即 w_2 , 其斜率等于中性面处的剪应变,即

$$\frac{dw_2}{dx} = -\frac{Q}{G} \quad (8)$$

由于剪切引起的曲率 ρ_{w_2} 为

$$\frac{1}{\rho_{w_2}} = \frac{d^2w_2}{dx^2} = -\frac{1}{G} \frac{dQ}{dx} \quad (9)$$

可得

$$-G \frac{d^2w_2}{dx^2} = \frac{dQ}{dx} = Bq_1 - Bq_2 \quad (10)$$

$$q_1(x) = \frac{G}{B} \frac{d^2w_2}{dx^2} + k'w_2 \quad (11)$$

结合式(5),(11),可得

$$w = (1 + \frac{k'}{c})w_2 - \frac{G}{Bc} \frac{d^2w_2}{dx^2} \quad (12)$$

桩体微单元受力如图 5 所示,其中 q_0 为桩体所受附加应力, M 为桩体所受弯矩。

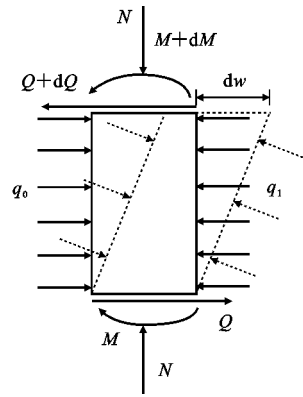


图 5 桩体微单元受力示意图

Fig. 5 Force on Pile Micro-element

根据桩体的受力平衡,则有

(1)力的平衡(水平方向)

$$Bq_0 dx + Q = Bq_1 dx + dQ \Rightarrow \frac{dQ}{dx} = Bq_0 - Bq_1 \quad (13)$$

(2)弯矩平衡

$$M + dM + B \frac{q_0}{2} dx^2 + N \frac{d}{2} = Q dx + B \frac{q_1}{2} dx^2 + M + N(\frac{d}{2} + dw) \Rightarrow \frac{d^2M}{dx^2} = \frac{dQ}{dx} + N \frac{d^2w}{dx^2} \quad (14)$$

结合式(13),(14),可得

$$\frac{d^2M}{dx^2} = Bq_1 - Bq_0 + N \frac{d^2w}{dx^2} \quad (15)$$

根据材料力学特性,可得弯矩-挠度的关系为

$$\frac{M}{K} = \frac{d^2w}{dx^2} \Rightarrow M = -K \frac{d^2w}{dx^2} \quad (16)$$

结合式(15),(16),可得桩体挠曲微分方程为

$$K \frac{d^4w}{dx^4} + N \frac{d^2w}{dx^2} = Bq_0 - Bq_1 \quad (17)$$

式中: K 为桩基抗弯刚度。

结合式(11),(12),(17)可得

$$\frac{d^2 w_2}{dx^6} - \left[\frac{B(c+k')}{G} - \frac{N}{K} \right] \frac{d^4 w_2}{dx^4} + \left[\frac{Bc}{K} - \frac{BN(c+k')}{KG} \right] \frac{d^2 w_2}{dx^2} - \frac{B^2 k' c}{KG} w_2 = -\frac{B^2 c}{KG} q_0 \quad (18)$$

2.3 地基参数选取

G 采用 Tanahashi^[20] 提出的经验公式计算,即

$$G = \frac{E_s t}{6(1+\nu_s)} \quad (19)$$

式中: E_s 为地基土的弹性模量; t 为地基土的剪切层厚度; ν_s 为地基土的泊松比。

本文参照已有研究^[21], 近似将 $11D$ (D 为桩的直径) 等效为地基土的剪切层厚度。

对于地基下层弹簧刚度 k' 的选取, 本文参照 Vesic^[22] 提出的地基模量计算方法, 如式(20)所示

$$k' = 0.65 \left(\frac{E_s B^4}{K} \right)^{0.083} \frac{E_s}{(1-\nu_s)^2} \quad (20)$$

参照简化弹性空间法^[23], Kerr 三参数地基上层弹簧刚度 c 为下层弹簧刚度 k' 的 3 倍。

2.4 有限差分法求解桩体挠曲微分方程

本文采用有限差分法对上文所得的桩体挠曲微分方程进行近似求解。求解过程如下: 将桩体 n' 等分, 桩顶至桩底节点编号分别为 $0, 1, \dots, n'-1, n'$ 。桩顶及桩底各增加 3 个虚拟节点, 编号为 $-3, -2, -1, n'+1, n'+2, n'+3$, 见图 6。

式(18)可表达为

$$x^{(6)} + A_1 x^{(4)} + A_2 x^{(2)} + A_3 x = A_4 \quad (21)$$

$$A_1 = \frac{N}{E_p I_p} - \frac{B(c+k')}{G}, A_2 = \frac{Bc}{E_p I_p}, A_3 = \frac{BN(c+k')}{E_p I_p G},$$

$$K' = \begin{bmatrix} A_3-19 & 19 & -1 & 1 & 0 & & & & & \\ 5-2A_1+A_2 & 5A_1-2A_2+A_3-14 & 14-4A_1+A_2 & A_1-6 & 1 & 0 & & & & \\ A_1-4 & 14-4A_1+A_2 & 6A_1-2A_2+A_3-20 & 15-4A_1+A_2 & A_1-6 & 1 & 0 & & & \\ 1 & A_1-6 & 15-4A_1+A_2 & -20+6A_1-2A_2+A_3 & 15-4A_1+A_2 & A-6 & 1 & 0 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & 0 & 1 & A_1-6 & 15-4A_1+A_2 & -20+6A_1-2A_2+A_3 & 15-4A_1+A_2 & A_1-6 & 0 & \\ & & 0 & 1 & A_1-6 & 15-4A_1+A_2 & 6A_1-2A_2+A_3-20 & 15-4A_1+A_2 & 0 & \\ & & & 0 & 1 & A_1-6 & 15-4A_1+A_2 & 6A_1-2A_2+A_3-20 & 0 & \\ & & & & 1 & A_1-6 & 15-4A_1+A_2 & 6A_1-2A_2+A_3-20 & 0 & \\ & & & & & 1 & A_1-6 & 15-4A_1+A_2 & 0 & \end{bmatrix} \quad (24)$$

通过式(24)求解, 可得剪切层变形量 w_2 。结合式(12)可取得桩体挠曲变形量, 进而可根据材料力学公式, 求出桩体弯矩等。

3 计算实例分析

利用上述计算方案, 求解基坑开挖作用下轴向

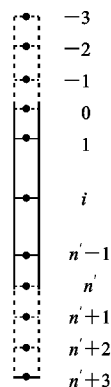


图 6 桩体计算模型

Fig. 6 Computation Model of Pile

$$A_3 = -\frac{B^2 c k'}{G E_p I_p}, D = -\frac{B^2 c}{E_p I_p G} q \quad (22)$$

结合桩体的等分形式, 式(21)中高阶导的有限差分近似表达如式(23)所示, 即

$$\left. \begin{aligned} f(x_i)^{(6)} &= f(x_{i+3}) - 6f(x_{i+2}) + 15f(x_{i+1}) - 20f(x_i) + 15f(x_{i-1}) - 6f(x_{i-2}) + f(x_{i-3}) \\ f(x_i)^{(4)} &= f(x_{i+2}) - 4f(x_{i+1}) + 6f(x_i) - 4f(x_{i-1}) + f(x_{i-2}) \\ f(x_i)^{(2)} &= f(x_{i+1}) - 2f(x_i) + 2f(x_{i-1}) \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

结合式(21),(23), 可列出 $n'+1$ 个方程, 方程中包括虚拟节点共有 $n'+7$ 个未知数。本文假设桩顶水平方向自由无外力, 桩底固定, 可得边界条件的有限差分近似表达式, 结合上述 $n+1$ 个方程, 消去多余未知量。最终可得桩体位移方程为

$$K'x = F$$

$$F = [D_0 \quad D_1 \quad D_2 \quad \cdots \quad D_i \quad \cdots \quad D_{n'-2} \quad D_{n'-1} \quad D_n']^T$$

$$x = [x_0 \quad x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_i \quad \cdots \quad x_{n'-2} \quad x_{n'-1} \quad x_n']^T$$

受荷桩基的受力变形规律, 并与数值模拟软件计算结果进行对比, 验证本文方法的正确性。

3.1 与数值模拟结果对比

如图 7 所示, 基坑长宽分别为 30 m 和 20 m, 开挖深度 $d=15$ m。桩基直径为 1 m, 桩深为 20 m, 距离基坑边界为 5 m, 桩顶作用 1.5 MPa 的向下轴向

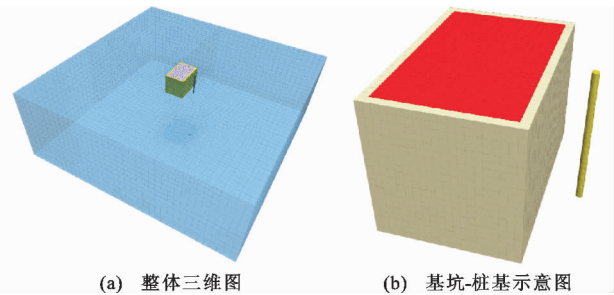


图 7 算例模型
Fig. 7 Model of Example

荷载。为尽量减小边界效应,整体模型尺寸为 230 m×230 m× 80 m。土体本构为摩尔库仑模型,基坑围护结构及桩基采用弹性模型。各结构参数如表 1 所示。

| Tab. 1 Numerical Calculation Parameters | | | | | |
|---|--------------|------|------------------------------|-------------|--------------|
| 参数 | 弹性模量/ MPa | 泊松比 | 重度/ (kN·m ⁻³) | 黏聚力/ kPa | 内摩擦 角/(°) |
| 土层 | 24.930 | 0.33 | 19.2 | 5 | 18.4 |
| 围护 | 25 400 | 0.22 | 26.0 | | |
| 桩基 | 30 000 | 0.22 | 26.0 | | |

由图 8,9 可以看出,本文计算结果与数值模拟结果较为接近,主要是在桩顶附近处的水平位移及弯矩有所差别。这些差别的原因主要是由于边界效应的影响,即数值模拟中模型尺寸会对分析单元的计算产生影响,而本文计算方法的假设是在半无限体模型中。综上所述,计算结果较为合理,计算方法可行。

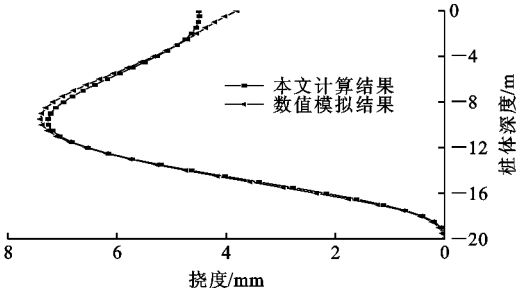


图 8 桩体挠度
Fig. 8 Deflection of Pile

3.2 不同影响因素分析

不同影响因素分析主要是桩顶荷载、桩基与基坑水平距离及基坑开挖三维尺寸对桩基水平位移的影响。

3.2.1 桩顶荷载

桩顶荷载分别选取 0, 1.5, 3, 4.5, 6 MPa, 不同桩顶荷载下计算所得的桩基挠曲变形曲线及弯矩结

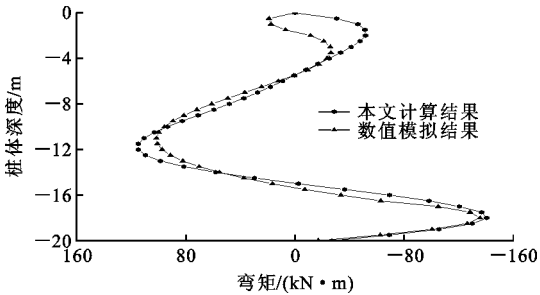


图 9 桩体弯矩
Fig. 9 Moment of Pile

果比对分别见图 10, 11。

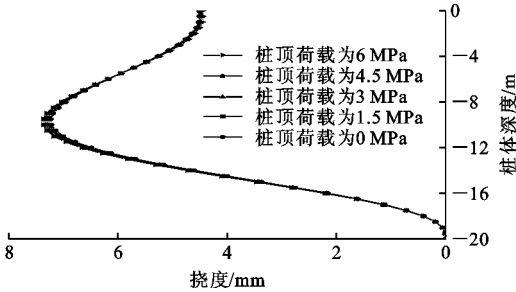


图 10 不同桩顶荷载下的桩体挠度
Fig. 10 Deflection of Pile Under Different Pile Top Loads

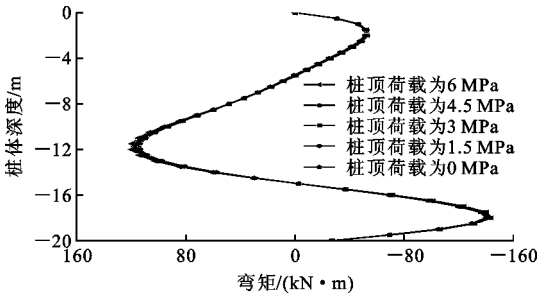


图 11 不同桩顶荷载下的桩体弯矩
Fig. 11 Moment of Pile Under Different Pile Top Loads

由图 10, 11 可以看出, 桩顶轴向荷载的施加, 对桩基水平位移有一定的影响, 但影响不大。桩顶轴向荷载从 0~6 MPa 时, 桩基最大挠度变化值为 0.17 mm, 桩基最大弯矩变化值为 6.6 kN·m。

3.2.2 桩基与基坑水平距离

桩基与基坑水平距离分别选取 1, 5, 10, 15, 20 m, 不同桩基与基坑水平距离条件下计算所得的桩基挠曲变形曲线及弯矩结果比对分别见图 12, 13。

由图 12, 13 可以看出, 不同的桩基与基坑距离引起的桩基水平位移及弯矩差别较大。桩基与基坑水平距离从 20 m 到 1 m, 桩基最大挠度变化值为 7.15 mm, 桩基最大弯矩变化值为 199.81 kN·m。同时可以看出, 随着桩基与基坑距离的加大, 基坑开挖引起的桩基水平位移及弯矩变化越发平缓。

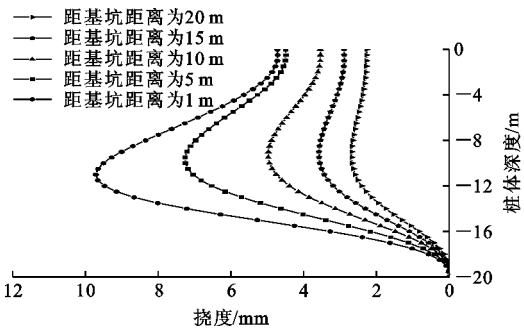


图 12 距基坑不同距离的桩体挠度

Fig. 12 Deflection of Single Pile Under Different Distances to Excavation

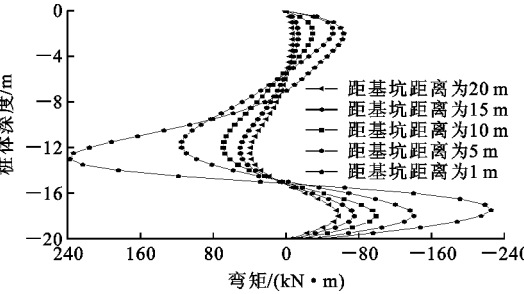


图 13 距基坑不同距离的桩体弯矩

Fig. 13 Moment of Single Pile Under Different Distances to Excavation

3.2.3 基坑三维尺寸

桩基轴向荷载选取 1.5 MPa, 桩基与基坑水平距离选取 5 m。基坑长度分别选取 25, 30, 35 m; 基坑宽度选取 15, 20, 25 m; 基坑开挖深度分别选取 10, 15, 20 m。本文不涉及不同工况的组合, 基本工况基坑三维尺寸为 30 m×20 m×15 m, 其他工况只改变 1 项尺寸, 共 7 种工况。不同工况条件下计算所得的桩基挠曲变形曲线及弯矩结果比对分别见图 14, 15。

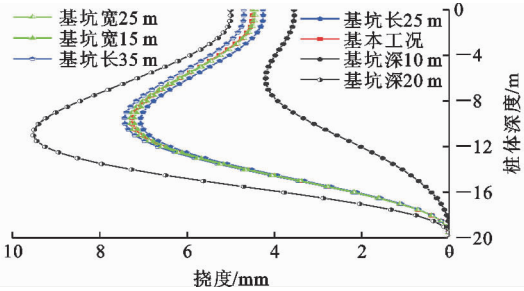


图 14 不同基坑尺寸的桩体挠度

Fig. 14 Deflection of Single Pile Under Different Dimensions of Foundation Pit

由图 14, 15 可以看出: 不同的基坑三维尺寸引起的桩基水平位移及弯矩差别较大。基坑开挖长度从 25 m 到 35 m, 桩基最大挠度变化值为 0.38 mm,

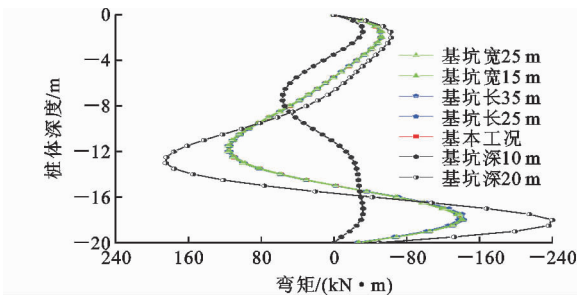


图 15 不同基坑尺寸的桩体弯矩

Fig. 15 Moment of Single Pile Under Different Dimensions of Foundation Pit

桩基最大弯矩变化值为 6.45 kN·m; 基坑开挖宽度从 15 m 到 25 m, 桩基最大挠度变化值为 0.10 mm, 桩基最大弯矩变化值为 3.02 kN·m; 基坑开挖深度从 10 m 到 20 m, 桩基最大挠度变化值为 5.32 mm, 桩基最大弯矩变化值为 207.85 kN·m。可以看出, 基坑三维尺寸中, 对桩基水平位移及弯矩影响最大的是开挖深度, 其次是开挖长度, 影响最小的是开挖宽度。

4 结 语

(1) 随着桩顶轴向荷载的加大, 桩基水平位移及桩体最大弯矩有所增加, 但幅度很小, 相较其他影响因素, 桩顶轴向荷载的影响最小。

(2) 随着桩基与基坑距离的减小, 桩基水平位移及最大弯矩逐渐加大。同时, 随着桩基与基坑距离的加大, 基坑开挖引起的桩基水平位移及弯矩变化愈发平缓。

(3) 基坑三维尺寸中, 开挖深度对桩基水平位移及弯矩的影响最大, 基坑开挖长度的影响次之, 基坑开挖宽度影响最小。

参考文献:

References:

[1] MROUEH H, SHAHROUR I. Three-dimensional Finite Element Analysis of the Interaction Between Tunneling and Pile Foundations [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2002, 26(3): 217-230.

[2] 张陈蓉, 黄茂松. 基坑开挖引起的邻近建筑物桩基变形受力响应[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(增): 565-570.

ZHANG Chen-rong, HUANG Mao-song. Behavior of Pile Foundation Due to Excavation-induced Lateral Soil Movement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(S): 565-570.

- [3] 刘松玉,李洪江,童立元,等.地下工程开挖卸荷既有桩基承载响应物理模拟及新进展[J].岩土工程学报,2019,41(7):1329-1338.
- LIU Song-yu, LI Hong-jiang, TONG Li-yuan, et al. Model Tests and New Progress of Pile Response Due to Underground Excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1329-1338.
- [4] 张治国,赵其华,徐晨,等.基于影像源法的基坑开挖对邻近单桩影响简化分析[J].岩土力学,2016,37(7):2011-2020.
- ZHANG Zhi-guo, ZHAO Qi-hua, XU Chen, et al. Simplified Analysis of Adjacent Single-pile Response Subjected to Foundation Pit Excavation Based on Virtual Image Technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(7): 2011-2020.
- [5] 张爱军,莫海鸿,李爱国,等.基坑开挖对邻近桩基影响的两阶段分析方法[J].岩石力学与工程学报,2013,32(增1):2746-2750.
- ZHANG Ai-jun, MO Hai-hong, LI Ai-guo, et al. Two-stage Analysis Method for Behavior of Adjacent Piles Due to Foundation Pit Excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2746-2750.
- [6] 王恒,陈福全,林海.基坑开挖对邻近桥梁桩基的影响与加固分析[J].地下空间与工程学报,2015,11(5):1257-1265.
- WANG Heng, CHEN Fu-quan, LIN Hai. Behaviors and Strengthening of Bridge Piles Subjected to Excavation-induced Soil Movement[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(5): 1257-1265.
- [7] 丁勇春,王建华.深基坑施工对高架基础的变形影响及控制研究[J].土木工程学报,2012,45(7):155-161.
- DING Yong-chun, WANG Jian-hua. Influence of Deep Excavation on Deformation of Elevated Bridge Foundations and Countermeasures[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 155-161.
- [8] 木林隆,黄茂松.基坑开挖引起的周边土体三维位移场的简化分析[J].岩土工程学报,2013,35(5):820-827.
- MU Lin-long, HUANG Mao-song. Simplified Method for Analysis of Soil Movement Induced by Excavations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 820-827.
- [9] 王翠,闫澍旺,张启斌.深基坑开挖对邻近桥桩的影响机制及控制措施研究[J].岩石力学与工程学报,2010,39(增1):2994-3000.
- WANG Cui, YAN Shu-wang, ZHANG Qi-bin. Study of Influence of Deep Pit Excavation on Adjacent Bridge Foundation Piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 39(S1): 2994-3000.
- [10] 郑刚,颜志雄,雷华阳,等.基坑开挖对邻近桩基影响的实测及有限元数值模拟分析[J].岩土工程学报,2007,29(5):638-643.
- ZHENG Gang, YAN Zhi-xiong, LEI Hua-yang, et al. Field Observation and Finite Element Numerical Simulation Analysis of Effect on Adjacent Piles Due to Excavation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(5): 638-643.
- [11] 郑俊杰,章荣军,潘玉涛,等.考虑开挖卸荷及变形耦合效应的被动桩分析方法[J].岩土工程学报,2012,34(4):606-614.
- ZHENG Jun-jie, ZHANG Rong-jun, PAN Yu-tao, et al. Analytic Method for Passive Piles Considering Excavation-induced Unloading Effects and Deformation Coupling Effect[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 606-614.
- [12] REZA B A, VOJTECH G. 3D Numerical Parametric Study of the Influence of Open-pit Mining Sequence on Existing Tunnels[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2017, 27(3): 459-466.
- [13] POULOS H G, CHEN L T. Pile Response Due to Excavation-induced Lateral Soil Movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(2): 94-99.
- [14] 张骁,肖军华,农兴中,等.基于HS-Small模型的基坑近接桥桩开挖变形影响区研究[J].岩土力学,2018,39(增2):263-273.
- ZHANG Xiao, XIAO Jun-hua, NONG Xing-zhong, et al. Analysis of Influenced Zone of Foundation Pit Excavation Adjacent to Bridge Pile Foundation Using HS-Small Constitutive Model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(S2): 263-273.
- [15] 张治国,鲁明浩,宫剑飞.黏弹性地基中基坑开挖对邻近桩基变形影响的时域解[J].岩土力学,2017,38(10):3017-3028,3038.
- ZHANG Zhi-guo, LU Ming-hao, GONG Jian-fei. Time-domain Solution for Influence of Excavation on Adjacent Pile Deformation in Visco-elastic Foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(10): 3017-3028, 3038.
- [16] 黄茂松,张陈蓉,李早.开挖条件下非均质地基中被动群桩水平反应分析[J].岩土工程学报,2008,30(7):1017-1023.

HUANG Mao-song,ZHANG Chen-rong,LI Zao. Lateral Response of Passive Pile Groups Due to Excavation-induced Soil Movement in Stratified Soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2008,30(7):1017-1023.

[17] BURMISTER D M. The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Soil Systems. Ⅲ [J]. Journal of Applied Physics,1945,16(3):126-127.

[18] KERR A D. On the Determination of Foundation Model Parameters[J]. Journal of Geotechnical Engineering,1985,111(11):1334-1340.

[19] 魏 纲,赵城丽. 基坑开挖引起临近地铁隧道的附加荷载计算方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增 1):3408-3417.

WEI Gang, ZHAO Cheng-li. Calculation Method of Additional Load of Adjacent Metro Tunnels Due to Foundation Pit Excavation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2016,35(S1):3408-3417.

[20] TANAHASHI H. Formulas for an Infinitely Long Bernoulli-Euler Beam on the Pasternak Model [J]. Soils and Foundations,2004,44(5):109-118.

[21] SHI J,NG C W W,CHEN Y. Three-dimensional Numerical Parametric Study of the Influence of Basement Excavation on Existing Tunnel [J]. Computers and Geotechnics,2015,63:146-158.

[22] VESIC A S. Bending of Beams Resting on Isotropic Elastic Solids[J]. Journal of the Engineering Mechanics Division,1961,87(2):35-53.

[23] MORFIDIS K. Research and Development of Methods for the Modeling of Foundation Structural Elements and Soil [D]. Thessaloniki: Aristotle University of Thessaloniki,2003.